



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

SOFIA MARIA GONÇALVES ROCHA

**DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA DE EUCALIPTO EM GRADIENTES
CLIMÁTICOS NO BRASIL**

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2018

SOFIA MARIA GONÇALVES ROCHA

**DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA DE EUCALIPTO EM GRADIENTES
CLIMÁTICOS NO BRASIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo como parte das exigências para obtenção do título de mestre em Ciências Florestais na área de concentração Ciências Florestais.
Orientadora: Graziela Baptista Vidaurre
Coorientador: José Eduardo Macedo Pezzopane

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2018

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Setorial Sul, Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)
Bibliotecária: Lizzie de Almeida Chaves – CRB-6 ES-000871/O

R672d Rocha, Sofia Maria Gonçalves, 1992-
 Densidade básica da madeira de eucalipto em gradientes climáticos
 no Brasil / Sofia Maria Gonçalves Rocha. – 2018.
 46 f. : il.

 Orientador: Graziela Baptista Vidaurre.
 Coorientador: José Eduardo Macedo Pezzopane.
 Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade
Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e Engenharias.

 1. Eucalipto. 2. Densidade da madeira. 3. Climatologia agrícola. I.
Vidaurre, Graziela Baptista. II. Pezzopane, José Eduardo Macedo. III.
Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Agrárias e
Engenharias. IV. Título.

CDU: 630

**DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA DE EUCALIPTO EM GRADIENTES
CLIMÁTICOS NO BRASIL**

Sofia Maria Gonçalves Rocha

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.

Aprovada em 26 de fevereiro de 2018.



Prof. Dr. Paulo Fernando Trugilho (Examinador externo)
Universidade Federal de Lavras



Prof. Dr. Otávio Camargo Campoe (Examinador externo)
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Dr. José Eduardo Macedo Pezzopane (Coorientador)
Universidade Federal do Espírito Santo



Profª. Drª. Graziela Baptista Vidaurre (Orientadora)
Universidade Federal do Espírito Santo

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por me conceder força e sustentação para concluir esta etapa.

À minha família (mãe, irmãos, sobrinhas e tias), pelo amor e carinho confiados a mim, que em muitas vezes foram os motivos para manter-me firme em busca do meu objetivo.

Ao Thiago, pelo companheirismo, amor e por se tornar refúgio nos momentos difíceis em que precisei de estímulo para continuar.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, pela oportunidade e estrutura para conclusão do curso.

Ao IPEF e programa TECHS, pela confiança a mim concedida para realização do trabalho e, ainda, pela oportunidade de participar de um projeto grandioso e inovador.

Às empresas Anglo Americana; Arauco; Arbogen; ArcelorMittal; Cenibra; CMPC; Comigo; Copener; Duratex; Eldorado; Fazenda Campo Bom; Fibria; Florestal Itaqui; Florestal Oriental; Gerdau; GMR; International Paper; Jari; Klabin; Lwarcel; Montes Del Plata; Plantar; Rigesa; Suzano; Vallourec e Veracel, que gentilmente contribuíram para a construção do programa TECHS e possibilitaram a realização do trabalho.

À prof.^a Graziela Baptista Vidaurre, minha orientadora, pelas doses diárias de ânimo e inspiração para persistir em busca do melhor. Agradeço a contribuição em meu crescimento profissional e pessoal.

Ao Prof. José Eduardo Macedo Pezzopane, meu coorientador, pelo direcionamento e disposição contínua para contribuir na construção do trabalho.

Aos colegas e professores da UFES, pela saudável convivência e por compartilhar conhecimentos que tanto contribuíram para o meu aprendizado na instituição.

Às minhas queridas companheiras de república Anny, Isáira e Naruna, pelos momentos de descontração e aperfeiçoamento pessoal na construção de uma relação de amizade e respeito.

A todos vocês, muito obrigada!

RESUMO

ROCHA, Sofia Maria Gonçalves. **Densidade básica da madeira de eucalipto em gradientes climáticos no Brasil**. 2018. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Orientador: Graziela Baptista Vidaurre. Coorientador: José Eduardo Macedo Pezzopane.

O potencial produtivo de um local é resultado da interação dos materiais genéticos e das condições ambientais, fatores fundamentais para a qualidade da madeira produzida. Conhecer o comportamento dos diferentes genótipos sob variadas condições climáticas torna-se essencial para o planejamento florestal. O trabalho objetivou avaliar a influência das condições climáticas na densidade da madeira de eucalipto e verificar a possibilidade do ajuste de modelos de predição da densidade básica da madeira por meio de variáveis meteorológicas. Foi analisada a densidade básica da madeira de 4 clones de eucalipto, aos 4 anos de idade, em 11 localidades do Brasil com características climáticas distintas. As variáveis meteorológicas temperatura, precipitação, déficit de pressão de vapor máximo, deficiência hídrica e índices de sazonalidade de temperatura e precipitação foram utilizadas para caracterizar os sítios quanto às suas condições climáticas no período avaliado. Foi realizado o agrupamento hierárquico dos sítios e verificado o comportamento da densidade da madeira dentro dos grupos formados. Foram ajustadas equações de regressão linear entre as variáveis meteorológicas e a densidade da madeira. Formaram-se quatro grupos distintos e dentro de cada um verificou-se o comportamento da densidade básica atrelada ao crescimento para cada clone. De maneira geral, locais mais secos possibilitam maiores densidades devido à diminuição no ritmo de crescimento, embora o comportamento seja intrínseco a cada material genético. O déficit de pressão de vapor máximo e o déficit hídrico foram as variáveis mais correlacionadas e de melhores potenciais estimadores de densidade básica da madeira. Apesar da alta herdabilidade da densidade básica da madeira, há interface significativa com as variáveis climáticas.

Palavras-chave: condições meteorológicas; densidade de *Eucalyptus*; TECHS.

ABSTRACT

ROCHA, Sofia Maria Gonçalves. **Density basic of eucalyptus wood in climatic gradient in Brazil.** 2018. Dissertation (Masters in Forest Sciences) - Federal University of Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Advisor: Graziela Baptista Vidaurre. Co-orientator: José Eduardo Macedo Pezzopane.

Genetic planting materials together with environmental conditions determine the productive potential of the site and are of fundamental importance under the quality of the resulting wood, and knowing the behavior of different species under different climatic conditions is essential for forest planning. In this context, the objective of this work was to evaluate the influence of climatic conditions under the density of eucalyptus wood and to verify the potential of property estimation through meteorological variables. The basic wood density of 04 eucalyptus clones was analyzed at 04 years of age in 11 sites in Brazil with different climatic characteristics. The meteorological variables temperature, precipitation, maximum vapor pressure deficit, water deficiency and seasonality of temperature and precipitation were used to characterize the sites regarding their climatic conditions during the growing period. It was carried out the hierarchical grouping of the sites and verified the behavior of the density of the wood within the groups formed. Linear regression equations were adjusted between the most influential meteorological variables under wood density in order to identify the potential estimator for wood density. Four groups were formed and within each one the growth density basic behavior of each clone was verified. In general, drier locations allow higher densities due to a decrease in growth rate, but the behavior is intrinsic to each clone and does not establish a general rule. The maximum DPV and the DEF were the variables most correlated and with the best potential wood density estimators. Although density is an inherited characteristic, there is significant interface with climatic variables.

Keywords: weather conditions, density of *Eucalyptus*, TECHS.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 OBJETIVOS	11
2.1 Objetivo geral	11
2.2 Objetivos específicos	11
3 HIPÓTESES.....	12
4 REVISÃO DE LITERATURA	13
4.1 Densidade e qualidade da madeira.....	13
4.2 Influência das condições climáticas na densidade da madeira.....	15
5 MATERIAL E MÉTODOS	19
5.1 Caracterização da área de estudo	19
5.2 Densidade básica da madeira.....	20
5.3 Banco de dados e variáveis meteorológicas.....	21
5.4 Formação de grupos climáticos e densidade básica da madeira.....	23
5.5 Estimativa de densidade básica da madeira por variáveis climáticas	24
6 RESULTADOS	25
7 DISCUSSÃO	30
8 CONCLUSÕES	34
REFERÊNCIAS.....	35
APÊNDICES.....	41

1. INTRODUÇÃO

A madeira é constituída majoritariamente por carbono e sua densidade é definida como a concentração de massa por volume (ZOBEL; VAN BUIJTENEN, 1989; CHAVE et al., 2009). A formação da madeira e, conseqüentemente, sua densidade são impulsionadas pelo gradiente climático e condições disponíveis para realização do processo de crescimento (NABAIS et al., 2018).

O clima afeta a densidade da madeira, infere no potencial que as florestas possuem de absorver e armazenar carbono e as torna fortes aliadas em um cenário de mudanças climáticas causadas pelo aumento de dióxido de carbono (CO₂) (KOCACINAR; SAGE, 2005; CAMARERO; GUITIÉRREZ, 2017). As espécies de rápido crescimento, como o eucalipto, são alternativas viáveis para o fornecimento de matéria-prima e melhoria do ambiente global devido à alta e rápida fixação de CO₂ (KOJIMA et al., 2009).

A relação entre as condições climáticas e a densidade da madeira de angiospermas ocorre indiretamente, em resposta a situações extremas de seca. Submetidos a altas pressões negativas, os vasos condutores aumentam a espessura de suas paredes para diminuir o risco de ocorrência de colapsos e possibilitam acréscimo na densidade da madeira (HACKE; SPERRY, 2001; LENS et al., 2013). A indução à lignificação no lenho tardio também pode gerar o aumento da densidade devido a altas temperaturas em períodos mais quentes e secos do ano (GINDL et al., 2001).

A densidade da madeira mais elevada é frequentemente abordada como resposta a locais mais secos e com menores índices pluviométricos, no entanto, a análise deve considerar um conjunto de variáveis para melhor representatividade do ambiente (ILBANEZ et al., 2017) como o déficit de pressão de vapor e o déficit hídrico, a fim de entender a interação fisiológica entre a disponibilidade de recursos e a realização dos processos metabólicos da planta.

Comprovada a existência da relação entre variáveis meteorológicas, crescimento e formação de madeira, é possível entender a influência exercida sobre a qualidade do material e a possibilidade de estimativa e seleção de variáveis que melhor interagem (MELESSE; ZEWOTIR, 2012). Entretanto, as respostas do crescimento em razão da variação climática não podem ser consideradas regras, por

não haver proporcionalidade entre as alterações em densidade da madeira, devido à grandeza de resposta das variáveis.

Entender o comportamento da densidade da madeira frente à variação climática é importante não apenas devido ao cenário de mudanças climáticas, mas também pela expansão das fronteiras florestais no Brasil. Conhecer como as espécies de eucalipto se comportam em condições meteorológicas contrastantes possibilitam inferências essenciais no planejamento florestal.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Verificar a influência das condições climáticas na densidade básica da madeira em clones de eucalipto.

