

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**EFEITO DO AUMENTO DA CONCENTRAÇÃO DE DIÓXIDO DE
CARBONO DO AR SOBRE A FERRUGEM E O CRESCIMENTO DE
MUDAS CLONAIIS DE EUCALIPTO**

RODRIGO ESTEVAM DE OLIVEIRA MAC LEOD

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu,
para obtenção do título de Mestre em Agronomia
(Proteção de Plantas).

BOTUCATU-SP
Janeiro - 2012

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**EFEITO DO AUMENTO DA CONCENTRAÇÃO DE DIÓXIDO DE
CARBONO DO AR SOBRE A FERRUGEM E O CRESCIMENTO DE
MUDAS CLONAIIS DE EUCALIPTO**

RODRIGO ESTEVAM DE OLIVEIRA MAC LEOD

Orientadora: Dra. Raquel Ghini

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu,
para obtenção do título de Mestre em Agronomia
(Proteção de Plantas).

BOTUCATU-SP
Janeiro – 2012

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

M165e Mac Leod, Rodrigo Estevam de Oliveira, 1983-
Efeito do aumento da concentração de dióxido de carbono do ar sobre a ferrugem e o crescimento de mudas clonais de eucalipto / Rodrigo Estevam de Oliveira Mac Leod. - Botucatu : [s.n.], 2012
xi, 62 f. : il. color., gráfs., tabs., fotos.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2012

Orientador: Raquel Ghini
Inclui bibliografia

1. Dióxido de carbono. 2. Eucalipto. 3. Ferrugem nas árvores. 4. Mudanças climáticas. 5. *Puccinia psidii*.
I. Ghini, Raquel. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. III. Título.

Palavras-chave: dióxido de carbono, *Eucalyptus*, mudança climática, *Puccinia psidii*.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS

CAMPUS DE BOTUCATU

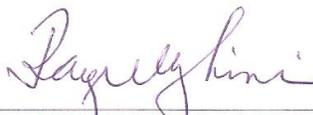
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: "EFEITO DO AUMENTO DA CONCENTRAÇÃO DE DIÓXIDO DE CARBONO
DO AR SOBRE A FERRUGEM E O CRESCIMENTO DE MUDAS CLONAIAS
DE EUCALIPTO"

ALUNO: RODRIGO ESTEVAM DE OLIVEIRA MAC LEOD

ORIENTADORA: PROFA. DRA. RAQUEL GHINI

Aprovado pela Comissão Examinadora



PROFA. DRA. RAQUEL GHINI



PROF. DR. EDSON LUIZ FURTADO



PROF. DR. CELSO GARCIA AUER

Data da Realização: 05 de janeiro de 2012.

Aos meus pais, Vera Lúcia Garcia de Oliveira e Sérgio Ferreira Mac Leod, pelo apoio
incontestável e dedicação em todos os momentos de minha vida.

Aos meus irmãos, Alessandro Henrique de Oliveira Mac Leod e Tatiana Cristina de Oliveira
Mac Leod, pelo apoio incondicional e amizade sincera.

A minha namorada, Danielle Cunha Cardoso, com muito amor e profunda admiração,
agradeço por todo o incentivo.

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Proteção de Plantas) da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” pela oportunidade de crescimento tanto pessoal quanto profissional.

À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Meio Ambiente) pela infraestrutura para desenvolvimento do projeto de pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa durante o mestrado.

À pesquisadora Dra. Raquel Ghini, da Embrapa Meio Ambiente, pela orientação, confiança e liberdade para a realização deste trabalho.

Ao Pesquisador Dr. Wagner Bettiol, da Embrapa Meio Ambiente, pelas sugestões, ensinamentos e amizade oferecida.

Aos professores que fazem parte do programa de Proteção de Plantas da UNESP/FCA, pela dedicação e profissionalismo, em especial: Dr. Edson Luiz Furtado, Dr. Antonio Carlos Maringoni, Dra. Silvia Renata S. Wilcken, Dr. Carlos Gilberto Raetano, Dr. Marcelo Agenor Pavan.

Aos meus amigos da Pós-Graduação e da Embrapa Meio Ambiente, em especial, Abrahão, Anamaria, Fernanda, Alexandre, Muricy, Regiane, Michelli, Zayame, Lívia, Luana, Luciana, Lucivane, Willian, Vanessa, Suikinai, João, Elke, Roseli, Márcia, Wallace, Rodolfo, Juliana e Natalia.

Aos amigos de república de Botucatu, Majin boo, Pandinha, Banheta, Ducarmo, Maricon, Biotério, Galo, Jack e Potter pela boa convivência e amizade.

Aos amigos de república de Jaguariúna, Cassiano e Juliano, pela amizade e divertida convivência.

Aos amigos de Ribeirão Preto, Ismael, Valdinei e Lívia, pela amizade e pelos momentos de descontração.

À pesquisadora Dra. Lilia Aparecida Salgado de Moraes e ao Rodrigo Fernandes Castanha, do Laboratório de Produtos Naturais da Embrapa Meio Ambiente, pela colaboração nos estudos com óleo essencial.

À Lidiane Cristina Ferreira da Silva, do Laboratório de Solo e Água da Embrapa Meio Ambiente, pela colaboração nos estudos de Carbono e Nitrogênio.

Aos meus pais Sérgio e Vera, pelo amor e atenção durante toda minha vida, pelos ensinamentos, pelo exemplo de honestidade e por muitas vezes renunciarem aos seus próprios sonhos para realizar os meus.

Ao Anízio e Glória, os quais também considero meus pais.

Aos meus irmãos Alessandro e Tatiana pela amizade, companheirismo e paciência.

Ao meu cunhado Tiago e cunhada Thamís pela amizade e agradável convívio.

Aos meus avôs: Israel, Lília e Nelson (*in memoriam*) pelas ótimas lembranças e minha avó pela alegria e boa convivência.

Aos meus familiares: Deise, Ivana, tio João, Gustavo, Dani, Breno, João Pedro, Luís Henrique, Nati, Fabi, Guilherme, tio Dort, tia Rosa, Sílvio, Raquel, Valéria, Laércio, Juliana, Matheus e Lucas.

À Danielle, pelo amor, compreensão e ajuda na realização deste trabalho.

Ao David, Efigênia, Fabrício e Leonardo pela amizade, apoio e orações.

Meu agradecimento especial a todas as pessoas cujos nomes foram omitidos, mas que contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTAS DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS	X
RESUMO	1
SUMMARY	3
1 INTRODUÇÃO.....	5
2 REVISÃO DE LITERATURA	8
2.1 Cultura do eucalipto	8
2.2 Ferrugem do eucalipto	10
2.2.1 Sintomatologia.....	11
2.2.2 Etiologia	12
2.2.3 Epidemiologia.....	13
2.3 Impacto das mudanças climáticas na agricultura	14
2.4 Efeito do CO ₂ sobre doenças de plantas.....	16
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	19
3.1 Sala Climatizada.....	19
3.2 Estufa de topo aberto	21
3.3 Condução da Cultura	23
3.4 Obtenção do inóculo de <i>Puccinia psidii</i>	24
3.5 Inoculação.....	24
3.6 Avaliações Realizadas	25
3.6.1 Quantificação da área lesionada por ferrugem através de análise de imagem	25
3.6.2 Quantificação de pústulas, uredínias e esporos de <i>Puccinia psidii</i>	26
3.6.3 Determinação dos teores de carbono e nitrogênio.....	26
3.6.4 Características de desenvolvimento do eucalipto.....	27
3.7 Teste de germinação <i>in vitro</i>	27
3.8 Análise estatística	28
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
4.1 Efeito do aumento da concentração de CO ₂ do ar sobre a ferrugem em mudas clonais de eucalipto	29

4.1.1	Quantificação da área lesionada por ferrugem através de análise de imagem	29
4.1.2	Quantificação de pústulas, uredínias e esporos de <i>Puccinia psidii</i>	32
4.2	Determinação dos teores de carbono e nitrogênio em mudas clonais de eucalipto.....	37
4.3	Efeito do aumento da concentração de CO ₂ do ar sobre o desenvolvimento de mudas clonais de eucalipto	40
4.3.1	Altura das plantas de eucalipto.....	42
4.3.2	Diâmetro das plantas de eucalipto.....	43
4.3.3	Área foliar de eucalipto	45
4.3.4	Massa seca da parte aérea e das raízes das plantas de eucalipto	47
4.4	Efeito do aumento da concentração de CO ₂ do ar sobre a germinação <i>in vitro</i> de urediniósporos	49
5	CONCLUSÕES	52
6	REFERÊNCIAS	53

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1. Sala climatizada onde foram mantidas as caixas plásticas contendo as mudas de eucalipto submetidas aos tratamentos de altas concentrações de CO ₂	20
Figura 2. Caixas plásticas contendo mudas dos clones de eucalipto submetidas ao tratamento com aumento da concentração de CO ₂ . (A) 390 μmol mol ⁻¹ , (B) 405 μmol mol ⁻¹ , (C) 520 μmol mol ⁻¹ e (D) 700 μmol mol ⁻¹	21
Figura 3. Estufas de topo aberto (OTCs)	22
Figura 4. Temperatura do ar (°C) e umidade relativa do ar (%) em OTC	23
Figura 5. Obtenção e germinação dos urediniósporos de <i>Puccinia psidii</i> . Pústulas contendo urediniósporos em folha de jambeiro (A), esporos de <i>P. psidii</i> em microtubos tipo “eppendorf” (B), urediniósporos em suspensão (C), germinação de um urediniósporo com formação do tubo germinativo (D)	24
Figura 6. Imagem fornecida pelo software ASSESS 2.0 mostrando a área de uma folha de eucalipto lesionada por ferrugem	25
Figura 7. Teste de germinação de urediniósporos de <i>Puccinia psidii</i> , <i>in vitro</i> , em sala climatizada.....	28
Figura 8. Área abaixo da curva de progresso da doença da área lesionada (AACPDal) de <i>Puccinia psidii</i> no clone VM 01 (híbrido de <i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>E. camaldulensis</i>), cultivado em diferentes concentrações de CO ₂ (390 μmol mol ⁻¹ , 405 μmol mol ⁻¹ , 520 μmol mol ⁻¹ e 700 μmol mol ⁻¹) em sala climatizada. Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5 % de probabilidade	30
Figura 9. Área abaixo da curva de progresso da doença da área lesionada (AACPDal) de <i>Puccinia psidii</i> no clone VM 01 (híbrido de <i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>E. camaldulensis</i>), cultivado em diferentes concentrações de CO ₂ (399 μmol mol ⁻¹ , 412 μmol mol ⁻¹ e 508 μmol mol ⁻¹) em OTC. Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5 % de probabilidade	31
Figura 10. Número médio de pústulas por folha (A), número médio de uredínias por discos de área foliar (1,13 cm ²) (B) e número médio de esporos por uredínias (C) de <i>Puccinia psidii</i> no clone VM 01 (híbrido de <i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>E. camaldulensis</i>) aos 12, 15 e 18 dias após a inoculação (d.a.i.), cultivado em diferentes concentrações de CO ₂ (390 μmol mol ⁻¹ , 405 μmol mol ⁻¹ , 520 μmol mol ⁻¹ e 700 μmol mol ⁻¹) em sala climatizada. Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5 % de probabilidade	34

Figura 11. Número médio de pústulas por folha (A), número médio de uredínias por discos de área foliar (1,13 cm²) (B) e número médio de esporos por uredínias (C) de *Puccinia psidii* no clone VM 01 (híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *E. camaldulensis*), 15, 18 e 21 dias após a inoculação (d.a.i.), cultivado em diferentes concentrações de CO₂ (399 μmol mol⁻¹, 412 μmol mol⁻¹ e 508 μmol mol⁻¹) em OTC. Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5 % de probabilidade36

Figura 12. Desenvolvimento das mudas de eucalipto dos clones VM 01 (híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *E. camaldulensis*) (A) e MN 463 (*E. urophylla*) (B), submetidos a diferentes concentrações de CO₂ em sala climatizada41

LISTAS DE TABELAS

- Tabela 1. Teores de carbono, nitrogênio e relação C/N nas folhas, caule e raízes nos clones VM 01 (híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *E. camaldulensis*) e MN 463 (*E. urophylla*) em diferentes concentrações de CO₂ (390 μmol mol⁻¹, 405 μmol mol⁻¹, 520 μmol mol⁻¹ e 700 μmol mol⁻¹) em sala climatizada38
- Tabela 2. Teores de carbono, nitrogênio e relação C/N nas folhas, caule e raízes nos clones VM 01 (híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *E. camaldulensis*) e MN 463 (*E. urophylla*) em diferentes concentrações de CO₂ (399 μmol mol⁻¹, 412 μmol mol⁻¹ e 508 μmol mol⁻¹) em OTC39
- Tabela 3. Área abaixo da curva de progresso da altura (AACPA) nos clones VM 01 (híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *E. camaldulensis*) e MN 463 (*E. urophylla*) em diferentes concentrações de CO₂ (390 μmol mol⁻¹, 405 μmol mol⁻¹, 520 μmol mol⁻¹ e 700 μmol mol⁻¹) em sala climatizada.....42
- Tabela 4. Área abaixo da curva de progresso da altura (AACPA) nos clones VM 01 (híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *E. camaldulensis*) e MN 463 (*E. urophylla*) em diferentes concentrações de CO₂ (399 μmol mol⁻¹, 412 μmol mol⁻¹ e 508 μmol mol⁻¹) em OTC.....43
- Tabela 5. Diâmetro da base do caule (mm) dos clones VM 01 (híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *E. camaldulensis*) e MN 463 (*E. urophylla*) em diferentes concentrações de CO₂ (390 μmol mol⁻¹, 405 μmol mol⁻¹, 520 μmol mol⁻¹ e 700 μmol mol⁻¹) em sala climatizada44
- Tabela 6. Diâmetro da base do caule (mm) dos clones VM 01 (híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *E. camaldulensis*) e MN 463 (*E. urophylla*) em diferentes concentrações de CO₂ (399 μmol mol⁻¹, 412 μmol mol⁻¹ e 508 μmol mol⁻¹) em OTC.....44
- Tabela 7. Área foliar (cm²) das folhas dos clones VM 01 (híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *E. camaldulensis*) e MN 463 (*E. urophylla*) em diferentes concentrações de CO₂ (390 μmol mol⁻¹, 405 μmol mol⁻¹, 520 μmol mol⁻¹ e 700 μmol mol⁻¹) em sala climatizada45
- Tabela 8. Área foliar (cm²) das folhas dos clones VM 01 (híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *E. camaldulensis*) e MN 463 (*E. urophylla*) em diferentes concentrações de CO₂ (399 μmol mol⁻¹, 412 μmol mol⁻¹ e 508 μmol mol⁻¹) em OTC46
- Tabela 9. Massa seca da parte aérea e das raízes dos clones VM 01 (híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *E. camaldulensis*) e MN 463 (*E. urophylla*) em diferentes concentrações de CO₂ (390 μmol mol⁻¹, 405 μmol mol⁻¹, 520 μmol mol⁻¹ e 700 μmol mol⁻¹) em sala climatizada47

Tabela 10. Massa seca da parte aérea e das raízes dos clones VM 01 (híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *E. camaldulensis*) e MN 463 (*E. urophylla*) em diferentes concentrações de CO₂ (399 μmol mol⁻¹, 412 μmol mol⁻¹ e 508 μmol mol⁻¹) em OTC48

Tabela 11. Teste de germinação *in vitro* de urediniósporos de *Puccinia psidii*, 3, 6, 9, 12 e 24 horas, em diferentes concentrações de CO₂ (390 μmol mol⁻¹, 405 μmol mol⁻¹, 520 μmol mol⁻¹ e 700 μmol mol⁻¹) em sala climatizada.....49

RESUMO

A concentração de dióxido de carbono (CO₂) da atmosfera vem aumentando desde 1750 com o advento da Revolução Industrial. Este aumento considerável, devido às atividades antrópicas, poderá alterar o cenário atual dos problemas fitossanitários em algumas décadas. O presente estudo teve como objetivo avaliar o efeito do aumento da concentração de CO₂ do ar sobre a ferrugem do eucalipto, causada pelo fungo *Puccinia psidii*, em mudas de dois clones de eucalipto: um híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *E. camaldulensis* (VM 01) e a espécie *E. urophylla* (MN 463), e ainda o efeito do CO₂ sobre o desenvolvimento das plantas. Foram realizados experimentos em sala climatizada com as concentrações de 390, 405, 520 e 700 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ e em estufas de topo aberto (“Open top chambers”, OTCs), em campo. Nos experimentos em OTCs, foram avaliados três tratamentos: controle sem estufa e sem injeção de CO₂ (concentração média de 399 $\mu\text{mol mol}^{-1}$), controle com estufa sem injeção de CO₂ (concentração média de 412 $\mu\text{mol mol}^{-1}$) e estufa com injeção de CO₂ (concentração média de 508 $\mu\text{mol mol}^{-1}$). A inoculação foi realizada via pulverização de ambas as faces das folhas com suspensão de 2×10^4 urediniósporos mL⁻¹ de *P. psidii*, aos 68 e 62 dias após a implantação do experimento em sala climatizada e nas OTCs, respectivamente. De acordo com os resultados dos experimentos, clones de VM 01 cultivados em ambiente enriquecido com CO₂ apresentaram menor área lesionada, número médio de pústula por folha, número de uredínias por amostra e número médio de esporo por uredínia, diferindo significativamente das plantas controle. Em clones de MN 463 não foram observadas lesões, resposta de

hipersensibilidade e esporulação de *P. psidii*. Com relação às análises de teor de carbono das plantas, observou-se que não houve diferença entre os tratamentos. Em oposição, nestas mesmas plantas, observou-se uma redução da concentração de nitrogênio, indicando que condições atmosféricas com concentração alterada de CO₂, podem interferir no processo de assimilação de nitrogênio em plantas de eucalipto. Observou-se ainda uma maior relação C/N em caules e raízes de plantas submetidas aos tratamentos em sala climatizada, quando comparadas às plantas controle. Nos tratamentos em OTCs, essa relação foi maior na análise de folhas e raízes. Foi observado ainda, que o aumento da concentração de CO₂ favoreceu características de desenvolvimento das plantas, como altura, diâmetro, massa seca da parte aérea, massa seca das raízes e área foliar, diferindo estatisticamente do controle. O efeito do aumento da concentração do CO₂ não interferiu sobre a germinação *in vitro* de urediniosporos de *Puccinia psidii*.

