

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

**FABRÍCIO LOPES DE MACEDO**

**MODELAGEM DA BIOMASSA ACIMA DO SOLO (BAS), POR MEIO  
DE IMAGENS DE ALTA RESOLUÇÃO ESPACIAL E ÍNDICES DE  
VEGETAÇÃO.**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

**FABRÍCIO LOPES DE MACEDO**

**MODELAGEM DA BIOMASSA ACIMA DO SOLO (BAS), POR MEIO  
DE IMAGENS DE ALTA RESOLUÇÃO ESPACIAL E ÍNDICES DE  
VEGETAÇÃO.**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia -  
UNESP – Campus de Ilha Solteira, para  
obtenção do título de Doutor em Agronomia.  
Especialidade: Sistemas de Produção

**Orientador:** Prof. Dr. Ricardo Antônio Ferreira  
Rodrigues

**Co-orientadores:** Hélio Ricardo Silva  
Adélia Maria Oliveira de Sousa

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

Macedo, Fabrício Lopes de.

M141m Modelagem da biomassa acima do solo (BAS), por meio de imagens de alta resolução espacial e índices de vegetação / Fabrício Lopes de Macedo. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2014  
105 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Especialidade: Sistemas de Produção, 2014

Orientador: Ricardo Antônio Ferreira Rodrigues

Co-orientador: Hélio Ricardo Silva

Inclui bibliografia

1. Azinheira. 2. Eucalipto. 3. Modelos empíricos. 4. Sistemas de informações geográficas. 5. Aquecimento global.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

### CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

**TÍTULO:** Modelagem da Biomassa Acima do Solo (BAS) por meio de imagens de alta resolução espacial e índices de vegetação

**AUTOR:** FABRICIO LOPES DE MACEDO

**ORIENTADOR:** Prof. Dr. RICARDO ANTONIO FERREIRA RODRIGUES

**CO-ORIENTADOR:** Prof. Dr. HELIO RICARDO SILVA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de DOUTOR EM AGRONOMIA, Área: SISTEMAS DE PRODUÇÃO, pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. HELIO RICARDO SILVA

Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Profa. Dra. MARLENE CRISTINA ALVES

Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. ARTUR PANTOJA MARQUES

Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Profa. Dra. ADÉLIA MARIA DE OLIVEIRA SOUSA

Departamento de Engenharia Rural / Universidade de Évora



Prof. Dr. EDSON EYJI SÃO

Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados / Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

Data da realização: 31 de outubro de 2014.

## **DEDICO**

Antes de tudo a Deus, por sempre ter me dado forças nos momentos bons e ruins e principalmente pela oportunidade da vida.

À minha noiva e eterna companheira Wellma, por todo carinho, amor, companheirismo, INCENTIVO e compreensão nos momentos difíceis. Saiba que você faz parte da minha vida pequena.

Aos meus pais, por todo o incentivo e compreensão, sobre essa árdua fase que se chama Doutorado, muito obrigado.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por tudo.

Aos meus orientadores, prof. Ricardo e prof. Hélio. Obrigado.

À prof<sup>a</sup> Adélia por todo o apoio e transmissão de conhecimentos na fase inesquecível que passei em Portugal. Muito obrigado por tudo professora.

À prof<sup>a</sup> Cristina que também foi fundamental para a elaboração e discussão desse trabalho, obrigado também professora.

Ao Programa Ciências Sem Fronteiras - Cnpq, que possibilitou e muito a elaboração desse trabalho.

À Capes pela bolsa de estudo no período em que estive no Brasil.

À Unesp e a Universidade de Évora, pela estrutura disponível para realização do estudo.

Ao Programa Operativo de Cooperação Transfronteiriço Espanha - Portugal (POCTEP), que financiou o projeto Altercexa - Medidas de Adaptación y del Cambio Climático Mitigación um Través del Impulso de las Energias Alternativas en Centro, Alentejo y Extremadura, em que este estudo foi desenvolvido. (Ref<sup>a</sup> 0317\_Altercexa\_I\_4\_E e 0406\_ALTERCEXA\_II\_4\_E).

Ao Programa Fundos FEDER através do Programa Operacional Factores de Competitividade - COMPETE e fundos nacionais através da FCT - Fundação para a Ciência e Tecnologia no âmbito do Projecto PEst-C/AGR/UI0115/2011 Estratégico.

Aos produtores florestais por permitirem a instalação enredo e de medição e para a equipe de campo, Carla Coelho, David Gomes e Pedro Antunes, por seu trabalho em coletar dados.

À empresa Eldorado Brasil pela disponibilização dos dados dos inventários florestais dos talhões de eucalipto.

À banca de defesa dessa Tese que sugeriu dicas muito importantes para a melhoria da mesma.

“[...] quanto a mim, não julgo que haja alcançado;  
mas uma coisa faço, e é que, esquecendo-me das  
coisas que atrás ficam, e avançando para as que  
estão adiante”

Filipenses 3:13

## RESUMO

A estimativa de Biomassa Acima do Solo (BAS), com alta precisão, utilizando dados de sensoriamento remoto é um desafio presente. O objetivo deste estudo foi desenvolver uma função para estimar BAS em escala local e regional, através de imagens de alta resolução espacial, para *Quercus rotundifolia* e *Eucalyptus*, em uma área do Alentejo região do sul de Portugal e em Selvíria – MS, localizada na região Centro Oeste do Brasil, respectivamente. Para este fim, foram gerados alguns modelos empíricos, combinando os valores de biomassa estimada a partir de parcelas de inventário com alguns índices de vegetação baseados em imagem QuickBird e Pléiades. Analisando a área de estudo 1, o modelo que melhor se ajustou na estimativa da biomassa foi associado ao Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), apresentando um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) 75,6%. Na área de estudo 2, os modelos que melhor se ajustaram nas estimativas de biomassa fizeram uso do Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI), apresentando um coeficientes de determinação ( $R^2$ ) de 64,8%. Essas funções poderão ser utilizadas em outras regiões para as mesmas espécies, com clima semelhante e com as mesmas características locais. Esta abordagem pode ser usada como uma ferramenta de baixo custo para produzir estimativas de biomassa acima do solo preliminares em escala local e regional.

**Palavras-chave:** Azinheira. Eucalipto. Modelos empíricos. Sistemas de informações geográficas. Aquecimento global.

## ABSTRACT

Estimating Above Ground Biomass (BAS), with high accuracy, using remote sensing data is a current challenge. The objective of this study was to develop a function to estimate BAS in local and regional level, through images of high spatial resolution, for *Quercus rotundifolia* and *Eucalyptus*, an area in the Alentejo region of southern Portugal and Selvíria - MS, located in the region central Brazil, respectively. To this end, some empirical models were generated by combining the values of biomass estimated from inventory plots with some vegetation indices based on QuickBird image and Pleiades. Analyzing the study area 1, the model that best fit the estimation of biomass was associated with the Index Normalized Difference Vegetation index (NDVI), with a coefficient of determination ( $R^2$ ) 75.6%. In study area 2, the models that best fit the biomass estimates made using the Soil Adjusted Vegetation (SAVI) Index, with a coefficient of determination ( $R^2$ ) of 64.8%. These functions can be used in other regions for the same species with similar climate and with the same local features. This approach can be used as an inexpensive tool to produce estimates of biomass above ground primary local and regional scale.

**Keywords:** Oak. Eucalyptus. Empirical models. Geographic information systems. Global warming.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1 -</b>	Elementos fundamentais de um SIG	24
<b>Figura 2-</b>	Esquema representativo dos quatro elementos fundamentais das técnicas de sensoriamento remoto	25
<b>Figura 3 -</b>	Direção de propagação da radiação eletromagnética na forma de uma onda, em função das oscilações ortogonais dos campos magnético (M) e elétrico (E)	27
<b>Figura 4 -</b>	Elementos da fase de aquisição	27
<b>Figura 5 -</b>	Processos de interação da radiação eletromagnética com os materiais	29
<b>Figura 6 -</b>	Seção transversal de uma folha	31
<b>Figura 7 -</b>	Principais regiões do espectro eletromagnético	32
<b>Figura 8 -</b>	Reflectância espectral característica de uma folha verde Sadia	33
<b>Figura 9 -</b>	Distribuição de <i>Quercus rotundifolia</i> (Azinheira) no território Português	43
<b>Figura 10 -</b>	Distribuição de <i>Quercus suber</i> (Sobreiro) no território português	44
<b>Figura 11 -</b>	Distribuição geográfica da azinheira no Mar Mediterrâneo	45
<b>Figura 12 -</b>	Distribuição geográfica dos sobreiros no Mar Mediterrâneo	46
<b>Figura 13 -</b>	Localização das parcelas de estudo no território português	49
<b>Figura 14 -</b>	Fluxograma metodológico utilizado no presente estudo	50
<b>Figura 15 -</b>	Ilustração das parcelas sobre a imagem Quickbird utilizando a composição falsa cor 4R 3G 2B	54
<b>Figura 16 -</b>	Localização das parcelas de estudo no território brasileiro	56
<b>Figura 17 -</b>	Ilustração das parcelas sobre a imagem Pleiádes utilizando a composição falsa cor 4R 3G 2B	59
<b>Figura 18 -</b>	Ilustração do resultado da máscara de vegetação na distinção de espécies florestais	65
<b>Figura 19 -</b>	Resíduos studentizados (esquerda) e a probabilidade normal gráfica (direita) do modelo M1	69
<b>Figura 20 -</b>	Resíduos studentizados (a) e gráfico de probabilidade normal (b) para o modelo com SAVI como variável independente	73

<b>Figura 21</b> - Resíduos studentizados (a) e gráfico de probabilidade normal (b) para o modelo com NDVI como variável independente	73
<b>Figura 22</b> - Resíduos studentizados (a) e gráfico de probabilidade normal (b) para o modelo com SR como variável independente	74
<b>Figura 23</b> - Resíduos studentizados (a) e gráfico de probabilidade normal (b) para o modelo com EVI como variável independente	74
<b>Figura 24</b> - Resíduos studentizados (a) e gráfico de probabilidade normal (b) para o modelo com SAVI como variável independente	75
<b>Figura 25</b> - Resíduos studentizados (a) e gráfico de probabilidade normal (b) para o modelo com NDVI como variável independente	75
<b>Figura 26</b> - Resíduos studentizados (a) e gráfico de probabilidade normal (b) para o modelo com SR como variável independente	76
<b>Figura 27</b> - Resíduos studentizados (a) e gráfico de probabilidade normal (b) para o modelo com EVI como variável independente	76
<b>Figura 28</b> - Resíduos studentizados (a) e gráfico de probabilidade normal (b) para o modelo com SAVI como variável independente	77
<b>Figura 29</b> - Resíduos studentizados (a) e gráfico de probabilidade normal (b) para o modelo com NDVI como variável independente	77
<b>Figura 30</b> - Resíduos studentizados (a) e gráfico de probabilidade normal (b) para o modelo com SR como variável independente	78
<b>Figura 31</b> - Resíduos studentizados (a) e gráfico de probabilidade normal (b) para o modelo com EVI como variável independente	78
<b>Figura 32</b> - Mapa de estimativa de biomassa para o montado alentejano	80
<b>Figura 33</b> - Mapa de estimativa de biomassa para plantios de eucalipto	81
<b>Figura 34</b> - Mapa de estimativa de Biomassa Aérea para plantios de eucalipto (t/ha)	82
<b>Figura 35</b> - Mapa de estimativa de Biomassa Radicular para plantios de eucalipto (t/ha)	83
<b>Figura 36</b> - Montado Alentejano localizado no Pólo de Mitra	103
<b>Figura 37</b> - Vista interna do montado alentejano	103
<b>Figura 38</b> - Exemplar de Azinheira ( <i>Quercus rotundifolia</i> )	104
<b>Figura 39</b> - Casca e ramificações de um exemplar de Azinheira ( <i>Quercus rotundifolia</i> )	104
<b>Figura 40</b> - Equipe de trabalho no montado alentejano	105

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1 -</b>	Dados do Satélite Quickbird	51
<b>Tabela 2 -</b>	Dados de campo obtidos para a azinheira	53
<b>Tabela 3 -</b>	Espécies de eucalipto presentes em cada talhão de estudo	57
<b>Tabela 4 -</b>	Dados do Satélite Pléiades	57
<b>Tabela 5 -</b>	Dados do inventario florestal obtidos para o eucalipto	60
<b>Tabela 6 -</b>	Índices de vegetação utilizados para estimativa de biomassa	63
<b>Tabela 7 -</b>	Coeficientes de correlação entre a BAS e os índices de vegetação para as parcelas de azinheira	66
<b>Tabela 8 -</b>	Coeficientes de correlação entre as biomassas e os índices de vegetação para as parcelas de eucalipto	67
<b>Tabela 9 -</b>	Modelos estatísticos elaborados para estimar a Biomassa Acima do Solo da azinheira	69
<b>Tabela 10 -</b>	Modelos estatísticos elaborados para estimar a Biomassa Total do eucalipto	71
<b>Tabela 11 -</b>	Modelos estatísticos elaborados para estimar a Biomassa Aérea do eucalipto	71
<b>Tabela 12 -</b>	Modelos estatísticos elaborados para estimar a Biomassa Radicular do eucalipto	71
<b>Tabela 13 -</b>	Dados dos Índices de vegetação para as parcelas de Azinheira	100
<b>Tabela 14 -</b>	Dados dos Índices de vegetação para as parcelas de Eucalipto	101

## LISTA DE ABREVIATURAS

DapQ.médio	Diâmetro a altura do peito médio
HT.média	Altura média total
HD.média	Altura média das árvores
VTCC	Volume total com casca
VTSC	Volume total sem casca
VCCC	Volume comercial com casca (Diâmetro mínimo de 5cm)
VCSC	Volume comercial sem casca (Diâmetro mínimo de 5cm)
IMA VTCC	Incremento médio anual com base no volume total com casca
IMA VTSC	Incremento médio anual com base no volume total sem casca
IMA VCCC	Incremento médio anual com base no volume comercial com casca (diâmetro mínimo de 5cm)
IMA VCSC	Incremento médio anual com base no volume comercial sem casaca (diâmetro mínimo de 5cm)

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	16
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	18
2.1	Mudanças Climáticas	18
2.2	Sequestro de Carbono	20
2.3	Determinação de Biomassa	21
2.4	Sistemas de Informações Geográficas	23
2.5	Sensoriamento Remoto	24
2.6	Interação da Vegetação com Radiação Eletromagnética	28
2.7	Dados de Biomassa Florestal com Base em Sensoriamento Remoto	34
2.8	Índices de Vegetação	36
2.9	O Eucalipto	38
2.9.1	<i>Eucalyptus Grandis</i>	41
2.9.2	<i>Eucalyptus Urophylla</i>	41
2.9.3	<i>Eucalyptus Urograndis</i>	42
2.10	O Sobreiro e a Azinheira	42
2.11	Montados Alentejanos	46
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b>	48
3.1	Área de Estudo – 1	48
3.1.1	Clima	48
3.1.2	Solo e Relevo	48
3.1.3	Vegetação	48
3.1.4	Softwares	50
3.1.5	Procedimentos Metodológicos	50
3.1.6	Dados de Satélite	50
3.1.7	Ortorretificação / Correção Geométrica	51
3.1.8	Máscara da Vegetação	52
3.1.9	Estimativa da Biomassa Acima Do Solo	53
3.2	Área de Estudo – 2	55
3.2.1	Clima	55
3.2.2	Solo e Relevo	55
3.2.3	Vegetação	55
3.2.4	Dados de Satélite	57

3.2.5	Estimativa da Biomassa das Áreas de Eucalipto	58
3.3	Determinação dos Índices de Vegetação	62
3.4	Desenvolvimento de Modelos de Regressão e Estimativa Espacial da BAS	63
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	65
4.1	Classificação de Imagens	65
4.2	Análise de Correlação	66
4.3	Modelagem da Biomassa Acima do Solo (BAS)	68
4.4	Biomassa Total, Biomassa Aérea e Biomassa Radicular	70
4.5	Mapeamento da Biomassa	79
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	85
	<b>REFERÊNCIAS</b>	86
	<b>APÊNDICE A – Dados referentes aos Índices de Vegetação</b>	100
	<b>APÊNDICE B – Montado Alentejano</b>	103

## 1 INTRODUÇÃO

O interesse em reconhecer os aspectos que abrangem a dinâmica florestal, seu desenvolvimento, sua importância e suas maneiras de exploração sustentável, favoreceu um grande aumento de pesquisas nas últimas décadas. Essa temática tem como foco principal, o fato das florestas desempenharem elevada influência no balanço dos gases do efeito estufa e suas implicações para as mudanças climáticas do planeta. (VISMARA, 2009).

As árvores podem acumular em sua estrutura carbônica determinados elementos poluentes e nocivos à qualidade de vida humana. Devido a isso o interesse pelos estudos relativos à estimação de biomassa pelas florestas vem ganhando cada vez mais espaço no meio acadêmico-científico. (SILVEIRA, 2008).

A maior parte dos trabalhos com foco na biomassa florestal é realizada em plantações florestais, sendo diminuta a quantidade de trabalhos de quantificação ou estimação da biomassa em florestas naturais. De acordo com Vismara (2009), a própria legislação muitas vezes impede a aquisição de amostras destrutivas de biomassa em florestas naturais. Contudo, as amostras destrutivas para obtenção da biomassa são extremamente importantes, pois possibilitam o desenvolvimento de novos métodos na sua determinação e estimação.

O uso dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG's) é uma das principais ferramentas utilizadas na determinação da biomassa florestal. Pois, o processo de estimação é relativamente mais eficiente e muito mais rápido do que os métodos tradicionais. O uso dos SIG's para o estudo da ocupação do solo nos dias de hoje tornou-se evidente, principalmente pelo rápido fornecimento de resultados, tornando-se assim um instrumento necessário para o estudo que será levado a efeito neste projeto.

A estimativa de biomassa é bastante controversa, visto que, a utilização de equações para a estimativa da mesma pode incidir em erros, já que, determinados biomas apresentam grandes variações na biomassa. (KOEHLER, et al., 2005). Porém, devido principalmente a sua praticidade, as técnicas para estimativas vem sendo cada vez mais utilizadas e conseqüente aprimoradas.

Baseado neste contexto, a avaliação de biomassa em florestas naturais e plantadas, por meio de imagens de satélite, pode se tornar extremamente rápida e

precisa as tomadas de decisões pelas áreas técnicas vinculadas ao cultivo e também pela área econômica.

O objetivo deste estudo foi desenvolver uma função para estimar BAS em escala local e regional, através de imagens de alta resolução espacial, para *Quercus rotundifolia* e *Eucalyptus*, em uma área do Alentejo região do Sul de Portugal e em Selvíria – MS, localizada na região Centro Oeste do Brasil, respectivamente. Essas funções poderão ser utilizadas em outras regiões para as mesmas espécies, com clima semelhante e com as mesmas características locais.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Mudanças climáticas

A humanidade durante muito tempo não teve nenhuma preocupação ambiental como exposto por Laslett (2001). O autor relata que até o século XVIII os intelectuais europeus enxergavam o meio ambiente com certo horror, e as derrubadas das matas com satisfação. No entanto as práticas de exploração desse período, não eram insustentáveis e tampouco provocavam crises ambientais de escala, visto que, os impactos eram localizados e de baixa intensidade.

Tommasino e Foladori (2001) afirmam que, a preocupação com o meio ambiente surgiu quando os recursos começaram a ser utilizados num ritmo maior do que a capacidade natural de reposição, ou ainda, quando os dejetos gerados a um ritmo maior do que a capacidade da natureza de absorvê-los. De acordo com Yu (2004), com o advento da revolução industrial, os termos relacionados com a utilização e capacidade de regeneração da natureza foram totalmente alterados.

A crescente demanda pela produção dizimou milhares de espécies animais e vegetais, rompeu cadeias alimentares, disseminou poluentes químicos no solo, na água e no ar; despejou venenos nos ecossistemas; e modificou a composição química da atmosfera, que começou a influenciar as alterações do clima global. (YU, 2004). Segundo Vitousek (1997), entre os diversos problemas de caráter ambiental contemporâneo, os dois principais e de escala global são: a mudança climática e a perda da diversidade biológica.

O termo mudanças climáticas corresponde ao aumento da temperatura média global da atmosfera e dos oceanos. (CGEE, 2008). Essas mudanças climáticas são consideradas por muitos como processos naturais, que ocorrem em determinados períodos de tempo. No entanto, a velocidade e intensidade com que essas mudanças vêm ocorrendo no sistema climático da Terra é que tem sido elemento de preocupação de cientistas e líderes mundiais, especialmente nas duas últimas décadas. (YU, 2004).

Segundo Faria (2012) o tema referente às mudanças climáticas globais e suas consequências sobre a vida das pessoas têm sido largamente debatidas no cenário mundial e se tornou grande alvo da preocupação da sociedade. Considerando a habilidade humana de alterar o meio em que vive, é necessário que

haja a combinação de três principais ações, com a finalidade de tentar reduzir os efeitos das mudanças do clima: inação, adaptação e mitigação (FARIA, 2012). Estas ações envolvem custos e diversos compromissos que devem ser divididos entre todos os países em caráter mundial. Por conta disso fez-se necessário a formulação de tratados internacionais, com o intuito de gerenciar a comunidade nos problemas relacionados com as mudanças climáticas. (CGEE, 2008).

De acordo com o relatório do Painel Intergovernamental de Mudança do Clima – IPCC (IPCC, 2001), o aquecimento global é agravado pelas emissões de gases de efeito estufa (GEE's). Esse acúmulo de gases apesar de ser um fenômeno natural, agravou-se desde a era pré-industrial. As ações antrópicas segundo o relatório potencializam os efeitos do aquecimento global, e existem “novas e fortes evidências” de que a maior parte desse evento observado nos últimos 50 anos é devido às atividades humanas. (IPCC, 2001).

Os principais GEE's são o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), proveniente da queima de combustíveis fósseis e das queimadas oriundas de desmatamento; o metano ( $\text{CH}_4$ ) e o óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), sobretudo proveniente das atividades agropecuárias (CGEE, 2008). As emissões destes gases, com exceção dos CFC's, e de outros gases reativos como o dióxido de enxofre, os óxidos de azoto, o monóxido de carbono e hidrocarbonetos - que levam à formação de poluentes secundários, incluindo partículas de aerossóis e ozono troposférico - têm aumentado substancialmente devido a atividades humanas. Como resultado, os ciclos biogeoquímicos têm sido significativamente perturbados. (IPCC, 2007).

Os gases, com efeito estufa distinguem-se por deixar passar com facilidade a radiação solar, com comprimento de onda curto, e absorverem fortemente a radiação emitida pela Terra, como comprimento de onda maior, resultando no aquecimento da atmosfera (BARBOSA et al., 2013). Pesquisas realizadas pelo IPCC (IPCC, 2007) indicam aumento das temperaturas médias globais variando de 1,1 e 6,4°C, até o fim do século XXI, graças ao aumento das emissões dos GEE's na atmosfera. De acordo com McKinsey e Company (2009) a elevação da temperatura média não deve exceder os 2°C, pois a partir deste limite as implicações do aquecimento global seriam muito sérias.

Para Faria (2012) o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), o metano ( $\text{CH}_4$ ) e o óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) respondem juntos por 88% do efeito estufa. O  $\text{CO}_2$  de acordo com o IPCC é o principal responsável pelo aquecimento global, considerado como o gás

mais emitido pelas atividades antrópicas. O crescimento do CO<sub>2</sub> atmosférico global desde a revolução industrial deve-se especialmente às emissões do gás proveniente da queima de combustíveis fósseis e da produção de cimento. O gás pode ser gerado ainda por meio do desmatamento e da queima de biomassa. Parte do CO<sub>2</sub> presente na atmosfera é absorvida por elementos da biosfera e da superfície oceânica, sendo os solos e os oceanos os principais depósitos deste GEE's (IPCC, 2007).

## **2.2 Sequestro de carbono**

O conceito de sequestro de carbono nasceu na Conferência das Partes (COP) da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (CQMC), realizada em Quioto, no Japão, em 1997. (MATHEUS, 2012). A ideia principal consistia em preservar a vegetação nativa e/ou reflorestar para que, por meio da fotossíntese, o CO<sub>2</sub> fosse absorvido e/ou mantivesse o estoque de carbono nas plantas (YU, 2004; MATHEUS et al., 2005). Yu (2004) salienta ainda que, o conceito aborda uma forma de mitigação de menor custo, com o intuito de reverter o acúmulo de CO<sub>2</sub> na atmosfera e conseqüentemente reduzir o efeito estufa. De acordo com Baird (2002), o dióxido de carbono pode ser retirado da atmosfera por meio do desenvolvimento de plantas selecionadas especialmente com esse intuito.

Segundo Renner (2004) o sequestro de carbono florestal é uma das principais alternativas para mitigar a situação referente ao processo de elevação da temperatura do planeta. Fearnside e Guimarães (1996) salientam ainda que de maneira contrária às plantas de curto ciclo de vida, que normalmente morrem e se decompõem de maneira mais rápida, as árvores são indivíduos com ciclo de vida longo, que acumulam carbono em sua biomassa.

A queima de combustíveis fósseis é responsável por gerar mais de 80% das emissões de carbono no mundo. (YU, 2004). O crescimento das plantas estaria realizando o processo oposto desta queima por meio da fotossíntese, que captura o carbono da atmosfera estocando-o em forma de biomassa viva. Combustíveis fósseis são biomassas submersas e decompostas durante as formações geológicas de longa escala temporal. (YU, 2004).

O sequestro de carbono em áreas florestais é fundamentado em duas premissas principais. A primeira premissa consiste que como o CO<sub>2</sub> é um gás de

circulação global, sua remoção tem igual valia se concretizada próxima à fonte emissora ou em locais mais afastados. A segunda premissa é que, as plantas absorvem CO<sub>2</sub> da atmosfera pelo processo de fotossíntese, utilizando-o para a produção de glicose e de outros compostos orgânicos aproveitados em seu crescimento e metabolismo. (MATHEUS, 2012). Ainda segundo o autor, as plantas lenhosas armazenam carbono na madeira e em outros tecidos até a sua morte e decomposição, onde o carbono presente na madeira poderá ser liberado na forma de CO<sub>2</sub>, CO ou CH<sub>4</sub>, ou ainda pode ser incorporado ao solo na configuração de substâncias orgânicas. Desse modo, é possível assegurar que as árvores possuem a habilidade permanente de captura e fixação de carbono enquanto vivas, podendo então serem consideradas como importantes sumidouros de carbono por longos períodos.

De acordo com Yu (2004) quanto maior é o tamanho das plantas, mais biomassa é acumulada, e conseqüentemente maior é a quantidade de carbono fixado. A maior parte do carbono terrestre é acumulada no solo florestal, principalmente pelo processo de decomposição de matéria-prima que se acumulou durante séculos. As florestas proporcionam o mais longo estoque do ciclo do carbono, na forma de madeira e acumulação no solo por centenas de anos antes de retornar à atmosfera via respiração, decomposição, erosão ou queima. (YU, 2004).

Segundo Matheus (2012) o sequestro carbono florestal é o fluxo entre a atmosfera e os ecossistemas terrestres, o que corresponderia à primeira etapa da concepção dos combustíveis fósseis, que é a detenção do carbono em formas vivas na superfície da terra. Segundo Totten (2000) um estoque que está concentrando carbono é conhecido com *poço (sink)*, e um estoque que estiver despreendendo carbono é chamado de *fonte (source)*. Assim sendo, áreas florestadas são consideradas como *poços de carbono (carbon sinks)*.

### **2.3 Determinação de biomassa**

De acordo com o IPCC (2003) biomassa florestal é definida como toda matéria orgânica disponível acima e abaixo do solo, podendo ser viva e/ou morta. De acordo com os mesmos autores biomassa aérea é considerada como sendo toda biomassa viva acima do solo e que inclui tronco, galhos, casca, sementes e folhagem.

A produção de biomassa está relacionada ao fato de que os organismos vivos precisam obter energia e minerais de seu meio e sintetizar a matéria orgânica para que seja possível sua sobrevivência e crescimento. (WENDLING, 1998). De acordo com Watzlawick (2003) a síntese da matéria orgânica concretizada pelas plantas por meio da fotossíntese é conhecida como produção primária de um ecossistema, e a totalidade de matéria orgânica produzida pela fotossíntese é chamada de produção bruta. Parte do produto da fotossíntese é consumido pelas plantas no processo da respiração, sendo que o restante é incorporado como matéria à planta, recebendo a denominação de produção líquida.

Para Higuchi et al. (1998) é extremamente importante a realização de estimativas de biomassa florestal, visto que, ela se relaciona diretamente com os estoques de carbono, e os mesmos são utilizados no processo de quantificação de CO<sub>2</sub> liberado na atmosfera durante o processo de degradação florestal. De acordo com Sanquetta (2002) quanto mais precisa for a estimativa de biomassa, maior será a consistência da quantificação de carbono estocado e/ou liberado na atmosfera pelos ecossistemas florestais.

Segundo Nunes (2011) além da importância para efeitos climáticos, às florestas são normalmente utilizadas para geração de vários produtos como madeira, combustível e alimentos. A quantificação de biomassa acima do solo (BAS) adquiriu uma importância significativa para muitas atividades científicas e sociais, como o manejo florestal sustentável, manejo de madeira, a previsão de produtividade florestal, avaliação de sumidouro de carbono e estudos florestais ciclo global do carbono. (BROWN et al., 1999; RYU et al., 2004; HOUGHTON, 2005; PALACIOS-ORUETA et al., 2005; LU, 2006).

As principais metodologias utilizadas para a estimativa de biomassa florestal podem ser separadas em duas categorias: método direto (ou destrutivo) e o método indireto (não destrutivo). No primeiro método, as árvores são derrubadas e seus componentes são separados e pesados. Esse método é muito preciso, porém extremamente caro e demorado. No segundo método, as estimativas são realizadas com auxílio de equações alométricas preexistentes na literatura, utilizando dados coletados em campo por meio de um inventário florestal. O método indireto consiste em realizar uma relação de variáveis como o DAP (diâmetro à altura do peito), volume da madeira, altura comercial, total das árvores e o diâmetro da copa, os quais são relacionados com a biomassa. (TEIXEIRA, 2003).