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar o comportamento de diferentes clones de eucalipto frente a distintos cenários meteorológicos formados a partir do agrupamento de sítios, a fim de entender as respostas na densidade básica da madeira.
- Selecionar variáveis meteorológicas que formam a melhor combinação para estimativa de densidade básica da madeira e ajustar modelos de regressão para tal finalidade.

3. HIPÓTESES

- A densidade básica da madeira de clones de eucalipto é modificada de acordo com a variação meteorológica devido a diferenças em suas taxas de crescimento.
- Não existe proporcionalidade determinada entre a taxa de crescimento e a densidade básica da madeira.
- A taxa de crescimento é modificada em maior escala do que a densidade básica da madeira pelas diferenças em condições climáticas.

4. REVISÃO DE LITERATURA

4.1 Densidade e qualidade da madeira

A densidade da madeira é importante para diversas finalidades, pois informa a quantidade de carbono utilizada no processo de formação da madeira e varia de acordo com a idade, espécies e dentro de uma mesma planta (CHAVE, 2002). A combinação das características químicas e anatômicas da madeira define o comportamento da densidade, e o conhecimento das propriedades da madeira é importante para entender a relação que existe entre anatomia, química e a densidade do material (GARCIA, 1995; MOURA; FIGUEIREDO, 2002).

A densidade da madeira tem sido um parâmetro viável para a manipulação e seleção genética de progênies devido à grande variação entre espécies, alta herdabilidade genética e baixa interação genótipo-ambiente (FERREIRA; KAGEYAMA et al., 1978). Entretanto, é preciso destacar que mesmo que não haja diferença significativa entre densidades de madeiras de mesma espécie e progênies cultivadas em locais contrastantes, ao se tratar de produção de madeira em larga escala, pequenos acréscimos ou decréscimos representam investimentos financeiros significativos para a indústria de transformação.

A densidade básica pode ser determinada de diversas formas, sendo o método gravimétrico da balança hidrostática descrito pela NBR 11941 – ABNT (2003) o mais empregado. O método é simples e demanda poucos recursos físicos e financeiros, o que garante ótima relação custo-benefício. A determinação das demais propriedades da madeira exige tempo e maior custo-benefício para a fase de seleção de clones. A simplicidade do método de determinação da densidade básica da madeira contribui para sua ampla utilização como parâmetro de qualidade (GOMIDE; FANTUZZI NETO; REGAZZI, 2010).

Dentre as características anatômicas, a espessura da parede celular de fibras apresenta maior correlação positiva com a densidade da madeira, entretanto, o diâmetro de vaso também apresenta correlação com a propriedade, porém, negativa (Tabela 1). As diferentes funções de cada célula permitem inferir sobre a sua relação com a densidade da madeira, por exemplo, as fibras são células estruturais com maior acúmulo de carbono, já os vasos são canais com espaços vazios na madeira que possibilitam a condução de líquidos (CARLQUIST, 1988).

Tabela 1: Correlação de Pearson entre características anatômicas e densidade básica (DB) da madeira de eucalipto em diferentes idades e tratos silviculturais.

Autor	Espécie/ Idade	Frequência de vasos (poros.mm ²)	Diâmetro de vasos (mm)	Espessura de parede de fibra (µm)	DB (g.cm ⁻³)
Alzate 2004	<i>E. grandis</i>	11,5	100,07	5,7	0,46
Sousa Júnior, 2004	<i>E. urophylla</i>	11,13	100,96	5,5	0,64
	<i>E. cloeziana</i>	14	86,72	5,95	0,73
Benjamin, 2006	<i>E. grandis</i> (30 anos)	10,9	121,24	4,61	0,58
Poubel et al., 2011	<i>E. pellita</i> (15 anos)		59,97	4,9	0,57
Barbosa, 2013	<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> (06 anos)	10,5	108	6	0,53
Braz et al., 2014	<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i> (30 a 35 meses)	11,82	105,7	3,81	0,39
Gonçalves et al., 2014	<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i> (08 anos)			5,61	0,51
Monteiro, 2014	<i>E. urophylla</i> (MN463) (07 anos)	16	104	3,4	0,47
	<i>E. urophylla</i> (VM04) (07 anos)	13	125	3,3	0,49
Correlação		0,00815	-0,34	0,54	

As práticas silviculturais como idade de corte, espaçamento, adubação, desbastes e irrigação proporcionam alterações que influenciam na qualidade da madeira (ZOBEL, 1992). O híbrido proveniente de *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla*, ao ser submetido a espaçamentos mais amplos atrelados à irrigação aos 6 meses de idade, apresentou maiores valores em densidade básica da madeira (MOULIN et al., 2017). Possivelmente, a menor competição por água, nutrientes e energia solar possibilitou maior investimento de carbono na densidade da madeira.

Embora a densidade básica tenha sido destacada como característica generalista sobre a qualidade da madeira de eucalipto, ou seja, parâmetro universal de sua qualidade, por explicar o comportamento físico-mecânico (FOELKEL; MORA; MENOCELLI, 1990), é preciso considerar a existência da variabilidade radial e longitudinal dentro de uma mesma árvore. Fatores como idade, cultivo, ambiente de origem e procedência genética podem apresentar alta correlação com a densidade e isso irá influenciar significativamente no tipo de amostragem a ser realizado e a qualidade dos produtos que têm a madeira como matéria-prima.

Foi identificada alta relação entre as propriedades mecânicas e a densidade básica da madeira de postes de eucalipto em estado de deterioração. Quanto maiores os valores de densidade, maior a rigidez e resistência à flexão, sendo a densidade da madeira considerada uma característica preliminar para estimativa de durabilidade mecânica do lenho (ABRUZZI et al., 2012).

A avaliação de densidade básica da madeira é essencial para estimar a impregnação dos reagentes aos cavacos e serve como indicador do consumo específico de madeira na indústria de celulose e papel (QUEIROZ et al., 2004).

Foi identificada a existência de correlação negativa e forte entre a densidade básica e o consumo específico de madeira em amostras de eucalipto de diferentes regiões do Brasil. Madeiras de maiores densidades proporcionaram menores consumos específicos de madeira, cujo fator favorece a produção de celulose no digestor e a manutenção de volume da pilha de cavacos nas fábricas (GOMIDE; FANTUZZI NETO; REGAZZI, 2010).

Madeiras mais densas podem subsidiar a produção de carvão vegetal com maiores concentrações de carbono fixo e conferir maior reatividade ao material (BRITO; BARRICHELO, 1977; SANTOS et al., 2011; MOUTINHO, 2013). Não apenas a condição de alta densidade, mas também as metodologias que serão empregadas na carbonização da madeira poderão interferir em um carvão mais reativo ou não.

A densidade da madeira é uma característica intimamente relacionada tanto com a caracterização de qualidade do material quanto com a demanda de matéria-prima para múltiplos produtos. Embora seja uma característica herdável, é preciso conhecer o comportamento quando submetidas aos diversos tratamentos silviculturais e condições ambientais.

4.2 Influência das condições climáticas na densidade da madeira

A madeira é composta basicamente por elementos traqueais e fibras que possuem paredes celulares espessas para realização de suas funções de suporte, proteção e condução (CARLQUIST, 1988). As referidas funções apresentam requisitos contrastantes, uma vez que incremento em parede celular é necessário

para suporte mecânico, e espaços vazios são necessários para o transporte de água, deste modo, ambos interferem na densidade da madeira (THOMAS; MONTAGU; CONROY, 2004).

Todos os tipos de células do xilema secundário são derivados do câmbio vascular, que tem sua atividade regulada por fatores internos (biossíntese de hormônios e proteínas) e fatores externos, como o ambiente de crescimento (ZHANG et al., 2014).

As variáveis meteorológicas subsidiam energia, água e disponibilidade de nutrientes para realização da fotossíntese pelas árvores. Assim, a temperatura e precipitação afetam diretamente a quantidade de energia dentro de uma árvore e influenciam a quantidade de recursos disponíveis para formação de novas células. Essas, ao serem submetidas a baixas quantidades de fotossíntese líquida, produzem células menores e/ou com paredes celulares menos espessas (WOOD; SMITH; HARTLEY, 2016).

O Brasil possui grande amplitude em seu gradiente climático e em sua distribuição de chuvas (ALVARES et al., 2013). Esse fato está intimamente ligado à disponibilidade de água e déficit de pressão de vapor, variáveis que influenciam diretamente a produção de madeira (STAPE et al., 2004) e, conseqüentemente, sua qualidade.

Características anatômicas da madeira, como comprimento das fibras, vasos e espessura de parede celular, variam de acordo com a disponibilidade hídrica, nutricional e idade da planta (CARLQUIST, 1988). A variação na porcentagem de elementos anatômicos se reflete na densidade básica da madeira de eucalipto, sendo os percentuais de aumento da parede celular das fibras os principais fatores a influenciar a densidade (ROQUE; TOMAZELLO FILHO, 2009).

Condições ambientais desfavoráveis ao desenvolvimento das espécies florestais, como temperaturas extremas, deficiências hídrica e nutricional, estão interligadas ao aumento da densidade da madeira, em virtude da diminuição da atividade cambial. Em contrapartida, espera-se que condições hídricas, nutricionais e climáticas favoráveis proporcionem baixa densidade, uma vez que aceleram a taxa de crescimento da planta (BAKER et al., 2004).

Maiores densidades da madeira resultantes de crescimento em diâmetro mais lento foram relacionadas a menores índices pluviométricos e capacidade de

armazenamento de água no solo, bem como maiores médias de precipitação e retenção de água resultaram em madeiras 10% menos densas (DOWNES et al., 2014).

Foi evidenciada a alta correlação existente entre as propriedades da madeira e a produção de biomassa resultante do clima de cultivo das árvores no trabalho de Downes et al., 2014. Entretanto, as diferenças entre os índices pluviométricos não foram significativas e possivelmente resultaram em conclusões parciais sobre a influência do índice pluviométrico na densidade básica da madeira.

Comportamentos diferenciados de três clones de *Eucalyptus* foram atribuídos ao sítio com 60% a mais de precipitação. Apesar de semelhantes temperaturas, a maior disponibilidade de água proporcionou diminuição de 11% na densidade de madeira (GOUVEA et al., 2012). O trabalho evidencia a existência da relação entre sítios secos e quentes e aumento em densidade básica da madeira. Entretanto, é preciso atenção ao material genético, pois clones mais adaptados a essas condições podem não sofrer alterações em suas propriedades frente à mudança climática.