Palavras-chave: dióxido de carbono, *Eucalyptus*, *Puccinia psidii*, mudança climática

EFFECT OF RISING CONCENTRATION OF CARBON DIOXIDE OF THE AIR ON THE RUST AND GROWTH IN EUCALYPTUS. Botucatu, 2012. 65p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Proteção de Plantas) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: RODRIGO ESTEVAM DE OLIVEIRA MAC LEOD

Adviser: RAQUEL GHINI

SUMMARY

The concentration of carbon dioxide (CO₂) in the air has increased since 1750 due to the advent of the Industrial Revolution. This considerable increase by anthropogenic activities may exert several effects on the current situation of phytosanitary problems in a few decades. The present study aimed to evaluate the effect of increasing CO₂ concentration in the air over the eucalyptus rust, caused by the fungus *Puccinia psidii* in seedlings of two eucalyptus clones, a hybrid of *Eucalyptus urophylla* x *E. camaldulensis* (VM 01) and *E. urophylla* (MN 463) species, and the effect of CO₂ on plants growth. Experiments in a climatized room with concentration of 390, 405, 520 and 700 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ and field in open-top chambers (OTCs) were performed. In experiments with OTCs, three types of treatments were evaluated: control without OTC and without CO₂ injection (average concentration of 399 $\mu\text{mol mol}^{-1}$), control with OTC and without CO₂ injection (average concentration of 412 $\mu\text{mol mol}^{-1}$) and OTC with CO₂ injection (average concentration of 508 $\mu\text{mol mol}^{-1}$). Spray inoculation with a suspension of $2 \times 10^4 \text{ mL}^{-1}$ uredinispore of *P. psidii* on both sides of the leaves was performed

after 68 and 62 days of implantation of the experiment in climatized room and in OTCs, respectively. According to the results of experiments, VM 01 clones cultivated in environment enriched with CO₂ had shown less injured area, fewer average number of pustules per leaf, fewer number of uredinias per sample and fewer mean number of uredinia were scored by spores, differing significantly from the control plants. In MN 463 clones there were no injuries, hypersensitivity response and sporulation of *P. psidii* on leaves. Regarding the analysis of carbon content of plants, it was observed no differences between the treatments. In contrast, in these same plants, we observed a reduction in the concentration of nitrogen, indicating that the atmosphere conditions with increased concentrations of CO₂ can interfere in the process of nitrogen assimilation in plants of *Eucalyptus*. There was also a higher C/N in stems and roots of plants subjected to treatments in climatized room, when compared to control plants. In treatments with OTCs, this ratio was higher in the analysis of leaves and roots. Furthermore, it was observed that the increase of CO₂ concentration favored features of plant development, such as height, diameter, shoot dry mass, dry mass of roots and leaf area, which proved to be statistically different from control plants. The effect of increased CO₂ concentration did not affect the *in vitro* germination of urediniospores of *Puccinia psidii*.

Keywords: carbon dioxide, *Eucalyptus*, *Puccinia psidii*, climate change

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, vem aumentando a quantidade de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera, proveniente de várias atividades antrópicas, como a queima de combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás natural) e de mudanças do uso da terra, ocasionando a intensidade do chamado efeito estufa (GEE) (SOARES; OLIVEIRA, 2002). Os gases de efeito estufa têm a capacidade natural de reter o calor na atmosfera, permitindo que as ondas eletromagnéticas provenientes do sol atravessem a atmosfera e aqueçam a superfície terrestre, dificultando a saída da radiação infravermelha emitida pela Terra, mantendo, assim, o planeta aquecido (SANTOS, 2006). Dentre os gases, o CO_2 é o mais emitido pela ação do homem.

Desde 1750, nos primórdios da Revolução Industrial, a concentração atmosférica de CO_2 aumentou 31 %, sendo que mais da metade desse aumento ocorreu nos últimos cinquenta anos. Durante os primeiros séculos da Revolução Industrial, período de 1760 a 1960, os níveis de concentração de CO_2 atmosférico aumentaram de $277 \mu\text{mol mol}^{-1}$ para $317 \mu\text{mol mol}^{-1}$. Durante as recentes quatro décadas, de 1960 a 2001, as concentrações de CO_2 aumentaram de $317 \mu\text{mol mol}^{-1}$ para $371 \mu\text{mol mol}^{-1}$, um acréscimo de $54 \mu\text{mol mol}^{-1}$ (IPCC, 2007a, b). Segundo o IPCC (2007c), a concentração desse gás tende a aumentar em até $1000 \mu\text{mol mol}^{-1}$ no cenário futuro, caso não ocorra uma mudança de comportamento e a redução da emissão destes gases para a atmosfera.

Segundo Siqueira (2001), as pesquisas voltadas ao efeito de mudanças climáticas na agricultura brasileira são ainda muito restritas. Considerando-se algumas questões agroambientais relevantes, pesquisas relacionadas ao manejo do solo, de pragas e

doenças de plantas tornam-se cada vez mais importantes no contexto do efeito estufa, em face dos impactos ambientais esperados.

A vulnerabilidade da agricultura brasileira, em relação à ocorrência de doenças de plantas é um assunto estratégico para o país (BRASIL, 2005 a, b). O atual cenário dos problemas fitossanitários será alterado pelas mudanças climáticas; modificações na importância relativa das doenças podem ocorrer em algumas décadas. Essas mudanças podem ser positivas, negativas ou neutras, uma vez que as mudanças climáticas podem diminuir, aumentar ou não ter efeito sobre os diferentes problemas fitossanitários, em cada região. Por esse motivo, a análise dos possíveis efeitos da mudança climática sobre doenças de plantas é fundamental na adoção de medidas efetivas, com a finalidade de evitar prejuízos mais sérios (GHINI, 2005; HAMADA et al., 2005). Existem poucos relatos sobre os efeitos do CO₂ sobre as doenças de plantas. Assim, faz-se necessária a realização de estudos relacionados ao assunto.

Altas concentrações de CO₂ na atmosfera tendem a favorecer o desenvolvimento das plantas. Por ser um componente básico da fotossíntese, o CO₂ em alta concentração pode promover alterações no metabolismo, crescimento e processos fisiológicos das plantas. Geralmente, essas alterações resultam em benefícios para o desenvolvimento das plantas. Vários autores chegaram às mesmas conclusões com diferentes culturas, ecossistemas naturais e espécies florestais (GHINI et al., 2008).

Com relação a problemas fitossanitários, o surgimento e desenvolvimento de uma doença são resultantes da interação de três fatores: planta suscetível, patógeno virulento e ambiente favorável. O ambiente é, portanto, um componente relevante nessa interação, podendo, inclusive, impedir a ocorrência da doença mesmo na presença de hospedeiro e patógeno (VALE et al., 2004). Com relação aos impactos das mudanças climáticas sobre as doenças de plantas, o efeito pode ser direto ou indireto, podendo interferir sobre os patógenos, sobre as plantas hospedeiras ou sobre a interação de ambos (CHAKRABORTY, 2005; GHINI, 2005).

Manning e Tiedemann (1995) verificaram que há uma tendência ao aumento de doenças de plantas com a elevação da concentração do CO₂. O aumento na produção de biomassa das plantas, isto é, o aumento de brotações, folhas, flores e frutos, representam maior quantidade de tecido a ser infectado pelos patógenos. O aumento na

densidade das copas e nos tamanhos das plantas pode facilitar o crescimento, a esporulação e disseminação de fungos foliares, tais como as ferrugens, que requerem alta umidade relativa do ar para se desenvolverem.

A ferrugem do eucalipto é causada pelo fungo *Puccinia psidii* Winter e, ultimamente, vem preocupando o setor florestal, principalmente pelo aumento de sua ocorrência no território nacional e pelos danos causados (FURTADO; SANTOS, 2001). O eucalipto era considerado uma cultura praticamente livre de doenças, até a década de 70. Entretanto, o avanço das áreas reflorestadas para regiões mais quentes e úmidas, o plantio de espécies mais suscetíveis e a utilização repetitiva de uma mesma área para plantio, criaram condições favoráveis à ocorrência de doenças (FURTADO et al., 2008), principalmente a ferrugem, a qual pode acarretar danos de até 25 % na produção, no estado de São Paulo (FURTADO et al., 2001).

As mudanças climáticas provavelmente exercerão efeitos diversos na agricultura, especialmente sobre as doenças de plantas. Com o objetivo de avaliar alguns desses efeitos, nesse trabalho foram testados ambientes que simulam condições com aumento da concentração de CO₂, para avaliar qual o efeito que esse aumento exerce sobre a ferrugem em um único ciclo, causada pelo fungo *Puccinia psidii*, em mudas de dois clones de eucalipto, um híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *E. camaldulensis* (VM 01) e a espécie *E. urophylla* (MN 463), bem como o crescimento das plantas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Cultura do eucalipto

O eucalipto (*Eucalyptus* spp.) ocorre naturalmente na Austrália, Indonésia e ilhas próximas, tais como Flores, Alor e Wetar. O gênero *Eucalyptus* pertence à família *Myrtaceae*, apresenta uma ampla plasticidade e dispersão mundial, crescendo satisfatoriamente em diferentes situações edafoclimáticas (SANTOS et al., 2001).

Segundo Martini (2004), o eucalipto foi introduzido na América do Sul, provavelmente, em 1823, em regiões próximas ao Chile. Em meados de 1865, a espécie foi introduzida na Argentina, pelo Presidente Garcia Moreno. De acordo com Martini (2004), a data da introdução do eucalipto no Brasil é por volta de 1868, e presume-se que as primeiras mudas foram plantas no Rio Grande do Sul por Frederico de Albuquerque.

De 1909 até 1965 haviam sido plantados 470.000 ha de eucalipto no Brasil, sendo que o estado de SP respondia por 80 % das terras cultivadas com a cultura (COUTO, 2002). Dados do último levantamento publicado revelam que a cultura expandiu-se de modo significativo em todo território brasileiro. Em 2008, a área cultivada com a espécie foi de 4.258.704 ha, em 2009 foi de 4.516.730 ha, sendo que em 2010 foi de 4.754.334 ha. Minas Gerais é o maior produtor da cultura, respondendo por 29,4 % do total cultivado, seguido por São Paulo, com 22 %, e Bahia, com 13,3 %. Constata-se crescimento de 5,3 % na área plantada com eucalipto em 2010, em relação a 2009 (ABRAF, 2011).

O eucalipto é cultivado para os mais diversos fins, tais como, produção de papel, obtenção de celulose, lenha, carvão, aglomerado, óleos para indústrias farmacêuticas, mel, além de ornamentação e quebra-vento. Mundialmente, o eucalipto é a árvore mais plantada, com mais de 20 milhões de ha. O Brasil possui a maior área plantada, detendo 21 %

do total mundial (IGLESIAS-TRABADO et al., 2011). Em 2010, o Brasil consumiu aproximadamente 112,9 milhões m³ de toras de eucalipto. O segmento de celulose e papel é o principal consumidor absorvendo aproximadamente 48,6 % das toras produzidas; o setor siderúrgico, por sua vez, consumiu 29,3 %; carvão vegetal 13,6 %; painéis reconstituídos 3,9 %; indústria madeireira 3,1 % e cavaco de madeira para exportação e madeira tratada consumiram, juntas, 1,5 % das toras produzidas (ABRAF, 2011).

O eucalipto é a cultura mais usada para obtenção de celulose, pela sua adaptabilidade a diferentes condições climáticas e regionais, apresentando tempo de crescimento até a idade de corte reduzido em comparação a pinos, além de possuir uma menor quantidade de lignina; pois madeira de folhosas deslignifica mais rapidamente (OLIVETTI NETO, 2007). A cultura do eucalipto se tornou muito importante para o reflorestamento comercial, devido ao seu rápido crescimento, baixo custo e alta produtividade (HO et al., 1998; SILVA, 2001).

Atualmente, o Brasil possui uma das áreas mais produtivas de eucalipto do mundo, chegando a atingir produtividade na ordem de 45 a 60 m³/ha/ano. Essa produtividade é alcançada, em grande parte, devido a materiais clonais e alta tecnologia de implantação, condução e colheita de florestas de eucalipto (COUTO, 2002; MORA; GARCIA, 2000).

As dez espécies de eucalipto mais importantes nas plantações florestais no mundo, em termos de incremento médio anual de madeira, são: *Eucalyptus grandis*, *E. saligna*, *E. urophylla*, *E. camaldulensis*, *E. tereticornis*, *E. globulus*, *E. citriodora*, *E. robusta*, *E. esxerta* e *E. paniculata*. No Brasil, as espécies mais plantadas são o *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus dunnii* (BRACELPA, 2004). Entre outras espécies, destacam-se o *E. cloeziana* e o *E. citriodora* (ESPÉCIES..., 2001).

No entanto, a produtividade do eucalipto é restringida pela ferrugem, doença causada pelo fungo *Puccinia psidii* Winter. A ferrugem destaca-se como uma das doenças mais severas da cultura (JUNGHANS et al., 2003).

2.2 Ferrugem do eucalipto

A primeira descrição da *Puccinia psidii* no Brasil ocorreu em mudas de goiabeira por George Winter (MACLACHLAN, 1938; FIGUEIREDO, 2001a). Em 1944

houve o primeiro relato descrito por Joffily em *Eucalyptus citriodora*, hoje *Corymbia citriodora*, no Estado do Rio de Janeiro (JOFFILY, 1944; COUTINHO et al., 1998). A primeira epidemia relevante de *P. psidii* em eucalipto ocorreu em 1973 no Espírito Santo, onde cerca de 400.000 mudas de *E. grandis*, oriundas de sementes vindas da África do Sul foram refugadas em decorrência da doença (FERREIRA, 1983).

O fungo biotrófico *P. psidii* apresenta uma distribuição geográfica ampla (CASTRO et al., 1983). Este patógeno é endêmico na América do Sul, América Central, nas ilhas do Caribe (LAUDON ; WATERSTON, 1965; DI STEFANO et al., 1998), na Jamaica (MACLACHLAN, 1938) e na Flórida (MARLATT; KIMBROUGH, 1979; RAYACHHETRY et al., 1997) e é capaz de infectar diversas espécies de Mirtáceas nativas e exóticas. Ainda não existem evidências de ocorrência de *P. psidii* na Austrália (COUTINHO et al., 1998), onde é considerada uma doença quarentenária de alto risco de danos à flora local ou em plantios comerciais, em virtude de sua alta capacidade de disseminação e ampla gama de hospedeiros (GLEN et al., 2007).

Já foram descritos como hospedeiros deste fungo 11 gêneros e 31 espécies (RAYACHHETRY et al., 2001; COUTINHO et al., 1998). Na cultura do eucalipto, já foi relatado *P. psidii* em *E. grandis*, *E. urophylla*, *E. nitens*, *E. phaeotricha*, *C. citriodora*, *E. cloeziana*, *E. obliqua*, *E. pilularis*, *E. saligna* (COUTINHO et al., 1998) e mais recentemente em *E. globulus* (TELECHEA et al., 2003). Como resistentes, destacam-se *E. pellita*, *E. microcorys* e *E. urophylla* (DIANESE et al., 1984).

A ferrugem do eucalipto é, atualmente, uma doença muito comum e severa em plantações suscetíveis à doença com menos de dois anos de idade. Em florestas plantadas de *E. grandis* com 12 meses de idade severamente infestadas com ferrugem, verificou-se uma redução do diâmetro das árvores em 28 % e redução na altura em 35 %, quando comparadas com as árvores não atacadas (SILVEIRA et al., 1998).

Atualmente, principal forma de controle da doença é o uso de genótipos de eucalipto resistentes à ferrugem, uma vez que o uso dessa medida apresenta maior praticidade, menor custo e causa menor impacto ambiental. Outras formas de controle também utilizadas são o uso de fungicidas e colheita de árvores para aproveitamento da rebrota em épocas desfavoráveis à ferrugem (DE CARVALHO et al., 1998; ALFENAS et al., 1989).

2.2.1 Sintomatologia

P. psidii é um patógeno que afeta plantas jovens, viveiros e jardins clonais. A ferrugem do eucalipto só ataca plantas jovens com menos de dois anos de idade ou em rebrotas, sempre em órgãos tenros como primórdios foliares, terminais de galhos e haste principal (FIGUEIREDO, 2001b), causando deformações dos órgãos, minicancros, perda da dominância apical e, provavelmente, redução do crescimento. A presença de pústulas amarelas sobre os órgãos afetados é o sinal marcante da doença (ALFENAS; ZAUZA, 2007).

A doença é também conhecida como ferrugem das mirtáceas, por infectar importantes mirtáceas florestais e frutíferas como goiabeira, jameiro, jaboticabeira, melaleuca, entre outras (FURTADO; MARINO et al., 2003).

P. psidii pode ser facilmente identificado por meio de seu sinal, na forma de esporulação urediniospórica intensa, pulverulenta e de coloração amarela em órgãos jovens da planta. Os sintomas do ataque iniciam-se com pequenas pontuações na parte inferior das folhas, levemente salientes de coloração verde clara ou vermelho-amarelada. Após duas semanas, as pontuações se transformam em pústulas de uredósporos amarelos, que aumentam de tamanho e, em seguida, ocorre a típica esporulação uredospórica de coloração amarela forte, nos órgãos atacados, que ficam tomados pela infecção (RAYACHHETRY et al., 2001; PRINCIPAIS..., 2001). Os órgãos mais suscetíveis à ferrugem são os rebentos foliares e as partes mais apicais dos galhos e haste principal, as quais podem apresentar características de encarquilhamento e esporulação acentuada. Quando o ataque é intenso as pústulas se agregam recobrando a superfície das brotações do eucalipto, ocasionando morte dos tecidos afetados, os quais adquirem coloração negra, devido à ocorrência de necrose (FERREIRA, 1989; TOMMERUP et al., 2003).

Nas folhas, as lesões podem ocorrer dispersas em ambas as faces do limbo e comumente delimitadas por um halo arroxeadado. Adicionalmente, quando o ataque ocorre nos ramos, às folhas recém-formadas não chegam a completar seu desenvolvimento e apresentam deformação (GALLI et al., 1980).

Sob condições ambientais favoráveis, o fungo infecta a parte área de mudas e de plantas jovens no campo, até o estágio fenológico B, que corresponde a cerca de 2

m de altura (FERREIRA, 1983). O ataque do fungo pode atrasar o desenvolvimento da planta, acarretar perdas da dominância apical e matar brotações após o corte raso. Em materiais altamente suscetíveis, além da redução do crescimento, eventualmente, pode ocorrer morte da planta (ALFENAS et al., 2004). Após o ressecamento das pústulas, as plantas atacadas podem recuperar-se, emitindo intensa brotação; porém, nessas novas brotações pode haver recorrência da doença (FERREIRA, 1989).

