



WALDIR AVELINO DELFINO AMARAL

**PREVISÃO DE CRESCIMENTO E TOLERÂNCIA À SECA
PARA MIGRAÇÃO ASSISTIDA DE PROCEDÊNCIAS DE
Eucalyptus grandis W. Hill ex Maiden PARA O BRASIL**

**LAVRAS – MG
2019**

WALDIR AVELINO DELFINO AMARAL

**PREVISÃO DE CRESCIMENTO E TOLERÂNCIA À SECA
PARA MIGRAÇÃO ASSISTIDA DE PROCEDÊNCIAS DE
Eucalyptus grandis W. Hill ex Maiden PARA O BRASIL**

Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área de concentração em Utilização da Madeira como Matéria-Prima, para obtenção do Título de Mestre.

Prof. Dr. Sebastião Carlos da Silva Rosado

Orientador

Prof. Dr. Paulo Fernando Trugilho

Coorientador

LAVRAS-MG

2019

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Amaral, Waldir Avelino Delfino.

Previsão de crescimento e tolerância à seca para migração assistida de procedências de *Eucalyptus grandis* para o Brasil / Waldir Avelino Delfino Amaral. - 2019.

75 p. : il.

Orientador(a): Sebastião Carlos da Silva Carlos da Silva Rosado.

Coorientador(a): Paulo Fernando Fernando Trugilho.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2019.

Bibliografia.

1. Normas de reação. 2. Plasticidade fenotípica. 3. Migração assistida. I. Carlos da Silva Rosado, Sebastião Carlos da Silva. II. Fernando Trugilho, Paulo Fernando. III. Título.

WALDIR AVELINO DELFINO AMARAL

**PREVISÃO DE CRESCIMENTO E TOLERÂNCIA À SECA PARA MIGRAÇÃO
ASSISTIDA DE PROCEDÊNCIAS DE *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden PARA O
BRASIL**

**GROWTH FORECAST AND DRY TOLERANCE FOR ASSISTED MIGRATION OF
PROCEDURES OF *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden FOR BRAZIL**

Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área de concentração em Utilização da Madeira como Matéria-Prima, para obtenção do Título de Mestre.

APROVADA em 19 de abril de 2019.

Prof. Dr. Sebastião Carlos da Silva Rosado	UFLA
Profa. Dra. Daniele Arriel	UFMT
Prof. Dr. Lucas Amaral de Melo	UFLA

Prof. Dr. Sebastião Carlos da Silva Rosado

Orientador

LAVRAS – MG

2019

A Warley meu pai, à Raquel minha esposa; à Ana Carolina, Gabriel, Isabelle e Ana Laura, meus filhos; aos meus familiares, por todo carinho e zelo familiar.

Aos meus amigos e parceiros da UFLA, por toda confiança e companheirismo.

Em especial, à Santuza, minha mãe e grande inspiradora.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, pela oportunidade concedida na realização deste trabalho.

Aos professores, Dr. Sebastião Carlos da Silva Rosado e Dr. Paulo Fernando Trugilho, por toda assessoria, durante os últimos semestres, orientação, amizade, profissionalismo, paciência, dedicação e por todo conhecimento compartilhado para realização deste trabalho e do meu crescimento profissional.

Aos professores, Dr. Sebastião Carlos da Silva Rosado, Dra. Daniele Arriel e Dr. Lucas Amaral de Melo que se disponibilizaram a participar como membros da banca de defesa do mestrado, acrescentando valiosas informações.

Aos amigos da UFLA pela preciosa ajuda na condução dos trabalhos e pelo companheirismo.

A Deus, que me deu forças para perseverar na continuação dos estudos acadêmicos.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Muito obrigado!

“A persistência é o caminho do êxito.”

(Charles Chaplin)

RESUMO

A adaptação de uma determinada procedência de sementes em outros ambientes modificados pode ser prevista pela comparação do seu desempenho atual com o ótimo previsto por modelos que avaliam as normas de reação de populações e seus indivíduos e, conseqüentemente, a plasticidade fenotípica, pode-se, portanto, conjecturar que as respostas das procedências às condições climáticas de ambientes exóticos, também, podem ser previstas pelas estimativas do impacto da movimentação de procedências ao longo de gradientes ambientais, dentro da faixa. Normalmente, nas normas de reação, as variáveis climáticas mais relacionadas à seca e que sofrem maiores variações em função da latitude, são a temperatura e a precipitação. Assim, estas se constituem nas variáveis independentes, enquanto que a adaptação e o crescimento vegetal, que são as características mais limitadas pelas referidas variáveis independentes, se constituem nas variáveis dependentes. O *Eucalyptus* é um importante gênero fornecedor de matéria-prima para diversas finalidades industriais, o que está diretamente relacionado à grande variabilidade da qualidade da madeira das suas diversas espécies/clones. Várias de suas espécies se adaptaram muito bem às condições edafoclimáticas do Brasil e passaram a ser importantes fornecedoras de matérias-primas para a produção de lenha, carvão vegetal, celulose e papel. O *Eucalyptus grandis* é a espécie florestal mais cultivada no Brasil, devido o seu potencial produtivo e às características da madeira, a qual é utilizada para produção de celulose e papel, painéis de fibra e aglomerado, energia de biomassa, uso doméstico e produtos de serraria. O presente estudo objetivou avaliar as normas de reação de diferentes procedências de *Eucalyptus grandis* cultivadas nos estados de Minas Gerais e Espírito Santo, avaliar a aplicabilidade da metodologia proposta por Pedlar & McKenney (2017) para predição de respostas de crescimento de procedências de sementes de *E. grandis* W. Hill ex Maiden em processos de migração assistida para o Brasil e prever a tolerância por análises de séries históricas de magnitude de secas, segundo estudos de Mackee et al. (1993), ocorridas em áreas de procedências australianas de sementes de *E. grandis* e em áreas de cultivos no Brasil. Os resultados demonstraram que a procedência Coffs Harbour, a princípio não estava apta a ser cultivada em Viçosa, ao contrário de Kyoqle que ainda apresentou a melhor distância ótima de crescimento. A procedência Atherton poderia ser cultivada tanto em Lavras como em Viçosa. Devendo-se também descartar Orara West SF, para esses sites de cultivo, apesar de apresentar picos de secas, as intensidades das secas foram bem inferiores a Lavras e Viçosa. Ainda dentre as procedências não testadas Collombatti SF, Cherry Tree SF e MT Lindsay apresentaram relevante distância ótima de crescimento e histórico de secas semelhantes a Lavras e Viçosa, tornando-as indicadas para cultivo nesses locais. Dentre as curvas das normas de reação, a procedência Atherton se destacou das demais, sendo esta a com maior plasticidade fenotípica.

Palavras-chave: Normas de reação. Plasticidade fenotípica. Temperatura. Precipitação. Migração assistida.

ABSTRACT

The adaptation of a given seed source to other modified environments can be predicted by comparison of its current performance with the optimum predicted by models that evaluate the reaction norms of populations and their individuals and, consequently, phenotypic plasticity, therefore, to conjecture that the responses of the provenances to the climatic conditions of exotic environments can also be predicted by the estimates of the impact of the movement of provenances along environmental gradients within the range. Normally, in the reaction norms, the climatic variables more related to the drought and that suffer greater variations as a function of the latitude, are the temperature and the precipitation. Thus, these are independent variables, whereas adaptation and plant growth, which are the most limited characteristics of these independent variables, are dependent variables. *Eucalyptus* is an important supplier of raw material for various industrial purposes, which is directly related to the great variability of the quality of the wood of its various species / clones. Several of its species have adapted very well to Brazil's soil-climatic conditions and have become important suppliers of raw materials for the production of firewood, charcoal, pulp and paper. *Eucalyptus grandis* is the most cultivated forest species in Brazil, due to its productive potential and the characteristics of wood, which is used for pulp and paper production, fiber and agglomerate panels, biomass energy, domestic use and sawmill products . The objective of this study was to evaluate the reaction standards of different *Eucalyptus grandis* cultivars in the states of Minas Gerais and Espírito Santo, to evaluate the applicability of the methodology proposed by Pedlar and McKenney (2017) to predict growth responses of *E . grandis* W. Hill ex Maiden in assisted migration processes for Brazil and predict tolerance for analyzes of historical series of drought magnitude, according to studies by Mackee et al. (1993), occurring in areas of Australian provenances of *E. grandis* seeds and in crop areas in Brazil. The results showed that the origin of Coffs Harbor, at first was not apt to be cultivated in Viçosa, unlike Kyoqle that still presented the best optimum distance of growth. The Atherton origin could be cultivated in both Lavras and Viçosa. It is also necessary to discard Orara West SF, for these cultivation sites, despite the presence of dry spikes, the intensities of the droughts were well below Lavras and Viçosa. Also among the untested provenances Collombatti SF, Cherry Tree SF and MT Lindsay presented excellent optimal growth distance and dry history similar to Lavras and Viçosa, making them suitable for cultivation in these locations. Among the curves of the reaction standards, Atherton originated from the others, being the one with greater phenotypic plasticity.

Keywords: Reaction norms. Phenotypic Plasticity. Temperature. Precipitation. Assisted migration.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Três modos de variação das normas de reação térmica	32
Figura 2	Mapa australiano contendo a localização das procedências de sementes	37
Figura 3	Incremento Médio Anual de Altura (i-alt) de quatro procedências de <i>E. grandis</i> , relacionado a quantidade de precipitação em áreas cultivadas de Minas Gerais (Cataguases, Lavras, Paraopeba, Sete Lagoas e Viçosa) e Espírito Santo (Aracruz e São Mateus)	47
Figura 4	Incremento Médio Anual de Área Seccional (i-as) de quatro procedências de <i>E. grandis</i> , relacionado a quantidade de precipitação em áreas cultivadas de Minas Gerais (Cataguases, Lavras, Paraopeba, Sete Lagoas e Viçosa) e Espírito Santo (Aracruz e São Mateus)	47
Figura 5	Distância Ótima Estimada (DOE) de Precipitação para Incremento Médio Anual de Altura (i-alt) das procedências utilizadas no ajuste do modelo linear (1, 2, 3, 4), das procedências testadas em Lavras e Viçosa (5, 6, 7, 8) e das simuladas para futuros testes no Brasil (9, 10, 11, 12, 13, 14, 15)	49
Figura 6	Distância Ótima Estimada (DOE) de Precipitação para Incremento Médio Anual de Área Seccional (i-as) das procedências utilizadas no ajuste do modelo linear (1, 2, 3, 4), das procedências testadas em Lavras e Viçosa (5, 6, 7, 8) e das simuladas para futuros testes no Brasil (9, 10, 11, 12, 13, 14, 15)	50
Figura 7	Frequência de picos de Magnitude Seca (MS-3) nos locais de teste Lavras/MG e Viçosa/MG com locais das procedências australianas utilizadas para ajuste do modelo (7-A) e com procedências australianas de melhores distâncias ótimas de precipitação não testadas (7-B)	52
Figura 8	Gráficos de Magnitudes de Secas para o município de Lavras com a melhor e a pior procedência testada utilizada para ajuste do modelo (8A) e com a melhor e a pior procedência não testada (8B), considerando ainda as distâncias ótimas de crescimento.	54
Figura 9	Gráficos de Magnitudes de Secas para o município de Viçosa com a melhor e a pior procedência testada utilizada para ajuste do modelo (9A) e com a melhor e a pior procedência não testada (9B), considerando ainda as distâncias ótimas de crescimento	56
Figura 10	Gráficos de Magnitudes de Secas para os municípios de Lavras e Viçosa com a procedência Atherton que apresentou melhor plasticidade fenotípica e maior desenvolvimento conforme Tabela 3	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Procedências australianas a serem utilizadas, localizações geográficas e distância em Km da estação meteorológica utilizada para obter as variáveis climáticas Precipt, TMin-Med, TMax-Med e TMA	37
Tabela 2	Dados climáticos para ajuste do modelo de 2° grau dos sites de teste no Brasil com procedências australianas para Precipitação Média Anual (Precipt), Temperatura Mínima Média Anual (TMin-Med), Temperatura Máxima Média Anual (TMax-Med) e Temperatura Média Anual (TMA).....	38
Tabela 3	Dados do Incremento Médio Anual de Altura (i-alt) e Incremento Médio Anual de Área Seccional (i-as) para <i>E. grandis</i> , nos sites de teste do Brasil	39
Tabela 4	Ajustes dos modelos quadráticos, aplicados aos dados de variáveis dependentes (VD) de Incremento Médio Anual de Altura (i-alt) e de Área Seccional (i-as) e de variáveis independentes climáticas (VI) de Precipitação Média Anual (Precipt), Temperatura Mínima Média Anual (TMin-Med), Temperatura Máxima Média Anual (TMax-Med), Temperatura Média Anual (TMA).....	45
Tabela 5	Pontos Ótimos de Precipitação ($P_{o,i}$) e Distância Climática Ótima (DC_o) nos sites de testes no Brasil	48

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	16
3	REVISÃO DE LITERATURA.....	17
3.1	Mudanças climáticas.....	17
3.1.1	Impactos das mudanças climáticas	17
3.1.2	Incertezas na segurança alimentar	18
3.2	Mitigação das mudanças climáticas.....	19
3.2.1	Variações intraespecíficas.....	20
3.2.2	Fluxo gênico assistido entre populações.....	20
3.2.3	Migração assistida	21
3.2.3.1	Varição clinal	21
3.2.3.2	Varição ecotípica	22
3.2.3.3	Índice padronizado de precipitação (IPP) e magnitude de seca (MS)	22
3.2.3.4	Migração assistida	25
3.2.4	Intensidade de seca X tempo de seca	27
3.2.5	Resposta antecipada de crescimento devido às mudanças climáticas	28
3.2.6	Evolução das espécies conforme normas de reação térmica	31
3.2.6.1	A epigenética das plantas sob estresses abióticos	33
3.2.6.2	Memória de estresse das plantas sujeitas a secas recorrentes	34
4	MATERIAL E MÉTODOS	36
4.1	Material biológico	36
4.1.1	Obtenção dos dados	39
4.2	Avaliação antecipada do crescimento de procedências de sementes <i>E. grandis</i>	40
4.3	Avaliação antecipada da tolerância à seca de procedências de sementes australianas de <i>E. grandis</i> em áreas de cultivos no Brasil	41
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	43
6	CONCLUSÃO	62
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

1 INTRODUÇÃO

O fenômeno do aquecimento global causado pela emissão de gases de efeito estufa é amplamente reconhecido por vários organismos ambientais e científicos (IPCC, 2014). As previsões mais pessimistas mencionam que esse fenômeno, no futuro, poderá ter a sua intensidade aumentada, provocando maiores níveis de estresses hídricos e térmicos nas plantas. Dependendo desses níveis a homeostasia celular poderá ser comprometida, ameaçando significativamente a produtividade primária dos ecossistemas.

Os vários cenários de predições dos impactos do referido fenômeno na segurança alimentar humana (LOBELL et al.; 2008; SCHMIDHUBER e TUBIELLO, 2007; WHEELER et al.; 2013), na perda de biodiversidade e funcionalidade dos ecossistemas florestais (SALA et al., 2012), tem gerado muitas incertezas acerca do bem estar das populações humanas que vivem em diferentes regiões da terra. Contudo, as evidências relatadas de que repetidas mudanças climáticas globais já ocorreram no passado (Riebeek, 2010) e as predições de que tais mudanças poderão ocorrer no futuro, em taxas semelhantes às passadas (Bracannot et al.; 2012), amenizam todas as previsões catastróficas e inquietantes anteriormente mencionadas. Além disso, deve-se considerar que são essas pressões das mudanças recorrentes de clima que salvagam um dos princípios fundamentais da biologia que coloca a variação genética como a precursora dos processos evolutivos (RAPP e WENDEL, 2005).

É nesse contexto de variação que se deve considerar o fato de que as espécies, dentre essas as arbóreas, são constituídas de populações que evoluíram por milhões de anos para possibilitar as suas persistências em cenários variáveis de estresses ambientais. Tais persistências decorrem das habilidades de determinadas populações para se adaptarem localmente, sendo que esse fenômeno é altamente dependente dos níveis de variabilidade genética que devem estar em magnitudes que sejam suficientes para garantir que muitos indivíduos possam superar os obstáculos impostos pelos efeitos imprevisíveis das mudanças climáticas.

Esse princípio básico da evolução e o fato de que a maioria das espécies de árvores apresentam variação genética em resposta às variações nas condições ambientais (MORGENSTERN, 1996; SAVOLAINEN et al.; 2007; AITKEN e WHITLOCK, 2013; KREMER et al.; 2012), mostram a necessidade de se conduzir estudos de diferenciação das características adaptativas em relação à heterogeneidade do ambiente, de modo que estes abranjam uma distribuição espacial mais ampla possível e que envolvam as variações clonais e

ecotípicas dentro da área de ocorrência natural da espécie alvo de estudo. Tendo em vista que as propriedades fisiológicas das árvores são altamente relacionadas a tais variações e que estas propriedades, por sua vez, conferem a adaptação e o crescimento das árvores, pode-se, portanto, melhor compreender as respostas evolutivas às mudanças climáticas por meio de estudos de procedências que se fundamentam nas normas de reação e, conseqüentemente, na plasticidade fenotípica das populações.

Nesse contexto, os altos níveis de variação genética para as características quantitativas relacionadas à adaptação, a estrutura geográfica dessa variação ao longo de gradientes climáticos e a interação entre genótipos e ambientes fornecem fortes evidências sobre a adaptação de populações ao clima (MÁTYAS, 1996; HOWE et al.; 2003; SAVOLAINEN et al.; 2007; AITKEN e WHITLOCK, 2013).

Os estudos de procedências, em que muitas fontes de sementes são testadas, permitem avaliar o desempenho em termos de diferenciais de suas respostas adaptativas a novos ambientes por meio do desenvolvimento de modelos de transferência geral, nos quais se relacionam o desempenho relativo de fontes de sementes com as diferenças das condições ecológicas e climáticas existentes entre as procedências de sementes e as dos locais de plantio, tal como proposto por Andalo, Beaulieu e Bousquet (2005). As respostas de fontes de sementes associadas às mudanças de clima, também podem ser previstas por simulações, envolvendo diferentes cenários de mudanças climáticas futuras (SCHMIDTLING, 1994; MÁTYAS, 1996; PERSSON, 1998; REHFELDT et al., 1999a, b).

Considerando que a adaptação de uma determinada procedência de sementes em outros ambientes modificados pode ser prevista pela comparação do seu desempenho atual com o ótimo previsto por modelos que avaliam as normas de reação de populações e seus indivíduos e, conseqüentemente, a plasticidade fenotípica, pode-se, portanto, conjecturar que as respostas das procedências às condições climáticas de ambientes exóticos, também, podem ser previstas pelas estimativas do impacto da movimentação de procedências ao longo de gradientes ambientais, dentro da faixa.

Normalmente, nas normas de reação, as variáveis climáticas mais relacionadas à seca e que sofrem maiores variações em função da latitude, são a temperatura e a precipitação. Assim, estas se constituem nas variáveis independentes, enquanto que a adaptação e o crescimento vegetal, que são as características mais limitadas pelas referidas variáveis independentes, se constituem nas variáveis dependentes.

Segundo Brito et al. (1983), o *Eucalyptus* é um importante gênero fornecedor de matéria-prima para diversas finalidades industriais, o que está diretamente relacionado à grande variabilidade da qualidade da madeira das suas diversas espécies/clones. Várias de suas espécies se adaptaram muito bem às condições edafoclimáticas do Brasil e passaram a ser importantes fornecedoras de matérias-primas para a produção de lenha, carvão vegetal, celulose e papel.

Os *Eucalyptus* cobrem grandes áreas de reflorestamentos no mundo. O grande número de espécies deste gênero, a grande plasticidade ecológica e a sua excelente produção tornou-o fonte de matéria prima de inúmeras indústrias florestais, o que permitiu um rápido avanço no conhecimento silvicultural e tecnológico de muitas espécies. Portanto, grande parte dos *Eucalyptus* têm capacidade de regenerar-se após o corte e por isso, as florestas têm sido manejadas com uma rotação de alto fuste seguidas de uma ou mais rotações de brotações sendo, posteriormente, substituídas por novas árvores originadas de sementes.

O *Eucalyptus grandis* é a espécie florestal mais cultivada no Brasil (SOUZA et al., 2004), devido o seu potencial produtivo e às características da madeira, a qual é utilizada para produção de celulose e papel, painéis de fibra e aglomerado, energia de biomassa, uso doméstico e produtos de serraria (SOARES et al., 2003).

A resposta de crescimento das árvores às mudanças climáticas em curso tem implicações importantes para a dinâmica florestal futura e implicações ecológicas e econômicas de longo alcance. Assim, Pedlar & McKenney (2017) utilizaram-se de dados de procedências canadenses para identificar respostas de crescimento consistentes ao aquecimento climático e apresentaram uma estratégia de regeneração florestal que incorpora essas respostas antecipadas de crescimento para promover crescimentos satisfatórios de procedências sob determinada mudança climática.