Esse método quando comparado com o anterior, os resultados são obtidos mais rapidamente, porém, com uma precisão inferior. (NELSON et al., 1999; PARRESOL, 1999; FOROUGHBAKHCH et al., 2005; SEGURA, 2005; PEICHL et al., 2006; FLOMBAUM; SALA, 2007). De acordo com Salati (1994), o uso de métodos destrutivos é aplicável apenas em pequenas áreas, sendo muitas vezes utilizados como calibração das equações empregadas nas determinações indiretas, visto que, esse tipo de método permite um conhecimento detalhado da biomassa nos diversos compartimentos da floresta.

Estas duas metodologias são muito discutidas entre os autores das áreas florestais, os quais dividem suas opiniões sobre qual a forma apresenta melhores resultados no processo de estimação de biomassa (NUNES, 2011). A única consonância é que é impossível determinar a biomassa de cada árvore pelo método direto. Por conta disso é necessária realizar análises de regressão para obter modelos estatísticos que possam ser utilizados para estimar biomassa em regiões maiores. (FEARNSIDE et al., 1993; HIGUCHI et al., 1998). Wulder et al. (2008) acrescentam dois novos métodos para estimar a biomassa acima do solo (BAS): dados de detecção remota e dados auxiliares utilizados na modelação baseados nos Sistemas de Informações Geográficas (SIG's).

## **2.4 Sistemas de Informações Geográficas**

O termo Geoprocessamento pode ser compreendido como sendo um conjunto de tecnologias que tem como finalidade principal a coleta e o tratamento de informações espaciais com um fim específico. Todas as aplicações do geoprocessamento são executadas por um determinado sistema específico, que normalmente é conhecido com Sistema de Informações Geográficas (SIG). (SILVA, 2006). De acordo com Câmara e Davis (2001) os SIG's compreendem as ferramentas computacionais de Geoprocessamento possibilitando a realização de complexas análises, por meio da integração de dados de fontes variadas e com a criação de bancos de dados.

Câmara (2005) salienta ainda que, a principal diferença entre um SIG e um sistema de informação convencional esta na sua habilidade de armazenar tanto atributos descritivos como as geometrias dos distintos tipos de dados geográficos.

Segundo Lazzarotto (2003), as principais características de um SIG podem verificadas a seguir (Figura 1).

Figura 1 - Elementos fundamentais de um SIG.



Fonte: (NOAS, 2011).

O software consiste em um conjunto de programas, que tem como objetivo a coleta, o armazenamento, o processamento e a análise dos dados geográficos. O compreende um conjunto de equipamentos imprescindíveis para a execução das funções concretizadas pelo software. Entende-se por dados o material bruto que alimentará o sistema, possibilitando a geração de determinada informação. Porém a parte essencial desses tópicos apresentados na figura, corresponde as pessoas. Já que por si só o SIG não garante a eficiência nem a eficácia de sua utilização (LAZZAROTTO, 2003).

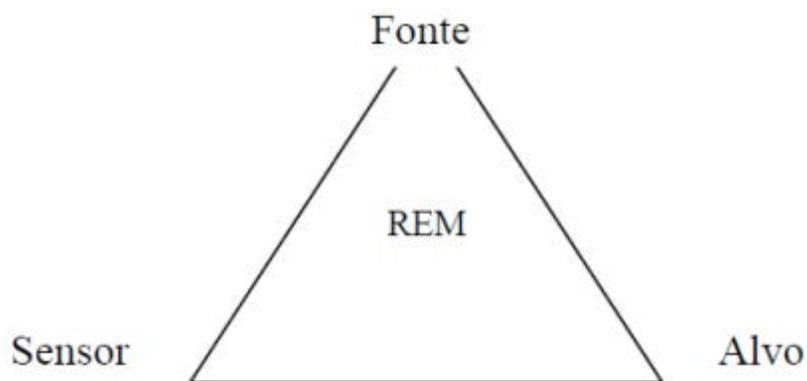
## 2.5 Sensoriamento remoto

De acordo com Jensen (2009) o termo Sensoriamento Remoto surgiu no início dos anos 60, quando alguns pesquisadores concluíram que o uso da Fotogrametria (arte ou ciência de obter medidas confiáveis por meio da fotografia), já não podia ser considerada o termo mais apropriado à série de evoluções que ocorriam na área, como a expansão de pesquisas usando instrumentos que utilizam câmeras que abrangiam regiões do espectro eletromagnético. (JENSEN, 2009).

Segundo Landgrebe (1978), Lillesand e Kiefer (1987), Asrar (1989), Mather (1999), Liu (2006) e Jensen (2009), sensoriamento remoto compreende um processo de obtenção de informações sobre um determinado objeto, área ou fenômeno por meio da análise de dados adquiridos à distância, por instrumentos que não se possuem contato com o objeto, área ou fenômeno em estudo. Para Silva (2007) Sensoriamento Remoto pode ser definido como sendo o emprego conjunto de sensores modernos, equipamentos para o processamento e transmissão de informações, como as aeronaves, espaçonaves, dentre outros, objetivando o estudo do ambiente terrestre por meio de registro e análise das informações, entre a radiação eletromagnética e as substâncias componentes do planeta Terra.

Para melhor compreensão destas definições, faz-se necessário identificar os quatro elementos principais das técnicas de Sensoriamento Remoto, representados no esquema na Figura 2.

Figura 2 - Esquema representativo dos quatro elementos fundamentais das técnicas de sensoriamento remoto



Fonte: Novo e Ponzoni (2001).

No centro do triângulo, encontra-se a Radiação Eletromagnética (REM), que é o elemento de ligação entre todos os demais fatores que se encontram nos vértices. A fonte de REM, geralmente em estudos das aplicações das técnicas de sensoriamento remoto é o Sol (podendo variar dependendo do tipo de sensor a ser utilizado); sensor é o instrumento capaz de coletar e armazenar a REM refletida ou emitida por determinado objeto, que também é conhecido como alvo, que representa o elemento do qual se almeja extrair informação. (VENTURIERI, 2007).

Moreira (2005), afirma que a energia eletromagnética se apresenta de diversas formas, como luz visível, radiação infravermelha, ondas de rádio, radiação ultravioleta, raios-X, entre outras. O comportamento destas formas de energia é análogo e está baseado na teoria ondulatória. De acordo a teoria, a aceleração de uma carga elétrica causa perturbações no campo elétrico e magnético, que se propagam repetitivamente no vácuo. Estas perturbações são conhecidas como ondas eletromagnéticas. Uma onda eletromagnética é uma oscilação do campo elétrico e magnético segundo um padrão harmônico de ondas. As ondas eletromagnéticas correspondem à equação geral. (NOVO, 1992):

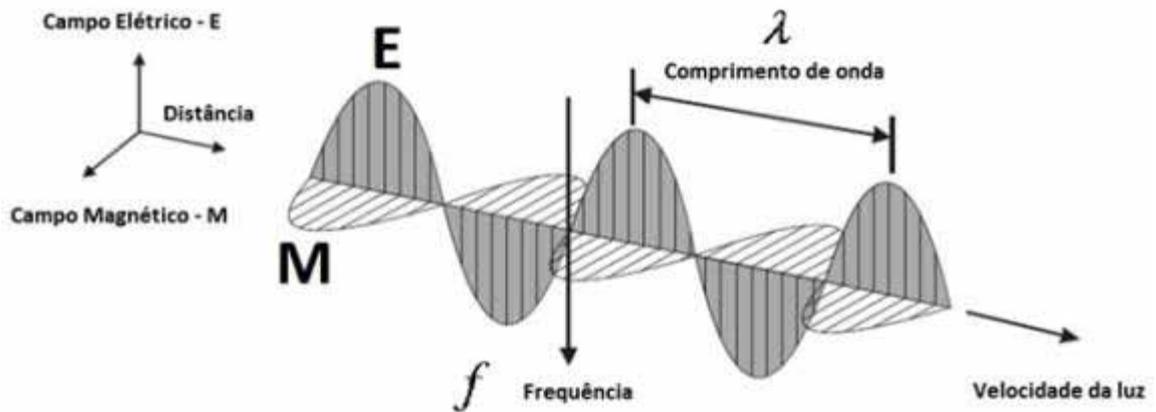
$$C = f \cdot \lambda \quad (1)$$

em que:  $c$  é a velocidade de propagação da onda eletromagnética,  $f$  é a frequência de onda e  $\lambda$  é o comprimento de onda.

Segundo Jensen (2009) o comprimento de onda ( $\lambda$ ) da radiação eletromagnética depende da duração do tempo pelo qual a partícula carregada é acelerada. Sua frequência ( $f$ ) depende do número de acelerações por segundo. O comprimento de onda é formalmente definido como a distância média entre dois máximos (ou mínimos) consecutivos de um padrão grosseiramente periódico, normalmente medido em micrômetros ( $\mu\text{m}$ ) ou nanômetros (nm). Frequência consiste no número de comprimentos de onda que passam por um ponto por unidade de tempo.

A seguir é representada esquematicamente uma onda eletromagnética, com o campo elétrico e magnético perpendiculares entre si e vibrando perpendicularmente em direção à propagação da onda (Figura 3). A distância entre um pico de onda e o próximo é o comprimento de onda ( $\lambda$ ) e o número de picos passando por um ponto fixo por unidade de tempo é a frequência ( $f$ ) (LILLESAND; KIEFER, 1994).

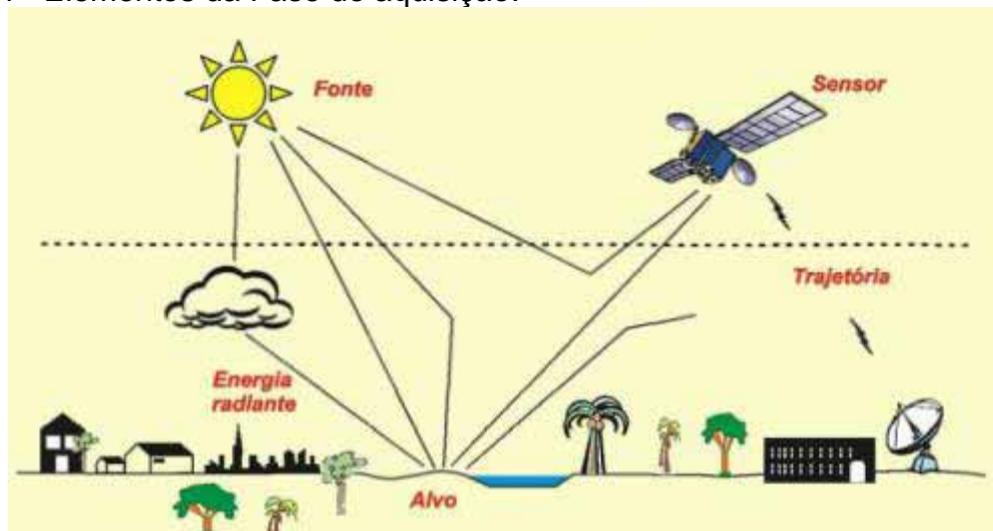
Figura 3 - Direção de propagação da radiação eletromagnética na forma de uma onda, em função das oscilações ortogonais dos campos magnético (M) e elétrico (E).



Fonte: Jensen (2009).

De acordo com Szekiela (1988) a REM sofre modificações em sua intensidade e distribuição espectral. Ao alcançar a superfície da Terra, a mesma interage com as feições dessa superfície, podendo ocasionar três processos distintos: absorção, reflexão e transmissão. (SZEKIELDA, 1988; JENSEN, 2009). A energia radiante do sol, após atravessar a atmosfera, irradia-se no alvo; dessa forma, parte dessa energia será refletida e/ou emitida pela superfície terrestre voltando a atravessar a atmosfera, ocorrendo novas interações e então atingirá o sensor remoto em órbita terrestre originando as imagens de satélite (Figura 4) (LILLESAND; KIEFER, 1987; VENTURIERI, 2007).

Figura 4 - Elementos da Fase de aquisição.



Fonte: Watrin e Maciel (2005).

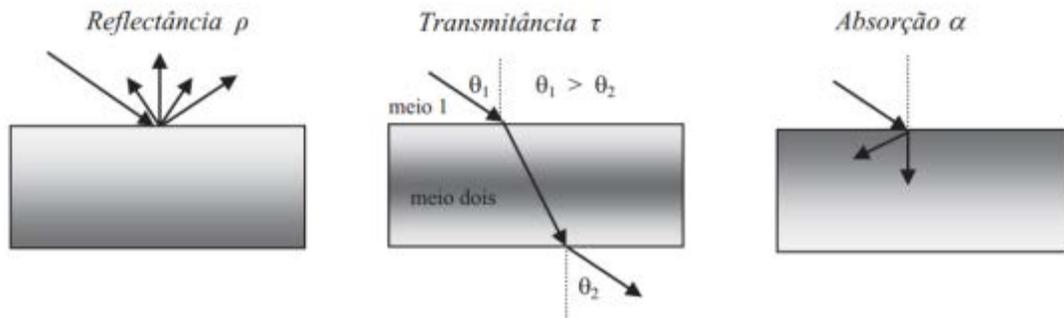
## 2.6 Interação da vegetação com a radiação eletromagnética

De acordo com Jensen (2009) o conhecimento dos processos de interação entre radiação solar e a vegetação é primordial para utilização de técnicas de sensoriamento remoto na extração de tipos vegetacionais. Este processo de interação ocorre de maneira complexa, sendo responsável pela reflectância da vegetação detectada por sensores ópticos a bordo de plataformas orbitais. Novo e Ponzoni (2001) relatam que a principal motivação dos estudos em vegetação utilizando técnicas de sensoriamento remoto, está relacionada com a compreensão da “aparência” que uma determinada cobertura vegetal adquire em certo produto de sensoriamento remoto. A radiação solar que chega à superfície da terra, ao alcançar as plantas, interage com estas e gera três frações:

- Cerca de 50% do total da radiação que chega até o planeta é absorvida pelos pigmentos contidos nas folhas, participando na síntese de compostos ricos em energia (fotossíntese), alterando as estruturas moleculares (fotoconversão), acelerando as reações, como a fotooxidação das xantofilas, ou ainda destruindo as estruturas de uma molécula;
- Outra parte é refletida pelas folhas, fenômeno conhecido como reflexão;
- A parte final consiste no processo de transmissão das camadas de folhas que compõem a copa e daquelas que constituem a folha, como a cutícula, o parênquima lacunoso e o paliçádico (MOREIRA, 2005 apud BRANDELERO, 2010, p. 24-25).

O estudo do comportamento espectral da vegetação incide na análise dos três fenômenos: reflexão, transmissão e absorção da radiação. A absorção é o processo pelo qual a energia radiante é absorvida e convertida em outras formas de energia, podendo ocorrer na atmosfera ou no terreno. Transmitância é a fração da luz incidente com um comprimento de onda específico, que atravessa uma amostra de matéria. A reflectância é o processo pelo qual a radiação “resvala” num objeto como o topo de uma nuvem, corpo d’água, ou um solo exposto (JENSEN, 2009) (Figura 5).

Figura 5 - Processos de interação da radiação eletromagnética com os materiais.



Fonte: Menezes et al. (2012).

Segundo Jensen (2009) uma folha verde sadia normalmente intercepta o fluxo radiante incidente ( $\Phi_i$ ) direto derivado do sol ou do processo de radiação difusa espalhada sobre a folha. Essa energia interage com os pigmentos, água e espaços intercelulares internos presentes na folha. A quantidade de fluxo radiante refletido da folha ( $\Phi_r$ ), a quantidade de fluxo radiante absorvido pela folha ( $\Phi_a$ ) e a quantidade de fluxo radiante transmitido através da folha ( $\Phi_T$ ) podem ser cuidadosamente medidos com a aplicação da equação do balanço de energia. A equação geral para a interação do fluxo radiante espectral ( $\lambda$ ) sobre e dentro da folha é apresentada a seguir:

$$\phi_{i\lambda} = \phi_{\rho\lambda} + \phi_{\alpha\lambda} + \phi_{\tau\lambda} \quad (2)$$

em que:  $\rho_\lambda$  é a reflectância hemisférica espectral da folha,  $\alpha_\lambda$  é a absortância e  $\tau_\lambda$  é a transmitância hemisférica espectral pela folha.

Se tratando mais propriamente da vegetação, alguns conceitos devem ser apresentados para que seja possível compreender todo esse processo de interação. Vegetação sob o ponto de vista fitogeográfico, compreende um conjunto de plantas que ocupa uma determinada área geográfica (WATZLAWICK, 2003). A expressão comportamento espectral da vegetação tem sido utilizado para representar os atributos espectrais de partes da planta, como as folhas, os galhos, a planta inteira e/ou um conjunto de plantas. (PONZONI; DISPERATI, 1995).

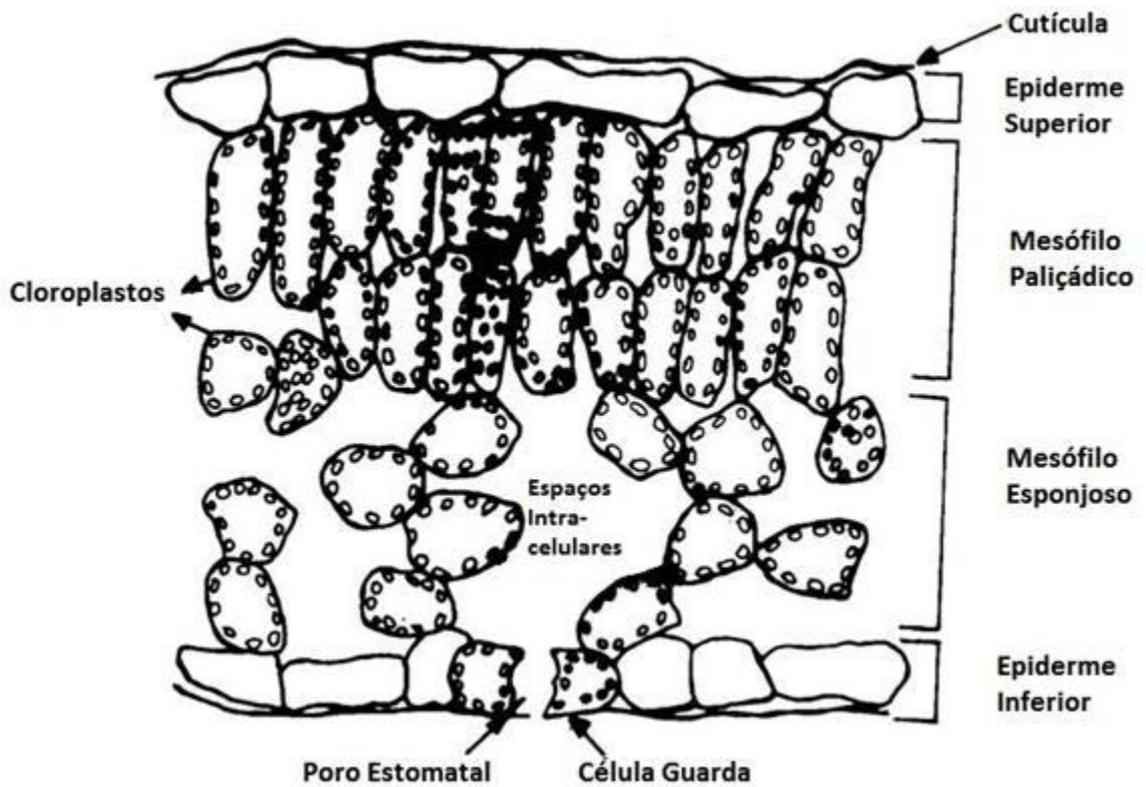
Ponzoni e Disperati (1995) afirmam que o comportamento espectral da vegetação, mais precisamente nas plantas, a folha é a que mais se destaca no processo de reflexão, sendo muito detectada pelos sensores ópticos, devido a sua

composição química, morfológica e por sua estrutura interna, havendo assim diferenças no comportamento espectral entre grupos geneticamente diferentes.

A constituição folha consiste em três tecidos: epiderme, mesófilo fotossintético e tecido vascular (Figura 6). A face ventral é aquela que está voltada para cima, recebendo então maior quantidade de radiação eletromagnética provinda do Sol. Nesta face se encontram diferentes tipos de estruturas como pêlos e camadas de cera (cutícula) que exercem diferentes funções de proteção, e concretiza as trocas gasosas, recebendo o gás carbônico e possibilitando a saída de oxigênio. Logo abaixo dessas estruturas, encontra-se a epiderme composta geralmente por células alongadas e por outras diferenciadas para desempenhar funções específicas, como aquelas que formam os estômatos. (PONZONI; SHIMABUKURO, 2009).

Abaixo da epiderme encontra-se mesófilo paliçádico ou também chamado de parênquima paliçádico o qual é organizado por células ricas em cloroplastos que são as organelas dentro das quais se encontram os pigmentos fotossintetizantes, principalmente as clorofilas. Seguindo em direção à face dorsal da folha, encontra-se o mesófilo esponjoso ou também conhecido como parênquima esponjoso, que se caracteriza por apresentar uma organização de células menos compacta do que o mesófilo paliçádico, que lhe confere uma maior quantidade de lacunas entre as células, lacunas essas preenchidas com gases resultantes dos processos de respiração e de transpiração. Segue-se novamente a epiderme, com um número frequentemente maior de estômatos em relação à face ventral e finalmente uma nova camada de cera ou cutícula, na qual voltam a aparecer estruturas como pêlos e ceras (WATZLAWICK, 2003; PONZONI; SHIMABUKURO, 2009).

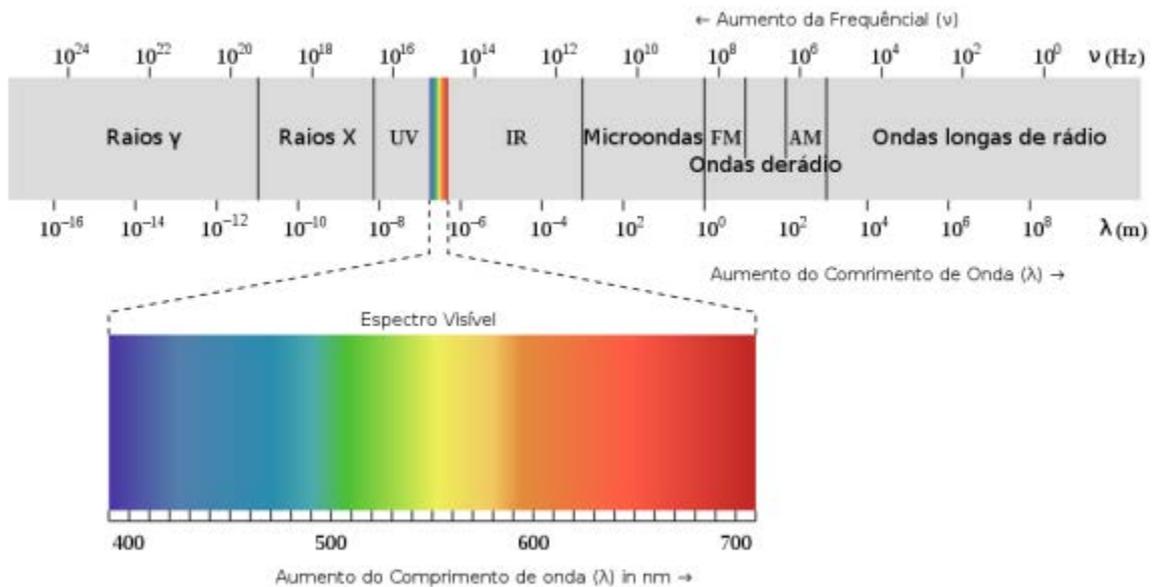
Figura 6 - Seção transversal de uma folha.



Fonte: Ponzoni e Shimabukuro (2009).

A fim de compreender o comportamento e a interação dos dosséis vegetativos com a energia eletromagnética incidente é importante observar o espectro-eletromagnético (Figura 7), juntamente com as respostas espectrais correspondentes em cada região do espectro. (JENSEN, 2009).

Figura 7 - Principais regiões do espectro eletromagnético.

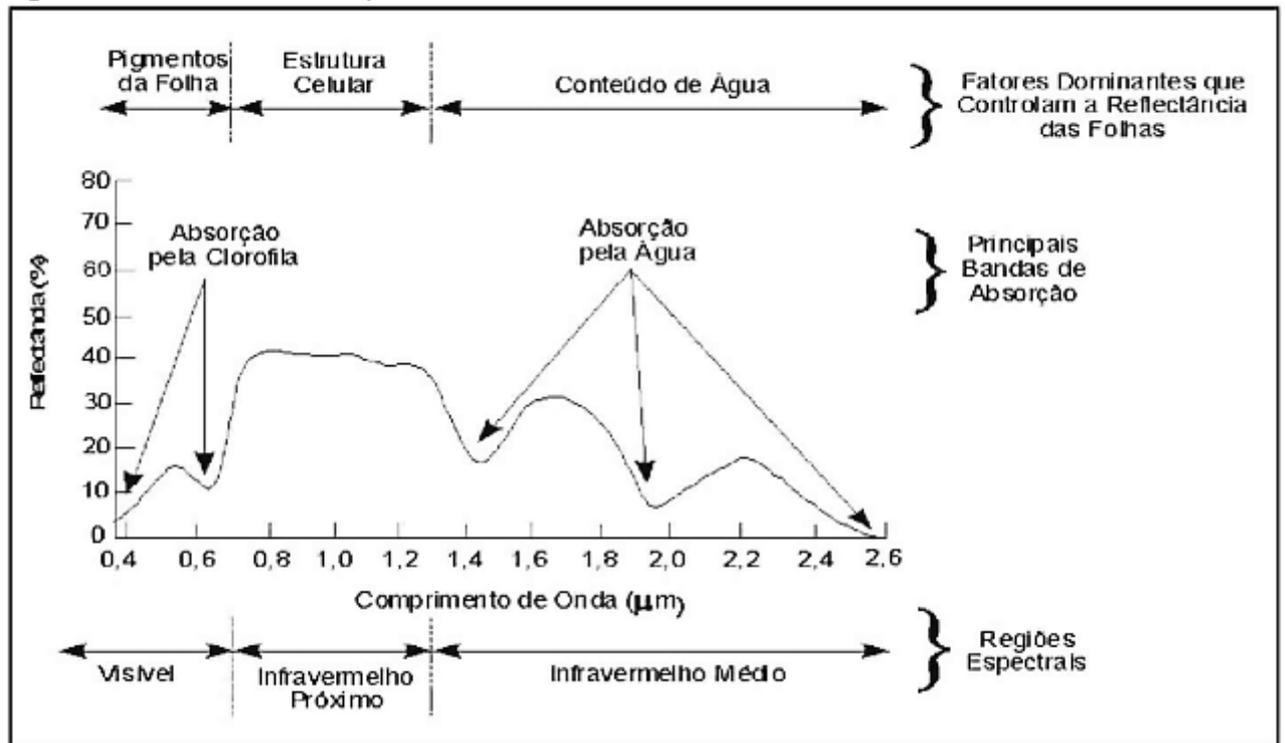


Fonte: Moreira (2012).

Dentre essas divisões do espectro eletromagnético, as mais empregadas em Sensoriamento Remoto correspondem às faixas do visível, infravermelho próximo, infravermelho médio, infravermelho distante.

O intervalo do comprimento de onda entre 0,4 e 2,6  $\mu\text{m}$ , apresenta uma reflectância espectral característica em uma folha vegetal verde sadia, podendo ser observada na Figura 8. Os principais fatores que controlam a reflectância foliar são os diversos pigmentos foliares existentes no mesófilo paliçádico (como as clorofilas a e b, e o  $\beta$  caroteno), o espalhamento da energia infravermelha no mesófilo esponjoso e a quantidade de umidade na planta. As principais bandas de absorção pela clorofila ocorrem em 0,43 – 0,45  $\mu\text{m}$  e em 0,65 – 0,66  $\mu\text{m}$  na região do visível. As principais bandas de absorção pela água ocorrem em 0,97; 1,19; 1,45; 1,94 e 2,7  $\mu\text{m}$ . (JENSEN, 2009).

Figura 8 - Reflectância espectral característica de uma folha verde sadia.



Fonte: Jensen (2009).

As três regiões espectrais apresentadas na Figura 8, correspondem à faixa do visível (0,4 – 0,72 μm), infravermelho próximo (0,72 – 1,3 μm) e infravermelho médio (1,3 – 2,6 μm), em cada uma dessas regiões a forma da curva é definida por diferentes constituintes da folha. A seguir as regiões serão descritas com mais detalhes:

- Região do visível (0,4 – 0,72 μm) – nesta região os pigmentos existentes nas folhas dominam a reflectância. São eles, portanto, que definem a forma da curva dos fatores de reflectância nessa região espectral. Estes pigmentos, geralmente encontrados nos cloroplastos, são: clorofila (65%), carotenos (6%) e xantofilas (29%). Os valores percentuais destes pigmentos presentes nas folhas podem variar intensamente de espécie para espécie. A energia radiante interage com a estrutura foliar por absorção e por espalhamento. A energia é absorvida seletivamente pela clorofila e é convertida em calor ou fluorescência, e também convertida fotoquimicamente em energia armazenada na forma de componentes orgânicos através da fotossíntese. Os pigmentos absorvem radiação na região do azul (próximo a 0,445 μm), mas somente a clorofila absorve na região do vermelho (0,645 μm). A maioria das plantas são moderadamente transparentes na região do verde (0,540 μm). Shul'gin e Kenshin (1959)

estudaram 80 espécies e verificaram que a absorção da energia radiante na região 0,550 a 0,670  $\mu\text{m}$  aumenta proporcionalmente com o aumento do conteúdo de clorofila. Similar conclusão foi encontrada por Tageeva et al. (1960), que estudaram a correlação entre o conteúdo de clorofila e as propriedades ópticas de três espécies distintas;

- Região do infravermelho próximo (0,72 – 1,10  $\mu\text{m}$ ) – nesta região ocorre absorção pequena da radiação e considerável espalhamento interno da radiação da folha. A absorção da água é geralmente baixa nessa região, enquanto que a reflectância é quase constante. Gates et al. (1965) concluíram que a reflectância espectral de folhas nessa região do espectro eletromagnético é o resultado da interação da energia incidente com a estrutura do mesófilo. Fatores externos à folha, como disponibilidade de água, por exemplo, podem causar alterações na relação água-ar, no mesófilo, podendo alterar quantitativamente a reflectância de uma folha nessa região. De maneira geral, quanto mais lacunosa for a estrutura interna foliar, maior será o espalhamento interno da radiação incidente, e conseqüentemente, maiores serão também os valores dos fatores de reflectância;
- Região do infravermelho médio (1,10 – 3,20  $\mu\text{m}$ ) – a absorção devido à água líquida afeta a reflectância das folhas nessa região. Considerando a água líquida, esta apresenta na região em torno de 2,0  $\mu\text{m}$ , fatores de reflectância geralmente pequenos, sendo menores do que 10% para um ângulo de incidência de 65° e menor que 5% para um ângulo de incidência de 20°. A água absorve consideravelmente a radiação incidente na região espectral compreendida entre 1,3  $\mu\text{m}$  a 2,0  $\mu\text{m}$ . Em termos mais pontuais, a absorção da água se dá em 1,1  $\mu\text{m}$ ; 1,45  $\mu\text{m}$ ; 1,95  $\mu\text{m}$  e 2,7  $\mu\text{m}$ . (PONZONI; SHIMABUKURO, 2009, p. 18-19).