À medida que o crescimento da árvore é estimulado pelo aumento da temperatura, há maior incremento na quantidade de carbono atribuído ao lenho, o que, conseqüentemente, contribui para o aumento da densidade. Acréscimo na temperatura proporcionou menor condutividade hidráulica da água, com vasos condutores de menores diâmetros e madeira de *Eucalyptus camaldulensis* 12% mais densa (THOMAS; MONTAGU; CONROY, 2004). Entretanto, foram utilizadas mudas de 19 semanas, o que indica uma conclusão prematura, uma vez que a densidade altera em virtude do aumento da idade e do tempo em que a planta está submetida a tais condições de temperatura.

Outro fator que infere modificações na densidade da madeira é a capacidade produtiva de um local, que pode se apresentar de forma positiva, negativa ou nula. Locais que proporcionam aumento da taxa de crescimento tendem a diminuir a densidade da madeira, ou seja, relação negativa (DOWNES, 1997).

Apesar de citado, o decréscimo da densidade básica da madeira em virtude do aumento da taxa de crescimento não é uma regra, pois há interação de outros fatores que podem interferir na taxa de crescimento e na densidade.

Foi constatado que o incremento em diâmetro influenciou na densidade, mas de forma positiva em *Eucalyptus grandis*, ou seja, locais que apresentaram maiores

taxas de incremento apresentaram também maiores valores de densidade. O autor atribui essa relação ao clima e evidencia que climas tropicais e latitudes mais próximas ao Equador produzem madeiras mais densas (KOJIMA et al., 2009).

Com relação às pesquisas sobre a interação entre clima e densidade básica da madeira, é preciso ressaltar alguns pontos. A densidade da madeira é uma característica herdável e com tendência de aumento com o decorrer da idade, portanto, é importante que os experimentos em ambientes contrastantes recebam tratamentos silviculturais e épocas de plantio semelhantes para minimizar a ação antrópica. Assim, as diferenças nas propriedades da madeira poderão ser atribuídas aos fatores edafoclimáticos.

Os estudos encontrados na literatura em sua maioria abordam temas poucos profundos quanto às variáveis climáticas e sua relação com as características da madeira, como fatores isolados de precipitação, temperatura e crescimento. O uso de variáveis que representem melhor o ambiente e a relação com o crescimento são escassos nos trabalhos com qualidade da madeira.

Outro fator relevante em estudos dessa natureza é relacionado às características ambientais. A maioria dessas apresenta alta correlação entre si, de modo que ao estudar o ambiente é preciso delimitar qual das variáveis realmente causa influência nas propriedades da madeira e melhor determinar as características a serem consideradas no planejamento florestal.

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Caracterização da área de estudo

O material foi proveniente do Projeto TECHS (Tolerância de *Eucalyptus* Clonais aos Estresses Hídrico e Térmico, www.ipef.br/techs/en), desenvolvido em diferentes locais do território brasileiro como descrito por Binkley et al. (2017). Em todos os sítios os experimentos receberam mesmos tratamentos silviculturais de preparo de solos, época de plantio e espaçamentos, para garantir a homogeneidade entre os locais e isolar os fatores climáticos e de solo.

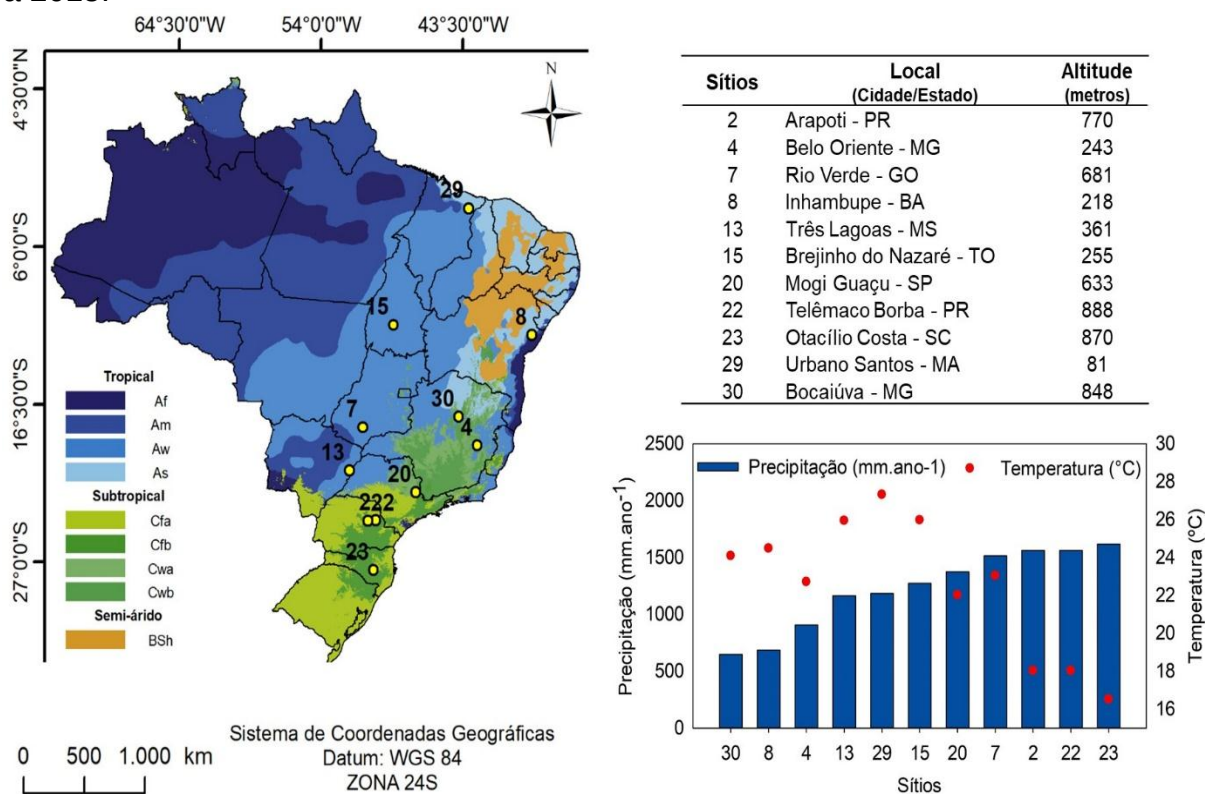
Foram analisados 4 clones de *Eucalyptus spp.* aos 4 anos de idade, cultivados entre os anos de 2012 e 2015, sob espaçamento 3 x 3 metros (Tabela 2). Embora cada clone seja mais adaptado com o clima para que foi desenvolvido, são denominados como plásticos quanto às características de crescimento.

Tabela 2. Identificação dos genótipos dos quatro clones de *Eucalyptus spp.* e seus climas de origem.

Clone	Genótipo	Clima da região de origem
C3	<i>E. grandis</i> x <i>E. camaldulensis</i>	Tropical com estação seca de verão (As)
K2	<i>E. saligna</i>	Temperado úmido com verão temperado (Cfb)
A1	<i>E. urophylla</i>	Temperado úmido com inverno seco e verão quente (Cwa)
Q8	<i>E. grandis</i>	Tropical úmido (Af)

Os 4 clones foram plantados em 11 locais distribuídos ao longo do território brasileiro em amplo gradiente latitudinal (Figura 3). Os sítios apresentam diferentes regimes hídricos e térmicos para o período de 2012 a 2015. Os locais com maiores temperaturas médias anuais apresentam as menores médias de precipitação, caracterizando os sítios tropicais. Os sítios subtropicais são caracterizados por maiores médias de precipitação e menores médias de temperatura.

Figura 1 – Localização geográfica e características de precipitação e temperatura para os 11 sítios onde foram cultivados os 4 clones de eucalipto no período de 2012 a 2015.



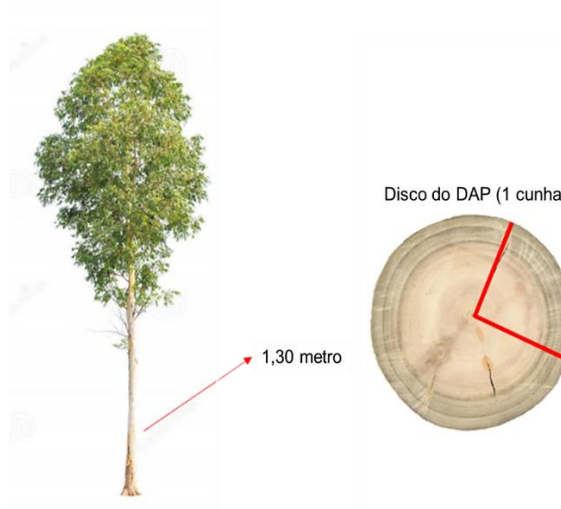
Fonte: Adaptado de Alvares et al., (2013).

Af: Tropical equatorial; Am: Tropical de monção; Aw: Tropical com estação seca e chuvas de verão; As: Tropical com estação seca de verão e chuvas de inverno; Cfa: Subtropical marítimo de verão quente; Cfb: Subtropical oceânico de verão temperado; Cwa: Subtropical úmido com verão quente e chuvoso; Cwb: Subtropical temperado e chuvas de verão; BSh: Semiárido seco e quente.

5.2 Densidade básica da madeira

Três árvores de cada sítio foram selecionadas de acordo com o DAP médio da parcela, determinado pelo inventário florestal semestral, e totalizaram 33 indivíduos por clone. Discos à altura de 1,30 metro a partir do solo (DAP) foram amostrados, dos quais retirou-se 1 cunha para a determinação da densidade básica da madeira (Figura 2). A densidade básica foi obtida considerando a recomendação da Norma Brasileira Regulamentadora (NBR 11941) da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (2003).

Figura 2 - Coleta de disco a 1,30 m do solo e cunha a partir da medula para determinação da densidade básica da madeira.



Fonte: a autora (2018).

5.3 Banco de dados e variáveis meteorológicas

O incremento médio anual (IMA) foi determinado a partir da divisão do volume de madeira acumulado aos 4 anos pela idade do plantio. As equações de volume utilizadas foram propostas por Mattos (2015).

Os dados meteorológicos entre 2012 e 2015 utilizados para o estudo das condições climáticas foram obtidos de estações meteorológicas do INMET- Instituto Nacional de Meteorologia e estações meteorológicas in situ (sítio 04, Belo Oriente). Os dados provenientes do INMET em escala horária foram transformados em escala diária, na falta de dados de quatro ou mais horas, o dia foi descartado.

Planilhas foram geradas com dados de temperatura (média, máxima e mínima) ($^{\circ}\text{C}$), umidade relativa média (%), velocidade do vento a 10 metros (m.s^{-1}), radiação solar global ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$) e precipitação (mm.dia^{-1}) para o período de 2012 a 2015 em escala diária, entretanto, há existência de falhas na aquisição dos dados meteorológicos, fazendo-se necessário o preenchimento das lacunas.