Mackee et al. (1993) propuseram um importante indicador e uma definição de seca que poderia servir como uma ferramenta versátil no monitoramento, previsão e análise de secas, traduzindo-se no Índice de Precipitação Padronizado (IPP) e na Magnitude de Seca (MS), reconhecendo uma variedade de escalas de tempo, fornecendo assim informações relevantes para mitigação das mudanças climáticas.

2 OBJETIVOS

O presente estudo objetivou:

i) Avaliar as normas de reação de diferentes procedências de *Eucalyptus grandis* cultivadas nos estados de Minas Gerais e Espírito Santo;

ii) Avaliar a aplicabilidade da metodologia proposta por Pedlar & McKenney (2017) para predição de respostas de crescimento de procedências de sementes de *E. grandis* W. Hill ex Maiden em processos de migração assistida para o Brasil;

iii) Predizer a tolerância por análises de séries históricas de magnitude de secas, segundo estudos de Mackee et al. (1993), ocorridas em áreas de procedências australianas de sementes de *E. grandis* e em áreas de cultivos no Brasil.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Mudanças climáticas

Conforme o relatório publicado pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2014) as alterações do clima, ao longo do século 21, promoverão modificações significativas nos regimes de chuva e considerável aumento na temperatura, em várias regiões da terra. Como consequência, espera-se a elevação dos estresses hídricos e térmicos nas plantas em níveis que podem comprometer a homeostasia celular, constituindo, assim, ameaça significativa para a produtividade primária dos ecossistemas.

As plantas sob tais condições de estresse podem sofrer alterações no seu metabolismo, sendo que o estresse térmico modifica, principalmente, as atividades enzimáticas envolvidas na síntese de carbono-amido e sua acumulação (MATHUR et al., 2014), enquanto que o estresse hídrico pode promover a cavitação/embolismo do xilema e elevar o risco de morte das plantas, quando estas se deparam com episódios de secas mais severas (NARDINI et al., 2011).

Contudo, há evidências de que algumas mudanças paleoclimáticas severas já ocorreram no passado (FAIRBANKS, 1993) e, conforme simulações, estas poderão ocorrer no futuro em taxas semelhantes (BRACANNOT, 2012). Principalmente por essas recorrências das mudanças climáticas globais é que se deve salvaguardar um dos princípios fundamentais da biologia que coloca a variação genética como precursora dos processos evolutivos (RAPP e WENDEL, 2005). Nesse contexto de noção fundamental neodarwiniana, há, portanto, que se considerar que as espécies, dentre essas, as arbóreas são constituídas de populações, que evoluíram por milhões de anos, para possibilitar as suas sobrevivências de em cenários variáveis de estresses ambientais.

Assim, comparações nas taxas de crescimento e produtividade entre populações, quando cultivadas em ambientes com condições climáticas distintas, são necessárias para avaliar a natureza das referidas mudanças de clima na produção de biomassa e na estabilidade dos ecossistemas florestais. Durante muitos anos, o melhoramento genético florestal procurou estabelecer estudos comparativos nos denominados testes de procedências ou de origens (MÁTYAS, 1994).

3.1.1 Impactos das mudanças climáticas

As espécies podem potencialmente responder às mudanças climáticas através de várias formas, incluindo a migração no espaço e adaptações comportamentais e/ou evolutivas que permitem a persistência da atual faixa geográfica devido às novas condições climáticas. No entanto, a falta de respostas rápidas, poderá resultar em extinção de espécies (DAWSON et al.; 2011).

Os impactos das mudanças climáticas poderão resultar, portanto, de interações como mudança de uso da terra, invasões biológicas e poluição do ar e da água (VITOUSEK et al.; 1997). Holding (2013) reconheceu a importância potencial e a compreensão limitada das mudanças climáticas, às respostas comportamentais, evolutivas e ecológicas a essas mudanças; e outras tensões de interação que podem fornecer um ponto de partida para gerenciar riscos na evolução.

Desde o início do século 20, a temperatura média global aumentou aproximadamente em 0,8 °C e foi acompanhada pelo aumento do nível do mar, sazonalidade alterada e mudanças nos extremos. Desde 1979, as temperaturas do ar superficial sobre a terra aumentaram em cerca de duas vezes a taxa de temperaturas em relação aos oceanos. É muito provável que o aquecimento continue, com a magnitude determinada por uma combinação de características intrínsecas do sistema terrestre e das ações humanas (IPCC, 2007).

Conforme Diffenbaugh e Field (2013), a avaliação de possíveis mudanças futuras nas condições climáticas, exige três tipos diferentes de informações. Primeiro, a compreensão dos aspectos das mudanças climáticas que impulsionam a resposta biológica. Segundo, a comparação das mudanças climáticas atuais e futuras com exemplos do passado, incluindo a magnitude e a taxa de mudança. Terceiro a imagem do contexto em que a mudança climática atual está ocorrendo e as consequências desse contexto na estruturação de restrições e oportunidades.

Ao responder às mudanças rápidas no clima, os organismos encontrarão uma paisagem altamente fragmentada, dominada por uma ampla gama de influências humanas. A combinação da alta velocidade das mudanças climáticas e a fragmentação humana multidimensional apresentará ecossistemas terrestres com ambiente sem precedentes na história evolutiva recente (DIFFENBAUGH e FIELD, 2013).

3.1.2 Incertezas na segurança alimentar

Segundo trabalhos de Lobell et al. (2008), os investimentos destinados a melhorar a adaptação agrícola às mudanças climáticas inevitavelmente favorecem algumas culturas e regiões sobre outras. A análise dos riscos climáticos para as culturas em 12 regiões do planeta, com insegurança alimentar foi realizada para identificar prioridades de adaptação, com base em modelos de culturas estatísticas e projeções climáticas para o ano de 2030 de 20 modelos de circulação geral. Os resultados indicam o Sul da Ásia e o Sul da África como duas regiões que, sem medidas de adaptação suficientes, provavelmente sofrerão impactos negativos em várias culturas que são importantes para populações humanas com grande insegurança alimentar. Verificou-se que as incertezas variam amplamente pela cultura e, portanto, as prioridades dependerão das atitudes de risco das instituições com investimento.

As mudanças climáticas afetarão as quatro dimensões da segurança alimentar, a saber, a disponibilidade de alimentos (por exemplo, produção e comércio), acesso a alimentos,

estabilidade de alimentos e uso dos alimentos. A importância das várias dimensões e o impacto global das mudanças climáticas na segurança alimentar serão diferentes em todas as regiões e ao longo do tempo e, o mais importante, dependerá do status socioeconômico geral que um país realizou à medida que os efeitos das mudanças climáticas se estabelecem. Essencialmente, todas as avaliações quantitativas mostram que o clima alterará a segurança alimentar. A mudança climática aumentará a dependência dos países em desenvolvimento nas importações e acentuará o foco atual da insegurança alimentar na África e, em menor medida, no sul da Ásia. No entanto, é provável que as diferenças nos caminhos do desenvolvimento socioeconômico também sejam determinantes para a utilização de alimentos em longo prazo e que serão decisivos para a capacidade de lidar com problemas de instabilidade alimentar, sejam eles relacionados ao clima ou causados por outros fatores (SCHMIDHUBER e TUBIELLO, 2007).

3.2 Mitigação das mudanças climáticas

O relatório publicado pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2014) destaca que, apesar do crescente número de políticas de mitigação, o crescimento das emissões de gases do efeito estufa acelerou na última década. A evidência de centenas de novos cenários de mitigação sugere que a estabilização do aumento de temperatura no século 21 requer uma partida fundamental do negócio como de costume. Ao mesmo tempo, mostra que existe uma variedade de vias de emissão, em que o aumento da temperatura pode ser limitado a menos de 2 °C em relação ao nível pré-industrial. Mas este objetivo está associado a consideráveis desafios tecnológicos, econômicos e institucionais. O atraso nos esforços de mitigação ou a disponibilidade limitada de tecnologias com baixa emissão de carbono aumentará ainda mais esses desafios. Objetivos de mitigação menos ambiciosos, como 2,5 °C ou 3 °C, envolvem desafios semelhantes, mas em escala de tempo mais lenta. Completando esses conhecimentos, o relatório fornece a avaliação abrangente das opções técnicas e de mitigação comportamental disponíveis nos setores de energia, transportes, edifícios, indústria e uso da terra e avalia as opções de políticas em todos os níveis de governança da escala local para a escala internacional.

As descobertas neste relatório aumentaram consideravelmente a compreensão da gama de caminhos de mitigação disponíveis e seus requisitos tecnológicos, econômicos e institucionais subjacentes. O momento deste relatório foi, portanto, crítico, pois pôde fornecer informações cruciais para os negociadores responsáveis pela conclusão de novo acordo para a Convenção das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas em 2015. O relatório exigiu, portanto, a atenção urgente dos formuladores de políticas e do público em geral.

O relatório avaliou opções de mitigação em diferentes níveis de governança e em diferentes setores econômicos. Ele avaliou as implicações societárias de diferentes políticas de mitigação, mas não recomendou nenhuma opção específica para a mitigação.

3.2.1 Variações intraespecíficas

Cenários estimados de clima futuro podem ser usados para prever onde pontos quentes de endemismo podem ocorrer ao longo do próximo século, mas a história da vida, características ecológicas e genéticas serão importantes para informar as respostas variadas em inúmeras taxas. Essencial para prever as consequências das mudanças climáticas para as espécies individuais será a compreensão dos fatores que impulsionam a estrutura genética dentro e entre as populações.

A persistência diante das mudanças climáticas é determinada pelas características da vida: capacidade de dispersão, tempo de geração, capacidade reprodutiva, grau de especialização do habitat, interações planta-inseto, diversidade genética existente e disponibilidade de habitat ou corredores de migração. Os níveis existentes de diversidade genética nas populações de plantas variam com base na série de cenários evolutivos que incluem endemismo, expansão desde o último período glacial, sistema de reprodução e tamanhos dos alcances atuais.

Algumas previsões podem ser feitas para as respostas dos táxons de plantas a mudanças ambientais rápidas com base na posição geográfica, história evolutiva, variação genética existente e amplitude ecológica. A previsão de como as espécies responderão às mudanças climáticas exigirá desenho de síntese da genética populacional, da geografia, da paleontologia e da ecologia (SCHIERENBECK, 2017).

3.2.2 Fluxo gênico assistido entre populações

Conforme trabalhos de Sally e Michael (2013), a capacidade das populações para responder às mudanças climáticas através da rápida adaptação afetará diretamente a persistência da biodiversidade, a provisão de serviços ecossistêmicos e a produção de recursos por muitas espécies em todo o mundo. Os genótipos que estão melhores adaptados aos novos climas enfrentados por uma população podem ocorrer em maior frequência em qualquer outro lugar, em uma área de espécies onde o clima histórico melhora as condições de previsões futuras. Uma ferramenta potencial para auxiliar a adaptação das populações a novas condições climáticas é o fluxo de genes assistidos, que pode ser definido como o movimento gerenciado de indivíduos ou gametas entre populações dentro das espécies, para mitigar a inadaptação local no curto e longo prazo. As espécies que mostram adaptação local a um clima histórico podem se beneficiar do fluxo de genes assistidos, mas também enfrentam potenciais riscos genéticos dessa prática.

Muitas espécies mostram adaptação local divergente em ambientes espacialmente heterogêneos (KAWECKI e EBERT, 2004; LEIMU e FICHER, 2008; HEREFORD, 2009). Durante períodos de estabilidade ambiental, a seleção natural mantém a adaptação local,

enquanto o fluxo de genes diminui. Se os ambientes locais mudam abruptamente, as populações podem não ser mais adaptadas, a média da aptidão pode diminuir e o tamanho da população e a produtividade provavelmente diminuirão. O aquecimento climático atual está a desacoplar rapidamente as populações das condições climáticas às quais se adaptaram no passado porque os climas estão mudando mais rapidamente do que muitas populações podem se adaptar ou se mover.

O fluxo de genes assistidos entre populações tem potencial para mitigar a inadaptação devido à mudança climática. No entanto, o fluxo de genes assistidos pode causar depressão da exclusão sexual (especialmente se as populações de origem e receptores estiverem isoladas há muito tempo) e podem prejudicar a adaptação local a fatores não climáticos. A seleção deve eliminar a depressão da exclusão extrínseca devido a diferenças adaptativas em grandes populações, e as simulações sugerem que, em poucas gerações, a evolução deve resolver a depressão intrínseca leve de exclusão por epistação. Para pesar os riscos do fluxo de genes assistidos contra aqueles de má adaptação devido à mudança climática, precisa-se conhecer a extensão da adaptação local ao clima e outros fatores ambientais, bem como seu padrão de fluxo de genes. O fluxo de genes assistidos deve ser uma ferramenta poderosa para o gerenciamento de espécies produtoras de recursos com grandes populações e amplos intervalos que mostram sinais de adaptação histórica às condições climáticas locais (SALLY e MICHAEL, 2013).

3.2.3 Migração assistida

3.2.3.1 Variação clinal

Segundo Huxley (1938), o termo variação clinal refere-se à mudança gradual em um fenótipo, podendo ser a característica, caráter ou feição, ao longo da distribuição de uma espécie ou população, normalmente relacionada com a transição geográfica ou ambiental.

O estudo da adaptação das espécies ao ambiente biótico e abiótico assume nova urgência devido à antecipada mudança climática global e a evidência de adaptação local demonstra a importância dos processos evolutivos passados para a dinâmica ecológica contemporânea e sugere o papel fundamental para a adaptação nas respostas das plantas ao ambiente em mudança (DAVIS et al., 2005). Os gradientes latitudinais em condições ambientais geralmente resultam em variação clinal intraespecífica ou diferenciação ecotípica em características de plantas (CLAUSEN et al., 1940; LINHART e GRANT, 1996; THOMPSON et al., 2007). Conforme Lieth (1973) e Hsu et al. (2012), particularmente, os gradientes abióticos podem impulsionar a variação clinal geneticamente baseada no crescimento e fenologia (JONAS e GEBER, 1999) e as características de defesa dos herbívoros (CUNNINGHAM et al., 1999; WOODS et al.; 2012) entre populações da mesma espécie. Tais clines são geneticamente baseados em características funcionais das espécies

que oferecem oportunidades únicas para documentar a covariância entre as características funcionais e o meio ambiente e podem decifrar os processos subjacentes à adaptação e as respostas às mudanças ambientais.

3.2.3.2 Variação ecotípica

A Variação Ecotípica ou Ecotipo refere-se a uma população de árvores de determinada espécie, diferente de outra população da mesma espécie, em várias características adaptativas. Essas diferenças não são graduais, são diferenças abruptas. Os ecotipos são isolados geneticamente, isto é, as populações não trocam pólen entre si. Normalmente, são associados aos fatores ambientais, classificando-se em: Ecotipos altitudinais, Ecotipos climáticos e Ecotipos edáficos (IPEF, 1980).

Mesmo que o padrão de mudança climática em longos períodos de tempo seja complexo, alguns paralelos ainda podem ser estabelecidos entre mudanças na morfologia das espécies e alterações climáticas globais. Uma lição encorajadora do registro fóssil é que as espécies têm a capacidade de evoluir diante das mudanças ambientais. No entanto, a extensão e a taxa das tendências climáticas atuais podem ser sem precedentes (HUGHES, 2000; HOUGHTON et al., 2001), podendo ser descoberto que algumas espécies alcançarão seu limite para a adaptação (HOLT, 1990). Este limite é, em teoria, estabelecido pela quantidade de variabilidade genética de indivíduos dentro das populações, e entretanto pouco se sabe sobre a extensão da variabilidade genética e a evolução (ou potencial evolutivo) da maioria das espécies. Mais importante ainda, a taxa de evolução no nível populacional de um caráter morfológico, como o tamanho do corpo, é mais crítica nos períodos de rápida mudança climática. As espécies devem evoluir rapidamente o suficiente para se adaptar às novas condições ambientais e acompanhar o clima em rápida mudança.

3.2.3.3 Índice padronizado de precipitação (IPP) e magnitude de seca (MS)

Segundo Mackee et al. (1993), existem vários pontos de vista relativos aos conceito de seca, os quais parecem concordar que ela é uma condição de umidade insuficiente causada por um déficit na precipitação ao longo de algum período de tempo. As dificuldades estão relacionadas principalmente ao período de tempo durante o qual os déficits se acumulam e à conexão do déficit na precipitação a déficits em fontes de água utilizáveis e os impactos que se seguem. A escala temporal em que os déficits de precipitação se acumulam torna-se extremamente importante e separa funcionalmente os diferentes tipos de seca.

Assim, os autores propuseram um indicador e uma definição de seca que poderia servir como uma ferramenta versátil no monitoramento e análise de secas. Este indicador requer apenas uma variável de entrada, poderia ser aplicado de forma semelhante à precipitação, camada de neve, vazão, armazenamento de reservatório, umidade do solo e água

subterrânea, reconhecendo uma variedade de escalas de tempo, fornecendo informações sobre déficit de precipitação, porcentagem de média e probabilidade.

A abordagem básica é utilizar a precipitação padronizada para um conjunto de escalas de tempo que juntas representam fontes de água de vários tipos. Soulé (1990) utilizou a precipitação padronizada em um estudo de padrões espaciais. Bhalme e Mooley (1980) também usaram a precipitação padronizada como ponto de partida para definição de seca.

O Índice de Precipitação Padronizado (IPP) é calculado por meio de um conjunto mensal de dados de precipitação preparado por um período de meses, idealmente um período contínuo de pelo menos 30 anos. Um conjunto de períodos médios é selecionado para determinar um conjunto de escalas de tempo do período de j meses, em que j é 3, 6, 12, 24 ou 48 meses. Estes representam escalas de tempo arbitrárias, mas típicas, para déficits de precipitação. O conjunto de dados se move no sentido de que a cada mês um novo valor é determinado a partir dos meses anteriores. Cada um dos conjuntos de dados é ajustado à função Gama para definir a relação entre probabilidade e precipitação. Uma vez que a relação de probabilidade para precipitação é estabelecida a partir dos registros históricos, a probabilidade de qualquer ponto de dados de precipitação observado é calculada e usada juntamente com uma estimativa da inversa normal para calcular o desvio de precipitação para uma densidade de probabilidade normalmente distribuída com uma média de zero e desvio padrão da unidade. Este valor é o IPP para o ponto de dados de precipitação específico (MACKEE et al., 1993).

Usando o IPP como indicador, uma definição funcional e quantitativa de seca pode ser estabelecida para cada escala de tempo. Um evento de seca para a escala de tempo é definido como um período em que o IPP é continuamente negativo e atinge um valor de -1,0 ou menor. A seca começa quando o IPP cai primeiro abaixo de zero e termina com o valor positivo de IPP após um valor de -1,0 ou menos. A intensidade da seca é arbitrariamente definida para valores do IPP com as seguintes categorias (MACKEE et al., 1993):

Valores de IPP	Categorias de Seca
0 a -0,99	Normal – Seca suave
-1,00 a -1,49	Seca Moderada
-1,50 a -1,99	Seca Severa
Maior ou igual a -2,00	Seca Extrema

A definição de seca incluiu uma data inicial, uma data final e uma intensidade. A duração da seca pode ser uma duração atual desde o início ou a duração de um evento histórico de seca, do começo ao fim. A intensidade máxima pode ser facilmente determinada a partir do IPP. A medida da magnitude acumulada da seca pode ser incluída. Então, a Magnitude de Seca (MS) é definida como:

$$MS = \sum_{j=1}^x IPP_{ij}$$

Em que, j começa com o primeiro mês de uma seca e continua a aumentar até o final da seca (x) para qualquer uma das escalas de tempo i. A MS tem unidades em meses, sendo equivalente à duração da seca se cada mês tiver IPP igual a -1,0.

Qualquer avaliação específica da seca e seus impactos requer a especificação da escala de tempo, uma vez que o início da seca, a intensidade, a duração, a magnitude e o final são todos dependentes da escala de tempo. Uma escala de tempo de três meses tem mais de 70 secas por século, usando os limites sugeridos. Uma escala de tempo de 24 meses é necessária para reduzir o número total de secas ao intervalo de 10 a 15 por século.

Outro importante aspecto da aplicação do IPP está relacionado às estimativas de recuperação da seca. A probabilidade de precipitação futura com base no passado pode ser calculada para todas as escalas de tempo, de modo que possam ser fornecidas estimativas das probabilidades de surgimentos de secas. Tais estimativas são particularmente úteis quando indicam que a seca provavelmente não terminará em breve e os impactos devem ser minimizados.

Finalizando, Mackee et al. (1993) propuseram uma nova definição de seca, que especifica explicitamente as escalas de tempo e utiliza um índice de precipitação padronizado. A frequência da seca diminui inversamente e a duração aumenta linearmente com a escala de tempo. A nova definição permite que um conjunto consistente de informações seja calculado, incluindo início, término, intensidade e magnitude da seca. Também produz informações de monitoramento de valores de índice, probabilidade, porcentagem da média e déficit de precipitação durante a seca. Desde o outono de 1992, o IPP é usado como uma ferramenta experimental de monitoramento de secas no Colorado, nos Estados Unidos.