## 2.7 Dados de biomassa florestal com base em sensoriamento remoto

De acordo com Watzlawick e Kirchner (2004) graças às melhorias tecnológicas das imagens de Sensoriamento Remoto e seus avanços no processo de tratamento das mesmas, atualmente tem sido possível realizar uma melhor caracterização da estrutura florestal e, conseqüentemente, dos estoques de biomassa e carbono.

A determinação da BAS utilizando imagens de satélite é uma solução promissora, especialmente para grandes áreas, visto que, sua obtenção se ocasiona da maneira indireta a partir de parâmetros do dossel, como a projeção horizontal da

copa. Assim, visando ter uma melhor relação custo-benefício sendo necessário menos tempo para a avaliação dos dados quando comparado com os métodos baseados em parcelas de inventário florestal e análise estatística. Devido à flexibilidade deste método, também é possível analisar a variação do estoque de carbono em diferentes regiões ou com o tempo, e o impacto de distúrbios, tais como o desmatamento.

Diversos estudos foram realizados utilizando dados de satélites espaciais de baixa e média resolução espacial para estimar BAS em grandes áreas e com diferentes espécies florestais (HÄME et al., 1997; BACCINI et al., 2004; LU, 2006; MUUKKONEN; HEISKANEN, 2007; VIANA et al., 2012). A estimativa de biomassa por meio de imagens de satélite de resolução espacial grosseira tem alguma limitação por causa da diferença entre o apoio de dados de referência do terreno e tamanho do pixel dos dados de sensoriamento remoto. (LU, 2006).

Desde o lançamento do satélite IKONOS, em 1999, seguido pelo QuickBird em 2001, os dados de sensoriamento remoto e sua relação com parâmetros florestais foram alterados. Os dados espaciais com uma maior riqueza de detalhes proporcionaram uma oportunidade para que as caracterizações da vegetação fossem mais precisas, reduzindo os erros de estimativa a um nível operacional aceitável. (KAYITAKIRE et al., 2006).

As imagens IKONOS, Worldview 2 e QuickBird, devido a sua alta resolução espacial, têm sido utilizados em vários estudos de biomassa: plantações de dendezeiros em África (THENKABAIL et al., 2004); parâmetros estruturais para Pinus floresta em Central Espanha (GÓMEZ et al., 2012; MUTANGA et al., 2012) de alta densidade de biomassa da vegetação das zonas úmidas; e estimação da BAS em florestas de mangue. (HIRATA et al., 2014). Estes dados de satélite podem produzir detalhados mapas de biomassa, juntamente com sua distribuição espacial, que muitas vezes são impossíveis de adquirir utilizando resoluções mais grosseiras, devido aos efeitos de pixels mistos. (WULDER et al., 2004).

É conveniente relatar que diversos estudos com Sensoriamento Remoto de média resolução espacial foram elaborados por vários autores (TOMPPPO et al., 2002; HALL et al., 2006; LU, 2006; MUUKKONEN; HEISKANEN, 2007; CHEN et al., 2011; JI et al., 2012) todos esses com intuito de quantificar BAS utilizando as bandas originais associados com índices de vegetação.

## 2.8 Índices de vegetação

O desenvolvimento das relações funcionais entre os atributos da vegetação e os dados adquiridos remotamente tem sido alvo de muitos profissionais dos setores agrícola e florestal. Com intuito de tentar minimizar a variabilidade ocasionada por fatores externos, a reflectância espectral tem sido transformada e associada em diversos índices de vegetação, por meio da utilização de duas ou mais bandas espectrais. (COURA, 2007). Segundo Ponzoni (2001) os índices mais usualmente utilizados empregam a informação contida nas reflectâncias de dosséis referentes às regiões do vermelho e do infravermelho próximo, que são combinadas sob a forma de razões. De acordo com Ferreira et al. (2008) e Mutanga et al. (2012), índices que utilizam as bandas do vermelho (RED) e infravermelho próximo (NIR) estão diretamente relacionados com a atividade fotossintética da vegetação.

O índice de vegetação é resultante do processo de combinação da medida da radiação eletromagnética refletida pela vegetação em determinadas bandas espectrais do espectro-eletromagnético, que conservam certa relação com a quantidade e o estado da vegetação. (COURA, 2007). Um dos primeiros índices de vegetação foi conseguido por Jordan (1969) sendo conhecido por índice da “Razão Simples” (SR):

$$SR = \frac{NIR}{RED} \quad (3)$$

em que: NIR = reflectância na banda referente ao infravermelho próximo; RED = reflectância na banda referente ao vermelho.

O SR fornece valiosas informações sobre a biomassa da vegetação ou sobre o Índice de área foliar (IAF) (SCHELERF et al., 2005) Ele é especialmente sensível a variações em biomassa ou em IAF para vegetação de grande biomassa, tais como florestas. (HUETE et al., 2002).

Pouco tempo depois, Rouse et al. (1973) propôs o uso da diferença normalizada para o monitoramento da vegetação. Os autores normalizaram a razão simples para o intervalo de -1 a +1, propondo o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI):

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (4)$$

em que: NIR = reflectância na banda referente ao infravermelho próximo; RED = reflectância na banda referente ao vermelho.

O NDVI é um importante índice de vegetação pois segundo Jensen (2009) favorece o monitoramento das mudanças sazonais e interanuais no desenvolvimento e atividade da vegetação; a razão reduz muitas formas de ruídos multiplicativos (diferenças de iluminação solar, sombra de nuvens, algumas atenuações atmosféricas, algumas variações topográficas) presentes em múltiplas bandas de imagens de múltiplas datas.

De acordo com Huete (1988) as características do solo têm uma considerável influência no espectro de radiação, provenientes dos dosséis vegetais esparsos, e conseqüentemente no cálculo dos índices de vegetação. Assim segundo Ponzoni e Shimabukuro (2009) em diversos estudos, o brilho do solo (principalmente em substratos mais escuros), tem mostrado um aumento no valor de índices de vegetação com o SR e o NDVI.

Huete et al. (1985) verificaram que a sensibilidade dos índices de vegetação em relação ao material de fundo é maior em dosséis com níveis médios de cobertura vegetal (50% de cobertura vegetal). Baseado nisso foi introduzido um novo índice de vegetação denominado de SAVI (Índice de Vegetação Ajustado para o Solo). Foi introduzida uma constante “L” com o intuito de minimizar o efeito do solo no resultado final do índice (PONZONI; SHIMABUKURO, 2009):

$$SAVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED + L)} \times (L + 1)$$

(5)

em que: NIR = reflectância na banda referente ao infravermelho próximo; RED = reflectância na banda referente ao vermelho; L= constante que minimiza o efeito do solo e pode variar de 0 a 1.

De acordo com Huete (1988) os valores de “L” são:

- L = 1 (para densidades baixas de vegetação);

- L = 0,5 (densidades médias);
- L = 0,25 (densidades altas).

O Índice de Vegetação Melhorado (EVI) é um NDVI modificado, contendo um fator de ajuste (L = 1) e (G = 2,5) e dois coeficientes (C1 = 6 e C2 = 7,5), que descrevem o uso da banda azul para correção da banda vermelha quanto ao espalhamento atmosférico por aerossóis. (JENSEN, 2009). Segundo Huete e Justice (1999) uma vez que o NDVI é sensível à clorofila, o EVI apresenta maior sensibilidade às modificações na resposta estrutural do dossel, em que se incluem o índice de área foliar, a fisionomia da planta e a disposição do dossel.

O EVI de acordo com Ponzoni e Shimabukuro (2009) foi desenvolvido com objetivo de aperfeiçoar o sinal da vegetação, melhorando a sensibilidade de sua detecção em regiões com maiores densidades de biomassa, e para reduzir a influência do sinal do solo e da atmosfera sobre a resposta do dossel, sendo calculado por:

$$EVI = \frac{G \times (NIR - RED)}{(NIR + C1 \times RED - C2 \times BLUE + L)} \quad (6)$$

em que: NIR = reflectância na banda referente ao infravermelho próximo; RED = reflectância na banda referente ao vermelho; BLUE = reflectância da banda azul; G= fator de ganho; L= fator de ajuste para o solo;

## 2.9 O eucalipto

Este gênero pertence à família Myrtaceae e inclui entre 670 a 700 espécies, a maioria delas nativa da Austrália (GRATTAPAGLIA; KIRST, 2008), exceto o *E. urophylla* e *E. deglupta* que são originários do Timor e Papua Guiné, respectivamente (PRYOR, 1986). De acordo com Mora e Garcia (2000), a maior parte das espécies conhecidas apresentam características típicas de florestas altas, com uma altura aproximada de 30 a 50m e de florestas abertas, com árvores entre 10 a 25m de altura. E apenas 30 a 40 espécies são consideradas arbustivas.

Mora e Garcia (2000) relatam que na Austrália, desde 1788 já foram abatidos 38% das florestas nativas. Atualmente é estimado que existam 43,2 milhões de ha de florestas, em que, 25,6 milhões (60%) são de eucaliptos. As principais espécies

de eucaliptos utilizadas em todo mundo são o *E. grandis*, *E. camaldulensis*, *E. tereticornis*, *E. globulus*, *E. urophylla*, *E. viminalis*, *E. saligna* e *E. citriadora* (ALZATE, 2004).

De acordo com Bertola (2011) o crescimento contínuo da população e o crescente aumento na demanda madeireira no início do século XX, foram os principais responsáveis pelo surgimento do interesse e da necessidade de utilização de espécies de eucalipto para a produção de madeira, lenha, dormentes etc., em diversos países. O eucalipto adquiriu, rapidamente, o atributo marcante de ser a espécie florestal mais plantada em todo mundo, visto que, a mesma apresentava condições favoráveis de crescimento e desenvolvimento onde as temperaturas mínimas do solo não fossem limitantes. (PRYOR, 1976). Um fator que favoreceu o aumento da demanda madeireira e um maior interesse na utilização do eucalipto em plantios florestais, foi a crise energética dos anos 70. (BERTOLA, 2011).

O eucalipto é considerado a árvore mais plantada no mundo, com uma área de mais de 17,8 milhões de hectares. O Brasil ocupa o segundo lugar relacionado aos países com maior área plantada, com aproximadamente cerca de 4 milhões de hectares, ultrapassado apenas pela Índia. (ABRAF, 2010). Outros vegetais exóticos, como por exemplo, o café, a cana e a soja; o eucalipto encontrou nas condições edafoclimáticas brasileira, as qualidades ideais para sua produção em grande escala, fato esse comprovado, pois praticamente todas as principais indústrias de celulose e madeira do mundo localizam-se no Brasil. De acordo com Queiroz e Barrichelo (2007) o eucalipto aliado com preservação das florestas nativas, concentram 196 milhões de toneladas de carbono, colaborando para que o planeta continue habitável e se livre do maléfico efeito estufa.

Segundo Bertola (2011) no ano de 1904, o Dr. Edmundo Navarro de Andrade iniciou os primeiros experimentos de natureza silvicultural, com o intuito de determinar uma espécie que fosse capaz de fornecer madeira e lenha para suprir as necessidades das ferrovias. A final de 6 anos de estudos, comparando espécies exóticas e nativas, o pesquisador chegou à conclusão de que o eucalipto era a espécie que deveria ser plantada em larga escala. Atualmente a linha de pesquisa com eucalipto consiste em buscar um maior rendimento, sustentabilidade e a integração da floresta plantada com a mata nativa. (QUEIROZ; BARRICHELO, 2007).

Cabe salientar que houve muitos insucessos em estudos ligados com o reflorestamento de áreas com o eucalipto. Bertola (2011) relata os principais fatores para os insucessos iniciais:

- Insuficiência de trabalhos científicos que permitissem nortear o estabelecimento dessas florestas com técnicas de manejo adequadas, tornando-as mais produtivas e, portanto reduzindo a pressão sobre as florestas nativas;
- Escolha inadequada da espécie/procedência, pois, em razão da alta produtividade nos reflorestamentos iniciais, principalmente de *E. grandis* e *E. saligna*, essas espécies foram consideradas adequadas para o plantio em quaisquer condições ambientais, ocorrendo então, um desastre ecológico quando do seu estabelecimento na região de cerrado, em especial na região do São Francisco e Jequitinhonha;
- Uso de técnicas inadequadas de implantação, destacando-se o uso insuficiente e inadequado de fertilizantes e a falta de uso de técnicas conservacionistas;
- Falhas na política, legislação e fiscalização, uma vez que, dentre outros, permitiu-se a substituição total da floresta nativa pela plantada e, a fiscalização era realizada apenas até o segundo ano, deixando o investidor inescrupuloso, que tinha apenas interesse em obter lucro imediato, abandonar os plantios às pragas e ao fogo.

Alguns mitos relacionados com o plantio de eucalipto foram sendo deixados de lados e não são mais sustentados atualmente. Segundo Lima (1993) o eucalipto pode sim ressecar o solo, no entanto não pode ser considerado como um vilão hídrico. Estudos científicos indicam que o regime hídrico tanto no solo, com das águas subterrâneas sob plantações de eucalipto não diferem consideravelmente daqueles observados em outras plantações florestais. De acordo com Queiroz e Barrichelo (2007) em torno dos 6 a 7 anos, o híbrido *Eucalyptus grandis* vs. *Eucalyptus urophylla* (*Eucalyptus urograndis*), absorve bem menos água do que um canavial. Segundo Reis et al. (2006) as raízes de determinados clones de eucalipto aos 6 meses de idade já beiram 1m de profundidade, porém isso não significa maior consumo de água, visto que, o maior agrupamento de raízes responsáveis pela absorção hídrica de e nutrientes, localizam-se nos primeiros 60 cm de solo (SILVA,

2003).

O eucalipto não “estraga a terra” como muitos acreditam; ao contrário o mesmo é muito recomendado na recuperação de solos erodidos, degradados e “cansados” como, por exemplo, as pastagens e os campos que perderam há muito tempo sua cobertura arbórea. (LOPES, 2008).

Segundo Pinto Júnior e Garlipp (2008) as principais espécies de eucalipto utilizadas são o *Eucalyptus grandis* e seus híbridos interespecíficos, especialmente com a espécie *E. urophylla*. No entanto O híbrido *E. urograndis* oriundo do cruzamento entre as espécies *E. grandis* e *E. urophylla*, também é muito aproveitado pelas empresas brasileiras. (BORTOLOTO, 2011).

### **2.9.1 *Eucalyptus grandis***

De acordo com Fao (1981) o *E. grandis* Hill ex Maiden é uma espécie nativa do Norte de Nova Gales do Sul e da costa sul de Queensland, na Austrália. Essa espécie distribui-se especialmente entre as latitudes 26 a 32º e em altitudes de 0 – 300m, se adaptando muito bem em regiões com precipitação entre 1000 e 1750 mm e valores de temperatura médias máximas entre 29 – 32°C, e em médias mínimas entre 5 e 6°C.

A madeira desta espécie é considerada com sendo medianamente leve e fácil de trabalhar em intervenções de usinagem, sendo considerada ainda de baixa estabilidade dimensional e de elevada permeabilidade. Apresenta usos múltiplos, estimada com uma das espécies mais versáteis do setor madeireiro, porém, apresenta problemas de empenamento, contrações e rachaduras nas operações de desdobro e de secagem. (BERTOLA, 2011).

Segundo Moura e Garcia (2000) esta espécie sobrepuja qualquer outra em incrementos volumétricos em adequadas condições ambientais, constituindo na espécie mais plantada no Brasil, devido à plasticidade genética.

### **2.9.2 *Eucalyptus urophylla***

Essa espécie é nativa de algumas ilhas orientais do arquipélago de Sonda: Timor, Flores, Adonara, Lomblem, Plantar, Alor e Wetar, localizados ao norte da Austrália, entre 7 – 10º de latitude sul (ALZATE, 2004). De acordo com Bertola

(2011) a altitude nessa região varia de 400 a 3.000 m, apresentando uma precipitação média anual em torno de 1.000 a 1.500 mm, a temperatura média máxima situa-se em torno de 32°C já a temperatura média mínima localiza-se entre 8 a 12°C. A madeira é estimada como medianamente leve, em que, as propriedades de resistência mecânica são moderadas. É considerada com uma madeira de relativa estabilidade e alta permeabilidade. (BERTOLA, 2011).

Ainda segundo o autor no Brasil, a espécie é indicada para usos gerais, sendo muito usadas em laminação, componentes estruturais para construção, caixotaria, mourões, celulose e papel, chapas duras, painéis, lenha e carvão. A espécie é adaptada muito bem a solos hidromórficos ou francamente arenosos, em diferentes altitudes; não tolera geada e situações de déficits hídricos severos.

Mora e Garcia (2000) afirmam que o interesse pelo *E. urophylla*, surgiu no Brasil depois de comprovada sua alta resistência ao agente causador do cancro do tronco, substituindo o *E. grandis* em regiões mais susceptíveis ao agente.

### **2.9.3 *Eucalyptus urograndis***

É um híbrido desenvolvido no Brasil, pelo cruzamento do *E. grandis* x *E. urophylla*. Atualmente cerca de 600.000ha são cultivados com este híbrido. O objetivo do cruzamento destas duas espécies foi obter plantas com um bom crescimento, propriedades do *E. grandis* e um leve acréscimo na densidade da madeira além de melhorias no rendimento e nas propriedades físicas da celulose, atributos do *E. urophylla* (BRAGA, 2008).

## **2.10 O sobreiro e a azinheira**

A azinheira (*Quercus rotundifolia* Lam.) e o sobreiro (*Quercus suber* L.) são espécies características do mediterrâneo. De acordo com Samuel et al. (1998) elas pertencem à ordem *Fagales*, família *Fagaceae* e gênero *Quercus*. Mais de 600 espécies são encontradas neste gênero, distribuídas pelo hemisfério Norte, sendo um dos mais amplos da família *Fagaceae*.

O porte da azinheira é variável, podendo alcançar os 25 m de altura, porém devido à ação antrópica, geralmente não supera os 10-12 m. Os ramos são abertos e cobertos por uma casca de coloração acinzentada ou parda densa, apresentando

sulcos pouco profundos. São plantas monóicas. O fruto é conhecido com bolota apresentando um formato oval. Sua frutificação se inicia a partir dos 8-10 anos. Tanto a casca do tronco jovem, as folhas e as bolotas são muito ricas em taninos (NAVARRO; FERNÁNDEZ, 2000). Segundo ainda com os autores a azinheira tem uma grande longevidade podendo encontrar-se exemplares com mais de 700 anos.

De acordo com Marques et al. (2008) a espécie adquire maior importância nas zonas continentais, de influência ibérica e mediterrânica. Sua distribuição em Portugal vai desde a região de Trás-os-Montes até ao Algarve, com maior presença nas regiões do Alentejo (Figura 9).

Figura 9 - Distribuição de *Quercus rotundifolia* (Azinheira) no território português.



Fonte: Marques et al. (2008).

O sobreiro é uma planta fundamentalmente alogâmica (NATIVIDADE, 1950). Raramente tem uma altura superior a 25 m (MONTROYA-OLIVER, 1988), apresentando tronco mais ou menos sinuoso. Seu florescimento e frutificação se dão a partir dos 15 - 20 anos. É uma espécie monóica. Seus frutos (glande) são oblongos e a frutificação é alternada. (CAETANO, 2007). De acordo com Natividade (1950) o sobreiro é a única espécie do gênero *Quercus* que possui felogênio, isto é,

é um produtor de tecido suberoso (cortiça) que envolve tanto o tronco quanto os ramos dos indivíduos dessa espécie, apresentando a aptidão de regenerá-lo indefinidamente quando ele é retirado. O sobreiro é uma espécie de vida longa podendo chegar aos 500 anos. Porém, a idade limite da cultura econômica da espécie é de 150-200 anos, visto que, depois deste período, a produção de cortiça baixa consideravelmente tanto em qualidade como em espessura (NATIVIDADE, 1950; GIL, 2005).

Segundo Natividade (1950) o clima propício para o desenvolvimento do sobreiro é o de transição entre as características atlânticas e as características mediterrâneas, sem grandes variações térmicas anuais, com estiagens prolongadas e com elevada umidade atmosférica.

O sobreiro está distribuído praticamente em todo território português (Figura 10), com exceção nas regiões montanhosas e/ou planálticas mais frias do norte e centro do país. As maiores manchas contínuas da espécie encontram-se distribuídas pelo Ribatejo, Alentejo Litoral e Central e Algarve (MARQUES et al., 2008).

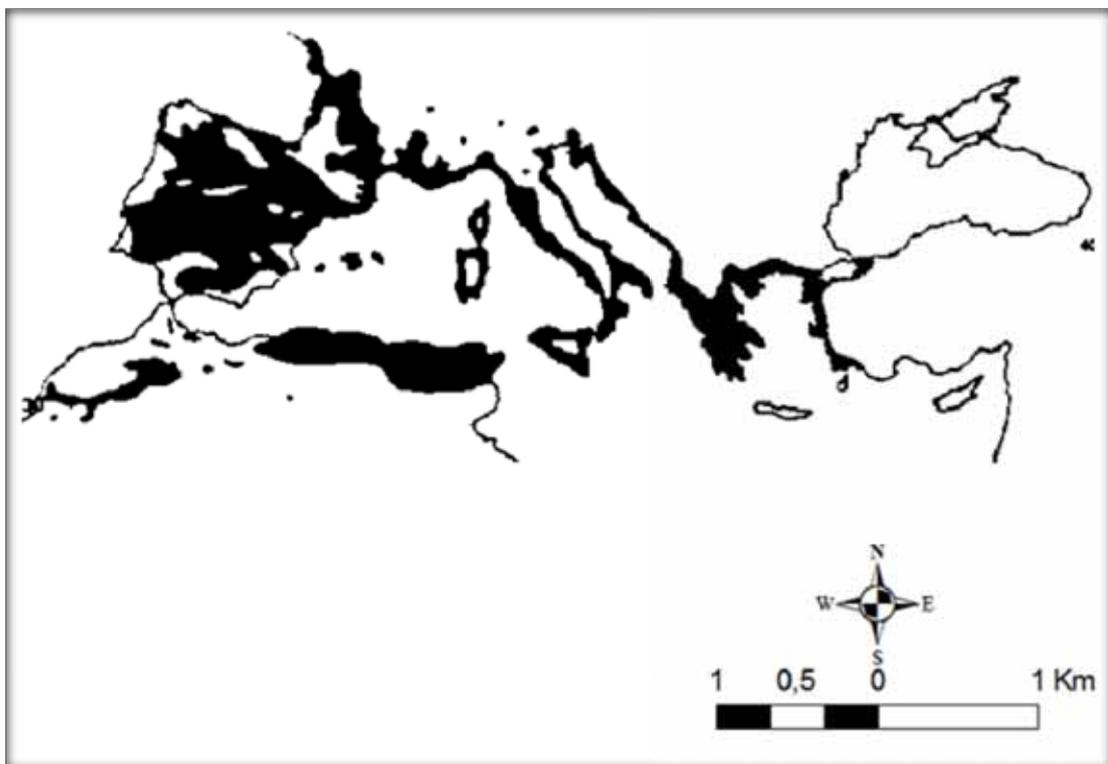
Figura 10 - Distribuição de *Quercus suber* (Sobreiro) no território português.



Fonte: Marques et al. (2008).

A azinheira tem uma vasta distribuição afora o território português, abrangendo o Sudoeste da Europa (Espanha, Sul de França, Itália e Noroeste da antiga Iugoslávia), o Norte de África (Marrocos, Argélia e Tunísia) estendendo-se ainda para o Oeste, passando por Chipre, Grécia e Mar Negro (MONTEIRO 1958). A preferência climática da azinheira é por climas de influência mais continental, suportando invernos frios e verões quentes. (CELA et al., 1998) (Figura 11).

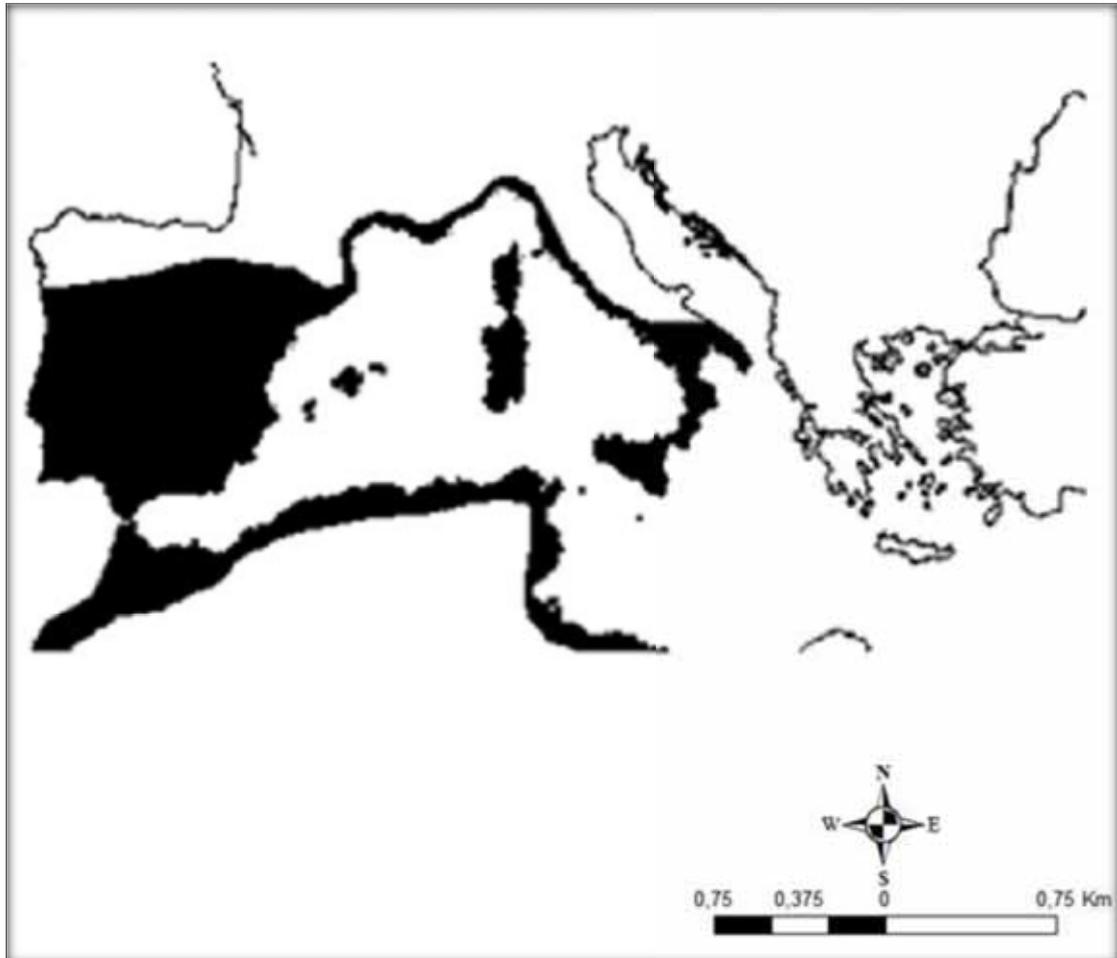
Figura 11 - Distribuição geográfica da azinheira no Mar Mediterrâneo.



Fonte: Tenorio et al. (2001).

Além do território português o *Quercus suber* ocupa outras regiões do Sudoeste da Europa (Espanha, Sul de França, Itália e Noroeste da antiga Iugoslávia), além do Norte de África (Marrocos, Argélia e Tunísia) (Figura 12). Mundialmente a área ocupada pela floresta de sobreiro aproxima-se dos 2.000.000 ha, situando-se 58% no Sudoeste da Europa e 42% no Magrebe, em que, a maior área de sobreiro concentra-se em Portugal com aproximadamente 35-40% do total (GIL, 2005).

Figura 12 - Distribuição geográfica dos sobreiros no Mar Mediterrâneo.



Fonte: (GDBC, 2014).

### 2.11 Montados Alentejanos

Na zona mediterrânea a azinheira e o sobreiro surgem em sistemas agrários de usos múltiplos denominados “montados” em português e “dehesas” em espanhol. (CAETANO, 2007). Segundo Brito-de-Carvalho (1994) o montado é um considerado como um sistema agroflorestal de uso do solo, caracteristicamente agro-silvo-pastoril, em que, a intervenção antrópica é fundamental para manter o equilíbrio. Esse tipo de sistema localiza-se na metade meridional da Península Ibérica, compondo uma forma ecológica de utilização do solo economicamente adequada e ajustada com as condições biofísicas. (CAETANO, 2007).

Segundo Gil (2005) ainda que se conheça o uso da cortiça desde a época romana como objeto flutuante e vedante, apenas no século XVIII os povoamentos de sobreiro passaram a ser apreciados como geradores de um bem precioso e

renovável, a cortiça. Em Portugal estas florestas foram resguardadas por meio de leis agrárias, sendo a citação mais antiga do ano 1209 no reinado de D. Dinis (NATIVIDADE, 1990; GIL, 2005). A exploração da cortiça em Portugal é muito antiga, existindo referência de que no século XIV a cortiça já era exportada (GIL, 2005).

Em meados do século XVIII segundo Gil (2005) foi iniciada a exploração do montado baseado na baixa densidade do arvoredo para aproveitamento agrícola sob coberto e uso do fruto para a nutrição do gado, mas de maneira especial para o suíno. A partir disso, os montados se transformaram em um tipo de exploração mista suberícola, cerealífera e pecuarista. Nos sistemas agro-silvo-pastoris, o elemento agrário é preenchido com a utilização de certas culturas e pastagens, geralmente utilizadas para consumo humano e dos animais. O componente animal do montado consiste em animais silvestres, geralmente carne de caça, e pela atividade pastorícia, que na maioria das vezes, tem maior peso econômico. (BRITO-DE-CARVALHO, 1992; 1994).