2.2.2 Etiologia

Os fungos do gênero *Puccinia* pertencem à família *Pucciniaceae*, ordem *Uredinales* (Ferrugens), classe *Basidiomycetes* (*Urediniomycetes*). A *P. psidii* é uma ferrugem de ciclo incompleto da qual se conhecem seus estádios I – écio (FIGUEIREDO et al., 1984), II – urédia, III – télia e IV – basídio (MACLACHLAN, 1938; FERREIRA, 1983). É importante considerar que o estágio espermogonial, até o momento, não foi identificado no fungo *P. psidii*. O estágio I – écio, apresenta a mesma morfologia do estágio II – urédia, e teve sua ocorrência identificada, até o momento, apenas no jambeiro (FIGUEIREDO et al., 1984), mas é possível que este estágio também ocorra nas demais mirtáceas hospedeiras desse fungo. O estágio II é constantemente produzido em condições naturais ou em inoculações artificiais e, inclusive, é por meio de suas pústulas uredospóricas, que se faz o diagnóstico da doença em condições de campo. Cada pústula bem desenvolvida pode apresentar mais de 20 urédias, cada uma com 0,2 - 0,3 mm de diâmetro. As pústulas podem interligar-se, especialmente quando os primórdios foliares e as partes apicais tenras dos galhos e da haste principal se mostram totalmente cobertos pela esporulação. Os urediniósporos variam quanto à forma, podendo ser periformes, esféricos ou ovais, e medem 10 - 20 x 15 - 25 µm.

Em geral, os estádios III e IV são pouco encontrados em ocorrência natural da ferrugem do eucalipto. Segundo Ferreira (1989), os teliosporos de *P. psidii* são pedicelados, bicelulares, clavados, achatados e muitos apresentam uma papila apical na parede da célula posterior e medem 15 - 28 x 30 - 60 µm.

Em eucalipto ou outras mirtáceas, há produção de teliosporo nas épocas mais quentes do ano. Em condições de temperatura (15 a 25 °C) e umidade favoráveis, os teliosporos germinam, produzindo basídios com basidiósporos. Das infecções

basidiospóricas em eucalipto ou outras mirtáceas, resultam estruturas e esporos morfológicamente similares aos estádios de urédia. Nesse caso, seriam do estágio de écio do tipo uraécio (CUMMINS; HIRATSUKA, 1983); uma vez que, por definição, os eciosporos seriam os primeiros esporos (unicelulares e não produtores de basídios) surgidos após infecções basidiospóricas das ferrugens.

2.2.3 Epidemiologia

O clima exerce influência marcante sobre o desenvolvimento de doenças, pois pode atuar sobre o patógeno, sobre o hospedeiro e sobre a interação patógeno-hospedeiro. O conhecimento das exigências climáticas dos fitopatógenos é de grande importância para o entendimento da evolução da doença no campo e para se prever, com certa exatidão, a ocorrência de epidemias em determinadas condições climáticas e agrícolas de uma região (KRUGNER, 1980).

Para os fungos causadores de ferrugens, o fotoperíodo, a temperatura e a umidade são os fatores que mais influenciam na ocorrência e severidade da doença, interferindo no processo de germinação, penetração e infecção de plantas de eucalipto por urediniósporos de *P. psidii* (NUTMAN; ROBERTS, 1963; RUIZ et al., 1989 a, b).

Por inibir a germinação de urediniósporos, a luz impede a penetração do fungo e o processo inicial de colonização, durante o dia. Urediniósporos germinam somente no escuro, na presença de água livre (entre 6 e 24 h de molhamento foliar), em temperatura de 10 a 30 °C, com máximo de germinação entre 15 e 20 °C. Após a penetração e incubação, ocorre a esporulação uredinospórica de *P. psidii*, por estímulo de luz e temperaturas próximas a 20 °C. Em mudas de jambeiro, após a realização da inoculação artificial e incubação a 20 °C e fotoperíodo de 12 horas, pode-se observar os sintomas iniciais a partir do segundo ao quarto dia e a esporulação a partir do quarto dia. Nestas condições, a esporulação máxima ocorre entre 7 e 15 dias de incubação. Após este período, as lesões tornam-se necróticas e a esporulação reduz. Há indícios de que a luz estimula a produção de teliosporos, os quais ocorrem nas épocas mais quentes do ano, com médias de temperaturas próximas a 25 °C. Temperaturas inferiores a 10 °C e superiores a 25 °C são desfavoráveis a infecção, colonização e a esporulação urediniósporica de *P. psidii* em plantas de eucalipto.

Umidade relativa maior ou igual a 90 %, por no mínimo 8 horas diárias, sob temperaturas medias de 20 °C a 25 °C, causaram aumento na intensidade da doença (CARVALHO et al., 1994; RUIZ et al., 1989a, 1989b).

Tessmann ; Dianese (2002) investigaram se compostos provindos da planta podem estimular a germinação de urediniósporos e observaram que a taxa de germinação foi duplicada justamente devido à presença de compostos produzidos pelas folhas. Um composto estimulador responsável por duplicar a taxa de germinação dos urediniósporos foi detectado e denominado hentriacotane, quando presente em concentrações variando de 20 – 200 mg L⁻¹.

2.3 Impacto das mudanças climáticas na agricultura

A agricultura, entre todos os setores econômicos, apresenta maior dependência das condições climáticas. A elevação das temperaturas das áreas tropicais e subtropicais, que incluem a maioria dos países em desenvolvimento, como o Brasil, afetará diretamente a produção agrícola.

A mudança climática poderá proporcionar ambientes mais chuvosos ou secos em algumas regiões causando irregularidade na distribuição de chuvas. A intensificação de chuvas em determinadas regiões pode aumentar o potencial de erosão, provocar inundações e assoreamento de rios. Em regiões onde ocorrerá ausência de chuvas por longos períodos poderá haver diminuição da cobertura vegetal em decorrência das secas, expondo o solo a processos erosivos e de desertificação. Existe o risco de intrusão de sais nos estuários e aquíferos, especialmente em áreas costeiras em decorrência da elevação do nível do mar (SIQUEIRA et al., 2001).

Outro fator importante é o aumento da concentração de CO₂ na atmosfera. Em experimentos de laboratório, o aumento da concentração de CO₂ de 330 para 660 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ poderá aumentar a produção em 34 % para culturas C₃ e 14 % para as culturas C₄ (IPCC, 1996).

Modelos matemáticos foram aplicados para o estudo de impactos das mudanças climáticas sobre a agricultura. Para as culturas do trigo, milho e soja, alguns desses estudos foram realizados por Siqueira et al. (2001) e indicaram que o efeito estufa poderá

reduzir a produtividade da cultura do trigo, em torno de 30 %, e para a cultura do milho, em média 16 %. Entretanto, para a cultura da soja, foram observadas projeções favoráveis, com um aumento médio de 21 % em sua produtividade. Com relação à modificação gradual da concentração de CO₂, acredita-se que o declínio da produtividade do trigo e do milho seja mais expressiva após a década de 2030 e, para a soja, as projeções de aumento da produção são aproximadamente lineares. Outros autores também realizaram estudos semelhantes para a cultura do café, como Assad et al. (2004) e Pinto et al. (2002), nos quais o aumento de 5,8 °C na temperatura e um incremento de 15 % na precipitação pluvial indicaram uma redução de área apta para a cultura superior a 95 % em Goiás, Minas Gerais e São Paulo, e de 75 % no Paraná.

De acordo com os trabalhos desenvolvidos por Amthor (2001), estudando efeitos do aumento da concentração de CO₂ na produtividade do trigo, foi observado aumento da produtividade em 37 % para concentração de 890 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ e de 31 % para concentração de 700 $\mu\text{mol mol}^{-1}$.

Mesmo levando em conta os efeitos diretos da fertilização por CO₂, estudos baseados em projeções do clima global e culturas agrícolas, feitas no Brasil, Argentina, Uruguai e Chile, indicam uma redução nas produtividades das culturas do milho, soja, trigo, cevada, batata e uva (IPCC, 1998).

O agravamento do efeito das mudanças climáticas sobre a capacidade de produção agrícola nos países em desenvolvimento tem sido temática de diversos estudos. Alguns destes estimam que, até o ano de 2080, esses países perderão 9 % de sua capacidade de produção agrícola, na ausência de medidas precisas de controle das mudanças climáticas. Dados desses estudos indicam ainda que o potencial produtivo da América Latina poderá ser reduzido em 13 %, uma vez que essa região está entre as mais vulneráveis, no que se refere aos efeitos das mudanças climáticas sobre a produtividade agrícola. Ainda segundo esses estudos, esse potencial poderá ser reduzido em até 17 % na África e em torno de 9 % na Ásia e no Oriente Médio. Segundo estimativas de trabalhos recentes, a cultura do milho será altamente prejudicada, na ausência de medidas de controle, podendo sofrer uma queda de produtividade em torno de 10 % até 2055, na América Latina e de surpreendentes 25 % no Brasil, podendo gerar diversos problemas relacionados com a ausência de alimento entre

populações que têm essa “commodity” agrícola como principal fonte de subsistência (KOTSCHI, 2007; ROSENZWEIG, 2008).

De acordo com Marengo (2001), o aumento da temperatura, ocorrência de longos períodos de seca e chuvas restritas a eventos raros e de curta duração podem inviabilizar a produção de grãos na região sul do Brasil.

Instituições de pesquisa dos Estados Unidos, como o Centro de Ciência e Política Ambiental da Universidade de Stanford, entre outras, avaliaram o efeito das mudanças climáticas sobre a produção de arroz na Indonésia e observaram que a probabilidade de ocorrência de atrasos por mais de 30 dias das chuvas pode aumentar para 30-40 %, em 40 anos. Esse aumento é extremamente alto, uma vez que atualmente esse aumento encontra-se entre 9-18 % (NAYLOR, 2007). É importante considerar que os resultados das pesquisas dos impactos das mudanças climáticas sobre a agricultura são muitas vezes contraditórios e que, para algumas culturas, a dificuldade de estabelecer previsões confiáveis é maior (MARENGO, 2001).

2.4 Efeito do CO₂ sobre doenças de plantas

É importante ressaltar o efeito do aumento da concentração de CO₂ atmosférico no desenvolvimento das plantas. A elevação do teor de CO₂ atmosférico pode promover alterações no metabolismo, crescimento e processos fisiológicos das plantas. Em algumas décadas, os impactos provocados pelo aumento de CO₂ atmosférico na fisiologia das plantas podem modificar o cenário atual de algumas fitopatologias e interferir nas relações patógeno-hospedeiro (CHAKRABORTY et al., 2008; GARRETT et al., 2006; GHINI et al., 2011; MANNING; TIEDEMANN, 1995).

Em trabalho desenvolvido por Chakraborty et al. (2000), foi demonstrado o efeito do aumento da concentração de CO₂ sobre as relações patógeno-hospedeiro. Sobre condições aumentadas desse gás em *Stylosanthes scabra* observou-se redução da densidade de estômatos, aumento do teor de carboidratos nas folhas e maiores camadas de ceras e células da epiderme. Os autores consideraram que o aumento do teor de carboidratos estimula o desenvolvimento de patógenos dependentes de açúcares, como os

fungos causadores de ferrugem; entretanto, a redução da abertura dos estômatos inibe a penetração destes (MANNING; TIEDEMANN, 1995).

Kobayashi et al. (2006) verificaram que a porcentagem de plantas de arroz infectadas por *Rhizoctonia solani* e *Magnaporthe oryzae* aumentou, sob condições elevadas de CO₂ (em torno de 574 a 650 μmol mol⁻¹) se comparada às condições ambientes (em torno de 365 a 369 μmol mol⁻¹). Dessa forma, a eficácia dos mecanismos de resistência das plantas pode ser quebrada mais rapidamente, como resultado do desenvolvimento acelerado das populações dos patógenos (CHAKRABORTY; DATTA, 2003).

McElrone et al. (2010) estudaram o efeito combinatório do aumento de CO₂ e da variação climática natural sobre a *Cercospora liquidambaris* e *C. cercidicola* em *Liquidambar styraciflua* e *Cercis canadensis*, respectivamente. O experimento conduzido no Duke FACE (“Free Air Carbon Dioxide Enrichment”) com 385 μmol mol⁻¹ e 585 μmol mol⁻¹ de CO₂ demonstrou que a incidência e severidade da doença aumentaram com a elevação da concentração de CO₂.

Segundo trabalho desenvolvido por Lessin ; Ghini (2009), em estufa de topo aberto (OTC), analisando-se a severidade do *Microsphaera diffusa* em plantas de soja foi observado aumento da severidade da doença nos tratamentos com aumento da concentração de CO₂.

Chakraborty et al. (2000), ao estudarem o efeito da elevação de CO₂ na produção e dispersão de esporos de *Colletotrichum gloeosporioides* em *Stylosanthes scabra*, verificaram redução da severidade da antracnose em ambiente enriquecido com 700 μmol mol⁻¹ de CO₂, quando comparado a ambientes com 350 μmol mol⁻¹.

Strengbom ; Reich (2006), em experimento do tipo FACE, observaram menor incidência de *Cercospora* sp. e *Septoria* sp. em plantas de *Solidago rigida* submetidas à concentração de 560 μmol mol⁻¹ de CO₂, quando comparadas à testemunha (368 μmol mol⁻¹).

Ghini (2005), ao realizar uma revisão de literatura sobre o assunto, comenta que algumas doenças serão favorecidas pelo aumento da concentração de CO₂ (*Fusarium nivale* - centeio; *Fusarium oxysporum* f. sp. *cyclaminis* - ciclame; *Fusarium* sp. - trigo; *Cladosporium fulvum* - tomate; *Seiridium cardinale* - *Cupressus sempervirens*; *Rhizoctonia solani* - algodão; *Plasmodiophora brassicae* - repolho; *Ustilago* spp. - cevada, milho; *Puccinia* spp. - aveia, centeio, trigo); outras não serão afetadas (*Pythium splendens* -

Poinsettia; *Thielaviopsis basicola* - Poinsettia; *Botrytis cinerea* - ciclame; *Sclerotinia minor* - alface; *Erysiphe graminis* - trigo) e algumas serão desfavorecidas (*Rhizoctonia solani* - beterraba açucareira; *Phytophthora parasitica* - tomate; *Colletotrichum gloeosporioides* - *Stylosanthes scabra*; *Xanthomonas campestris* pv. *pelargonii* - gerânio; *Sphaerotheca pannosa* - roseiras; *Puccinia* sp. - gramínea).

3 MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos para o estudo dos efeitos do aumento da concentração de CO₂ do ar sobre a ferrugem do eucalipto foram conduzidos em sala climatizada e estufas de topo aberto (OTC, do inglês, “open top chambers”), da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa Meio Ambiente, localizada na cidade de Jaguariúna – SP (latitude 22° 41’ S., longitude 47° 00’ W. e altitude de 570 m).

3.1 Sala climatizada

A sala climatizada foi mantida com temperatura média de 23 ± 2 °C, umidade relativa de 50 % e fotoperíodo de 12 horas, com a iluminação fornecida por cinco lâmpadas fluorescentes e cinco lâmpadas luz do dia (Acrolux[®]) 20000 lux por bloco (Figura 1).



Figura 1. Sala climatizada onde foram mantidas as caixas plásticas contendo as mudas de eucalipto submetidas aos tratamentos de altas concentrações de CO₂.

O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com cinco repetições, contendo quatro concentrações de CO₂: 390 $\mu\text{mol mol}^{-1}$, 405 $\mu\text{mol mol}^{-1}$, 520 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ e 700 $\mu\text{mol mol}^{-1}$. Cada parcela foi constituída por uma caixa plástica (20 x 32 x 32 cm) fechada por uma lâmina de vidro.

Para obter as concentrações de CO₂ no interior da caixa foram realizadas injeções de CO₂ puro proveniente de um cilindro de 25 quilogramas do gás liquefeito. A partir do cilindro, o gás passa pelo manômetro de controle de volume e pressão e por uma válvula solenóide, segue em direção a um fluxômetro, o qual regula a vazão de CO₂. Em seguida, este gás é conduzido para o interior das caixas contendo as plantas, através da passagem por um divisor, do qual saem tubos de igual comprimento. A abertura da válvula solenóide foi ajustada para abrir 0,5 segundo a cada 50 minutos. Para homogeneizar o CO₂ no interior da caixa foi utilizado um compressor programado para ligar por 15 minutos e desligar por 15 minutos, injetando ar externo à sala, através de um tubo, para dentro das caixas.

Dois tratamentos testemunha foram utilizados, um consistindo de caixas com concentração de 390 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO₂, sem injeção de ar e sem injeção de CO₂ (Figura 2A) e outro, com caixas que recebiam injeção de ar e sem injeção de CO₂ totalizando

aproximadamente $405 \mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO_2 (Figura 2B). Os demais tratamentos consistiam de diferentes concentrações de CO_2 : $520 \mu\text{mol mol}^{-1}$, com injeção de ar e de CO_2 , através de um tubo (Figura 2C) e $700 \mu\text{mol mol}^{-1}$, com injeção de ar e de CO_2 , através de dois tubos de CO_2 (Figura 2D). As concentrações de CO_2 das caixas foram monitoradas com uso de um analisador de gás infravermelho (IRGA), marca Vaisalla, modelo 343.



Figura 2. Caixas plásticas contendo mudas dos clones de eucalipto submetidas ao tratamento com aumento da concentração de CO_2 . (A) $390 \mu\text{mol mol}^{-1}$, (B) $405 \mu\text{mol mol}^{-1}$, (C) $520 \mu\text{mol mol}^{-1}$ e (D) $700 \mu\text{mol mol}^{-1}$.

As mudas foram produzidos por miniestaquia, em tubetes plásticos cônicos (50 ml de capacidades) contendo substrato à base de *Pinus*. No primeiro experimento, para as análises não destrutivas, utilizaram-se oito mudas por caixa plástica, sendo quatro mudas de cada clone. Para o segundo experimento, de análises destrutivas, o número de mudas utilizadas foi doze, sendo seis de cada clone.

3.2 Estufa de topo aberto

As estufas de topo aberto (OTCs) utilizadas no experimento possuem formato circular, estrutura de perfilados perfurados de 1,5 m de comprimento (galvanização eletrolítica, chapa 22), dos quais 0,6 m encontravam-se enterrados no solo. As laterais das OTCs apresentavam filmes de polietileno transparente de espessura de 150 μm , os quais ofereciam proteção contra raios ultravioleta (Figura 3).



Figura 3. Estufas de topo aberto (OTCs).