3.2.3.4 Migração assistida

Ultimamente, a abordagem de procedência local ou regional tem sido intensamente questionada (BROADHURST et al.; 2008; CROWE e PARKER, 2008; HOFFMANN e SGRO, 2011; BREED et al., 2016; CHRISTMAS et al., 2016). Um dos principais argumentos contra o uso de fontes locais de sementes é que as plantas locais não estão adaptadas ao clima previsto nas mudanças climáticas e, conseqüentemente, podem não cumprir metas de restauração. Em vez disso, alguns especialistas sugerem o uso de material de sementes provenientes de outras possíveis fontes geograficamente distantes que coincidem com o clima previsto na localidade alvo em futuro previsível (SGRO et al.; 2011) do método chamado **Migração Assistida** dentro da gama de espécies ou proveniência provável. Apesar de algum debate sobre os potenciais riscos e benefícios de tal abordagem (KREYLING et al.; 2011; FRASCARIA-LACOSTE e FERNÁNDEZ-MANJARRÉS, 2012), mais e mais pesquisadores consideram a migração assistida uma estratégia promissora e a ferramenta adequada para lidar com os desafios colocados pelas mudanças climáticas (MCLACHLAN et al., 2007; VITT et al.; 2009; GRAY et al., 2011; AITKEN e WHITLOCK, 2013; GALLAGHER et al., 2015; BREED et al., 2016). Conseqüentemente, os profissionais estão seguindo essa tendência na literatura de pesquisa e começaram a desenvolver estruturas políticas para implementar a migração assistida dentro dos programas de gerenciamento (BURBIDGE et al., 2011; WILLIAMS e DUMROESE, 2013; SANSILVESTRI et al., 2015).

Bucharova (2017) define, que, conforme o contexto das mudanças climáticas, muitas espécies de plantas podem ter problemas para se adaptarem ou se dispersarem rapidamente o suficiente para acompanhar a mudança das condições ambientais. Dado estes potenciais problemas, alguns especialistas argumentam contra o uso de ecótipos de plantas locais para a restauração do ecossistema. Em vez disso, eles propõem usar ecótipos estrangeiros que são adaptados ao clima previsto dentro da faixa de espécies ou procedência provável.

Assim, argumenta-se que tais ações podem causar incompatibilidade nas interações bióticas e ter efeitos negativos sobre outros organismos. Como tal, a migração assistida só deve ser considerada nos casos em que os ecótipos locais não conseguiriam garantir os serviços dos ecossistemas. De fato, há poucas evidências experimentais sobre a abordagem de migração assistida até agora, e o pouco que há não parece apoiar seu uso. Mesmo em climas alterados, os ecótipos locais geralmente funcionavam igualmente bem ou melhor do que os estrangeiros selecionados para suas adaptações a esses climas. A razão é que, mesmo que a adaptação ao clima desempenhe o papel, esse fator pode ser substituído por outros fatores de adaptação local, como o solo ou as interações bióticas. Apesar da migração assistida ser conceito popular que é repetidamente elogiado na literatura científica e propagado entre os

profissionais, não deve ser considerado uma ferramenta universal para melhorar os resultados da restauração durante as mudanças climáticas. Dada a falta de dados experimentais, pode-se apelar a estudos experimentais multiespecíficos em grande escala que fornecerão a evidência necessária para derivar diretrizes gerais e recomendações para o manejo de ecossistemas durante as mudanças climáticas.

Conforme Iverson et al. (2013), o clima sempre esteve mudando, mas a rápida taxa de mudança climática, como projetada pelo IPCC (2007), provavelmente colocará tensões únicas nas comunidades vegetais. Além disso, barreiras antrópicas (por exemplo, uso fragmentado da terra) apresentam uma restrição moderna significativa que irá limitar a capacidade de migração de espécies em resposta a um clima em mudança.

Assim, os gerentes se deparam com quatro opções que se estabelecem ao lidar com as mudanças climáticas: (1) Eles não podem fazer nada e, portanto, permitem que as paisagens existentes mudem sem intervenção ativa, aceitando resultados desconhecidos ou arriscados; (2) Eles podem confiar em estratégias de gerenciamento passivo de recursos para permitir acomodação, como a ligação de reservas existentes com corredores; (3) Eles podem gerenciar ativamente as paisagens para preservá-las como estão, criando assim refúgios. Esse manejo de habitats incluiria ações como a prevenção de invasões, a instalação de irrigação e a regulamentação de interações bióticas; ou (4) Eles podem gerenciar ativamente as paisagens para convertê-las em algo considerado mais compatível com as condições climáticas projetadas. Este último exemplo de gerenciamento incluiria a migração assistida. Os riscos e benefícios específicos de cada uma dessas ações dependerão da magnitude da pressão climática, do contexto do ecossistema e de sua paisagem e dos objetivos das decisões humanas. Portanto, podem ser descritas algumas opções sobre como decidir entre as opções citadas, introduzindo a migração assistida e descrevendo possíveis ramificações associadas a ela.

A migração assistida foi usada como sinônimo na literatura com vários termos, com algumas ligeiras diferenças. Assim, podemos apresentar essas definições publicadas por um consórcio de pesquisadores sobre o tema (SCHWARTZ et al., 2012):

- a) Translocação: Qualquer movimento intencional de uma espécie de um local para outro. (Ex: reintroduzindo lobos ao Parque Nacional de Yellowstone);
- b) Migração Assistida (MA): Introdução de uma espécie em um novo local, trazendo propágulos ou indivíduos e liberando-os. (Ex: o movimento da árvore *Torreya taxifolia* para a Carolina do Norte a partir de sua área nativa na Flórida);

c) Colonização Assistida: Migração assistida em que a introdução é gerenciada para garantir o sucesso do estabelecimento. (Ex: as populações de *Torreya translocadas* são cuidadosamente monitoradas e gerenciadas);

d) Relocação gerenciada: O ato intencional de mover espécies, populações ou genótipos para um local fora da distribuição histórica conhecida do alvo, com a finalidade de manter a diversidade biológica ou o funcionamento do ecossistema como uma estratégia de adaptação às mudanças climáticas (Ex: introdução de uma borboleta em novo habitat quando os locais atuais provavelmente se tornarão inadequados com a mudança climática).

Pode-se reconhecer também mais dois termos, introduzidos por Pedlar et al. (2012), fazendo uma distinção importante:

a) Resgate de Espécies com Migração assistida: um meio de resgatar espécies ameaçadas pela mudança climática;

b) Migração Assistida Florestal: visa assegurar que as florestas (frequentemente plantações) de espécies arbóreas comuns (muitas vezes com valor comercial) sejam estabelecidas usando procedências que serão adaptadas climaticamente durante a rotação.

Assim, torna-se necessária a utilização da migração assistida como política para mitigar as mudanças climáticas, principalmente quando deparamos com alterações nos regimes de chuvas em diversas regiões do planeta, o que poderá comprometer as produções agrícolas, devido a intensificação de mortalidades de plantas.

3.2.4 Intensidade de seca x tempo de seca

Conforme estudos de Forner et al. (2017), há muito tempo sabe-se que a intensidade da seca é uma variável crítica na determinação do estresse hídrico das espécies arbóreas do Mediterrâneo. No entanto, não se prestou muita atenção a outras características da seca, por exemplo, a duração dos períodos secos. Assim, foram investigados o impacto do tempo e da intensidade de secas extremas no crescimento e eficiência no uso da água de três espécies de árvores do Mediterrâneo. Durante o período de estudo (2009-13), secas intensas foram observadas em escalas anuais e sazonais, particularmente durante 2011 e 2012. Em 2012, um inverno e uma primavera atipicamente secos foram seguidos por uma intensa seca de verão. A resiliência às secas extremas foi diferente entre as espécies e os resultados revelaram que o tempo de eventos extremos de seca pode afetar a função das árvores em maior extensão do que a intensidade da seca, especialmente em espécies decíduas.

A intensidade da seca é amplamente reconhecida como um dos fatores que determina a extensão dos efeitos da seca nas espécies de árvores (MCDOWELL, 2011). O impacto da

intensidade da seca tornou-se a base de muitos estudos em ambientes propensos a períodos de seca. Entretanto, pouco se sabe sobre o impacto do tempo de seca nas funções das plantas (GRANDA et al., 2013; CAMARERO et al., 2015a). O estresse hídrico pode afetar as espécies durante diferentes fases do crescimento, afetando criticamente as árvores durante a retomada da atividade cambial em biomas temperados (CAMARERO et al., 2010; ROZAS et al., 2011).

Portanto, os efeitos dos períodos secos anuais, sazonais ou mensais nas fases de crescimento das espécies podem afetar seriamente aspectos relevantes do funcionamento das espécies. Diminuições na produção primária líquida devido à seca durante a estação de crescimento podem ser compensadas por períodos de crescimento mais longos se as espécies aproveitarem condições amenas antes ou depois dos períodos de seca, e durante eventos de chuvas curtos, mas intensos ocorridos durante esses períodos (VICENTE-SERRANO et al.; 2010b).

Estudos de dendrocronologia mostraram que o estresse hídrico de curto ou longo prazo não apenas reduz o crescimento no ano atual, como também pode afetar o crescimento na estação de crescimento seguinte (BADEAU et al., 1996; LINARES et al., 2010; BAUERLE et al., 2012). A recuperação após esses efeitos da seca sobre o crescimento depende da estratégia específica seguida pela espécie de árvore de acordo com sua resistência e resiliência (ROMAN et al., 2015).

Forner et al. (2017), identificaram como o tempo, a duração e a intensidade das secas extremas afetaram o crescimento de três espécies de árvores mediterrâneas coexistentes. Foi hipotetizado que o tempo de períodos secos extremos pode afetar o funcionamento da árvore de maneira diferente da intensidade da seca, dependendo do hábito foliar e da sensibilidade à seca de cada espécie. Posteriormente, foi levantada a hipótese de que o crescimento durante condições extremamente secas varia dependendo da espécie. Assim, chegaram a conclusão por meio de estudos que o tempo de eventos extremos de seca pode afetar o funcionamento das árvores em maior extensão do que a intensidade da seca, e esse efeito é específico.

3.2.5 Resposta antecipada de crescimento devido às mudanças climáticas

Muitas abordagens têm sido empregadas para investigar as respostas do crescimento das árvores às mudanças climáticas, incluindo análises dos seus anéis (GIRARDIN, 2016), estudos de regeneração florestal (ZHU et al., 2012) e experimentos de CO₂ no ar livre (WARD, 2013). Os testes de procedências representam outra fonte de dados úteis para abordar esse tópico. Esses estudos, que foram realizados durante séculos (MORGENSTERN,

1996), envolvem o plantio de sementes coletadas de várias populações (também conhecidas como procedências ou fontes de sementes) em uma série de locais de testes. Estudos de procedência em larga escala, podendo envolver centenas de fontes de sementes plantadas com várias combinações através de dezenas de locais de teste são relativamente raros, pois requerem quantidades significativas de planejamento, cooperação e recursos para estabelecer, manter e medir o tempo. Esses experimentos foram usados para explorar o crescimento das árvores e os movimentos de sementes sob mudanças climáticas (REHFELDT et al., 1999).

Historicamente, os dados de respostas de procedências de sementes foram analisados usando funções de transferência ou resposta (O'NEILL et al., 2008). No caso das funções de transferência, uma variável de resposta (por exemplo, altura de cada fonte de sementes a uma certa idade) é modelada em função da distância de cada fonte de sementes (frequentemente medida em unidades climáticas) do local de teste. Em contraste, as funções de resposta retratam uma única característica da fonte de sementes (por exemplo, altura) varia entre os locais de teste em relação a uma variável climática de interesse. Esforços recentes estenderam as abordagens básicas de função de transferência e resposta. O'Neill et al. (2008), apresentaram uma função de transferência universal que se ajusta a uma função de transferência separada para cada local de teste, ajustando uma relação entre esses parâmetros a nível de clima local. Wang et al. (2010), apresentaram um método que combina essencialmente as abordagens de resposta e função de transferência descritas acima em uma função de resposta universal que poderia prever o crescimento em altura de qualquer procedência de semente em qualquer local de plantio dentro da faixa dos dados usados para desenvolver a relação. Por fim, Leites et al. (2012), propuseram a fusão de respostas de espécies e populações em um modelo usando técnicas de modelagem de efeitos mistos.

Pedlar e McKenney (2017), fizeram uso das funções tradicionais de resposta, pois estas permitem que as descobertas sejam transmitidas de maneira relativamente simples e transparente. Foram empregadas combinações de dados de ensaios de procedências e dados publicados para examinar a resposta antecipada de crescimento de cinco coníferas às mudanças climáticas. O principal achado foi notavelmente consistente entre essas espécies, com populações de origem fria (norte) que apresentaram resposta de crescimento positiva a uma significativa quantidade de aquecimento climático, enquanto esperava-se que as populações de origem quente (sul) apresentassem declínios quase imediatos. Assim, essa descoberta para o crescimento das árvores sob a mudança climática, foi possível identificar uma abordagem que incorporou explicitamente essas considerações nos esforços de regeneração e restauração florestal.

Os autores utilizaram oito variáveis climáticas como potenciais impulsionadores do crescimento em altura de árvores, incluindo: temperatura média anual (MAT), temperatura máxima diária média do mês mais quente (MAXT), temperatura mínima diária média do mês mais frio (MINT), temperatura mínima anual extrema (XMINT), precipitação anual (PREC), precipitação dos três meses mais frios (PRECCQ), precipitação dos três meses mais quentes (PRECHQ) e um índice anual de umidade-clima (CMI). Nas análises estatísticas foi modelada a altura das árvores em função do clima no local de plantio usando a função quadrática separada para cada procedência:

$$H_{ti} = \beta_{0i} + \beta_{1i} X + \beta_{2i} X^2$$

Em que, H_{ti} é a altura total da procedência i , X é o valor da variável climática em um local de plantio e os β_{0i} , β_{1i} e β_{2i} são os parâmetros ajustados. Análises preliminares indicaram que, das oito variáveis climáticas examinadas, o MAT foi o mais forte preditor de crescimento em altura para o *Picea mariana* e o segundo mais forte preditor (estritamente atrás do MAXT) para *Pinus banksiana*. Assim, como o MAT foi um forte preditor para ambas as espécies, foi identificado como importante impulsionador da variação genética florestal em estudos anteriores, concentrou-se no MAT para o restante deste estudo.

Foram empregadas funções quadráticas para capturar a relação Gaussiana antecipada entre o crescimento das árvores e o clima, pois essa função permitiu flexibilidade significativa na forma das curvas ajustadas (variando de parabólica a plana) e, em inspeção visual, ajustou-se aos dados razoavelmente bem.

O MAT ótimo (MAT_{opt}) para o crescimento de cada procedência (i) foi calculado tomando a primeira derivada da equação quadrática ajustada de cada procedência:

$$MAT_{o,i} = -\beta_{1i}/2 \cdot \beta_{2i}$$

A diferença entre MAT_o e MAT na origem da procedência (MAT_i) foi calculada para quantificar a distância climática de cada procedência (CDo) até a sua temperatura ideal de crescimento:

$$CD_{o,i} = MAT_{o,i} - MAT_i$$

Os resultados pareceram ser relativamente robustos dentro e entre as espécies. As regressões quadráticas baseadas em MAT produziram funções de resposta de Gauss, que

explicaram quantidade significativa de variação no crescimento em altura para a maioria das procedências. Além disso, todas as espécies exibiram fortes relações entre CDo e MAT, com estimativas de erro de parâmetros baixos, e uma preferência consistente pelas temperaturas características da porção sul da gama (i.e., entre o percentil 85 e 95 MAT). Finalmente, os erros de previsão relativamente pequenos, estimados usando o conjunto de dados de procedência regional de pinheiros forneceram confiança de que os relacionamentos desenvolvidos são aplicáveis a uma variedade de regiões e idades da floresta. A razão para os modestos erros de previsão não é clara, mas podem estar associadas a sutis diferenças regionais nas preferências do MAT.

Entender a resposta das florestas às mudanças climáticas torna-se importante para projetar suas futuras dinâmicas, permitindo projeções razoáveis dos seus impactos, além de entender as normas de reação térmica que normalmente são representadas por uma linha ou curva, que descrevem o padrão de expressão fenotípica de um único genótipo numa gama de diferentes condições ambientais, no qual organismos se desenvolvem e vivem.

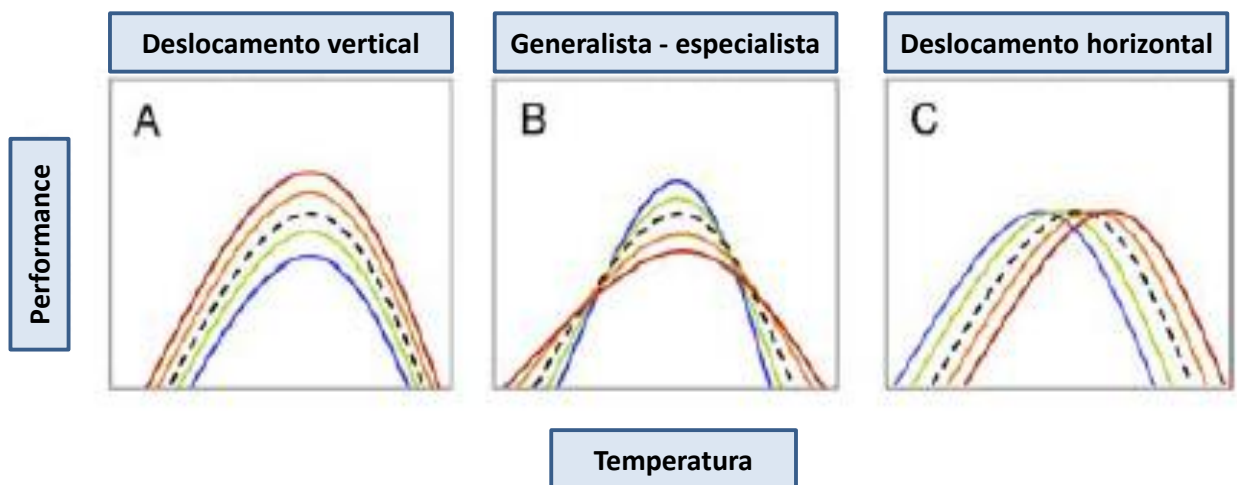
3.2.6 Evolução das espécies conforme normas de reação térmica

Segundo Knies et al. (2006), o estudo das respostas evolutivas à temperatura tem servido como um importante modelo para a compreensão do processo de adaptação a novos ambientes, em parte porque as causas evolutivas e mecanicistas da adaptação térmica são relativamente simples. A temperatura é um componente do ambiente que varia previsivelmente, e para o qual existe conhecimento dos mecanismos próximos (por exemplo, processos de taxa bioquímica) que determinam os efeitos da temperatura no crescimento ou no desempenho. A adaptação térmica e restrição são vistas mais naturalmente como um tipo de norma de reação contínua, na qual o valor da característica fenotípica (por exemplo, adequação ou desempenho) de um genótipo, varia em função de alguma variável ambiental contínua (por exemplo, temperatura) e as normas de reação são rotineiramente usadas para investigar os efeitos ambientais variados em um genótipo ou população.

As normas de reação térmica geralmente têm uma forma geral comum em que o desempenho aumenta com o aumento da temperatura, atinge um máximo em alguma temperatura intermediária e, em seguida, declina rapidamente com novos aumentos na temperatura (HUEY e STEVENSON, 1979). Com base no conhecimento dessa forma comum, os fisiologistas evolutivos propuseram modos de variação nas normas de reação térmica que são de interesse biológico particular (Figura 1): deslocamento vertical (na aptidão média), deslocamento horizontal (na temperatura ideal) e variação generalista especializada

(largura do nicho) (HUEY e KINGSOLVER, 1989). Por exemplo, a adaptação a altas temperaturas deve-se principalmente a mudanças evolutivas no desempenho médio, na temperatura ideal, na largura do nicho ou em uma combinação desses modos. Assim, como determinadas alterações genéticas selecionadas durante a evolução poderiam contribuir para esses modos?

Figura 1. Três modos de variação das normas de reação térmica



Os desvios verticais produzem mudanças no desempenho médio, os desvios horizontais produzem mudanças na temperatura ótima e a variação generalista-especialista produz mudanças na largura do nicho. Um modelo polinomial idêntico é mostrado em cada gráfico como uma norma de reação, conforme linha preta tracejada. As transições de curvas azuis para vermelhas ilustram contribuições hipotéticas dos três modos de variação para adaptação à alta temperatura.

