

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL**

**RESPOSTA ESPECTRAL DE FOLHAS DE
Eucalyptus globulus (Labill.) ATACADAS POR
Mycosphaerella spp.**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Diogo Belmonte Lippert

Santa Maria, RS, Brasil

2011

RESPOSTA ESPECTRAL DE FOLHAS DE *Eucalyptus globulus* (Labill.) ATACADAS POR *Mycosphaerella* spp.

por

Diogo Belmonte Lippert

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Área de Concentração em Silvicultura, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Florestal.**

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Marlove Fátima Brião Muniz

Santa Maria, RS, Brasil

2011

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal**

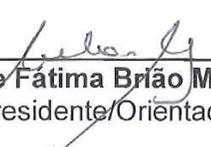
A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**RESPOSTA ESPECTRAL DE FOLHAS DE *Eucalyptus globulus*
(Labill.) ATACADAS POR *Mycosphaerella* spp.**

elaborada por
Diogo Belmonte Lippert

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Florestal

COMISSÃO EXAMINADORA:



Marlove Fátima Brião Muniz, Dr^a.
(Presidente/Orientadora)



Elena Blume, PhD. (UFSM)



Elvis Rabuske Hendges, Dr. (UNIOESTE)

Santa Maria, 25 de Fevereiro de 2011.

L765r Lippert, Diogo Belmonte
Resposta espectral de folhas de eucalyptus globulus (Labill.) atacadas por
Mycosphaerella spp. / por Diogo Belmonte Lippert. – 2011.
64 f. ; il. ; 30 cm

Orientador: Marlove Fátima Brião Muniz
Coorientador: Rudiney Soares Pereira
Coorientador: Maristela Machado Araújo
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de
Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, RS, 2011

1. Engenharia florestal 2. Espectrorradiometria 3. Nível de severidade
4. Reflectância foliar 5. Epidemiologia I. Muniz, Marlove Fátima Brião
II. Pereira, Rudiney Soares III. Araújo, Maristela Machado IV. Título.

CDU 630.2:632.26

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**RESPOSTA ESPECTRAL DE FOLHAS DE *Eucalyptus globulus*
(Labill.) ATACADAS POR *Mycosphaerella* spp.**

elaborada por
Diogo Belmonte Lippert

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Florestal

COMISSÃO EXAMINADORA:

Marlove Fátima Brião Muniz, Dr^a.
(Presidente/Orientadora)

Elena Blume, PhD. (UFMS)

Elvis Rabuske Hendges, Dr. (UNIOESTE)

Santa Maria, 25 de Fevereiro de 2011.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Santa Maria que, através do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, oportunizou a realização do curso de Mestrado.

Ao órgão financiador CAPES, pelo apoio financeiro com a concessão da bolsa de mestrado.

A minha orientadora Prof.^a Marlove Fátima Brião Muniz, por todo o aprendizado, constante incentivo, confiança e amizade demonstrada durante a elaboração deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Rudiney Soares Pereira pela Co-orientação e pelo empréstimo do espectrorradiômetro, equipamento indispensável para a realização deste trabalho, e ainda por toda a ajuda prestada e idéias sugeridas.

À Professora Dra. Maristela Machado Araújo, pela Co-Orientação e ajuda neste trabalho.

Aos professores Dr. Frederico Dimas Fleig e ao Dr. Alessandro Dal Col Lúcio pela ajuda fornecida.

À banca examinadora, constituída pela Prof.^a. Phd Elena Blume e Prof. Dr. Élvís Rabuske Hendges, por suas contribuições.

À empresa Fibria pela infra-estrutura disponibilizada durante a execução do trabalho, e aos amigos Elder Finkenauer, Osmarino Santos, Sidiclei e Eder pelas contribuições prestadas.

À minha mãe, Maria Cristina Belmonte, por sempre estar ao meu lado, dando forças e orientando para seguir em frente.

Em especial, a minha noiva, Ana Caroline Paim Benedetti, pelo carinho e amor, pela presença constante, além do apoio nos momentos mais difíceis.

Ao acadêmico do curso de Engenharia Florestal da UFSM, Carlos Alberto Biernaski, que nunca mediu esforços para ajudar neste trabalho.

Ao pessoal dos laboratórios de Fitopatologia e de Sensoriamento Remoto da UFSM, pelo apoio e ajuda fornecida.

A todos os amigos que contribuíram, de forma direta ou indireta, para a conquista dessa vitória.

Muito Obrigado!

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal
Universidade Federal de Santa Maria

RESPOSTA ESPECTRAL DE FOLHAS DE *Eucalyptus globulus* (Labill.) ATACADAS POR *Mycosphaerella* spp.

AUTOR: DIOGO BELMONTE LIPPERT

ORIENTADORA: PROF^a. Dr^a. MARLOVE FÁTIMA BRIÃO MUNIZ

Local e Data da Defesa: Santa Maria, 25 de Fevereiro de 2011.

Eucalyptus globulus uma das espécies mais importantes para a indústria do papel e celulose, atualmente enfrenta problemas de desenvolvimento em diversos países por ser suscetível ao ataque de *Mycosphaerella* spp., fungo causador de manchas foliares às quais sucedem o desfolhamento das copas. O estudo tem como objetivo analisar o comportamento espectral de folhas de *E. globulus* em resposta à severidade da doença causada pelo fungo *Mycosphaerella* spp. O povoamento avaliado localiza-se no município de Herval-RS. Foram realizadas quatro coletas nas diferentes estações climáticas. Em cada coleta, com auxílio de espectrorradiômetro, efetuaram-se as leituras de reflectância das folhas classificadas em diferentes níveis de severidade (sadio, pouco atacado, medianamente atacado e muito atacado) presentes na base, no meio e na parte superior da copa. Os valores de reflectância foram então analisados segundo duas subdivisões do espectro eletromagnético (visível e infravermelho próximo). Os resultados obtidos através da ANOVA, para os valores médios de reflectância foliar na faixa do visível do espectro eletromagnético, indicam a existência de diferenças entre os níveis de severidade, entre as posições de coleta, bem como interação entre os dois fatores: posição de coleta na árvore e severidade da doença. Na porção do espectro eletromagnético correspondente ao infravermelho próximo, também foram verificadas diferenças significativas entre as posições de coleta e entre os níveis de severidade. Constatou-se a interação entre as posições de coleta na árvore e a severidade da doença. Foi possível concluir que existem variações no comportamento espectral dos níveis de severidade de acordo com a posição das folhas na árvore nas diferentes estações climáticas. Na resposta espectral das folhas de *Eucalyptus globulus* é detectada diferenças significativas entre os menores e maiores níveis de infecção por *Mycosphaerella* spp., tanto na região do visível quanto na do infravermelho.

Palavras-chave: epidemiologia; nível de severidade; espectrorradiometria; reflectância foliar.

ABSTRACT

Master's Dissertation
Graduation Program in Forest Engineering
Federal University of Santa Maria

SPECTRAL RESPONSE OF *Eucalyptus globulus* (Labill.) LEAFS ATTACKED BY *Mycosphaerella* spp.

AUTHOR: DIOGO BELMONTE LIPPERT

ADVISER: PROF^a. Dr^a. MARLOVE FÁTIMA BRIÃO MUNIZ

Defense Place and Date: Santa Maria, February 25th, 2011.

Eucalyptus globulus one of the most important species for paper and pulp industries, nowadays faces development problems in several countries due to its susceptibility to the fungus *Mycosphaerella* spp., which causes leaf spots that may cause the crown defoliation. The study aims at analyzing the spectral behavior of *E. globulus* leaves in response to the severity of the disease caused by the fungus *Mycosphaerella* spp. The stand evaluated is located at Herval - RS. Four collections were performed during the different climate seasons. In each collection, with the aid of a spectroradiometer, we carried out the reading of the foliar reflectance with different severity levels (healthy, little affected, median attack and severely attacked) in leaves from the lower, medium and higher part of the crown. The reflectance values were then analyzed according to two divisions of the electromagnetic spectrum (visible and proximal infrared). The results obtained through ANOVA for the mean value of foliar reflectance in the visible band of the electromagnetic spectrum indicate the existence of differences between levels of severity, between the positions of collection, as well as interaction between two factors: position in the tree collection and disease severity. In the part of the electromagnetic spectrum that corresponds to proximal infrared, we verified significant differences between climate seasons, collection positions and severity level. It was found interaction between collection positions and climate seasons as well as among the three factors, climate seasons, and collection positions in the tree and disease severity. It was then possible to conclude that there are variations in the spectral behavior of severity levels according to leaf position in the tree and to the climate season. The reflectance of "severely" attacked leaves is clearly distinguished from leaves in the "healthy" and "little affected" levels.

Key words: epidemiology; severity level; spectroradiometry; foliar reflectance.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Talhão de <i>Eucalyptus globulus</i> Labill. à esquerda, e talhão de clones de híbridos de <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> à direita.....	17
Figura 2 – Folhas jovens de <i>Eucalyptus globulus</i> Labill. com sintomas (A); mancha característica da doença (B); pontuações escuras no centro da lesão correspondentes a estruturas do fungo (C); ascas com ascósporos de <i>Mycosphaerella</i> spp. (D).....	21
Figura 3 – Distribuição de <i>Mycosphaerella</i> spp. em cultivos de eucalipto no mundo.....	23
Figura 4 – Distribuição do fungo <i>Mycosphaerella</i> spp. em florestas de eucalipto da Austrália.....	24
Figura 5 – O espectro eletromagnético.....	26
Figura 6 – Formas de interação da energia solar com a vegetação (I= INCIDENTE, A= ABSORVIDA, R= REFLETIDA, T= TRANSMITIDA).....	28
Figura 7 – Localização da Fazenda Florestal São Cipriano, Herval - RS.....	33
Figura 8 – Instalação das parcelas de coleta de material vegetativo no interior da Fazenda Florestal São Cipriano.....	35
Figura 9 – Posições de coleta do material vegetativo (B= base, M= meio e S= superior) na árvore.....	36
Figura 10 – Representação das amostras segundo os níveis de severidade “Sadio”, “Pouco”, “Médio” e “Muito” para as folhas de <i>Eucalyptus globulus</i> atacadas por <i>Mycosphaerella</i> spp.....	38
Figura 11 – Espectrorradiômetro FieldSpec R ³ utilizado em laboratório para as leituras de reflectância nas folhas de <i>Eucalyptus globulus</i>	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Sequência do sorteio das parcelas amostradas para a coleta do material vegetativo no talhão de <i>Eucalyptus globulus</i> durante as quatro estações.....	36
Tabela 2 – Escala de severidade usada para a classificação visual das folhas de <i>Eucalyptus globulus</i> atacadas por <i>Mycosphaerella</i> spp.....	37
Tabela 3 – ANOVA para a resposta espectral na região do visível de folhas de <i>Eucalyptus globulus</i> com diferentes níveis de severidade da mancha de <i>Mycosphaerella</i> spp. em diferentes posições da árvore na estação climática primavera.....	42
Tabela 4 – Médias dos níveis de severidade da resposta espectral de folhas de <i>Eucalyptus globulus</i> atacadas por <i>Mycosphaerella</i> spp. na estação climática primavera, na região do visível.....	42
Tabela 5 – ANOVA para a resposta espectral na região do visível de folhas de <i>Eucalyptus globulus</i> com diferentes níveis de severidade da mancha de <i>Mycosphaerella</i> spp. em diferentes posições da árvore na estação climática verão.....	43
Tabela 6 – ANOVA para a resposta espectral na região do visível de folhas de <i>Eucalyptus globulus</i> com diferentes níveis de severidade da mancha de <i>Mycosphaerella</i> spp. em diferentes posições da árvore na estação climática outono.....	45
Tabela 7 – Médias dos níveis de severidade da resposta espectral de folhas de <i>Eucalyptus globulus</i> atacadas por <i>Mycosphaerella</i> spp. na estação climática outono, na região do visível.....	46
Tabela 8 – ANOVA para a resposta espectral na região do visível de folhas de <i>Eucalyptus globulus</i> com diferentes níveis de severidade da mancha de <i>Mycosphaerella</i> spp. em diferentes posições da árvore na estação climática inverno.....	46
Tabela 9 – Médias dos níveis de severidade da resposta espectral de folhas de <i>Eucalyptus globulus</i> atacadas por <i>Mycosphaerella</i> spp. na estação climática inverno, na região do visível.....	47

Tabela 10 – ANOVA para a resposta espectral na região do infravermelho próximo de folhas de <i>Eucalyptus globulus</i> com diferentes níveis de severidade da mancha de <i>Mycosphaerella</i> spp. em diferentes posições da árvore na estação climática primavera.....	48
Tabela 11 – Médias dos níveis de severidade da resposta espectral de folhas de <i>Eucalyptus globulus</i> atacadas por <i>Mycosphaerella</i> spp. na estação climática primavera, na região do infravermelho próximo.....	48
Tabela 12 – ANOVA para a resposta espectral na região do infravermelho próximo de folhas de <i>Eucalyptus globulus</i> com diferentes níveis de severidade da mancha de <i>Mycosphaerella</i> spp. em diferentes posições da árvore na estação climática verão.....	49
Tabela 13 – Médias dos níveis de severidade da resposta espectral de folhas de <i>Eucalyptus globulus</i> atacadas por <i>Mycosphaerella</i> spp. na estação climática verão, na região do infravermelho próximo.....	50
Tabela 14 – ANOVA para a resposta espectral na região do infravermelho próximo de folhas de <i>Eucalyptus globulus</i> com diferentes níveis de severidade da mancha de <i>Mycosphaerella</i> spp. em diferentes posições da árvore na estação climática outono.....	51
Tabela 15 – Médias dos níveis de severidade da resposta espectral de folhas de <i>Eucalyptus globulus</i> atacadas por <i>Mycosphaerella</i> spp. na estação climática outono, na região do infravermelho próximo.....	52
Tabela 16 – ANOVA para a resposta espectral na região do infravermelho próximo de folhas de <i>Eucalyptus globulus</i> com diferentes níveis de severidade da mancha de <i>Mycosphaerella</i> spp. em diferentes posições da árvore na estação climática inverno.....	53
Tabela 17 – Médias dos níveis de severidade da resposta espectral de folhas de <i>Eucalyptus globulus</i> atacadas por <i>Mycosphaerella</i> spp. na estação climática inverno, na região do infravermelho próximo.....	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANOVA -	<i>Analysis of Variance</i>
APP -	Área de Preservação Permanente
DBC -	Delineamentos Blocos ao Acaso
DAP -	Diâmetro à Altura do Peito
FAMURS -	Federação das Associações de Municípios do Rio Grande do Sul
HSD -	<i>Honestly Significant Difference</i>
IBGE -	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDH -	Índice de Desenvolvimento Humano
INPE -	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IV -	Infravermelho
SIG -	Sistema de Informação Geográfica
UFSM -	Universidade Federal de Santa Maria
VCP -	Votorantim Celulose e Papel
ηm -	Nanômetro