Os montados de sobreiro e azinho ocupam uma área superior a 1.000.000 de ha em Portugal, essas duas espécies correspondem a 36% das florestas portuguesas. (DGF, 2001). A azinheira, em termos de representatividade da área tomada, a quarta espécie de maior interesse no país, abrangendo 14% da área florestal, o que corresponde a 465.000 há. (DGF, 2001).

Em montados associados com maior número de azinheiras, o interesse dos produtores é focado principalmente na produção do fruto para alimentação animal. As bolotas desta espécie são consideradas as mais doces do género *Quercus* e são utilizadas principalmente na alimentação do porco preto (de montanha). As bolotas são ricas em hidratos de carbono e gorduras, e em associação com os pastos, propiciam uma alimentação completa ao gado e ao suíno, proporcionando uma produção de presunto e chouriços de alta qualidade e com elevado valor comercial. (CAETANO, 2007).

## 3 MATERIAL E MÉTODOS

### 3.1 Área de estudo – 1

A primeira área de estudo está localizada na região sul de Portugal, com as coordenadas centrais de 8°4'53.98"W e 38°51'16.12"N (Figura 13). Essa área tem uma dimensão aproximada de 133 km<sup>2</sup>.

#### 3.1.1 Clima

De acordo com a classificação de Köppen o clima na área 1 de estudo é classificado como Csa, denominado de clima temperado úmido com verão quente e seco nas regiões interiores do vale do Douro (parte do distrito de Bragança), assim como nas regiões a sul do sistema montanhoso Montejunto - Estrela (exceto no litoral oeste do Alentejo e Algarve) (IPMA, 2011).

A precipitação média anual varia entre 600 - 700 mm, a temperatura média anual está na faixa entre 16 a 17,5°C. (FERREIRA, 2000).

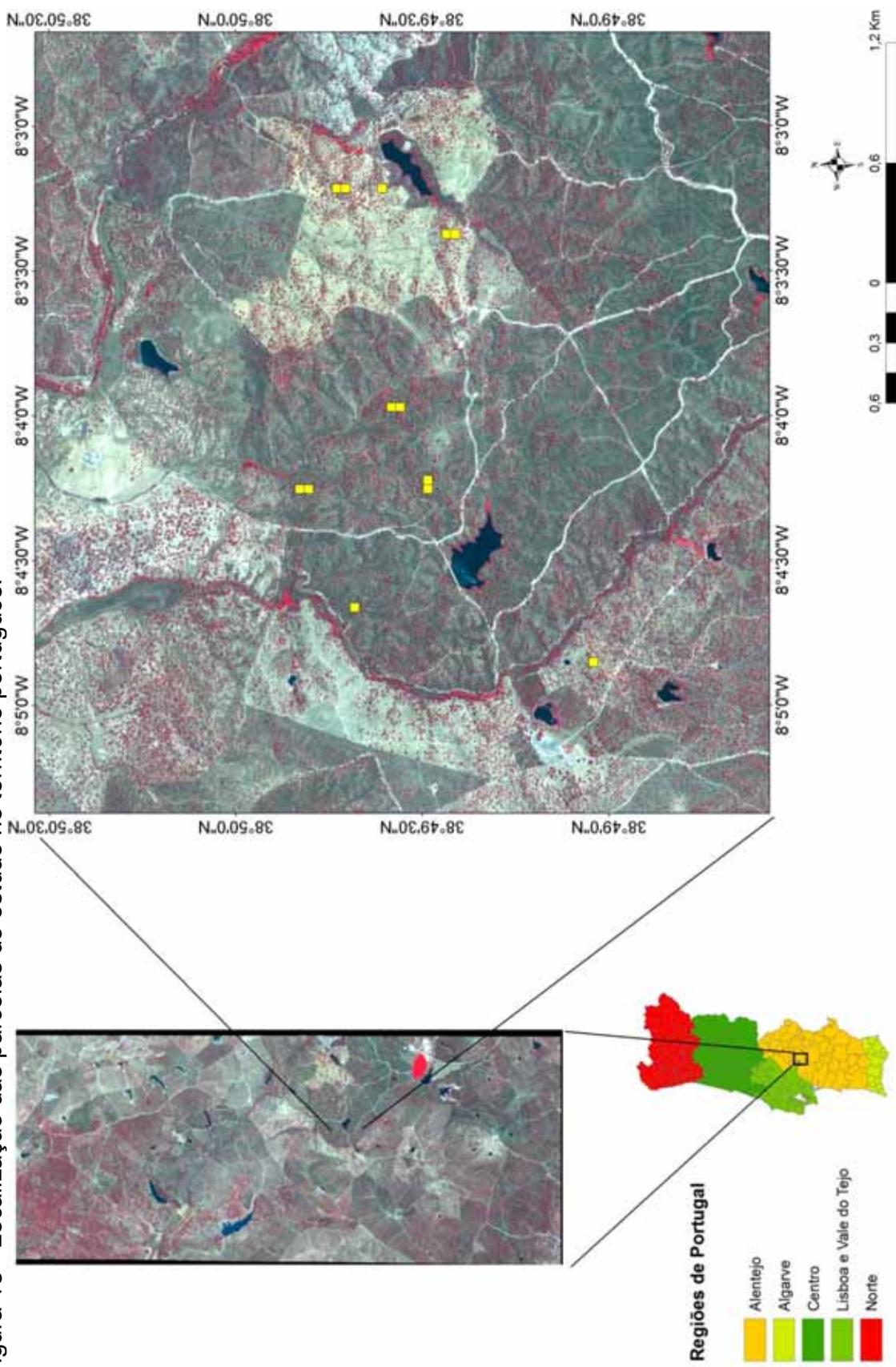
#### 3.1.2 Solo e relevo

O tipo de solo presente na região é o Cambissolo êutrico. O terreno da região é marcado com a presença de planícies, apresentando baixa variação de altimetria (altitude de aproximadamente 200 m).

#### 3.1.3 Vegetação

As florestas da região são compostas predominantemente por Azinheiras (*Quercus rotundifolia*) e Sobreiro (*Quercus suber*), com pequenas manchas de *Pinus pinaster*, *Pinus pinea* e *Eucalyptus globulus* em povoamentos puros e mistos.

Figura 13 - Localização das parcelas de estudo no território português.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

### 3.1.4 Softwares

Os softwares utilizados no presente estudo foram: ArcGIS Desktop v.10, ENVI versão 4.8, Definiens Developer (versão 8.0.1), software estatístico R.

### 3.1.5 Procedimentos metodológicos

Os procedimentos metodológicos utilizados na primeira parte dos trabalhos são ilustrados na Figura 14. Os detalhes de cada etapa são descritos a seguir:

Figura 14 - Fluxograma metodológico utilizado no presente estudo.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

### 3.1.6 Dados de satélite

Foi utilizada uma imagem do satélite QuickBird disponibilizada pela DigitalGlobe na forma denominada “Pan-sharpened” que possui 0,70 m de resolução espacial, uma composição colorida natural (vermelho, verde e azul) ou infravermelho (vermelho, verde e infravermelho-próximo) (Tabela 1). As imagens PAN são adquiridas com 11 bits, podendo ser entregues em 8 bits ou 16 bits. A data de

registro da imagem é de 8/8/2006. A seguir são apresentadas as características das imagens QUICKBIRD:

Tabela 1 - Dados do Satélite Quickbird

Resolução Espacial (Nominal)	0,61 m (nadir) Pancromática
	2,44 m (nadir) Multiespectral
	0,72 m (25° off-nadir) Pancromática
	2,88 (25° off-nadir) Pancromática
Resolução Espectral	Pancromático: 0,45 – 0,90 $\mu\text{m}$
	1 Banda (Azul): 0,45 – 0,52 $\mu\text{m}$
	2 Banda (Verde): 0,52 – 0,60 $\mu\text{m}$
	3 Banda (Vermelho): 0,63 – 0,69 $\mu\text{m}$
	4 Banda (Infravermelho próximo): 0,76 – 0,90 $\mu\text{m}$
Resolução Radiométrica	11 bits (2048 níveis de cinza)
Faixa imageada	16,5 km (nadir)
	20,8 km (25° off-nadir)
Precisão métrica	23 m CE, 17 m erro linear (sem pontos de controle)

Fonte: Adaptada de Digital Globe (2003)

### **3.1.7 Ortorretificação / Correção Geométrica**

As imagens do satélite QuickBird foram ortorretificadas baseadas na elevação digital do terreno do Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) e também foram geometricamente corrigidas com base em pontos de controle coletados com o Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS) e vértices geodésicos identificados tanto no solo quanto na imagem, utilizando o software ENVI versão 4.8 (ENVI, 2009). O erro médio quadrático (RMSE) foi de 0,49 m.

### **3.1.8 Máscara da vegetação**

Após o processo de ortorretificação da imagem, procedeu-se o processamento digital da imagem com o método de segmentação e classificação orientada a objeto, recorrendo ao programa Definiens Developer (versão 8.0.1).

O passo inicial da metodologia de distinção de espécies consistiu inicialmente no cálculo do NDVI (TUCKER, 1979), que se mostrou ser um bom identificador da vegetação arbórea. Este índice é empregado como banda adicional, com a finalidade de diminuir os problemas na discriminação da vegetação relativamente ao solo e arbustos de pequenas dimensões, resultantes da resolução espectral limitada do satélite Quickbird. (KEY et al., 2001).

Com base no NDVI, procedeu-se à obtenção de uma máscara de vegetação para a área de estudo. Realizou-se uma segmentação utilizando um limiar que maximiza o contraste entre regiões na imagem, os segmentos da imagem foram convertidos em objetos de imagens brilhantes e escuros, com base num valor de limiar que maximiza o contraste. (SOUZA et al., 2010).

Com intuito de diferenciar as espécies florestais presentes na área de estudo, foi executada uma segmentação multi-resolução com base em critérios aplicados apenas à banda do NIR. O método de segmentação multi-resolução, se baseia em um procedimento de otimização heurística, que calcula e diminui localmente a média da desigualdade de regiões com características idênticas para toda a imagem. (MATSUOKA; HAERTEL, 2007).

No processo de classificação digital da imagem foi usado o algoritmo do vizinho mais próximo, com base nas propriedades espectrais das quatro bandas e do NDVI de cada objeto (médias e desvio padrão) e ainda foram consideradas outras duas variáveis, como o brilho e a máxima diferença para as cinco bandas. (SOUZA et al., 2010). O algoritmo do vizinho mais próximo estima a densidade local de padrões de treino na vizinhança de um padrão desconhecido durante o procedimento de classificação. Posteriormente a classificação da imagem, realizou-se a avaliação da precisão da classificação digital, com base na realização de trabalho de campo. (SOUZA et al., 2010).

A máscara de vegetação para distinção de espécies florestais foi utilizada nesse estudo para planejar o inventário florestal (Tabela 2). Para se ter uma correspondência exata entre os dados adquiridos a partir da imagem de satélite e do

inventário florestal, a área de estudo foi dividida em grades de 45,5 m x 45,5m (2.070,25 m<sup>2</sup>) (Figura 15). A máscara de vegetação por espécie foi utilizada para determinar a composição por grade, bem como cobertura de solo em porcentagem, usando ArcGIS Desktop v.10 (ESRI, 2010). Quando a cobertura do solo de uma espécie era igual ou maior do que 75% da grade, ela foi considerada pura. Redes puras de *Quercus rotundifolia* foram divididas em dois estratos: a) 10% a 30% de cobertura do solo; e b) cobertura do solo superior a 30%. Parcelas de inventário florestal, cada um correspondendo a uma grade, foram selecionados por amostragem aleatória estratificada, por alocação proporcional.

Tabela 2 – Dados de campo obtidos para a azinheira

Composição	% coberto	Biomassa
		t/ha
Azinheira	20	20,0
Azinheira	29	25,4
Azinheira	23	20,2
Azinheira	19	18,7
Azinheira	30	29,8
Azinheira	17	19,5
Azinheira	34	40,9
Azinheira	34	35,2
Azinheira	37	48,1
Azinheira	39	29,2
Azinheira	29	21,5
Azinheira	27	29,4
Azinheira	47	45,9
Azinheira	33	28,6
Azinheira	20	23,3
Azinheira	23	18,9
Azinheira	48	34,2

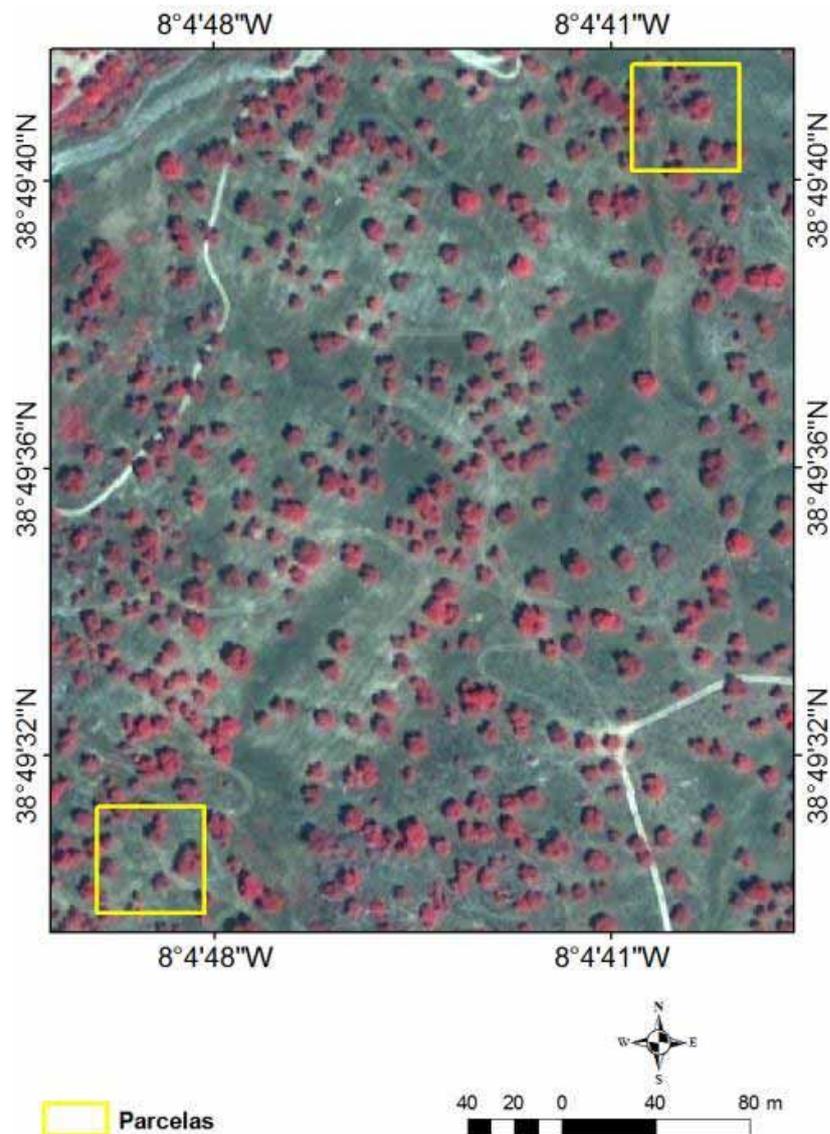
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

### 3.1.8 Estimativa da Biomassa Acima do Solo

O conjunto de dados de inventário florestal, coletados em 2011, foi composto por 17 parcelas. Todos os indivíduos apresentaram diâmetro à altura do peito de 60

cm ou mais. Em todas estas árvores individuais, os parâmetros dendrométricos foram medidos, ou seja, o diâmetro à altura do peito, altura total e raios da copa em 4 direções (norte, sul, leste e oeste) (AVERY, 1994) e sua localização geográfica foi gravada por GPS. A biomassa acima do solo (BAS) por árvore (eq. 10) foi estimada utilizando as funções alométricas eq. (7) a (9), de Paulo e Tomé (2006), em que  $w_w$ ,  $w_b$  e  $w_c$  são, respectivamente, a biomassa de madeira (kg); casca (kg); e copa (kg);  $d$  é o diâmetro da árvore (cm) na altura do peito e BAS é a biomassa acima do solo (kg). A BAS foi calculada como a soma de todas as árvores individuais biomassa por unidade de área (t/ha).

Figura 15 - Ilustração das parcelas sobre a imagem Quickbird utilizando a composição falsa cor 4R 3G 2B.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

$$ww = 0,164185 \cdot d^{2,011002} \quad (7)$$

$$wb = 0,600169 \cdot d^{1,355957} \quad (8)$$

$$wc = 1,909152 \cdot d^{1,200354} \quad (9)$$

$$BAS = ww + wb + wc \quad (10)$$

### **3.2 Área de estudo – 2**

A segunda área de estudo é denominada como Fazenda Dois Irmãos do Buriti, localizada próximo ao município de Selvíria, no estado do Mato Grosso do Sul (Figura 16). Esta área é pertencente à empresa Eldorado Brasil.

#### **3.2.1 Clima**

De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo Aw, com inverno seco e ameno e verão quente e chuvoso, com precipitações médias anuais de 1.370 mm, concentrada principalmente no período de outubro a março, a temperatura média anual é de 23,5°C e a umidade relativa do ar variando entre 70% e 80%. (RODRIGUES et al., 2007)

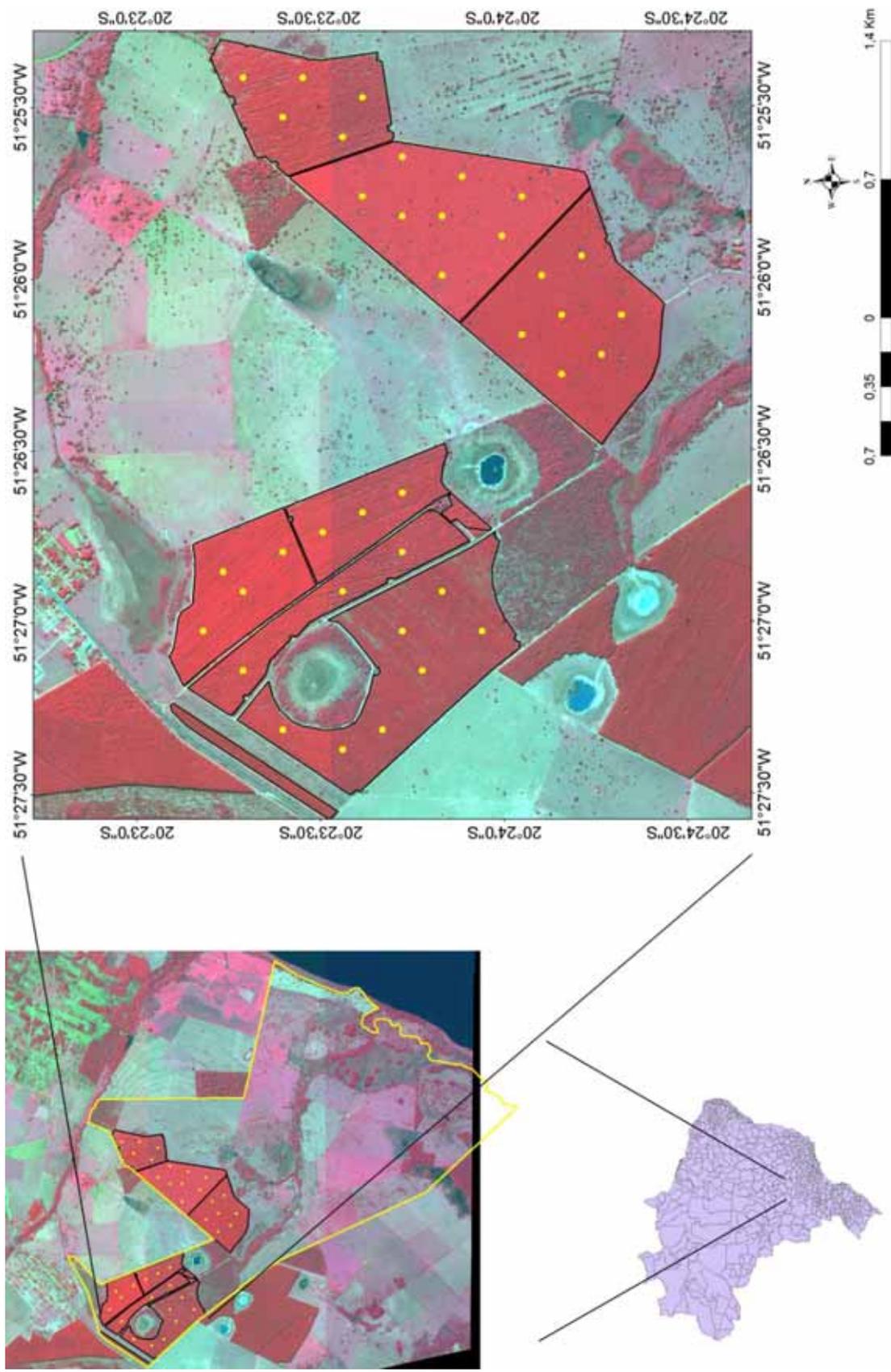
#### **3.2.2 Solo e relevo**

As classes de solos presentes nessa área de estudo são os Latossolos Vermelhos e Argissolos Vermelhos. A altitude média no local é de 335 m (EMBRAPA, 1999).

#### **3.2.3 Vegetação**

As tipologias florestais presentes na região são compostas basicamente de Eucalipto e algumas manchas de Cerrado e Cerradão.

Figura 16 - Localização das parcelas de estudo no território brasileiro.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Diferentemente da primeira área de estudo que contava com distintas espécies florestais em uma mesma localidade, essa localidade contou basicamente com áreas de eucalipto, por conta disso, não foi necessário à obtenção de uma máscara de vegetação para separar as espécies (Tabela 3). Nos talhões foram plantadas três espécies de eucalipto descritas a seguir:

Tabela 3 – Espécies de eucalipto presentes em cada talhão de estudo

Talhão	Espécie	Plantio
1	<i>E. urophylla</i>	19/10/2011
2	<i>E. urograndis</i>	09/05/2011
3	<i>E. urophylla</i>	20/10/2011
4	<i>E. urograndis</i>	04/05/2011
5	<i>E. grandis</i>	02/05/2011
6	<i>E. urophylla</i>	20/10/2011
7	<i>E. urophylla</i>	24/10/2011

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

### 3.2.4 Dados de satélite

As imagens utilizadas foram do satélite Pléiades disponibilizada pela EngSat na forma denominada “Pan-sharpened” que possui 0,50 m de resolução espacial, uma composição colorida natural (vermelho, verde e azul) ou infravermelho (vermelho, verde e infravermelho-próximo) (Tabela 4). A imagem obtida foi georreferenciada e corrigida geometricamente pela própria empresa que distribuiu a imagem. A data da imagem utilizada foi do dia 27/07/2013. A seguir são apresentadas as características das imagens Pléiades:

Tabela 4 – Dados do Satélite Pléiades

Resolução Espectral	Resolução	Comprimento de Onda	Bandas
Pancromática	0,50 m	470 – 830 nm	
		430 – 550 nm	Azul
Multiespectral	2 m	500 – 620 nm	Verde
		590 – 710 nm	Vermelha
		740 – 940 nm	Infravermelho Próximo

Fonte: Adaptada de Engesat (2013)

### 3.2.5 Estimativa da biomassa das áreas de eucalipto

Os 7 talhões plantados com eucalipto abrangem 37 parcelas. O inventário florestal foi realizado com base no “Método de área fixa com parcelas circulares”, em que, as parcelas apresentavam formato circular com uma área de 400 m<sup>2</sup> com raios de 11,24 m (Figura 17). Foram realizadas medições de CAP (circunferência na altura do peito) e por medições indiretas de altura (hipsômetro). A seguir são apresentados exemplos das parcelas e os dados do inventário florestal (Tabela 5) realizado pela empresa Eldorado.

Diversos trabalhos foram realizados em plantios de eucaliptos com intuito de avaliar a biomassa da parte aérea das árvores, utilizando para isso equações de regressão. Essas equações normalmente são baseadas em relações empíricas entre a biomassa dos componentes da árvore e o DAP (diâmetro à altura do peito) e a altura, ou a combinação dessas (BARROS, 2013). De acordo com Mello e Gonçalves (2008) as equações logarítmicas são muito apropriadas para a estimação da biomassa, visto que, apresentam como vantagem a redução da variância associada com o sucessivo aumento na altura da árvore. As equações específicas para cada parte do eucalipto independentemente do local, são descritas em Mello e Gonçalves (2008):

$$BioFuste = -4,54731 + 2,13859 * LnDAP + 1,0236 * LnH \quad (11)$$

$$BioCasca = -5,65757 + 0,891063 * LnDAP^2H \quad (12)$$

$$BioFolha = -5,66536 + 0,749721 * LnDAP^2H \quad (13)$$

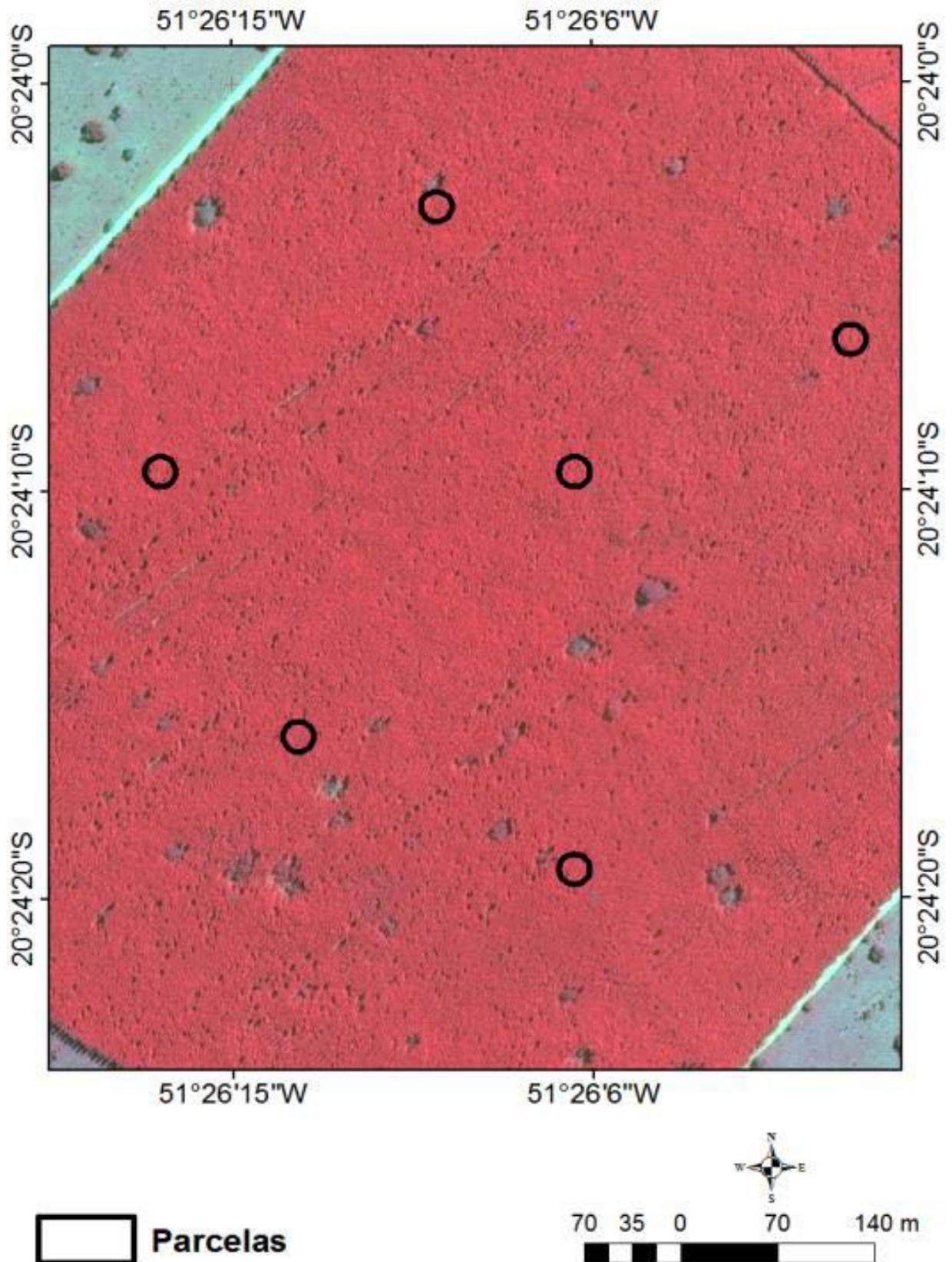
$$BioGalho = -8,80766 + 1,13508 * LnDAP^2H \quad (14)$$

$$BiorFina = 5,99232 + 4,69711 * LnDAP - 5,54655 * LnH \quad (15)$$

$$BiorGrossa = -5,21936 + 0,928862 * LnDAP^2H \quad (16)$$

em que: Ln - logaritmo neperiano, DAP – Diâmetro a 1,3 m de altura, H – altura total

Figura 17 - Ilustração das parcelas sobre a imagem Pleiádes utilizando a composição falsa cor 4R 3G 2B.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Tabela 5 – Dados do inventário florestal obtidos para o eucalipto