Estudos de espécies encontradas naturalmente em ambientes térmicos contrastantes podem fornecer algumas informações sobre essas questões. Por exemplo, comparações do efeito da temperatura na taxa de crescimento de cepas de bactérias (HAHN e POCKL, 2005) e a capacidade fotossintética de espécies vegetais não relacionadas (SALVUCCI e GRAFTS-BRANDNER, 2004) encontradas em diferentes ambientes térmicos sugerem que a adaptação à alta temperatura ocorreu principalmente através de uma mudança na temperatura ótima. No entanto, esses padrões observados são o resultado de uma longa história de seleção dessas espécies, e não fornecem informações sobre quais modos de variação foram responsáveis pela adaptação inicial à alta temperatura.

Conforme Holder e Bull (2001), para demonstrar o poder de analisar as respostas evolutivas à temperatura usando normas de reação contínua, um estudo recente de adaptação a altas temperaturas nos bacteriófagos que se destaca por ser capaz de associar a adaptação a determinadas alterações genéticas. Eles demonstraram que as populações de fagos prontamente evoluíram para maiores taxas de crescimento em alta temperatura, mas caracterizaram as respostas correlacionadas nas taxas de crescimento apenas na temperatura ancestral ótima.

A plasticidade fenotípica pode ser definida como a habilidade de um único genótipo expressar formas alternativas de morfologia, estado fisiológico e/ou comportamento em resposta às condições ambientais (WESTEBERHARD, 1989). Um fenótipo plástico teria enorme vantagem sobre um fenótipo fixo, por poder se ajustar a variação ambiental e não somente a um único ambiente. Portanto, a plasticidade fenotípica pode ser entendida como a resposta mais vantajosa de um indivíduo diante de flutuações ambientais, mas existem diversas restrições, como a ausência de algum requisito acima ou mesmo a existência de custos à origem e/ou à manutenção da plasticidade (DEWITT e SIH et al. 1998; RELYEA, 2002). Porém respostas plásticas são necessárias nos organismos, assim como variações ambientais na natureza (WESTHEBERHARD, 1989), indicando que suas interações são de alta importância para a manutenção e evolução da vida.

No processo de evolução, as plantas desenvolveram formas de responder e tolerar condições ambientais adversas, mas, para que se possa utilizar e/ou potencializar esses eventos evolutivos na produção de alimentos, combustíveis, vestuário, paisagens e reestabelecimento de biomas fortemente alterados, é necessária uma maior compreensão dos mecanismos genético-moleculares que coordenam a recepção e transdução de sinais e, por conseguinte, regulam vias metabólicas gerenciadoras do próprio genoma e aquelas do metabolismo primário e secundário das plantas. Grande parte dessas respostas se deve a dois tipos de regulação gênica: genética e epigenética.

3.2.6.1 A epigenética das plantas sob estresses abióticos

Epigenética na definição moderna refere-se às alterações hereditárias na expressão gênica que podem levar a uma variação no fenótipo sem alteração na sequência de DNA. Os eventos moleculares na epigenética podem ocorrer naturalmente nas células, mas também podem ser modulados por estressores ambientais (MORRIS, 2001).

As plantas desenvolveram vários mecanismos de defesa, incluindo adaptações morfológicas, vias celulares, moléculas de sinalização específicas e imunidade inerente para

suportar vários estresses abióticos durante diferentes estágios de crescimento. A maioria dos mecanismos de defesa é controlada por genes responsáveis ao estresse, transcrevendo e traduzindo genes específicos. No entanto, certas modificações do DNA e da cromatina, juntamente com pequenos mecanismos baseados em RNA, também foram relatados para regular a expressão de genes responsivos ao estresse e constituem outra linha de defesa para as plantas em sua luta contra o estresse. Mais recentemente, estudos sugeriram que essas modificações são também hereditárias para as gerações futuras, indicando seu possível papel nos mecanismos evolucionários relacionados aos estresses abióticos (SUDÃO et al.; 2018).

Conforme Yaish et al. (2017), alterações na expressão gênica são essenciais durante as fases de crescimento e desenvolvimento e quando as plantas estão expostas a desafios ambientais. As condições de estresse induzem modificações na expressão gênica, que estão associadas a mudanças nos processos bioquímicos e fisiológicos que ajudam as plantas a evitar ou reduzir os danos potenciais resultantes dessas tensões. Após a exposição ao estresse, as plantas sobreviventes tendem a florescer mais cedo do que o normal e, portanto, transferem a informação epigenética acumulada para suas progênies, uma vez que as sementes, onde essas informações são armazenadas, são formadas em um estágio posterior do desenvolvimento da planta.

Portanto, estímulos ambientais com luz, temperatura, disponibilidade hídrica e de nutrientes, incidências de patógenos, podem incidir em mudanças epigenéticas, modificando a composição química do DNA e de proteínas associadas. Essas alterações funcionariam como uma “memória celular”, onde os genes passariam a ser mais eficientes quando ativados, funcionando como um mecanismo de adaptação a estresses.

3.2.6.2 Memória de estresse das plantas sujeitas a secas recorrentes

Os efeitos da seca, particularmente o estresse hídrico sobre o comportamento fisiológico de espécies anuais e perenes têm sido amplamente investigados. No entanto, poucas informações estão disponíveis sobre o comportamento de espécies perenes sujeitas a secas recorrentes. As árvores em áreas vulneráveis à seca estão expostas ao estresse hídrico quase todos os anos, e isso pode naturalmente estimular a resposta das árvores à seca. De fato, a "memória" de estresse vegetal, isto é, as modificações estruturais, genéticas e bioquímicas que ocorreram devido à exposição ao estresse e que tornam a planta mais resistente a futuras exposições ao mesmo fator de estresse, está ganhando crescente atenção (FLETA-SORIANO e MUNNÉ-BOSCH, 2016).

Sabe-se que as condições de estresse hídrico durante a estação vegetativa podem induzir mudanças morfo-anatômicas que supostamente aumentam a tolerância ao estresse hídrico (LOVISOLO e SCHUBERT, 1998; PALLIOTTI et al., 2014); Por outro lado, o estresse hídrico parece aumentar a suscetibilidade das plantas à seca devido ao aumento da vulnerabilidade do xilema devido a fenômenos como fadiga por cavitação e depleção de carboidratos (HACKE et al., 2001; TRIFILÓ et al., 2017).

Atualmente, há falta de conhecimento sobre o possível comportamento contrastante de plantas perenes cultivadas em secas recorrentes versus a abundante disponibilidade de água. De fato, plantas usadas em experimentos de estresse hídrico são submetidas a ciclos curtos de estresse hídrico (entre 1 semana e uma estação vegetativa), e experimentos com plantas primárias ou múltiplos ciclos de seca raramente abrangem mais de uma estação (FLETA-SORIANO e MUNNÉ-BOSCH, 2016).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Material biológico

O presente estudo foi conduzido a partir de dados obtidos de testes de espécies/procedências de *Eucalyptus* L'Herit., conduzidos no Brasil pelo Centro de Pesquisas Agropecuárias do Cerrado (CPAC), a partir de 1973 e publicados em MOURA et al. (1980). As sementes usadas nesses testes foram obtidas CSIRO forestry and forest products.

No presente estudo, foram estudadas 15 procedências de *Eucalyptus grandis*, as quais estão relacionadas na Tabela 1, com destaque de posicionamento geográfico na figura 2.

As procedências 1, 2, 3 e 4 foram utilizadas para os ajustes, conforme as equações listadas a seguir no item 4.2. As procedências 5, 6, 7 e 8 não foram utilizadas nos referidos ajustes, mas que foram utilizadas em testes em diversas regiões do sudeste do Brasil e as procedências de 9 a 15, foram obtidas através da página da web Australian Tree Seed Center, no site <http://www.csiro.au/ATSCOrdering/GetSpecies.aspx> as, sendo utilizadas para as estimativas de suas distâncias climáticas, em relação a distancia ótima e, assim, antecipar as respostas de crescimento caso sejam testadas no Brasil, em um processo de migração assistida.

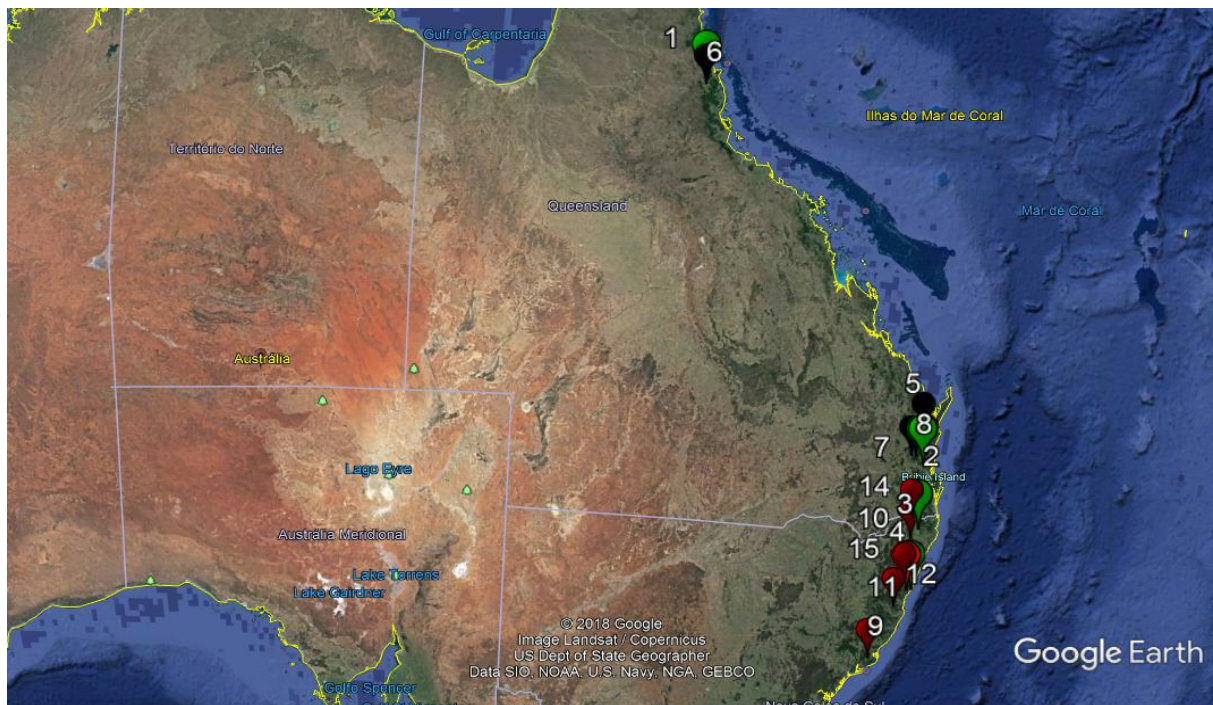
Os dados das estações meteorológicas utilizadas para obter a precipitação média anual (Precipt), a temperatura mínima média anual (TMin-Med), a temperatura máxima média anual (TMax-Med) e a temperatura média anual (TMA), entre os anos de 1975 a 1979, bem como a localidade, seedlot, localização geográfica, número da estação meteorológica e a distância em Km das procedências australianas até a estação meteorológica estão expressos na Tabela 1.

Tabela 1. Procedências australianas a serem utilizadas, localizações geográficas e distância em Km da estação meteorológica utilizada para obter as variáveis climáticas Precipt, TMin-Med, TMax-Med e TMA.

Função	Procedência	Seedlot	Lat (S)	Long (E)	Estação Meteorológica	Dist. (km)*
Ajuste do Modelo	Atherton (1)	48	17°12'	145°35'	31108	8,4
	Bellthorpe (2)	10696	26°52'	152°48'	40486	10,3
	Kyoqle (3)	9535	28°37'	153°00'	58141	4,9
	Coffs Harbour (4)	9783	30°18'	153°08'	59006	2,6
Testadas	Gympie (5)	7244	26°00'	152°40'	40365	5,9
	Atherton Dist. (6)	42	17°12'	145°35'	31108	8,4
	Jimna S. Dist. (7)	43	26°40'	152°25'	40146	20,1
	Kenilworth (8)	10695	26°40'	152°33'	40889	16,4
Não Testadas	N. Buladelah (9)	07810	32°20'	152°13'	60103	15,0
	Cherry Tree SF (10)	16900	28°54'	152°49'	57020	9,2
	Collombatti SF (11)	17767	30°50'	152°42'	59019	15,1
	Bagawa SF (12)	18274	30°07'	152°54'	56163	19,5
	Mapleton (13)	18698	26°36'	152°52'	40099	19,0
	MT Lindsay (14)	18705	28°21'	152°45'	40485	8,3
	Orara West SF (15)	20678	30°20'	153°00'	59006	10,3

*Distância entre a estação meteorológica e a localização geográfica do seedlot

Figura 2. Mapa australiano contendo a localização das procedências de sementes.



No presente estudo as variáveis climáticas (independentes) e os locais para o estudo, conforme testes de procedências de sementes do Centro de Pesquisas Agropecuárias do Cerrado (CPAC) localizam-se em Aracruz e São Mateus no Estado do Espírito Santo e em Lavras, Viçosa, Cataguases, Paraopeba e Sete Lagoas, no Estado de Minas Gerais, conforme apresentadas na tabela 2.

Tabela 2. Dados climáticos para ajuste do modelo de 2º grau dos sites de teste no Brasil com procedências australianas para Precipitação Média Anual (Precipt), Temperatura Mínima Média Anual (TMin-Med), Temperatura Máxima Média Anual (TMax-Med) e Temperatura Média Anual (TMA)

	Localidades	Estação Nº	Latitude (S)	Longitude (E)	Altitude (m)	Precipt (mm)	TMin-Med (°C)	TMax-Med (°C)	TMA (°C)
Sites de Teste Brasil	Aracruz	83648	19°49'11"	40°16'27"	69	1388	21,2	28,4	24,8
	São Mateus	83550	18°43'00"	39°51'34"	48	1247	19,9	28,8	23,6
	Lavras	83687	21°14'54"	45°00'04"	919	1440	14,5	26,0	19,4
	Viçosa	83642	20°45'17"	42°52'42"	648	1255	14,7	26,1	19,3
	Cataguases	83037	21°23'17"	42°41'57"	181	1472	15,4	28,1	20,6
	Paraopeba	83536	17°44'45"	46°10'44"	768	1105	16,3	29,8	22,4
	Sete Lagoas	83586	19°28'04"	44°14'52"	751	1347	15,5	27,9	20,9
Procedências Australianas	Atherton	31108	17°12'00"	145°35'00"	790	1013	17,1	27,4	20,6
	Bellthorpe	40486	26°52'00"	152°48'00"	450	983	13,6	27,2	20,0
	Kyoqle	58141	28°37'00"	153°00'00"	152	1218	14,5	25,8	19,6
	Coffs Harbour	59006	30°18'00"	153°08'00"	91	1484	11,9	24,2	19,1

4.1.1 Obtenção dos dados

Os dados de Incremento Médio Anual de Altura (i-alt) em m.ano⁻¹ e Incremento Médio Anual de Área Seccional (i-as) em cm².ano⁻¹, das procedências cultivadas nos estados de Minas Gerais e Espírito Santo foram obtidos a partir dos valores de DAP e altura publicados por Moura et al. (1980). Foram utilizadas as informações das médias por procedências relatadas para as idades de 3,5 anos e 4,5 anos, entre os anos de 1975 e 1979, nas seguintes cidades: Aracruz (ES), São Mateus (ES), Lavras (MG), Viçosa (MG), Cataguases (MG), Paraopeba (MG) e Sete Lagoas (MG), conforme Tabela 3.

Tabela 3. Dados do Incremento Médio Anual de Altura (i-alt) e Incremento Médio Anual de Área Seccional (i-as) para *E. grandis*, nos sites de teste do Brasil

Sites de Teste - Brasil	Procedência - Austrália	i-alt (m/ano)	i-as (cm ² /ano)
Aracruz (ES)	Atherton 48	5,2	42
	Coffs Harbour 9753	4,4	34
	Kyoqle 9535	4,1	30
	Bellthorpe 10696	4,1	35
São Mateus (ES)	Atherton 48	4,8	46
	Coffs Harbour 9753	4,4	37
	Kyoqle 9535	4,7	37
	Bellthorpe 10696	4,6	39
Lavras (MG)	Atherton 48	3,9	32
	Coffs Harbour 9753	3,7	36
	Kyoqle 9535	3,2	23
	Bellthorpe 10696	3,7	28
Viçosa (MG)	Atherton 48	3,4	28
	Bellthorpe 10696	5,0	27
Cataguases (MG)	Atherton 48	3,3	29
Paraopeba (MG)	Atherton 48	2,4	13
	Coffs Harbour 9753	2,4	17
	Kyoqle 9535	2,4	18
	Bellthorpe 10696	2,3	16
Sete Lagoas (MG)	Coffs Harbour 9753	3,3	24
	Kyoqle 9535	3,4	27
	Bellthorpe 10696	3,2	26

Os dados climáticos nas localidades brasileiras foram obtidos no banco de dados históricos do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), disponível em <http://www.inmet.gov.br> e os das localidades australianas no banco de dados do BOM (Bureau of Metereology), disponível em <http://www.bom.gov.au/clidate/data>. Esses dados estão apresentados na Tabela 2.

4.2 Avaliação antecipada do crescimento de procedências de sementes *E. grandis*

Pedlar e McKenney (2017), com o propósito de avaliar antecipadamente a resposta de crescimento de populações de *Picea marina* e *Pinus banksiana* sob condições simuladas de aquecimento do meio, utilizou de dados de uma rede de testes de procedências dessas coníferas, cultivados em uma ampla distribuição espacial de temperatura média anual de regiões de ocorrência natural no Canadá e Estados Unidos.

Tal como desenvolvido pelo trabalho dos referidos autores, o presente estudo se desenvolveu em quatro etapas distintas e abaixo descritas; Na primeira, utilizando o modelo da equação 1, ajustou-se o incremento médio anual em altura (i-alt) e em área seccional (i-as) das árvores em função de diferentes variáveis climáticas dos locais dos testes de procedências conduzidos no Brasil. Em uma segunda etapa, após a identificação da variável climática que propiciou o melhor ajuste de i-alt e i-as pela equação 1, obteve-se o ponto ótimo da referida variável climática para proporcionar a maior taxa de crescimento de cada procedência da rede de teste. Isso foi feito pela primeira derivada da equação 1, conforme está apresentado na equação 2. Em uma terceira etapa, por meio da equação 3, estimou-se a distância climática ótima de cada procedência e, por fim, considerando toda a amplitude da variável climática de todas as procedências, ajustou-se o modelo linear, apresentado na equação 4, que estima a distância climática de cada procedência com relação ao ponto climático ótimo para se alcançar as maiores taxas de crescimento (i-alt e i-as).

$$TC_i = \beta_{0i} + \beta_{1i}X + \beta_{2i}X^2 \text{ (equação 1)}$$

Em que, TC_i é a taxa de crescimento (i-alt ou i-as) da procedência i , X é o valor da variável climática em um local de plantio e os β_{0i} , β_{1i} e β_{2i} são os parâmetros ajustados. Análises preliminares poderão indicar que, das quatro variáveis climáticas examinadas, uma delas será o mais forte preditor de i-alt e i-as para *E. grandis*.

$$P_{o,i} = -\beta_{1i}/2 \cdot \beta_{2i} \text{ (equação 2)}$$

Em que, $(P_{o,i})$ é o ponto ótimo para o crescimento (i-alt ou i-as) de cada procedência (i).

$$DC_{o,i} = P_{o,i} - VC_i \text{ (equação 3)}$$

Em que, $DC_{o,i}$ é a distância climática ótima de cada procedência em relação a (i) e V_{Ci} é a mesma variável climática do local de plantio de cada procedência (i).

$$DC_{o,i} = \beta_{0i} + \beta_{1i} X \text{ (equação 4)}$$

Em que, $DC_{o,i}$ é a distância climática ótima de cada procedência (i), β são os parâmetros ajustados e X é a variável climática de melhor ajuste para representar a maior taxa de crescimento (i-alt e i-as) nos locais de cultivo das procedências de interesse.

4.3 Avaliação antecipada da tolerância à seca de procedências de sementes australianas de *E. grandis* em áreas de cultivos no Brasil

Essa avaliação transcorreu por comparações entre as magnitudes de seca, estimadas por IPP, para um período de três meses (MS-3), dos locais de procedências de sementes na Austrália e as dos locais Lavras e Viçosa, utilizados em situações de simulação. Outros municípios participantes no presente estudo também poderiam ter participado das referidas simulações.

Tais simulações de tolerância à seca serão conduzidas para o conjunto de procedências testadas e não testadas no Brasil, desde que estejam enquadradas dentro de distâncias climáticas ótimas estimadas conforme apresentado no item 4.2.

As estimativas das Magnitudes de Seca dos locais das procedências e dos locais de cultivo no Brasil foram feitas a partir dos Índices de Precipitação Padronizado (IPP), obtidos de um conjunto mensal de dados históricos de precipitação ocorrida no período compreendido entre os anos de 1961 e 2017, ou seja, um período total de 57 anos.