No preenchimento de falhas buscaram-se bases de dados já existentes para os 11 sítios. Primeiramente, foram utilizados os dados interpolados por Xavier; King; Scanlon (2015) com precisão de 25 km em escala diária. Ao persistir a existência de

falhas, utilizou-se para a precipitação os dados da ANA (Agência Nacional de Águas) e do CHIRPS (Grupo de Perigos Climáticos Precipitação Infra Estrada e Estação) desenvolvido por Stackhouse et al., (2015). Para as demais variáveis foram utilizados os dados da plataforma NASA POWER descrito por Funk et al., (2015). Ao final, gerou-se planilha com 100% de dados meteorológicos para o período dos quatro anos para cada sítio. A percentagem de falhas preenchidas variou de 0,7% a 28% entre os sítios (APENDICE A).

A relação entre as condições climáticas e a densidade básica da madeira se baseou em seis variáveis meteorológicas. Foram obtidos os seus valores absolutos referentes às médias anuais para cada sítio, de acordo com os seguintes métodos:

- *Temperatura média anual (°C)*: média aritmética da temperatura média para cada ano e média dos quatro anos de cultivo.
- *Precipitação média anual (mm.ano⁻¹)*: média aritmética da precipitação para cada ano e média dos quatro anos de cultivo.
- *Déficit de pressão de vapor máximo (kPa)*: foi calculado de acordo com a equação proposta por Tetens e descrita por Alvarenga et al., (2014), pelas equações 1, 2 e 3. Todavia, utilizou-se a temperatura máxima do dia no cálculo do es:

$$DPV = es - ea \quad (1) \quad es = 0,6108 * \exp \left[\frac{17,3 * T_{\text{máx}}}{237,3 + T_{\text{máx}}} \right] \quad (2) \quad ea = \frac{UR * es}{100} \quad (3)$$

Em que: DPV: déficit de pressão de vapor de água no ar (kPa); es: pressão de saturação de vapor de água no ar (kPa); ea: pressão parcial de vapor de água no ar (kPa); T: temperatura média do ar (°C); UR: umidade relativa média do ar (%).

- *Deficit hídrico (mm.ano⁻¹)*: o balanço hídrico climatológico sequencial proposto por Thornthwaite e Mather (1955) e modificado por Camargo (1962) foi realizado em escala mensal. A evapotranspiração potencial (ETP) foi calculada pelo método de Penman-Monteith, parametrizado pela FAO (PM-FAO 56). A capacidade de armazenamento de água no solo (CAD) foi estimada pela equação proposta por Meneses (2005) de acordo com os teores de silte e argila do solo de cada sítio.
- *Índice de sazonalidade da temperatura (°C)*: calculou-se a média da temperatura a cada três meses efetuando-se a subtração do trimestre de maior temperatura pelo trimestre de menor temperatura a cada ano; ao final calculou-se a média das diferenças para os quatro anos.

- *Índice de sazonalidade da precipitação (mm)*: dividiram-se os anos em quatro trimestres e realizou-se a soma da precipitação a cada três meses, efetuando-se a subtração do trimestre de maior precipitação pelo trimestre de menor precipitação; ao final calculou-se a média das diferenças para os quatro anos.

5.4 Formação de grupos climáticos e densidade básica da madeira

Com a finalidade de entender previamente o comportamento da densidade básica da madeira frente em distintos cenários climáticos, foram formados grupos para representar tais situações. A análise foi realizada no software R (R CORE TEAM, 2014), e o método de agrupamento hierárquico aglomerativo da “Mínima Variância” proposto por Ward (1963) foi utilizado para formar grupos de sítios de menor dissimilaridade quanto às suas condições climáticas (seis variáveis propostas). A técnica objetiva agrupar os sítios que possuem maior homogeneidade intragrupo, ou seja, minimiza a soma de quadrados no grupo e maximiza intergrupos (SHARMA, 1996). Adotou-se como medida de dissimilaridade a distância de Mahalanobis (D^2), aplicada em casos em que as variáveis apresentam alguma correlação entre si e denominada pela seguinte equação 4:

$$D^2 = \sqrt{((x-m)'S^{-1}(x-m))} \quad (4)$$

Em que: $(x-m)'$: matriz transposta do grupo de variáveis; S^{-1} : matriz de covariância.

Foi delineado para cada clone o comportamento intergrupos da densidade básica da madeira a fim de verificar qual possibilita maiores valores em densidade básica e, ainda, maior variação da característica. O cálculo do índice de correlação cofenético foi determinado a partir da relação entre a matriz de dissimilaridade e a matriz resultante do agrupamento. A proximidade a 1 indica menor distorção da realidade no dendrograma, de modo a verificar a eficiência do agrupamento (VALENTIM, 2000).

Realizou-se a análise de variância (ANOVA) e o teste de médias Schott-Knott a 95% de significância a fim de identificar a diferença entre as densidades médias de

cada grupo. O incremento médio anual (IMA) foi plotado para caracterizar o crescimento do povoamento e delinear sua relação com a densidade básica da madeira em diferentes cenários.

5.5 Estimativa de densidade básica da madeira por variáveis climáticas

Após a análise exploratória dos dados, diferentes modelos para estimativa de densidade básica da madeira foram testados. Variáveis climáticas (temperatura, precipitação, DPV máximo, DEF e índices de sazonalidade da temperatura e precipitação) foram utilizadas e, para cada clone, selecionaram-se as que melhor estimam a variável dependente. Foi utilizado o pacote *Leaps* no software R (R CORE TEAM, 2014) e o método *Exhaustive Search*, que testa exaustivamente todas as combinações de variáveis e fornece a que melhor estima a variável dependente (HOLSCHUH, 2008).

Após a seleção de variáveis, foi ajustado o modelo de regressão linear pelo método dos mínimos quadrados ordinários (MMQO). Os melhores modelos foram selecionados pela análise gráfica das densidades observadas versus densidades estimadas, o coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{ajus.}$), erro médio absoluto e a raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE %).

$$R_{aj}^2 = 1 - \left(\frac{n-1}{n-p} \right) \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \right] \quad E(\%) = \frac{\sum abs(Y_{obs} - Y_{est})}{n} \quad RMSE(\%) = \frac{100}{\bar{Y}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n}}$$

Em que: Y_i : variável dependente observada; $\hat{Y}_i$: variável dependente estimada; $\bar{Y}$: média da variável dependente observada; p : número de parâmetros estimados no modelo; e n : número de observações.

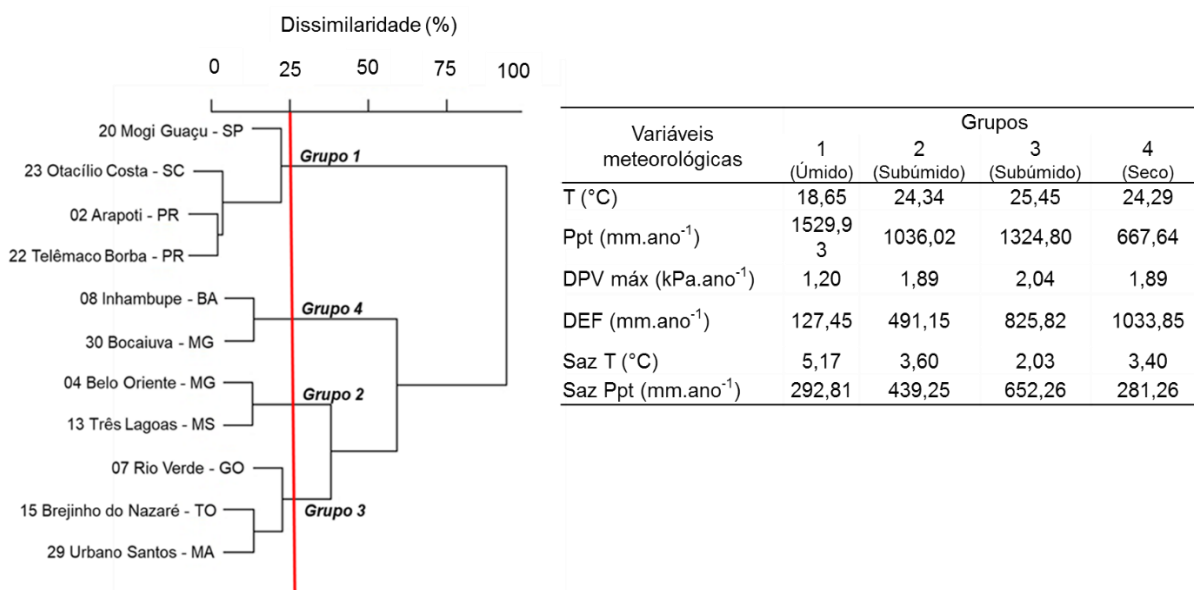
6. RESULTADOS

Os 11 locais apresentaram distintos valores para as variáveis meteorológicas. Os sítios 02, 22 e 23 possuíram altos índices pluviométricos e baixas temperaturas médias, o que resultou em baixa DEF, atrelada à alta sazonalidade da temperatura, deste modo, foram caracterizados como locais úmidos temperados (Apêndices C, D e E). Índices pluviométricos, temperaturas e DEF medianos caracterizaram os sítios 04, 13 e 20 como sub-úmidos (Apêndices C e D).

A alta sazonalidade da precipitação combinada a altas temperaturas constantes dos sítios 07, 15 e 29 garantiram sazonalidade demarcada a DEF e os caracterizaram como sub-úmidos (Apêndices C, D e E). O DEF e DPV_{máx} acentuados no período de verão para os 4 anos caracterizou os sítios 30 e 08 como locais secos (Apêndices D e E).

Geraram-se quatro grupos de condições meteorológicas distintas. O dendrograma de agrupamento foi interceptado em 75% de similaridade e 25% de dissimilaridade, e o índice de correlação cofenético foi 0,79. Os grupos foram organizados em ordem crescente, do menos seco para o mais seco (Figura 3).