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1 <i>Eucalyptus globulus</i>.....	15
2.2 Epidemiologia de doenças florestais.....	16
2.3 Quantificação de doenças.....	18
2.4 Mancha de <i>Mycosphaerella</i> spp. em eucalipto.....	20
2.5 Sensoriamento Remoto.....	25
2.5.1 Reflectância espectral da vegetação.....	27
2.5.2 Sistemas sensores de uso terrestre.....	31
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	33
3.1 Caracterização geral da área de estudo.....	33
3.1.1 Características silviculturais do plantio.....	34
3.2 Obtenção de dados a campo.....	34
3.3 Obtenção de dados em laboratório.....	36
3.3.1 Classificação visual das amostras.....	37
3.3.2 Análise espectrorradiométrica.....	38
3.3.3 Conversão e processamento dos dados de reflectância	39
3.4 Procedimento estatístico.....	40
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	41

4.1 Resposta espectral de folhas de <i>Eucalyptus globulus</i> atacadas por <i>Mycosphaerella</i> spp. na região do visível do espectro eletromagnético considerando as quatro estações climáticas.....	41
4.1.1 Resposta espectral de <i>Eucalyptus globulus</i> atacado por <i>Mycosphaerella</i> spp. na estação climática primavera, na região do visível.....	41
4.1.2 Resposta espectral de <i>Eucalyptus globulus</i> atacado por <i>Mycosphaerella</i> spp. na estação climática verão, na região do visível.....	43
4.1.3 Resposta espectral de <i>Eucalyptus globulus</i> atacado por <i>Mycosphaerella</i> spp. na estação climática outono, na região do visível.....	44
4.1.4 Resposta espectral do <i>Eucalyptus globulus</i> atacado por <i>Mycosphaerella</i> spp. na estação climática inverno, na região do visível.....	46
4.2 Resposta espectral de folhas de <i>Eucalyptus globulus</i> atacadas por <i>Mycosphaerella</i> spp. na região do infravermelho do espectro eletromagnético considerando as quatro estações climáticas.....	47
4.2.1 Resposta espectral do <i>Eucalyptus globulus</i> atacado por <i>Mycosphaerella</i> spp. na estação climática primavera, na região do infravermelho próximo.....	47
4.2.2 Resposta espectral de <i>Eucalyptus globulus</i> atacado por <i>Mycosphaerella</i> spp. na estação climática verão, na região do infravermelho próximo.....	49
4.2.3 Resposta espectral de <i>Eucalyptus globulus</i> atacado por <i>Mycosphaerella</i> spp. na estação climática outono, na região do infravermelho próximo.....	51
4.2.4 Resposta espectral de <i>Eucalyptus globulus</i> atacado por <i>Mycosphaerella</i> spp. na estação climática inverno, na região do infravermelho próximo.....	52
5 CONCLUSÕES.....	54
5.1 Considerações finais.....	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	56

1 INTRODUÇÃO

Eucalyptus spp. é um dos gêneros mais populares para a silvicultura comercial e suas plantações expandem-se mais rapidamente do que qualquer outra espécie florestal, devido à qualidade da madeira, ao crescimento relativamente rápido e à sua adaptabilidade a diferentes ambientes (TURNBULL, 2000). Espécies de *Eucalyptus* são propagadas comercialmente em forma de plantações em muitos países tropicais e subtropicais, onde a madeira é usada principalmente para a indústria de papel e celulose.

Eucalyptus globulus Labill., por apresentar rápido crescimento e fácil adaptação, foi a primeira espécie a se espalhar por diversos países. Foi implantado em Portugal, Espanha, Uruguai, Chile, Peru, Equador, Bolívia, Brasil (principalmente no Rio Grande do Sul), Argentina, Estados Unidos e Etiópia (GOES, 1991). Essa espécie demonstrou ser muito promissora no sul do país, dada sua maior resistência ao frio (BARRICHELO; FOELKEL, 1976); apresenta características muito importantes para a fabricação de papel e celulose, pois, segundo os autores, sua celulose apresenta altos rendimentos, elevada resistência à tração ao arrebentamento. Para Barrichelo e Brito (1983), a madeira de *E. globulus* apresenta elevados teores de holocelulose, baixos teores de lignina e valores de densidade básica semelhantes àqueles obtidos para as espécies normalmente usadas para produção industrial de celulose.

No entanto, *Eucalyptus globulus* vem enfrentando problemas de desenvolvimento em diversos países onde é plantado, por tratar-se de uma espécie suscetível ao ataque do fungo *Mycosphaerella* spp., atualmente também denominado *Teratosphaeria* spp. A doença causada por esse patógeno apresenta como sintomas manchas foliares, as quais sucede o desfolhamento da copa das árvores atacadas (CROUS et al., 2004).

Embora *Eucalyptus globulus* seja uma das espécies mais afetadas por doenças e pragas, não deixará de estar presente em programas de melhoramento genético para a produção de papel e celulose, devido às suas excelentes características para esses fins, tornando-se imprescindível o desenvolvimento de ferramentas que visem auxiliar a observação e o monitoramento de seus povoamentos.

No Brasil, e em grande parte do mundo, a maioria dos métodos utilizados, atualmente, para a detecção de doenças em povoamentos florestais é a avaliação visual (NILSSON, 1995; STEDDOM et al., 2005). No entanto, a limitação das técnicas visuais reside na demora e no intenso trabalho quando implementadas em grandes áreas (KOBAYASHI et al., 2001).

Na fitopatologia florestal, a avaliação e a quantificação de doenças são necessárias tanto para o estudo de medidas de controle e para a caracterização da resistência varietal, como também para a epidemiologia, na construção de curvas de progresso da doença e estimativa dos danos provocados por ela. Uma das maiores dificuldades enfrentadas por produtores e pesquisadores no controle de doenças florestais é o tamanho dos povoamentos, pois, nas grandes áreas plantadas, a localização e o conhecimento da distribuição espacial dos patógenos e o estágio em que a doença se encontra são de extrema dificuldade, sendo apenas detectados após estarem muito infectadas.

Ainda são poucos os produtos fungicidas e bactericidas registrados para as culturas florestais. Um forte obstáculo para o uso desse tipo de medida de controle, no caso de grandes áreas, seriam os altos custos do tratamento, tanto econômicos quanto ecológicos, quando realizado na totalidade da área. No entanto, se forem conhecidos com precisão os pontos de ocorrência do ataque e estágio da doença, o controle racional poderá ser realizado com maior eficiência.

Imagens de satélite, há alguns anos, vêm sendo utilizadas para o monitoramento de culturas agrícolas e florestais. Mais recentemente, a disponibilidade de sensores eficazes em descrever o comportamento espectral da vegetação, em função de sua interação com a energia eletromagnética, aumentou a possibilidade de se obterem informações sobre a tipologia, a estrutura do dossel, o estado fenológico da cultura, as condições de estresse e a falta de nutrientes.

Como o método mais utilizado para identificação de doenças florestais consiste em retirar amostras das árvores doentes e enviá-las para análise em laboratório, o uso de equipamentos sensores que auxiliem na identificação de danos à vegetação é de suma importância, sobretudo em grandes áreas, como no caso de plantios comerciais. Um desses equipamentos é o espectrorradiômetro, que pode ser utilizado a campo ou em laboratório, e tem a função de registrar a energia refletida por um determinado alvo como, por exemplo, a vegetação, gerando uma assinatura espectral capaz de descrever seu comportamento fisiológico.

A resposta espectral da vegetação fotossinteticamente ativa, na região do visível do espectro eletromagnético, corresponde a uma baixa reflectância devido à absorção da radiação incidente pela clorofila e pelos carotenóides da planta; já na região do infravermelho próximo, ocorre uma alta reflectância devido à estrutura celular da folha (PONZONI; SHIMABUKURU, 2010), a qual tem essas condições alteradas quando submetida a situações de estresse, em virtude, por exemplo, do ataque de doenças e de pragas. Quanto à *Mycosphaerella* spp., a hipótese é que muitas das alterações nas propriedades foliares, induzidas pela infecção, irão influenciar a resposta espectral nas regiões do visível e do infravermelho próximo do espectro eletromagnético.

O desenvolvimento de metodologias capazes de identificar diferentes níveis de severidade de doenças, ou seja, capazes de caracterizar o estado sanitário de uma floresta facilita o controle e, com isso, auxilia na proteção e no planejamento silvicultural das espécies ou clones de interesse.

Nesse sentido, o objetivo geral desse estudo foi analisar a resposta espectral de folhas de *Eucalyptus globulus* (Labill.) em resposta à severidade da doença causada pelo fungo *Mycosphaerella* spp. E como objetivos específicos têm-se:

- 1) Avaliar a resposta espectral de folhas de três diferentes posições na copa da árvore, classificadas em quatro níveis de severidade de dano nas diferentes estações climáticas, considerando a região do visível do espectro eletromagnético.
- 2) Avaliar a resposta espectral de folhas de três diferentes posições na copa da árvore, classificadas em quatro níveis de severidade de dano nas diferentes estações climáticas, considerando a região do infravermelho próximo do espectro eletromagnético.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 *Eucalyptus globulus*

A silvicultura comercial no Brasil com espécies não nativas ocupa uma área de quase 6 milhões de hectares, dos quais 3,5 milhões de hectares são plantados com *Eucalyptus* spp. Espécies puras e híbridas de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden, *Eucalyptus saligna* Smith e *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake são tipicamente plantadas em regiões de clima tropical e subtropical; *Eucalyptus dunnii* Maiden, *Eucalyptus globulus* (Labill.) e *Eucalyptus viminalis* (Labill.), em zonas temperadas (SBS, 2010).

O gênero *Eucalyptus* pertence à família Mirtáceae e conta com mais de 600 espécies, sendo a grande maioria originária da Austrália, onde ocupa uma extensa área geográfica. Ocorre desde o nível do mar até altitudes superiores a 1000 metros, em clima temperado ao sul e subtropical ao norte (ANDRADE, 1961). Segundo Foelkel et al. (1975), dissemina-se por quase todas as regiões tropicais e subtropicais do mundo, vindo a se destacar em maior escala no Brasil, mais especificamente na região centro-sul. Segundo o autor, a primeira referência relativa à utilização de madeira de *Eucalyptus* spp. para a produção de celulose provém de Portugal. Celulose sulfito foi obtida por D. E. Berggvist, em 1906, a partir de *Eucalyptus globulus*.

Eucalyptus globulus Labill. possui uma distribuição natural bastante restrita, encontrando-se limitado a pequenas manchas da zona litorânea do Sudeste e Sul da Tasmânia, nas Ilhas Flinders e King entre a Tasmânia e a Austrália, e no estado de Victória, junto ao Cabo Otway e Promontório Wilsons, em altitudes compreendidas entre o nível do mar e 400 metros. A latitude varia para essa espécie de 38° a 43° Sul. O clima é temperado frio, uniforme, de úmido a subúmido. As temperaturas médias anuais máximas estão em torno de 21°C e as mínimas, 4°C. A precipitação média anual varia entre 500 e 1.500 milímetros (POYNTON, 1979). Foi a primeira espécie de eucalipto que se espalhou pelo mundo devido ao seu rápido crescimento e fácil adaptação. Foi implantada principalmente em Portugal, Espanha, Uruguai,

Chile, Peru, Equador, Bolívia, Brasil (principalmente no estado do Rio Grande do Sul), Argentina, Estados Unidos e Etiópia, sendo que nos anos 90 a área total plantada no mundo era da ordem de 1.100.000 ha (GOES, 1991).

É uma espécie importante para produção de celulose (VOLKER; ORME, 1988); no entanto, devido a estar muito suscetível ao ataque de pragas e doenças, o *E. globulus*, hoje, vem sendo utilizado em programas de melhoramento genético e em programas de hibridização com outras espécies de eucaliptos para obter árvores resistentes a doenças e com qualidade desejada para a fabricação de papel e celulose. Além do *E. globulus*, várias espécies de eucaliptos utilizadas na silvicultura brasileira e no resto do mundo encontram-se seriamente ameaçadas por pragas e doenças (COUTINHO et al., 1998; ALFENAS et al., 2009).

2.2 Epidemiologia de doenças florestais

Para Vanderplank (1963), epidemiologia é “a ciência da doença em populações” e, para Kranz (1974), consiste no “estudo de populações de patógenos em populações de hospedeiros e da doença resultante desta interação, sob a influência do ambiente e a interferência humana”.

De acordo com Lucas (1998), três fatores são simultaneamente necessários para a ocorrência da epidemia de uma doença. Em primeiro lugar, uma fonte viável e ativa de inóculo; em segundo, um grande número de hospedeiros em um estágio de seu ciclo de vida suscetíveis à infecção; e, finalmente, as condições ambientais específicas exigidas pelo patógeno de um hospedeiro, para assim colonizar e produzir novas unidades de dispersão. Na figura 1, pode ser visualizada a monocultura de diferentes espécies do gênero *Eucalyptus*, diante disso, é confirmada a susceptibilidade de algumas espécies e outras não, como descreve a epidemiologia.

As variáveis ambientais de maior influência para infecção pelo patógeno na progressão espacial e temporal incluem: umidade relativa do ar, temperatura, período de molhamento foliar, vento (velocidade e direção), radiação solar e nutrição de plantas. Cada uma dessas variáveis pode afetar a eficiência de infecção e subsequente desenvolvimento da doença, quer diretamente (por exemplo, através

do desenvolvimento do patógeno), ou indiretamente (por exemplo, o desempenho do hospedeiro) (LUCAS, 1998).

O risco de uma epidemia em uma monocultura é maior do que em uma floresta mista, devido à uniformidade do crescimento das plantas, um grande número de indivíduos da mesma espécie reunidos em uma área, baixa variabilidade genética (OLD et al., 2003). Nos plantios de florestas homogêneas, as árvores são plantadas em um padrão regular e encontram-se em um estágio similar de desenvolvimento; por exemplo, o estágio de folha juvenil, o mais suscetível a uma doença, estará presente, ao mesmo tempo, em um grande número de árvores (ZADOKS; SCHEIN, 1979).



Figura 1 – Talhão de *Eucalyptus globulus* Labill. à esquerda, e talhão de clones de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* à direita.

Fonte: imagem do autor.

Tais fatores, em plantios homogêneos, aumentam o risco da probabilidade de uma epidemia, desde que os hospedeiros sejam suscetíveis ao inóculo (patógeno) e as condições ambientais presentes ocorram concomitantemente. O inóculo pode

estar presente tanto naturalmente em torno da vegetação nativa, ou pode ser disseminado pelo vento ou água para os hospedeiros (AGRIOS, 2005).

No noroeste da Tasmânia, baixos níveis de danos causados por *Mycosphaerella* spp. foram observados em árvores plantadas em 1999 e esses podem ter proporcionado uma fonte de inóculo para as plantações vizinhas que foram plantadas em 2000, junto com as condições ambientais favoráveis ao desenvolvimento da doença, resultando em uma epidemia que varia de alta a moderada com os níveis de dano da copa de 40% a 70% (WARDLAW, 2002).

2.3 Quantificação de doenças

A quantificação de doenças de plantas, também denominada fitopatometria, é uma das mais importantes áreas da fitopatologia (JAMES, 1974). Sua importância pode ser comparada à etiologia, uma vez que conhecer o agente causal, mas não quantificar a extensão dos seus danos no hospedeiro, não faz muito sentido. As medidas mais comumente utilizados em fitopatometria são incidência e severidade. A incidência refere-se à porcentagem de plantas doentes, ou de partes de plantas doentes, e a severidade refere-se à proporção do volume ou área do tecido com sintomas (JAMES, 1974; BERGAMIM FILHO et al., 1995). A quantificação de uma doença por incidência é mais fácil, precisa e simples. A avaliação da severidade exige a adoção de chaves descritivas, escalas diagramáticas, técnicas de sensoriamento remoto. Dessas três, as escalas diagramáticas são as mais utilizadas atualmente e constituem-se em representações ilustradas de uma série de plantas ou de partes de plantas com sintomas em diferentes níveis de severidade da doença.