A transferência do CO₂ puro contido no cilindro de 25 quilos para os OTCs ocorre do seguinte modo: inicialmente, o gás passa pelo manômetro de controle de volume e pressão, em direção a um tubo de cobre com 5 mm de diâmetro, enterrado 15 cm no solo, até um controlador de fluxo, que regula a quantidade de CO₂ distribuído em cada parcela.

As parcelas sem injeção de CO₂ e semelhantes à descrita foram utilizadas para comparação das condições atmosféricas atuais. Adicionalmente, utilizaram-se parcelas controle, sem nenhuma estrutura de OTCs, a fim de verificar o efeito da estrutura sobre as plantas. Do mesmo modo que na sala climatizada, as concentrações de CO₂ foram monitoradas diariamente, com analisador de gás infravermelho (IRGA).

Assim como na sala climatizada, nas OTCs utilizou-se o delineamento experimental casualizado em blocos, com três repetições e três concentrações de CO₂: 399 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ (controle, sem estufa e sem injeção de CO₂), 412 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ (controle com estufa e sem injeção de CO₂) e 508 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ (estufa com injeção de CO₂). O experimento foi conduzido entre o período de agosto a novembro de 2010, época do ano mais favorável a *Puccinia psidii* (Figura 4). O plantio das mudas foi realizado em parcelas de 1,9 m de diâmetro. As parcelas foram constituídas por 34 plantas (17 de cada clone).

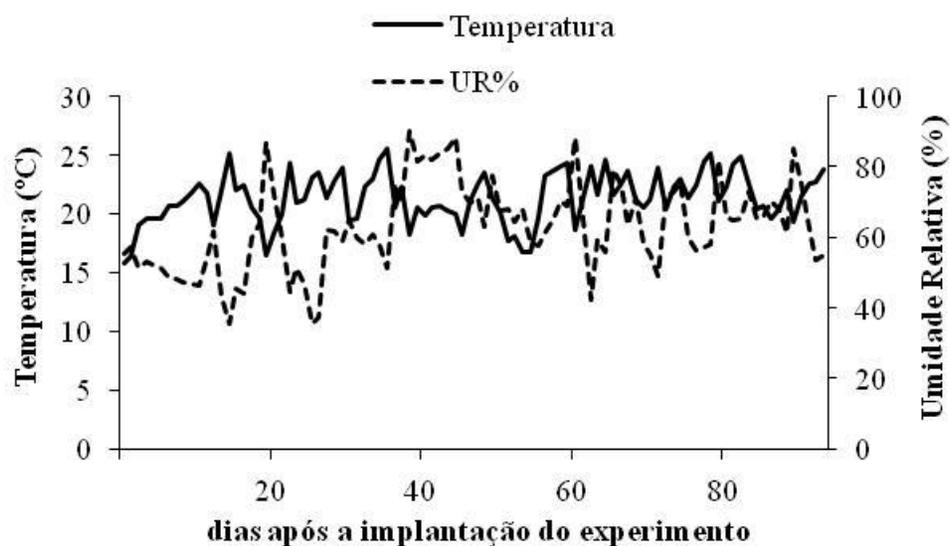


Figura 4. Temperatura do ar (°C) e umidade relativa do ar (%) em OTC.

3.3 Condução da cultura

Foram utilizados nos experimentos dois clones de eucalipto: um híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *E. camaldulensis* (VM 01) e a espécie *E. urophylla* (MN 463). As mudas do híbrido VM 01 e da espécie MN 463 foram cedidas pela empresa V;M Florestal Ltda.

Para os experimentos na sala climatizada, aos 45 dias após estaquia, os tubetes foram transferidos para as caixas plásticas contendo diferentes concentrações de CO₂. A fim de padronizar as mudas, as mesmas foram submetidas a podas, deixando-as com dois pares de folhas. No interior das caixas plásticas foram colocados quatro litros de vermiculita de granulação média, para manter a umidade e sustentar os tubetes. Durante a realização do experimento, a cada dois dias, foram feitas adubações com 2 ml por tubete com solução nutritiva contendo nitrato de cálcio: 750 g 1000 L⁻¹; nitrato de potássio: 500 g 1000 L⁻¹; monoamônio fosfato: 150 g 1000 L⁻¹; sulfato de magnésio: 400 g 1000 L⁻¹; ferro quelatado: 13,8 g 1000 L⁻¹; ácido bórico: 1,5 g 1000 L⁻¹; sulfato de manganês: 1,5 g 1000 L⁻¹; sulfato de zinco: 0,5 g 1000 L⁻¹; sulfato de cobre: 0,15 g 1000 L⁻¹ e molibdato de sódio: 0,15 g 1000 L⁻¹, produzida pela Qualifertil Comércio e Representações Ltda, cuja condutividade elétrica foi ajustada para 2,3 dS m⁻¹.

Para o experimento das OTCs, o plantio das mudas foi realizado aos 60 dias após estaquia. A adubação foi realizada a cada 15 dias com 25 g de cloreto de potássio, 10 g de cloreto de cálcio, 6 g de monoamônio fosfato e 5 g de sulfato de amônio, dissolvidos em 12 L de água, suficientes para 500 mudas. O sistema de irrigação por gotejamento foi acionado manualmente, conforme as necessidades das plantas.

3.4 Obtenção do inóculo de *Puccinia psidii*

Urediniósporos de *Puccinia psidii* foram coletados com auxílio de pincel n°4, a partir de folhas lesionadas de plantas de *Eucalyptus grandis* e multiplicados em plantas de jameiro (*Syzygium jambo* (L.) Alston). A suspensão de urediniósporos foi preparada em água destilada contendo Tween 80 (0,05 %) e calibrada em câmara de Neubauer na concentração de 2×10^4 urediniósporos mL^{-1} . A suspensão foi mantida sob constante agitação, com uso de um agitador magnético para homogeneização. A Figura 5 abaixo esquematiza os processos de obtenção e germinação dos urediniósporos de *Puccinia psidii*.

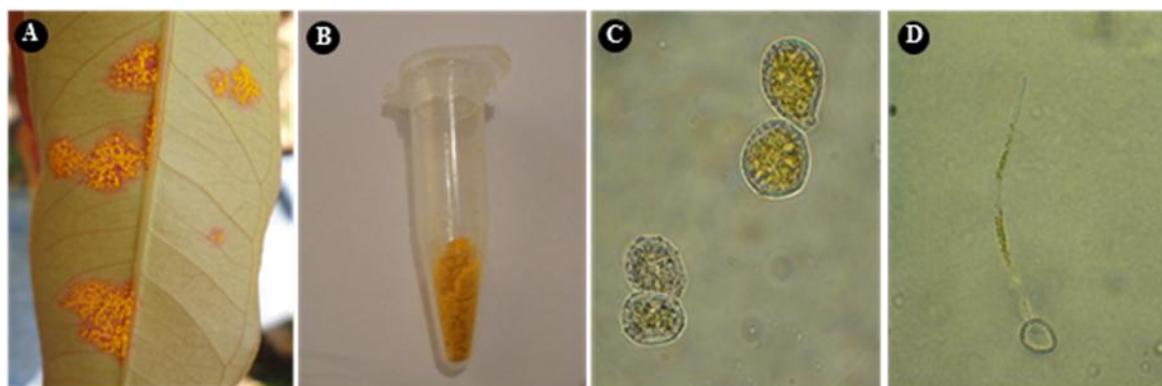


Figura 5. Obtenção e germinação dos urediniósporos de *Puccinia psidii*. Pústulas contendo urediniósporos em folha de jameiro (A), esporos de *P. psidii* em microtubos tipo “ependorf” (B), urediniósporos em suspensão (C), germinação de um urediniósporo com formação do tubo germinativo (D).

3.5 Inoculação

O método de inoculação utilizado foi a pulverização em ambas as faces das folhas ao final da tarde, com auxílio de pulverizador manual de capacidade de 0,5 L.

Após a inoculação, as plantas foram mantidas em câmara úmida durante 12 horas no escuro. Essa condição é necessária para que ocorra germinação, uma vez que a *Puccinia psidii* germina no escuro e sob alta umidade.

A inoculação das plantas em todas as parcelas foi realizada aos 68 e 62 dias após a implantação do experimento em sala climatizada e nas OTCs, respectivamente.

3.6 Avaliações realizadas

3.6.1 Quantificação da área lesionada por ferrugem através de análise de imagem

A fim de determinar a porcentagem de área lesionada nas folhas de eucalipto, presentes na sala climatizada e nas OTCs, utilizou-se o software ASSESS 2.0 (American Phytopathological Society, St. Paul, MN, USA), de análise de imagem para quantificação de doenças de plantas; a partir de fotografias, em fundo contrastante, das folhas lesionadas (Figura 6).

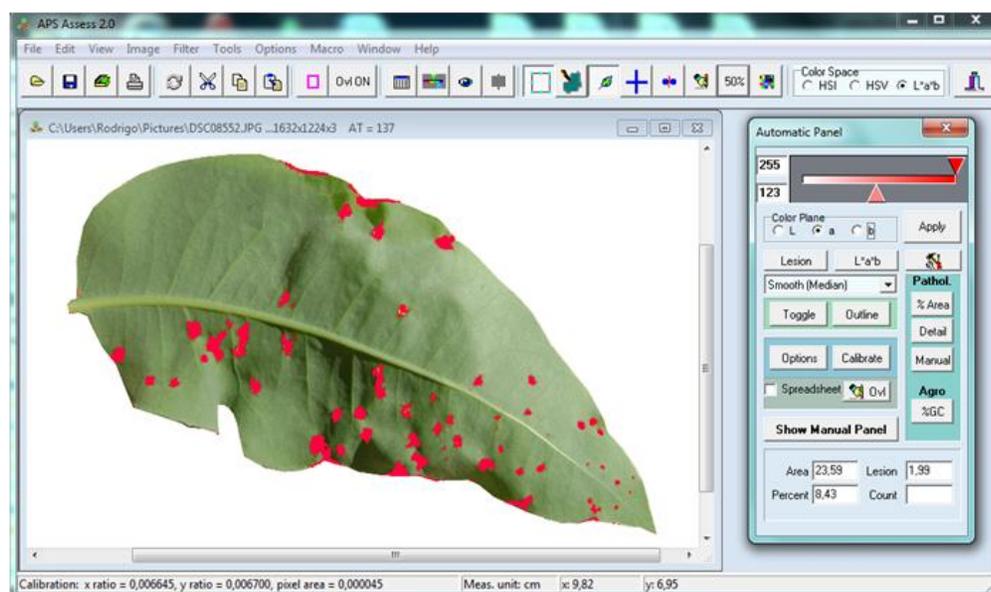


Figura 6. Imagem fornecida pelo software ASSESS 2.0 mostrando a área de uma folha de eucalipto lesionada por ferrugem.

A ferrugem do eucalipto foi avaliada em um único ciclo aos 11, 14 e 17 dias após a inoculação (d.a.i.) para o experimento em sala climatizada e aos 14, 17 e 20

d.a.i. para o experimento nas OTCs, em quatro plantas de cada clone por tratamento, no segundo e terceiro par de folhas de ramos previamente marcados (SOUZA, 2008), em amostras não destrutivas. O índice médio da porcentagem de área lesionada foi transformado em área abaixo da curva de progresso da doença da área lesionada (AACPDal).

3.6.2 Quantificação de pústulas, uredínias e esporos de *Puccinia psidii*

Para quantificar as pústulas, uredínias e esporos de *P. psidii*, foram avaliados em um único ciclo o segundo e terceiro pares de folhas aos 12, 15 e 18 d.a.i. e aos 15, 18 e 21 d.a.i. para sala climatizada e OTCs, respectivamente. Para avaliar o número médio de pústulas por folha e uredínias por área foliar (1,13 cm²), cada folha foi avaliada em microscópio estereoscópico. Para avaliação de número médio de esporos por uredínia, foram colocados quatro discos de área foliar de cada planta em um tubo de ensaio contendo 2 mL de água destilada e Tween 80 (0,1 %). Posteriormente, os tubos foram agitados em vortex por 5 minutos, realizando-se duas leituras, em câmara de Neubauer, por tubo (TEIXEIRA et al., 2005). As análises foram realizadas em duas plantas por parcela, com cinco repetições, em sala climatizada e quatro plantas por parcela, com três repetições, nas OTCs.

3.6.3 Determinação dos teores de carbono e nitrogênio

Para determinação dos teores de carbono (C) e nitrogênio (N) nas folhas, caule e raízes das plantas dos experimentos conduzidos na sala climatizada e nas OTCs, agrupou-se quatro plantas de cada clone, pertencentes a um mesmo tratamento, para se fazer uma amostra composta. Cada amostra composta foi seca em estufa de circulação forçada de ar, na temperatura de 50 °C, até atingirem peso constante. Depois de secas, as amostras foram trituradas em moinho de facas (peneira com abertura de malha de 2 mm) e moinho de bolas (peneira com abertura de malha de 0,42 mm). Em seguida, as amostras compostas foram analisadas quanto ao teor de C e N, através do método da combustão seca, em analisador elementar, do tipo TruSpec CHN (LECO[®]) no Laboratório de Solo e Água da Embrapa Meio Ambiente.

Após a calibração do aparelho foi colocado 0,2 g da amostra padrão BARLEY 502-277 ($C=45,20 \pm 0,28 \%$, $N=1,69 \pm 0,03 \%$, LOT=1007) e, em seguida, as mesmas quantidades das amostras a serem analisadas foram colocadas em um recipiente de estanho, o qual foi levado para combustão seca no analisador elementar. O equipamento utiliza o software TruSpec CN[®] para a apresentação dos resultados e subtrai os valores referentes à amostra “branco” (oxigênio, ar sintético e hélio), passada pelo equipamento para calibração, daqueles referentes às amostras analisadas (SANTOS, 2011). Adicionalmente, calculou-se a relação C/N em cada amostra composta, submetidas a cada tratamento.

3.6.4 Características de desenvolvimento do eucalipto

Foram avaliadas algumas características importantes do desenvolvimento do eucalipto, a fim de avaliar o efeito das diferentes concentrações de CO₂ sobre os clones. Dentre essas características, avaliou-se a altura, diâmetro, massa seca da parte aérea, massa seca das raízes e área foliar. Para a característica altura das plantas foram realizadas avaliações a cada quinze dias, determinando-se o comprimento das plantas do solo ou substrato até o ápice da haste principal e calculada a área abaixo da curva de progresso da altura (AACPA). Para medir o diâmetro da base dos caules das plantas foi utilizado um paquímetro digital. Para as avaliações de massa seca de parte aérea e das raízes, no final dos experimentos, as plantas foram lavadas para a remoção de sedimentos e, em seguida, foram secas até peso constante, em estufa de circulação forçada de ar, na temperatura de 50 °C e pesadas em balança semianalítica. Para a determinação da área foliar, avaliou-se o quarto par de folhas de seis plantas de cada clone, em scanner de área foliar LI-COR, modelo LI-3100 Area Meter, análises que foram destrutivas e realizadas ao final do experimento.

3.7 Teste de germinação *in vitro*

O fungo foi obtido de folhas de jambeiro lesionadas pela ferrugem e ajustou-se a suspensão para 2×10^4 urediniósporos mL⁻¹, como explicado anteriormente. Uma alíquota de 100 µL da suspensão foi colocada em placas de Petri (60 x 16 mm) contendo ágar-água (2 %) com estreptomicina e tetraciclina na concentração de 30 mg L⁻¹, cada. As placas

abertas foram mantidas no escuro, em sala climatizada, na temperatura de 20 ± 2 °C e acondicionadas em caixas plásticas contendo papel filtro umedecido e com quatro concentrações de CO₂ ($390 \mu\text{mol mol}^{-1}$, $405 \mu\text{mol mol}^{-1}$, $520 \mu\text{mol mol}^{-1}$ e $700 \mu\text{mol mol}^{-1}$) (Figura 7), com três placas sem a tampa por parcela e cinco repetições. Após 3, 6, 9, 12 e 24 horas foi colocada uma gota de lactofenol por placa, para paralisar a germinação, e avaliou-se a germinação de 100 esporos em microscópio ótico. Considerou-se germinado o esporo com comprimento do tubo germinativo maior que seu diâmetro (PRITCHARD; BELL, 1967).



Figura 7. Teste de germinação de urediniósporos de *Puccinia psidii*, *in vitro*, em sala climatizada.

3.8 Análise estatística

Os experimentos foram instalados em delineamento em blocos casualizados (DBC). Foi realizada análise de variância para comparar o efeito de diferentes concentrações de CO₂ sobre a ferrugem do eucalipto e sobre o desenvolvimento das mesmas, por meio do teste de Tukey, a 5 % de probabilidade. Os dados foram analisados pelo programa estatístico SISVAR[®] versão 5.3.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados do presente trabalho possibilitaram avaliar o efeito do aumento da concentração de CO₂ do ar sobre a ferrugem do eucalipto, bem como no desenvolvimento das plantas. Esse efeito foi avaliado com diferentes concentrações de CO₂, em sala climatizada (390, 405, 520 e 700 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO₂) e em OTC (399, 412 e 508 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO₂), avaliando-se a área lesionada, número de lesões, quantidade de uredínias e esporos, além dos teores de carbono e nitrogênio e outros parâmetros relacionados ao desenvolvimento das plantas.

4.1 Efeito do aumento da concentração de CO₂ do ar sobre a ferrugem em mudas clonais de eucalipto

4.1.1 Quantificação da área lesionada por ferrugem por meio de análise de imagem

Os resultados referentes ao efeito do aumento da concentração de CO₂ sobre a ferrugem do eucalipto, utilizando o método de análise de imagem das lesões da doença revelaram que no clone VM 01, tanto em sala climatizada (Figura 8), quanto em OTCs (Figura 9), a área lesionada das folhas foi menor em altas concentrações de CO₂. A análise da área abaixo da curva de progresso da doença da área lesionada (AACPDal) em sala climatizada

mostrou que esta foi significativamente menor nas concentrações de 520 e 700 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ que nas concentrações de 390 e 405 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ (Figura 8). Adicionalmente, é importante considerar que entre as duas menores (390 e 405 $\mu\text{mol mol}^{-1}$) e maiores concentrações (520 e 700 $\mu\text{mol mol}^{-1}$) não foram observadas diferenças estatísticas significativas.