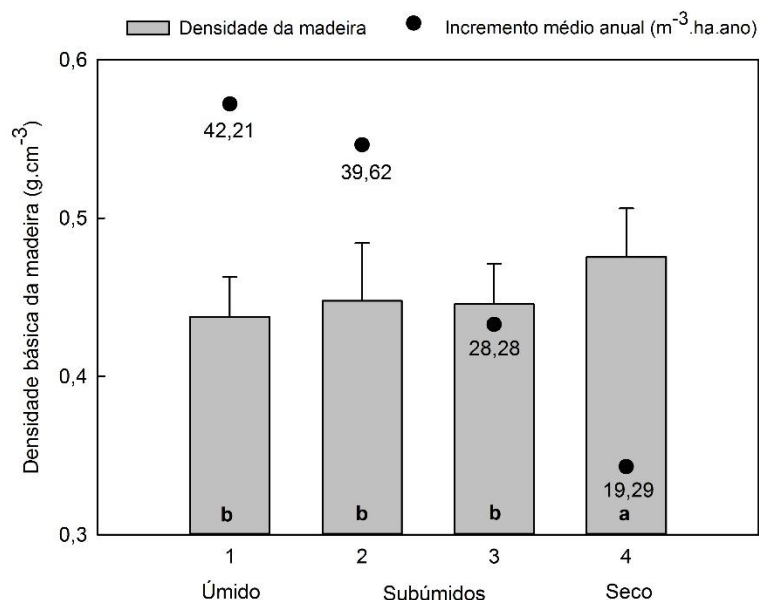
Figura 3. A) Dendrograma de agrupamento pelo método da Mínima Variância de 11 sítios em diferentes locais do Brasil para o conjunto de variáveis meteorológicas temperatura, precipitação, DPV máximo, deficiência hídrica, sazonalidades da temperatura e precipitação; B) Médias das variáveis meteorológicas para os grupos formados.



T: temperatura; Ppt: precipitação; DPV máx: déficit de pressão de vapor máximo no ar; DEF: déficit hídrico; Saz T: sazonalidade da temperatura; Saz Ppt: sazonalidade da precipitação.

O grupo 4, caracterizado como seco, apresentou maior média em densidade básica da madeira (Figura 4), mas não ocorreu acréscimo em densidade proporcionalmente ao aumento das condições secas para todos os clones. Locais menos secos (grupos 1 e 2) não apresentaram grandes diferenças em valores médios de densidade da madeira. O ritmo de crescimento respondeu de forma decrescente para os grupos mais secos, embora sua relação com a densidade da madeira não seja explícita, está atrelada à particularidade de cada material genético (Figura 4).

Figura 4 - Densidade básica média da madeira e incremento médio anual de clones de eucalipto aos 4 anos de idade em função de grupos climáticos.



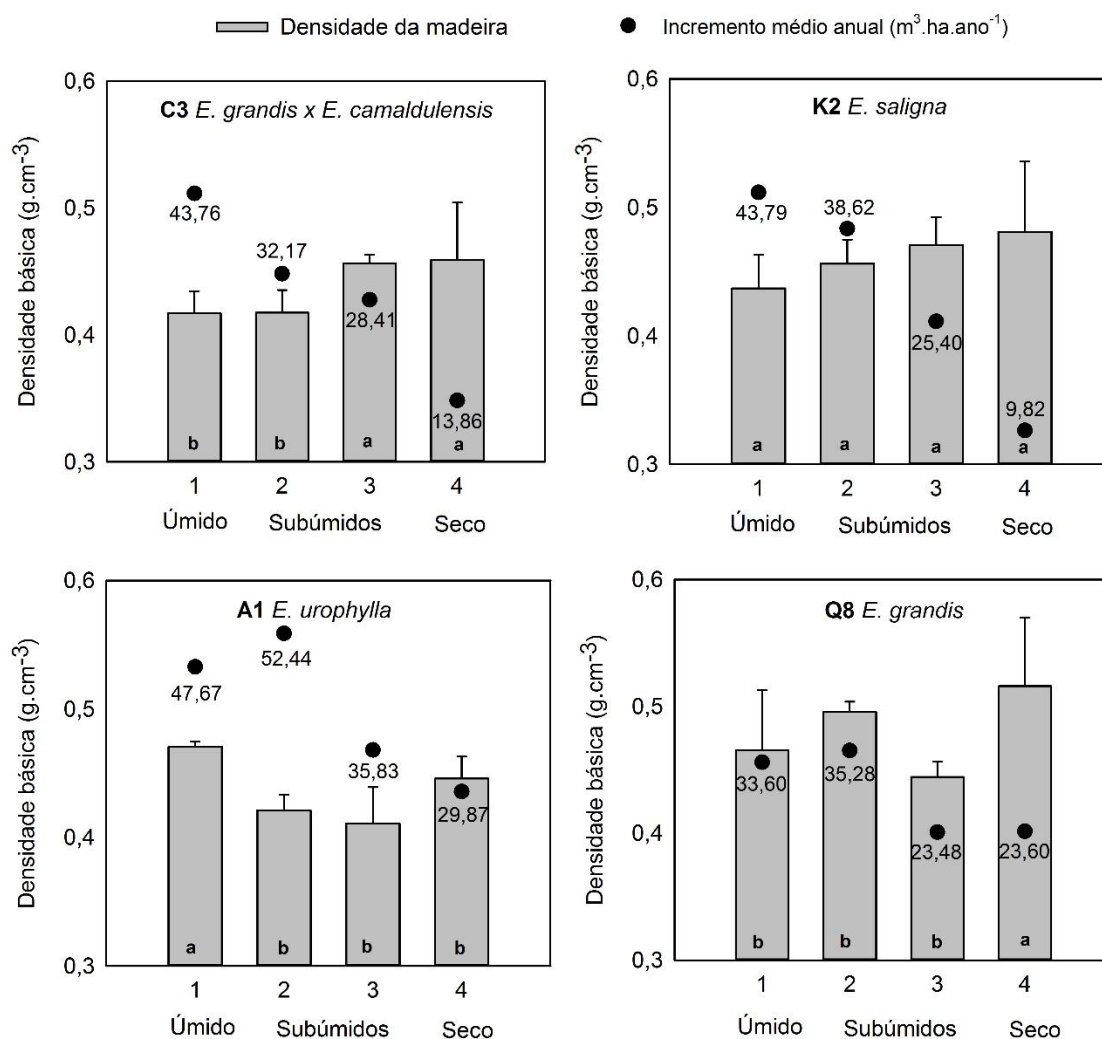
*Médias seguidas de mesmas letras não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

A densidade da madeira foi maior a 5% de probabilidade de acordo com o aumento do DEF e diminuição do crescimento expresso em IMA, porém, o comportamento não ocorreu para todos os clones e ambientes. Por exemplo, o clone A1 no grupo 1 (menor DEF) apresentou alto valor em IMA e maior densidade da madeira (Figura 5).

No geral, o aumento em DEF e DPV_{máx} provocou aumento na densidade da madeira, mas em alguns casos foram limitantes. Valores extremos em DPV_{máx} (grupo 3 – 2,04 kPa) limitaram tanto o crescimento quanto o aumento em densidade.

Nos grupos 3 e 4, os clones A1 e Q8 obtiveram IMAs semelhantes e valores de densidades distintos e denotou que a proporcionalidade entre aumento de IMA e diminuição em densidade da madeira é particular para cada material genético (Figura 5).

Figura 5 - Densidade básica da madeira de 4 clones de eucalipto aos 4 anos de idade em função de grupos climáticos.



*Médias seguidas de mesmas letras não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Para o clone C3 - *E. grandis* x *E. camaldulensis*, em resposta ao acréscimo de 88% de déficit hídrico do grupo 1 ao grupo 4, houve diminuição de 70% em IMA e aumento de 9% no valor de densidade básica da madeira (Figura 5). Esperava-se que a maior densidade básica da madeira estivesse atrelada ao menor crescimento para locais com baixos déficits hídricos, porém, o comportamento foi o inverso ao de um material genético nativo de ambientes secos e tolerantes ao déficit hídrico.

O clone K2 - *E. saligna* é adaptado a ambientes mais úmidos. O crescimento e densidade básica da madeira foram característicos do clima de origem, em que o acréscimo de 88% de DEF do grupo 1 para o grupo 4 possibilitou decréscimo de 78% em IMA e aumento de 9% de densidade básica da madeira mesmo não havendo diferença estatística significativa entre os valores (Figura 5).

O clone A1 - *E. urophylla* não apresentou tendência definida de acréscimo em densidade da madeira atrelada ao menor IMA. No grupo 1, com menor DEF, houve 14% de aumento da densidade básica da madeira, e o seu crescimento não foi comprometido. Já para o grupo 4, com maior DEF e menor IMA, houve acréscimo em 9% na densidade básica da madeira (Figura 5).

Semelhantemente ao clone K2, o Q8 - *E. grandis*, material genético de ambientes de baixo déficit hídrico, quando submetido em condições de alto DEF, reduziu o IMA e houve acréscimo de 10% em densidade básica da madeira. No grupo 3, o alto DPVmáx provavelmente foi uma condição limitante para o crescimento e também para o aumento em densidade básica da madeira (Figura 5).

Os clones apresentaram uma ou duas variáveis que se correlacionaram fortemente e melhor estimaram a densidade básica da madeira a 95% de significância. As variáveis meteorológicas selecionadas explicaram de 30% a 47% da variação em densidade básica da madeira.

O DPV máximo foi a variável de maior influência na densidade da madeira para os clones C3, K2 e Q8, com correlação positiva (Apêndice G). Houve combinação de outras variáveis, como o DEF, sazonalidade da temperatura e precipitação para o ajuste das equações (Tabela 4). O clone A1 apresentou maior correlação com a temperatura e evidenciou o decréscimo em densidade da madeira com o aumento em temperatura (Tabela 4).

Tabela 4 – Modelos de regressão simples e medidas de precisão para estimativa de densidade básica da madeira de eucalipto aos 4 anos por meio de variáveis meteorológicas.