A quantificação de doenças visa avaliar os sintomas causados pelos agentes patogênicos nas plantas e seus sinais (estruturas do patógeno associadas aos tecidos doentes). Segundo Bergamim Filho et. al. (1995), a quantificação de doenças é um tópico ligado a diversas especialidades dentro da Fitopatologia, sendo necessária tanto para o estudo de medidas de controle, na determinação da eficiência de um fungicida e na caracterização à resistência varietal, como para a

epidemiologia, na construção de curvas de progresso da doença e estimativas de danos causados por ela.

De acordo com Alfenas et al. (2009), em um programa de melhoramento genético, além das características silviculturais, tecnológicas e de rendimento de madeira, é fundamental avaliar também a resistência a doenças, uma vez que materiais suscetíveis, quando plantados em extensas áreas, podem resultar em perdas de grande impacto econômico. Para avaliação da doença, é necessário estabelecer métodos simples, rápidos e precisos para sua quantificação.

As quantificações precisas de perdas, como relatam Berti Filho e Krügner (1986), são de difícil execução. No entanto, uma estimativa do impacto da mesma poderá ser buscada por ocasião da ocorrência dos surtos epidêmicos, através da avaliação da quantidade de doença em povoamentos de espécies/procedências com diferentes níveis de ataque e da medição dos parâmetros de crescimento desses povoamentos.

Uma análise detalhada dos objetivos define os critérios para se escolher o método para avaliação da doença. Assim, métodos adequados devem ser escolhidos de forma criteriosa a fim de melhorar o grau de acurácia, precisão e repetibilidade das avaliações (GAUNT, 1987). Tais medidas são essenciais na quantificação da doença no espaço e no tempo (ZADOKS, 1972). O método de avaliação varia com o agente etiológico e com a característica espacial da doença (GAUNT, 1995). No caso de doenças foliares, a severidade é a variável mais utilizada, sendo que sua avaliação é, normalmente, feita de forma subjetiva por meio de análises visuais e, por conseguinte, as escalas diagramáticas tornam-se ferramentas fundamentais em tais estudos (GODOY et. al., 1997).

Sanfuentes (2000) utilizou escala de notas para avaliar a doença mela de *Rhizoctonia* spp. em folhas de eucalipto, dividindo-a em 4 notas, onde a nota 1 equivalia a 0% de ataque, a 2 de 1 a 25%, a 3 de 26 a 50% e a 4 de 51% ou mais da superfície foliar com sintomas de mela. Xavier et al. (2007) utilizaram escala diagramática para avaliar a resposta de resistência de espécies de *Eucalyptus globulus* e *Eucalyptus nitens* inoculados com *Puccinia psidii* Winter, a fim de obter uma seleção de genótipos resistentes ao patógeno para hibridização. Foram utilizadas escalas de notas, conforme Junghans et al. (2003), de acordo com a severidade da doença e classificadas em quatro diferentes classes de ataque.

Alguns pesquisadores, na análise diagramática, separam a severidade em muitas classes, por exemplo, em 10 classes (1= 2%, 2= 4%, 3= 8%, 4= 16.5%, 5= 32%, 6= 64%, 7= 82%, 8= 91%, 9= 96% e 10= 100%). Essas análises diagramáticas nos fornecem maior precisão e detalhes das condições sanitárias em que se encontra o material avaliado. No entanto, essa classificação, sem ajuda de aparelhos que sejam rápidos e capazes de efetuar a leitura com precisão, torna difícil um maior grau de detalhamento, especialmente quando a separação do material é feita a olho nu (ALFENAS et al., 2009).

2.4 Mancha de *Mycosphaerella* spp. em eucalipto

A doença Mancha de *Mycosphaerella* (figura 2A) apresenta, como sintomas, manchas que variam de anelar a circular ou irregular e apresentam coloração marrom-escura, marrom-clara ou palha (figura 2B), sendo mais escuras no lado inferior do limbo e mais claras na face adaxial das folhas. Sobre as lesões formam-se ascas escuras (pseudotécios) (figura 2C), contendo em seu interior ascas com ascósporos (figura 2D) (ALFENAS et al., 2009).

Mycosphaerella é um dos gêneros mais numerosos de Ascomycetes, acomodando mais de 3000 espécies (CROUS, 1998). Cerca de 60 espécies de *Mycosphaerella* têm sido associadas a doenças em folhas de eucalipto, conhecidas coletivamente como mancha de *Mycosphaerella* (CROUS, 1998; MAXWELL et al., 2003; CROUS et al., 2004; HUNTER et al., 2006). Os sintomas da doença incluem manchas foliares, desfolha, cancrios do galho e, em casos graves, retardo de crescimento das árvores (PARK ; KEANE, 1984; CROUS, 1998).



Figura 2 – Folhas jovens de *Eucalyptus globulus* Labill. com sintomas **(A)**; mancha característica da doença **(B)**; pontuações escuras no centro da lesão correspondentes a estruturas do fungo **(C)**; ascas com ascósporos de *Mycosphaerella* spp. **(D)**.

Fonte: imagens do autor.

No entanto, *Mycosphaerella nubilosa* (Cooke & Hansf). Hansf. e *Mycosphaerella cryptica* (Cooke & Hansf). Hansf. são as duas espécies mais comumente associadas em plantações de eucalipto na Austrália (MILGATE et al., 2001; MOHAMMED et al., 2003; SMITH, 2006). Ambas afetam particularmente as folhas juvenis de *Eucalyptus globulus* Labill. em plantações no sul da Austrália (PARK; KEANE, 1984; CARNEGIE et al., 1998; MILGATE et al., 2001; MAXWELL et

al., 2003). Das duas, apenas *M. cryptica* infecta folhas adultas de *E. globulus* (PARK; KEANE, 1984), e esse patógeno tem sido observado causando significativos danos em plantações de *E. globulus* até seis anos de idade (CARNEGIE & ADES, 2001).

O fungo *Mycosphaerella* spp. é ligado a cerca de 23 gêneros anamórficos (CROUS; BRAUN, 2003; KIRSCHNER et al., 2004). Recentes pesquisas em doenças foliares de Eucalipto, em muitas partes do mundo, revelaram um aumento significativo no número de espécies de *Mycosphaerella* encontradas nessas árvores (CROUS et al., 2004). Recentemente, algumas espécies de *Mycosphaerella* foram transferidas para o gênero *Teratosphaeria* (CROUS et al., 2007).

Embora não se saiba muito a respeito de espécies de *Mycosphaerella* que ocorrem em eucaliptos no Brasil, acredita-se que *Mycosphaerella parkii* (anamorfo = *Stenella parkii*), *Teratosphaeria suttonii* (anamorfo= *Kirramyces epicoccoides*), *Teratosphaeria suberosa* (anamorfo= não determinado) e *Teratosphaeria nubilosa* (anamorfo= não determinado) sejam as mais comuns (ALFENAS et al., 2009).

A espécie *Teratosphaeria molleriana* (anamorfo= *Colletogloeopsis molleriana*) teve sua ocorrência originalmente descrita em *E. globulus* em Portugal e, na sequência, foi relatada na Califórnia (EUA), em vários países africanos, no Irã, no Brasil e na Espanha (ALFENAS et al., 2009).

Muitos gêneros anamórficos estão ligados à *Mycosphaerella* e várias espécies do gênero *Pseudocercospora* estão associadas aos sintomas de manchas foliares em diversas espécies de *Eucalyptus*. As árvores de *Eucalyptus* spp., no Vietnã e na Tailândia, especialmente as de *E. camaldulensis* e híbridos dessa espécie, apresentam geralmente uma doença de mancha foliar causada por uma espécie de *Pseudocercospora*. As lesões associadas a essa doença são muito características, com as margens cloróticas e massas de conidióforos castanhos, ocorrendo predominantemente na superfície abaxial das folhas. Os sintomas são muito óbvios e, por isso, ela não é facilmente confundida com outras manchas foliares. Com base na ocorrência de conidióforos abundantes que se encontram sobre a lesão, é reconhecido que a doença é causada por uma espécie de *Pseudocercospora* (OLD et al., 2003).

As condições favoráveis descritas por Alfenas et al. (2009) podem variar de acordo com a espécie, mas, em geral, temperaturas entre 15 e 25°C e molhamento

foliar favorecem a infecção pelo fungo *Mycosphaerella*. A ejeção de germinação de ascósporos varia de acordo com a temperatura e o período de molhamento foliar.

Surtos da doença também já foram relatados na África do Sul (HUNTER et al., 2006), Etiópia (GEZAHGNE et al., 2006), Nova Zelândia (HOOD et al., 2002) e Chile (WINGFIELD et al., 1995). A figura 3, ilustra a distribuição da ocorrência da doença em vários países.

Espécies do patógeno *Mycosphaerella* já causaram severa necrose foliar e desfolhamento em plantios jovens de eucalipto na Austrália, Nova Zelândia, África do Sul, Portugal, Espanha e Chile (PARK et al., 2000; MOHAMMED et al., 2003; POTTS et al., 2004), resultando em graves perdas de produtividade.

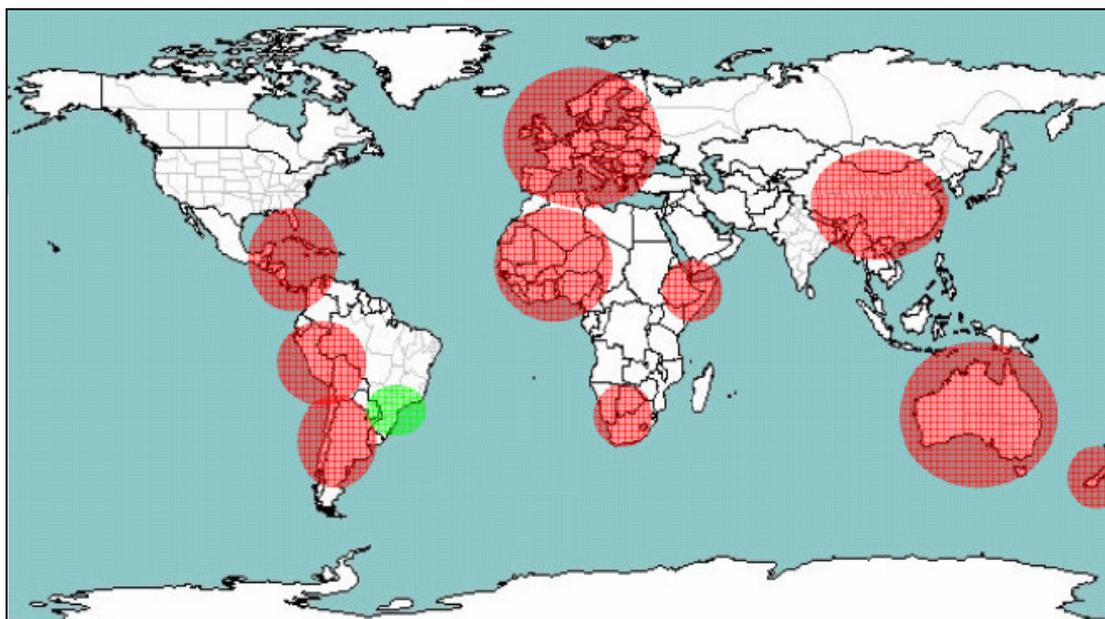


Figura 3 – Distribuição de *Mycosphaerella* spp. em cultivos de eucalipto no mundo.

Fonte: Votorantin Celulose e Papel (VCP), (2008).

As duas principais espécies de *Mycosphaerella* que atacam plantações jovens de *Eucalyptus globulus* (Labill.), no sul da Austrália, são *Mycosphaerella nubilosa* (Cooke) Hansf. e *Mycosphaerella cryptica* (Cooke) Hansf. (MILGATE et al., 2001; MOHAMMED et al., 2003). Essas espécies de *Mycosphaerella* estão entre as mais prejudiciais em plantações de eucaliptos jovens no sul da Austrália (CARNEGIE et al., 1998; PARK et al., 2000). Graves epidemias esporádicas foram ocorrendo ao

longo dos últimos 30 anos em plantações de *E. globulus* na Tasmânia, especialmente na região noroeste da ilha, e provavelmente estão relacionadas com o clima molhado e quente que predomina na região. Epidemias recentes têm sido tão significativas na Tasmânia que o plantio de *E. globulus* foi substituído pelo *E. nitens*, já que esta espécie é considerada mais resistente à infecção por *Mycosphaerella* spp. (WARDLAW, 2001). A figura 4 apresenta a distribuição espacial da ocorrência de *Mycosphaerella* na Austrália.

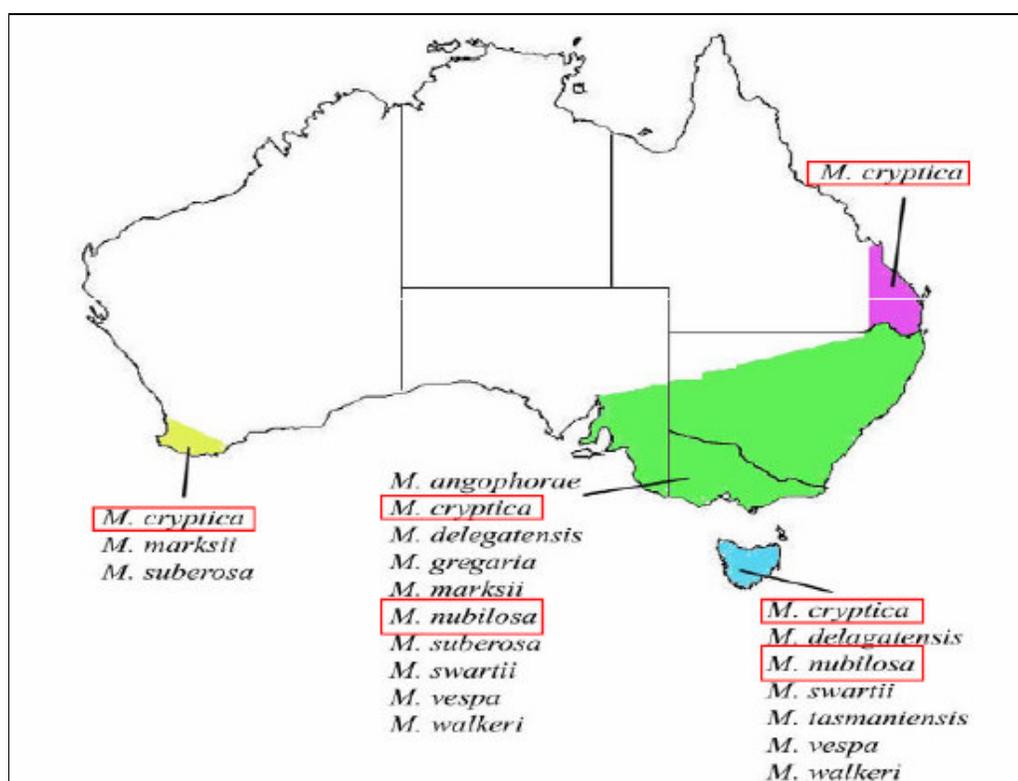


Figura 4 – Distribuição do fungo *Mycosphaerella* spp. em florestas de eucalipto da Austrália.