Parcela	Fustes (n/ha)	DapQ.médio (cm)	Área basal (m <sup>2</sup> )	HT.média (m)	HD.média (m)	VTCC							
						VTSC (m <sup>3</sup> /ha)	VCCC (m <sup>3</sup> /ha)	VCSC (m <sup>3</sup> /ha)	IMA (m <sup>3</sup> /ha/ano)	VTCC (m <sup>3</sup> /ha/ano)	IMA (m <sup>3</sup> /ha/ano)	VTSC (m <sup>3</sup> /ha/ano)	IMA (m <sup>3</sup> /ha/ano)
17	975	9,0	6,2	12,0	13,2	31,6	26,7	23,0	22,6	15,2	12,8	11,0	10,8
26	950	10,7	8,5	13,1	14,6	47,7	40,4	42,1	37,5	22,9	19,4	20,2	18,0
33	1,075	10,1	8,6	12,6	14,6	46,8	39,6	38,7	35,5	22,5	19,0	18,6	17,1
31	1,175	8,9	7,3	10,7	12,2	32,7	27,1	21,3	21,3	16,3	13,6	10,7	10,6
34	1,250	8,4	6,9	10,4	11,7	30,0	24,9	17,2	18,0	15,0	12,5	8,6	9,0
36	1,075	8,9	6,7	10,7	13,0	31,6	26,3	23,6	22,3	15,8	13,2	11,8	11,1
37	1,200	8,6	7,0	10,5	11,8	30,9	25,7	18,4	19,1	15,4	12,8	9,2	9,5
18	1,000	10,8	9,2	13,2	14,7	51,5	43,6	45,2	40,6	24,7	20,9	21,7	19,5
22	1,100	11,4	11,2	13,8	15,1	64,3	54,5	58,5	51,8	30,9	26,1	28,1	24,9
28	1,100	10,7	9,9	13,3	14,1	55,1	46,6	48,3	43,6	26,5	22,4	23,2	20,9
1	1,075	8,8	6,6	10,7	11,6	29,1	24,2	18,2	18,6	14,6	12,1	9,1	9,3
2	1,150	8,4	6,4	10,4	11,5	27,8	23,1	15,9	16,7	13,9	11,5	7,9	8,3
3	1,175	9,2	7,8	10,9	12,0	35,6	29,6	23,7	23,7	17,8	14,8	11,9	11,8
4	1,150	8,7	6,8	10,6	11,7	30,1	25,0	18,3	18,9	15,1	12,5	9,1	9,4
5	1,250	9,0	8,0	10,8	12,1	36,2	30,1	23,7	23,8	18,1	15,0	11,8	11,9
6	1,200	8,3	6,5	10,3	11,8	28,4	23,6	16,4	17,1	14,2	11,8	8,2	8,6
7	1,250	8,9	7,7	10,7	11,6	34,5	28,7	21,6	22,1	17,2	14,3	10,8	11,1
11	1,250	9,2	8,3	10,9	11,8	37,5	31,2	24,9	24,9	18,7	15,6	12,5	12,5
13	1,100	7,7	5,1	9,9	11,3	21,5	17,9	10,7	11,7	10,7	8,9	5,4	5,9
14	1,225	8,9	7,6	10,7	11,7	33,7	28,1	21,1	21,6	16,9	14,0	10,6	10,8

19	1,200	9,0	7,6	10,8	11,8	34,2	28,5	22,1	22,3	17,1	14,2	11,0	11,1
20	1,075	8,6	6,3	10,5	11,9	27,7	23,0	16,9	17,3	13,8	11,5	8,5	8,6
23	1,200	8,5	6,9	10,5	11,9	30,3	25,2	18,0	18,6	15,2	12,6	9,0	9,3
8	1,250	9,0	8,0	10,8	11,8	36,1	30,0	23,9	23,9	18,1	15,0	12,0	12,0
9	1,200	8,8	7,2	10,7	11,6	32,3	26,9	20,0	20,6	16,2	13,5	10,0	10,3
10	1,175	11,3	11,7	15,8	16,9	79,7	69,0	74,5	66,3	34,2	29,6	31,9	28,4
12	875	10,2	7,1	12,9	14,4	39,3	33,3	33,5	30,5	18,8	16,0	16,1	14,6
15	1,050	9,8	7,9	12,5	14,5	43,2	36,6	35,4	32,7	20,7	17,6	17,0	15,7
16	1,050	10,1	8,5	12,8	14,1	46,3	39,2	39,3	35,8	22,2	18,8	18,9	17,2
21	1,125	10,5	9,7	13,1	14,4	54,3	45,9	47,1	42,6	26,1	22,1	22,6	20,4
25	1,125	9,2	7,5	12,0	14,1	39,9	33,7	31,7	29,4	19,1	16,2	15,2	14,1
30	1,150	9,7	8,5	12,4	14,1	45,7	38,6	37,1	34,4	21,9	18,5	17,8	16,5
24	850	12,0	9,6	16,3	17,2	66,7	57,7	63,0	55,7	28,6	24,7	27,0	23,9
27	1,025	11,8	11,1	16,1	17,3	76,5	66,1	71,8	63,8	32,8	28,3	30,8	27,3
29	975	11,1	9,4	15,6	17,1	62,7	54,2	57,5	51,8	26,9	23,2	24,6	22,2
32	850	11,8	9,4	16,0	17,5	64,3	55,6	60,2	53,5	27,6	23,8	25,8	22,9
35	775	11,4	8,0	15,6	17,2	53,5	46,2	49,5	44,2	22,9	19,8	21,2	18,9

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Para a estimativa da biomassa foram utilizadas as seguintes equações:

$$BioTotal = BioFuste + BioCasca + BioFolha + BioGalho + BiorFina + BiorGrossa \quad (17)$$

$$BioAerea = BioFuste + BioCasca + BioFolha + BioGalho \quad (18)$$

$$BioRadicular = BiorFina + BiorGrossa \quad (19)$$

Cabe salientar que essas equações utilizadas foram estimadas pelos autores já citados para áreas de *Eucalyptus grandis* com 9 anos de idade.

### 3.3 Determinação dos Índices de Vegetação

Quatro índices de vegetação foram calculados com base nas bandas individuais dos satélites QuickBird e Pléiades (Tabela 6), com auxílio do Spatial Analyst do ArcGis. (ESRI, 2010). Os índices de vegetação utilizados neste estudo foram: a) Razão Simples (SR); b) Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI); c) Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI); d) A Enhanced Vegetation Index (EVI). Todos combinaram informações de duas ou mais bandas espectrais para melhorar o sinal da vegetação, minimizando o efeito do solo, efeitos atmosféricos e de irradiância solares. (JACKSON; HUETE, 1991).

O índice de vegetação (NDVI) é o mais utilizado, baseado no fato de que a vegetação é altamente reflexiva na região NIR, como um resultado da estrutura da folha ser fortemente absorvente no RED devido à absorção da clorofila (ROUSE et al., 1973). O Enhanced Vegetation Index (EVI) foi desenvolvido para otimizar o sinal de vegetação com maior sensibilidade em regiões altas de biomassa e maior monitoramento da vegetação por meio da redução do impacto do ruído de fundo do dossel e influências atmosféricas (HUETE et al., 1996; HUETE et al., 1997). A razão simples (SR) é calculada simplesmente dividindo o NIR pela banda RED. (JORDAN, 1969) e pretende captar o contraste entre as faixas vermelhas e NIR para pixels com vegetação.

O Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI) foi desenvolvido por Huete (1988), especialmente para as áreas com cobertura vegetal esparsa, para reduzir os efeitos de confusão no fundo do solo. De acordo com o mesmo autor  $L = 0,5$  é razoável para uma ampla gama de tipos de solo.

Tabela 6 – Índices de vegetação utilizados para estimativa de biomassa.

Índice	Equação	Referência
Razão Simples	$SR = \frac{NIR}{RED}$	(JORDAN, 1969)
Índice de Vegetação por Diferença Normalizada	$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$	(ROUSE et al., 1973)
Índice de Vegetação Ajustado ao Solo	$SAVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED + 0,5)} \cdot (0,5 + 1)$	(HUETE, 1988)
Índice de Vegetação Melhorado	$EVI = \frac{2.5 \times (NIR - RED)}{(NIR + 6 \times RED - 7.5 \times BLUE + 1)}$	(HUETE, et al., 1996; 1997)

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Os valores dos índices de vegetação por pixel foram obtidos através da média aritmética correspondente a cada parcela do inventário, esses dados foram utilizados para modelar a estimativa da BAS. Os valores médios dos índices de vegetação para cada uma das parcelas analisadas nas duas áreas de estudo são apresentados nos apêndices 1 e 2.

### 3.4 Desenvolvimento de modelos de regressão e Estimativa espacial da BAS

Inicialmente efetuou-se a análise de correlação entre as variáveis com o teste de Spearman, dado que as variáveis BAS na área de estudo 1 e Biomassa Total, aérea e radicular na área de estudo 2, não apresentavam distribuição normal, aferida pelo teste de normalidade de Shapiro Wilk (SHAPIRO et al., 1968) para um nível de significância de 95%. O desenvolvimento de modelos de estimação das variáveis analisadas foi efetuado com regressão linear simples, pelo método stepwise (eq. 20, onde  $\beta_0$  é a constante,  $\beta_1$  o declive da reta e IV é o índice de vegetação), como sugerido por vários autores (RAUSTE; HÄME, 1994; DRAKE et al., 2002a; DRAKE et al., 2002b; AUSTIN et al., 2003; POPESCU et al., 2003). A análise estatística foi implementada no software estatístico R. (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2012).

$$BAS = \beta_0 + \beta_1 \times VI \quad (20)$$

As propriedades estatísticas dos modelos permitem selecionar o que, potencialmente, se ajusta melhor aos dados e/ou que tem melhor capacidade preditiva. (CURTIS, 1967; TOMÉ, 1988; FANG; BAILEY, 1998; YUNCAI; PARRESOL, 2001). Estas propriedades foram aferidas pela soma dos quadrados dos resíduos (SQR), pelo coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e pelo coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{aj}$ ) o índice de classificação do modelo (IORD) e o índice de diferença R2 (IR2). (MYERS, 1986). O modelo de IORDE é definido como função da soma dos quadrados dos resíduos, classificado crescente por valor SQR. O grau de diferença na R2 (IR2) é a diferença entre o máximo de R2 e este valor de cada uma das funções ajustadas. (TOMÉ, 1988).

Complementarmente, as estatísticas PRESS, correspondente à soma dos quadrados dos resíduos (eq. 21) e APRESS, correspondente à soma dos valores absolutos dos resíduos (eq. 22), assim como os seus valores médios foram usados, tal como referem Clutter et al. (1983) e Myers (1986) como um verdadeiro teste de validação, em que se considera o melhor modelo o que tem menores valores das referidas estatísticas.

Com base nos critérios acima referidos ordenaram-se, por ordem crescente os modelos, considerando-se o melhor modelo o que apresentava menores valores de SQR, maiores valores de  $R^2$  e  $R^2_{aj}$  e menores valores de PRESS e APRESS. Os modelos foram classificados de acordo com os critérios acima referidos e o melhor modelo é aquele que apresenta os valores mais baixos.

$$PRESS = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_{i,-1})^2 \quad (21)$$

$$APRESS = \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_{i,-1}| \quad (22)$$

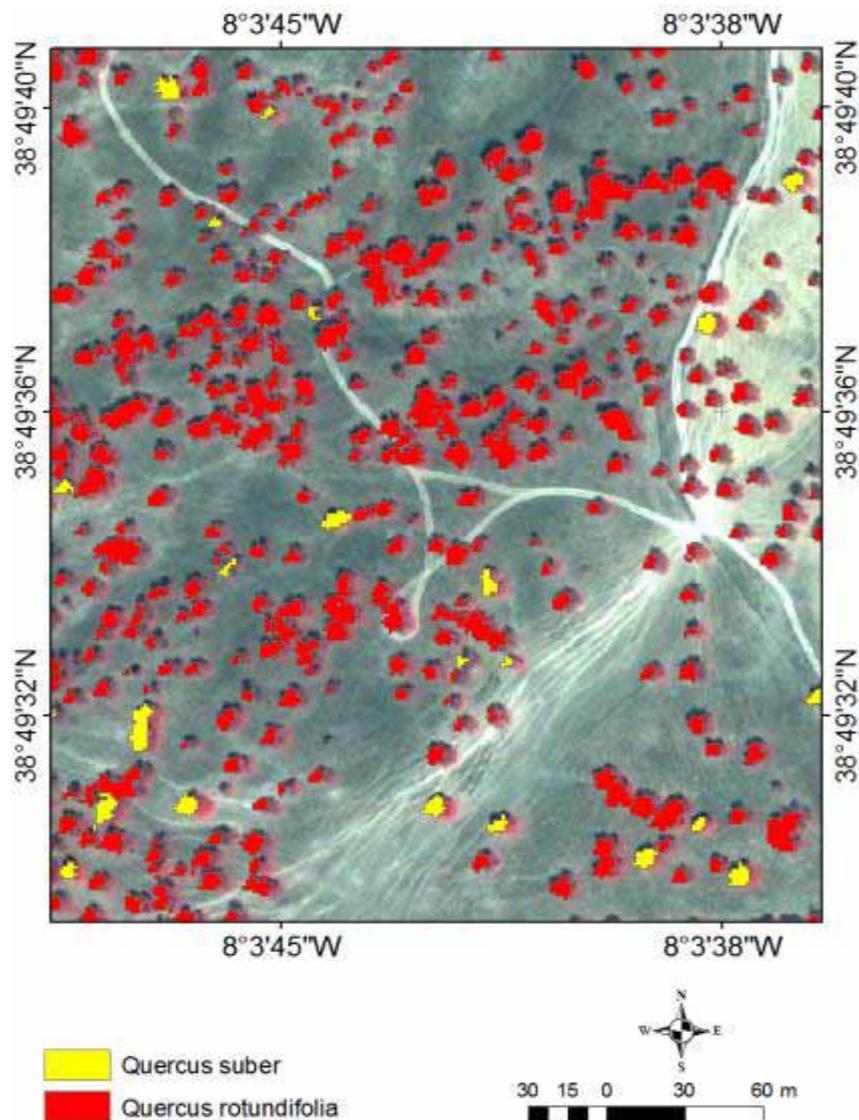
A heteroscedasticidade associada ao termo do erro dos modelos e a normalidade dos resíduos studentizados foram avaliadas a primeira pela análise, na forma gráfica, da relação entre os resíduos studentizados e a estimativa da variável dependente; e a segunda por meio dos gráficos de probabilidade normal e do teste de normalidade de Shapiro Wilk, para um nível de probabilidade de 99%.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Classificação de Imagens

A Figura 18 apresenta o resultado da segmentação multi-resolução e processo de classificação orientada a objetos para uma pequena área da região sul de Portugal utilizando a imagem Quickbird, em que há uma maior predominância de *Quercus rotundifolia*. O resultado entre a classificação e a verdade terrestre obtida pela estatística Kappa (CONGALTON et al., 1983; STEHMAN, 1997) foi de 78% e a precisão foi de global de 89%.

Figura 18 - Ilustração do resultado da máscara de vegetação na distinção de espécies florestais.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

## 4.2 Análise de correlação

A matriz de correlação de Spearman para um nível de significância de 95% apresentaram fortes correlações positivas entre a BAS e todos os índices de vegetação analisados no estudo, ou seja, SR (0,850); NDVI e SAVI (0,836); e EVI (0,771) (Tabela 7). Já os resultados na área de estudo 2 para as variáveis Biomassa Total, Biomassa Aérea e Biomassa Radicular, com as imagens sintéticas, demonstraram que a correlação entre as variáveis é fortemente negativa em todos os casos avaliados (SR -0,681; NDVI -0,679; SAVI -0,672; EVI -0,564) (Tabela 8). O EVI para as duas situações analisadas foi o índice que apresentou os piores coeficientes de correlação.

De acordo com Pearson e Miller (1972) e Jensen (2009) têm sido demonstrado desde a década de 60 que existe uma relação direta entre a resposta espectral no NIR com as variáveis relacionadas com biomassa, porém, a resposta do visível apresenta uma relação inversa, particularmente no RED. O comprimento de onda do NIR apresenta como característica uma alta capacidade de reflexão da vegetação e uma alta capacidade de absorção no RED (MUTANGA; SKIDMORE, 2004; PONZONI; SHIMAKUBURO, 2009; BERRA et al., 2012). Basicamente todos os índices de vegetação estudados utilizaram uma combinação dessas bandas, com exceção do EVI que utilizou também a banda azul.

Tabela 7 – Coeficientes de correlação entre a BAS e os índices de vegetação para as parcelas de azinheira

	BAS	NDVI	EVI	SR	SAVI
BAS	1				
NDVI	0,836	1			
EVI	0,771	0,882	1		
SR	0,850	0,996	0,886	1	
SAVI	0,836	1,000	0,882	0,996	1

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Tabela 8 – Coeficientes de correlação entre as biomassas e os índices de vegetação para as parcelas de eucalipto

	BIOTOTAL	BIOAEREA	BIORADICULAR	NDVI	SR	SAVI	EVI
BIOTOTAL	1						
BIOAEREA	1,000	1					
BIORADICULAR	1,000	1,000	1				
NDVI	-0,679	-0,679	-0,682	1			
SR	-0,681	-0,681	-0,684	0,998	1		
SAVI	-0,672	-0,672	-0,674	0,999	0,998	1	
EVI	-0,564	-0,564	-0,566	0,811	0,818	0,818	1

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Semelhante aos resultados obtidos para a área de estudo 1, foram obtidas correlações positivas de biomassa por Pinheiro et al. (2009) com um NDVI (0,481), SR (0,443) e SAVI (0,477), embora com valores menores. A diferença pode ser explicada pelas diferentes estruturas de suporte, no caso deste estudo, os estandes eram abertos com camadas de arbusto e sub-bosque com baixa densidade, enquanto em Pinheiro et al. (2009) a área de estudo correspondia a uma densa camada arbusto sub-bosque.

Foram obtidos resultados contrários para a área 2, porém esses resultados se assemelharam aos obtidos por Watzlawick et al. (2009) que avaliaram a biomassa em plantios de *Araucária angustifolia*; Watzlawick et al. (2006) em plantios de *Pinus taeda* ambos com densidade muito alta. Os autores encontraram alta correlação negativa entre biomassa e NDVI (-0,740 e -0,800, respectivamente), SR (-0,71 e -0,750, respectivamente), e SAVI (-0,77 e -0,70, respectivamente). Maciel (2002) obteve correlações negativas de biomassa com o SAVI (-0,83) utilizando o TM Landsat em uma floresta primária na Amazônia Oriental. Matos e Kirchner (2008) utilizando o satélite IKONOS II para estimar a biomassa de uma Floresta Ombrófila Densa também obtiveram correlações negativas com a biomassa e o NDVI e SAVI (-0,070 e -0,058 respectivamente).

Segundo vários autores (WANG et al., 2005; PONZONI; SHIMAKUBURO, 2009; ZANZARINI et al., 2013) um aumento na cobertura do solo não aumenta NDVI, devido a sua saturação rápida, porque o índice se estabiliza, embora tivesse ocorrido um aumento na densidade do dossel, o índice torna-se insensível ao aumento da biomassa.

De maneira semelhante com exceção ao sinal, os menores valores de correlação foram encontrados para o EVI para as áreas 1 e 2 (0,771 e -0,564). Isso é justificado para a área 1 devido ao fato de que este índice foi desenvolvido para melhorar o monitoramento da vegetação com alta biomassa, diminuindo a influência do sinal de solo a partir do sub-bosque e reduzindo as influências atmosféricas (HUETE et al., 1997; ARTOLI et al., 2004).

Já para a área 2 devido à idade dos plantios de apenas 2 anos pode ter originado alguma confusão com a matriz de correlação devido ao estágio de crescimento das espécies, possivelmente com povoamentos mais velhos esse índice poderá apresentar resultados mais satisfatórios em relação aos outros analisados. Outro pressuposto que pode ter levado a resultados insatisfatórios para o EVI, corresponde às equações utilizadas, pois as mesmas foram desenvolvidas para plantios de *Eucalyptus grandis* com 9 anos de idade. Como a área de estudo 2, apresentava idade de 2 anos e espécies diversas, isso pode ter favorecido a confusão dos resultados da estimativa de biomassa e a correlação com o EVI.

Os bons coeficientes de correlação entre os índices de vegetação analisados juntamente com a BAS (área 1) parecem estar associados com a época do ano em que a imagem foi adquirida. Para os países do Mediterrâneo, no horário de verão (estação seca), o sub-bosque tem uma cor muito leve, devido à presença de vegetação seca, possibilitando maximizar o contraste entre as árvores perenes de *Quercus rotundifolia* e o fundo herbáceo seco. Carreiras et al. (2006) e Thenkabail et al. (2004), também se referem este tipo de fenômenos em seus estudos, considerando-se imagens de alta resolução. Para a área 2 apesar da imagem também sido adquirida em um período de estiagem na região de estudo, esse fator não exerce grande influência visto que os povoamentos de eucalipto analisados são bem densos.

### **4.3 Modelagem da Biomassa Acima do Solo (BAS)**

Na Tabela 9 podem-se verificar as equações ajustadas para as estimativas de BAS (área 1); já nas Tabelas 10 a 12 encontram-se as equações de Biomassa Total, Biomassa Aérea e Biomassa Radicular (área 2). Analisando os resultados obtidos pelos ajustes, nota-se que os modelos obtidos pelo método de seleção de variáveis *stepwise* apresentaram bons ajustes para os dados analisados. As propriedades

estatísticas dos diferentes modelos podem ser vistos observados nas tabelas a seguir. Na Tabela 9 o modelo com o melhor desempenho foi aquele cuja variável independente era o NDVI apresentando um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 75,6% e um coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{aj}$ ) de 73,7%. Ao analisar as estatísticas de PRESS e APRESS, pode ser verificado que a função M1 tem os valores mais baixos, embora muito semelhante ao SAVI e SR, porém a função apresentou um SQR menor do que os outros índices de vegetação testados.

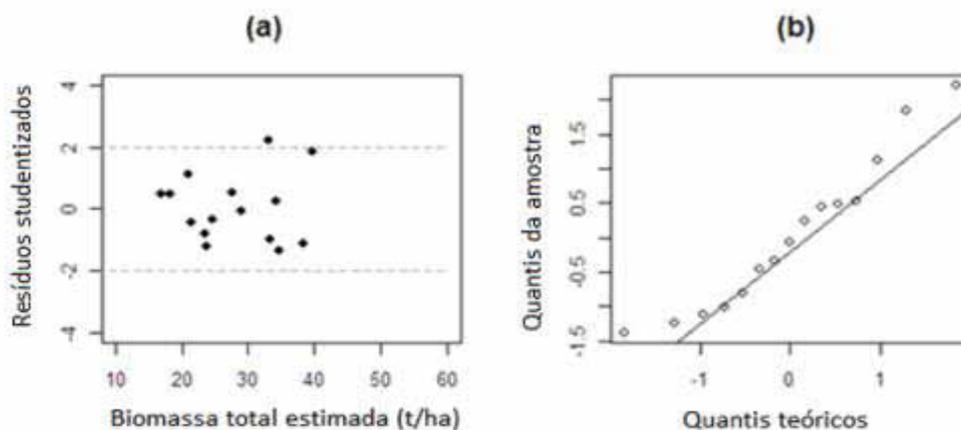
Tabela 9 – Modelos estatísticos elaborados para estimar a Biomassa Acima do Solo da azinheira.

Modelo	Equação	SQR	IORD	$R^2$	$R^2_{aj}$	PRESS	APRESS
M1	$BAS = -24,156 + 203,642 \times NDVI$	239,27	1	0,756	0,737	0,0197	0,4824
M2	$BAS = -24,116 + 135,736 \times SAVI$	239,79	2	0,755	0,736	0,0197	0,4822
M3	$BAS = -62,571 + 52,580 \times SR$	251,00	3	0,744	0,724	0,0182	0,4721
M4	$BAS = 246,550 + 732,610 \times EVI$	363,34	4	0,629	0,600	0,0246	0,5379

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A análise dos resíduos studentizados não mostrou variações sistemáticas, os gráficos de probabilidade normal se aproximam de uma linha reta (Figura 19) e normalidade dos resíduos não é rejeitada pelo teste de Shapiro-Wilk. Todos os modelos, exceto M4, produzem resultados semelhantes, com diferenças mínimas nas propriedades estatísticas.

Figura 19 - Resíduos studentizados (a) e a probabilidade normal gráfica (b) do modelo M1.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Os modelos com melhor capacidade preditiva são M1 e M2. Na literatura foram encontradas poucas referências para a estimativa de biomassa em função da utilização de índices de vegetação obtidos por meio de imagens de alta resolução espacial. Os resultados deste estudo são consistentes com os de Thenkabail et al. (2006), onde o melhor modelo para a estimativa da biomassa em uma plantação de óleo de palma na África, era uma função NDVI com  $R^2$  de 72%. Da mesma forma, outros autores (WATZLAWICK et al., 2006; WATZLAWICK et al., 2009), relataram que os modelos lineares simples com SAVI e NDVI como variáveis independentes têm as melhores capacidades preditivas para estimativas BAS, apresentando um coeficiente de determinação ajustado de 57% e 53%, respectivamente.

Além disso, resultados análogos foram encontrados em vários estudos com base em índices de vegetação derivados de imagens de satélite de resolução espacial média e baixa (HÄME et al., 1997;. ARAÚJO, 1999; DONG et al., 2003;. MACIEL et al., 2009.).

#### **4.4 Biomassa Total, Biomassa Aérea e Biomassa Radicular**

Nas Tabelas 10 a 12 os modelos que apresentaram o melhor desempenho foram aqueles cuja variável independente era o SAVI, apresentando os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) de 64,6%; 64,8%; 64,0% e os coeficientes de determinação ajustado ( $R^2_{aj}$ ) de 63,6%; 63,5%; 62,6% respectivamente. Analisando os resultados do PRESS e APRESS, pode ser acurado que o modelo M1 tem os valores mais baixos para a Biomassa Total. No entanto mesmo apresentando resultados semelhantes ao NDVI e SR, o SQR obtido para o modelo M1 foi maior do que os outros índices de vegetação testados, sendo então determinado como o melhor modelo para a predição da Biomassa Total.

Tabela 10 – Modelos estatísticos elaborados para estimar a Biomassa Total do eucalipto.

Modelo	Equação	SQR	IODR	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>aj</sub>	PRESS	APRESS
M1	$BIOTOTAL = -1056,7 + 1428,8 \times SAVI$	14596,1	1	0,646	0,633	0,00051	0,09483
M2	$BIOTOTAL = -1588,4 + 1431,6 \times NDVI$	14691,4	2	0,644	0,630	0,00051	0,09478
M3	$BIOTOTAL = -49,488 + 589,82 \times SR$	15149,7	3	0,633	0,619	0,00052	0,09576
M4	$BIOTOTAL = -975,56 - 136,19 \times EVI$	21590,4	4	0,477	0,457	0,00053	0,10043

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Tudo o que ocorreu com o modelo para estimativa da Biomassa Total, foi obtido para os modelos da estimativa da Biomassa Aérea e da Biomassa Radicular, onde, o SAVI foi o índice de vegetação que apresentou o maior SQR e por conta disso foi selecionado como o melhor modelo de predição.

Tabela 11 – Modelos estatísticos elaborados para estimar a Biomassa Aérea do eucalipto.

Modelo	Equação	SQR	IODR	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>aj</sub>	PRESS	APRESS
M1	$BIOAEREA = -799,9 + 1080 \times SAVI$	8298,8	1	0,648	0,635	0,00091	0,12654
M2	$BIOAEREA = -1202,3 + 1082 \times NDVI$	8354,0	2	0,646	0,632	0,00090	0,12646
M3	$BIOAEREA = -37,459 + 444,864 \times SR$	8616,7	3	0,635	0,621	0,00092	0,12777
M4	$BIOAEREA = -738,99 - 104,88 \times EVI$	12289,7	4	0,479	0,459	0,00094	0,13397

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Tabela 12 – Modelos estatísticos elaborados para estimar a Biomassa Radicular do eucalipto.

Modelo	Equação	SQR	IODR	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>aj</sub>	PRESS	APRESS
M1	$BIORADICULAR = -256,7 + 348,71 \times SAVI$	885,3	1	0,640	0,626	0,00842	0,38521
M2	$BIORADICULAR = -385,9 + 349,41 \times NDVI$	890,7	2	0,638	0,624	0,00839	0,38504
M3	$BIORADICULAR = -12,02 + 144,9 \times SR$	917,9	3	0,627	0,612	0,00852	0,38899
M4	$BIORADICULAR = -236,5 - 31,29 \times EVI$	1302,9	4	0,470	0,450	0,00869	0,40888

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

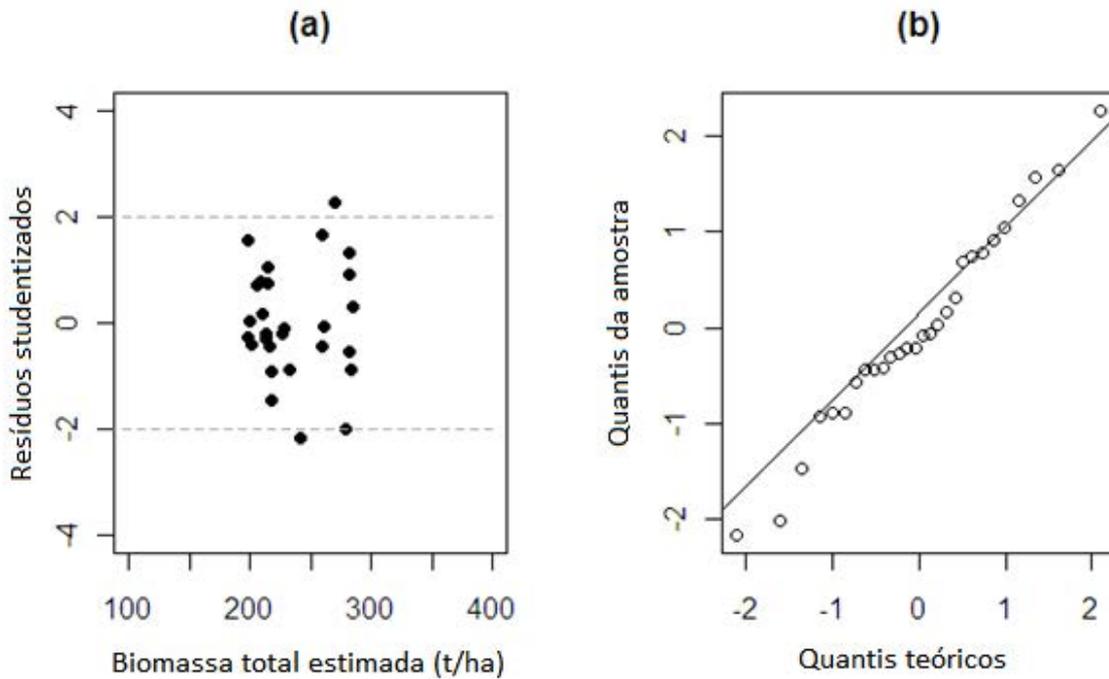
Novamente os modelos M4, cuja variável independente era EVI, foram aqueles que apresentaram os resultados menos significativos, quando comparados aos outros. Os resultados obtidos nesse estudo foram semelhantes aos obtidos por Hentz et al. (2014) em que o SAVI foi o índice de vegetação selecionado em seu modelo para estimativa de biomassa em uma Floresta Ombróflia Mista no Paraná.