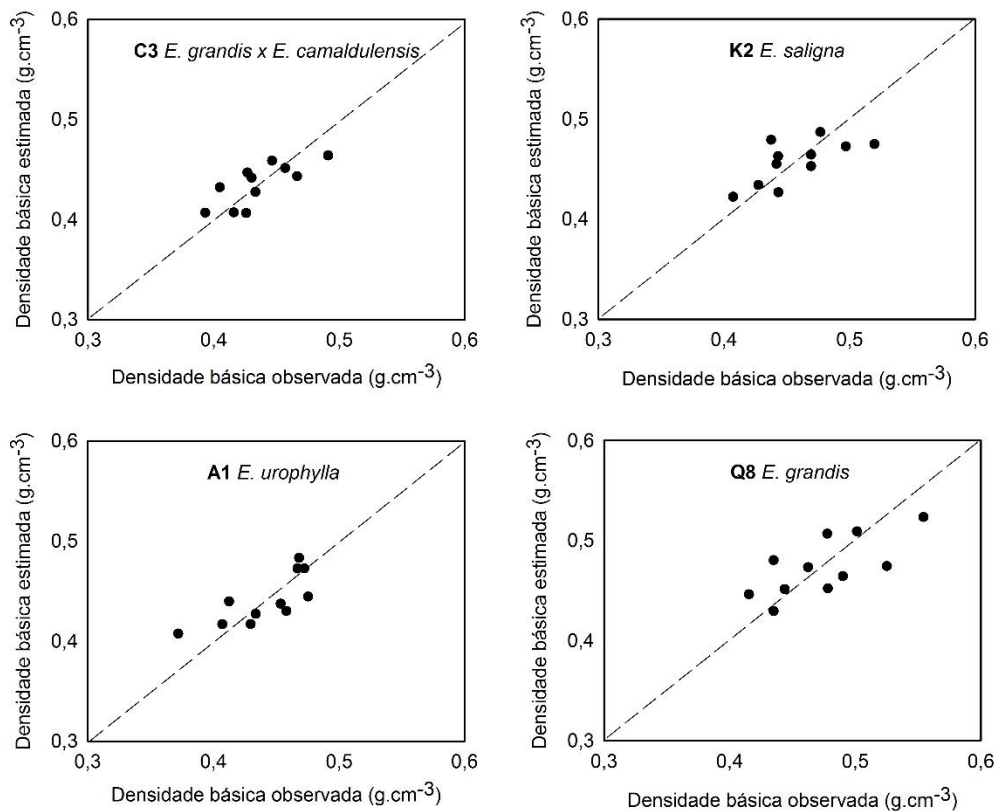
Clones	Modelos	R ² ajus.	Erro médio absoluto (g.cm ⁻³)	RMSE (%)
C3	$0,385400 + 0,018490 * \text{DPVmáx} + 0,000034 * \text{DEF}$	0,46	0,027	7,23
K2	$0,443994 + 0,025348 * \text{DPVmáx} - 0,007821 * \text{sazT}$	0,30	0,024	6,85
A1	$0,599171 - 0,007021 * \text{T}$	0,47	0,022	6,18
Q8	$0,408400 + 0,083560 * \text{DPVmáx} - 0,000182 * \text{sazPPT}$	0,36	0,025	6,03

T: Temperatura; DEF: Déficit Hídrico; DPVmáx: Déficit de Pressão de Vapor máximo; sazPPT: Sazonalidade da Precipitação; sazT: sazonalidade da Temperatura; R²ajus.: Coeficiente de determinação ajustado; RMSE: raiz quadrada do erro quadrático médio.

Para todos os modelos o RMSE foi abaixo de 10%, e ao utilizá-los para estimativa os valores previstos pouco desviam dos observados, como mostra os valores médios de erro absoluto (Tabela 4).

Os modelos ajustados para estimativa de densidade básica da madeira de eucalipto apresentaram tendência linear e dispersão próximas às densidades observadas. Para os clones C3 e K2 houve tendência de melhores estimativas para densidades mais baixas, já para o clone A1 a tendência foi observada para maiores densidades (Figura 6).

Figura 6 - Densidade da madeira observada versus densidade estimada de 4 clones de eucalipto aos 4 anos de idade em função de variáveis climáticas em 11 locais do Brasil.



7. DISCUSSÃO

A diversidade meteorológica entre os 11 sítios no período de cultivo reflete a heterogeneidade climática do Brasil. O país apresenta grande diversidade de tipos e comportamentos climáticos durante o ano, de acordo com a região, e está dividido em três zonas e nove tipos climáticos. Ao identificar o clima de um local/região é possível inferir sobre qual tipo de vegetação/espécies melhor se adapta àquele local (ALVARES et al., 2013). Não somente o tipo de espécies e vegetação, mas também as características da madeira advinda das florestas.

Os grupos gerados a partir das condições meteorológicas dos quatro anos de cultivo (2012 a 2015) foram semelhantes àqueles formados por Stape et al. (2014), em que os climas dos sítios que integram os grupos foram determinados como 1 - úmido, 2 e 3 – sub-úmidos e 4 - seco.

O DEF médio para cada grupo retrata diferentes cenários de condições hídricas. A distinta disponibilidade hídrica varia de acordo com as características físico-hídricas do solo, precipitação e evapotranspiração da vegetação. A deficiência hídrica ocorre a partir do momento em que a evapotranspiração excede a ocorrência da precipitação, assim a vegetação utilizará águas subterrâneas obtidas em maior profundidade (WILSKE et al., 2009).

Existem dois estágios entre a disponibilidade hídrica e sua utilização pela vegetação. No estágio 1, a água está disponível no solo e a planta não tem dificuldades para extraí-la e exerce condutância estomática e transpiração ótimas. No estágio 2, a disponibilidade hídrica do solo diminui e dificulta a extração de água, diminuindo a condutância estomática e transpiração, para manter o seu potencial hídrico em equilíbrio (MARTINS et al., 2008).

Locais com menores disponibilidades hídricas, como os sítios do grupo 4, caracterizados como secos, induzem a formação de vasos condutores com menores diâmetros, a fim de maximizar a condutividade hidráulica. As menores taxas fotossintéticas limitam o crescimento e investem maiores custos de carbono na parede celular e nos vasos com menores diâmetros e assim inferem correlações negativas entre o crescimento e a densidade básica da madeira (POORTER et al., 2009).

O acréscimo em densidade da madeira em resposta ao aumento do DEF, nos clones C3 e K2, é um mecanismo de defesa ao embolismo. Altas pressões

negativas advindas da menor disponibilidade hídrica no solo combinadas aos vasos largos e longos favorecem a cavitação, ou seja, ocorre a quebra das ligações de hidrogênio no menisco e há aspiração de ar. O espessamento da parede celular irá diminuir os riscos de colapso e garantir a segurança do transporte (MARTÍNEZ-CABRERA et al., 2009; MARKESTEIJN et al., 2009).

Possivelmente nos grupos 3 e 4, para os clones C3 e K2, a diminuição da área de vasos (espaço vazios) atrelada ao espessamento da parede celular colaborou para maior concentração de carbono e aumento em densidade da madeira frente às condições severas de seca. Entretanto, a relação deficiência hídrica x crescimento x densidade da madeira ocorre de forma distinta de acordo com a espécie de eucalipto e ambiente de origem de cada material genético (GRIEBEL; BENNETT; ARNDT, 2017).

Os clones K2 e A1 apresentaram relações conflitantes: espera-se que espécies de clima temperado tolerem maiores variações em temperaturas e deficiências hídricas do que as espécies tropicais por estarem submetidas a maiores sazonalidades em seu habitat natural (CUNNINGHAM; READ, 2002; NABAIS et al., 2018). Esses clones (K2 e A1) foram mais penalizados quando cresceram em condições secas, com redução do crescimento e, consequente, aumento em densidade da madeira.

Maiores valores de densidade da madeira das árvores que cresceram em locais mais secos eram esperados para o clone C3, entretanto, ocorreu o contrário, o que pode estar relacionado ao maior índice de heterozigosidade do híbrido – 0,294 - (BINKLEY et al., 2017). Aumento da heterozigosidade acarreta maior variabilidade e tendência de comportamento semelhante a um dos parentais (SOUZA et al., 2010). No híbrido, a semelhança é atribuída ao parental *E. grandis*, espécie pouco tolerante à seca (BOLAND et al., 2006); o seu crescimento foi comprometido com o aumento em DEF e DPV máximo e, consequente, acréscimo em densidade da madeira.

A combinação de alto DPV_{máx} e DEF, como observado no grupo 3 para os clones A1 e Q8, foi limitante. Provavelmente a oferta de carbono diminuiu substancialmente devido à baixa condução estomática e oferta de água em virtude do alto DEF, e reduziu a fotossíntese, o crescimento e, consequentemente, a densidade da madeira (SANTIAGO et al., 2004). O DEF e DPV máximo funcionaram

como agentes limitantes para a dormência cambial. A diminuição do crescimento causou acréscimo em densidade da madeira como mecanismo de defesa (LARA et al., 2017).

O DPV é uma das variáveis meteorológicas mais responsivas na condutância estomática em eucalipto, e a tradução da resposta influencia diretamente a eficiência do uso da água do solo. Mesmo o eucalipto mantendo o estômato aberto em altas taxas de DPV, condições extremas de seca conduzem ao fechamento estomático como forma de limitar as trocas gasosas e fotossíntese e diminuir a absorção de água do solo (MACFARLANE; WHITE; ADAMS, 2004).

O clone A1 evidenciou impossibilidade de estabelecer relação clara entre crescimento e densidade e isso pode estar atrelado à sua forte expressão genética. Em condições ótimas, a relação entre o crescimento e a densidade da madeira se torna equivalente, pois a densidade da madeira é uma característica herdada de forma aditiva e expressa em seu valor ótimo, mesmo em maiores taxas de crescimento (ASSIS, 2014; TAN et al., 2018).

As variáveis selecionadas para estimativa da densidade não foram as mais correlacionadas com a variável resposta e sim as que forneceram o conjunto que melhor estimou a propriedade. Selecionar variáveis significativas e que, combinadas, estimam melhor a variável dependente geraram modelo de regressão linear mais robusto (TSAGKRASOULIS; MONTANA, 2018).

Na seleção das variáveis para estimativa de densidade da madeira, cada material genético apresentou maior conexão com uma variável climática, que infere sobre o potencial estimador da variável a uma característica de interesse (MELESSE; ZEWOTIR, 2012). A temperatura geralmente fornece uma relação positiva com a densidade da madeira e induz a lignificação no lenho tardio (GRIND; GRABNER; WIMMER, 2001). Mas a relação não é uma regra, e a interação entre o conjunto de variáveis pode influenciar majoritariamente na densidade da madeira.

A sazonalidade das variáveis climáticas, principalmente a temperatura e a precipitação, contribui para as alterações em densidade da madeira atreladas à formação dos anéis de crescimento (CAMARERO; GUTIÉRREZ, 2017). Maiores sazonalidades possibilitam melhores respostas às estações com altas precipitações e formação do lenho inicial de menor densidade, resultando em menor densidade média da madeira.

Embora a densidade da madeira seja uma característica herdável, evidenciou-se a existência da interação com as variáveis meteorológicas. A variação nas taxas de incremento em madeira pode alterar a concentração de carbono no xilema secundário, porém, não se pode estabelecer uma proporcionalidade e regra entre os valores em densidade da madeira e crescimento.

Devem-se observar os traços genéticos de afinidade de cada clone por climas específicos. Selecionar variáveis significativas e que melhor interagem para estimativa de densidade da madeira melhora a robustez do modelo de regressão proposto para o planejamento florestal.

8. CONCLUSÕES

Cada espécie e material genético apresenta comportamento característico ao seu clima de origem, entretanto, a variação em crescimento responde em maior proporção do que a variação em densidade.