A intensidade de seca para os locais de teste no Brasil (Lavras e Viçosa) e procedências australianas (Atherton, Bellthorpe, Kyoqle, Coffs Harbour, Cherry Tree SF, Collombatti SF, MT Lindsay e Orara West SF) foi determinada pelo Índice de Precipitação Padronizado (IPP) e a partir deste, calculou-se a magnitude de seca de acordo com Mckee; Doesken e Kleist (1993). O IPP é baseado em funções de probabilidade de acordo com séries mensais de precipitação e relaciona a precipitação média em um período de tempo especificado com a média e o desvio padrão das séries temporais, sendo capaz de identificar a ocorrência e frequência de seca curta e longa por meio da escala de tempo (três, seis, doze, vinte e quatro ou quarenta e oito meses) escolhida para o cálculo. Quanto mais longo o

período de tempo (12, 24 e 48 meses) mais lentamente o IPP responderá às mudanças de precipitação (MCKEE; DOESKEN; KLEIST, 1993), portanto, para diferentes escalas de tempo, diferentes valores de IPP serão obtidos. Considerou-se, neste trabalho, a precipitação ocorrida entre os anos de 1961 e 2017 e foi escolhida a escala temporal de três meses para a determinação do IPP, a qual foi realizada utilizando o programa *SPI SL 6* (NDMC, 2014), disponível em <https://drought.unl.edu/droughtmonitoring/SPI/SPIProgram.aspx>.

Para comparar as Magnitudes de Seca entre os sites de testes no Brasil e as procedências australianas foram feitos gráficos e também comparações com a Metodologia proposta por Pedlar e McKenney (2017), conforme intensidade e duração da seca anual de acordo com os dados de crescimento de *E. grandis* (i-alt e i-as), em Lavras e Viçosa, assim utilizou-se a magnitude de seca (MCKEE; DOESKEN; KLEIST, 1993) a qual se refere ao somatório dos IPP's trimestrais consecutivos com valor inferior a -1, de acordo com a Equação 5:

$$MS = \sum_{j=1}^x IPP_{ij} \text{ (equação 5)}$$

Em que, j é o primeiro mês de ocorrência de seca ($IPP < -1$) e x , o último mês de ocorrência de seca consecutiva quando o IPP torna-se maior que -1, para a escala de tempo de três meses.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A dinâmica das normas de reação das árvores, quando estas se deparam com as mudanças do ambiente, pode, dentre várias outras funções mencionadas por Arnold et al. (2019), ser compreendida pelo ajuste de modelos de regressão polinomial para caracterizar a plasticidade fenotípica. Para proceder ao mencionado ajuste polinomial, a função quadrática é uma das mais usuais (Gavrilets e Scheiner 1993; Delpuech et al. 1995)

Para uma mesma característica fenotípica, diferentes populações de uma espécie podem apresentar normas de reação distintas diante de tais alterações ambientais. Esse fato, por si só, pode representar variações na plasticidade fenotípica, seja em nível de população ou de seus indivíduos, as quais constituem um dos principais pilares do melhoramento genético de plantas por seleção.

Fundamentando-se na aplicação de modelos polinomiais quadráticos, recentemente Pedlar e Macknney (2017) apresentaram uma metodologia que, além de propiciar o conhecimento da dinâmica das normas de reação para a variável climática de temperatura média anual, possibilitou um grande avanço para aprimorar os processos de migração assistida de procedências de sementes.

Seguindo a metodologia apresentada pelos referidos autores, procuramos estabelecer as curvas que representam e permitem compreender as normas de reação resultante de ajustes de modelos de regressão quadrática de quatro procedências de *Eucalyptus grandis*, já cultivadas em vários sítios no Brasil. A partir dessa metodologia, também, foi possível estimar a distância ótima de variáveis climáticas para, desta forma, prever o crescimento de várias outras procedências de *E. grandis*, antes mesmo de serem inseridas em novos processos de migração assistida de procedências da Austrália para o Brasil.

Assim, em um primeiro passo procuramos ajustar o modelo quadrático para descrever as normas de reação para várias características climáticas influenciadoras na taxa de incremento médio anual em altura (i-alt) ou em área seccional (i-as) das procedências australianas Atherton, Bellthorpe, Kyoqle e Coffs Harbour. A tabela 4 apresenta os ajustes dessas variáveis de crescimento relacionadas às variáveis de Precipitação Média Anual (Precipt), Temperatura Mínima Média Anual (TMin-Med), Temperatura Máxima Média Anual (TMax-Med) e Temperatura Média Anual (TMA). O melhor ajuste, definido pelos valores de R^2 foi verificado para variável Precipt, sendo, portanto, a variável independente que afetou mais

diretamente o crescimento de *E. grandis*. No trabalho de Pedlar e Macknney (2017), a variável climática que mais afetou o crescimento em altura das árvores foi a Temperatura Média Anual. Assim, nesse referido estudo, foram estabelecidas as curvas de desempenho térmico de várias populações de *Picea marina* e *Pinus banksiana* com o intuito de avaliar antecipadamente as suas respostas de crescimento sob condições simuladas de aquecimento do meio.

Considerando a variável dependente de i-alt, observa-se pela tabela 4, que para variável independente de Precipitação Média Anual (Precipt) a procedência Atherton-48 foi a que apresentou o melhor ajuste, seguido pelas procedências de Kyogle – 9535, Coffs Harbour – 9753 e Belthorpe – 10696. Os modelos quadráticos ajustados apresentaram valores de $R^2(\%)$ de 94,9; 72,6; 62,1 e 61,3, respectivamente, com probabilidades de significância (%) pelo teste F, respectivamente de 1,0; 28,7; 37,7 e 24,9.

Tabela 4. Ajustes dos modelos quadráticos, aplicados aos dados de variáveis dependentes (VD) de Incremento Médio Anual de Altura (i-alt) e de Área Seccional (i-as) e de variáveis independentes climáticas (VI) de Precipitação Média Anual (Precipt), Temperatura Mínima Média Anual (TMin-Med), Temperatura Máxima Média Anual (TMax-Med), Temperatura Média Anual (TMA).

Procedência	VD	VI	Modelo	R ²	Sig (%)
Atherton 48	i-alt (m/ano)	Precipt (mm)	$Y = -118,58 + 0,19X - 0,00007X^2$	94,9	1,0
		TMin-Med (°C)	$Y = 34,165 - 3,7463X + 0,113X^2$	82,3	7,8
		TMax-Med (°C)	$Y = -285,45 + 21,096X - 0,3836X^2$	40,5	43,9
		TMA (°C)	$Y = 134,36 - 12,328X + 0,2889X^2$	80,5	8,8
	i-as (cm ² /ano)	Precipt (mm)	$Y = -820,28 + 1,2837 - 0,0005X^2$	69,7	16,7
		TMin-Med (°C)	$Y = 347,48 - 37,252X + 1,0882X^2$	24,9	100,0
		TMax-Med (°C)	$Y = -5608,3 + 410,77X - 7,4551X^2$	87,2	4,1
		TMA (°C)	$Y = 984,01 - 88,156X + 2,0344X^2$	17,1	100,0
Bellthorpe 10696	i-alt (m/ano)	Precipt (mm)	$Y = -87,57 + 0,142X - 0,00005X^2$	61,3	24,9
		TMin-Med (°C)	$Y = 44,004 - 4,6879X + 1,1336X^2$	32,8	100,0
		TMax-Med (°C)	$Y = -145,05 + 11,111X - 0,2065X^2$	40,1	46,1
		TMA (°C)	$Y = 130,55 - 11,742X + 0,2698X^2$	56,1	28,6
	i-as (cm ² /ano)	Precipt (mm)	$Y = -576,41 + 0,9239X - 0,0004X^2$	55,4	29,7
		TMin-Med (°C)	$Y = 235,04 - 25,504X + 0,7677X^2$	57,6	27,6
		TMax-Med (°C)	$Y = -2450 + 179,95X - 3,2578X^2$	47,0	38,5
		TMA (°C)	$Y = 826,53 - 75,755X + 1,7822X^2$	52,8	32,5
Kyoqle 9535	i-alt (m/ano)	Precipt (mm)	$Y = -83,67 + 0,136X - 0,00005X^2$	72,6	28,7
		TMin-Med (°C)	$Y = 10,105 - 0,963X + 0,033X^2$	58,2	43,8
		TMax-Med (°C)	$Y = -264,98 + 19,383X - 0,349X^2$	53,5	48,3
		TMA (°C)	$Y = 61,758 - 5,6008X + 0,1334X^2$	47,2	100,0
	i-as (cm ² /ano)	Precipt (mm)	$Y = -771,31 + 1,2565X - 0,0005X^2$	79,9	20,0
		TMin-Med (°C)	$Y = 2,5547 + 1,0902X + 0,0173X^2$	48,0	100,0
		TMax-Med (°C)	$Y = -2260,8 + 164,78X - 2,9607X^2$	54,5	45,5
		TMA (°C)	$Y = 331,13 - 29,955X + 0,7279X^2$	34,5	100,0
Coffs Harbour 9753	i-alt (m/ano)	Precipt (mm)	$Y = -57,31 + 0,093X - 0,00004X^2$	62,1	37,7
		TMin-Med (°C)	$Y = 31,58 - 3,3818X + 0,0997X^2$	67,7	30,4
		TMax-Med (°C)	$Y = -212 + 15,733X - 0,2862X^2$	46,5	100,0
		TMA (°C)	$Y = 105,7 - 9,5737X + 0,2227X^2$	66,5	32,4
	i-as (cm ² /ano)	Precipt (mm)	$Y = -322,42 + 0,513X - 0,0002X^2$	51,5	48,5
		TMin-Med (°C)	$Y = 414,08 - 45,072X + 1,2915X^2$	52,5	47,5
		TMax-Med (°C)	$Y = -1099,5 + 84,949X - 1,5896X^2$	41,4	100,0
		TMA (°C)	$Y = 1288,7 - 116,42X + 2,6722X^2$	69,6	30,4

R²: Coeficiente de determinação. Sig (%) nível de significância dos ajustes dos modelos quadráticos pelo teste F de Fisher.

Os ajustes para a variável dependente de i-as, considerando a variável climática Precipt, foram menos expressivos que para i-alt, sendo a procedência Atherton- 48 a que teve melhor ajuste com R² de 69,7 e nível de significância pelo teste de F de 16,7 % (Tabela 4).

Após os ajustes do modelo quadrático apresentados na tabela 4, e utilizando apenas aqueles relativos a influência da variável independente (Precipit) nas variáveis dependentes (i-alt e i-as), representamos graficamente as curvas de normas de reação das quatro referidas procedências (figura 3 e 4). Essas representações das normas de reação foram feitas para as condições de precipitação ocorridas no período de 1975 a 1979, nas regiões de Minas Gerais (Cataguases, Lavras, Paraopeba, Sete Lagoas e Viçosa) e do Espírito Santo (Aracruz e São Mateus). Observa-se que, tanto para i-alt, quanto para i-as a procedência Atherton – 48 foi a que mais se destacou e apresentou uma forma mais típica para a expressão da norma de reação às variações nos níveis de precipitação. Isso ocorreu devido ao melhor ajuste do modelo quadrático, como foi apresentado anteriormente.

Considerando a definição de Larcher (2001) de que o estresse é resultante de um desvio significativo da condição ótima do meio para a vida e considerando que a vitalidade das árvores se torna mais reduzida à medida que o referido desvio se torna mais expressivo, podemos, portanto, interpretar, por comparações entre as curvas de desempenho no crescimento (i-alt e i-as) das quatro referidas procedências (figuras 3 e 4), que a procedência Atherton - 48 é a que menos se estressa quando o referido desvio se distancia da condição ideal para o crescimento das plantas. Portanto, além de maior taxa de crescimento, é razoável sugerir que a referida procedência apresenta maior plasticidade fenotípica que as demais.

Pelas figuras 3 e 4, observa-se que os pontos ótimos nos níveis de precipitação variam entre as procedências estudadas e, portanto, torna-se factível estimar a distância climática ótima referente aos níveis de precipitação nos locais de cada procedência com relação ao ponto ótimo de precipitação nos locais de destino no Brasil.

Os Pontos Ótimos dos níveis de precipitação para cada procedência ($P_{o,i}$), para promoção de maior taxa de crescimento das procedências australianas cultivadas no Brasil foram calculados de acordo com os ajustes apresentados na Tabela 4, tomando a primeira derivada da equação quadrática.

$$\text{Assim, estimou-se } P_{o,i} = -\beta_{1i}/2 \cdot \beta_{2i}.$$

Figura 3. Incremento Médio Anual de Altura (i-alt) de quatro procedências de *E. grandis*, relacionado a quantidade de precipitação em áreas cultivadas de Minas Gerais (Cataguases, Lavras, Paraopeba, Sete Lagoas e Viçosa) e Espírito Santo (Aracruz e São Mateus)

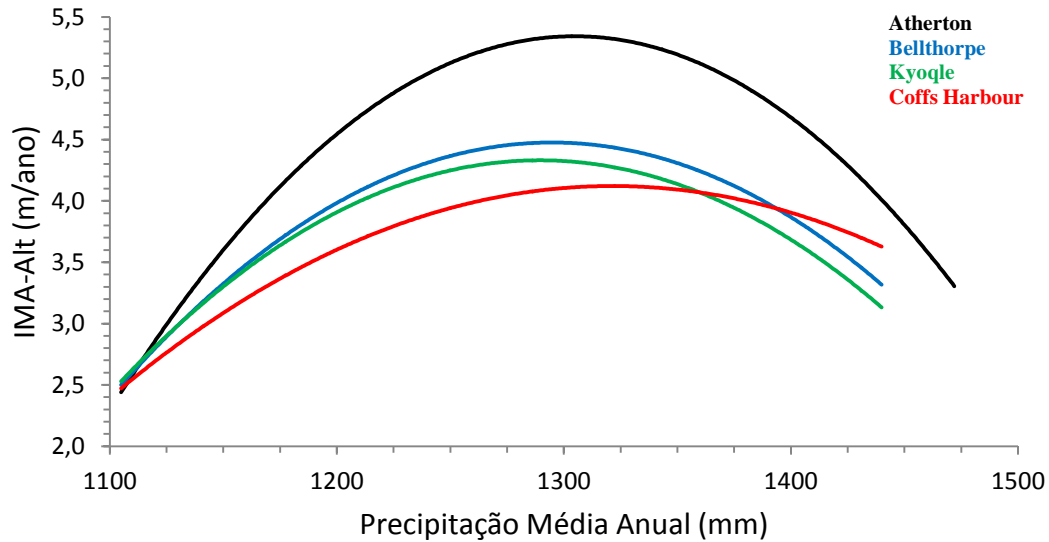
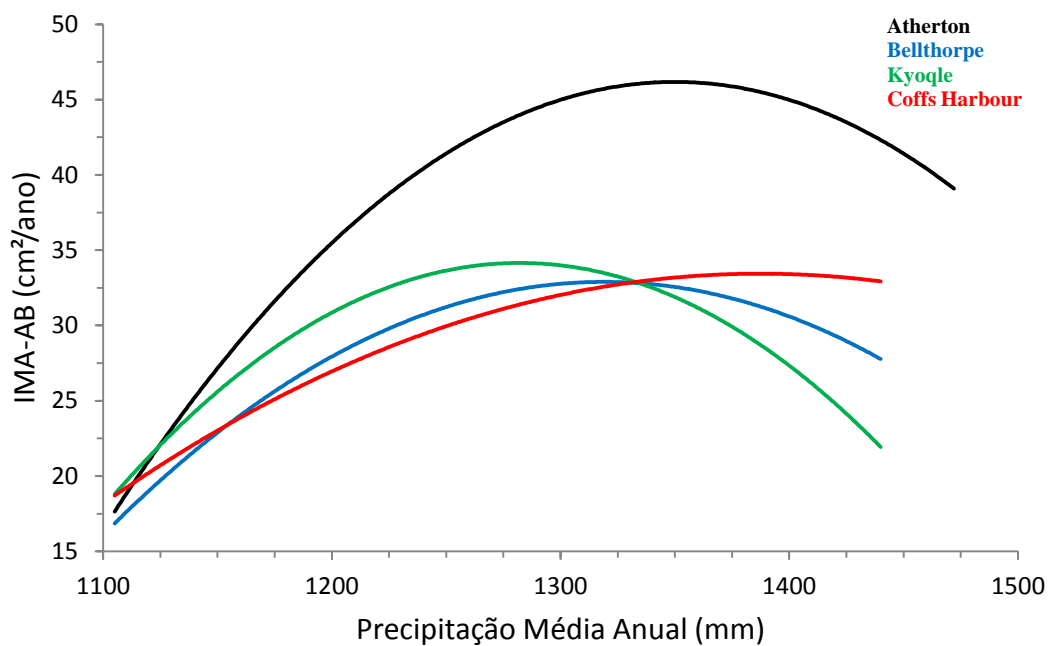


Figura 4. Incremento Médio Anual de Área Seccional (i-as) de quatro procedências de *E. grandis*, relacionado a quantidade de precipitação em áreas cultivadas de Minas Gerais (Cataguases, Lavras, Paraopeba, Sete Lagoas e Viçosa) e Espírito Santo (Aracruz e São Mateus)



A partir das referidas estimativas e dos valores de precipitação ocorridos nos locais de procedências, pode-se, portanto, estimar a Distância Climática Ótima ($DC_{o,i}$), para a variável Precipitação. Essas estimativas de $DC_{o,i}$ foi feita pela diferença entre os níveis ótimo de precipitação ocorridos nos locais de destino no Brasil ($P_{o,i}$) e a precipitação média total nos locais de procedências na Austrália, para se alcançar a máxima taxa de crescimento (i-alt ou i-as) na procedência e o $P_{o,i}$. A $DC_{o,i}$, é a que se encontra mais próxima de zero, ou seja a precipitação na procedência é semelhante ao local de cultivo no Brasil.

Tabela 5. Pontos Ótimos de Precipitação ($P_{o,i}$) e Distância Climática Ótima (DC_o) nos sites de testes no Brasil

Variável Dependente	Procedência	Precipitação Média Anual (mm)	Ponto Ótimo de Precipitação (mm)	Distância Ótima de Precipitação (mm)
i-alt	Atherton 48	1013	1357	344
	Bellthorpe 10696	983	1420	437
	Kyoqle 9535	1218	1360	142
	Coffs Harbour 9753	1484	1162	-322
i-as	Atherton 48	1013	1284	271
	Bellthorpe 10696	983	1155	172
	Kyoqle 9535	1218	1257	39
	Coffs Harbour 9753	1484	1283	-201

Após essas estimativas das distancias ótimas de precipitação, utilizamos o modelo linear simples (figuras 5 e 6), como proposto por Pedlar e Macknney (2017), considerando a variável precipitação, para quatro outras procedências já testadas em Viçosa – MG e Lavras - MG, sendo as procedências de números 5, 6, 7 e 8, referentes a Gympie, Atherton Dist., Jimna Sub. Dist. e Kenilworth, respectivamente.

Adicionalmente, as figuras 5 e 6 apresentam as distâncias ótimas de precipitação, estimadas pelo referido modelo, de sete procedências ainda não testadas no Brasil, disponíveis para venda e previamente selecionadas no site da Australian Tree Seed Centre (<http://www.csiro.au/ATSCOrdering/GetSpecies.aspx>). A seleção prévia dessas procedências, identificadas no gráfico com os números 9, 10, 11, 12,13, 14 e 15, são referentes a N. Buladelah, Cherry Tree SF, Collombatti SF, Bagawa SF, Mapleton, MT Lindsay e Orara West SF, respectivamente, tendo como critério a suas localizações na Austrália com precipitação anual média compatível com a amplitude definida pelo ajuste envolvendo as quatro procedências já testadas no Brasil.

O ajuste do referido modelo apresentou um R^2 de 98,47% e 93,75%, para i-alt e i-as, tendo níveis de significativo pelo teste F de 0,8 e 3,2%, respectivamente.

Analisando a Figura 5, para i-alt, verificou-se que das procedências utilizadas para ajuste do modelo, a nº 3 (Kyoqle), foi a que esteve mais próxima da distância ótima estimada, entretanto, essa procedência não foi a que apresentou maior crescimento em altura, na maioria dos sites de teste no Brasil, utilizados para o ajuste do modelo (Tabela 3).

A procedência nº 1 (Atherton) foi a que apresentou maior crescimento em altura dentre as que foram utilizadas para ajuste do modelo, conforme Tabela 3, porém, conforme o gráfico foi a que ficou mais longe da distância ótima de crescimento, seguindo padrões semelhantes para as distâncias ótimas às procedências: 2 (Bellthorpe), 5 (Gympie), 6 (Atherton Dist.), 7 (Jimna Sub. Dist.) e 8 (Kenilworth).

Nessa contradição deve ser considerado que a distância ótima foi mais alta, porém positiva, ou seja, é uma procedência com volume de precipitação menor que os ocorridos nos locais de cultivo no Brasil, sugerindo que nessa variação positiva pode não acarretar prejuízos na taxa de crescimento.