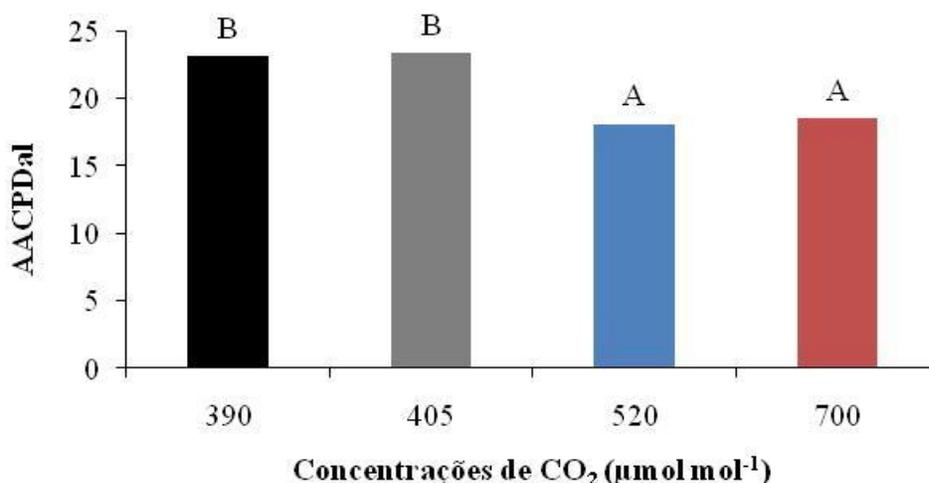


Figura 8. Área abaixo da curva de progresso da doença da área lesionada (AACPDal) de *Puccinia psidii* no clone VM 01 (híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *E. camaldulensis*), cultivado em diferentes concentrações de CO₂ (390 $\mu\text{mol mol}^{-1}$, 405 $\mu\text{mol mol}^{-1}$, 520 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ e 700 $\mu\text{mol mol}^{-1}$) em sala climatizada. Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5 % de probabilidade.

Analizando-se os resultados obtidos por meio da análise da área abaixo da curva de progresso da doença da área lesionada (AACPDal) em OTC, ainda referentes ao clone VM 01, observou-se redução significativa na AACPDal na concentração de 508 $\mu\text{mol mol}^{-1}$, a maior concentração avaliada. Entretanto, entre as duas menores concentrações analisadas (399 e 412 $\mu\text{mol mol}^{-1}$), não houve diferença significativa (Figura 9), confirmando que a estrutura da OTC não influenciou os resultados da análise de AACPDal, uma vez que as plantas submetidas à concentração de 399 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO₂ não foram mantidas em uma estrutura de OTC.

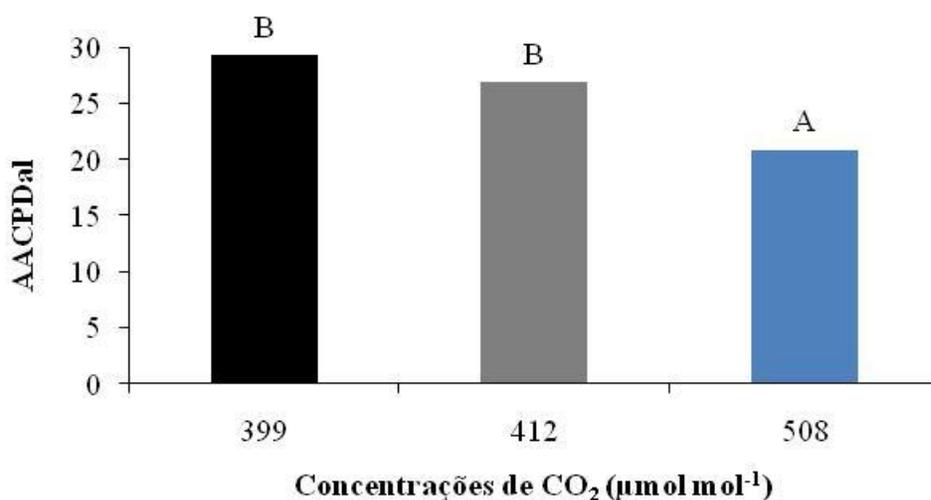


Figura 9. Área abaixo da curva de progresso da doença da área lesionada (AACPDal) de *Puccinia psidii* no clone VM 01 (híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *E. camaldulensis*), cultivado em diferentes concentrações de CO₂ (399 μmol mol⁻¹, 412 μmol mol⁻¹ e 508 μmol mol⁻¹) em OTC. Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5 % de probabilidade.

Para o clone MN 463, entretanto, não foram observadas lesões e resposta de hipersensibilidade de *P. psidii*, impossibilitando a análise da AACPDal.

Já foi demonstrado que o aumento da concentração de CO₂ na atmosfera pode influenciar diretamente nos processos fisiológicos da fotossíntese, respiração e transpiração das plantas (CHMURA et al., 2011) e que fungos biotróficos, como o agente etiológico da doença em estudo, têm um longo período de interação fisiológica com o hospedeiro, nutrindo-se de células vivas (SCHUMMANN; D' ARCY, 2006). A influência direta do CO₂ na fisiologia das plantas altera o crescimento destas e pode também alterar a colonização do patógeno biotrófico nos tecidos do hospedeiro (EASTBURN et al., 2011), conforme observado no presente trabalho, uma vez que os resultados aqui apresentados confirmam a ocorrência de uma alteração no processo de colonização de *P. psidii* nas folhas de eucalipto, como revelam os resultados da AACPDal, para ambos os experimentos (sala climatizada e OTC).

McElrone et al. (2005), ao estudar o efeito do aumento da concentração de CO₂ no patossistema *Acer rubrum* x *Phyllosticta minima*, observaram redução significativa da área lesionada em 35 %, 50 % e 10 % em três anos consecutivos de

avaliação das plantas submetidas à concentração de 200 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ acima da concentração ambiente, em experimento em Duke FACE (“Free Air Carbon Dioxide Enrichment”). Esses resultados corroboram com os resultados de AACPDal do presente trabalho (Figuras 8 e 9).

A redução da lesão de *Colletotrichum gloeosporioides* também foi verificada em plantas de *Stylosanthes scabra* em concentrações elevadas de CO_2 (700 $\mu\text{mol mol}^{-1}$) quando comparada à concentração de 350 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO_2 (PANGGA et al., 2004). Do mesmo modo, em experimento de SoyFACE, EASTBURN et al. (2010) observaram reduções significativas na severidade da *Peronospora manshurica* em soja, entre 39 e 66 % nos três anos de estudo, em concentrações elevadas de CO_2 (550 $\mu\text{mol mol}^{-1}$).

Entretanto, o trabalho realizado por McElrone et al. (2010), comparando o ambiente (385 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO_2) com altas concentrações desse gás (586 $\mu\text{mol mol}^{-1}$), demonstra o aumento da área lesionada de *Cercospora liquidambaris* e *C. cercidicola* em *Liquidambar styraciflua* e *Cercis canadensis*, respectivamente, indicando que esse efeito pode ser bastante variável, de acordo com o patossistema; possivelmente porque, conforme já foi demonstrado, o ambiente pode influenciar tanto a suscetibilidade da planta hospedeira quanto a multiplicação, a sobrevivência e as atividades do patógeno. Ainda com relação a essas observações, é válido ressaltar que os efeitos poderão ser também contrários nas diversas fases do ciclo de vida do patógeno e da cultura (COAKLEY; SCHERM, 1996).

4.1.2 Quantificação de pústulas, uredínias e esporos de *Puccinia psidii*

A partir da análise do efeito do aumento da concentração de CO_2 sobre o número de pústulas, uredínias e esporos de *Puccinia psidii*, realizada em clone VM01 (já que no clone MN 463 não houve esporulação), feitas aos 12, 15 e 18 d.a.i. em sala climatizada e aos 15, 18 e 21 d.a.i. em OTCs, foi possível observar tendências semelhantes ao longo do período analisado (Figuras 10 e 11).

Com relação ao número de pústulas por folha, pode-se observar redução significativa em plantas submetidas às concentrações de 520 e 700 $\mu\text{mol mol}^{-1}$, aos 15 e 18 d.a.i., em sala climatizada (Figura 10A). Conforme esperado, os resultados da análise do número de uredínias (Figura 10B) foram semelhantes aos relativos ao número de pústulas, observando-se redução significativa nas maiores concentrações de CO_2 (520 e 700 $\mu\text{mol mol}^{-1}$

¹). Entretanto, para a análise do número de pústulas (Figura 10A) e esporos (Figura 10C) aos 12 d.a.i., concentrações maiores ou menores de CO₂, não foram fatores limitantes para essa variável, uma vez que não foram observadas diferenças significativas para esse tempo, nas diferentes concentrações de CO₂. Ainda com relação às análises do número de esporos por uredínia, em plantas submetidas às concentrações de 520 e 700 μmol mol⁻¹ de CO₂, aos 15 e 18 d.a.i., observou-se uma menor quantidade de esporos.

Adicionalmente, conforme observado para análise da AACPDal, para as outras três variáveis analisadas (Figuras 10A, B, C) não houve diferença significativa entre as duas menores e as duas maiores concentrações de CO₂ entre si, nos tempos analisados, exceto para o tempo 18 d.a.i., com relação ao número de esporos por uredínia (Figura 10C).

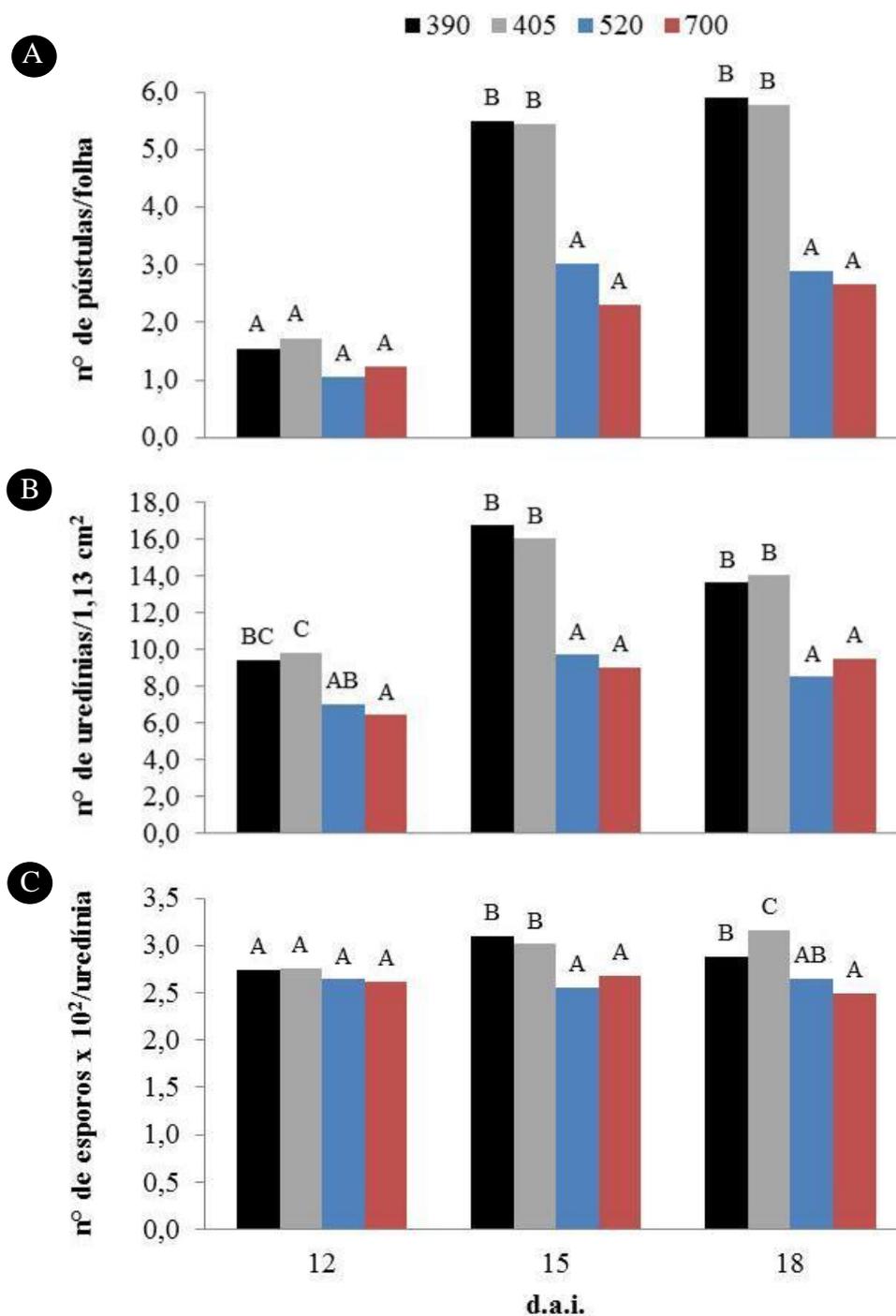


Figura 10. Número médio de pústulas por folha (A), número médio de uredínias por discos de área foliar (1,13 cm²) (B) e número médio de esporos por uredínias (C) de *Puccinia psidii* no clone VM 01 (híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *E. camaldulensis*) aos 12, 15 e 18 dias após a inoculação (d.a.i.), cultivado em diferentes concentrações de CO₂ (390 µmol mol⁻¹, 405 µmol mol⁻¹, 520 µmol mol⁻¹ e 700 µmol mol⁻¹) em sala climatizada. Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5 % de probabilidade.

Avaliando-se os resultados obtidos pela análise do número de pústulas por folha (Figura 11A), número de uredínias por área (Figura 11B) e número de esporos por uredínia (Figura 11C), foi observada uma redução significativa de todas essas variáveis, na concentração de $508 \mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO_2 , em todos os tempos avaliados. Entre as duas outras concentrações de CO_2 avaliadas (399 e $412 \mu\text{mol mol}^{-1}$), não houve diferenças significativas entre os tempos analisados para o número de pústulas por folha e número de uredínias por área, exceto para o número de esporos por uredínia, aos 15 d.a.i., onde observou-se menor número de esporos por uredínia sobre influência da concentração de $412 \mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO_2 (Figura 11C).

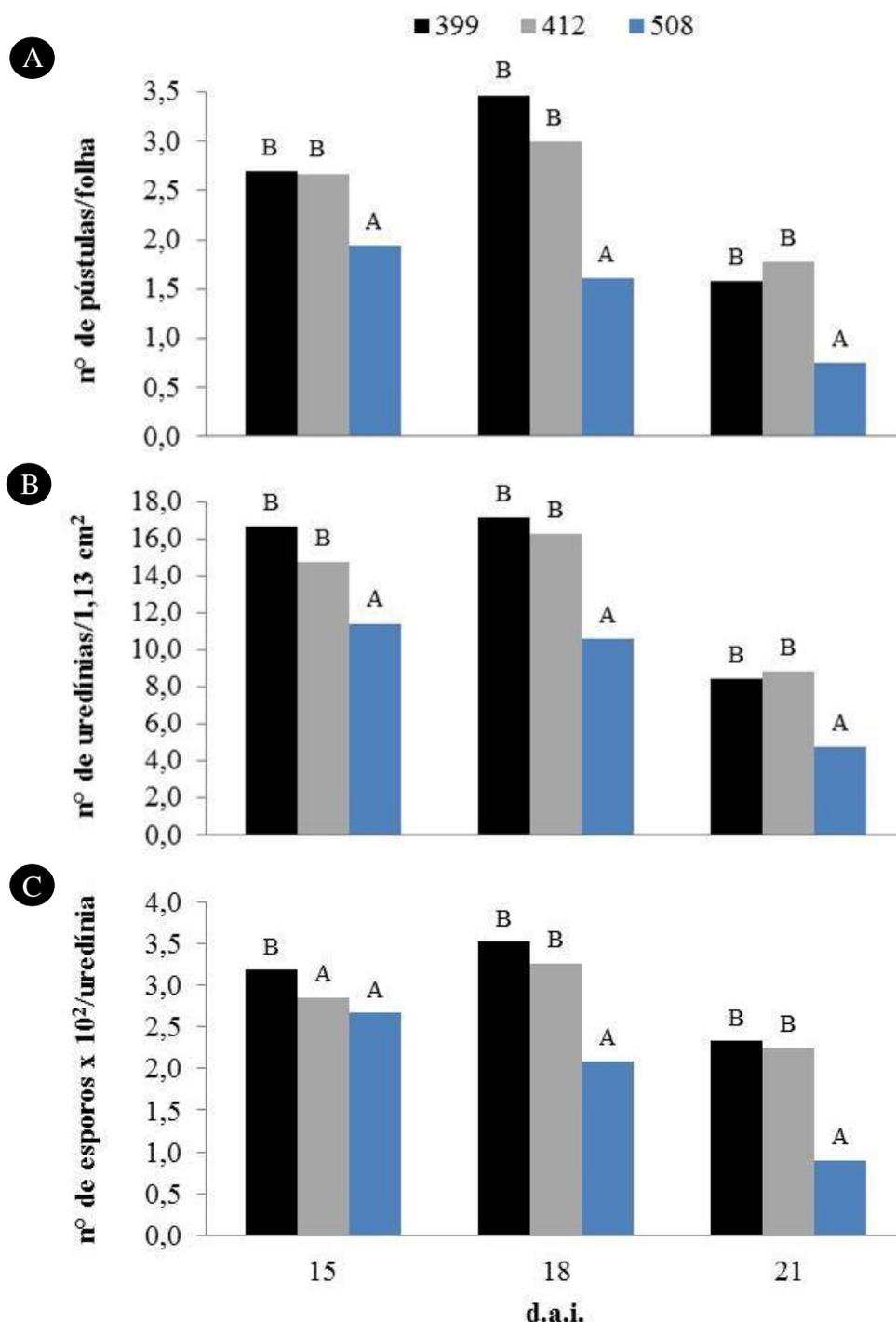


Figura 11. Número médio de pústulas por folha (A), número médio de uredínias por discos de área foliar (1,13 cm²) (B) e número médio de esporos por uredínias (C) de *Puccinia psidii* no clone VM 01 (híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *E. camaldulensis*), 15, 18 e 21 dias após a inoculação (d.a.i.), cultivado em diferentes concentrações de CO₂ (399 μmol mol⁻¹, 412 μmol mol⁻¹ e 508 μmol mol⁻¹) em OTC. Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5 % de probabilidade.

Estudo semelhante foi realizado por Santos (2011), no qual se verificou que o aumento da concentração de CO₂ resultou na diminuição da incidência e severidade da murcha de *Ceratocystis* em mudas clonais de *Eucalyptus urophylla* x *E. camaldulensis* e de *E. urophylla*.

Em trabalho realizado por Runion et al. (2010), mudas de *Pinus taeda* e *Quercus rubra* inoculadas com *Cronartium quercuum* f.sp. *fusiforme* se beneficiaram com o aumento da concentração de CO₂ (720 μmol mol⁻¹), que resultou em menor incidência da doença, quando comparadas às plantas submetidas à concentração de CO₂ presente no ambiente (365 μmol mol⁻¹), conforme também foi observado nesse trabalho.