Fonte: Votorantin Celulose e Papel, (2008).

No Brasil, até o ano de 2007, não havia relatos de danos graves causados pelo fungo em plantios de eucalipto (PÉREZ et al., 2009). A doença até então era causada por *M. marksii*, *M. parkii*, *T. suberosa* e *T. suttonii*, porém esses não são considerados patógenos agressivos (ALFENAS et al., 2009). Aparentemente são levemente patogênicas ou colonizadoras secundárias de tecidos necrosados como

muitas outras espécies de *Mycosphaerella* e *Teratosphaeria* em eucalipto (CROUS, 1998; CROUS et al., 2007).

Durante o outono de 2007, foi verificada severa desfolha em plantios jovens de *E. globulus* no estado do Rio Grande do Sul, Brasil. Plantações com mais de seis meses foram severamente afetadas. Em um estudo preliminar, realizado nos municípios de Pinheiro Machado e Piratini - RS, Finkenauer e Ramiro (2007), citados por Pérez et al. (2009), verificaram que 50 a 90% das árvores de *E. globulus* mostraram os sintomas claros da doença. Além disso, em uma plantação com 16 meses de idade, 2,5 a 18,4% das mortes das árvores foram associadas a essa doença (PÉREZ et al., 2009).

2.5 Sensoriamento Remoto

Para Novo (1998), sensoriamento remoto é a utilização conjunta de modernos sensores, equipamentos para processamento de dados, equipamentos de transmissão de dados, aeronaves, espaçonaves etc., com o objetivo de estudar o ambiente terrestre através do registro e da análise das interações entre a radiação eletromagnética e as substâncias componentes do planeta Terra e as suas mais diversas manifestações. Todo o processo de aquisição de dados em Sensoriamento Remoto ocorre dentro de faixas do espectro eletromagnético (INPE, 2010), o qual, por sua vez, é subdividido em faixas, representando regiões que possuem características peculiares em termos de processos físicos, geradores de energia em cada faixa, ou dos mecanismos físicos de detecção dessa energia. A figura 5 ilustra o espectro eletromagnético.

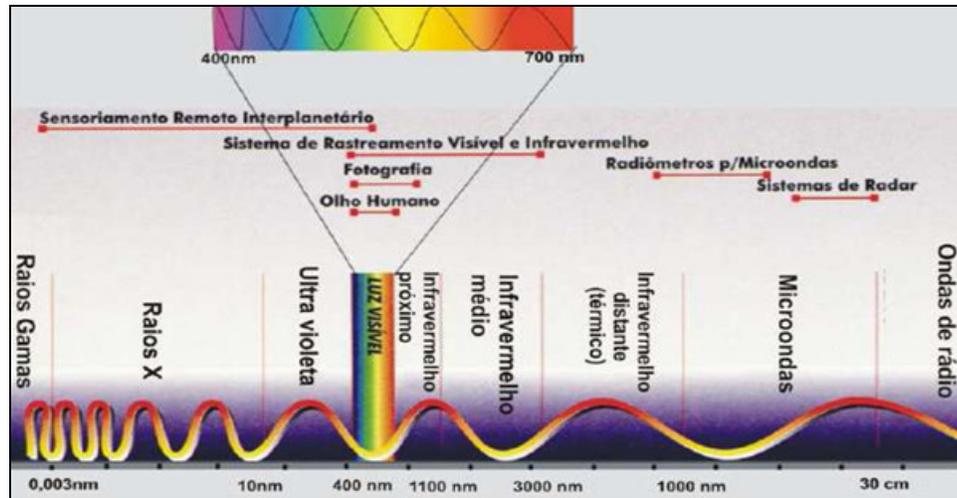


Figura 5 – O espectro eletromagnético.

Fonte: MOREIRA (2007, p.23).

O conjunto de radiações eletromagnéticas compreendidas entre 390 e 700 nm é denominado radiação visível (luz). As radiações contidas nessa faixa de comprimento de onda, ao incidirem no sistema visual humano, são capazes de provocar uma sensação de cor no cérebro. Ao conjunto de radiações eletromagnéticas cujos comprimentos de onda variam de 700 a 10.000 nm chamamos radiação infravermelha (IV). Situam-se no espectro eletromagnético entre a luz vermelha e as micro-ondas; às vezes, recebem a denominação de radiação térmica. Essa radiação é dividida em três faixas espectrais: IV próximo (700 a 1.100 nm), IV médio (1.100 a 3.000 nm) e IV distante (3.000 a 10.000 nm) (MOREIRA, 2007).

O sensoriamento remoto tem sido utilizado em todo o mundo para diversos fins. Na ciência florestal, vários projetos têm demonstrado sua capacidade para monitorar condições sanitárias de florestas plantadas e nativas, identificar e avaliar a gravidade de fatores bióticos ou abióticos, e identificar as alterações fisiológicas (CARTER et al., 1996; BLACKBURN, 2002; MOSKAL; FRANKLIN, 2004; LECKIE et al., 2005).

Os recentes avanços dessa ciência oferecem a oportunidade para o desenvolvimento de métodos de vigilância das condições sanitárias de um dossel vegetativo, identificando características muitas vezes não perceptíveis a olho nu. Propiciam também a coleta de grandes volumes de dados quantitativos precisos,

que podem permitir a detecção precoce de problemas sanitários na vegetação (ASRAR, 1989).

De acordo com Reike e Jones (2006), os dados de reflectância extraídos de uma imagem são utilizados para caracterizar vários sintomas exibidos pelas copas. Algoritmos são, então, desenvolvidos para diferenciar tipos de sintomas e sua intensidade nas copas; os mesmos algoritmos podem ser aplicados sobre uma imagem para estimar a intensidade da doença em uma grande área.

Quando integrado aos Sistemas de Informação Geográfica (SIG), o Sensoriamento Remoto tem a capacidade de produzir mapas de uma determinada doença e esses podem ser incorporados à modelagem estatística e aos sistemas de previsões, uma vez que os SIG têm a capacidade de realizar análises espaciais e temporais, promovendo o monitoramento de epidemias e o progresso da doença (AGRIOS, 2005).

2.5.1 Reflectância espectral da vegetação

A radiação solar que chega à superfície terrestre, ao atingir uma planta, interage com esta e resulta em três frações. Uma parte dessa radiação (em torno de 50% do total) é absorvida pelos pigmentos contidos na folha e participa na síntese de compostos ricos em energia (fotossíntese), altera estruturas moleculares (fotoconversão), acelera reações como a foto-oxidação das xantofilas ou ainda destrói estruturas de uma molécula. Outra parte é refletida pelas folhas, fenômeno denominado de reflexão. Finalmente, uma terceira parte sofre o processo de transmissão, através das camadas de folhas que compõem a copa e daquelas que constituem a folha, como a cutícula, o parênquima lacunoso e paliçádico. Tais quantidades de energia absorvida, transmitida ou refletida pelas folhas podem diferir de uma espécie para outra ou até mesmo dentro da própria espécie, porque existem, dentre outros, os fatores ambientais que influenciam direta ou indiretamente nessa interação (MOREIRA, 2007). A figura 6 demonstra as formas de interação da energia solar com as folhas.



Figura 6 – Formas de interação da energia solar com a vegetação (I= INCIDENTE, A= ABSORVIDA, R= REFLETIDA, T= TRANSMITIDA).

Fonte: MOREIRA (2007, p.81).

Para a maioria dos sistemas sensores, a energia refletida pela vegetação tem sido a mais utilizada, pois é nessa faixa do espectro eletromagnético que se dispõe da maior quantidade de sensores orbitais e suborbitais capazes de registrar informações da superfície terrestre (MOREIRA, 2007). As plantas emitem e refletem radiação eletromagnética, que pode ser captada por sensores especiais sensíveis a determinados comprimentos de onda. Essa radiação pode fornecer informações sobre o desenvolvimento e a sanidade das culturas, e permite seu monitoramento (SANTOS JUNIOR et al., 2002). Tais informações auxiliam na determinação do estado fisiológico da vegetação, na detecção de estresses, na discriminação de características fenológicas, medição e interpretação da quantidade de radiação fotossinteticamente ativa absorvida (FERRI et. al., 2004).

De acordo com Gates et al.(1965), três mecanismos influenciam a quantidade de energia eletromagnética refletida pelas folhas: pigmentos, espaços celulares ocupados pela água e pelo ar, e estruturas celulares com dimensões do comprimento de onda da radiação incidente (grãos de amido, mitocôndrias, ribossomos, núcleo e outros plastídios). Para Gausman (1985), além desses três mecanismos, outros fatores afetam a energia refletida pelas folhas: conteúdo de água, maturação ou idade da folha, posição nodal, condição de iluminação (folhas expostas ao sol e folhas constantemente à sombra), pubescência e senescência. Datt (1998) complementa que, em uma folha, a reflexão e a absorção da luz são

influenciadas por dois processos: dispersão de luz como resultado da superfície de uma folha e estrutura celular interna, e absorção da energia radiante ditada pela bioquímica foliar.

As células da camada superficial da folha refletem uma pequena quantidade de luz, sendo que a maior parte é transmitida para o mesófilo esponjoso, onde os raios incidem frequentemente nas paredes celulares, sendo refletidos se os ângulos de incidência da radiação forem suficientemente grandes. Devido ao grande número de paredes celulares dentro da folha, alguns raios são refletidos de volta na direção da fonte da energia incidente, enquanto outros são transmitidos através da folha (JENSEN et al., 2009).

A região do visível compreende toda radiação eletromagnética de 400 a 700nm. A maior parte desta radiação que incide sobre o dossel vegetativo é absorvida pelos pigmentos fotossintetizantes no mesófilo das folhas. Os pigmentos são compostos por clorofilas, em maior quantidade, e pelos carotenóides, xantofilas e antocianinas (MOREIRA, 2007). Ao estudar o efeito da presença de diferentes pigmentos nas folhas de *Coleus* spp. sobre a reflectância medida na região espectral de 400 a 900nm, Hoffer e Johannsen (1969) concluíram que folhas sem pigmentação, aparentemente, apresentaram um nível de reflectância muito alto, principalmente no intervalo de comprimento de onda de 500 a 900nm. As folhas nas quais predominou a antocianina (pigmento avermelhado) tiveram uma baixa reflectância na região espectral do azul e do verde e um aumento marcante na região do vermelho. Nas folhas com clorofila e antocianina, a reflectância foi baixa em toda a faixa do visível em razão da absorção diferenciada desses dois pigmentos.

Jensen (2009) salienta sobre a importância do conhecimento da fisiologia das plantas, especialmente as suas características de pigmentação, de tal forma que se saiba diferenciar quando a absorção pela clorofila começa a diminuir, se ela é provocada pela senescência ou por algum fator de estresse ambiental. Pois, quando uma planta está sob estresse e/ou a produção de clorofila diminui, a falta de clorofila faz com que a planta absorva menor quantidade de energia nas respectivas bandas de absorção de clorofila, azul e vermelho, dessa forma não refletindo mais o verde de uma planta saudável. A reflectância espectral foliar de uma planta estressada localiza-se, segundo Carter et al. (1996), na região do visível, entre os intervalos de 535 a 640nm e de 685 a 700nm. Para o Sensoriamento Remoto, nessas regiões

pode ser detectada a presença de estresse, não somente para folhas individuais, mas também para dosséis vegetais densos.

Segundo Jensen (2009), mudanças nas propriedades espectrais no infravermelho próximo (entre 700 e 1.100nm) da vegetação verde sadia podem fornecer informações sobre questões de senescência e/ou de estresse das plantas, devido ao fato de que plantas com essas condições possuem grande reflectância nessa região do espectro, e na medida em que a reflectância diminui, enfrentam mudanças em sua fisiologia. Carter (1994) explica que a reflectância no infravermelho próximo diminui quando ocorre desidratação foliar e, diante dessa situação, sabe-se que quando isso acontece com os vegetais é porque esses se encontram em condições de estresse provocado seja por déficit hídrico, ataque de pragas e doenças, etc.

Conforme Bergamim Filho et al. (1995), a ocorrência de ataques patogênicos, causadores de manchas foliares, caracteriza-se pela destruição do tecido vegetal decorrente da necrose dos mesmos, o que interfere diretamente na fotossíntese, através da redução da área foliar. Diversos estudos em vários países têm investigado mudanças espectrais especificamente em resposta às infecções fúngicas (MALTHUS; DA MADEIRA, 1993; CARTER et al., 1996; NILSSON; JOHNSON, 1996; KOBAYASHI et al., 2001; STEDDOM et al., 2005). Reynolds (2010), estudando o comportamento espectral de folhas de beterraba para a detecção e diferenciação de doenças, calculou a diferença de reflectância espectral e da sensibilidade para cada comprimento de onda, enfatizando as assinaturas espectrais nas regiões do visível e do infravermelho próximo em função de doenças. Liu et al. (2010) também observaram a viabilidade da utilização dos comprimentos de onda no visível e infravermelho próximo para discriminar condições de saúde das panículas de arroz.

Segundo Lorenzen e Jensen (1989), qualquer interação patógeno-hospedeiro no ambiente poderá resultar em mudanças espectrais, pois as estruturas presentes sobre a superfície dos tecidos de uma planta, como no caso do fungo *Oidium* spp., forma uma camada de micélios esbranquiçados e pulverulentos sobre a folha, resultando em uma resposta espectral diferente em comparação com um fungo que destrói o tecido interno das folhas, tais como os agentes causadores de ferrugem (STONE et al., 2003). Em ambos os casos, há uma diminuição no teor de clorofila com o progresso da gravidade da doença. Em casos em que não se tem um sintoma

dominante, a resposta geral do espectro pode ser uma mistura de interação da radiação resultante de um conjunto de sintomas.

Em *E. globulus*, os sintomas causados por *Mycosphaerella* spp. demoram em torno de 7 a 21 dias para aparecer, começam com uma pequena lesão de coloração roxa que pode ser verificada a olho nu ou sob o auxílio de um microscópio estereoscópico. Cerca de 21 a 35 dias após a infecção, a área roxa torna-se necrótica embora uma zona de coloração arroxeadada passa a delimitar a necrose (PARK, 1988). Lesões necróticas individuais presentes em uma única folha podem aumentar significativamente em tamanho e coalescer. Para Pietrzykowski (2007), a provável diferença na resposta espectral entre as folhas saudáveis e doentes está na proporção de tecidos necrosados e tecidos verdes sadios.

No Brasil, parece não haver precedentes do uso de sensoriamento remoto na quantificação de doenças para espécies florestais, tampouco para o eucalipto. No entanto, algumas de suas técnicas vêm despertando interesse de pesquisadores, principalmente aquelas relacionadas com propriedades relativas ao espectro de comprimento de onda refletido pelas plantas (reflectância), avaliado com a utilização de espectrorradiômetros, o que pode determinar o nível de estresse da planta (ALFENAS et al., 2009).

2.5.2 Sistemas sensores de uso terrestre

Novo (1998) descreve os sistemas sensores como equipamentos capazes de coletar a energia proveniente de um alvo e convertê-la em um sinal passível de ser registrado. Segundo Steffen et al. (1981), os sistemas sensores podem ser classificados quanto ao tipo de produto, em fotográficos e não fotográficos; quanto ao princípio de funcionamento, em imageadores e não imageadores; e quanto à fonte de energia, em ativos e passivos. Os sensores ativos possuem sua própria fonte de energia como, por exemplo, um *flash* fotográfico; já os passivos se utilizam de outra fonte como, por exemplo, o sol.