Figura 5. Distância Ótima Estimada (DOE) de Precipitação para Incremento Médio Anual de Altura (i-alt) das procedências utilizadas no ajuste do modelo linear (1, 2, 3, 4), das procedências testadas em Lavras e Viçosa (5, 6, 7, 8) e das simuladas para futuros testes no Brasil (9, 10, 11, 12, 13, 14, 15).

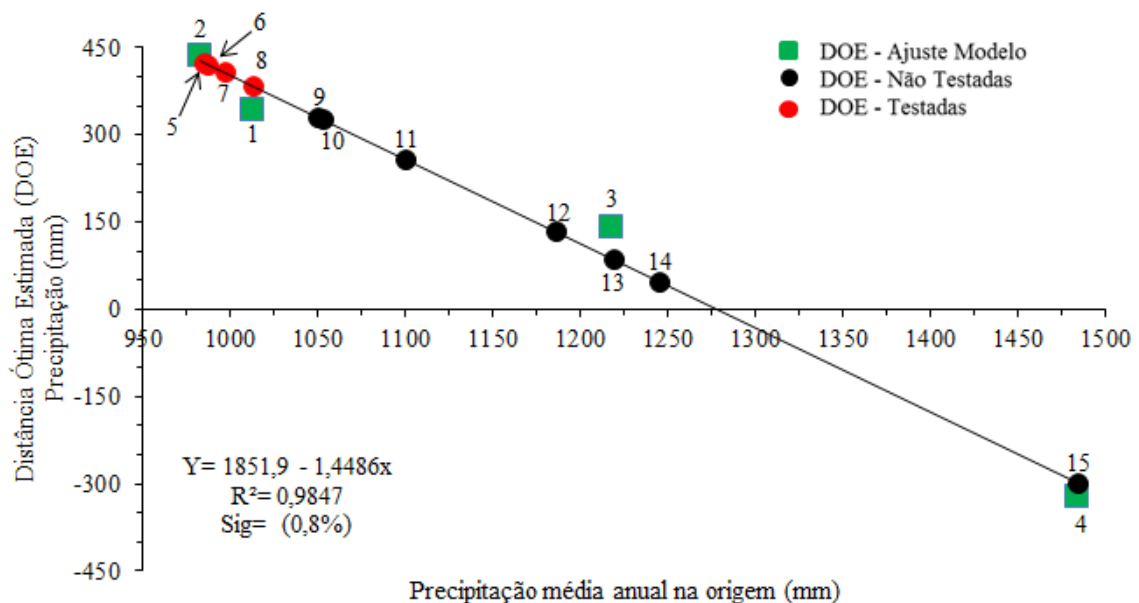
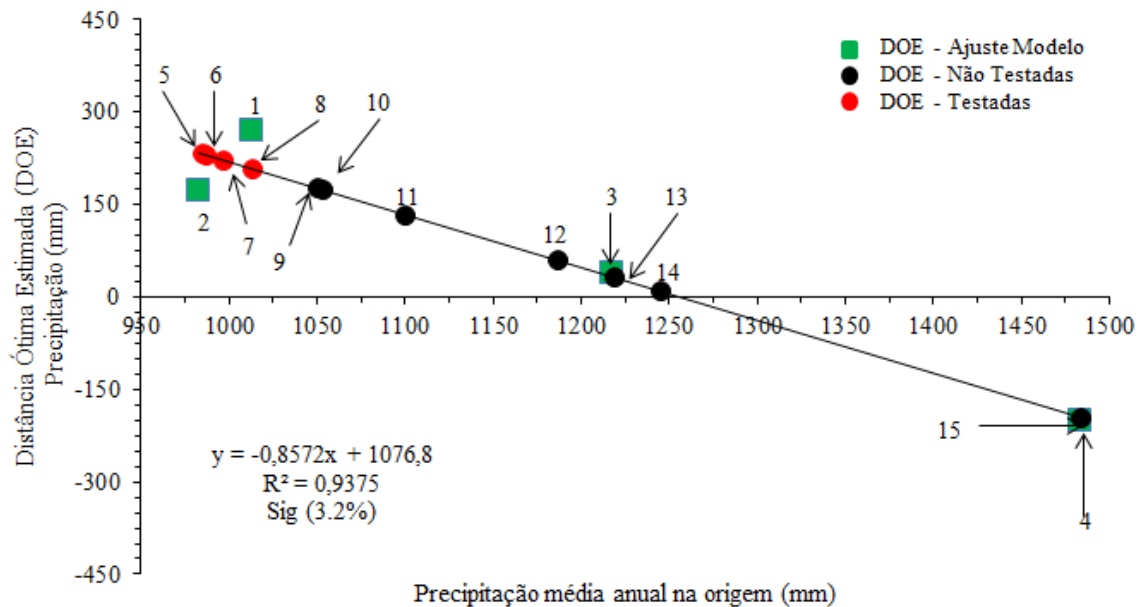


Figura 6. Distância Ótima Estimada (DOE) de Precipitação para Incremento Médio Anual de Área Seccional (i-as) das procedências utilizadas no ajuste do modelo linear (1, 2, 3, 4), das procedências testadas em Lavras e Viçosa (5, 6, 7, 8) e das simuladas para futuros testes no Brasil (9, 10, 11, 12, 13, 14, 15).



Analisando a Figura 6, para i-as, verificou-se que das procedências australianas utilizadas para ajuste do modelo, novamente a nº 3 (Kyoqle), foi a que esteve mais próxima da distância ótima estimada, entretanto, essa procedência não foi a que apresentou menor desenvolvimento de área seccional, na maioria dos sites de teste no Brasil, utilizados para o ajuste do modelo (Tabela 3).

As demais procedências também apresentaram desenvolvimento semelhante ao que foi apresentado na análise da Figura 5, levando a crer que tanto o crescimento em altura, como o de área seccional estão em sintonia com o que foi apresentado nos dois gráficos, ocorrendo poucas diferenças entre eles.

Contudo vale salientar que esses resultados são para as condições de precipitação em uma escala de tempo específico, curto e sem registros de déficits hídricos relativamente severos. Esse tempo transcorreu entre os anos de 1975 a 1979. Assim, esse fato não propicia as garantias de plasticidade fenotípica em momentos de secas relativamente severas.

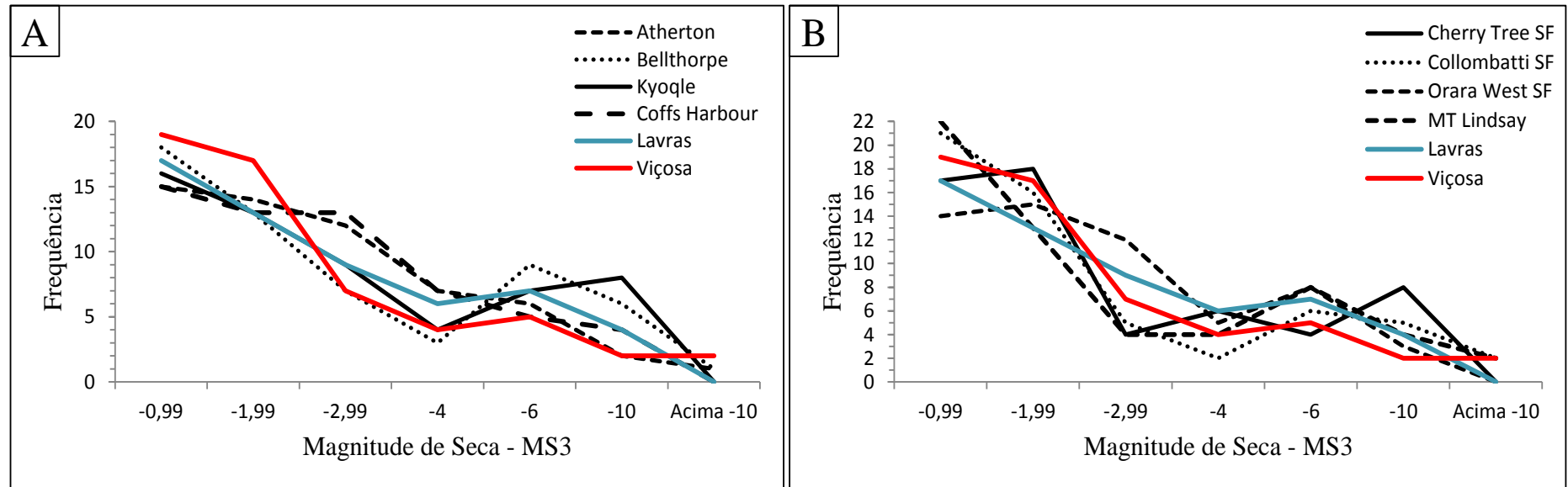
Visando o fornecimento de maiores garantias para as estimativas da plasticidade fenotípica, avaliamos pela metodologia proposta por Mckee, Doesken e Kleist (1993) as

magnitudes de seca, utilizando os dados históricos de precipitações ocorridas entre os anos de 1961 a 2017, ou seja; com abrangência de 57 anos. Dessas observações, considerando os locais das procedências australianas e de cultivo no Brasil, pode-se avaliar a frequência de picos de seca, as quais são apresentadas na figura 7.

Assim, a figura 7A representa os locais de testes no Brasil, em Lavras/MG e Viçosa/MG com as procedências australianas testadas. De acordo com os resultados apresentados anteriormente, a procedência que apresentou melhor distância ótima de crescimento, tanto para i-alt, como para i-as, foi a de Kyoqle, a qual nesse gráfico não apresentou registro de magnitude de seca abaixo de -10, mas por outro lado a procedência apresentou oito ocorrências entre os picos de -6 a -10, sendo a que teve maior número dentre as testadas, para esses picos, os quais também podem ser considerados como fortes secas.

A cidade de Lavras apresentou para esse intervalo (-6 a -10), uma frequência de quatro picos, além de nenhum pico de magnitude seca abaixo de -10. Já Viçosa, apresentou para o intervalo de -6 a -10, uma frequência de quatro picos, assim como em Lavras, porém com uma ocorrência de dois picos de magnitude de seca abaixo de -10, tornando esse site de teste um local com maior previsibilidade de ocorrências de secas mais intensas que Lavras, o que poderia resultar em maiores índices de mortalidade.

Figura 7. Frequência de picos de Magnitude Seca (MS-3) nos locais de teste Lavras/MG e Viçosa/MG com locais das procedências australianas utilizadas para ajuste do modelo (7-A) e com procedências australianas de melhores distâncias ótimas de precipitação não testadas (7-B)



A procedência Coffs Harbour apresentou picos menos intensos de seca, com somente quatro registros entre -6 e -10, além de nenhum abaixo de -10, concentrando essas ocorrências em magnitudes de secas menores, o que pode tornar essa procedência menos resistente a secas mais intensas, dentre as quatro que foram testadas em Lavras e Viçosa.

Atherton apresentou um total de 28 picos de secas e as intensidades foram semelhantes as que ocorreram em Lavras, porém menores do que em Viçosa, com somente dois picos entre -6 e -10 e um abaixo de -10, o que pode tornar essa procedência menos tolerante à seca, caso algum evento de elevado déficit hídrico venha a ocorrer novamente, na cidade de Viçosa.

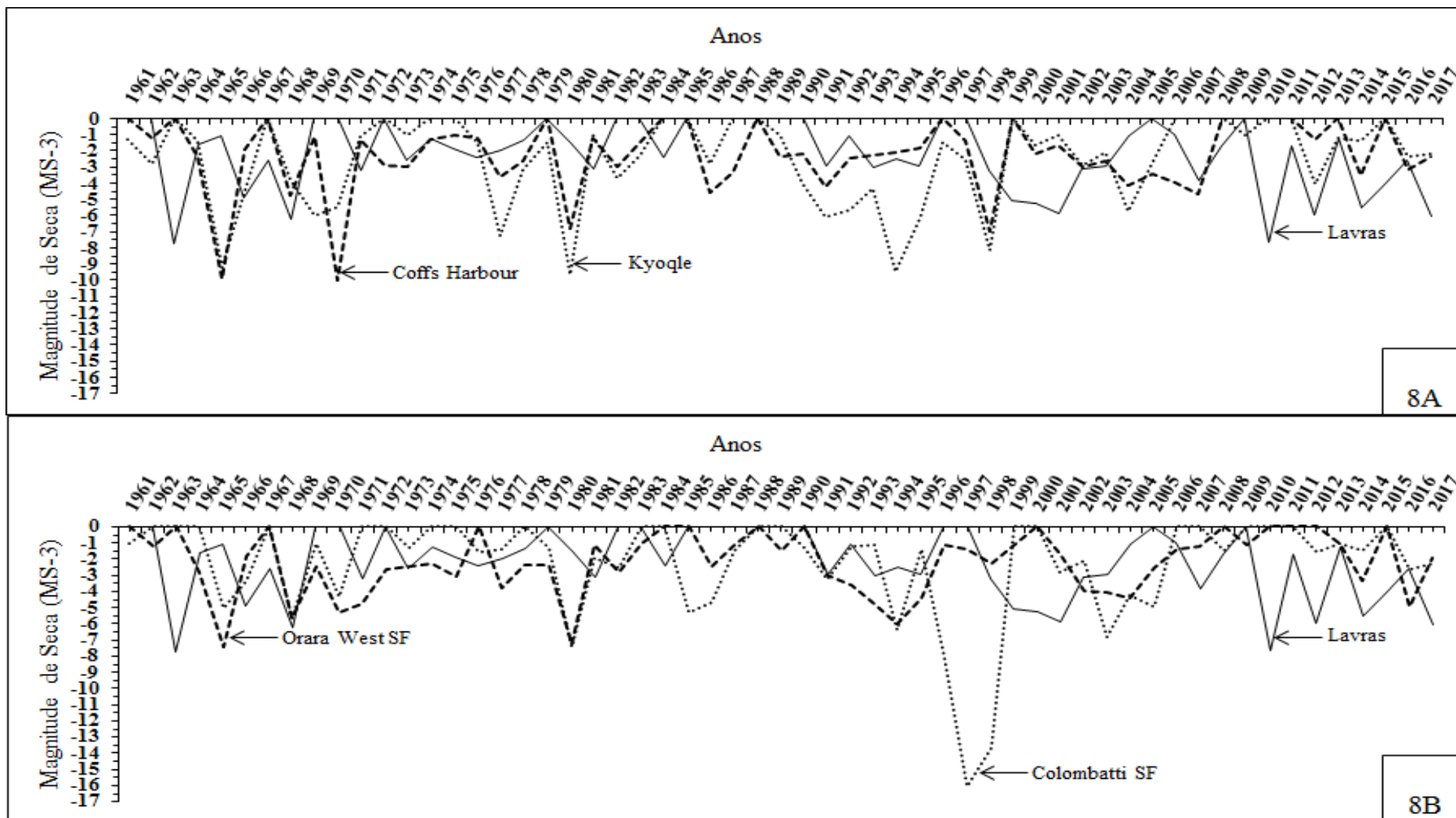
A procedência Bellthorpe apresentou um total de 25 registros de secas, mas com intensidades de picos maiores do que Lavras, porém menores do que Viçosa, com destaque para seis registros entre -6 e -10 e um abaixo de -10, tornando essa procedência mais susceptível a períodos de secas prolongadas, quando cultivada em Lavras.

Cabe destacar que as medidas de crescimento, ou seja, incremento médio de área seccional (i-as) e incremento médio de altura (i-alt) das procedências testadas foram obtidas de mensurações ocorridas entre os anos de 1975 e 1979, quando as espécies de *E. grandis* contavam com idades de 3,5 e 4,5 anos, período em que praticamente não ocorreram secas expressivas nas cidades de Lavras e Viçosa, o que explica maior desenvolvimento da procedência Atherton, a qual encontrou ambiente favorável de crescimento.

A Figura 7-B representa os locais de testes no Brasil, em Lavras/MG e Viçosa/MG com projeções futuras de secas com as procedências australianas não testadas e que apresentaram melhores distâncias ótimas de crescimento. Assim poderemos prever secas futuras e apontar qual delas seria mais resistente a estresses hídricos.

A procedência Cherry Tree SF assemelha-se bastante a Kyoqle, apresentando oito ocorrências entre os picos de -6 a -10 e nenhum abaixo de -10, o que lhe confere boa resistência à seca. Outras procedências que também apresentaram históricos de secas intensas foram Collombatti SF e MT Lindsay, com cinco e quatro picos entre -6 e -10, respectivamente, além de duas ocorrências abaixo de -10, cada uma, tornando essas duas, possivelmente as mais aptas a serem cultivadas em Lavras e Viçosa. A procedência Orara West SF demonstrou ser a mais vulnerável entre as não testadas, com somente três históricos entre -6 e -10, além de nenhum registro abaixo de -10, concentrando suas secas em patamares menos intensos.

Figura 8. Gráficos de Magnitudes de Secas para o município de Lavras com a melhor e a pior procedência testada utilizada para ajuste do modelo (8A) e com a melhor e a pior procedência não testada (8B), considerando ainda as distâncias ótimas de crescimento.



Na série histórica de 1961 a 2017, Lavras apresentou um total de 26 registros de secas, com destaque para a década de 60 que contou com episódios de déficits hídricos, podendo se repetir num futuro próximo, tendo em vista a previsibilidade desses eventos. As décadas de 70, 80 e 90 apresentaram eventos de seca, porém nenhum deles próximos da magnitude dos picos que ocorreram nos anos 60. A partir daí, nos anos de 2000 em diante, as secas ocorreram de maneira mais contundente, demonstrando grande déficit hídrico de precipitação para o período, o que poderia resultar em índices elevados de mortalidade de plantas não resistentes e/ou resilientes à seca.

A procedência Kyoqle (Figura 8-A), foi determinada como a mais adequada para cultivo em Lavras e que também apresentou melhor distância ótima de precipitação, porém não foi a que apresentou melhor plasticidade fenotípica e teve 27 registros de secas, com destaque para picos entre -6 e -10, tornando essa procedência mais resistente a períodos de secas prolongadas, sendo a que apresentou picos mais intensos em termos quantitativos.

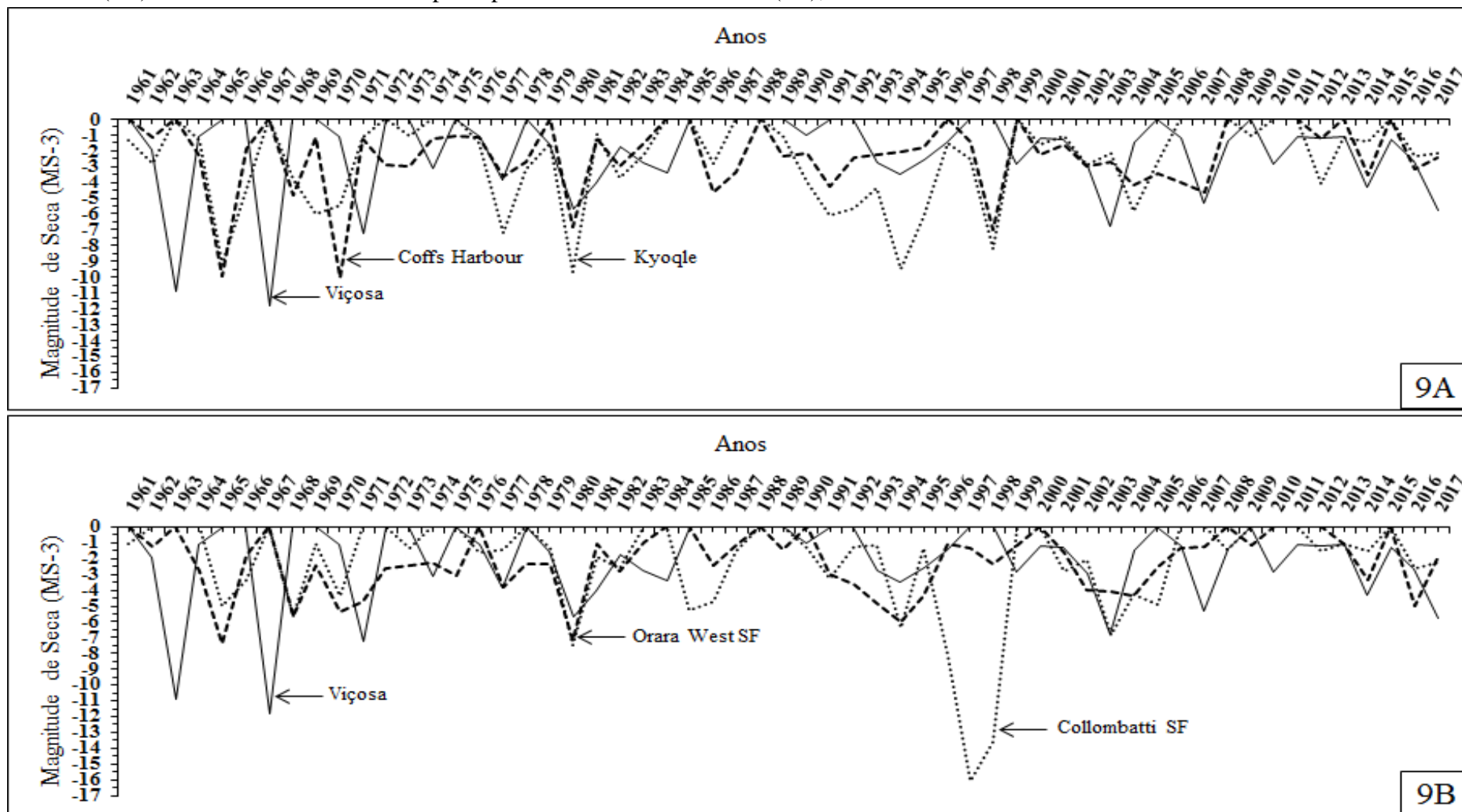
A procedência Coffs Harbour (11-B) apresentou um total de 27 registros de seca, porém menos intensas, com quatro registros entre -6 e -10, além de nenhum abaixo de -10, tornando-a, uma espécie mais vulnerável a déficits hídricos, o que poderia resultar em numerosa mortalidade, porém estaria apta a ser cultivada em Lavras.