Hibberd et al. (1996), em estudo sobre o efeito do aumento da concentração de CO₂ sobre o oídio em cevada, também observaram redução da incidência da doença. Segundo os autores, devido às mudanças ocorridas nas folhas do hospedeiro (aumento do acúmulo de ceras cuticulares e papilas) nos locais de penetração do fungo, que atuaram como barreiras físicas ao desenvolvimento do patógeno. Segundo Runion et al. (2010), a incidência da doença é controlada, em grande parte, pelo crescimento do hospedeiro. O crescimento da planta em maiores concentrações de CO₂ deve fornecer maior área de superfície para a infecção, tanto de patógenos obrigatórios quanto facultativos. Entretanto, se a planta apresentar condições nutricionais adequadas, a capacidade de resistir à infecção por patógenos pode ser aumentada. Resultados de maior desenvolvimento das mudas de eucalipo sobre o aumento da concentração de CO₂ foram observados nesse trabalho e essas mudas apresentaram menor número médio de pústulas por folha, número médio de uredínias por discos de área foliar e número médio de esporos por uredínias de *Puccinia psidii* (Figuras 10 e 11), além de menor AACPDal (Figuras 8 e 9), possivelmente em função da maior capacidade de resistência à doença, referida por Runion et al. (2010), uma vez que as plantas receberam quantidades adequadas de água e nutrientes.

4.2 Determinação dos teores de carbono e nitrogênio em mudas clonais de eucalipto

Em plantas do clone MN 463 não foi observada influência das maiores concentrações de CO₂ sobre os teores de carbono e nitrogênio e relação C/N para folhas, caule e raízes. Entretanto, nas raízes, houve uma redução nos teores de N em função do aumento da

concentração de CO₂ (Tabela 1). O clone VM 01, por sua vez, apresentou teores reduzidos de nitrogênio e aumento na relação C/N em folhas, caule e raízes, em função do aumento das concentrações do CO₂. Entretanto, para os teores de carbono, não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos.

Comparando-se clones VM 01 e MN 463, pode-se observar maior teor de carbono em folhas do clone MN 463, em todas as concentrações de CO₂ avaliadas (Tabela 1).

Tabela 1. Teores de carbono, nitrogênio e relação C/N nas folhas, caule e raízes nos clones VM 01 (híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *E. camaldulensis*) e MN 463 (*E. urophylla*) em diferentes concentrações de CO₂ (390 μmol mol⁻¹, 405 μmol mol⁻¹, 520 μmol mol⁻¹ e 700 μmol mol⁻¹) em sala climatizada.

Concentrações de CO ₂ (μmol mol ⁻¹)	Nitrogênio (g kg ⁻¹)		Carbono (g kg ⁻¹)		Relação C/N	
	Clones					
	VM 01	MN 463	VM 01	MN 463	VM 01	MN 463
Folhas						
390	25,84 bcA	26,79 aA	491,60 aA	503,40 aB	19,20 abB	18,91 aA
405	27,00 cA	25,15 aA	488,80 aA	503,80 aB	18,16 aA	20,22 aA
520	24,00 abA	25,88 aA	493,20 aA	506,00 aB	20,69 bcA	19,65 aA
700	22,60 aA	25,84 aB	493,30 aA	503,80 aB	21,86 cB	19,55 aA
CV (%)	6,81		0,93		7,14	
Caule						
390	10,13 bA	10,44 aA	469,00 aA	469,20 aA	46,91 aA	45,81 aA
405	10,29 bA	9,34 aA	467,40 aA	472,60 aA	45,70 aA	52,13 aA
520	8,81 abA	9,99 aA	466,60 aA	471,40 aA	53,64 abA	47,89 aA
700	8,39 aA	9,40 aA	467,00 aA	471,60 aA	56,18 bA	50,63 aA
CV (%)	10,02		0,89		10,08	
Raízes						
390	12,20 bA	12,01 bA	474,40 aA	479,60 aB	39,35 abA	40,11 aA
405	12,16 bB	11,12 abA	473,20 aA	477,20 aB	39,08 aA	43,15 aB
520	10,86 aA	11,17 abA	475,80 aA	477,40 aA	43,91 bcA	43,90 aA
700	9,99 aA	10,69 aA	477,40 aA	477,60 aA	47,90 cA	44,72 aA
CV (%)	6,52		0,63		6,37	

Médias seguidas pela mesma letra, minúsculas nas colunas (concentração de CO₂), e maiúsculas nas linhas (clones), não diferem significativamente pelo teste de Tukey, ao nível de 5 % de probabilidade.

No experimento realizado em OTC, com o aumento da concentração de CO₂ verificou-se redução dos teores de nitrogênio em folhas, caule e raízes, em ambos os clones (Tabela 2). Entretanto, do mesmo modo observado no experimento realizado em sala climatizada, o aumento da concentração de CO₂ não influenciou os teores de carbono das plantas avaliadas em OTC, quando comparadas com plantas controle. Em ambos os clones houve redução da relação C/N em folhas, em função do aumento da concentração de CO₂, contrastando com o observado para o experimento realizado em sala climatizada.

De maneira oposta ao ocorrido em folhas, em caule e raízes houve aumento da relação C/N de ambos os clones, sendo este significativo em caules do clone MN 463, na concentração de 412 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ e raízes do clone VM 01, na concentração de 508 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ (Tabela 2).

Tabela 2. Teores de carbono, nitrogênio e relação C/N nas folhas, caule e raízes nos clones VM 01 (híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *E. camaldulensis*) e MN 463 (*E. urophylla*) em diferentes concentrações de CO₂ (399 $\mu\text{mol mol}^{-1}$, 412 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ e 508 $\mu\text{mol mol}^{-1}$) em OTC.

Concentrações de CO ₂ ($\mu\text{mol mol}^{-1}$)	Nitrogênio (g kg ⁻¹)		Carbono (g kg ⁻¹)		Relação C/N	
	Clones					
	VM 01	MN 463	VM 01	MN 463	VM 01	MN 463
Folhas						
399	25,30 bA	26,79 bA	501,83 aA	502,83 aA	24,29 cA	21,70 bA
412	22,63 abA	23,23 aA	501,00 aA	502,67 aA	22,16 bA	21,25 bA
508	20,51 aB	23,58 aA	498,00 aA	500,00 aA	19,91 aB	18,85 aA
CV(%)	5,78		0,51		5,16	
Caule						
399	3,45 bA	4,00 bB	479,50 aA	468,33 aA	141,55 aB	118,47 aA
412	2,88 aA	3,09 aA	463,33 aA	474,67 aA	162,25 aA	153,95 bA
508	2,89 aA	3,52 abB	478,00 aA	458,33 aB	165,42 aB	132,31 abA
CV(%)	12,80		2,27		11,94	
Raízes						
399	6,57 bA	6,36 bA	480,67 aB	474,67 aA	73,17 aA	75,60 aA
412	6,40 abB	5,78 aA	479,67 aA	474,00 aA	74,67 abA	82,33 bB
508	5,93 aA	5,86 aA	481,33 aA	478,33 aA	81,67 bA	81,67 bA
CV(%)	5,04		0,74		5,43	

Médias seguidas pela mesma letra, minúsculas nas colunas (concentração de CO₂), e maiúsculas nas linhas (clones), não diferem significativamente pelo teste de Tukey, ao nível de 5 % de probabilidade.

A diminuição dos teores de nitrogênio em ambientes com altas concentrações de CO₂ pode ser devida ao maior desenvolvimento das plantas e conseqüentemente, a um “efeito de diluição” do nitrogênio total (RUNION et al., 2010). Entretanto, segundo Makino (2003), a diminuição dos teores de nitrogênio foliar não é devido a esse “efeito de diluição” causado pelo aumento da área foliar ou biomassa da planta, mas pela alteração da alocação do nitrogênio na planta.

McElrone et al. (2005) também verificaram uma redução nos teores de nitrogênio e aumento da relação C/N em 20 %, quando plantas de *Acer rubrum* foram submetidas ao aumento da concentração de CO₂. Contudo, os resultados obtidos por Eastburn et al. (2010) e McElrone et al. (2010) não revelaram variações significativas nos teores de nitrogênio e da relação C/N entre a condição ambiente e o aumento da concentração de CO₂, indicando que as alterações químicas que ocorrem nas plantas sobre influência do aumento da concentração de CO₂, dependem de vários fatores, como a espécie estudada e o nível de exposição ao CO₂.

O impacto de níveis de nutrientes sobre o crescimento de *Eucalyptus grandis* por influência de concentrações elevadas de CO₂ foi analisado em um experimento em câmara de crescimento, desenvolvido por Conroy et al. (1992). Os resultados indicaram que o crescimento de *E. grandis* foi estimulado pelo aumento da concentração de CO₂ através de uma ampla gama de nitrogênio e disponibilidade de fósforo, e que o grau da estimulação do crescimento era dependente dos níveis de nutrientes.

4.3 Efeito do aumento da concentração de CO₂ do ar sobre o desenvolvimento de mudas clonais de eucalipto

As mudas de ambos os clones apresentaram maior porte, desenvolvimento e volume de raiz, quando submetidas ao aumento da concentração de CO₂, sendo que o desenvolvimento das mudas foi visualmente proporcional ao aumento da concentração de CO₂ (Figura 12).



Figura 12. Desenvolvimento das mudas de eucalipto dos clones VM 01 (híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *E. camaldulensis*) (A) e MN 463 (*E. urophylla*) (B), submetidos a diferentes concentrações de CO₂ em sala climatizada.

Os resultados do trabalho de Duff et al. (1994), estudando o efeito do aumento da concentração de CO₂ sobre o desenvolvimento de *Eucalyptus tetradonta*, revelaram que plantas submetidas à concentração de 700 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO₂ apresentaram um aumento significativo na biomassa total, altura, raiz, massa seca e área foliar, de modo semelhante ao observado no presente estudo (Figura 12). Pangga et al. (2004) também observaram que plantas de *Stylosanthes scabra* submetidas ao aumento da concentração de CO₂ (700 $\mu\text{mol mol}^{-1}$) apresentaram aumento da altura, número de ramos, biomassa e área foliar, entre 18 e 39 % maior que na concentração de 350 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO₂, resultados similares aos observados neste estudo.

4.3.1 Altura das plantas de eucalipto

Em função do aumento da concentração de CO₂, houve incremento na altura das plantas de ambos os clones, tanto no experimento realizado em sala climatizada (Tabela 3), quanto em OTC (Tabela 4). Em sala climatizada, esse acréscimo em plantas submetidas a injeções de CO₂ (520 e 700 μmol mol⁻¹) foi 17 % e 19 % significativamente maior nos clones VM 01 e MN 463, respectivamente, que em plantas controle (submetidas a 390 e 405 μmol mol⁻¹), sendo importante observar que a altura não variou significativamente entre as duas maiores concentrações do gás (Tabela 3).

Tabela 3. Área abaixo da curva de progresso da altura (AACPA) nos clones VM 01 (híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *E. camaldulensis*) e MN 463 (*E. urophylla*) em diferentes concentrações de CO₂ (390 μmol mol⁻¹, 405 μmol mol⁻¹, 520 μmol mol⁻¹ e 700 μmol mol⁻¹) em sala climatizada.

Clones	Concentrações de CO ₂ (μmol mol ⁻¹)				Média
	390	405	520	700	
VM 01	888,96 aA	937,43 aA	1066,76 bA	1072,16 bA	991,33 A
MN 463	905,96 aA	857,21 aB	1053,63 bA	1045,86 bA	965,67 A
Média	897,46 a	897,32 a	1060,19 b	1059,01 b	
CV(%)	8,42				

Médias seguidas pela mesma letra, minúsculas nas linhas, e maiúsculas nas colunas, não diferem significativamente pelo teste de Tukey, ao nível de 5 % de probabilidade.

Em experimento em OTC, com injeção de 508 μmol mol⁻¹ de CO₂, o acréscimo da altura em clones VM 01 e MN 463 foi significativamente maior, 17 % e 22 %, respectivamente, quando comparados às plantas controle. Diferentemente das análises em sala climatizada, em OTC, foi estudado o efeito de apenas uma concentração aumentada de CO₂ (508 μmol mol⁻¹). Além disso, como esperado, não houve diferença significativa da AACPA entre as plantas controle, confirmando novamente que a estrutura não influenciou as variáveis estudadas (Tabela 4).

Tabela 4. Área abaixo da curva de progresso da altura (AACPA) nos clones VM 01 (híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *E. camaldulensis*) e MN 463 (*E. urophylla*) em diferentes concentrações de CO₂ (399 μmol mol⁻¹, 412 μmol mol⁻¹ e 508 μmol mol⁻¹) em OTC.

Clones	Concentrações de CO ₂ (μmol mol ⁻¹)			Média
	399	412	508	
VM 01	2682,01 aA	2797,35 aA	3231,63 bA	2848,25 A
MN 463	2597,72 aA	2708,00 aA	3249,67 bA	2788,27 A
Média	2639,86 a	2752,68 b	3240,65 c	
CV (%)	12,94			

Médias seguidas pela mesma letra, minúsculas nas linhas, e maiúsculas nas colunas, não diferem significativamente pelo teste de Tukey, ao nível de 5 % de probabilidade.

Para a maioria das espécies de plantas, o aumento da concentração de CO₂ no ar promove uma elevação da fotossíntese (AMTHOR, 1995) e uma maior eficiência do uso da água, o que pode resultar em incremento no crescimento das plantas (ROGERS; DAHLMAN, 1993). De acordo com Malhi et al. (2002), a duplicação da concentração de CO₂ na atmosfera favorece o crescimento das árvores entre 10 % e 70 % e aumenta a produção de biomassa.

Chakraborty et al. (2000) observaram acréscimo de 10 % da altura em plantas de *Stylosanthes scabra* quando enriquecidas com CO₂ (700 μmol mol⁻¹).

4.3.2 Diâmetro das plantas de eucalipto

O Aumento da concentração de CO₂ no ar resultaram em aumento do diâmetro da base do caule em mudas de eucalipto, de ambos os clones, tanto em sala climatizada (Tabela 5), quanto em OTC (Tabela 6), ressaltando que esse aumento foi significativo, quando comparadas com as plantas controle (390 e 405 μmol mol⁻¹, em sala climatizada) e (399 e 412 μmol mol⁻¹, em OTC).

Tabela 5. Diâmetro da base do caule (mm) dos clones VM 01 (híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *E. camaldulensis*) e MN 463 (*E. urophylla*) em diferentes concentrações de CO₂ (390 $\mu\text{mol mol}^{-1}$, 405 $\mu\text{mol mol}^{-1}$, 520 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ e 700 $\mu\text{mol mol}^{-1}$) em sala climatizada.

Clones	Concentrações de CO ₂ ($\mu\text{mol mol}^{-1}$)				Média
	390	405	520	700	
VM 01	1,93 aA	1,96 aA	2,31 bA	2,32 bA	2,13 A
MN 463	1,96 aA	1,98 abA	2,16 bcA	2,25 cA	2,08 A
Média	1,94 a	1,97 a	2,23 b	2,28 b	
CV(%)	11,59				

Médias seguidas pela mesma letra, minúsculas nas linhas, e maiúsculas nas colunas, não diferem significativamente pelo teste de Tukey, ao nível de 5 % de probabilidade.

Tabela 6. Diâmetro da base do caule (mm) dos clones VM 01 (híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *E. camaldulensis*) e MN 463 (*E. urophylla*) em diferentes concentrações de CO₂ (399 $\mu\text{mol mol}^{-1}$, 412 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ e 508 $\mu\text{mol mol}^{-1}$) em OTC.

Clones	Concentrações de CO ₂ ($\mu\text{mol mol}^{-1}$)			Média
	399	412	508	
VM 01	6,97 aA	7,06 aA	8,71 bA	7,43 A
MN 463	7,03 aA	6,98 aA	8,91 bA	7,49 A
Média	7,00 a	7,02 a	8,81 b	
CV (%)	12,34			

Médias seguidas pela mesma letra, minúsculas nas linhas, e maiúsculas nas colunas, não diferem significativamente pelo teste de Tukey, ao nível de 5 % de probabilidade.

Runion et al. (2010) também observaram aumento significativo do diâmetro em mudas de *Pinus taeda* em ambientes com CO₂ elevado (720 $\mu\text{mol mol}^{-1}$). Do mesmo modo, Cheng (2009) observou aumento do diâmetro da base do caule em plantas de *Ulmus americana* e *Quercus rubra* submetidas a concentrações elevadas de CO₂ (540 $\mu\text{mol mol}^{-1}$), quando comparadas ao controle (360 $\mu\text{mol mol}^{-1}$). No trabalho realizado por Niu et al. (2011), foi observado aumento do diâmetro da raiz em plantas de *Arabidopsis thaliana* submetidas a concentração de 800 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO₂, quando comparadas às plantas controle (350 $\mu\text{mol mol}^{-1}$). Esse aumento do diâmetro da raiz observado pelos autores foi atribuído ao estímulo da sinalização de auxina, por influência do aumento das concentrações de CO₂ e que

concentrações adequadas de auxina endógena e de seus transportadores são fundamentais para a regulação do desenvolvimento da raiz induzida pelo aumento de CO₂. É possível que no presente estudo possa ter ocorrido aumento da sinalização desse hormônio, por influência do CO₂ aumentado, resultando em aumento do diâmetro do caule, em ambos os clones (Tabelas 5 e 6), e no maior desenvolvimento das plantas dos tratamentos com aumento de CO₂.

4.3.3 Área foliar de eucalipto

Os resultados obtidos pela análise da área foliar revelaram que o aumento da concentração de CO₂ no ar resultou em aumento da área foliar em ambos os clones de eucalipto (Tabelas 7 e 8).

Comparando-se plantas controle, submetidas às concentrações de 390 e 405 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO₂ com plantas com injeção de 520 e 700 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ desse gás, em sala climatizada foi observado um aumento significativo da área foliar de 188 % em plantas do clone VM 01 e 141 % em plantas do clone MN 463. Ao comparar clones relativos aos tratamentos com 520 e 700 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ foi observado que plantas do clone VM 01 apresentaram maior área foliar que aquelas relativas ao clone MN 463, diferindo-se significativamente (Tabela 7).

Tabela 7. Área foliar (cm²) das folhas dos clones VM 01 (híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *E. camaldulensis*) e MN 463 (*E. urophylla*) em diferentes concentrações de CO₂ (390 $\mu\text{mol mol}^{-1}$, 405 $\mu\text{mol mol}^{-1}$, 520 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ e 700 $\mu\text{mol mol}^{-1}$) em sala climatizada.