Moreira (2007) relata que alguns sistemas sensores terrestres são usados para obter dados da radiação refletida e/ou emitida por alvos da superfície em nível de solo. Um exemplo dessa aplicação é a radiometria de campo, usada para

relacionar o comportamento espectral com anomalias na planta, provocadas por estresse hídrico e/ou nutricional; também é utilizada em pesquisas para estimar parâmetros biofísicos, como o índice de área foliar, usado em modelos de crescimento da cultura.

Segundo Ponzoni e Shimabukuro (2010), a medição da reflectância espectral da vegetação pode ser feita através dos espectrorradiômetros, que são considerados sistemas sensores remotos terrestres não imageadores, uma vez que detectam a radiação eletromagnética emitida por uma fonte (alvo). Um exemplo de sensor terrestre é o espectrorradiômetro *FieldSpec*, um equipamento portátil, que pode ser usado a campo ou em laboratório. Esse sensor pesa aproximadamente 8 kg e apresenta um FOV (*campo de visão*) de 25°; opera na faixa espectral de 350 a 2500nm do espectro eletromagnético, possui uma resolução espectral de 10nm e capacidade de coletar até 10 espectros por segundo. A unidade detectora, chamada pistola de mão, está conectada ao equipamento por um cabo de fibra óptica e possui três sensores, que são uma malha de fotodiodo de 512 elementos e dois sensores resfriados termoeletricamente. É constituído também por um computador notebook LCD, baterias, interface espectrorradiômetro - computador, porta paralela bidirecional, *software* de interface com o usuário e *software* para aquisição e armazenamento de dados do fator de reflectância, radiância e irradiância (HATCHELL, 1999).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização geral da área de estudo

A área de estudo localiza-se no município de Herval, estado do Rio Grande do Sul, Brasil. É de propriedade da empresa multinacional Fibria® Papel e Celulose e denomina-se Fazenda Florestal São Cipriano. Encontra-se sob as coordenadas 31°59' e 32°01' de Latitude Sul e 53°36' e 53°38' de Longitude Oeste, e altitude média de 126m. Na figura 7, é ilustrada a localização da Fazenda São Cipriano no município de Herval - RS. O município está localizado na mesorregião Sudeste Rio-Grandense e apresenta uma área de 1.758,41 km² (FAMURS, 2010). Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010), a população total do município é de 6.757 de habitantes, sendo que 4.523 residem no meio urbano e 2.234 habitantes residem no meio rural; o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) é de 0.754.

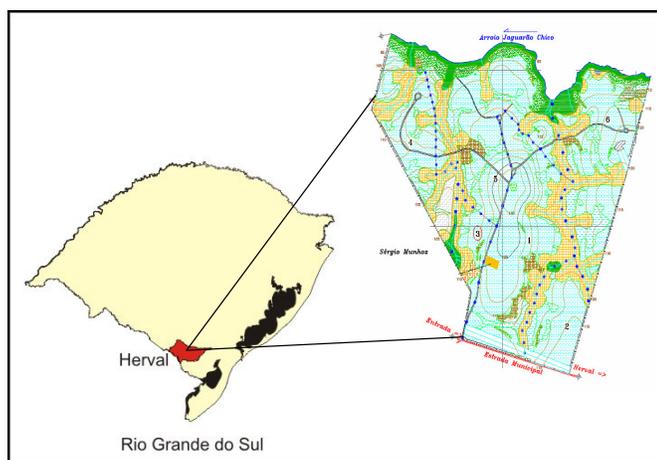


Figura 7 – Localização da Fazenda Florestal São Cipriano, Herval - RS.

Fonte: IBGE / Votorantin - Celulose e Papel / Estrada de Terra Engenharia de Água de e Solo.

3.1.1 Características silviculturais do plantio

Antes da implantação do povoamento florestal, a área de estudo era ocupada por pastagens nativas, utilizadas com frequência para o pastoreio extensivo do gado nessa região.

A fazenda São Cipriano possui um total de 270 ha, dos quais 144 ha são de efetivo plantio de floresta e 126 ha, de Área de Preservação Permanente (APP) e de reserva legal. A área plantada está dividida em seis talhões, sendo esses plantados por duas espécies puras, *Eucalyptus globulus* (Labill.) e *Eucalyptus dunnii* Maiden, e por clones de híbridos de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden, *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake, *Eucalyptus saligna* Smith e de *Eucalyptus dunnii* Maiden.

O talhão de *E. globulus*, do qual foram coletados os dados, possui 6,71 ha, é de origem seminal e a procedência de suas sementes é Otways s.o - Austrália. O plantio foi realizado no dia 29 de setembro de 2008 e as árvores foram plantadas sob um espaçamento de 2,0 m na linha e de 3,5 m na entrelinha.

O local onde está situada a Fazenda São Cipriano possui relevo plano, com leve declive. Em todos os lugares de onde foram retiradas as amostras das folhas, foram feitas verificações da profundidade do solo, sendo que todas apresentaram profundidade superior a 1 metro.

A coleta do material vegetativo teve início no dia 09 de dezembro de 2009, quando o plantio estava com 14 meses de idade, período em que os indivíduos apresentavam alturas variando de 2,5 m a 6 m, e diâmetro à altura do peito (DAP) entre 1,3 cm e 8 cm.

3.2 Obtenção de dados a campo

A etapa de levantamento de dados a campo foi realizada em quatro diferentes períodos: dezembro de 2009, ao final da primavera; março de 2010, ao final do verão; junho de 2010, ao final do outono; e em setembro de 2010, ao final do inverno. A distribuição temporal das coletas de dados foi realizada no intuito de abranger as quatro estações climáticas.

O experimento compreendeu a instalação de um Delineamento Blocos ao Acaso (DBC): foram distribuídos no talhão cinco blocos (figura 8), cada um contendo quatro parcelas, de modo a avaliar a existência de variação na severidade da doença nas quatro estações climáticas, como descreve a tabela 1. O tamanho de cada parcela foi de 84 m² (7x12 m), totalizando o tamanho do bloco em 336 m² (7x48 m).

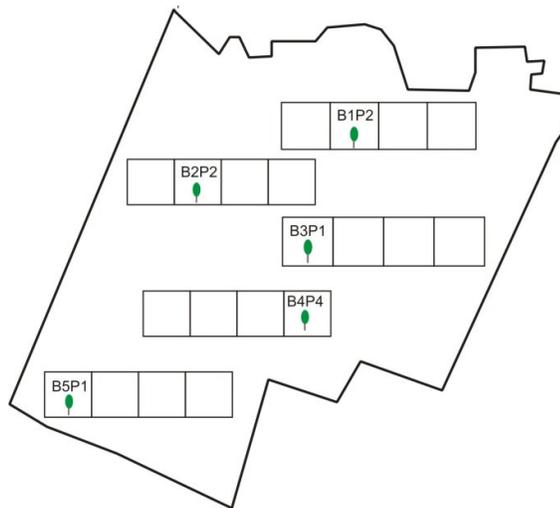


Figura 8 – Instalação das parcelas de coleta de material vegetativo no interior da Fazenda Florestal São Cipriano.

Em cada coleta de dados foi realizado o sorteio de uma parcela por bloco (tabela 1). Cada parcela foi composta por 12 árvores; dessas árvores, foi escolhida a árvore média, a qual foi abatida de modo que se pudesse realizar a coleta de folhas em 3 posições (base, meio e superior), demonstradas na figura 9. Em cada posição coletou-se um total aproximado de 100 folhas, de forma a caracterizar as diferentes condições de severidade da doença encontradas na estação climática de coleta.

As folhas obtidas em cada posição das referentes parcelas de cada bloco, foram armazenadas em embalagens plásticas identificadas e essas foram acondicionadas em caixas térmicas para a posterior análise em laboratório.

Tabela 1 – Sequência do sorteio das parcelas amostradas para a coleta do material vegetativo no talhão de *Eucalyptus globulus* durante as quatro estações.

Coletas	B1	B2	B3	B4	B5
1ª: Dezembro de 2009	P3	P2	P1	P4	P1
2ª: Março de 2010	P1	P4	P4	P1	P3
3ª: Junho de 2010	P2	P1	P3	P2	P4
4ª: Setembro de 2010	P4	P3	P2	P3	P2

Sendo: B= bloco; P= parcela.

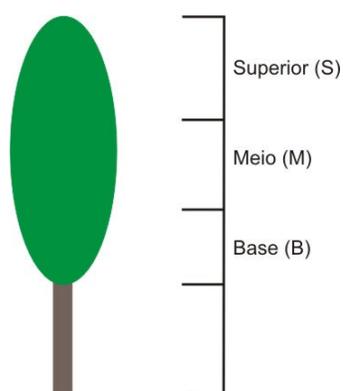


Figura 9 – Posições de coleta do material vegetativo (B= base, M= meio e S= superior) na árvore.

3.3 Obtenção de dados em laboratório

A análise e o processamento dos dados referentes ao material coletado a campo foram realizados no Laboratório de Fitopatologia do Departamento de Defesa Fitossanitária e no Laboratório de Sensoriamento Remoto do Departamento de Engenharia Rural, ambos pertencentes ao Centro de Ciências Rurais da Universidade Federal de Santa Maria, e compreenderam as seguintes etapas:

3.3.1 Classificação visual das amostras

A classificação visual das folhas provenientes do povoamento de *Eucalyptus globulus* atacadas por *Mycosphaerella* spp., usadas para posteriores leituras da reflectância espectral, foi distribuída em quatro diferentes níveis, conforme a severidade de dano na superfície foliar. Essa classificação pode ser observada na tabela 2.

Tabela 2 – Escala de severidade usada para a classificação visual das folhas de *Eucalyptus globulus* atacadas por *Mycosphaerella* spp.

Nível de severidade	Descrição dos sintomas
Sadio	Folhas sadias, sem a presença de sintomas de dano na face adaxial ou abaxial.
Pouco	Folhas com presença de sintomas distribuídos em até 25% da superfície foliar.
Médio	Folhas com presença de sintomas distribuídos entre 26 e 60% da superfície foliar.
Muito	Folhas com presença de sintomas distribuídos em mais de 61% da superfície foliar.

Um exemplo de amostras, classificadas segundo a escala de severidade adotada, pode ser visto na figura 10.



Figura 10 – Representação das amostras segundo os níveis de severidade “Sadio”, “Pouco”, “Médio” e “Muito” para as folhas de *Eucalyptus globulus* atacadas por *Mycosphaerella* spp.

Fonte: imagens do autor.

3.3.2 Análise espectrorradiométrica

As leituras de reflectância do material vegetativo de *Eucalyptus globulus* foram obtidas a partir do espectrorradiômetro FieldSpec R³ (figura 11). Inicialmente, conectou-se o equipamento à esfera integradora e foi efetuada a calibração do sensor, com base no próprio material vegetativo a ser analisado. O fator de reflectância foi obtido utilizando-se como superfície lambertiana a placa *Spectralon*, que apresentou reflectância espectral de aproximadamente 100% em todo o espectro solar.

Em seguida, cada amostra (folha) a ser lida pelo instrumento foi posicionada no orifício da esfera de forma que sua face ventral ficasse voltada para o interior desta. Tal procedimento foi repetido para um número de 10 amostras classificadas em cada nível de severidade estabelecido, conforme a escala descrita na Seção 3.3.1. Para cada amostra, o equipamento registrou 10 leituras médias por segundo, distribuídas em sua faixa de operação dentro do espectro eletromagnético.

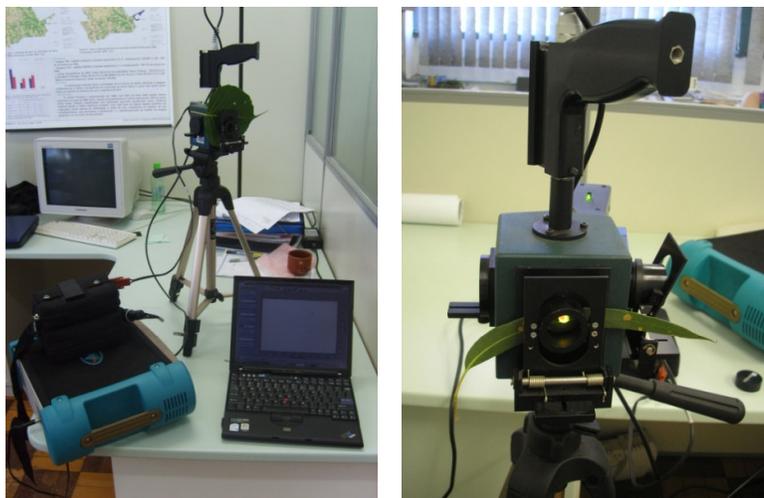


Figura 11 – Espectrorradiômetro FieldSpec R³ utilizado em laboratório para as leituras de reflectância nas folhas de *Eucalyptus globulus*.

Fonte: imagens do autor.

3.3.3 Conversão e processamento dos dados de reflectância

Para a conversão e o processamento dos valores de reflectância obtidos durante a etapa de leitura, foi utilizado o aplicativo computacional RS³ 16052 *versão 1*, que consiste em uma interface com o usuário usada para aquisição e armazenamento de dados espectrais, e também o aplicativo ASD *View Spec PRO versão 4.05*, que permite a transformação dos valores de reflectância para o formato texto, necessário para as demais conversões. Os arquivos gerados através do último aplicativo originaram planilhas individuais por folha analisada, que posteriormente foram importadas para a *Microsoft Office Excel 2007* e nesse aplicativo, foi inicialmente eliminada a presença de eventuais ruídos (correspondentes a valores superiores a 1) registrados durante o processo de leitura, os quais foram substituídos pelo valor médio das leituras imediatamente anterior e posterior.

Foram selecionados, para a análise estatística, os valores correspondentes à faixa do visível, compreendidos no intervalo espectral de 400 a 700nm, e do infravermelho próximo do espectro eletromagnético, compreendidos no intervalo entre 700 e 1.100nm. Essa subdivisão é proposta em estudos de reflectância de alvos como a vegetação, por autores como Ponzoni e Shimabukuro (2010), Ponzoni

(2001) e Jensen et al. (2009). De acordo com Watslawick e Kirchner (2004), em cada faixa do espectro eletromagnético, a radiação eletromagnética interage com a vegetação de forma diferenciada. Na faixa de transição entre essas duas regiões, segundo Carter (1994), encontram-se os picos de reflectância mais sensíveis ao estresse da planta e são fornecidas informações sobre o status da clorofila (CLEVERS, 1996). Para os intervalos espectrais de interesse, calculou-se a média das 10 amostras de cada nível de severidade e, com base nesse valor, foram realizadas as análises posteriores.

3.4 Procedimento estatístico

O delineamento estatístico empregado foi blocos ao acaso (DBC), com experimento fatorial para análise dos valores de reflectância dentro de cada estação climática. Tem como fatores: posição na árvore (três níveis: base, meio e superior) e severidade (quatro níveis: sadio, pouco, médio e muito atacada). A combinação entre os níveis gerou 12 tratamentos com cinco repetições (blocos) cada.