Conforme resultados anteriores, algumas procedências foram selecionadas para análises das magnitudes de seca, em relação à cidade de Lavras, tendo em vista os seus pontos ótimos de precipitação, o que as tornam árvores promissoras no tocante a desenvolvimento e crescimento.

Collombatti SF apresentou um total de 19 ocorrências de secas e picos elevados, em termos de intensidade, com destaque para aqueles ocorridos entre 94 e 98, por apresentarem grande intensidade, demonstrando ser uma procedência resistente a déficits hídricos.

Orara West SF apresentou 27 secas, sendo mais numerosas das que as outras três procedências não testadas, entretanto a intensidade dos picos foram bem menores, os quais indicam que a procedência possui históricos de poucos estresses hídricos, em termos de intensidade.

Figura 9. Gráficos de Magnitudes de Secas para o município de Viçosa com a melhor e a pior procedência testada utilizada para ajuste do modelo (9A) e com a melhor e a pior procedência não testada (9B), considerando ainda as distâncias ótimas de crescimento.

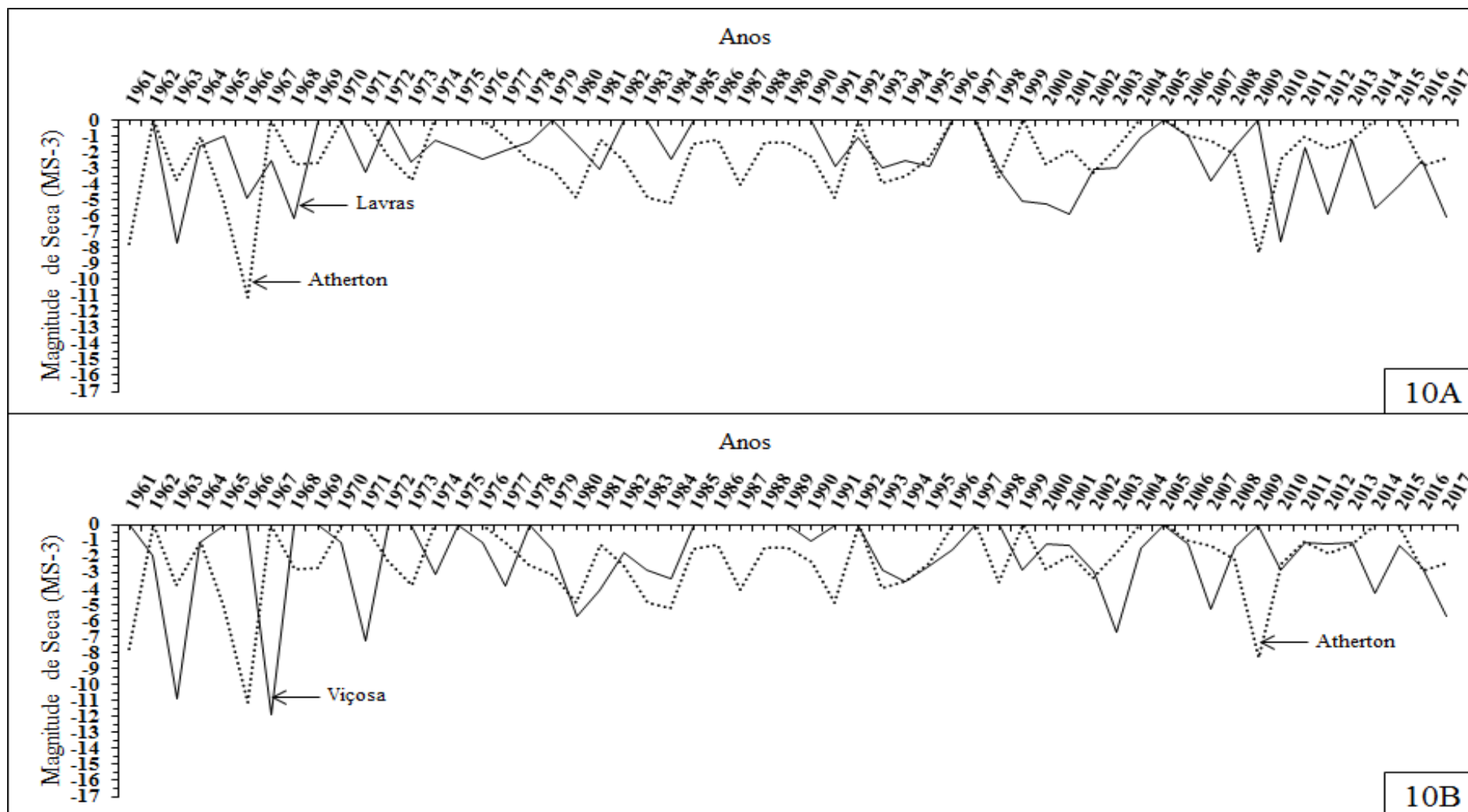


A cidade de Viçosa apresentou um total de 21 registros de secas, sendo esses menos numerosos do que Lavras, porém as intensidades dos picos foram maiores, tornando esse site de teste um local mais susceptível a ocorrências de estresses hídricos intensos, destacando dois episódios abaixo de -10, durante a década de 60, demonstrando grande déficit hídrico para o período, o que poderia resultar em índices elevados de mortalidade de plantas não resistentes e/ou resilientes à seca.

As Magnitudes de secas das procedências Kyoqle e Coffs Harbour já foram descritas após a figura 8, cabendo destacar que quando cultivadas em Viçosa a previsibilidade de intensidades de picos de secas são ainda mais prováveis de ocorrer, necessitando assim o cultivo de procedências mais resistentes à seca e semelhantes a Kyoqle, onde deveria-se evitar o cultivo da procedência Coffs Harbour.

A procedência não testada Collombatti SF possui histórico relevante de exposição a picos de secas mais intensos, estando apta a ser cultivada em Viçosa, entretanto, a procedência Orara West SF demonstrou menores intensidades de picos de secas, apesar de apresentar maior número, mas com intensidades inferiores a Viçosa.

Figura 10. Gráficos de Magnitudes de Secas para os municípios de Lavras e Viçosa com a procedência Atherton que apresentou melhor plasticidade fenotípica e maior desenvolvimento conforme Tabela 3.



Conforme Tabela 3, a procedência Atherton foi a que apresentou melhor plasticidade fenotípica e maior desenvolvimento tanto em i-alt como em i-as, entretanto, foi a que apresentou maior distância estimada ótima de precipitação, ainda levando em consideração que as condições de crescimento foram obtidas entre 1975 e 1979, período em que não ocorreram secas expressivas nos sites de testes do Brasil.

Observando a figura 10-A, Lavras apresentou déficits hídricos menores do que Atherton, a qual também apresentou um pico de seca abaixo de -10 e um padrão semelhante de magnitudes de secas, sendo essa procedência indicada para cultivo na cidade de Lavras. Já em relação à Viçosa (figura 10-B), Atherton se assemelha ao site de teste, que apresentou dois picos abaixo de -10, devendo essa procedência também ser indicada para cultivo.

GOLFARI (1975) e GOLFARI; CASER; MOURA (1978) realizaram o importantíssimo zoneamento ecológico do estado de Minas Gerais e Brasil para a cultura do eucalipto. A partir desses trabalhos iniciaram-se as pesquisas, principalmente no campo da silvicultura e melhoramento genético, que, hoje, coloca o Brasil em condições de destaque em diferentes cenários relacionados à produtividade nos cultivos da referida cultura.

Esse zoneamento ecológico basicamente se fundamentou nas similaridades de clima entre as procedências de sementes na Austrália e as diferentes regiões disponíveis para cultivo no Brasil. A partir dessas similaridades várias espécies de *Eucalyptus*, dentre elas destaca-se o *Eucalyptus grandis*, foram indicadas para uso em programas de reflorestamentos nas diferentes condições bioclimáticas brasileiras. Entretanto, o avanço tecnológico de cultivos dessas espécies, principalmente no campo da genética e fisiologia florestal, possibilitaram a produção de árvores geneticamente selecionadas e clonadas para uma nova silvicultura, que foi denominada de silvicultura clonal. Tal avanço propiciou grande aumento na produtividade dos *Eucalyptus*. Porém, os recentes e mais frequentes episódios de seca em várias regiões bioclimáticas brasileiras revelaram um importantíssimo “trade-off” na silvicultura clonal, revelado por um grande aumento na mortalidade de árvores decorrente do estreitamento da base genética, tornando as árvores cultivadas mais vulneráveis às deficiências hídricas do solo.

Portanto, para reduzir os danos causados pela seca nas plantações de *Eucalyptus* no Brasil, é crucial caracterizá-la de forma precoce ou antecipada, tanto em escalas regionais das procedências quanto nos sites de cultivo no Brasil. Assim, também por similaridades de clima

entre as mencionadas escalas regionais, propomos o modelo de comparações apresentado nas figuras 8 a 10, para a verificação de similaridades das magnitudes de secas (MS-3), considerando às procedências mais indicadas para cultivo dentre as testadas, Kyoqle (8-A e 9-A), a menos indicada Coffs Harbour (8-A e 9-A) e Atherton (10-A e 10-B), que apresentou melhor plasticidade fenotípica, além das procedências não testadas com Collombatti SF (8-B e 9-B) sendo a mais indicada e Orara West SF (8-B e 9-B) a menos indicada, por estarem em distâncias ótimas de precipitação estimadas. Portanto, os resultados antecipados de tolerância/resiliência apresentados somente poderão ser úteis para um processo de migração assistida de procedências australianas para os referidos municípios mineiros.

As magnitudes de seca apresentadas nas figuras 8 a 10, ocorridas entre os anos de 1961 e 2017 são para um período de tempo de 57 anos, sendo, portanto superior, aos 30 anos de dados históricos mensalmente contínuos, tal como recomendado por World Meteorological Organization (WMO) para adequada estimativa do IPP e, portanto, para a magnitude de seca.

Conforme Kinoshita e Jacobsen (2012), as plantas têm um enorme potencial para utilizar a adaptação do estresse epigenético, onde as condições ambientais experimentadas pela geração parental são herdadas pela exposição a estresses. As plantas não têm uma linha germinativa sequestrada em comparação aos animais, mas desenvolvem suas células germinativas relativamente tarde em seu ciclo de vida diretamente das células meristemáticas e qualquer alteração epigenética adquirida durante o crescimento vegetativo pode ser transmitida para as gerações futuras.

Um aspecto intrigante dos mecanismos de defesa das plantas, onde processos epigenéticos poderiam desempenhar um papel, é o priming (BRUCE et al., 2007). Isso descreve um tipo de memória de estresse que permite responder mais rápido ou mais forte a um estímulo recorrente, quando a planta foi previamente "preparada" (HILKER et al., 2016; MAUCH-MANI et al.; 2017). Considera-se que o priming ocorre dentro da mesma geração, mas são imagináveis efeitos transgeracionais que se estendem à geração seguinte (HERMAN e SULTAN, 2011; BALMER et al.; 2015). Embora ainda haja evidências experimentais limitadas para isso, o potencial que a memória epigenética poderia desempenhar para a adaptação ao estresse transgeracional foi discutido em várias revisões (GUTZAT e MITTELSTEN, 2012; HOLESKI et al.; 2012; SAHU et al.; 2013; CRISP et al.; 2016). A versatilidade das mudanças epigenéticas tornou-se responsável por alguns dos fenômenos

primários clássicos, pois eles permitem uma adaptação temporária em uma espécie de “memória de curto prazo” dentro da vida de uma planta.

Kinoshita e Seki (2014) sugerem que há evidências crescentes de que os mecanismos epigenéticos contribuem para respostas de estresse e memória nas plantas. Portanto, é tentador especular que muitas das respostas transgeracionais observadas às condições de estresse poderiam ser atribuídas a mecanismos epigenéticos.

Portanto, conforme descrito nas figuras 7 a 10, devido à “memória de estresse”, algumas procedências podem ter o seu desenvolvimento comprometido ou até mesmo atingir a mortalidade quando cultivadas em ambientes de ocorrências de secas mais intensas, simplesmente porque essa procedência, de acordo com o seu histórico de secas, possivelmente não foram susceptíveis às mudanças epigenéticas na sua estrutura básica.

Assim, a procedência Coffs Harbour, a princípio não estava apta a ser cultivada em Viçosa, ao contrário de Kyoqle que ainda apresentou a melhor distância ótima de crescimento. A procedência Atherton poderia ser cultivada tanto em Lavras como em Viçosa. Deve-se também descartar Orara West SF, para esses sites de cultivo, apesar de apresentar picos de secas, as intensidades das secas foram bem inferiores a Lavras e Viçosa. Ainda dentre as procedências não testadas Collombatti SF, Cherry Tree SF e MT Lindsay apresentaram relevante distância ótima de crescimento e histórico de secas semelhantes a Lavras e Viçosa, tornando-as indicadas para cultivo nesses locais.

6. CONCLUSÃO

Dentre as curvas das normas de reação, a procedência Atherton se destacou das demais, sendo esta a com maior plasticidade fenotípica.

As procedências Belltorpe, Kyoqle, Collombatti SF, Cherry Tree SF e MT Lindsay foram indicadas para cultivo tanto em Lavras como em Viçosa. Coffs Harbour deveria ter sido cultivada somente em Lavras e a procedência Orara West SF foi contra indicada para cultivo nos dois sites de teste.

Podemos concluir que tanto o trabalho de Pedlar e Macnney, referente ao cálculo das distâncias ótimas de crescimento de plantas, como o de Mackee, no tocante as magnitudes de seca, possuem importância impar. Não há como mensurar qual deles tem maior importância. De um lado, podemos agora estabelecer distâncias ótimas de crescimento em relação a variáveis climáticas e de acordo com a particularidade do local de cultivo e por outro lado, podemos prever estresses hídricos por meio do histórico de chuvas de um determinado local, por meio do cálculo das magnitudes de seca, entre a procedência e o local de plantio futuro. Assim, um trabalho é complemento do outro, o que os tornam ainda mais eficazes quando utilizados em conjunto.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AITKEN, S. N.; WHITLOCK, M. C. Assisted gene flow to facilitate local adaptation to climate change. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, v. 44, p. 367, 2013.

ANDALO, C.; BEAULIEU J.; BOUSQUET, J. The impact of climate change on growth of local white spruce populations in Quebec, Canada. **Forest Ecology and Management**, v. 205, p. 169-182, 2005.

ARNOLD, P. A.; KRUK, L. E. B.; NICOTRA, A. B. How to analyse plant phenotypic plasticity in response to a changing climate. **New Phytology**, 2019.

BADEAU, V.; BECKER, M.; BERT, D.; DUPOUEY, J. L.; LEBOURGEOIS, F.; PICAR, J. F. Long-term growth trends of trees: ten years of dendrochronological studies in France. **Heidelberg**, p. 167-181, 1996.

BALMER, A.; PASTOR, V.; GAMIR, J. et al. The “prime-ome”: towards a holistic approach to priming. **Trends Plant Sci**, v. 20, p. 443–452, 2015.

BAUERLE, W. L.; OREN, R.; WAY, D. A.; QIAN, S. S.; STOY, P. C.; THORNTON, P. E.; BOWDEN, J. D.; HOFFMAN, F. M.; REYNOLDS, R. F. Photoperiodic regulation of the seasonal pattern of photosynthetic capacity and the implications for carbon cycling. **Proc Natl Acad Sci USA**, v. 109, p. 8612-8617, 2012.

BHALME, H. N.; MOOLEY, D. A. Large-scale drought/floods and monsoon circulation. **Mon. Wea. Rev.**, v. 108, p. 1197, 1980.

BOREAU OF METEOROLOGY – BOM. **Disponível em**
<http://www.bom.gov.au/climate/data>.

BRACANNOT, P.; HARRISON, S. P.; KAGEYAMA, M.; BARTLEIN, P. J.; MASSON-DELMOTTE, V.; ABE-OUCHI, A.; OTTO-BLIESNER, B.; ZHAO, Y. Evaluation of climate models using paleoclimatic data. **Nature climate change**, v. 1456, n. 2, p. 417-424, 2012.

BREED, M. F.; LOWE, A. J.; MORTIMER, P. E. Restoration: “Garden of Eden” unrealistic. **Nature**, v. 533, p. 469, 2016.

BRITO, J. O. et al. Análise da produção energética e de carvão vegetal de espécies de eucalipto. **Boletim do Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais**, Piracicaba, n. 23, p. 53-56, abr. 1983.

BROADHURST, L. M.; LOWE, A.; COATES, D. J.; CUNNINGHAM, S. A.; MCDONALD, M.; VESK, P. A.; YATES, C. Seed supply for broadscale restoration: maximizing evolutionary potential. **Evolutionary Applications**, v. 1, p. 587–597, 2008.

BRUCE, T. J. A.; MATTHES, M. C.; NAPIER, J. A.; PICKETT, J. A. Stressful “memories” of plants: evidence and possible mechanisms. **Plant Sci**, v. 173, p. 603–608, 2007.

BUCHAROVA, A. Assisted migration within species range ignores biotic interactions and lacks evidence. **Society for Ecological Restoration**, v. 25, n. 1, p. 14–18, 2017.

BURBIDGE, A. A.; BYRNE, M.; COATES, D. Is Australia ready for assisted colonization? Policy changes required to facilitate translocations under climate change. **Pacific Conservation Biology**, v. 17, p. 259–269, 2011.

CAMARERO, J. J.; OLANO, J. M.; PARRAS, A. Plastic bimodal xylogenesis in conifers from continental Mediterranean climates. **New Phytol**, v. 185, p. 471-480, 2010.

CAMARERO, J. J.; FRANQUESA, M.; SANGUESA-BARREDA, G. Timing of drought triggers distinct growth responses in Holm Oak: implications to predict warming-induced forest defoliation and growth decline. **Forests**, v. 6, p. 1576, 2015.

CHRISTMAS, M. J.; BREED, M. F.; LOWE, A. J. Constraints to and conservation implications for climate change adaptation in plants. **Conservation Genetics**, v. 17, p. 305–320, 2016.

CLAUSEN, J.; KECK, D. D.; HIESEY, W. M. Experimental Studies on the Nature of Species. Effect of Varied Environments on Western North American plants. **Carnegie Institute of Washington**, Publicação, n. 520, Washington, DC, 1940.

CRISP, P. A.; GANGULY, D.; EICHTEN, S. R. et al. Reconsidering plant memory: intersections between stress recovery, RNA turnover, and epigenetics. **Sci Adv**, v. 2: e1501340–e1501340, 2016.

- CROWE, K.A.; PARKER, W. H. Using portfolio theory to guide reforestation and restoration under climate change scenarios. **Climatic Change**, v. 89, p. 355–370, 2008.
- CUNNINGHAM, S. A.; SUMMERHAYES, B.; WESTOBY, M. Evolutionary divergences in leaf structure and chemistry, comparing rainfall and soil nutrient gradients. **Ecological Monographs**, v. 69, p. 569–588, 1999.
- DAVIS, M. B.; SHAW, R. G.; ETTERSON, J. R. Evolutionary responses to changing climate. **Ecology**, v. 86, p. 1704–1714, 2005.
- DAWSON, T. P.; JACKSON, S. T.; HOUSE, J. I.; PRENTICE, I. C.; MACE, G. M. Beyond Predictions: Biodiversity Conservation in a Changing Climate. **Science**, p. 53–58, 2011.
- DELPUECH, J. M. B.; MORETEAU, J.; CHICHE, E.P.; VOUIDIBIO, J.; DAVID, J. R. Phenotypic plasticity and reaction norms in temperate and tropical populations of *Drosophila melanogaster*: ovarian size and developmental temperature. **Evolution**, v. 49, p. 670-675, 1995.
- DEWITT, T. J. A.; SIH, et al. Costs and limits of phenotypic plasticity. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 13, n. 2, p. 77-81, 1998.
- DIFFENBAUGH, N. S.; FIELD, C.B. Changes in Ecologically Critical Terrestrial Climate Conditions. **Science**, v. 341, p. 486-491, 2013.
- FAIRBANKS, R. G. Flip-flop end to last ice age. **Climate change**. v. 362, p. 495, 1993.
- FLETA-SORIANO, E.; MUNNÉ-BOSCH, S. Stress memory and the inevitable effects of drought: a physiological perspective. **Front Plant Sci**, v. 7, p. 143, 2016.
- FORNER, A.; VALLADARES, F.; BONAL, D.; GRANIER, A.; GROSSIORD, C.; ARANDA, I. Extreme droughts affecting Mediterranean tree species' growth and water-use efficiency: the importance of timing. **Tree Physiology**, p. 1-11, 2017.
- FRASCARIA-LACOSTE, N.; FERNÁNDEZ-MANJARRÉS, J. Assisted colonization of foundation species: lack of consideration of the extended phenotype concept-response to Kreyling et al. (2011). **Restoration Ecology**, v. 20, p. 296–298, 2012.