Clones	Concentrações de CO ₂ ($\mu\text{mol mol}^{-1}$)				Média
	390	405	520	700	
VM 01	4,52 aA	4,73 aA	13,52 bB	13,17 bB	8,98 B
MN 463	4,30 aA	4,73 aA	10,95 bA	10,85 bA	7,71 A
Média	4,41 a	4,73 a	12,23 b	12,01 b	
CV(%)	16,19				

Médias seguidas pela mesma letra, minúsculas nas linhas, e maiúsculas nas colunas, não diferem significativamente pelo teste de Tukey, ao nível de 5 % de probabilidade.

O mesmo tipo de análise descrito no item anterior foi realizada para o experimento em OTC, no qual observou-se aumento da área foliar em 25 % e 26 % para clones VM 01 e MN 463, respectivamente, no tratamento com injeção de 508 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO_2 , quando comparados aos controles. Conforme esperado e ocorrido em outras análises, plantas controle submetidas a 399 e 412 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ não diferiram significativamente entre si (Tabela 8).

Tabela 8. Área foliar (cm^2) das folhas dos clones VM 01 (híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *E. camaldulensis*) e MN 463 (*E. urophylla*) em diferentes concentrações de CO_2 (399 $\mu\text{mol mol}^{-1}$, 412 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ e 508 $\mu\text{mol mol}^{-1}$) em OTC.

Clones	Concentrações de CO_2 ($\mu\text{mol mol}^{-1}$)			Média
	399	412	508	
VM 01	22,57 aA	24,19 bB	29,17 cA	24,63 A
MN 463	23,38 aA	22,14 aA	28,75 bA	24,41 A
Média	22,97 a	23,17 a	28,96 b	
CV (%)	12,08			

Médias seguidas pela mesma letra, minúsculas nas linhas, e maiúsculas nas colunas, não diferem significativamente pelo teste de Tukey, ao nível de 5 % de probabilidade.

Chakraborty et al. (2000) demonstraram que, em ambientes com aumento da concentração de CO_2 (700 $\mu\text{mol mol}^{-1}$), plantas de *Stylosanthes scabra* apresentaram área foliar 47 % maior que plantas controle (350 $\mu\text{mol mol}^{-1}$). Segundo Dermody et al. (2006), com base em diversos estudos, mencionou que concentrações elevadas de CO_2 resultam em aumento da área foliar e promovem um fechamento do dossel.

Ceulemans et al. (1995) também observaram aumento significativo no índice de área foliar de 18 % para clone de *Populus trichocarpa* x *P. deltoides* e 8 % para *P. deltoides* x *P. nigra* em ambiente com concentração elevada de CO_2 (700 $\mu\text{mol mol}^{-1}$), quando comparados aos controles submetidos a concentrações ambientais desse gás.

4.3.4 Massa seca da parte aérea e das raízes das plantas de eucalipto

A influência do aumento da concentração de CO₂ sobre a massa seca da parte aérea e das raízes em sala climatizada e OTC foi semelhante. Em ambos os experimentos, para ambos os clones observou-se aumento significativo da massa seca da parte aérea e das raízes, nos dois clones estudados, em plantas com injeção de CO₂, quando comparadas com plantas controle (Tabelas 9 e 10). No experimento em sala climatizada, não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos com injeção de CO₂ (520 e 700 $\mu\text{mol mol}^{-1}$), bem como entre as plantas controle (390 e 405 $\mu\text{mol mol}^{-1}$) (Tabela 9).

Tabela 9. Massa seca da parte aérea e das raízes dos clones VM 01 (híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *E. camaldulensis*) e MN 463 (*E. urophylla*) em diferentes concentrações de CO₂ (390 $\mu\text{mol mol}^{-1}$, 405 $\mu\text{mol mol}^{-1}$, 520 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ e 700 $\mu\text{mol mol}^{-1}$) em sala climatizada.

Clones	Concentrações de CO ₂ ($\mu\text{mol mol}^{-1}$)				Média
	390	405	520	700	
Parte aérea (g)					
VM 01	1,400 aA	1,500 aA	3,750 bB	3,550 bA	2,55 B
MN 463	1,100 aA	1,250 aA	3,200 bA	2,200 bA	2,19 A
Média	1,25 a	1,28 a	3,48 b	3,38 b	
CV(%)	23,76				
Raízes (g)					
VM 01	0,169 aA	0,192 aA	0,404 bB	0,366 bA	0,28 B
MN 463	0,168 aA	0,174 aA	0,319 bA	0,340 bA	0,25 A
Média	0,17 a	0,18 a	0,36 b	0,35 b	
CV(%)	23,76				

Médias seguidas pela mesma letra, minúsculas nas linhas, e maiúsculas nas colunas, não diferem significativamente pelo teste de Tukey, ao nível de 5 % de probabilidade.

Tabela 10. Massa seca da parte aérea e das raízes dos clones VM 01 (híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *E. camaldulensis*) e MN 463 (*E. urophylla*) em diferentes concentrações de CO₂ (399 $\mu\text{mol mol}^{-1}$, 412 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ e 508 $\mu\text{mol mol}^{-1}$) em OTC.

Clones	Concentrações de CO ₂ ($\mu\text{mol mol}^{-1}$)			Média
	399	412	508	
Parte aérea				
VM 01	47,00 aB	45,50 aA	59,42 bA	49,73 B
MN 463	43,25 aA	44,08 aA	59,67 bA	47,56 A
Média	45,13 a	44,79 a	59,54 b	
CV (%)	10,73			
Raízes				
VM 01	17,17 aA	15,75 aA	24,83 bA	18,73 A
MN 463	15,54 aA	16,17 aA	25,83 bA	18,27 A
Média	16,35 a	15,96 a	25,33 b	
CV (%)	19,74			

Médias seguidas pela mesma letra, minúsculas nas linhas, e maiúsculas nas colunas, não diferem significativamente pelo teste de Tukey, ao nível de 5 % de probabilidade.

O aumento da concentração de CO₂ na atmosfera pode causar efeitos benéficos na fisiologia das plantas. O aumento da biomassa em plantas submetidas a concentrações elevadas de CO₂ é, em grande parte, atribuído ao aumento da fotossíntese. No entanto, os efeitos benéficos podem ser suprimidos por limitações de nutrientes (STITT; KRAPP, 1999). Roden et al. (1999), em estudo com mudas de *Eucalyptus pauciflora*, observaram um aumento de 30 % da fotossíntese e de 53 % de biomassa em mudas submetidas a concentrações elevadas de CO₂ (700 $\mu\text{mol mol}^{-1}$) quando comparadas ao controle (350 $\mu\text{mol mol}^{-1}$). Em *Eucalyptus camaldulensis*, plantas cultivadas em ambiente enriquecido com CO₂ (1200 $\mu\text{mol mol}^{-1}$) apresentaram incremento 26 % e 23 % na taxa fotossintética e peso das plântulas, respectivamente (KIRDMANEE et al., 1995).

Os resultados do presente trabalho, indicados na tabela 9 e tabela 10, corroboram com aqueles apresentados no trabalho de Niu et al. (2011), no qual foi observado maior desenvolvimento do sistema radicular em plantas de *Arabidopsis thaliana* submetidas a concentrações de 800 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO₂. Nessas plantas, as raízes apresentaram-se mais densas e ramificadas que as raízes do grupo controle (350 $\mu\text{mol mol}^{-1}$). Esse aumento do sistema radicular, assim como a profundidade de crescimento das raízes finas foram

observadas em vários estudos (LUKAC et al., 2003; NORBY et al., 2004; PRITCHARD et al., 2008).

Em tomateiro, o aumento da concentração de CO₂ (800 µmol mol⁻¹) resultou em comprimento significativamente maior das raízes, bem como em aumento do diâmetro da raiz e volume radicular (WANG et al., 2009).

4.4 Efeito do aumento da concentração de CO₂ do ar sobre a germinação *in vitro* de urediniósporos

As maiores concentrações de CO₂ do ar não influenciaram a taxa de germinação dos esporos. É possível que o CO₂ não tenha interferido no patógeno de forma direta; provavelmente, essa interferência deve ter ocorrido sobre o hospedeiro, que pode ter desenvolvido uma resposta de defesa mais efetiva ou mesmo barreiras estruturais mais desenvolvidas.

Tabela 11. Teste de germinação *in vitro* de urediniósporos de *Puccinia psidii*, 3, 6, 9, 12 e 24 horas, em diferentes concentrações de CO₂ (390 µmol mol⁻¹, 405 µmol mol⁻¹, 520 µmol mol⁻¹ e 700 µmol mol⁻¹) em sala climatizada.

Horas	Concentrações de CO ₂ (µmol mol ⁻¹)			
	390	405	520	700
3	32,73 A	33,27 A	31,67 A	32,53 A
6	53,20 A	52,13 A	52,00 A	53,33 A
9	66,73 A	64,87 A	67,60 A	63,93 A
12	74,53 A	76,40 A	72,87 A	75,73 A
24	83,47 A	84,47 A	85,07 A	86,13 A

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5 % de probabilidade.

Estudo semelhante foi realizado por McElrone et al. (2005), no qual verificaram-se que, em concentrações elevadas de CO₂ (560 µmol mol⁻¹), o fungo *Phyllosticta*

minima apresentou crescimento radial 17 % maior que na concentração de 360 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO_2 .

Em estudo semelhante, a concentração de 700 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO_2 atrasou o crescimento do tubo germinativo e a formação de apressório de *Colletotrichum gloeosporioides* em plantas de *Stylosanthes scabra*, comparando-se com crescimento observado nas plantas controle, submetidas à concentração de 350 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO_2 , adiando o desenvolvimento dos sintomas (CHAKRABORTY et al., 2000). Entretanto, diversos estudos têm mostrado que a elevação de CO_2 não tem efeito sobre a germinação de conídios (MANNING; TIEDEMANN, 1995; HIBBERD et al., 1996). A redução do efeito da ferrugem do eucalipto demonstrada no presente trabalho pode ter sido devido a modificações fisiológicas e bioquímicas provocadas nas plantas, por efeito das concentrações elevadas de CO_2 , como: aumento do conteúdo de carboidrato, lignina e componentes de defesa (RUNION et al., 1999) e aumento da relação C/N (TORBERT et al., 2000).

Os resultados do presente trabalhos são pioneiros com relação à análise do efeito de concentrações alteradas de CO_2 sobre a ferrugem do eucalipto e indicam redução da severidade da doença nas plantas, bem como um menor desenvolvimento do patógeno. Entretanto, é importante considerar que outras variáveis climáticas serão alteradas além das estudadas no presente trabalho, como aumento da temperatura e alterações da precipitação. Segundo Furtado et al. (2008), o aumento da temperatura e as alterações nas estações climáticas como aumento do período de seca durante os meses de junho, julho, agosto e setembro apontam para um decréscimo de epidemia da ferrugem do eucalipto nas atuais regiões de plantio. Entretanto, nos plantios da região sul do Brasil, as epidemias poderão se intensificar. De acordo com Mafia et al. (2011) e Furtado et al. (2008), em regiões com maior temperatura, a ferrugem do eucalipto poderá se tornar menos frequente.

De modo geral, a possível ocorrência de aumento da temperatura média e redução da precipitação pluviométrica, em função do efeito estufa poderão exercer algum efeito sobre os estresses abióticos aos quais as plantas estão submetidas, favorecendo a ocorrência de doenças que são intensificadas pela debilitação fisiológica do hospedeiro (MAFIA et al., 2011).

É importante considerar que estudos sobre os possíveis efeitos das mudanças climáticas sobre espécies florestais são bastante escassos, especialmente no que

se refere às interações planta-patógeno. Os resultados demonstrados nesse estudo apresentam fortes evidências de efeitos positivos do aumento da concentração de CO₂ no ar sobre o desenvolvimento do eucalipto e na redução do efeito da ferrugem; entretanto, pesquisas adicionais são necessárias para melhor direcionar essas investigações, especialmente em condições naturais de campo, onde diversos outros fatores podem influenciar os efeitos da doença sobre o hospedeiro.

5 CONCLUSÕES

- O aumento da concentração de CO₂ do ar reduz a área lesionada causada por *Puccinia psidii* em mudas clonais de *Eucalyptus urophylla* x *E. camaldulensis*.
- A elevação do CO₂ no ar reduz o número de pústulas de *Puccinia psidii* por folha, uredínias por área e esporos por uredínia em mudas clonais de *Eucalyptus urophylla* x *E. camaldulensis*.
- Em mudas clonais de *E. urophylla* não foram observadas lesões, resposta de hipersensibilidade e esporulação de *P. psidii* nas folhas.
- A alta concentração de CO₂ no ar aumenta a altura, diâmetro da base do caule, área foliar e massa seca de mudas clonais de *Eucalyptus urophylla* x *E. camaldulensis* e de *E. urophylla*.
- Altas concentrações de CO₂ não afetam a germinação dos urediniósporos de *P. psidii*.

6 REFERÊNCIAS

ALFENAS, A. C.; DEMUNER, N. L.; BARBOSA, M. M. A. Ferrugem e as opções de controle. **Correio Agrícola**, São Paulo, v. 1, p. 18-20, 1989.

ALFENAS, A. C.; ZAUZA, E. A. V. **Doenças na cultura do eucalipto**. Viçosa: SIF, 2007. 164 p.

ALFENAS, A. C. et al. **Clonagem e doenças do eucalipto**. 2. ed. Viçosa, MG: UFV, 2004. 442 p.

AMTHOR, J. S. Effects of atmospheric CO₂ concentration on wheat yield: review of results from experiments using various approaches to control CO₂ concentration. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 73, p. 1-34, 2001.

AMTHOR, J. S. Terrestrial higher-plant response to increasing atmospheric [CO₂] in relation to the global carbon cycle. **Global Change Biology**, Cambridge, v. 1, p. 243-274, 1995.

ASSAD, E. D. et al. Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Rio de Janeiro, v. 39, n. 11, p.1057-1064, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL. **Espécies mais plantadas existentes em 31/12/2004**: folhosas. São Paulo, 2004. 1 p. 1 (Boletim técnico).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico da ABRAF 201**: ano base 2010. Disponível em: <<http://www.abraflor.org.br/estatisticas/ABRAF11/ABRAF11-BR.pdf>>. Acesso em: 13 nov. 2011.

BRASIL. Núcleo de Assuntos Estratégicos da Presidência da República. **Negociações internacionais sobre a mudança do clima: vulnerabilidade, impactos e adaptação à mudança do clima**. Brasília, DF, 2005a. v. 1, 250 p. (Cadernos NAE, 3).

BRASIL. Núcleo de Assuntos Estratégicos da Presidência da República. **Mercado de carbono**. Brasília, DF, 2005b. v. 2, 500 p. (Cadernos NAE, 4).

CARVALHO, A. O. et al. Avaliação do progresso da ferrugem (*Puccinia psidii*) em brotações de *Eucalyptus cloeziana* no sudeste da Bahia, de 1987 a 1989. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 18, p. 265-274, 1994.

CASTRO, H. A. et al. Inoculação cruzada de *Eucalyptus*, goiaba (*Psidium guajava*) e jambeiro (*Syzygium jambos*) com *Puccinia psidii* WINTER. **Fitopatologia Brasileira**, Brasília, DF, v. 8, p. 491-497, 1983.

CEULEMANS, R.; VAN PRAET, L.; JIANG, X. N. Effects of CO₂ enrichment, leaf position and clone on stomatal index and epidermal cell density in poplar (*Populus*). **New Phytologist**, Cambridge, v. 131, p. 99-107, 1995.

CHAKRABORTY, S.; DATTA, S. How will plant pathogens adapt to host plant resistance at elevated CO₂ under a changing climate? **New Phytologist**, Cambridge, v. 159, p. 733-742, 2003.

CHAKRABORTY, S. et al. Impacts of global change on diseases of agricultural crops and forest trees. **CAB Reviews: perspectives in agriculture, veterinary science, nutrition and natural resources**, Washington, DC, v. 3, p. 1-15, 2008.

CHAKRABORTY, S. et al. Production and dispersal of *Colletotrichum gloeosporioides* spores on *Stylosanthes scabra* under elevated CO₂. **Environmental Pollution**, Barking, v. 108, p. 381-387, 2000.

CHAKRABORTY, S. Potential impact of climate change on plant-pathogen interactions. **Australasian Plant Pathology**, Collingwood, v. 34, p. 443-448, 2005.

CHENG, S. Changes in root growth and relationships between plant organs and root hydraulic traits in American elm (*Ulmus americana* L.) and red oak (*Quercus rubra* L.) seedlings due to elevated CO₂ level. **Forestry Studies in China**, v. 11, n. 20, p. 65-76, 2009.

CHMURA, D. J. et al. Forest responses to climate change in the northwestern United States: Ecophysiological foundations for adaptive management. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 261, p. 1121-1142, 2011.

COAKLEY, S. M.; SCHERM, H. Plant disease in a changing global environment. **Applied Biology**, London, v. 45, p. 227-238, 1996.

CONROY, J. P.; MILHAM, P. J.; BARLOW, E. W. R. Effect of nitrogen and phosphorus

availability on the growth response of *Eucalyptus grandis* to high CO₂. **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v. 15, p. 843-847, 1992.

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

COUTO, L. Cultivation and production of eucalypts in South América: with special reference to the leaf oils. In: COPPEN, J. J. W. *Eucalyptus: the genus Eucalyptus*. London: Taylor ; Francis, 2002. p. 239-250.

CUMMINS, G. B.; HIRATSUKA, Y. **Illustrated genera of rust fungi**. rev. ed. Saint Paul: American Phytopathological Society, 1983. 152 p.

DE CARVALHO, A. D. O. et al. Resistance of *Eucalyptus* Species, Progenies and Provenances to *Puccinia psidii* Winter. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Rio de Janeiro, v. 33, n. 2, p. 139-147, 1998.

DERMODY, O.; LONG, S. P.; DELUCIA, E. H. How does elevated CO₂ or ozone affect the leaf-area index of soybean when applied independently? **New Phytologist**, Cambridge, v. 169, p. 145-155, 2006.

DIANESE, J. C.; MORAES, A. T. S.; SILVA, A. R. Response of *Eucalyptus* species to field infection by *Puccinia psidii*. **Plant Disease**, Saint Paul, v. 68, n. 4, p. 314-316, 1984.

DI STEFANO, J. F. et al. Invasive potential of *Syzigium jambos* (*Myrtaceae*) in forest fragments: the case of Ciudad Colon, Costa Rica. **Revista de Biología Tropical**, San Jose, v. 46, p. 567-573, 1998.