Para todos os valores amostrados, realizou-se o Teste de Normalidade, o qual comprovou que os dados seguem uma distribuição normal. Na sequência, para verificação de interação e se os efeitos principais eram significativos, realizou-se a análise de variância (ANOVA) e os respectivos testes de hipóteses. Nos casos em que a interação foi significativa, estudou-se o comportamento dos níveis de um fator dentro de cada nível do outro fator, através da comparação de médias utilizando o Teste de Tukey HSD a 5% de probabilidade. As análises descritas foram desenvolvidas no aplicativo para análises estatísticas "R" versão 2.12.0 (REIS; RIBEIRO JÚNIOR, 2007).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Resposta espectral de folhas de *Eucalyptus globulus* atacadas por *Mycosphaerella* spp. na região do visível do espectro eletromagnético considerando as quatro estações climáticas

4.1.1 Resposta espectral de *Eucalyptus globulus* atacado por *Mycosphaerella* spp. na estação climática primavera, na região do visível

A resposta espectral de *Eucalyptus globulus* na porção do visível, na primavera, foi analisada através do delineamento blocos ao acaso, no intuito de avaliar os fatores “Posição” e “Severidade”. A tabela 3 apresenta os resultados obtidos na ANOVA. Verificou-se a existência de diferenças significativas entre as posições de coleta do material vegetativo com F calculado de 4,0491 e probabilidade de erro de 0,02385. Essa resposta pode estar associada à atividade fotossintética nessa estação, que pode diferir entre as folhas da posição superior (em geral mais jovens) de folhas do meio e da base da árvore, de estrutura interna diferenciada e, em geral, com maior intensidade de sintomas da *Mycosphaerella* spp.

Com relação à severidade da doença nessa estação, observa-se a existência de diferença significativa entre os níveis estabelecidos. O F calculado foi de 14,5662 e a probabilidade de erro de $7,695e^{-07}$, comprovando a hipótese de que muitas das alterações nas propriedades foliares, induzidas pela infecção por *Mycosphaerella* spp., influenciam a resposta espectral de *Eucalyptus globulus* (PIETRZYKOWSKI, 2007).

Ocorre interação entre os fatores “Posição e Severidade”, na primavera, pois obteve-se F calculado de 3,2073, e probabilidade de erro de 0,01010. Tal resultado indica que os níveis de severidade diferem entre si em função da posição de coleta do material vegetativo na árvore.

Tabela 3 – ANOVA para a resposta espectral na região do visível de folhas de *Eucalyptus globulus* com diferentes níveis de severidade da mancha de *Mycosphaerella* spp. em diferentes posições da árvore na estação climática primavera.

F.V.	GL	SQ	QM	F(calculado)	Pr(>F)
Posição	2	0,0050549	0,0025275	4,0491	0,02385 *
Severidade	3	0,0272769	0,0090923	14,5662	7,695e-07 *
Posição:Severidade	6	0,0120122	0,0020020	3,2073	0,01010 *
Blocos	4	0,0000011	0,0000011	0,0017	0,96732
Resíduo	47	0,0293378	0,0006242		

" * " significativo ao nível de 5% de probabilidade ($p < 0.05$).

Na primavera, na faixa do espectro visível, folhas sadias apresentaram maior reflectância espectral, assim como as folhas “Muito” atacadas apresentaram reflectâncias menores. Baixos valores de reflectância observados na primavera podem ocorrer por que, nesse período ocorre um aumento da atividade fotossintética e, conseqüentemente, os maiores picos de absorção nas regiões do azul e do vermelho (visível) do espectro eletromagnético (TUCKER, 1978; PONZONI, 2001).

Tabela 4 – Médias dos níveis de severidade da resposta espectral de folhas de *Eucalyptus globulus* atacadas por *Mycosphaerella* spp. na estação climática primavera, na região do visível.

POSIÇÃO	NÍVEIS DE SEVERIDADE			
	Sadio	Pouco	Médio	Muito
Base	0,067068 Aa	0,084959 Aa	0,100815 Aa	0,105024 Ab
Meio	0,088192 Ba	0,066122 Ba	0,095388 Ba	0,164666 Aa
Superior	0,080728 Aa	0,110809 Aa	0,122039 Aa	0,133136 Aab

* Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

O teste de comparação de médias, disposto na tabela 4, indica que: folhas tomadas na base da árvore não apresentaram diferenças significativas quanto às

reflectâncias dos níveis de severidade em estudo; em folhas coletadas no meio, somente as reflectâncias do nível de severidade “Muito” diferem significativamente das demais; folhas da parte superior da copa também não apresentaram reflectâncias significativamente diferentes com relação à severidade.

4.1.2 Resposta espectral de *Eucalyptus globulus* atacado por *Mycosphaerella* spp. na estação climática verão, na região do visível

Nessa etapa, foi avaliada a existência de interações significativas entre os níveis dos fatores “Posição” e “Severidade”, considerando a segunda estação de coleta de dados. A tabela 5 apresenta os resultados obtidos na ANOVA da tabela 5.

Tabela 5 – ANOVA para a resposta espectral na região do visível de folhas de *Eucalyptus globulus* com diferentes níveis de severidade da mancha de *Mycosphaerella* spp. em diferentes posições da árvore na estação climática verão.

F.V.	GL	SQ	QM	F(calculado)	Pr(>F)
Posição	2	0,01623	0,00812	0,9016	0,4128
Severidade	3	0,05675	0,01898	2,1013	0,1127
Posição:Severidade	6	0,06573	0,01096	1,2170	0,3145
Blocos	4	0,00004	0,00004	0,0043	0,9481
Resíduo	47	0,42309	0,00900		

" * " significativo ao nível de 5% de probabilidade ($p < 0,05$);

No verão, foram observadas altas reflectâncias que podem ser associadas a uma redução no conteúdo hídrico no interior das folhas e ao aumento das áreas necróticas nas mesmas. No entanto, o F calculado para as fontes de variação (F.V.) não foi significativo para o modelo, não sendo encontradas diferenças entre os fatores avaliados. Tal resposta pode estar associada a fenômenos como diminuição da absorção pela clorofila e perda de umidade nas folhas devido às altas temperaturas, o que pode ter ocasionado aumento das reflectâncias das folhas verdes sadias, fazendo com que estas não se diferenciasssem das demais. No

entanto, o estudo realizado por Brandelero (2010) sobre o comportamento espectral da vegetação em diferentes estações do ano demonstra a existência de diferença significativa de reflectância de folhas saudáveis de *Eucalyptus grandis* coletadas entre as estações primavera e verão.

A elevação da temperatura característica dessa estação climática, associada à umidade, influenciam a severidade das doenças do tipo manchas, fazem com que essas possam facilmente tomar grandes proporções necróticas da folha. Segundo Bedendo (1995), temperaturas em torno de 20 a 30 °C juntamente com a alta umidade, tanto na forma de umidade relativa, quanto na forma de película de água sobre a superfície vegetal, são condições indispensáveis ao rápido estabelecimento e aumento da doença.

4.1.3 Resposta espectral de *Eucalyptus globulus* atacado por *Mycosphaerella* spp. na estação climática outono, na região do visível

A terceira coleta de dados a campo foi realizada no outono; uma característica particular a essa estação é que foram amostradas apenas folhas da base e da parte superior da árvore, pois todos os indivíduos integrantes do experimento apresentaram ocorrência de desfolha em sua porção central.

Os dados da ANOVA (tabela 6) indicam a existência de diferença significativa entre as posições de coleta do material vegetativo, pois a análise apresenta um F calculado igual a 4,1838 com probabilidade de erro 0,04955. Entre os níveis de severidade, podem ser constatadas as maiores diferenças significativas para esta estação; o F calculado foi de 14,5399 com probabilidade de $4,994e^{-06}$. No entanto, a interação entre “Posição” e “Severidade”, no outono, não foi significativa.

Tabela 6 – ANOVA para a resposta espectral na região do visível de folhas de *Eucalyptus globulus* com diferentes níveis de severidade da mancha de *Mycosphaerella* spp. em diferentes posições da árvore na estação climática outono.

F. V.	GL	SQ	QM	F(calculado)	Pr(>F)
Posição	1	0,0017139	0,0017139	4,1883	0,04955 *
Severidade	3	0,0178495	0,0059498	14,5399	4,994e ⁻⁰⁶ *
Posição:Severidade	3	0,0005675	0,0001892	0,4420	0,72466
Blocos	4	0,0000752	0,0000752	0,1837	0,67129
Resíduo	30	0,0122762	0,0004092		

" * " significativo ao nível de 5% de probabilidade ($p < 0,05$);

Para avaliar quais os níveis do fator “Severidade” diferem entre si dentro do fator “Posição”, procedeu-se à comparação de médias pelo teste de Tukey (tabela 7). Na base da árvore os resultados demonstrados comprovam a existência de diferenças significativas entre as reflectâncias de folhas “Muito” atacadas em relação à reflectância de folhas saudas. Para a posição superior, foram verificadas diferenças significativas entre as reflectâncias do nível “Muito” quanto comparadas aos níveis “Sadio” e “Pouco”. Nas duas posições, é possível comprovar a diferença entre a resposta espectral de folhas sob condições de estresse causado pela *Mycosphaerella* spp. Carter (1994) sugere que o aumento da reflectância no visível é a mais consistente resposta da reflectância foliar ao estresse.

Observa-se, através da tabela 7, que as reflectâncias das folhas da base da árvore foram maiores para os quatro níveis de severidade. Esse fato pode estar associado à diferença na estrutura interna das folhas da base e do ápice, devido a fatores como senescência, pela maior atividade fotossintética das folhas jovens (MOREIRA, 2007), bem como pela maior intensidade de dano observada em porções inferiores da copa, que diminuem a reflectância das folhas saudas. De acordo com Jensen et al. (2009), no outono cessa a produção de clorofila, fazendo com que a coloração amarela dos carotenos e de outros pigmentos tornem-se mais visíveis.

Tabela 7 – Médias dos níveis de severidade da resposta espectral de folhas de *Eucalyptus globulus* atacadas por *Mycosphaerella* spp. na estação climática outono, na região do visível.

POSIÇÃO	NÍVEIS DE SEVERIDADE			
	Sadio	Pouco	Médio	Muito
Base	0,078814 Ba	0,098841 ABa	0,114341 ABa	0,133516 Aa
Superior	0,068781 Ba	0,082851 Ba	0,094643 ABb	0,132246 Aa

* Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

4.1.4 Resposta espectral do *Eucalyptus globulus* atacado por *Mycosphaerella* spp. na estação climática inverno, na região do visível

A última coleta de dados a campo foi realizada no inverno; nesse período, observou-se uma severa desfolha nos galhos de indivíduos de todo o povoamento, portanto foram coletadas apenas folhas na porção superior da copa. Em função de tal ocorrência, pesquisadores como Alfenas et al. (2009) propõem uma escala de severidade com base na desfolha da copa, diretamente relacionada à posição de inserção dos galhos. A hipótese de diferenças entre os níveis de severidade, nessa posição, foi confirmada através da ANOVA, presente na tabela 8, a qual demonstra que F calculado (52,9814) foi significativo com probabilidade de erro de $3,402e^{-07}$. Na tabela 9 é apresentado o teste de Tukey para a comparação das médias de reflectância.

Tabela 8 – ANOVA para a resposta espectral na região do visível de folhas de *Eucalyptus globulus* com diferentes níveis de severidade da mancha de *Mycosphaerella* spp. em diferentes posições da árvore na estação climática inverno.

F.V.	GL	SQ	QM	F(calculado)	Pr(>F)
Severidade	3	0,0195067	0,0065022	52,9814	$3,402e^{-07}$ *
Blocos	4	0,0011709	0,0002927	2,3852	0,1093
Resíduo	12	0,0014727	0,0001227		

" * " significativo ao nível de 5% de probabilidade ($p < 0,05$).

Tabela 9 – Médias dos níveis de severidade da resposta espectral de folhas de *Eucalyptus globulus* atacadas por *Mycosphaerella* spp. na estação climática inverno, na região do visível.

POSIÇÃO	NÍVEIS DE SEVERIDADE			
	Sadio	Pouco	Médio	Muito
Superior	0,072116 b	0,080053 b	0,09177 b	0,151606 a

* Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Na porção superior da copa, apenas folhas que se apresentaram “Muito” atacadas por *Mycosphaerella* spp. diferiram das demais no inverno. Nessa posição de coleta, nas estações outono e inverno, as folhas que continham muitas lesões (“Muito”) apresentaram boa diferenciação quanto aos demais níveis. Nessa última estação climática, a distinção observada entre essas folhas e as sadias igualmente demonstra alterações na resposta espectral devido a mudanças no metabolismo da planta e nos pigmentos controladores da reflectância foliar (PONZONI e SHIMABUKURO, 2010).

4.2 Resposta espectral de folhas de *Eucalyptus globulus* atacadas por *Mycosphaerella* spp. na região do infravermelho do espectro eletromagnético considerando as quatro estações climáticas

4.2.1 Resposta espectral de *Eucalyptus globulus* atacado por *Mycosphaerella* spp. na estação climática primavera, na região do infravermelho próximo

Nessa etapa, foram avaliados dois fatores (“Posição” e “Severidade”) e sua interação, conforme a tabela 10.

Tabela 10 – ANOVA para a resposta espectral na região do infravermelho próximo de folhas de *Eucalyptus globulus* com diferentes níveis de severidade da mancha de *Mycosphaerella* spp. em diferentes posições da árvore na estação climática primavera.

F.V.	GL	SQ	QM	F(calculado)	Pr(>F)
Posição	2	0,0273810	0,0136905	23,5848	1,095e ⁻⁰⁷ *
Severidade	3	0,0069877	0,0023292	4,0126	0,01311 *
Posição:Severidade	6	0,0106254	0,0017709	3,0508	0,01391 *
Blocos	4	0,0006152	0,0001538	0,2650	0,89888
Resíduo	44	0,0255411	0,0005805		

" * " significativo ao nível de 5% de probabilidade ($p < 0,05$).

Para "Posição", verificou-se um F calculado de 23,5848, com probabilidade de erro de 1,095e⁻⁰⁷. Nesse caso, pode-se concluir que as reflectâncias tomadas na base, meio e superior do indivíduo diferem entre si. No estudo da "Severidade", obteve-se um F calculado de 4,0126 com probabilidade de erro de 0,01311, indicando que a reflectância espectral de folhas sadias, pouco, medianamente e muito atacadas pelo fungo *Mycosphaerella* spp. diferem.

Segundo o teste de Tukey (tabela 11), avaliou-se a existência de diferenças significativas entre os níveis de severidade nas três posições de coleta.

Tabela 11 – Médias dos níveis de severidade da resposta espectral de folhas de *Eucalyptus globulus* atacadas por *Mycosphaerella* spp. na estação climática primavera, na região do infravermelho próximo.

POSIÇÃO	NÍVEIS DE SEVERIDADE			
	Sadio	Pouco	Médio	Muito
Base	0,450335 Aa	0,428643 Aa	0,402548 Ab	0,427419 Ab
Meio	0,469826 ABa	0,429793 Ba	0,467271 ABa	0,495565 Aa
Superior	0,472171 Aa	0,477183 Aa	0,471471 Aa	0,488095 Aa

* Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Entre as folhas coletadas na base da árvore não foi constatada a existência de diferenças significativas entre os níveis de severidade nessa porção do espectro eletromagnético. Nas folhas do meio da copa, no entanto, os níveis de severidade “Muito” e “Pouco” diferiram entre si. E as folhas da posição superior também não apresentaram diferença significativa quanto às classes de severidade.