Os melhores resultados foram obtidos com a utilização do SAVI, possivelmente graças a sua baixa saturação em comparação ao NDVI. Como não havia presença de solo, visto que, a área de estudo estava completamente tomada pelo eucalipto, isso pode ter favorecido para o saturamento do NDVI e por conta disso o SAVI se sobressaiu. Bolfe et al. (2012) correlacionando o SAVI com a biomassa em diversos estágios de vegetação em áreas de sistemas agroflorestais, encontraram valores de  $R^2$  variando 0,24 e 0,62. Os autores verificaram ainda que esses valores diminuía nas parcelas com maiores valores de biomassa.

Possivelmente como as parcelas tinham 2 anos de idade na época da coleta dos dados de campo e na imagem de satélite, esse fato leva a supor que futuramente, próximo a idade de corte do eucalipto (7 e 10 anos), os resultados serão totalmente diferentes aos obtidos nesse estágio de desenvolvimento da cultura. Visto que, os valores de biomassa serão muitos superiores e tanto o NDVI como o SAVI tenderão a apresentar os piores resultados, e o EVI, que foi desenvolvido para estimava de grandes volumes de biomassa, poderá ser o índice de vegetação superior, e o recomendado para as estimativas via sensoriamento remoto de alta resolução espacial.

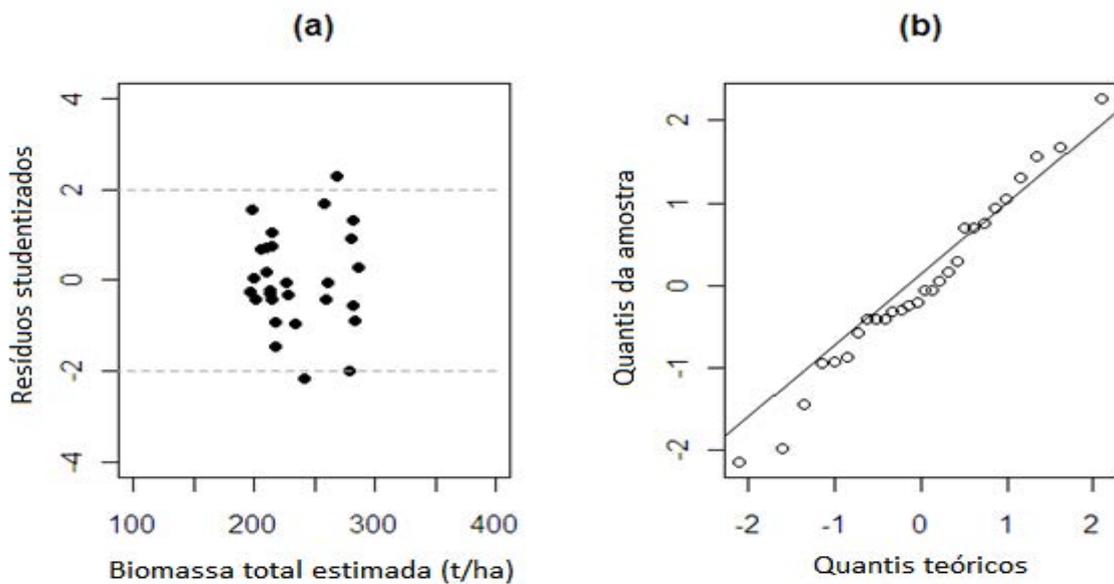
Assim como os resultados obtidos na área 1, a análise dos resíduos studentizados não apresentou variações sistemáticas, os gráficos de probabilidade normal se aproximaram de uma linha reta (Figuras 20 a 31) e normalidade dos resíduos não foi rejeitada pelo teste de Shapiro-Wilk.

Figura 20 - Resíduos studentizados (a) e gráfico de probabilidade normal (b) para o modelo com SAVI como variável independente.



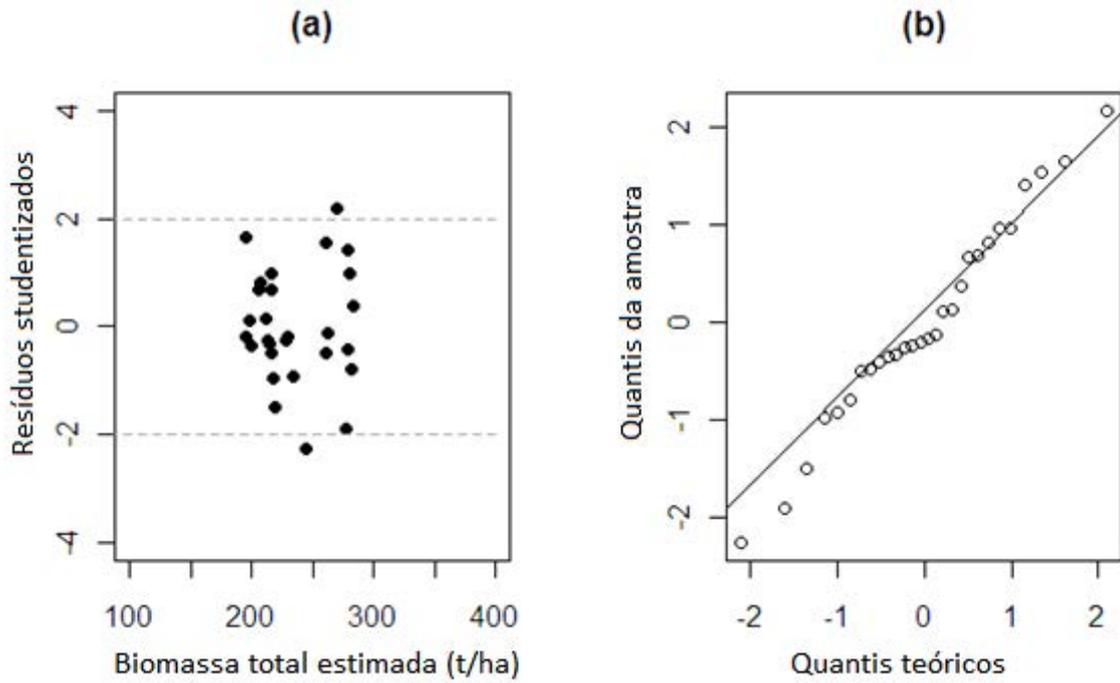
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 21 - Resíduos studentizados (a) e gráfico de probabilidade normal (b) para o modelo com NDVI como variável independente.



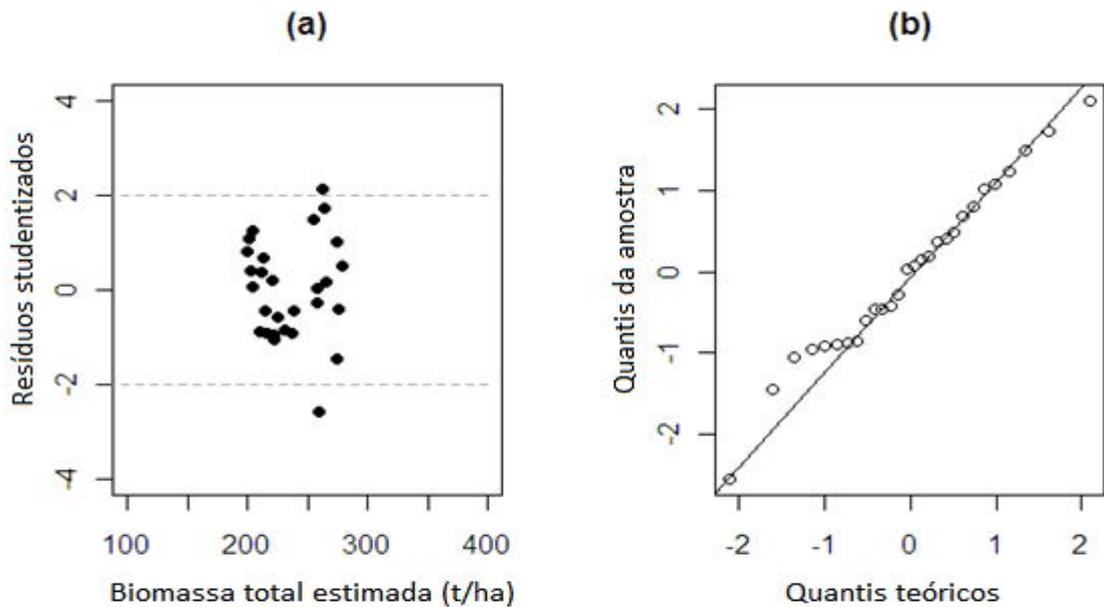
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 22 - Resíduos studentizados (a) e gráfico de probabilidade normal (b) para o modelo com SR como variável independente.



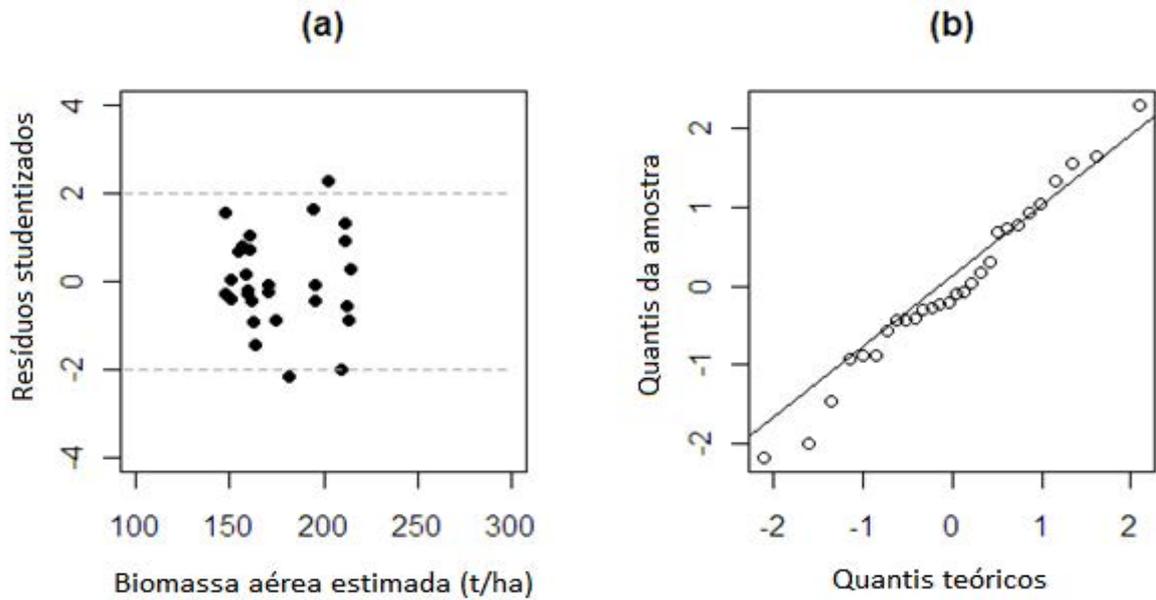
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 23 - Resíduos studentizados (a) e gráfico de probabilidade normal (b) para o modelo com EVI como variável independente.



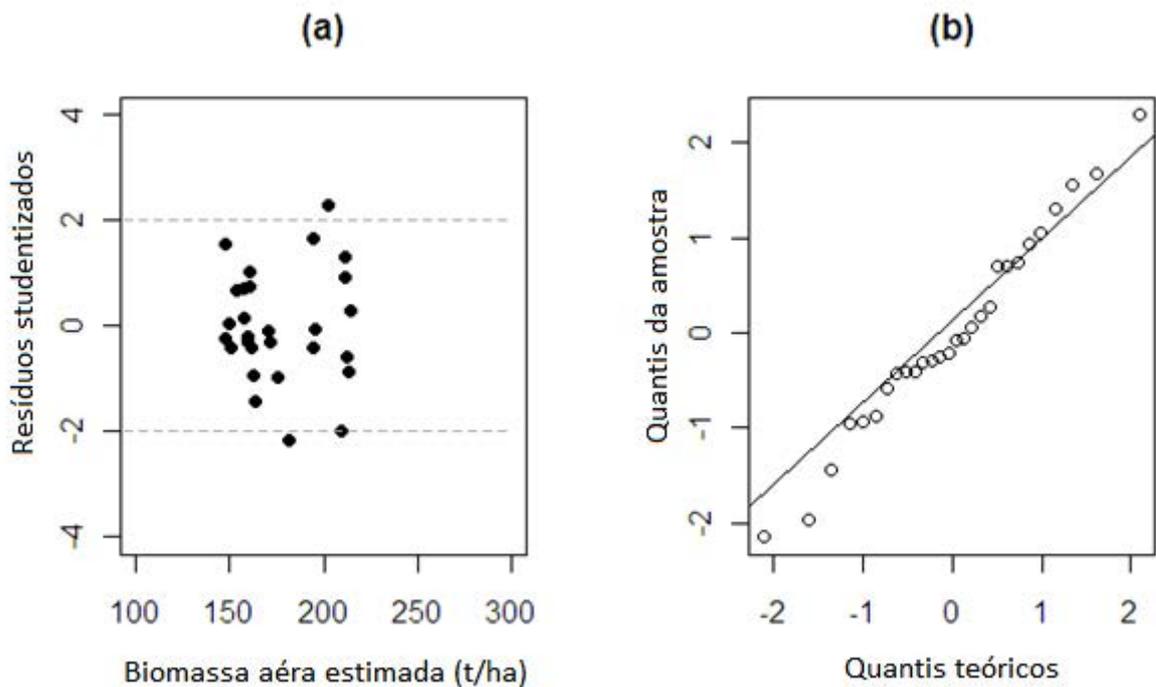
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 24 - Resíduos studentizados (a) e gráfico de probabilidade normal (b) para o modelo com SAVI como variável independente.



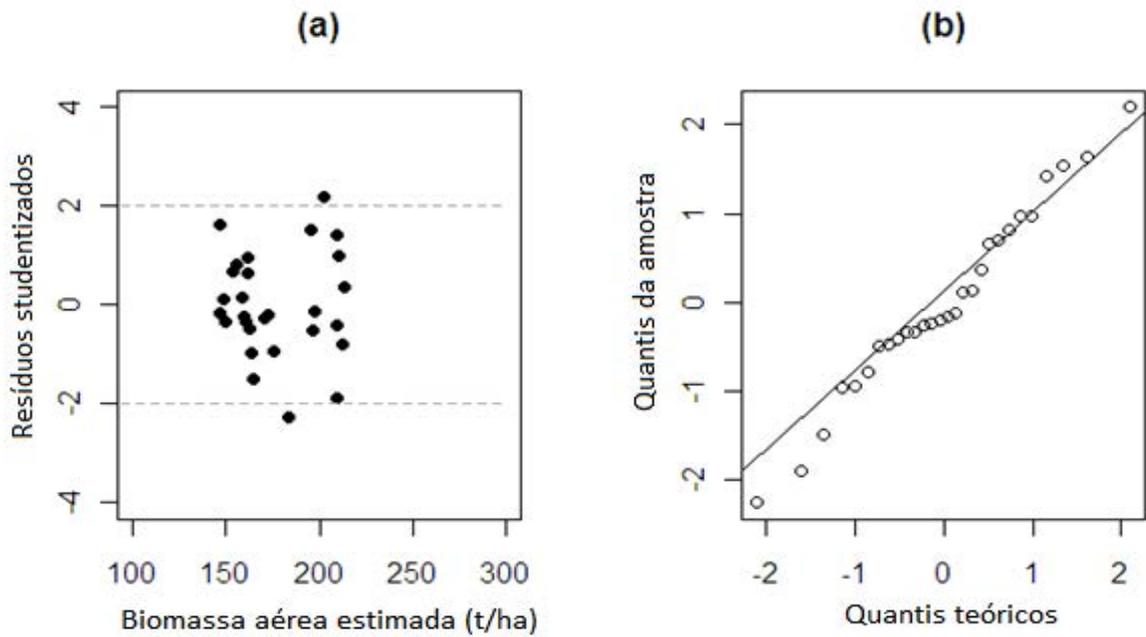
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 25 - Resíduos studentizados (a) e gráfico de probabilidade normal (b) para o modelo com NDVI como variável independente.



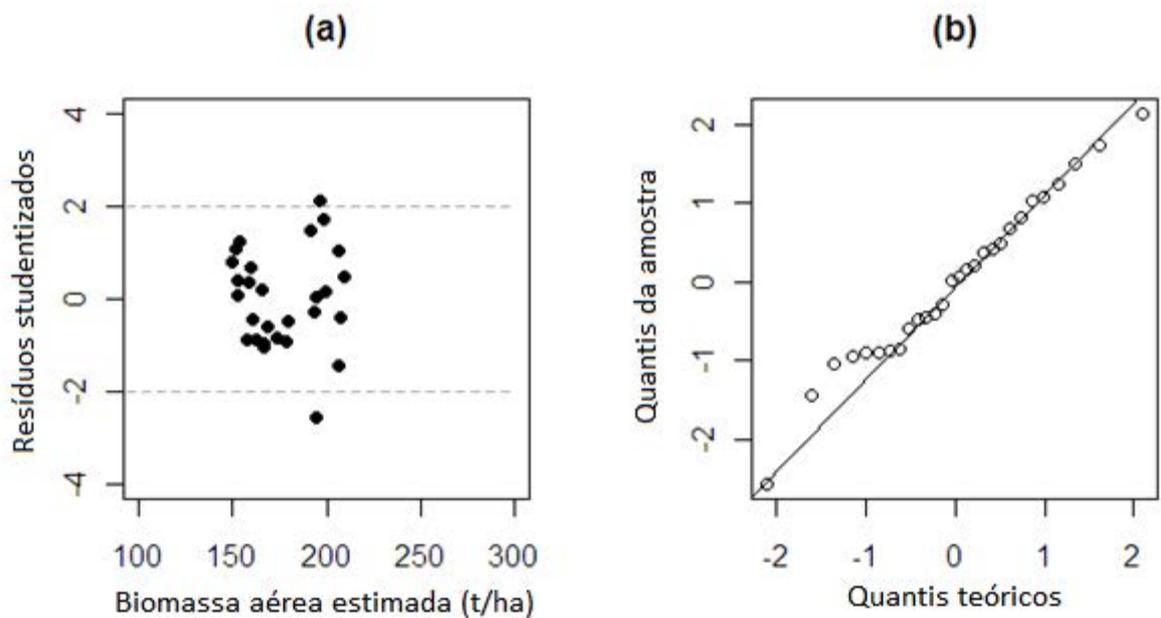
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 26 - Resíduos studentizados (a) e gráfico de probabilidade normal (b) para o modelo com SR como variável independente.



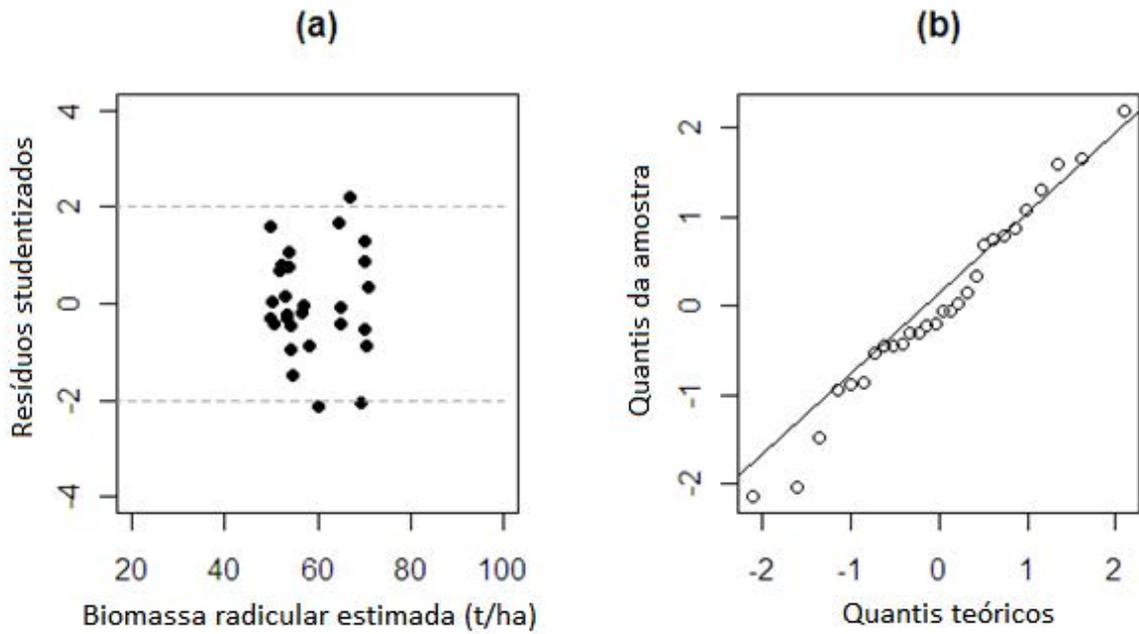
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 27 - Resíduos studentizados (a) e gráfico de probabilidade normal (b) para o modelo com EVI como variável independente.



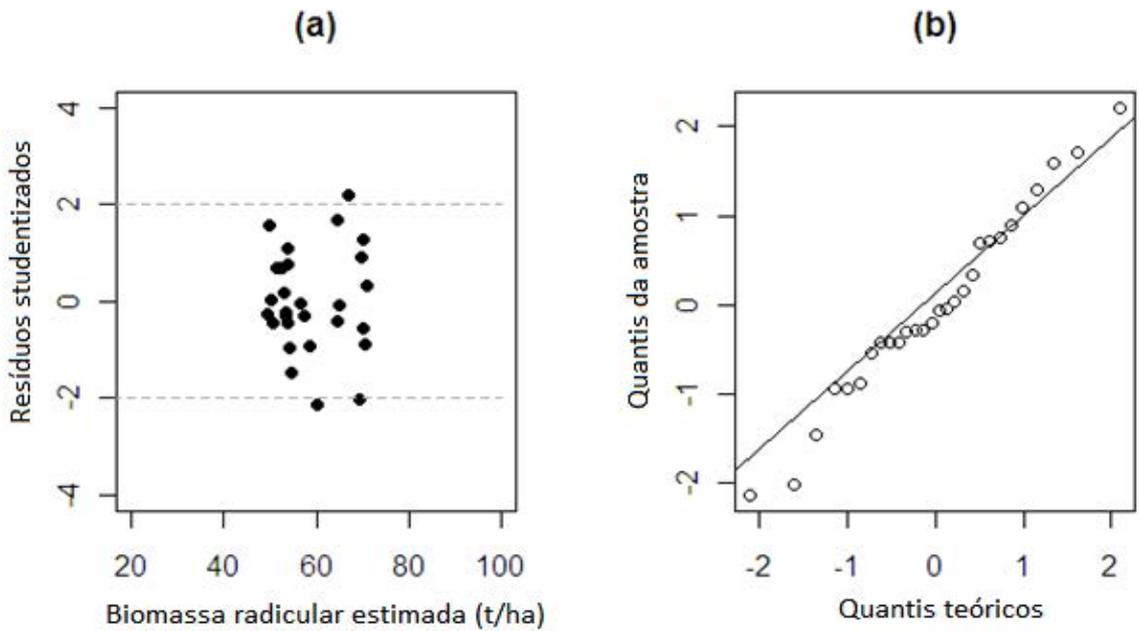
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 28 - Resíduos studentizados (a) e gráfico de probabilidade normal (b) para o modelo com SAVI como variável independente.



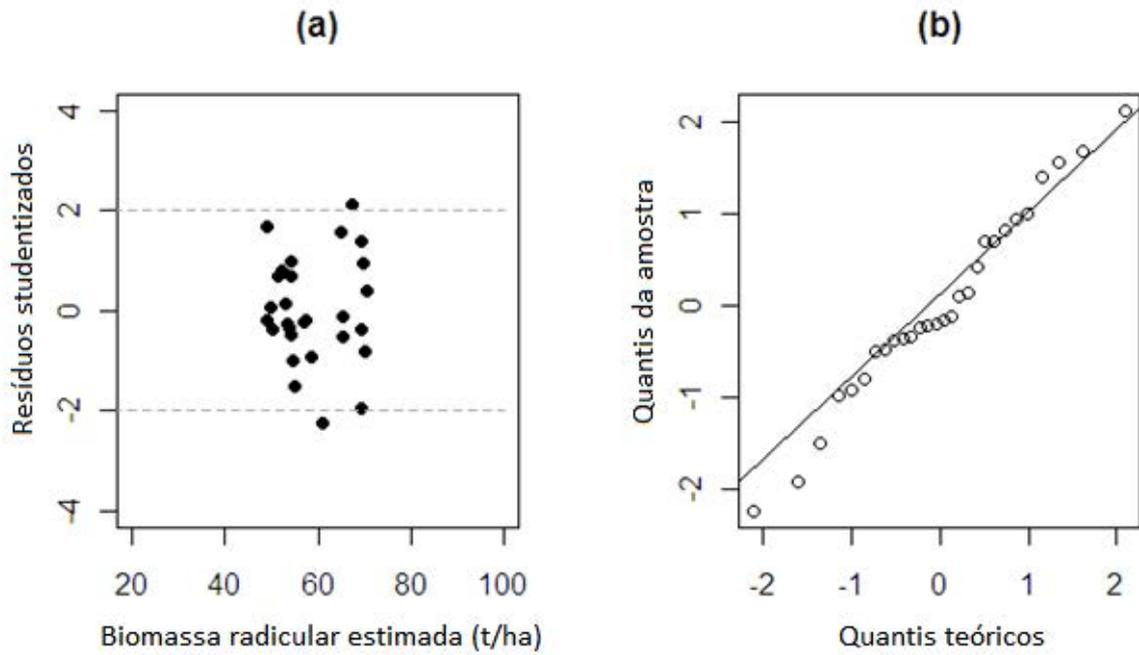
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 29. Resíduos studentizados (a) e gráfico de probabilidade normal (b) para o modelo com NDVI como variável independente.



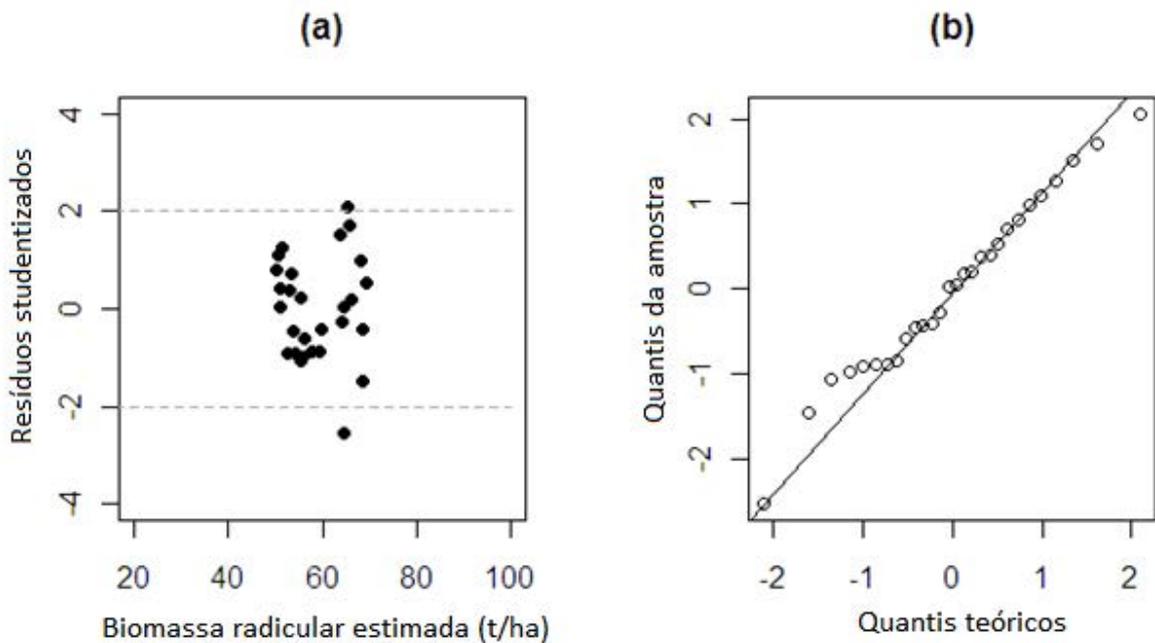
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 30. Resíduos studentizados (a) e gráfico de probabilidade normal (b) para o modelo com SR como variável independente.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 31. Resíduos studentizados (a) e gráfico de probabilidade normal (b) para o modelo com EVI como variável independente.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

#### 4.5 Mapeamento da Biomassa

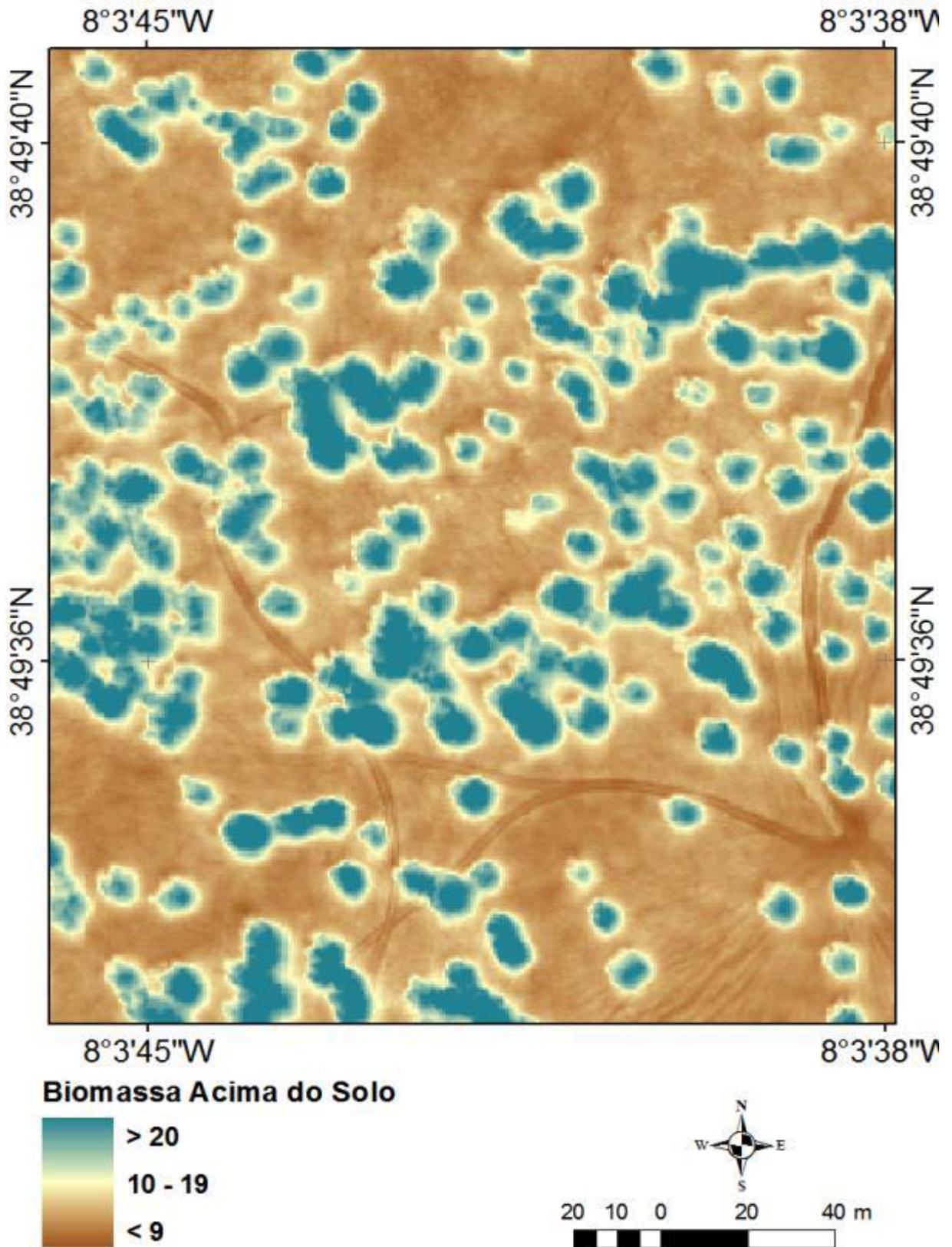
Com a seleção dos melhores modelos para as duas áreas de estudo, foi possível gerar um mapeamento da Biomassa. Utilizando as equações ajustadas e selecionadas foram geradas novas imagens, onde cada pixel passou a representar a quantidade estimada da variável biomassa. Foram formulados alguns intervalos de classes, com o intuito de melhor avaliar e verificar a aplicação e a interação dos modelos matemáticos obtidos por meio das imagens, os quais contiveram como bases os levantamentos efetivados em campo.