DUFF, G. A.; BERRYMAN, C. A.; EAMUS, D. Growth, biomass allocation and foliar nutrient contents of two *Eucalyptus* species of the wet-dry tropics of Australia grown under CO₂ enrichment. **Functional Ecology**, Oxford, v. 8, p. 502-508, 1994.

EASTBURN D. M. et al. Elevated atmospheric carbon dioxide and ozone alter soybean diseases at SoyFACE. **Global Change Biology**, Oxford, v. 16, p. 320-330, 2010.

EASTBURN, D. M.; MCELRONE, A. J.; BILGIN, D. B. Influence of atmospheric and climatic change on plant-pathogen interactions. **Plant Pathology**, Oxford, v. 60, n. 1, p.54-69, 2011.

ESPÉCIES de eucalipto. **Revista da Madeira**, São Paulo, v. 59, p. 16-22, 2001.

FERREIRA, F. A. Ferrugem do eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 7, p. 91-109, 1983.

FERREIRA, F. A. **Patologia florestal: principais doenças florestais no Brasil**. Viçosa: SIF, 1989. 570 p.

FIGUEIREDO, M. B. Ciclo vital e ecologia de *Puccinia psidii*. **Biológico**, São Paulo, v. 63, n. 1, p. 69-71, 2001a.

FIGUEIREDO, M. B. Doenças fúngicas emergentes em grandes culturas. **Biológico**, São Paulo, v. 63, n. 1, p. 29-32, 2001b.

FIGUEIREDO, M. B.; COUTINHO, L. N.; HENNEN, J. F. Estudos para determinação do ciclo vital de *Puccinia psidii*. **Summa Phytopathologica**, Jaguariúna, v. 10, n. 1, p. 53-54, 1984.

FURTADO, E. L.; MARINO, C. L. *Eucalyptus* rust management in Brazil. **Forest Research**, New Zealand, v. 16, p. 118-124, 2003. Supplement.

FURTADO, E. L.; SANTOS, C. A. G. **Doenças em viveiros de *Eucalyptus* spp.**: diagnóstico e manejo. Botucatu: Votorantim Celulose e Papel, Unidade Florestal, 2001. 23 p. (Boletim técnico).

FURTADO, E. L.; SANTOS, C. A. G.; MASSON, M. V. Impacto potencial das mudanças climáticas sobre a ferrugem do eucalipto no Estado de São Paulo. In: GHINI, R.; HAMADA, E. **Mudanças climáticas: impactos sobre doenças de plantas no Brasil**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. p. 273-286.

FURTADO, E. L. et al. **Doenças de *Eucalyptus* em viveiro e plantio**: diagnose e manejo. Botucatu: Votorantim Celulose e Papel, Unidade Florestal, 2001. 48 p. (Boletim técnico).

GALLI, F.; CARVALHO, P. C. T.; TOKESHI, H. **Manual de fitopatologia**. São Paulo: Ceres, 1980. v. 2, 987 p.

GARRETT, K. A. et al. Climate change effects on plant disease: genomes to ecosystems. **Annual Review of Phytopathology**, Palo Alto, v. 44, p. 490-509, 2006.

GHINI, R.; BETTIOL, W.; HAMADA, E. Diseases in tropical and plantation crops as affected by climate changes: current knowledge and perspectives. **Plant Pathology**, Oxford, v. 60, p. 122-132, 2011.

GHINI, R.; HAMADA, E.; BETTIOL, W. Climate change and plant diseases. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 65, p. 98-107, 2008. Volume especial.

GHINI, R. **Mudanças climáticas globais e doenças de plantas**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2005. 104 p.

GLEN, M. et al. *Puccinia psidii*: a threat to the Australian environment and economy: review. **Australasian Plant Pathology**, Collingwood, v. 36, p. 1-16, 2007.

HAMADA, E. et al. Efeito de mudanças climáticas globais sobre a distribuição espacial do número provável de gerações do bicho-mineiro do cafeeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO

DE AGROMETEOROLOGIA, 14., 2005, Campinas. **Anais...** Campinas: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2005. 1 CD-ROM.

HIBBERD, J. M.; WHITBREAD, R.; FARRAR, J. F. Effect of elevated concentrations of CO₂ on infection of barley by *Erysiphe graminis*. **Physiological and Molecular Plant Pathology**, London, v. 48, p. 37-53, 1996.

HO, C. K. et al. *Agrobacterium tumefaciens* - Mediated Transformation of *Eucalyptus camaldulensis* and Production of Transgenic Plants. **Plant Cell Reports**, Berlin, v. 17, n. 9, p. 675-680, 1998.

IGLESIAS-TRABADO, G.; CARBALLEIRA-TENREIRO, R.; FOLGUEIRA-LOZANO, J. **Eucalyptus universalis**: global cultivated eucalyptus forests map version 1.2. Lugo: GIT Forestry Consulting. 2011. Disponível em: <http://git-forestry.com/download_git_eucalyptus_map.htm>. Acesso em: 15 nov. 2011.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2007: impacts, adaptation and vulnerability**. Cambridge: Cambridge University Press, 2007a. p. 23.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2007: the physical science basis**. Cambridge: Cambridge University Press, 2007b. p. 18.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2007: synthesis report**. Cambridge: Cambridge University Press, 2007c. p. 73.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Latin America. In: WATSON, R. et al. (Ed.). **The regional impacts of climate change: an assessment of vulnerability – special Report of IPCC Working group II**. Cambridge: Cambridge University Press, 1998. chap. 6, p. 190-230.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. The social costs of climate change: greenhouse damage and the benefits of control. In: BRUCE, J.; LEE, H.; HAITES, E. (Ed.). **Climate change: economic and social dimensions of climate change**. Cambridge: Cambridge University Press, 1996. chap. 6, p. 183-219.

JOFFILY, J. Ferrugem do eucalipto. **Bragantia**, Campinas, v. 4, p. 475-487, 1944.

JUNGHANS, D. T. et al. Resistance to rust (*Puccinia psidii* Winter) in Eucalyptus: mode of inheritance and mapping of a major gene with RAPD markers. **Theoretical and Applied Genetics**, Berlin, v. 108, p. 175-180, 2003.

KIRDMANEE, C.; KITAYA, Y.; KOZAI, T. Effects of CO₂ enrichment and supporting material in vitro on photoautotrophic growth of *Eucalyptus plantlets in vitro* and *ex vitro*. **In Vitro Cellular and Developmental Biology – Plant**, Columbia, v. 31, p. 144-149, 1995.

KOBAYASHI, T. et al. Effects of elevated atmospheric CO₂ concentration on the infection of rice blast and sheath blight. **Phytopathology**, Saint Paul, v. 96, p. 425-431, 2006.

KOTSCHI, J. Agricultural biodiversity is essential for adapting to climate change. **Gaia: ecological perspectives for science and society**, Zurich, v. 16, n. 2, p. 98-101, 2007.

KRUGNER, T. L. Doenças do eucalipto. In: GALLI, F. (Ed.). **Manual de fitopatologia**. 2. ed. São Paulo: Agronômica Ceres, 1980. v. 2, p. 275-296.

LAUDON, G. F.; WATERSTON, J. M. *Puccinia psidii*. **CMI Descriptions of Pathogenic Fungi and Bacteria**, Kew, n. 56, p. 1, 1965.

LESSIN, R. C.; GHINI, R. Efeito do aumento da concentração de CO₂ atmosférico sobre o oídio e o crescimento de plantas de soja. **Tropical Plant Pathology**, Brasília, DF, v. 34, n. 6, p. 385-392, 2009.

LUKAC, M.; CALFAPIETRA, C.; GODBOLD, D. L. Production, turnover and mycorrhizal colonization of root systems of three *Populus* species grown under elevated CO₂ (POPFACE). **Global Change Biology**, Oxford, v. 9, p. 838-848, 2003.

MACLACHLAN, J. D. A rust of the pimento tree in Jamaica, **B.W.I. Phytopathology**, Saint Paul, v. 28, p. 157-170, 1938.

MAFIA, R. G.; ALFENAS, A. C.; LOOS, R. A. Impacto potencial das mudanças climáticas sobre doenças na eucaliptocultura no Brasil. In: GHINI, R.; HAMADA, E.; BETTIOL, W. **Impacto das mudanças climáticas sobre doenças de importantes culturas no Brasil**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2011. p. 211-226.

MAKINO, A. Rubisco and nitrogen relationships in rice: leaf photosynthesis and plant growth. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v. 49, p. 319-327, 2003.

MALHI, Y.; MEIR, P.; BROWN, S. Forests, carbon e global climate. **Philosophical Transaction of the Royal Society of London Series A: mathematical, physical and engineering**, London, v. 360, p. 1567-1591, 2002.

MANNING, W. J.; TIEDMANN, A. V. Climate change: potential effects of increased atmospheric carbon dioxide (CO₂), ozone (O₃), and Ultraviolet-B (UV-B) radiation on plant diseases. **Environmental Pollution**, Barking, v. 88, p. 219-245, 1995.

MARENCO, J. A. Impactos das condições climáticas e da variabilidade e mudanças do clima sobre a produção e os preços agrícolas: ondas de frio e seu impacto sobre a cafeicultura nas Regiões Sul e Sudeste do Brasil. In: LIMA, M. A.; CABRAL, O. M. R.; MIGUEZ, J. D. G. (Ed.). **Mudanças climáticas globais e a agropecuária brasileira**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2001. p. 97-123.

MARLATT, R. B.; KIMBROUGH, J. W. *Puccinia psidii* on *Pimenta dioica* in South Florida. **Plant Disease Reporter**, Washington, DC, v. 63, p. 510-512, 1979.

MARTINI, A. J. **O plantador de Eucalyptus: a questão da preservação florestal no Brasil e o resgate documental do legado de Edmundo Navarro de Andrade**. 2004. 320 f. Dissertação (Mestrado em História Social)-Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

MCELTRONE, A. J. et al. Combined effects of elevated CO₂ and natural climatic variation on leaf spot diseases of redbud and sweetgum trees. **Environmental Pollution**, Barking, v. 158, p. 108-114, 2010.

MCELTRONE, A. J. et al. Elevated CO₂ reduces disease incidence and severity of a red maple fungal pathogen via changes in host physiology and leaf chemistry. **Global Change Biology**, Oxford, v. 11, p. 1828-1836, 2005.

MORA, A. L.; GARCIA, C. H. **A cultura do eucalipto no Brasil**. São Paulo: SBS, 2000. 112 p.

NAYLOR, R. Assessing risks of climate variability and climate change for Indonesian rice agriculture. **National Academy of Science**, Washington, DC, v. 104, n. 19, p. 7752-7757, 2007.

NIU, Y. et al. Auxin modulates the enhanced development of root hairs in *Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh. under elevated CO₂. **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v. 34, p. 1304-1317, 2011.

NORBY, R. J. et al. Fine-root production dominates response of a deciduous forest to atmospheric CO₂ enrichment. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, Washington, DC, v. 101, p. 9689-9693, 2004.

NUTMAN, F. J.; ROBERTS, F. M. Studies on the biology of *Hemileia vastatrix* Berk ; Br. **Transactions of the British Mycological Society**, London, v. 46, p. 27-48, 1963.

OLIVETTI NETO, A. **Qualidade de cavacos de eucalipto para obtenção de celulose kraft**. 2007. Disponível em: <<http://www.celuloseonline.com.br/imagembank/Docs/DocBank/dc/dc403.pdf>>. Acesso em: 15 out. 2007.

PANGGA, I. B.; CHAKRABORTY, S.; YATES, D. Canopy size and induced resistance in *Stylosanthes scabra* determine anthracnose severity at high CO₂. **Phytopathology**, Saint Paul, v. 4, p. 221-227, 2004.

PINTO, H. S.; ASSAD, E. D.; ZULLO JR.; BRUNINI, O. O Aquecimento Global e a Agricultura. **Comciência**, Campinas, v. 35, p. 1-6, 2002.

- PRINCIPAIS doenças na cultura do *Eucalyptus*. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 93, p. 26-32, 2001.
- PRITCHARD, N. J.; BELL, A. A. Relative activity of germination inhibitors from spores of rust and smut fungi. **Phytopathology**, Saint Paul, v. 57, n. 9, p. 932-934, 1967.
- PRITCHARD, S. G. et al. Fine root dynamics in a loblolly pine forest are influenced by free-air-CO₂-enrichment: a six-year-minirhizotron study. **Global Change Biology**, Oxford, v. 14, p. 1-15, 2008.
- RAYACHHETRY, M. B.; ELLIOTT, M. T.; VAN, T. K. Natural epiphytotic of the rust *Puccinia psidii* in *Melaleuca quinquenervia* in Florida. **Plant Disease**, Saint Paul, v. 81, p. 831, 1997.
- RAYACHHETRY, M. B. et al. Host Range of *Puccinia Psidii*, a Potential Biological Control Agent of Melaleuca Quinquenervia in Florida. **Biological Control**, Orlando, v. 22, n. 1, p. 38-45, 2001.
- RODEN, J. S.; EGERTON, J. J. G.; BALL, M. C. Effect of elevated [CO₂] on photosynthesis and growth of snow gum (*Eucalyptus pauciflora*) seedlings during winter and spring. **Australian Journal of Plant Physiology**, Melbourne, v. 26, p. 37-46, 1999.
- ROGERS H. H.; DAHLMAN R. C. Crop responses to CO₂ enrichment. **Vegetatio**, The Hague, v. 104, n. 105, p. 117-131, 1993.
- ROSENZWEIG, C. Attributing physical and biological impacts to anthropogenic climate change. **Nature**, London, v. 453, p. 353-357, 2008.
- RUIZ, R. A. R. et al. Progresso da ferrugem do eucalipto, causada por *Puccinia psidii*, em condições de campo. **Fitopatologia Brasileira**, Brasília, DF, v. 14, p. 73-81, 1989a.
- RUIZ, R. A. R. et al. Influência da temperatura, do tempo de molhamento foliar, fotoperíodo e da intensidade de luz sobre a infecção de *Puccinia psidii*, em Eucalipto. **Fitopatologia Brasileira**, Brasília, DF, v. 14, p. 55-61, 1989b.
- RUNION, G. B. et al. Tissue chemistry and carbon allocation in seedlings of *Pinus palustris* subjected to elevated atmospheric CO₂ and water stress. **Tree Physiology**, Oxford, v. 19, p. 329-335, 1999.
- RUNION, G. B. et al. Effects of elevated atmospheric CO₂ on two southern forest diseases. **New Forests**, Dordrecht, v. 39, p. 275-285, 2010.
- SANTOS, A. F.; AUER, C. G.; GRIGOLETTI JÚNIOR, A. **Doenças do eucalipto no sul do Brasil: identificação e controle**. Colombo: Embrapa Floresta, 2001. 20 p. (Circular técnica, n. 45).

SANTOS, C. A. C. **Estimativas e Tendências de Índices de Detecção de Mudanças Climáticas com base na precipitação diária no Rio Grande do Norte e na Paraíba.** 2006. 98 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia)-Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2006.

SANTOS, M. S. **Efeito do aumento da concentração de dióxido de carbono do ar sobre a murcha de *Ceratocystis* em mudas clonais de eucalipto.** 2011. 53 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Proteção de Plantas)-Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2011.

SCHUMMANN G. L.; D' ARCY C. J. **Essential plant pathology.** Saint Paul: APS Press, 2006. 338 p.

SILVA, J. Melhoria genética para a qualidade da madeira. **Revista da Madeira**, São Paulo, n. 59, p. 48-54, 2001.

SILVEIRA, R. L. V. A. et al. **Resultados preliminares do projeto influencia do estado nutricional do *Eucalyptus* na predisposição à ocorrência da ferrugem (*Puccinia psidii*).** Piracicaba, 1998. 44 p. Relatório técnico.

SIQUEIRA, O. J. W. et al. Efeitos potenciais das mudanças climáticas na agricultura brasileira e estratégias adaptativas para algumas culturas. In: LIMA, M. A. de; CABRAL, O. M. R.; MIGUEZ, J. D. G. **Mudanças climáticas globais e a agropecuária brasileira.** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2001. p. 32-63.

SOARES, C. P. B.; OLIVEIRA, M. L. R. Equações para estimar a quantidade de carbono na parte aérea de árvores de eucalipto em Viçosa, Minas Gerais. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 26, n. 5, p. 533-39, 2002.

SOUZA, R. R. S. **Caracterização anatômica quantitativa e composição de óleos essenciais em três estágios foliares de clones de eucalipto e sua relação com a ferrugem.** 2008. 104 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Proteção de Plantas)-Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2008.

STITT, M.; KRAPP, A. The interaction between elevated carbon dioxide and nitrogen nutrition: the physiological and molecular background. **Plant, Cell and Environment**, San Francisco, v. 22, n. 6, p. 583-621, 1999.

STRENGBOM, J.; REICH, P. B. Elevated [CO₂] and increased N supply reduce leaf disease and related photosynthetic impacts on *Solidago rigida*. **Oecologia**, Berlin, v. 149, p. 519-525, 2006.

TEIXEIRA, D. A. et al. Evidências de indução de resistência sistêmica à ferrugem do eucalipto mediada por rizobactérias promotoras do crescimento de plantas. **Fitopatologia brasileira**, Brasília, DF, v. 30, p. 350-356, 2005.

TELECHEA, N. et al. *Puccinia psidii* on *Eucalyptus globulus* in Uruguay. **Plant Pathology**, Oxford, v. 52, p. 427, 2003.

TESSMANN, D. J.; DIANESE, J. C. Hentriacotane: a leaf hydrocarbon from *Syzygium jambos* whit stimulatory effects on the germination of uredinispores of *Puccinia psidii*. **Fitopatologia Brasileira**, Brasília, DF, v. 27, p. 538-542, 2002.

TOMMERUP, I. C.; ALFENAS, A. C.; OLD, K. M. Guava rust in Brazil-a threat to *Eucalyptus* and other Myrtaceae. **New Zealand Journal of Forestry Science**, Rotorua, v. 33, n. 3, p. 420-428, 2003.

TORBERT, H. A. et al. Review of elevated atmospheric CO₂ effects on agroecosystems: residue decomposition processes and soil carbon storage. **Plant and Soil**, The Hague, Holanda, v. 224, p. 59-73, 2000.

VALE, F. X. R.; JESUS JUNIOR, W. C.; ZAMBOLIM, L. **Epidemiologia aplicada ao manejo de doenças de plantas**. Belo Horizonte: Perfíl, 2004. 531 p.

WANG, Y. et al. Effect of CO₂ elevation on root growth and its relationship with indole acetic acid and ethylene in tomato seedlings. **Pedosphere**, Nanjing, v. 19, p. 570-576, 2009.