O DPV máximo responde em maiores proporções e de maneira positiva ao aumento em densidade da madeira. Contudo, a combinação com o fator hídrico proporciona maiores impactos sob sua alteração e exprime potencial para estimativa em densidade. A adição de um fator genético e de idade pode contribuir com a melhoria dos modelos de estimativa.

A caracterização da madeira em resposta às condições climáticas não é expressa apenas em densidade da madeira, fazendo-se necessários estudos anatômicos e químicos para entender a relação clima x qualidade da madeira.

REFERÊNCIAS

- ABRUZZI, R. C. et al. Relação das propriedades mecânicas e densidade de postes de madeira de eucalipto com seu estado de deterioração. **Revista Árvore**, Viçosa, v.36, n.6, p. 1173-1181, 2012.
- ALVARENGA, C. B. et al. Efeito do déficit de pressão de vapor d'água no ar na pulverização hidropneumática em alvos artificiais. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 30, n. 1, p. 182-193, 2014.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Gebruder Borntraeger, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ALZATE, S. B. A. **Caracterização da madeira de árvores de clones de *Eucalyptus grandis*, *E. saligna* e *E. grandis* x *E. urophylla***. 2004. 151f. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Universidade Estadual de São Paulo, Piracicaba, 2004.
- ALLEN, R. G. et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 300 p. (FAO – Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ASSIS, T. F. Melhoramento genético de *Eucalyptus*: Desafios e perspectivas. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE SILVICULTURA, 3., 2014. Campinas. **Anais...** Curitiba: Malinovski, 2014. v. 1, 307 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR-11941**: madeira – determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003.
- BAKER, T. R et al. Variation in wood density determines spatial patterns in Amazonian forest biomass. **Global Change Biology**, Oxford, v. 10, n. 5, p. 545- 562, 2004.
- BARBOSA, T. L. **Qualidade da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* cultivados em cinco regiões do estado de minas gerais para produção de celulose**. 2013. 126f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2013.
- BENJAMIN, C. A. **Estudo da estrutura anatômica e das propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Corymbia (Eucalyptus) citriodora* e *Eucalyptus grandis***. 2006. 180 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2006.
- BINKLEY, D. et al. The interactions of climate, spacing and genetics on clonal *Eucalyptus* plantations across Brazil and Uruguay. **Forest Ecology and Management**, New York, v. 405, n. 15, p. 271-283, 2017.
- BOLAND, D. J.; BROOKER, M. I. H.; CHIPPENDALE, G. M. et al. **Forest Trees of Austrália**. Austrália: Hardcover, 2006. 768 p.

BRAZ, R. L. et al. Caracterização anatômica, física e química da madeira de clones de *Eucalyptus* cultivados em áreas sujeitas à ação de ventos. **Ciência da Madeira** (Brazilian Journal of Wood Science), Porto Alegre, v.5, n.2, p.127-137, 2014.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. **Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal**: I. Densidade e teor de lignina da madeira de eucalipto. IPEF, Piracicaba, n.14, p.9-20, 1977.

CARLQUIST, S. **Comparative wood anatomy**: systematic ecological and evolutionary aspects of Dicotyledonean wood. Berlim: Springer Verlag, 1988. 436 p.

CAMARERO, J. J.; GUITIÉRREZ, E. Wood density of silver fir reflects drought and cold stress across climatic and biogeographic gradients. **Dendrochronologia**, Suíça, v.45, p.101-112, 2017.

CAMARGO, A. P. Contribuição para a determinação da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 21, n. 12, p. 163-213, 1962.

CHAVE, J. et al. Towards a worldwide wood economics spectrum. **Ecology Letters**, Oxford, v.12, p.351-366, 2009.

CHAVE, J. **Medição da densidade da madeira em árvores tropicais, manual de campo**. Toulouse: Projeto PAN AMAZONIA - Université Paul Sabatier, 2002. 07 p.

CUNNINGHAM, S. C.; READ, J. Comparison of temperate and tropical rainforest tree species: photosynthetic responses to growth temperature. **Oecologia**, Austrália, v.133, p. 112-119, 2002.

DOWNES, G. M. et al. Wood properties of *Eucalyptus globulus* at three sites in Western Australia: effects of fertilizer and plantation stocking. **Australian Forestry**, Austrália, v. 77, n. 3, p.179-188, 2014.

DOWNES, G. M. **Sampling plantation eucalypts for wood and fiber properties**. Austrália: CSIRO Publishing, 1997. 144 p.

FERREIRA, M.; KAGEYAMA, P.Y. Melhoramento genético da densidade da madeira de eucalipto. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 3., 1978, São Paulo, SP. **Anais...SILVICULTURA**, 1978, v. 14, n. 14, p. 148-152.

FOELKEL, C.E.; MORA, E.; MENOCELLI, S. Densidade básica: sua verdadeira utilidade como índice de qualidade da madeira de eucalipto para produção de celulose. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 6., Campos do Jordão, SP, 1990. **Anais...** Campos do Jordão, 1990. p.719- 728.

FUNK, C. et al. The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. **Scientific Data**, China, v. 2, p. 150066, 2015.

GARCÍA, C. B. **Anatomia, composição e propriedade de cinco madeiras paraguaias**. 1995. 126 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1995.

GINDL, W.; GRABNER, M.; WIMMER, R. Effects of altitude on tracheid differentiation and lignification of Norway spruce. **Canadian Journal of Botany**, Canadá, v. 79, n. 7, 2001.

GOMIDE, J. L.; FANTUZZI NETO, H.; REGAZZI, A. J. Análise de critérios de qualidade da madeira de eucalipto para produção de celulose kraft. **Revista Árvore**, Viçosa, v.34, n.2, p.339-344, 2010.

GONÇALEZ, J. C. et al. Relações entre dimensões de fibras e de densidade da madeira ao longo do tronco de *Eucalyptus urograndis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 42, n. 101, p. 81-89, 2014.

GOUVEA, A. F. G. et al. Efeito do sítio nas características tecnológicas da madeira de *Eucalyptus* para produção de celulose kraft. **Ciência da Madeira**, Pelotas, v. 03, n. 02, p. 102-115, 2012.

GRIEBEL, A.; BENNET, L. T.; ARNDT, S. K. Evergreen and ever growing – Stem and canopy growth dynamics of a temperate eucalypt forest. **Forest Ecology and Management**, New York, v. 389, p. 417-426, 2017.

HACKE, U. G.; SPERRY, J. S. Functional and ecological xylem anatomy. **Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics**, China, v.4, n.2, p. 97–115, 2001.

HOLSCHUH, L. de M. **Contribuições para o aprendizado por busca de projeção**. 2008. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

ILBANEZ, T. et al. Community variation in wood density along a bioclimatic gradient on a hyper-diverse tropical island. **Journal of Vegetation Science**, Madford, n. 28, p.19–33, 2017.

KOCACINAR, F.; SAGE, R. F. Hydraulic Properties of the Xylem in Plants of Different Photosynthetic Pathways. In: HOLBROOK, N. M.; ZWIENIECK, M. **Vascular Transport in Plants**. Physiological Ecology, California, 592 p., 2005.

KOJIMA, M. et al. Effects of the lateral growth rate on wood quality parameters of *Eucalyptus grandis* from different latitudes in Brazil and Argentina. **Forest Ecology and Management**, New York, v. 257, p. 2175 – 218, 2009.

LARA, N. O. T. et al. Duration of cambial activity is determined by water availability while cambial stimulus is day-length dependent in a Neotropical evergreen species. **Environmental and Experimental Botany**, Barcelona, n. 14, p. 50–59, 2017.

LENS, F. et al. Embolism resistance as a key mechanism to understand adaptive plant strategies. **Plant Biology**, Africa, v. 16, p. 287-292, 2013.

LUMLEY, T. **Regression Subset Selection**, 10 jan. 2017. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/web/packages/leaps/leaps.pdf>>. Acesso em: 02 dez. 2017.

MACFARLANE, C.; WHITE, D. A.; ADAMS, M. A. The apparent feed-forward response to vapour pressure deficit of stomata in droughted, field-grown *Eucalyptus globulus* Labill. **Plant, Cell and Environment**, v.27, n.10, p.1266-1280, 2004.

MARKESTEIJN, L.; POORTER, L. Seedling root morphology and biomass allocation of 62 tropical tree species in relation to drought- and shade-tolerance. **Journal of Ecology**, Londres, n. 97, p. 311-325, 2009.

MARTINS, F. B. et al. Deficiência hídrica no solo e seu efeito sobre transpiração, crescimento e desenvolvimento de mudas de duas espécies de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Santa Maria, n. 32, p.1297-1306, 2008.

MARTÍNEZ – CABRERA, H. I. et al. Wood anatomy and wood density in shrubs: responses to varying aridity along transcontinental transects. **American Journal of Botany**, USA, v. 96, n.8, p. 1388-1398, 2009.

MATTOS, E. M. **Caracterização da sazonalidade do crescimento do lenho, da copa e da eficiência do uso da luz em clones do gênero *Eucalyptus***. 2015. 130 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.

MELESSE, S. F.; ZEWOTIR, T. The effect of correlated climatic factors on the radial growth of eucalypt trees grown in coastal Zululand of South Africa. **African Journal of Agricultural Research**, África, v. 8, n. 14, p. 1233- 1244, 2012.

MENESES, A. A. **Produtividade de eucalipto e sua relação com a qualidade e a classe de solo**. 2005. 110 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

MONTEIRO, T. C. **Efeito da anatomia no fluxo da água em madeira de *Eucalyptus* e *Corymbia***. 2004. 131f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras. Lavras, 2014.

MOULIN, J. C. et al. Efeito do espaçamento, idade e irrigação no volume e densidade básica do eucalipto. **Floresta e Ambiente**. Seropédica, v. 24, p. 1-10, 2017.

MOURA, M. J.; FIGUEIREDO, M. M. Estudos de variabilidade numa árvore de *Eucalyptus globulus*. **O Papel**, São Paulo, v. 63, n. 6, p.71-79, 2002.

MOUTINHO, V. H. P. **Influência da variabilidade dimensional e da densidade da madeira de *Eucalyptus* sp. e *Corymbia* sp. na qualidade do carvão**. 2013. 164 f. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

NABAIS, C. et al. The effect of climate on wood density: What provenance trials tell us?. **Forest Ecology and Management**, New York, v. 408, p. 148-156, 2018.

POORTER, L. et al. Leaf traits show different relationships with shade tolerance in moist versus dry tropical forests. **New Phytologist**, Lancaster, v. 181, p. 890-900, 2009.

POUBEL, D. S. et al. Estrutura Anatômica e Propriedades Físicas da Madeira de *Eucalyptus pellita* F. Muell. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 18, n. 2, p. 117-126, 2011.