A utilização do modelo M1 para área de estudo 1, originou uma nova imagem cuja homogeneização dos valores da BAS estão representados na tonalidade verde, o que corresponde aproximadamente a uma geometria circular, que é o das copas de áreas de projeção horizontal. A BAS estimada com o modelo M1 para a área ilustrada na Figura 32.

Para a área de estudo 2, foram gerados três mapas, que correspondem a Biomassa Total, Biomassa Aérea e Biomassa Radicular (Figuras 33 a 35). As tonalidades em verde claro, nos três mapas gerados, representam áreas com maiores produção de biomassa e as áreas com coloração verde mais escura, representam as áreas com baixa produção de biomassa. Analisando ainda os 3 mapas gerados, foi possível notar que mesmo o plantio sendo ocasionado na mesma data nos talhões, o crescimento do eucalipto não segue uma tendência homogênea, pois é visível a presença de falhas nos plantios.

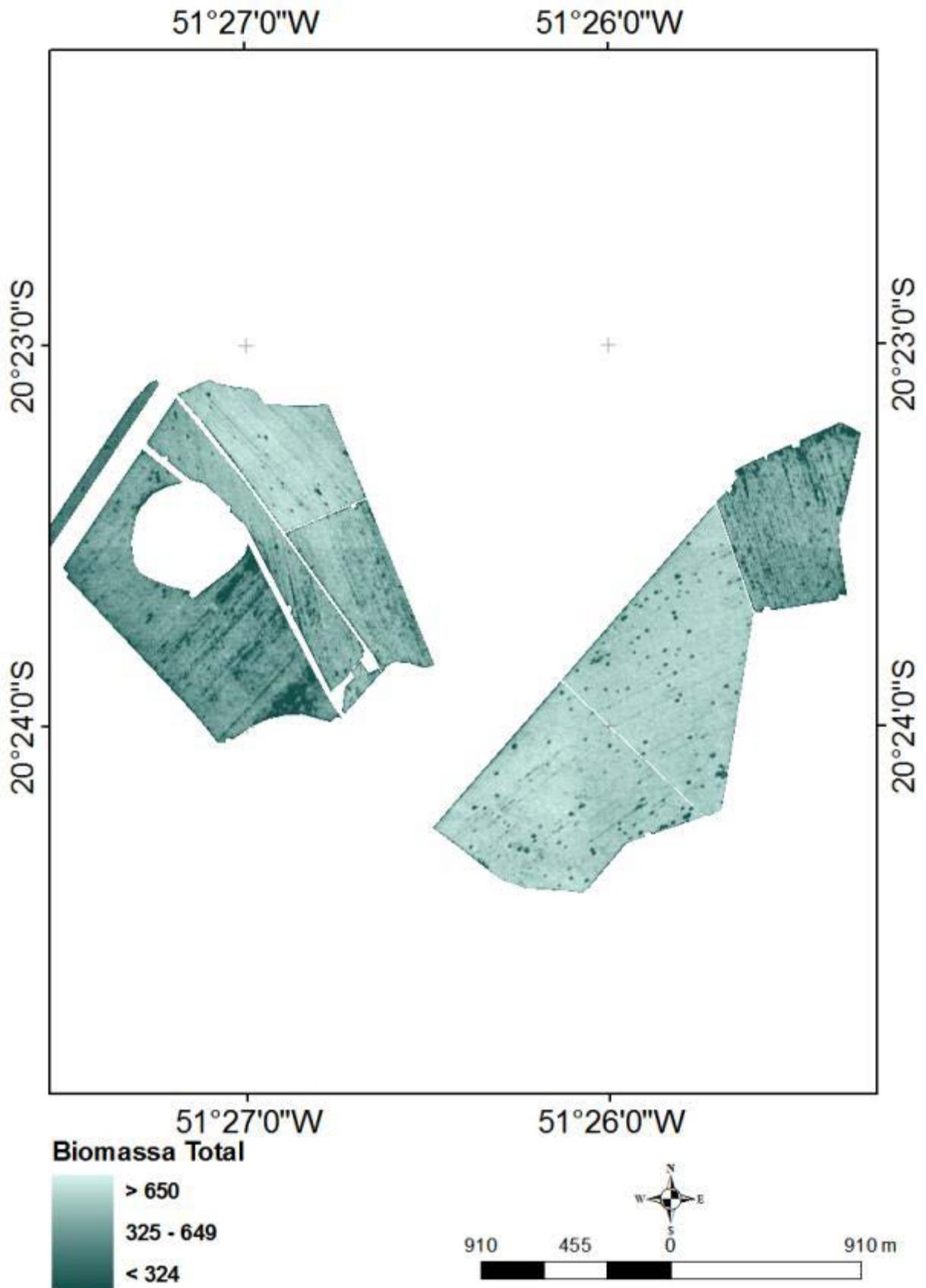
Porém nos talhões 3, 5 e 6 com a presença de *E. urograndis*, *E. urograndis* e *E. grandis* respectivamente, foi possível observar um crescimento mais homogêneo. Esse fato pode ter ocorrido devido à equação formulada por Mello e Gonçalves (2008), para o *E. grandis*, que pode ter influenciado em uma melhor distinção das espécies.

Figura 32- Estimativa da biomassa para áreas do montado alentejano (t/ha).



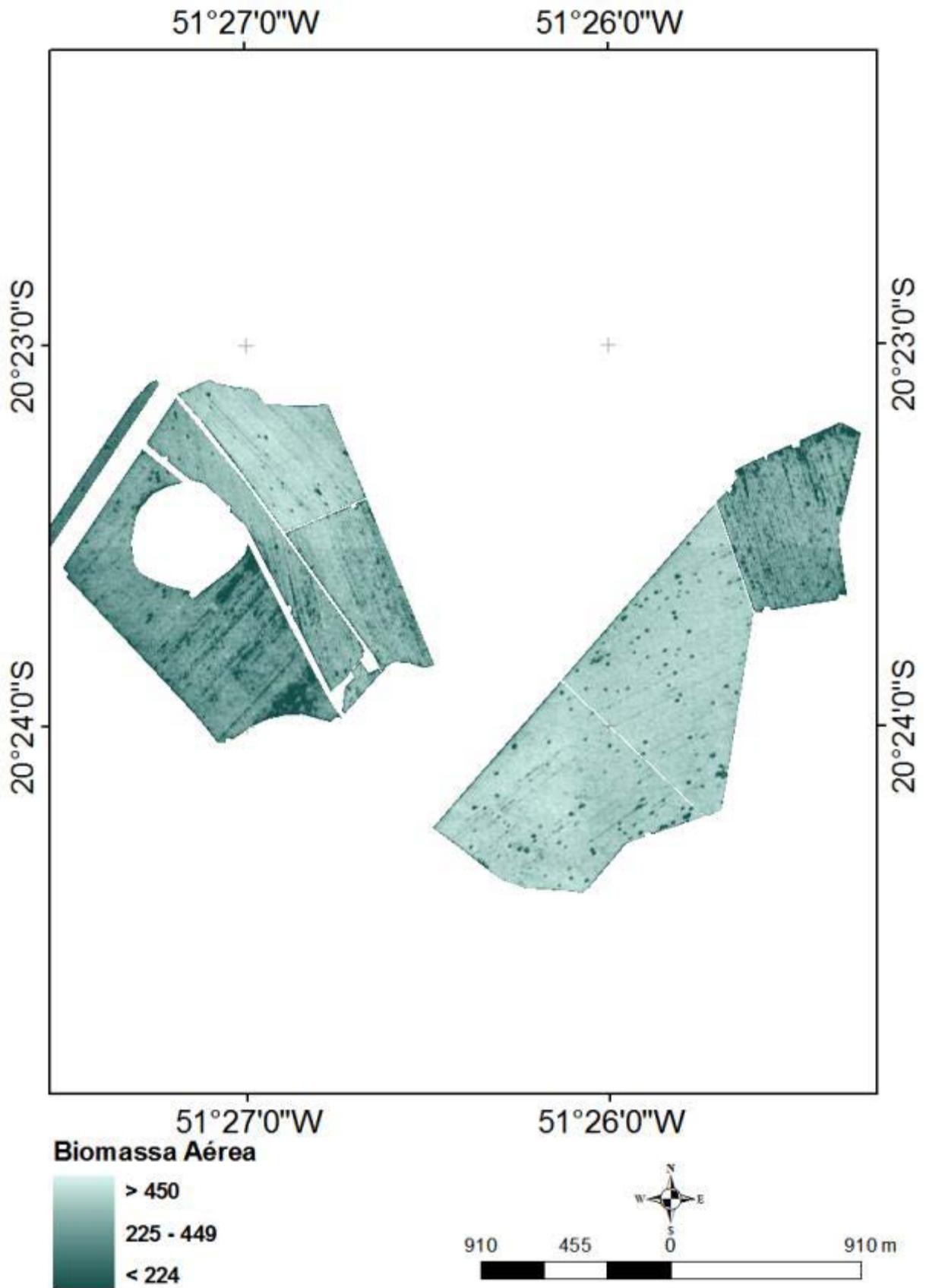
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 33 – Mapa de estimativa de Biomassa Total para plantios de eucalipto (t/ha).



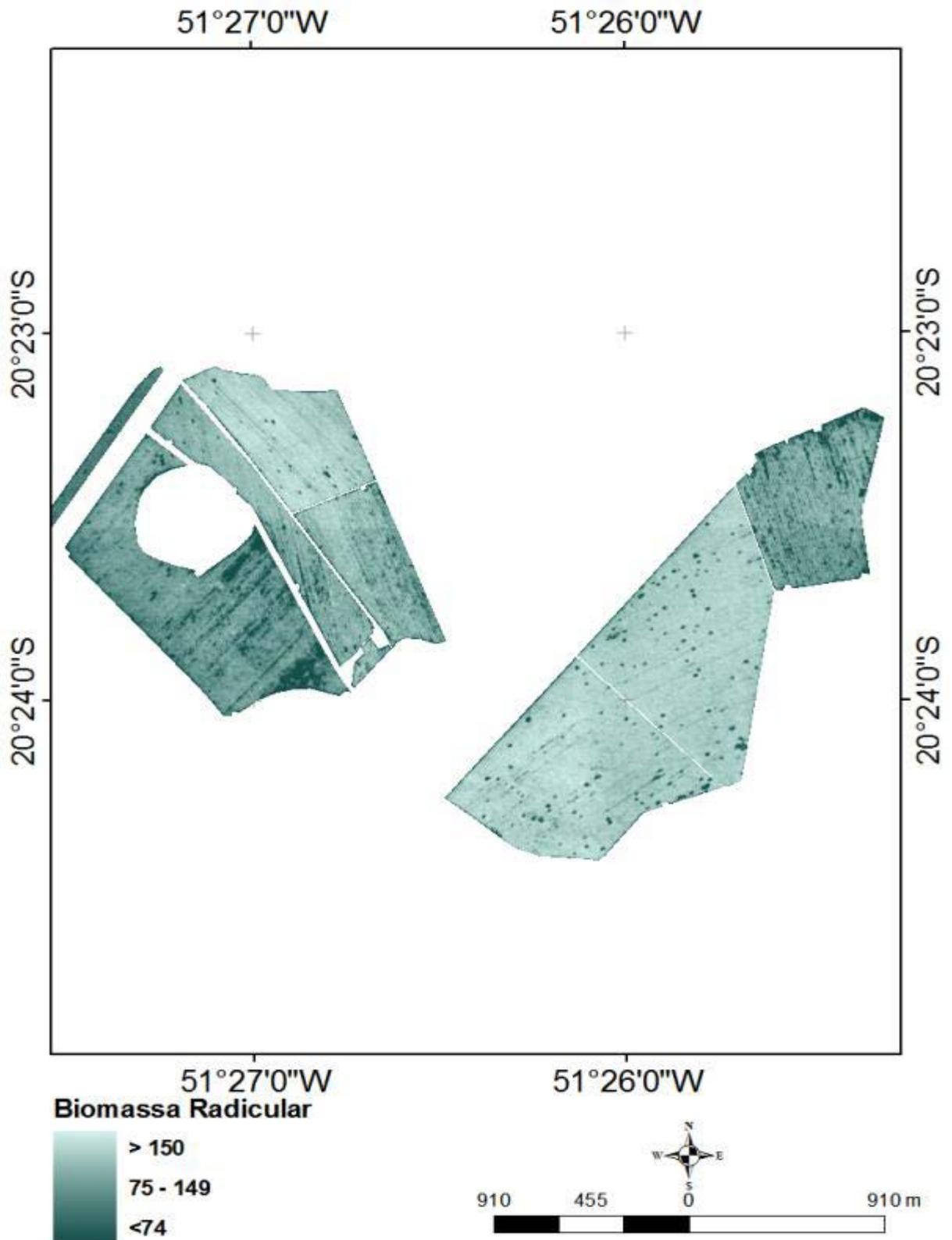
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 34 – Mapa de estimativa de Biomassa Aérea para plantios de eucalipto (t/ha).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 35 – Mapa de estimativa de Biomassa Radicular para plantios de eucalipto (t/ha).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A metodologia desenvolvida é de extrema importância para o planejamento e manejo florestal, visto que, pode auxiliar na tomada de decisões, uma vez que permite a produção de mapas de biomassa por procedimentos simples, consumindo menos tempo do que outras metodologias, como por exemplo, o inventário florestal e a análise espacial. Também é importante para projeto de inventário florestal, como pode ser alcançada uma amostragem mais eficiente em termos de custo.

Além de uma análise da biomassa e do monitoramento, que pode ser realizado em ambas as séries espacial e temporal como imagens de satélite QuickBird ou Pléiades, que estão disponíveis em intervalos de tempo curtos e com preços razoáveis. Esta é também uma ferramenta interessante para avaliar as melhores práticas de silvicultura e de gestão, a fim de atingir estandes sustentáveis, florestas e produções. Os resultados obtidos nesse trabalho, estão de acordo com os obtidos por Watzlawick et al. 2004, e Watzlawick; Kirchner; Sanquetta que realizaram um estudo similar ao apresentado porém para a espécie florestal *Araucária angustifolia*.

## 5 CONCLUSÕES

Os resultados mostraram que as imagens tomadas no período do verão, nos países do Mediterrâneo, podem ser usadas para estimar a Biomassa Acima do Solo (BAS) para o *Quercus rotundifolia*, utilizando para tanto, imagens de alta resolução associados a índices de vegetação. O modelo com melhor capacidade preditiva para estimar biomassa na área 1 de estudo foi  $BAS = -24,156 + 203,642 \times NDVI$ .

É possível ainda com a utilização de imagens de alta resolução espacial, estimar a produção de biomassa em plantios de eucalipto, obtendo um resultado satisfatório. No entanto é recomendado utilizar equações para os diversos tipos de eucalipto, a fim de, se obter resultados mais precisos. Os modelos com melhor capacidade preditiva para estimar Biomassa Total (BIOTOTAL), Biomassa Aérea (BIOAEREA) e Biomassa Radicular (BIORADICULAR) foram os seguintes  $BIOTOTAL = -1056,7 + 1428,8 \times SAVI$ ;  $BIOAEREA = -799,9 + 1080 \times SAVI$ ;  $BIORADICULAR = -256,7 + 348,71 \times SAVI$ .

A abordagem desenvolvida para estimativa de biomassa pode ser usada como uma ferramenta de baixo custo para procedimento preliminar de estimativas de biomassa acima do solo em escala local e regional.

## REFERÊNCIAS

- ABRAF. **Anuário estatístico da ABRAF 2010 ano base 2009**. Brasília, 2010. 140 p. Disponível em: <<http://www.ipef.br/estatisticas/relatorios/anuario-ABRAF-2010-BR.pdf>>. Acesso em: 04 jul. 2014.
- ALZATE, S. B. A. **Caracterização da madeira de árvores de clones de *Eucalyptus grandis*, *E. saligna* e *E.grandis* x *E.urophylla***. 2004. 133 f. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade Federal de São Paulo, Piracicaba, 2004.
- ARAÚJO, L. S. **Análise da cobertura vegetal e de biomassa em áreas de contato floresta/savana a partir de dados TM/LANDSAT e JERS-1**. 1999. 129 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1999.
- ARTOLI, J.; PEPPER, I. L. ; BRUSSEAU, M. L. **Environmental monitoring and characterization**. Amsterdam: Elsevier Academic Press, 2004.
- ASRAR, G.; FUCHS, M.; KANEMASU, E.T.; HATFIELD, J.L. Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. **Agronomy Journal**, Madison, v. 76, n. 2, p. 300-306, 1984.
- AUSTIN, J. M.; MACKEY, B. G.; VAN NIEL, K. P. Estimating forest biomass using satellite radar: an exploratory study in a temperate Australian Eucalyptus forest. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 176, n. 1-3, p. 575–583, 2003.
- AVERY, T. E.; BURKHART, H. E. **Forest Measurements**. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 1994.
- BACCINI, A.; FRIEDL, M. A.; WOODCOCK, C. E.; WARBINGTON, R. Forest biomass estimation over regional scales using multisource data. **Geophysical Research Letters**, Hoboken, v. 31, n. 10, p. 1-4, 2004.
- BAIRD, C. **Química ambiental**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2002.
- BALDOCCHI, D. D. ; XU, L. K. ; KIANG, N. How plant functional-type, weather, seasonal drought, and soil physical properties alter water and energy fluxes of an oak-grass savannah and an annual grassland. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 123, n. 1-2, p. 13–39, 2004.
- BARBOSA, R. R. N.; SILVA, A. de A.; NEVES, M. G.; GALVÃO, A. R. de A.; OLIVEIRA NETO, C. F. Produção e Sequestro de carbono na atmosfera. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 9, n. 16, p. 1783-1798, 2013.
- BERTOLA, A. **Eucalipto: 100 Anos de Brasil: “Falem mal, mas continuem falando de mim!”**. Paraopeba: V&M Florestal, 2011. Disponível em: <[http://www.celsofoelkel.com.br/artigos/outros/Eucalipto\\_100%20anos%20de%20Brasil\\_Alexandre\\_Bertola.pdf](http://www.celsofoelkel.com.br/artigos/outros/Eucalipto_100%20anos%20de%20Brasil_Alexandre_Bertola.pdf)>. Acesso em: 05 jul. 2014.

- BRANDELERO, C. **Espectrorradiometria do visível e infravermelho próximo em povoamento de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden**. 2010. 90 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.
- BERRA, E.F.; BRANDELERO, C.; PEREIRA, R. S.; SEBEM, E.; GOERGEN, L. C. G.; BENEDETTI, A. C. P.; LIPPERT, D. B. Estimativa do volume total de madeira em espécies de eucalipto a partir de imagens do satélite Landsat. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 22, n. 4, p. 853-864, 2012.
- BOTOLOTO, T.M. **Caracterização de uma Região Genômica relacionada à característica Lignotuber em Eucalipto**. 2011. 80 f. Tese (Doutorado em Ciências Biológicas) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2011.
- BRAGA, J. L. P. **Estabilidade fenotípica de clone de *Eucalyptus urograndis*, na fazenda Bom Jardim - Aparecida – SP**. 2008. 27 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2008.
- BRITO-DE-CARVALHO, J. H. **O Sequeiro Algarvio: actualidades e perspectivas**. Faro: Associação *In-Loce*, 1992.
- BRITO-DE-CARVALHO, J. H. **Sistemas agroflorestais da serra**. [S. l.: s. n.], 1994.
- BROWN, S. L.; SCHROEDER, P.; KERN, J. S. Spatial distribution of biomass in forests of the eastern USA. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 123, n. 1, p. 81–90, 1999.
- CAETANO, P.C.L. **Envolvimento de *Phytophthora cinnamomi* no declínio de *Quercus suber* e *Q. rotundifolia*: Estudo da influência de factores bióticos e abióticos na progressão da doença. Possibilidades de controlo químico do declínio**. 2007. 341 f. Tese (Doutorado em Ciências Agrárias) – Universidade do Algarve, Faro, 2007.
- CALVÃO, T.; PALMEIRIM, J. M. Mapping Mediterranean scrub with satellite imagery: biomass estimation and spectral behaviour. **International Journal of Remote Sensing**, Abingdon, v. 25, n. 16, p. 3113-3126, 2004.
- CÂMARA, G.; DAVIS, C. Introdução. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. (Org.). **Introdução à ciência da geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2001. Cap. 1, p. 1-5. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/cap1-introducao.pdf>>. Acesso em: 31 out. 2014.
- CÂMARA, G. Representação computacional de dados geográficos. In: CASANOVA, M. A. et al. **Banco de dados geográficos**. Curitiba: Mundogeo, 2005. p. 11-52.
- CARREIRAS, J. M. B.; PEREIRA, J. M. C.; PEREIRA, J. S. Estimation of tree canopy cover in evergreen oak woodlands using remote sensing. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 223, n. 1-3, p. 45–53, 2006.

CELA, P. G.; GAMARRA, R. G.; VIÑAS, J. I. G. **Árboles y arbustos de la Península Ibérica e Islas Baleares**. Jacksonville: Jaguar, 1998.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS – CGEE. **Manual de capacitação sobre mudança do clima e projetos de mecanismos de desenvolvimento limpo (MDL)**. Brasília, DF, 2008. Disponível em: <[www.cgee.org.br/atividades/redirect.php?idProduto=4681](http://www.cgee.org.br/atividades/redirect.php?idProduto=4681)>. Acesso em: 26 jun. 2014.

CHEN, F.; WEBER, K. T.; GOKHALE, B. Herbaceous Biomass Estimation from SPOT 5 Imagery in Semiarid Rangelands of Idaho. **GIScience & Remote Sensing**, Abingdon, v. 48, n. 2, p. 195–209, 2011.

CLUTTER, J. L.; FORTSON, J. C.; PIENAAR, L. V.; BRIESTER, G. H.; BAILEY, R. L. **Timber Management: A quantitative approach**. Nova Jersey: John Wiley & Sons, 1983.

CONGALTON, R. G.; ODERWALD, R. G.; MEAD, R. A. Assessing Landsat classification accuracy using discrete multivariate statistical techniques. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, Bethesda, v. 49, p. 1671–1678, 1983.

COURA, S. M. da C. **Mapeamento da vegetação do Estado de Minas Gerais utilizando dados Modis**. 2007. 147 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2007.

CURTIS, R. O. Height-diameter and height-diameter age equations for second growth Douglas-fir. **Forest Science**, Bethesda, v. 13, n. 4, p. 365-375, 1967.

DEFINIENS IMAGING. **eCognition Developer 8.0.1 Reference Book**. Carlsbad, 2010. Disponível em: <<http://www.definiens.com>>. Acesso em: 24 mar. 2014.

DONG, J.; KAUFMANN, R. K.; MYNENI, R. B.; TUCKER, C. J.; KAUPPI, P. E.; LISKI, J.; BUERMANN, W.; ALEXEYEV, V.; HUGHES, M. K. Remote sensing estimates of boreal and temperate forest woody biomass: carbon pools, sources, and sinks. **Remote sensing of environment**, New York, v. 84, p. 393-410, 2003.

DRAKE, J. B.; DUBAYAH, R. O.; CLARK, D. B.; KNOX, R. G.; BLAIR, J. B.; HOFTON, M. A.; CHAZDON, R. L.; WEISHAMPEL, J. F.; PRINCE, S. D. Estimation of tropical forest structural characteristics using large-footprint lidar. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 79, n. 2-3, p. 305–319, 2002a.

DIGITALGLOBE. **QuickBird Imagery Products**. [S. l.], 2003. 15 p. Disponível em: <<http://calval.cr.usgs.gov/wordpress/wp-content/uploads/1Friede8.pdf>>. Acesso em 20 out. 2014.

DRAKE, J. B.; DUBAYAH, R. O.; KNOX, R. G.; CLARK, D. B.; BLAIR, J. B. Sensitivity of large-footprint lidar to canopy structure and biomass in a neotropical rainforest. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 81, n. 2-3, p. 378–392, 2002b.

DGRF 2006: resultados do Inventário Florestal Nacional 2005/2006. Lisboa: Direcção-Geral dos Recursos Florestais, 2006. 70 p.

ESRI. **ArcGIS Desktop**: release 10. Redlands: Environmental Systems Research Institute, 2010.

ENGESAT. **Satelites Pleiádes 1A e 1B**. [S. l.], 2013. Disponível em: <<http://www.engesat.com.br/satelites/pleiades-1a-e-1b/>>. Acesso em: 20 out. 2013.

ENVI - Reference Guide. **Exelis Visual Information Solutions**. Boulder: Exelis Visual Information Solutions, 2009.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF UNITED NATION - FAO. **Eucalyptus for planting**. Italy: FAO, 1981. 677 p.

FARIA, R. A. V. B. **Estoque de carbono e atributos florísticos e edáficos de ecossistemas florestais em processo de restauração**. 2012. 168 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.

FANG, Z.; BAILEY, R. L. Height-diameter models for tropical forests on Hainan Island in southern China. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 110, n. 1-3, p. 315-327, 1998.

FEARNSIDE, P. M.; LEAL FILHO, N.; FERNANDES, F. M. Rainforest burning and the global carbon budget: biomass, combustion efficiency, and charcoal formation in the Brazilian Amazon. **Journal of Geophysical Research**, Hoboken, v. 98, p. 16733-16743, 1993.

FERREIRA, L. G.; FERREIRA, N. C.; FERREIRA, M. E. Sensoriamento remoto da vegetação: evolução e estado-da-arte. **Acta Scientiarum. Biological Sciences**, Maringá, v. 30, n. 4, p. 379-390, 2008.

FLOMBAUM, P.; SALA, O. E. A non-destructive and rapid method to estimate biomass and aboveground net primary production in arid environments. **Journal of Arid Environments**, London, v. 69, n. 2, p. 352-358, 2007.

FOODY, G. M.; BOYD, D. S.; CUTLER, M. E. J. Predictive relations of tropical forest biomass from Landsat TM data and their transferability between regions. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 85, n. 4, p. 463-474, 2003.

FOROUGHBAKHCH, R.; REYES, G.; ALVARADO-VÁZQUEZ, M. A.; HERNÁNDEZ-PIÑERO, J.; ROCHA-ESTRADA, A. Use of quantitative methods to determine leaf biomass on 15 woody shrub species in northeastern Mexico. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 216, n.1-3, p. 359-366, 2005.

GAIVOTA DE BOTAS CALÇADAS - GDBC. **As árvores mais emblemáticas de Portugal**. [S. l.], 2014. Disponível em: <<http://gaiivotadebotascalçadas.blogspot.com.br/2014/02/as-arvores-mais-emblematicas-de-portugal.html>>. Acesso em: 07 jul. 2014.

GIL, L. **Cortiça da produção à aplicação**. Seixal: Câmara Municipal do Seixal, 2005.

GÓMEZ, C.; WULDER, M. A.; MONTES, F.; DELGADO, J. A. Modeling forest structural parameters in Mediterranean pines of central Spain using QuickBird-2 Imagery and classification and regression tree analysis (CART). **Remote Sensing**, Basel, v. 4, n. 1, p. 135-159, 2012.

GRATTAPAGLIA, D.; KIRST, M. Eucalyptus applied genomics: from gene sequences to breeding tools. **New Phytologist**, Oxford, v. 179, p. 911-929, 2008.

HALL, R. J.; SKAKUN, R. S.; ARSENAULT, E. J.; CASE, B. S. Modeling forest stand structure attributes using Landsat ETM+ data: Application to mapping of aboveground biomass and stand volume. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 225, n. 1-3, p. 378–390, 2006.

HÄME, T.; SALLI, A.; ANDERSSON, K.; LOHI, A. A new methodology for estimation of biomass of conifer-dominated boreal forest using NOAA AVHRR data. **International Journal of Remote Sensing**, Abingdon, v. 18, n. 15, p. 3211–3243, 1997.

HIGUCHI, N.; SANTOS, J.; RIBEIRO, R. J.; MINETTE, L.; BIOTY, Y. Biomassa da parte aérea da vegetação da floresta tropical úmida de terra-firma da Amazônica Brasileira. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 28, n. 2, p.153-166, 1998.

HIRATA, Y.; TABUCHI, R.; PATANAPONPAIBOON, P.; POUGPARN, S.; YONEDA, R.; FUJIOKA, Y. Estimation of aboveground biomass in mangrove forest using high-resolution satellite data. **Journal of Forest Research**, Tokyo, v. 19, n.1, p. 34-41, 2014.