Como indicam os dados da tabela 11, as altas reflectâncias no extrato superior podem ocorrer pela presença de folhas mais jovens, com maior atividade fotossintética e, conseqüentemente, maiores picos de reflectância nessa região do espectro eletromagnético (TUCKER, 1978; PONZONI, 2001). Baixos valores de reflectância podem ser explicados pela maior proporção de tecidos necrosados presentes nas folhas mais velhas da árvore que, por sua vez, têm maiores alterações em sua estrutura interna e, portanto, mais afetada será a reflectância na região do infravermelho próximo, como ressaltado por Datt (1998).

4.2.2 Resposta espectral de *Eucalyptus globulus* atacado por *Mycosphaerella* spp. na estação climática verão, na região do infravermelho próximo

A segunda coleta de dados a campo foi efetuada no verão, e a avaliação estatística é dada na ANOVA (tabela 12).

Tabela 12 – ANOVA para a resposta espectral na região do infravermelho próximo de folhas de *Eucalyptus globulus* com diferentes níveis de severidade da mancha de *Mycosphaerella* spp. em diferentes posições da árvore na estação climática verão.

F. V.	GL	SQ	QM	F(calculado)	Pr(>F)
Posição	2	0,008911	0,0044555	3,2666	0,04756 *
Severidade	3	0,001723	0,0005743	0,4211	0,73878
Posição:Severidade	6	0,012859	0,0021432	1,5714	0,17819
Blocos	4	0,005742	0,001435	1,0524	0,39134
Resíduo	44	0,060013	0,001364		

" * " significativo ao nível de 5% de probabilidade ($p < 0,05$).

Os resultados indicam a existência de diferenças significativas entre as posições de coleta do material vegetativo, uma vez que F calculado foi de 3,2666 com probabilidade de erro de 0,04756. A comparação de médias demonstrou que as folhas coletadas na base diferem significativamente das folhas do ápice, como mostra a tabela 13.

Tabela 13 – Médias dos níveis de severidade da resposta espectral de folhas de *Eucalyptus globulus* atacadas por *Mycosphaerella* spp. na estação climática verão, na região do infravermelho próximo.

POSIÇÃO		
Base	Meio	Superior
0,468927 B	0,488346 AB	0,498271 A

* Médias seguidas da mesma letra maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A observação de diferenças apenas entre posições de coleta, e não entre os níveis de severidade, pode estar mais associada à diferença nas características morfológicas das folhas na base e no ápice (geralmente mais jovens) do que à própria ocorrência da doença.

A alta reflectância no infravermelho próximo em folhas “Muito” atacadas pode ser explicada pela maior gravidade das lesões. Segundo Jensen et al. (2009), a reflectância no infravermelho é um indicador consistente do estresse somente quando ocorre severa desidratação foliar. Para Salgado e Amorim (1995), sintomas necróticos são caracterizados pela degeneração do protoplasma, seguida de morte de células, tecidos e órgãos. No caso da mancha foliar ocasionada por *Mycosphaerella* spp. ocorre a necrose, morte de tecidos foliares que se tornam pardos e secos.

4.2.3 Resposta espectral de *Eucalyptus globulus* atacado por *Mycosphaerella* spp. na estação climática outono, na região do infravermelho próximo

Na coleta realizada durante o outono, as árvores não apresentavam folhas na posição "Meio". Dessa forma, a análise de variância (tabela 14) foi realizada para observar a existência de diferenças significativas quanto aos níveis de severidade nas posições base e superior, considerando a região do infravermelho próximo do espectro eletromagnético.

Tabela 14 – ANOVA para a resposta espectral na região do infravermelho próximo de folhas de *Eucalyptus globulus* com diferentes níveis de severidade da mancha de *Mycosphaerella* spp. em diferentes posições da árvore na estação climática outono.

F. V.	GL	SQ	QM	F(calculado)	Pr(>F)
Posição	1	0,0000758	0,00007584	0,1054	0,74783
Severidade	3	0,0069882	0,00232939	3,2380	0,03703 *
Posição:Severidade	3	0,0020218	0,00067394	0,9368	0,43600
Blocos	4	0,0061085	0,0015271	2,1228	0,10441
Resíduo	28	0,0201429	0,0007194		

" * " significativo ao nível de 5% de probabilidade ($p < 0,05$).

Conforme os resultados, apenas para o fator "Severidade" ocorre diferença significativa a um nível inferior a 5% de probabilidade de erro. Esses resultados concordam com experimentos de Pietrzykowski (2007) que, ao avaliar a incidência da *Mycosphaerella* spp. em plantios de eucalipto na Austrália, com base nos valores de reflectância, não encontrou diferenças significativas entre as posições de coleta na copa da árvore.

O teste de Tukey, realizado para a comparação de médias entre os níveis de severidade (tabela 15), demonstra a existência de diferença significativa entre folhas sadias e "Muito" atacadas por *Mycosphaerella* spp.

Tabela 15 – Médias dos níveis de severidade da resposta espectral de folhas de *Eucalyptus globulus* atacadas por *Mycosphaerella* spp. na estação climática outono, na região do infravermelho próximo.

NÍVEIS DE SEVERIDADE			
Sadio	Pouco	Médio	Muito
0,438857109 B	0,465157708 AB	0,460082165 AB	0,475012837 A

* Médias seguidas da mesma letra maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Altos valores de reflectância são observados para folhas "Muito" atacadas, tanto na base quanto no ápice do indivíduo. As folhas sadias, por sua vez, apresentam menor reflectância na base e maior reflectância no ápice, provavelmente em função do alto teor de clorofila e maior vigor vegetativo das folhas mais jovens. Guyot (1990) apresenta curvas de reflectância espectral para folhas verdes e senescentes, demonstrando que a reflectância de folhas senescentes no infravermelho próximo é menor do que em folhas sadias. Com relação à idade da planta, Moreira (2007) afirma que a capacidade das folhas em realizar fotossíntese aumenta desde a emergência da plântula até sua maturidade fisiológica, a partir da qual a taxa fotossintética declina fortemente até a completa maturação.

4.2.4 Resposta espectral de *Eucalyptus globulus* atacado por *Mycosphaerella* spp. na estação climática inverno, na região do infravermelho próximo

Na última coleta de dados a campo, ocorrida no inverno, havia a presença apenas de folhas na posição superior da copa, sendo então realizada a ANOVA (tabela 16) somente para avaliar a existência de diferenças significativas no fator "Severidade" para posição superior.

Tabela 16 – ANOVA para a resposta espectral na região do infravermelho próximo de folhas de *Eucalyptus globulus* com diferentes níveis de severidade da mancha de *Mycosphaerella* spp. em diferentes posições da árvore na estação climática inverno.

F.V.	GL	SQ	QM	F(calculado)	Pr(>F)
Blocos	4	0,0037433	0,0009358	11,1095	0,0005289 *
Severidade	3	0,0015927	0,00053089	6,3025	0,0082003 *
Resíduo	12	0,0010108	0,0000842		

" * " significativo ao nível de 5% de probabilidade ($p < 0,05$).

Diante da diferença significativa, com F calculado de 11,1095 e com probabilidade de erro de 0,0005289 detectadas na ANOVA, avaliou-se quais os níveis de severidade que diferem entre si através do teste de Tukey. Os resultados são apresentados na tabela 17.

Tabela 17 – Médias dos níveis de severidade da resposta espectral de folhas de *Eucalyptus globulus* atacadas por *Mycosphaerella* spp. na estação climática inverno, na região do infravermelho próximo.

NÍVEIS DE SEVERIDADE			
Sadio	Pouco	Médio	Muito
0,468694 B	0,474167 B	0,475135 B	0,492478 A

* Médias seguidas da mesma letra maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

O comportamento espectral das folhas presentes na parte superior da copa demonstrou ser diferente apenas quando comparado ao nível “Muito” em relação aos demais. Tal resposta evidencia que mudanças espectrais no infravermelho próximo da vegetação verde sadia podem fornecer informações sobre estresse de plantas (JENSEN et al., 2009), porém em condições de severidade avançada. Nessa estação foram observadas altas reflectâncias para as folhas “Muito” atacadas. Segundo os autores, pode-se esperar valores muito altos de reflectância no infravermelho próximo em folhas secas, característica similar de folhas com muitas lesões necróticas em superfície.

5 CONCLUSÕES

Com base na metodologia adotada nesse estudo, para analisar a resposta espectral de folhas de *Eucalyptus globulus* (Labill.) atacadas pelo fungo *Mycosphaerella* spp. em diferentes níveis de severidade, considerando a porção do visível do espectro eletromagnético, é possível concluir que:

- Na primavera, o nível de severidade “Muito” difere-se dos demais níveis na posição meio.

- No outono, o nível “Muito” difere do “Sadio” em folhas coletadas na base da árvore. Na posição superior folhas muito atacadas se diferiram de folhas sadias e pouco atacadas.

- No inverno, o nível “Muito” diferiu-se dos demais níveis de severidade, em folhas coletadas na posição superior.

Quando considerada a porção do infravermelho do espectro eletromagnético, pode-se concluir que:

- Na primavera, folhas “Muito” atacadas se diferiram de folhas “Pouco” atacadas, presentes na posição meio.

- No outono, o nível “Muito” difere-se do “Sadio”.

- No inverno, o nível “Muito” diferiu-se dos demais níveis de severidade, em folhas coletadas na posição superior.

Através do espectrorradiômetro verificou-se a variação na resposta espectral das folhas de *Eucalyptus globulus*, sob diferentes níveis de severidade de ataque de *Mycosphaerella* spp. A reflectância espectral das folhas atacadas em diferentes níveis de severidade varia de acordo com sua posição na árvore. E ainda, a resposta espectral das folhas atacadas sofre influência da estação climática de coleta. No entanto, não foi possível diferenciar os quatro níveis de severidade estabelecidos pela escala diagramática proposta.

5.1 Considerações finais

O presente estudo foi realizado no intuito de propor metodologias alternativas para o estudo da epidemiologia florestal. O *E. globulus* é uma espécie potencial para indústria de celulose e papel e é, atualmente, uma das mais visadas economicamente. No entanto, a presença do patógeno *Mycosphaerella* spp. em plantios comerciais de *E. globulus* tem inibido seu pleno desenvolvimento em áreas do sul do Brasil e ainda são poucas as pesquisas desenvolvidas visando o monitoramento de sua incidência através de ferramentas de sensoriamento remoto.

A avaliação da resposta espectral da vegetação, sobretudo daquela submetida a condições de estresse, constitui ainda um vasto campo de pesquisa a ser desenvolvido com vistas a melhorias futuras, tais como sistemas de previsão, monitoramento de epidemias e para a tomada de medidas de controle. Para o sucesso desses métodos, são inúmeros os fatores que participam do processo de interação de alvos como a vegetação com a radiação eletromagnética a serem considerados.

Quanto às subdivisões do espectro eletromagnético, adotadas nesse estudo, pode-se inferir que na região do visível, e também no infravermelho próximo, os níveis de severidade “Pouco” e “Médio” não apresentaram diferenças significativas para todos os testes realizados sendo, portanto, desnecessária a definição de quatro classes para a caracterização do dano da *Mycosphaerella* nessas porções do espectro. Resultados não satisfatórios para a caracterização do comportamento espectral podem ser determinados pelo uso da média geral para cada porção do espectro.

Para melhor caracterização do comportamento espectral dessa espécie, seja de folhas saudáveis ou estressadas, sugere-se a maior fragmentação do espectro eletromagnético em faixas de comprimento de onda sensíveis ao status da clorofila e aos demais componentes da estrutura celular.

Sobre as estações climáticas de coleta, é importante ressaltar que a doença pode se apresentar mais severa de acordo com as condições que possam favorecer o seu desenvolvimento. Desse modo, a reflectância dos níveis de severidade tanto para o espectro visível como para o infravermelho, podem apresentar variações, o que reforça a impossibilidade de determinação da assinatura espectral das folhas de *E. globulus*, seja em condições saudáveis ou não, em único período de avaliação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGRIOS, G. N. **Plant Pathology**. 5ª ed. San Diego: Academic Press, 2005. 948 p.

ALFENAS, A. C. et al. **Clonagem e doenças do eucalipto**. 2ª ed. Viçosa: Ed. UFV, 2009. 500 p.: il.

ANDRADE, E. N. **O eucalipto**. 2ª ed. Jundiaí: Companhia Paulista de Estradas de Ferro, 1961. 667 p.

ASRAR, G. **Theory and applications of optical Remote Sensing**. New York: John Wiley & Sons, 1989. 752 p.

BARRICHELO, L. E. G.; BRITO, J. O. Celulose sulfato de madeiras de diferentes espécies de eucalipto. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 4., 1982, Belo Horizonte, **Anais...** São Paulo: ed. esp. Silvicultura, 1983. p. 734-738.

BARRICHELO, L. E. G.; FOELKEL, C. E. B. Estudos para produção de celulose sulfato de seis espécies de eucalipto. **IPEF**, v. 1, n. 12, p. 77-95, 1976.

BEDENDO, I. P. Manchas Foliares. In: BERGAMIN FILHO, A.; KIMATI, H.; AMORIM, L. **Manual de Fitopatologia**: princípios e conceitos. São Paulo: Agronômica Ceres, 1995. v. 1, p. 849-858.

BERGAMIM FILHO, A.; KIMATI, H.; AMORIM, L. **Manual de Fitopatologia**: princípios e conceitos. São Paulo: Agronômica Ceres, 1995. 919 p.: il.

BERTI FILHO, E.; KRÜGNER, T. L. Manejo integrado de pragas e doenças em povoamentos de *Eucalyptus* no Brasil. **Silvicultura**, v. 11, n. 41, p. 41-43, 1986.

BLACKBURN, G. A. Remote sensing of forest pigments using airborne imaging spectrometer and LIDAR imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 1, n. 82, p. 311-321, 2002.

BRANDELERO, C. **Espectrorradiometria do visível e infravermelho próximo em povoamento de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden**. 2010. 90f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

CARNEGIE, A. J.; ADES, P. K. *Mycosphaerella* leaf disease reduces growth of plantation-grown *Eucalyptus globulus*. **Australian Forestry**, v. 66, n. 2, p. 113-119, 2001.

CARNEGIE, A. J.; ADES, P. K.; KEANE, P.J.; SMITH, I. W. *Mycosphaerella* diseases of juvenile foliage in eucalypt species and provenance trial in Victoria, Australia. **Australian Forestry**, v. 1, n. 61, p. 190-194, 1998.

CARTER, G. A. Responses of leaf spectral reflectance to plant stress. **American Journal of Botany**, v. 80, n. 3, p. 2310-2343, 1994.

CARTER, G. A.; DELL T. R.; CIBULA, W. G. Spectral reflectance characteristics and digital imagery of a pine needle blight in the southeastern United States. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 1, n. 26, p. 402-407, 1996.

CLEVERS, J. G.; Van LEEUWEN, H. Combining use of optical and microwave remote sensing data for crop growth monitoring. **Remote Sensing of Environment**, v. 1, n. 56, p. 42-51, 1996.

COUTINHO, T. A. et al. *Eucalyptus* rust: a disease with the potential for serious international implications. **Plant Disease**, v. 82, n. 7, p. 819-925, 1998.