GALLAGHER, R. V.; MAKINSON, R. O.; HOGBIN, P. M.; HANCOCK, N. Assisted colonization as a climate change adaptation tool. **Austral Ecology**, v. 40, p. 12–20, 2015.

GAVRILETS, S.; SCHEINER, S. M. The genetics of phenotypic plasticity. V. Evolution of reaction norm shape. **J. Evol. Biol.**, v. 6, p. 31-48, 1993.

GIRARDIN, M. P. Negative impacts of high temperatures on growth of black spruce forests intensify with the anticipated climate warming. **Global Change Biology**, v. 22, p. 627-643, 2016.

GOLFARI, L. Zoneamento ecológico do Estado de Minas Gerais para reflorestamento. **Belo Horizonte: Centro de Pesquisa Florestal da Região do Cerrado**, p. 65 (PRODEPEF. Série técnica, 3), 1975.

GOLFARI, L.; CASER, R. L.; MOURA, V. P. G. Zoneamento ecológico esquemático para reflorestamento no Brasil: 2ª aproximação. **Belo Horizonte: Centro de Pesquisa Florestal da Região do Cerrado**, p. 66 (PRODEPEF. Série técnica), 1978.

GRANDA, E.; CAMARERO, J. J.; GIMENO, T.; MARTINEZ-FERNÁNDEZ, J.; VALLADARES, F. Intensity and timing of warming and drought differentially affect growth patterns of co-occurring Mediterranean tree species. **J. For Res**, v. 132, p. 469-480, 2013.

GRAY, L. K.; GYLANDER, T.; MBOGGA, M. S.; CHEN, P. Y.; HAMSNN, A. Assisted migration to address climate change: recommendations for aspen reforestation in western Canada. **Ecological Applications**, v. 21, p. 1591–1603, 2011.

GUTZAT, R.; MITTELSEN, S. O. Epigenetic responses to stress: triple defense? **Curr Opin. Plant Biol**, v. 15, p. 568–573, 2012.

HACKE, U. G.; STILLER, V.; SPERRY, J. S.; PITTERMANN, J.; MCCULLOH, K. A. Cavitation fatigue: embolism and refilling cycles can weaken the cavitation resistance of xylem. **Plant Physiol**, v. 125, p. 779–786, 2001.

HAHN, M. W.; POCKL, M. Ecotypes of planktonic actinobacteria with identical 16S rRNA genes adapted to thermal niches in temperate, subtropical, and tropical freshwater habitats. **Appl Environ Microbiol**, v. 71, p. 766–773, 2005.

- HELDING, D. Globally networked risks and how to respond. **Nature**, v. 497, p. 51–59, 2013.
- HEREFORD, J. A quantitative survey of local adaptation and fitness trade-offs. **Am. Nat.**, v. 173, p. 579–588, 2009.
- HERMAN, J. J.; SULTAN, S. E. Adaptive transgenerational plasticity in plants: case studies, mechanisms, and implications for natural populations. **Front Plant Sci**, v. 2, p. 102, 2011.
- HILKER, M.; SCHWACHTJE, J.; BAIER, M. et al Priming and memory of stress responses in organisms lacking a nervous system. **Biol Rev**, v. 91, p. 1118–1133, 2016.
- HOFFMANN, A. A.; SGRO, C. M. Climate change and evolutionary adaptation. **Nature**, v. 470, p. 479–485, 2011.
- HOLDER, K. K.; BULL, J. J. Profiles of adaptation in two similar viruses. **Genetics**, v. 159, p. 1393–1404, 2001.
- HOLESKI, L. M.; JANDER, G.; AGRAWAL, A. Transgenerational defense induction and epigenetic inheritance in plants. **Trends Ecol Evol**, v. 27, p. 618–626, 2012.
- HOLT, R. D. The microevolutionary consequences of climate change. **Trends Ecol. Evol**, v. 5, p. 311–315, 1990.
- HOUGHTON, J. T.; DING, Y.; GRIGGS, D. J.; NOGUER, M.; VAN DER LINDER, P. J.; DAI, X. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. **Cambridge University Press, Cambridge, UK**, 2001.
- HOWE, G. T.; AITKEN, A. N.; NEALE, D. B.; JERMSTAD, K. D.; WHEELER, N. C.; CHEN, T. H. H. From genotype to phenotype unraveling the complexities of cold adaptation in forest trees. **Can J. Bot.**, v. 81, p. 1247–1266, 2003.
- HSU, J.S.; POWELL, J.; ADLER, P. B. Sensitivity of mean annual primary production to precipitation. **Global Change Biology**, v. 18, p. 2246–2255, 2012.
- HUEY, R. B.; STEVENSON, R. D. Integrating thermal physiology and ecology of ectotherms: A discussion of approaches. **Am Zool**, v. 19, p. 357–366, 1979.

HUEY, R. B.; KINGSOLVER, J. G. Evolution of thermal sensitivity of ectotherm performance. **Trends Ecol Evol**, v. 4, p. 131–135, 1989.

HUGHES, L. Biological consequences of global warming: is the signal already apparent? **Trends Ecol. Evol**, v. 15, p. 56–61, 2000.

HUXLEY, J. Clines: an auxiliary method in taxonomy. **Bijdragen tot de Dierkunde (Leiden)**, v. 27, p. 491-520, 1938.

INSTITUTO DE PESQUISAS E ESTUDOS FLORESTAIS – IPEF. **Circular Técnica nº 19**. <http://www.ipef.br/publicacoes/ctecnica/nr019.pdf> (visitado em 22/12/2017).

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 1995: synthesis report**. Cambridge, 1995.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2007: synthesis report**. Cambridge, p. 1-21, 2007.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2014: synthesis report**. Geneva, p. 151, 2014.

IPCC II (2014), “Climate Change 2014; Impacts, adaptations and vulnerability”, Working Group II Contribution to the Fifth Assessment Report of Intergovernmental Panel on Climate Change, **Cambridge University Press**, Cambridge, MA 11.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET, **disponível em** <http://www.inmet.gov.br>

IVERSON, L. R.; PETERS, M. P.; MATTHEWS, S.; PRASAD, A. An overview of some concepts, potentials, issues, and realities of assisted migration for climate change adaptation in forests. United **States Department of Agriculture**, 2013.

JONAS, C.; GEBER, M. Variation among populations of *Clarkia unguiculata* (Onagraceae) along altitudinal and latitudinal gradients. **American Journal of Botany**, v. 86, p. 333–343, 1999.

KAWECKI, T. J.; EBERT, D. Conceptual issues in local adaptation. **Ecol. Lett.**, v. 7, p. 1225–1241, 2004.

KINOSHITA, T.; JACOBSEN, S. E. Opening the door to epigenetics in PCP. **Plant Cell Physiol**, v. 53, p. 763–765, 2012.

KINOSHITA, T.; SEKI, M. Epigenetic memory for stress response and adaptation in plants. **Plant & Cell Physiology**, v. 55, p. 1859–1863, 2014.

KNIES, J. L.; IZEM, R.; SUPLER, K. L.; KINGSOLVER, J. G.; BURCH, C. L. The genetic basis of thermal reaction norm evolution in lab and natural phage populations. **Plos Biology**, v. 4, p. 1257–1264, 2006.

KREMER, A.; RONCE, O.; JUAN, J.; ARNUNCIO, R.; GUILLAUME, F.; BOHRER, G.; NATHAN, R.; BRIDLE, J. R.; GOMULKIEWCZ, R.; KLEIN, E. K.; RITLAND, K.; KUPARINEN, A.; GERBER, S.; SCHUELER, S. Long-distance gene flow and adaptation of forest trees to rapid climate change. **Ecology Letters**, v. 15, p. 378–392, 2012.

KREYLING, J.; BITTNER, T.; JAESCHKE, A.; JENTSCH, A.; JONAS S. M.; THIEL, D.; BEIERKUHNLIN, C. Assisted colonization: a question of focal units and recipient localities. **Restoration Ecology**, v. 19, p. 433–440, 2011.

LARCHER, W.O. Ökophysiologie der Pflanzen. Ulmer Verlag. **Auflage**, v. 6, 2001.

LEIMU, R.; FICHER, M. A meta-analysis of local adaptation in plants. **PLoS ONE**, v. 3, p. 4010, 2008.

LEITES, L. P., ROBINSON, A. P., REHFELDT, G. E., MARSHALL, J. D.; CROOKSTON, N. L. Height-growth response to climatic changes differs among populations of Douglas-fir: a novel analysis of historic data. **Ecological Applications**, v. 22, p. 154–165, 2012.

LIETH, H. Primary production: terrestrial ecosystems. **Human Ecology**, v. 1, p. 303–332, 1973.

LINARES, J. C.; CAMARERO, J. J.; CARREIRA, J. A. Competition modulates the adaptation capacity of forests to climatic stress: insights from recent growth decline and death in relict of the Mediterranean fir *Abies pinsapo*. **J. Ecol.**, v. 98, p. 592–603, 2010.

LINHART, Y. B.; GRANT, M. C. Evolutionary significance of local genetic differentiation in plants. **Annual Review of Ecology and Systematics**, v. 27, p. 237–277, 1996.

LOBELL, D. B.; BURKE, M. B.; TEBALDI, C.; MASTRANDREA, M. D.; FALCON, W. P.; NAYLOR, R. L. Prioritizing Climate Change Adaptation Needs for Food Security in 2030. **Science**, v. 319, p. 607–610, 2008.

LOVISOLO, C.; SCHUBERT, A. Effects of water stress on vessel size and xylem hydraulic conductivity in *Vitis vinifera* L. **J. Exp. Bot.**, v. 49, p. 693–700, 1998.

MÁTYAS, C. Climatic adaptation of trees: rediscovering provenance tests. **Euphytica**, v. 92, p. 45–54, 1996.

MAUCH-MANI, B.; BACCELLI, I.; LUNA E.; FLORS, V. Defense priming: an adaptive part of induced resistance. **Annu Rev Plant Biol.**, v. 68, p. 485–512, 2017.

MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration to times scale. In: CONFERENCE ON APPIED CLIMATOLOGY, 8, 1993, Boston. **Anais Boston**, p. 179–184, 1993.

MCLACHLAN, J. S.; HELLMANN, J. J.; SCHWARTZ, M. W. A framework for debate of assisted migration in an era of climate change. **Conservation Biology**, v. 21, p. 297–302, 2007.

MATHUR, S.; AGRAWAL, D.; JAJOO, A. Photosynthesis: Response to high temperature stress. **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**, v. 137, n. 1, p. 116–126, 2014.

MÁTYAS, C. Modeling climate change effects with provenance test data. **Tree Physiology**, v. 14, p. 797–804, 1994.

MORGENSTERN, E. K. Geographic Variation in Forest Trees. **UBC Press, Vancouver, BC**, 1996.

MORRIS, J. Genes, genetics, and epigenetics: a correspondence. **Science**, v. 293, p. 1103–1105, 2001.

MOURA, V. P. G.; CASER, R. L.; ALBINO, J. C.; GUIMARÃES, D. P.; MELO, J. T. D.; COMASTRI, S. A. Avaliação de espécies e procedências de *Eucalyptus* em Minas Gerais e Espírito Santo. **Centro de Pesquisas Agropecuárias do Cerrado – CPAC**, p. 104, 1980.

NARDINI, A.; GULLO, M. A. L.; SALLEO, S. Refilling embolized xylem conduits: Is it a matter of phloem unloading? **Plant Science**, Ireland, v. 180, n. 4, p. 604–611, 2011.

PALLIOTTI, A.; TOMBESI, S.; FRIONI, T.; FAMIANI, F.; SILVESTRONI, O.; ZAMBONI, M.; PONI, S. Morpho-structural and physiological response of container-grown sangiovese and Montepulciano cvv. (*Vitis vinifera*) to re-watering after a pre-veraison limiting water deficit. **Funct. Plant Biol**, v. 41, p. 634–647, 2014.

PEDLAR, J. H.; MACKENNEY, D. W.; AUBIN, I. Placing forestry in the assisted migration debate. **BioScience**, v. 62, p. 835–842, 2012.

PEDLAR, J. H.; MACKENNEY, D. W. Assessing the anticipated growth response of northern conifer populations to a warming climate. **Scientific Reports**, p. 10, 2017.

PERSSON, B. Will climate change affect the optimal choice of *Pinus sylvestris* provenances? **Silva Fenn**, v. 32, p. 121–128, 1998.

O’NEILL, G. A., HAMANN, A.; WANG, T. Accounting for population variation improves estimates of the impact of climate change on species’ growth and distribution. **Journal of Applied Ecology**, v. 45, p. 1040–1049, 2008.

RAPP, R. A.; WENDEL, J. F. Epigenetics and plant evolution. **New Phytology**, v. 168, p. 81-91, 2005.

REHFELDT, G. E.; TCHEBAKOVA, N. M.; BARNHARDT, L. K. Efficacy of climate transfer functions: introduction of Eurasian populations of *Larix* into Alberta. **Can. J. For. Res**, v. 29, p. 1660–1668, 1999.

REHFELDT, G. E., YING, C. C., SPITTLEHOUSE, D. L.; HAMILTON, D. A. Genetic responses to climate in *Pinus contorta*: niche breadth, climate change, and reforestation. **Ecological Monographs**, v. 69, p. 375–407, 1999.

- RELYEA, R. A. Costs of phenotypic plasticity. **American Naturalist**, v. 159, n. 3, p. 272-282, 2002.
- RIEBEEK, H. Global warming: feature articles. p. 1-17, 2010. Disponível em <https://earthobservatory.nasa.gov/Features/GlobalWarming/printall.php>
- ROMAN, D. T.; NOVICK, K. A.; BRZOSTEK, E. R.; DRAGONI, D.; RAHMAN, F.; PHILLIPS, R. P. The role of isohydric and anisohydric species in determining ecosystem-scale response to severe drought. **Oecologia**, v. 179, p. 641-654, 2015.
- ROZAS, V.; GARCIA-GONZÁLEZ, I.; ZAS, R. Climatic control of intraannual wood density fluctuations of *Pinus pinaster* in NW Spain. **Trees**, v. 25, p. 443-453, 2011.
- SAHU, P. P.; PANDEY, G.; SHARMA, N. et al. Epigenetic mechanisms of plant stress responses and adaptation. **Plant Cell Rep**, v. 32, p. 1151–1159, 2013.
- SGRO, C. M.; LOWE, A. J.; HOFFMANN, A. A. Building evolutionary resilience for conserving biodiversity under climate change. **Evolutionary Applications**, v. 4, p. 326–337, 2011.
- SALA, A.; WOODRUFF, D.R.; MEINZER, F.C. Carbon dynamics in trees: feast or famine? **Tree Physiol**, v. 32, p. 764–775, 2012.
- SALLY, N. A.; MICHAEL, C. W. Assisted Gene Flow to Facilitate Local Adaptation to Climate Change. **Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst**, v. 44, p. 367–388, 2013.
- SALVUCCI, M. E.; CRAFTS-BRANDNER, S. J. Relationship between the heat tolerance of photosynthesis and the thermal stability of rubisco activase in plants from contrasting thermal environments. **Plant Physiol**, v. 134, p. 1460–1470, 2004.
- SANSILVESTRI, R.; FRASCARIA-LACOSTE, N.; FERNÁNDEZ-MANJARRÉS, J. F. Reconstructing a deconstructed concept: policy tools for implementing assisted migration for species and ecosystem management. **Environmental Science & Policy**, v. 51, p. 192–201, 2015.
- SAVOLAINEN, O.; PYHAJARVI, T.; KNURR, T. Gene flow and local adaptation in trees. **Annual Review of Ecology Evolution and Systematics**, v. 38, p. 595-619, 2007.

SCHIERENBECK, K. A. Population-level genetic variation and climate change in a biodiversity hotspot. Review: Part of a Special Issue on Endemism Hotspots. **Annals of Botany**, v. 119, p. 215-228, 2017.

SCHMIDHUBER, J.; TUBIELLO, F. N. Global food security under climate change. **PNA**, v. 104, p. 19703-19708, 2007.

SCHMIDTLING, R. C. Use of provenance tests to predict response to climatic change: loblolly pine and Norway spruce. **Tree Physiol**, v. 14, p. 805–817, 1994.

SCHWARTZ, M. W.; HELLMANN, J. J.; JASON, M. M. Managed relocation: integrating the scientific, regulatory, and ethical challenges. **Bioscience**, v. 62, p. 732–743, 2012.

SOARES, T.S.; CARVALHO, R.M.M.A.; VALE, A.B. Avaliação econômica de um povoamento de *Eucalyptus grandis* destinado a multiprodutos. **Revista Árvore**, v.27, n.5, p.689-694, 2003.

SOULÉ, P. Spatial patterns of multiple drought types in the contiguous United States: a seasonal comparison. **Clim. Res**, v. 1, p. 13-21, 1990.

SOUZA, C.R. et al. Comportamento da *Acacia mangium* e de clones de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* em plantios experimentais na Amazônia Central. **Scientia Forestalis**, v.65, p.95-101, 2004.

SUDÃO, J.; RAINA, M.; SINGH, R. Plant epigenetic mechanisms: role in abiotic stress and their generational heritability. **Biotech**, 2018.

THOMPSON, J. D.; GAUTHIER, P.; AMIOT, J. Ongoing adaptation to mediterranean climate extremes in a chemically polymorphic plant. **Ecological Monographs**, v. 77, p. 421–439, 2007.

- TRIFILÓ, P.; CASOLO, V.; RAIMONDO, F.; PETRUSSA, E.; BOSCUCCI, F.; LOGULLO, M. A.; NARDINI, A. Effects of prolonged drought on stem non-structural carbohydrates content and post-drought hydraulic recovery in *Laurus nobilis* L.: the possible link between carbon starvation and hydraulic failure. **Plant Physiol. Biochem**, v. 120, p. 232–241, 2017.
- VICENTE-SERRANO, S. M.; LASANTA, T.; GRACIA, C. Aridification determines changes in forest growth in *Pinus halepensis* forests under semiarid Mediterranean climate conditions. **Agric For Meteorol**, v. 150, p. 614–628, 2010b.
- VITOUSEK, P. M.; MOONEY, H. A.; LUBCHENCO, J.; MELILLO, J. M. Human Domination of Earth's Ecosystems. **Science**, v. 277, p. 494–499, 1997.
- VITT, P.; HAVENS, K.; HOEGH-GULDBERG, O. Assisted migration: part of an integrated conservation strategy. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 24, p. 473–474, 2009.
- WANG, T., O'NEILL, G. A., AITKEN, S. N. Integrating environmental and genetic effects to predict responses of tree populations to climate. **Ecological Society of America**, v. 20, p. 153–163, 2010.
- WARD, E. J. The effects of elevated CO₂ and nitrogen fertilization on stomatal conductance estimated from 11 years of scaled sap flux measurements at Duke FACE. **Tree Physiology**, v. 33, p. 135–151, 2013.
- WESTHEBERHARD, M. J. Phenotypic plasticity and the origins of diversity. **Annual Review of Ecology and Systematics**, v. 20, p. 249–278, 1989.
- WHEELER, T.; VON BRAUN, J HELLIKER, B. Climate change impacts on global food security. **Science**, v. 134: p. 508, 2013.
- WILLIAMS, M. I.; DUMROESE, R. K. Preparing for climate change: forestry and assisted migration. **Journal of Forestry**, v. 111, p. 287–297, 2013.
- WOODS, E. C.; HASTINGS, A. P.; TURLEY, N. E.; HEARD, S. B.; AGRAWAL, A. A. Adaptive geographical clines in the growth and defense of a native plant. **Ecological Monographs**, v. 82, p. 149–168, 2012.

YAIISH, M. W.; HIRT, H.; HOHM, B. Epigenetic modifications associated with abiotic and biotic stresses in plants: an implication for understanding plant evolution. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, p. 6-8, 2017.

ZHU, K., WOODALL, C. W.; CLARK, J. S. Failure to migrate: lack of tree range expansion in response to climate change. **Global Change Biology**, v. 18, p. 1042–1052, 2012.