HOUGHTON, R.A. Aboveground forest biomass and the global carbon balance. **Global Change Biology**, Chichester, v. 11, p. 945–958, 2005.

HUETE, A. R.; JACKSON, R. D.; POST, D. F. Spectral response of plant canopy with different soil backgrounds. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 17, p. 37-53, 1985.

HUETE, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 25, n. 3, p. 295–309, 1988.

HUETE, A. R.; JUSTICE, C.; VAN LEEUWEN, W. **MODIS vegetation index (MOD13)**: algorithm theoretical basis document, version 2. Tucson: University of Arizona, 1996.

HUETE, A. R.; LIU, H.Q.; BATCHILY, K.; VAN LEEUWEN, W. A Comparison of Vegetation Indices over a Global Set of TM Images for EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 59, p. 440 – 451, 1997.

HUETE, A.; JUSTICE C. **MODIS Vegetation Index (MOD 13) Algorithm Theoretical Basis Document**. Greenbelt: NASA Godard Space Fight Center, 1999. 129 p.

HUETE, A.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E. P.; GAO, X.; FERREIRA, L. G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 83, p. 195-213, 2002.

IPCC. **Climate Change 2001**: Synthesis report. contribution of working group I, II, and III to the third assessment report of the IPCC. Cambridge: Cambridge University, 2001.

IPCC. **Good practice guidance for land use, land-use change and forestry**. Hayama: Institute for Global Environmental Strategies, 2003.

IPCC. **Climate Change 2007**: the Physical Science Basis: contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC. Cambridge: Cambridge University, 2007.

JACKSON, R. D.; HUETE, A. R. Interpreting vegetation indices. **Preventive veterinary medicine**, Amsterdam, v. 11, p. 185-200, 1991.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente**: uma perspectiva em recursos terrestres. 2. ed. São José dos Campos: Parêntese, 2009. 604 p.

JI, L.; WYLIE, B. K.; NOSSOV, D. R.; PETERSON, B.; WALDROP, M. P.; McFARLAND, J. W.; ROVER, J.; HOLLINGSWORTH, T. N. Estimating aboveground biomass in interior Alaska with data and field measurements. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Amsterdam, v. 18, p. 451–461, 2012.

JOFFRE, R.; LACAZE, B. Estimating tree density in oak savanna-like ‘dehesa’ of southern Spain from SPOT data. **International Journal of Remote Sensing**, Abingdon, v. 14, n. 3, p. 685–697, 1993.

JOFFRE, R.; RAMBAL, S.; DAMESIN, C. Functional attributes in Mediterranean-type ecosystems (pp. 347–380). In: PUGNAIRE, F.I., VALLADARES, F. (Ed.), **Handbook of Functional Plant Ecology**. New York: Marcel Dekker, 1999.

JORDAN, C.F. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. **Ecology**, Washington, v. 50, n. 4, p. 663–666, 1969.

KAYITAKIRE, F.; HAMEL, C.; DEFOURNY, P. Retrieving forest structure variables based on image texture analysis and IKONOS-2 imagery. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 102, n. 3-4, p. 390-401, 2006.

KEY, T.; WARNER, T.A.; MCGRAW, J. B.; FAJVAN, M. A. A comparison of multispectral and multitemporal information in high spatial resolution imagery for classification of individual tree species in a temperate hardwood forest. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 75, n.1, p. 100-112, 2001.

- KOEHLER, H. S. WATZLAWICK, L. F. KIRCHNER, F. F. VALÉRIO, A. F. Fontes de erros nas estimativas da biomassa e carbono fixado na floresta ombrófila mista. **Biomassa & Energia**, Viçosa, v. 2, n. 1, p. 69-77, 2005.
- LASLETT, P. Environment ethics and the obsolescence of existing political institutions. In: GLESSON, B.; LOW, N. (Org.). **Governing for the environment. Global problems, ethics and democracy**. New York: Palgrave Publisher, 2001.
- LANDGREBE, D. A. The Quantitative approach: concept and Rationale. In: SWAIN, P. H.; DAVIS, S. M. (Ed.) **Remote sensing: the quantitative approach**. New York: McGraw-Hill, 1978. 396 p.
- LAZZAROTTO, D. R. **O que são geotecnologias**. [S. l.: s. n.], 2002. Disponível em: <<http://www.fatorgis.com.br/>>. Acesso em: 31 out. 2014.
- LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. **Remote sensing and image interpretation**. 2. ed. New York: Wiley, 1987. 721 p.
- LIMA, W. P. **Impacto ambiental do eucalipto**. 2. ed. São Paulo: Editora da USP, 1993. 301 p.
- LIU, W. T. **Aplicações de sensoriamento remoto**. Campo Grande: Uniderp, 2006. 908 p.
- LOPES, J. L. W. **Qualidade de mudas clonais do híbrido de *Eucalyptus grandis* vs. *Eucalyptus urophylla*, submetidas a diferentes regimes hídricos**. 2008. 181 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2008.
- LU, D. The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation. **International Journal of Remote Sensing**, Abingdon, v. 27, n. 7, p. 1297–1328, 2006.
- MACIEL, M. N. M.; BASTOS, P. C. de O.; CARVALHO, J. O. P. de; WATRIN, O. dos S. Uso de imagens orbitais na estimativa de parâmetros estruturais de uma floresta primária no município de Paragominas, Estado do Pará. **Revista Ciência Agrária**, Belém, v. 52, p. 159–178, 2009.
- MARQUES, H.; PINTO, G.; PINTO, P; TEIXEIRA, C. **Regiões de Proveniência Portugal**. [S. l.: s. n.], 2008. Disponível em: <<http://www.icnf.pt/portal/florestas/gf/ps/resource/docs/reg-prov/reg-prov12>>. Acesso em: 07 jul. 2014.
- MATHEUS, M. T. Sequestro de carbono sob a óptica floresta no Brasil. **Revista Trópica – Ciências Agrárias e Biológicas**, Chapadinha, v. 6, n. 1, p. 104-116, 2012.
- MATHER, P. M. **Computer processing of remotely-sensed images: an introduction**. 2. ed. Great Britain: John Wiley e Sons, 1999. 210 p.

- MATHEUS, M. T.; PASSOS, R. R.; SOUSA, F. C.; HOFFMANN, R. G. Sequestro de carbono. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE DEFESA DO MEIO AMBIENTE, 8. 2005, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Clube de Engenharia, 2005.
- McKINSEY AND COMPANY. **Caminhos para uma economia de baixa emissão de carbono no Brasil**. [s. L], 2009. Disponível em: <[http://www.mckinsey.com.br/sao\\_paulo/carbono.pdf](http://www.mckinsey.com.br/sao_paulo/carbono.pdf)>. Acesso em: 20 maio 2014.
- MELO, A. C. G.; DURIGAN, G. Fixação de carbono em reflorestamento de matas ciliares no Vale do Paranapanema, SP, Brasil. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 71, p. 149-154, 2006.
- MELLO, S. L. M.; GONÇALVES, J. L. M. Equações para estimar a biomassa da parte aérea e do sistema radicular em povoamentos de *Eucalyptus grandis* em sítios com produtividades distintas. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 101-111, 2008.
- MONTEIRO, J. A. C. **Ecologia do sobreiro**: estudos e divulgação técnica. [S. l.]: Direção-Geral dos Serviços Florestais e Aquícolas, 1958.
- MONTGOMERY, D. C.; PECK, E. A. **Introduction to linear regression analysis**. Nova Jersey: John Wiley & sons, 1982.
- MONTOYA-OLIVER, J. M. **Los alcornocales**. 2. Ed. Madrid: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 1988.
- MORA, A. L.; GARCIA, C. H. **A cultura do eucalipto no Brasil**. São Paulo: Sociedade Brasileira de Silvicultura, 2000.
- MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicações**. 3. ed. Viçosa: Ed. UFV, 2005. 320 p.
- MUTANGA, O.; SKIDMORE, A. K. Narrow band vegetation indices overcome the 514 saturation problem in biomass estimation. **International Journal of Remote Sensing**, Abingdon, v. 25, n.19, p. 1-16, 2004.
- MUTANGA, O.; ADAM, E.; CHO, M.A. High density biomass estimation for wetland vegetation using WorldView-2 imagery and random forest regression algorithm. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Amsterdam, v. 18, p. 399–406, 2012.
- MUUKKONEN, P.; HEISKANEN, J. Estimating biomass for boreal forests using ASTER satellite data combined with standwise forest inventory data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 99, n. 4, p. 434 – 447, 2005.
- MUUKKONEN, P.; HEISKANEN, J. Biomass estimation over a large area based on standwise forest inventory data and ASTER and MODIS satellite data: a possibility to verify carbon inventories. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 107, n. 4, p. 617–624, 2007.

MYERS, R.H. **Classical and modern regression with applications**. [S. l.]: Duxbury Press, 1986.

NATIVIDADE, J. V. **Subericultura**. Lisboa: Estação de Experimentação Florestal do Sobreiro, 1950.

NAVARRO, R. M.; FERNÁNDEZ, P.; NAVARRO, J. M. **Evaluación de daños producidos por la seca de especies del género Quercus sp. en Andalucía**. [S. l.]: Servicio de Ordenación de los Recursos Forestales, 2000.

NELSON, B. W.; MESQUITA, R.; PEREIRA, J.; SOUZA, S.G.; BATISTA, G.; COUTO, L. B. Allometric regressions for improved estimate off secondary forest biomass in the central Amazon. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 117, n. 3, p. 149-167, 1999.

NOAS. **Sistema de informações geográficas como recurso didático**. [S. l.], 2011. Disponível em: <<http://www.noas.com.br/artigos/geotecnologia/sistema-de-informacoes-geograficas-como-recurso-didatico/>>. Acesso em: 31 out. 2014.

NOVO, E. M. L. de M.; PONZONI, F. J. **Introdução ao sensoriamento remoto**. [S. l.], 2001. Disponível em: <[http://academico.riogrande.ifrs.edu.br/~daniel.zanotta/arquivos/Introd\\_SER.pdf](http://academico.riogrande.ifrs.edu.br/~daniel.zanotta/arquivos/Introd_SER.pdf)>. Acesso em: 02 jul. 2014.

NUNES, S. do S. S. **Estimativa de biomassa e carbono e indicadores para restauração de florestas secundárias em Paragominhas, Pará**. 2011. 127 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

PALACE, M.; KELLER, M.; ASNER, G. P.; HAGEN, S.; BRASWELL, B. Amazon forest structure from IKONOS satellite data and the automated characterization of forest canopy properties. **Biotropica**, Hoboken, v. 40, n. 2, p. 141–150, 2008.

PALACIOS-ORUETA, A.; CHUVIECO, E.; PARRA, A.; CARMONA-MORENO, C. Biomass burning emissions: a review of models using remote sensing data. **Environmental Monitoring and Assessment**, Dordrecht, v. 104, n. 1-3, p. 189–209, 2005.

PARRESOL, B. R. Assessing tree and stand biomass: a review with examples and critical comparisons. **Forest Science**, Bethesda, v. 45, n. 4, p. 573-593, 1999.

PAULO, J. A.; TOMÉ, M. **Equações para estimação do volume e biomassa de duas espécies de carvalhos: *Quercus suber* e *Quercus ilex***. Lisboa: Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Técnica de Lisboa, 2006.

PEICHL, M. ; ARAIN, M. A. Above and belowground ecosystem biomass and carbon pools in an age-sequence of temperate pine plantation forests. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, 140, n.1-4, 51-63, 2006.

PEREIRA, J. M. C.; OLIVEIRA, T. M.; PAUL, J. C. P. Satellite-based estimation of Mediterranean shrubland structural parameters. **EARSeL Advances in Remote Sensing**, Hannover, v. 4, n. 3, p. 14–20, 1995.

PINHEIRO, E. S.; DURIGAN, G.; ADAMI, M. Imagens Landsat e QuickBird são capazes de gerar estimativas precisas de biomassa aérea de Cerrado? In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos, INPE, 2009. p. 2913-292.

PINTO JÚNIOR, J. E.; GARLIPP, R. C. D. Eucalipto. In: ALBUQUERQUE, A. C. S.; SILVA, A. G. **Agricultura tropical: Quatro décadas de inovações tecnológicas, institucionais e políticas**. Brasília, DF: Embrapa Informações Tecnológicas, 2008. p. 801-822.

POPESCU, S. C.; WYNNE, R. H.; NELSON, R. F. Measuring individual tree crown diameter with lidar and assessing its influence on estimating forest volume and biomass. **Canadian Journal of Remote Sensing**, Ottawa, v. 29, n. 5, p. 564–577, 2003.

PONZONI, F. J.; DISPERATI, A. A. **Comportamento espectral da vegetação**. São José dos Campos: INPE, 1995. 37 p.

PONZONI, F. J. Comportamento espectral da vegetação. In: MENESES, P. R.; MADEIRA NETTO, J. S. **Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais**. Brasília: Editora Universidade de Brasília/Embrapa Cerrados, 2001. p. 157-199.

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

PRYOR, L. D. **The biology of Eucalyptus**. London: Edward Arnold, 1976. 82 p.

QUEIROZ, L. R. de S.; BARRICHELO, L. E. G. **O eucalipto: um século no Brasil**. São Paulo: Neoband Soluções Gráficas, 2007. 127 p.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, 2012.

RAUSTE, J.; HÄME, T. Radar-based forest biomass estimation. **International Journal of Remote Sensing**, Abingdon, v. 15, n. 14, p. 2797-2808, 1994.

REIS, G. G.; REIS, M. G. F.; FONTAN, I. C. I.; MONTE, M. A.; GOMES, N. A.; OLIVEIRA, C. H. R. Crescimento de raízes e da parte aérea de clones de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e de *Eucalyptus camaldulensis* x *Eucalyptus* spp submetidos a dois regimes de irrigação no campo. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 6, p. 921-931, 2006.

RENNER, R. M. **Sequestro de Carbono e a Viabilização de Novos Reflorestamentos no Brasil**. 2004. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

RIZZI, R. **Geotecnologias em um sistema de estimativa da produção de soja: estudo de caso no Rio Grande do Sul**. 2004. 212 f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2004.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: ERTS SYMPOSIUM, 3., 1973, [S. l.]. **Proceedings...** [S. l.]: NASA SP-351, 1973. p. 309–317.

RYU, S. R.; CHEN, J.; CROW, T. R.; SAUNDERS, S. C. Available fuel dynamics in nine contrasting forest ecosystems in north America. **Environmental Management**, New York, v. 33, n. 1, p. 87–107, 2004.

SALATI, E. **Emissão x seqüestro de CO<sub>2</sub>**: uma nova oportunidade de negócios para o Brasil. Rio de Janeiro: CRVD, 1994.

SALVADOR, R.; PONS, X. On the applicability of Landsat TM images to Mediterranean forest inventories. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 104, n. 1-3, p. 193–208, 1998.

SAMUEL, R.; BACHMAIR, A.; JOBST, J.; EHRENDORFER, F. ITS sequences from nuclear Rdna suggest unexpected phylogenetic relationships between Euro-Mediterranean, East Asiatic and North American taxa of *Quercus* (*Fagaceae*). **Plant Systematics and Evolution**, Wien, v. 211, p.129-139, 1998.

SANQUETTA, C. R. Métodos de determinação de biomassa florestal. In: SANQUETTA, C. R. et al. (Ed.) **As florestas e o carbono**. Curitiba, 2002. p.119-140.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B.; CHEN, H. J. A comparative study of various tests of normality. **Journal of the American Statistical Association**, Alexandria, v. 63, n. 324, p. 1343–1372, 1968.

SEGURA, M. Allometric models for tree volume and total aboveground biomass in a tropical humid forest in Costa Rica. **Biotropica**, Hoboken, v. 37, n.1, p. 2-8, 2005.

SILVA, M. R. **da. Efeitos do manejo hídrico e da aplicação de potássio na qualidade de mudas de *Eucalyptus grandis* W. (Hill ex. Maiden)**. 2003. 100 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2003.

SILVA, M. S. **Sistemas de Informações Geográficas: elementos para o desenvolvimento de bibliotecas digitais geográficas distribuídas**. 2006. 167 f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Informação) – Universidade Estadual Paulista, Marília, 2006.

SILVA, R. M. **Introdução ao geoprocessamento**: conceitos, técnicas e aplicações. Novo Hamburgo: Feevale, 2007. 176 p.

- SILVEIRA, P. **Métodos indiretos de estimativa do conteúdo de biomassa e do estoque de carbono em um fragmento de floresta ombrófila densa**. 2008. 129 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.
- SOMOGYI, Z.; CIENCIALA, E.; MÄKIPÄÄ, R.; MUUKKONEN, P.; LEHTONEN A.; WEISS, P. Indirect methods of large forest biomass estimation. **European Journal of Forest Research**, Heidelberg, v. 126, n. 2, p. 197-207, 2006.
- SOUSA, A. M. O.; MESQUITA, P.; GONÇALVES, A. C.; MARQUES da SILVA, J. R. Segmentação e classificação de tipologias florestais a partir de imagens Quickbird. **Ambiência**, Guarapuava, v. 6, p. 57–66, 2010.
- STEININGER, M. K. Satellite estimation of tropical secondary forest aboveground biomass: Data from Brazil and Bolivia. **International Journal of Remote Sensing**, Abingdon, v. 21, n. 6-7, p. 1139–1157, 2000.
- STEHMAN, S.V. Estimating the kappa coefficient and its variance under stratified random sampling. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, Bethesda, v. 62, n. 4, p. 401–407, 1996.
- SZEKIELDA, K. **Satellite monitoring of the earth**. New York: John Wiley, 1988. 326 p.
- TEIXEIRA, L. M. **Influência da Intensidade de Exploração Seletiva de Madeira no Crescimento e Respiração do Tecido Lenhoso das Árvores em uma Floresta Tropical de Terra-Firme na Região de Manaus**. 2003. 61 f. Dissertação (Mestrado em Ciências de Florestas Tropicais) – Universidade do Amazonas, Manaus, 2003.
- TENORIO, M. C.; JUARISTA, C. M.; OLLERO, H. S. **Los Bosques Ibéricos: una interpretación geobotánica**. São Paulo: Editorial Planeta, 2001.
- THENKABAIL, P. S.; ENCLONA, E. A.; ASHTON, M. S.; LEGG, C.; JEAN DE DIEU, M. Hyperion, IKONOS, ALI, and ETM+ sensors in the study of African rainforests. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 90, n. 1, p. 23–43, 2004.
- TOMMASINO, H.; FOLADORI, G. (In) certezas sobre La crisis ambiental. **Ambiente e Sociedade**, Campinas, v. 4, n. 8, p. 49-68, 2001.
- TOMÉ, M. **Modelação do crescimento da árvore individual em povoamentos de Eucalyptus globulus Labill. (1ª rotação). Região centro de Portugal**. 1988. 256 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Instituto Superior de Agronomia – UTL, Lisboa, 1988.
- TOMPPO, E.; NILSSON, M.; ROSENGREN, M.; AALTO, P.; KENNEDY, P. Simultaneous use of Landsat-TM and IRS-1c WiFS data in estimating large area tree stem volume and aboveground biomass. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 82, n.1, p. 156–171, 2002.

TOTTEN, M. **Getting it right: emerging markets for storing carbon in forests.** Washington: Forest Trends and World Resources Institute, 2000.

VENTURIERI, A. **Curso de introdução às técnicas de sensoriamento remoto.** Lavras: UFLA, 2007. Disponível em: <<http://www.ufpa.br/epdir/images/docs/paper64.pdf>>. Acesso em: 01 jul. 2014.

VIANA, H.; ARANHA, J.; LOPES, D.; COHEN, W.B. Estimation of crown biomass of *Pinus pinaster* stands and shrubland above-ground biomass using forest inventory data, remotely sensed imagery and spatial prediction models. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 226, n. 10, p. 22-35, 2012.

VISMARA, E. de S. **Mensuração da biomassa e construção de modelos para construção de equações de biomassa.** 2009. 103 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

VITOUSEK, P. M.; MOONEY, H. A.; LUBCHENCO, J.; MELILLO, J. M. Human domination of earth's ecosystems. **Science**, Washington, v. 277, n. 5325, p. 494-499, 1997.

WANG, Q.; ADIKU, S.; TENHUNEN, J.; GRANIER, A. On the relationship of NDVI with leaf area index in a deciduous forest site. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 94, n. 2, p. 244-255, 2005.

WATRIN, O. dos S.; MACIEL, M. N. M. **Curso de Introdução às técnicas de Sensoriamento Remoto.** Belém; UFRA, 2005. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAXWIAD/apostila>>, Acesso em: 10 ago. 2014.

WATZLAWICK, L.F. **Estimativa de biomassa e carbono em Floresta Ombrófila Mista e plantações florestais a partir de dados de imagens do satélite Ikonos II.** 2003. 138 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

WATZLAWICK, L. F.; KIRCHNER, F. F. Estimativa de biomassa e carbono utilizando imagens de satélite de alta resolução: In: SANQUETTA, C. R.; BALBINOT, R.; ZILIO, M. A. A. (Ed.). **Fixação de carbono: atualidades, projetos e pesquisas.** Curitiba: [S. N.], 2004. p. 133-152.

WATZLAWICK, L.F.; KIRCHNER, F.F.; COUTO, L.C.; SANTOS, R.T. Carbon and Biomass Estimate in *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze Plantations Using Ikonos II Satellite Images. **Biomassa & Energia**, São Paulo, v. 1, n. 2, p. 209-219, 2004.

WATZLAWICK, L. F.; KOEHLER, H. S.; KIRCHNER, F. F. Estimativa de biomassa e carbono em plantios de *Pinus taeda* L. utilizando imagens do satélite IKONOS II. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 28, n. 1, p. 45-60, 2006.

WATZLAWICK, L. F.; KIRCHNER, F. F.; SANQUETTA, C. R. Estimativa de biomassa e carbono em floresta com araucária utilizando imagens do satélite Ikonos II. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 19, n. 2, p. 169-181, 2009.

- WENDLING, J. L. G. **Modelos matemáticos de crescimento e produção em biomassa para árvores de *Euterpe edulis* MART. Plantadas a céu aberto.** 1998. 168 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1998.
- WULDER, M. A.; HALL, R. J.; COOPS, N. C.; FRANKLIN, S. E. High spatial resolution remotely sensed data for ecosystem characterization. **BioScience**, Washington, v. 54, n. 6, p. 511-521, 2004.
- WULDER, M. A.; WHITE, J. C.; FOURNIER, R. A.; LUTHER, J. E.; MAGNUSSEN, S. Spatially explicit large area biomass estimation: three approaches using forest inventory and remotely sensed imagery in a gis. **Sensors**, Switzerland, v. 8, n. 1, p. 529-560, 2008.
- YU, C. M. **Sequestro florestal de carbono no Brasil – Dimensões políticas, socioeconômicas e ecológicas.** 2004. 293 f. Tese (Doutorado em Meio Ambiente e Desenvolvimento) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.
- YUANCAI, L.; PARRESOL, B. R. **Remarks on height-diameter modelling.** [S. l.]; Southern Research Station, 2001.
- ZANZARINI, F. V.; PISSARA, T. C. T.; BRANDÃO, F. J. C.; TEIXEIRA, D. D. B. Correlação espacial do índice de vegetação (NDVI) de imagem Landsat/ETM+ com atributos do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 6, p. 608-414, 2013.

## APÊNDICE A – Dados referentes aos Índices de Vegetação

Tabela 13 – Dados dos Índices de vegetação para as parcelas de azinheira.

PARCELA	NDVI	SR	SAVI	EVI
Az1 18	0,207981	1,536904	0,311734	-0,30663
Az1 29	0,221454	1,585495	0,331999	-0,30727
Az1 4	0,234298	1,638465	0,351178	-0,30208
Az1 49	0,234759	1,627114	0,351887	-0,30291
Az1 51	0,253764	1,700571	0,380348	-0,30018
Az1 66	0,223744	1,589109	0,335384	-0,30148
Az2 18	0,280667	1,811717	0,420702	-0,29128
Az2 19	0,286687	1,837055	0,429709	-0,28944
Az2 35	0,282076	1,81529	0,423358	-0,28646
Az2 37	0,289155	1,856417	0,433425	-0,29252
Az2 38	0,31309	1,937058	0,469332	-0,28278
Sb1 17	0,26065	1,753835	0,390733	-0,30647
Sb1 36	0,240207	1,675225	0,360033	-0,29985
Sb1 37	0,202141	1,530695	0,303047	-0,31526
Sb2 60	0,307164	1,927747	0,460457	-0,29125

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Tabela 14 – Dados dos Índices de vegetação para as parcelas de Eucalipto.

Talhão	Parcela	NDVI	SR	SAVI	EVI
2	17	0,71615	6,099076	1,074169	-0,41674
2	26	0,738044	6,635203	1,106272	-0,40366
2	33	0,737164	6,619706	1,10539	-0,4046
3	31	0,754104	7,196389	1,132556	-0,38279
3	34	0,767047	7,586432	1,150217	-0,37628
3	36	0,749492	6,989169	1,123854	-0,40509
3	37	0,767543	7,607533	1,150972	-0,36981
4	18	0,723515	6,281869	1,085163	-0,4114
4	22	0,734117	6,550792	1,100992	-0,40641
4	28	0,738669	6,65105	1,106762	-0,40083
5	1	0,774474	7,871243	1,161425	-0,36655
5	2	0,777254	7,974183	1,165191	-0,36158
5	3	0,758464	7,267142	1,136979	-0,38406
5	4	0,775266	7,901722	1,162519	-0,35911
5	5	0,776951	7,971364	1,165217	-0,35749
5	6	0,764694	7,506497	1,146915	-0,36765
5	7	0,768995	7,729616	1,154861	-0,36588
6	11	0,766408	7,56107	1,149223	-0,34937
6	13	0,76158	7,400062	1,141763	-0,3575
6	14	0,771925	7,770767	1,157577	-0,34405
6	19	0,757262	7,321901	1,137726	-0,35609
6	20	0,764068	7,479836	1,145662	-0,35462
6	23	0,765858	7,540489	1,148254	-0,34816
6	8	0,766495	7,561778	1,14923	-0,34649
6	9	0,768739	7,650121	1,152655	-0,34779
8	10	0,730284	6,415613	1,094883	-0,41694
8	12	0,710508	5,906678	1,064501	-0,44137
8	15	0,705773	5,817777	1,058846	-0,43365
8	16	0,695417	5,598875	1,043017	-0,43451

---

8	21	0,721522	6,189364	1,082217	-0,4252
8	25	0,725782	6,300947	1,087992	-0,42149
8	30	0,722638	6,215308	1,083464	-0,42215
9	24	0,724039	6,289058	1,085884	-0,41054
9	27	0,733251	6,510184	1,099638	-0,40245
9	29	0,732044	6,465015	1,097482	-0,40797
9	32	0,724494	6,268288	1,085945	-0,42067
9	35	0,673904	5,265653	1,010505	-0,45339

---

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

## APÊNDICE B – Montado Alentejano

Figura 36 – Montado Alentejano localizado no Pólo de Mitra.



Figura 37 – Vista interna do montado alentejano.



Figura 38 – Exemplar de Azinheira (*Quercus rotundifolia*).



Figura 39 – Casca e ramificações de um exemplar de Azinheira (*Quercus rotundifolia*).

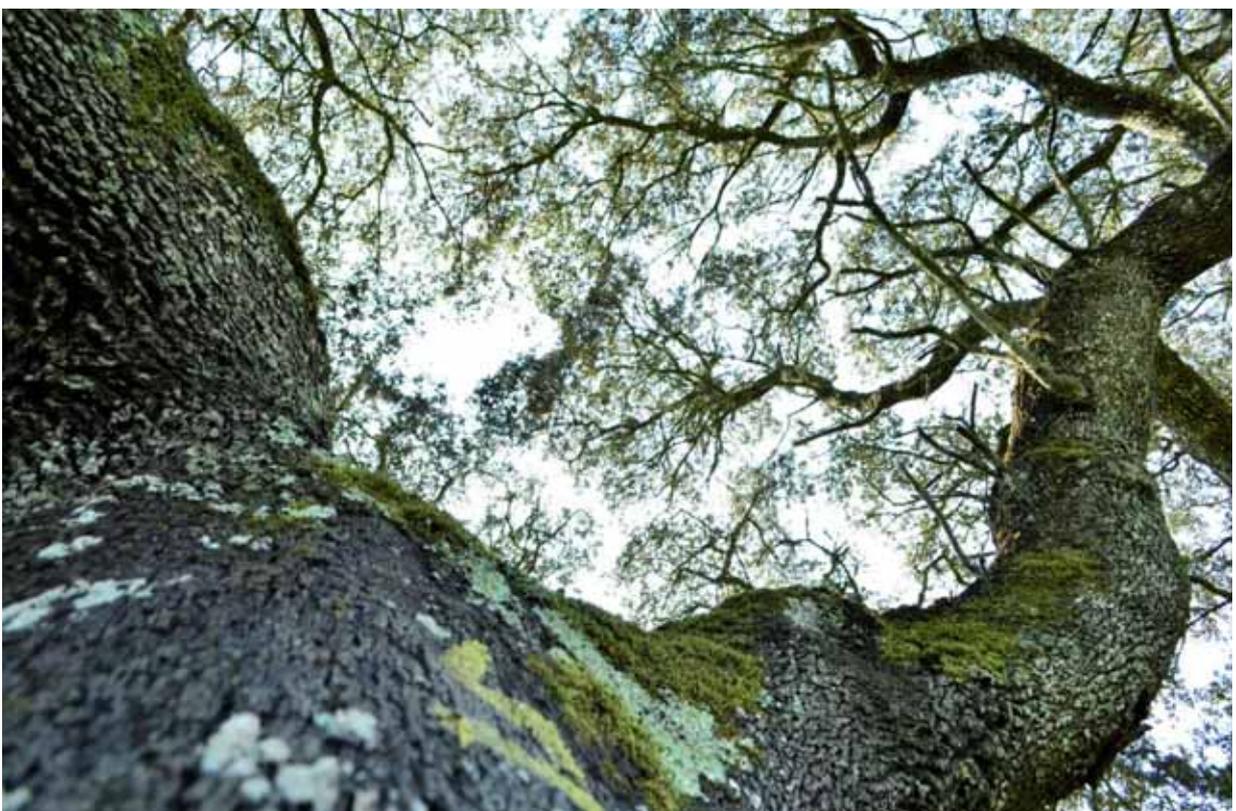


Figura 40 – Equipe de trabalho no montado alentejano.