CROUS, P. W.; BRAUN, U.; GOENEWALD, J. Z. *Mycosphaerella* is polyphyletic. **Studies in Mycology**, v. 1, n. 58, p.1-32, 2007.

CROUS, P. W. *Mycosphaerella* spp. and their anamorphs associated with leaf spot diseases of *Eucalyptus*. **Mycologia Memoir**, v. 1, n. 21, p. 1-170, 1998.

CROUS, P. W.; BRAUN, U. *Mycosphaerella* and its anamorphs. Names published in *Cercospora* and *Passalora*. **CBS Biodiversity Series**, v. 1, n. 1, p. 1-571, 2003.

CROUS, P. W. et al. Phylogenetic reassessment of *Mycosphaerella* spp. and their anamorphs occurring on *Eucalyptus*. **Studies in Mycology**, v. 1, n. 50, p. 195-214, 2004.

DATT, B. Remote sensing of chlorophyll *a*, chlorophyll *b*, chlorophyll *a+b*, and total carotenoid content in *Eucalyptus* leaves. **Remote Sensing of Environment**, v. 1, n. 66, p.111-121, 1998.

FAMURS – Federação das Associações de Municípios do Rio Grande do Sul. Brasília, 2010. Disponível em: <http://www.famurs.gov.br>. Acesso em: 10 dez. 2010.

FERRI, P.C. et al. Narrow band spectral indexes for chlorophyll determination in soybean canopies [*Glycine max* (L.) Merrill]. Braz. J. **Plant Physiology**, v.16, n.3, p.131-136, 2004.

FOELKEL, C.E.B.; BARRICHELO, L.E.G.; MILANEZ, A.F. Estudo comparativo das madeiras de *Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus paniculata*, *Eucalyptus citriodora*, *Eucalyptus maculata*, *Eucalyptus tereticornis* para a produção de celulose sulfato. **IPEF**, v. 10, n. 1, p. 17-37, 1975.

GATES, D. M. et al. Spectral properties of plants. **Applied Optics**, v. 4, n. 1, p. 11-20, 1965.

GAUNT, R. E. The relationship between plant disease and severity and yield. **Annual Review of Phytopathology**, v. 1, n. 33, p.119-144,1995.

GAUNT, R. E. Measurement of disease and pathogens. In: Teng, P.S. (Ed.) **Crop Loss Assessment and Pest Management**. St. Paul: APS Press, 1987. p. 6-18.

GAUSMAN, H. W. Leaf reflectance of near-infrared. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 51, n. 11, p. 1725-1734, 1985.

GEZAHGNE, A. et al. *Mycosphaerella* species associated with leaf disease of *Eucalyptus globulus* in Ethiopia. **Forest Pathology**, v. 1, n. 36, p. 253-263, 2006.

GODOY, C. V. et al. Diagrammatic scales for bean diseases: Development and validation. **Journal of Plant Disease and Protection**, v. 1, n. 104, p. 336-345, 1997.

GOES, E. **A floresta portuguesa**: sua importância e descrição das espécies de maior interesse. Portugal: Portucel, 1991. 259 p.

GUYOT, G. Optical properties of vegetation canopies. In: STEVEN, M. D.; CLARK, J. A. **Applications of remote sensing in agriculture**. London: Butterworths, 1990. Cap. 2, p. 19-43.

HATCHELL, D. C. **Analytical Spectral Devices (ASD): Technical Guide**. USA: Bolder, 4^a ed., 1999. 136 p.

HOFFER, R. M.; JOHANNSEN, C. J. Ecological potentials in spectral signature analysis. In: JOHNSON, P.L. **Remote Sensing in Ecology**. Athens, G. A: Univ. of Georgia Press, 1969. p. 1-16.

HOOD, I. A. et al. Seasonal development of *Septoria* leaf blight in young *Eucalyptus nitens* plantations in New Zealand. **Australian Forestry**, v. 1, n. 65, p. 153-164, 2002.

HUNTER, G. C. et al. *Pseudocercospora flavomarginata* sp. nov. from *Eucalyptus* leaves in Thailand. **Fungal Diversity**, v. 1, n. 22, p.71-90, 2006.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Brasília, 2010. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 15 nov. 2010.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, 2010. Disponível em: <http://www.inpe.br>. Acesso em: 18 nov. 2010.

JAMES, W.C. Assessment of plant diseases and losses. **Annual Review of Phytopathology**, v. 1, n. 12, p. 27-48, 1974.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente**: uma perspectiva em recursos terrestres. Tradução José Carlos Neves Epiphanyo (coordenador) ...[et al]. São José dos Campos: Parêntese, 2009. 598 p.

JUNGHANS, D. T.; ALFENAS, A.C.; MAFFIA, L. A. Escala de notas para quantificação da ferrugem em *Eucalyptus*. **Fitopatologia Brasileira**, v. 1, n. 28, p.184-188, 2003.

KIRSCHNER, R. K.; PIEPENBRING, M.; CHEN, C. J. Some cercosporoid hyphomycetes from Taiwan, including a new species of *Stenella* and new reports of *Distocercospora pachyderma* and *Phacellium papali*. **Fungal Diversity**, v. 1, n. 17, p. 57-68, 2004.

KOBAYASHI, T. et al. Detection of rice panicle blast with multispectral radiometer and the potential of using airborne multispectral scanners. **Phytopathology**, v. 1, n. 91, p. 316-323, 2001.

KRANZ, J. **Epidemics of plant diseases**: mathematical analysis and modeling. Berlin: Springer, 1974.170 p.

LECKIE, D.; CLONEY, E.; JOYCE, S. Automated detection and mapping of crown discolouration caused by jack pine budworm with 2.5m resolution multispectral imagery. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 1, n. 7, p. 61-77, 2005.

LIU, Zhan-yu; SHI Jing-jing; ZHANG, Li-wen; HUANG, Jing-feng. Discrimination of rice panicles by hyperspectral reflectance data based on principal component analysis and support vector classification. **Biomedical & Biotechnology**, v. 1, n. 11, p. 71-78, 2010.

LORENZEN, B.; JENSEN, A.; Changes in leaf spectral properties induced in barley by cereal powdery mildew. **Remote Sensing of Environment**, v. 1, n. 27, p. 201-209, 1989.

LUCAS, J. A. **Plant pathology and plant pathogens**. 3^a ed. Oxford: Blackwell Science, 1998. 288 p.

MALTHUS, T. J.; MADEIRA, A. C. High resolution spectroradiometry: spectral reflectance of field bean leaves infected by *Botrytis fabae*. **Remote Sensing of Environment**, v. 1, n. 45, p.107-116, 1993.

MAXWELL, A. et al. *Mycosphaerella* species associated with *Eucalyptus* in southwestern Australia: new species, new records and a key. **Mycological Research**, v. 1, n. 107, p. 351-359, 2003.

MILGATE, A. W. *Mycosphaerella* species occurring on *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus nitens* plantations of Tasmania, Australia. **Blackwell Wissenschafts-Verlag**, v. 1, n. 31, p. 53-56, 2001.

MOHAMMED, C. et al. *Mycosphaerella* leaf diseases of temperate eucalypts around the southern pacific rim. **New Zealand Journal of Forest Science**, v. 1, n. 33, p. 362-372, 2003.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 3^a ed. atual. ampl. Viçosa: UFV, 2007. 320 p.: il.

MOSKAL, L.M.; FRANKLIN, S.E. Relationship between airborne multispectral image texture and aspen defoliation. **International Journal of Remote Sensing**, v. 1, n. 25, p. 2701-2711, 2004.

NILSSON, H. E. Remote sensing and image analysis in plant pathology. **Annual Review of Phytopathology**, v.1, n. 15, p. 489-527,1995.

NILSSON, H. E.; JOHNSON, L. Hand-held radiometry of barley infected by barley strip in a field experiment. **Journal of Plant Disease Protection**, v. 1, n. 103, p. 517-526, 1996.

NOVO, E. M. L. de M. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. 2ª ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1998. 308 p.

OLD, K. M.; WINGFIELD, M. J.; YUAN, Z. Q. **A manual of diseases of *Eucalyptus* in South-East Asia**. Indonesia: Centre for International Research, 2003. 106 p.

PARK, R. F.; KEANE, P. J. Further *Mycosphaerella* species causing leaf diseases of *Eucalyptus*. **Transactions of the British Mycological Society**, v. 1, n. 83, p. 93-105, 1984.

PARK, R. F. Effect of certain host, inoculum, and environmental factors on infection of *Eucalyptus* species by two *Mycosphaerella* species. **Transactions of the British Mycological Society**, v. 1, n. 90, p. 221-228, 1988.

PARK, R.F. et al. Fungal diseases of eucalypt foliage. In: KILE G. A.; PODGER F. D.; BROWN B.N. editors. **Diseases and Pathogens of Eucalypts**. Collingwood: CSIRO Publishing. 2000. p. 153-239.

PÉREZ, C. A. et al. Mycosphaerellaceae and Teratosphaeriaceae associated with *Eucalyptus* leaf diseases and stem cankers in Uruguay. **Blackwell Verlag**, v. 1, n. 39, p. 349-360, 2009.

PIETRZYKOWSKI, E. **New tools for determining incidence and severity of *Mycosphaerella* Leaf Disease in Eucalypt plantations**. 2007. 210f. Thesis (Doctor of Philosophy). School of Agricultural Science, University of Tasmania, Australia, 2006.

PONZONI, F. J. Comportamento espectral da vegetação. In: MENESES, R.; MADEIRA NETTO, J. S. **Sensoriamento Remoto: reflectância dos alvos naturais**. Brasília: UNB, Planaltina: EMBRAPA Cerrados, 2001. p. 157-199.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. São Jose dos Campos: Parêntese, 2010. 127p.

POTTS, B. M. et al. Quantitative genetic control of *Mycosphaerella* resistance in *Eucalyptus globulus* and impact on growth. In: BORRALHO, N. M. G.; PEREIRA, J. S.; MARQUES, C.; COUTINHO, J.; MADEIRA, M.; TOMÉ, M. ***Eucalyptus in a Changing World***. IUFRO Conference Aveiro, Portugal: RAIZ, Instituto Investigação da Floresta e Papel, Portugal. 2004. p. 116-122.

POYNTON, R. J. **Tree planting in Southern Africa: the *Eucalyptus***. Republic of South Africa: Department of Forestry, Pretoria, 1979. 882 p.

RAYNOLDS, G. J. **Remote Sensing for Detections of *Rhizoctonia* Crown and Root Rot in Sugar Beet and the Impact of the Disease and Chlorophyll Content**. 2010. 106f. School of University of Minnesota, Minnesota, 2010.

REIKE X.; JONES X. Integrating vegetation field surveys with remotely sensed data. **Ecological Management and Restoration**, v. 1, n. 7, p. 518-523, 2006.

REIS, G. M.; RIBEIRO JÚNIOR, J. I. **Ferramentas Estatísticas Básicas da Qualidade - guia prático do R**. 2007. Disponível em: <http://www.estatisticador.xpg.com.br>. Acesso em: 15 dez. 2010.

SALGADO, C. L.; AMORIM, L. Sintomatologia. In: BERGAMIN FILHO, A.; KIMATI, H.; AMORIM, L. **Manual de Fitopatologia: princípios e conceitos**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1995. v. 1, p. 212-223.

SANFUENTES, E. A. V. **Caracterização de isolados, flutuação populacional e controle biológico de *Rhizoctonia* em jardim clonal de *Eucalyptus***. 2000. 106f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2000.

SANTOS JUNIOR, R. F. et. al. Detecção de *Heterodera glycines* em plantio de soja mediante espectrorradiometria no visível e infravermelho próximo. **Fitopatologia Brasileira**, v. 1, n. 27, p. 355-360, 2002.

SBS. Sociedade Brasileira de Silvicultura. Disponível em: <http://www.sbs.org.br>. Acesso em: 01 nov. 2010.

SCHEPERS, J. S. et al. Transmittance and reflectance measurements of corn leaves from plants with different nitrogen and water supply. **J. Plant Physiological**, v. 148, p.523-529, 1996.

SMITH, A. **The Development of Strategies for the Management and Research of Foliar Pathogens on Eucalypt Plantations: Using *Mycosphaerella* as a Case Study.** 2006. 215f. Thesis (Doctor of Philosophy). School of Agricultural Science, University of Tasmania, Australia, 2006.

STEDDOM, K. et al. Comparison of visual and multispectral radiometric disease evaluations of *Cercospora* leaf spot of sugar beet. **Plant Disease**, v. 1, n. 89, p.153-158, 2005.

STEFFEN, C. A. **Sensoriamento Remoto: princípios físicos, sensores e produtos, e sistema Landsat.** São José dos Campos: INPE, 1981. 71 p.

STONE, C.; CHISHOLM, L A.; McDONALD, S. Spectral characteristics of *Pinus radiata* needles affected by *Dothistroma* needle blight. **Canadian Journal of Botany**, v. 1, n. 81, p. 560-569, 2003.

SZEKIELDA, K. **Satteling monitoring of the earth.** New York: J. Wiley, 1988. 326 p.
TUCKER, C. J. A comparison of satellite sensors for monitoring vegetation. **Photogrammetric. E. R.**, v. 1, n. 44, p. 1369-1380, 1978.

TURNBULL, J. W. Economic and social importance of eucalypts. In: KILE G. A.; PODGER F. D.; BROWN B.N. editors. **Diseases and Pathogens of Eucalypts.** Collingwood: CSIRO Publishing. 2000. p. 1-9.

VANDERPLANK, J. E. **Plant Diseases: Epidemics and Control.** New York: Academic Press, 1963. 349 p.

VOLKER, P. W.; ORME, R. K. Provenance trials of *Eucalyptus globulus* and related species in Tasmania. **Australian Forestry**, v. 1, n. 51, p. 257-265, 1988.

WARDLAW T. J. Defoliation of *Eucalyptus globulus* by *Mycosphaerella* leaf blight in the Circular Head Area. **Hobart: Forestry Tasmania.** p 1-8, 2001.

WARDLAW, T. J. Response to *Mycosphaerella* leaf blight of *E. globulus* planted in windrows and bays. **Internal Report 32. Hobart: Forestry Tasmania.** p 1-12, 2002.

WATSLAWICK, L. F.; KIRCHNER, F. F. Estimativas de biomassa e carbono utilizando imagens de satélite de alta resolução. In: FIXAÇÃO DE CARBONO: ATUALIZAÇÕES, PROJETOS E PESQUISAS, 2004, Curitiba. **Anais...** Curitiba, 2004. p. 133-151.

WINGFIELD, M. J.; CROUS, P.W.; PEREDO, H. L. A preliminary, annotated list of foliar pathogens of *Eucalyptus* spp. in Chile. **South African Forestry Journal**, v. 1, n. 173, p. 53-57, 1995.

XAVIER, A. A. et al. Resistência de *Eucalyptus globulus* e *Eucalyptus nitens* à ferrugem (*Puccinia psidii*). **Revista Árvore**, v. 1, n. 31, p. 731-735, 2007.

ZADOKS, J.; SHEIN, R. **Epidemiology and plant disease management**. New York: Oxford University Press, 1979. 427 p.

ZADOKS, J.C. Methodology of epidemiological research. **Annual Review of Phytopathology**, v. 1, n. 10, p. 253-276, 1972.