QUEIROZ, S. C. S. et al. Influência da densidade básica da madeira na qualidade da polpa kraft de clones híbridos de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 28, n. 6, p.901-909, 2004.

R Core Team, 2014. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. <<http://www.R-project.org>> (accessed 12.10.2017).

ROQUE, R. M.; TOMAZELLO FILHO, M. Variação radial da estrutura anatômica do lenho de árvores de *Gmelina arborea* em diferentes condições de clima e de manejo na Costa Rica. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 37, n. 83, p. 273-285, 2009.

SANTIAGO, L. S. et al. Scale of photosynthetic characteristics of leaves with hydraulic conductivity and wood density in canopy trees of the Panamanian forest. **Oecologia**, Austrália, v. 140, n. 4, p. 543-550, 2004.

SANTOS, R. C. et al. Correlações entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 90, p. 221-230, 2011.

SHARMA S. **Applied multivariate techniques**. NewYork: John Wiley & Sons, 1996, 493p.

SILVA, M. G. **Produtividade, idade e qualidade da madeira de Eucalyptus destinada a produção de polpa celulósica branqueada**. 2011. 95F. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

SOUSA JUNIOR, W. P. **Propriedades físicas, mecânicas e anatômicas das madeiras de Eucalyptus cloeziana e de Eucalyptus urophylla oriundas dos municípios de Turmalina e Paraopeba (MG)**. 2004. 75f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2004.

SOUZA, H. G. A. et al. Diversidade genética em populações núcleo de *Eucalyptus grandis*. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 32, n. 4, p. 621-625, 2010.

STACKHOUSE, P. W. et al. Prediction of Worldwide Energy Resource (POWER). **Agroclimatology Methodology**. (1.0 Latitude by 1.0 Longitude Spatial Resolution) p. 0–45, 2015.

STAPE, J. L. et al. Fatores Hídricos e as decisões de silvicultura, de melhoramento e de proteção na eucaliptocultura: O programa TECHS. Encontro Brasileiro de Silvicultura, 3., 2014, Campinas. **Anais...** Curitiba: Embrapa Florestas, 2014, p. 81-98.

STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; RYAN, M. G. *Eucalyptus* production and the supply, use and efficiency of use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management**, New York, v. 193, p. 17-31, 2004.

TAN, B. et al. Genomic relationships reveal significant dominance effects for growth in hybrid *Eucalyptus*. **Plant Science**, USA, v. 267, p. 84-93, 2018.

THOMAS, D. S.; MONTAGU, K. D.; CONROY, J. P. Changes in wood density of *Eucalyptus camaldulensis* due to temperature—the physiological link between water viscosity and wood anatomy. **Forest Ecology and Management**, New York, v. 193, p. 157-165, 2004.

TSAGKRASOULIS, D.; MONTANA, G. Random forest regression for manifold-valued responses. **Pattern Recognition Letters**, Inglaterra, v. 101, 2018, p. 6-13.

VALENTIN, J. L. **Ecologia numérica**: uma introdução à análise multivariada de dados ecológicos. Rio de Janeiro: Inter ciência, 2000, 154p.

XAVIER, A. C., KING, C. W., & SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013). **International Journal of Climatology**, Austin, v. 2659, p. 2644-2659, 2015.

WARD, J.H. Hierarchical grouping to optimize an objective function. **Journal of the American Statistical Association**, USA, v. 58, p.236-244, 1963.

WOOD, L. J.; SMITH, D. J.; HARTLEY, I. D. Predicting softwood quality attributes from climate data in interior British Columbia, Canada. **Forest Ecology and Management**, New York, v. 631, p. 81-89, 2016.

WILSKE, N.; LU, N.; WEI, L.; CHEN, S.; ZHA, T.; LIU, C.; XU, W.; NOORMETS, A.; HUANG, J.; CHEN, J.; ZHANG, Z.; NI, J.; SUN, G.; GUO, K.; MCNULTY, S.; JOHN, R.; HAN, X., LIN, G.; CHEN, J. Poplar plantation has the potential to alter the water balance in semiarid Inner Mongolia. **Journal of Environmental Management**, USA, v. 90, p. 2762-2770, 2009.

ZHANG, J.; NIEMINEM, K.; SERRA, J. A. A.; HELARIUTTA, Y. The formation of wood and its control. **Current Opinion in Plant Biology**, USA, v. 17, P. 56-63, 2014.

ZOBEL, B. Silvicultural effects on wood properties. **IPEF International**, Piracicaba, v. 2, p. 31-38, 1992.

ZOBEL, B. J.; VAN BUIJTENEN, J. P. Wood Variation: its Causes and Control. Berlim: Springer-Verlag, 1989, 325p.

APÊNDICES

APÊNDICE A - Estações meteorológicas referentes aos locais de estudo e porcentagem de preenchimento de falhas em dados meteorológicos.

Sítio	Cidade/Estado	Estação meteorológica	% de preenchimento
2	Arapoti - PR	INMET- Ventania-A872	6,3
4	Belo Oriente - MG	In situ - Belo Oriente	0,7
7	Rio Verde – GO	INMET- Rio Verde-A025	9,2
8	Inhambupe – BA	INMET- Feira de Santana-A413	20,2
13	Três Lagoas - MS	INMET- Três Lagoas-A704	3,2
15	Brejinho do Nazaré - TO	INMET- Gurupi-A019	4,6
20	Mogi Guaçu - SP	INMET- Itapira-A739	3,6
22	Telêmaco Borba - PR	INMET- Ventania-A872	6,3
23	Otacílio Costa - SC	INMET- Curitiba-A860	0,8
29	Urbano Santos - MA	INMET- Chapadinha-A206	28,6
30	Bocaiúva – MG	INMET- Montes Claros-A506	1,3

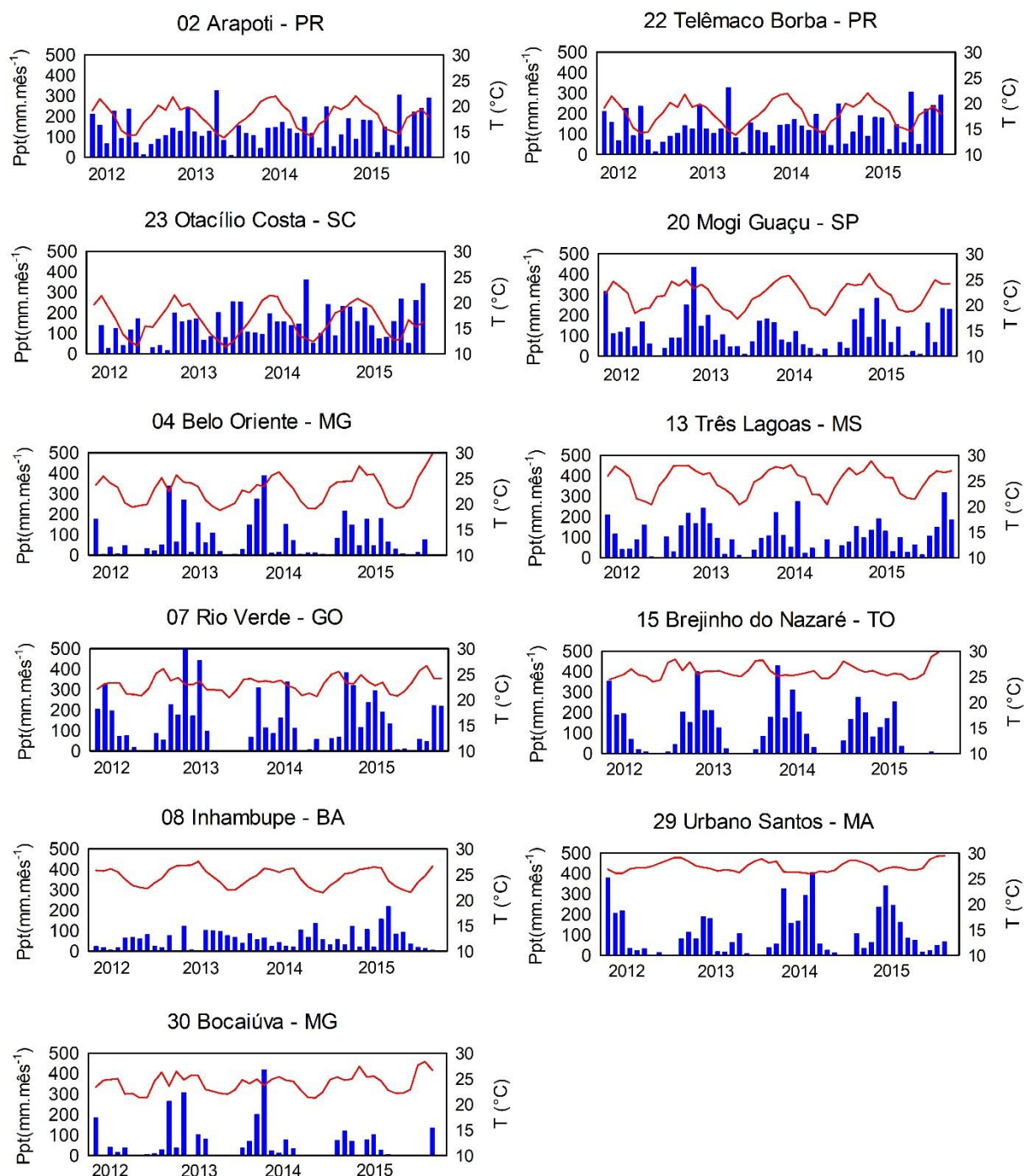
APÊNDICE B – Variáveis meteorológicas médias para o período de 2012 a 2015 em 11 locais do Brasil de cultivo de eucalipto.

Sítio	T (°C)	Ppt (mm.ano ⁻¹)	DPVmáx (kPa)	DEF (mm.ano ⁻¹)	SazT (°C)	SazPPT (mm)	CAD (mm)
2	18,03	1562,63	1,02	64,80	5,50	230,00	276,90
4	22,72	907,41	1,66	474,10	2,77	459,75	204,30
7	23,05	1515,20	1,88	679,30	2,41	755,28	21,80
8	24,49	685,88	1,64	917,70	3,87	213,93	65,40
13	25,95	1164,63	2,11	508,20	4,43	418,75	58,80
15	25,98	1273,78	2,14	778,10	1,43	631,80	44,40
20	22,03	1375,83	1,76	285,30	4,55	449,68	167,70
22	18,03	1562,63	1,02	73,60	4,58	262,90	232,90
23	16,52	1618,65	1,01	86,10	6,04	228,65	208,10
29	27,32	1185,43	2,09	1020,05	2,25	569,70	29,80
30	24,09	649,40	2,13	1150,00	2,93	348,60	269,90

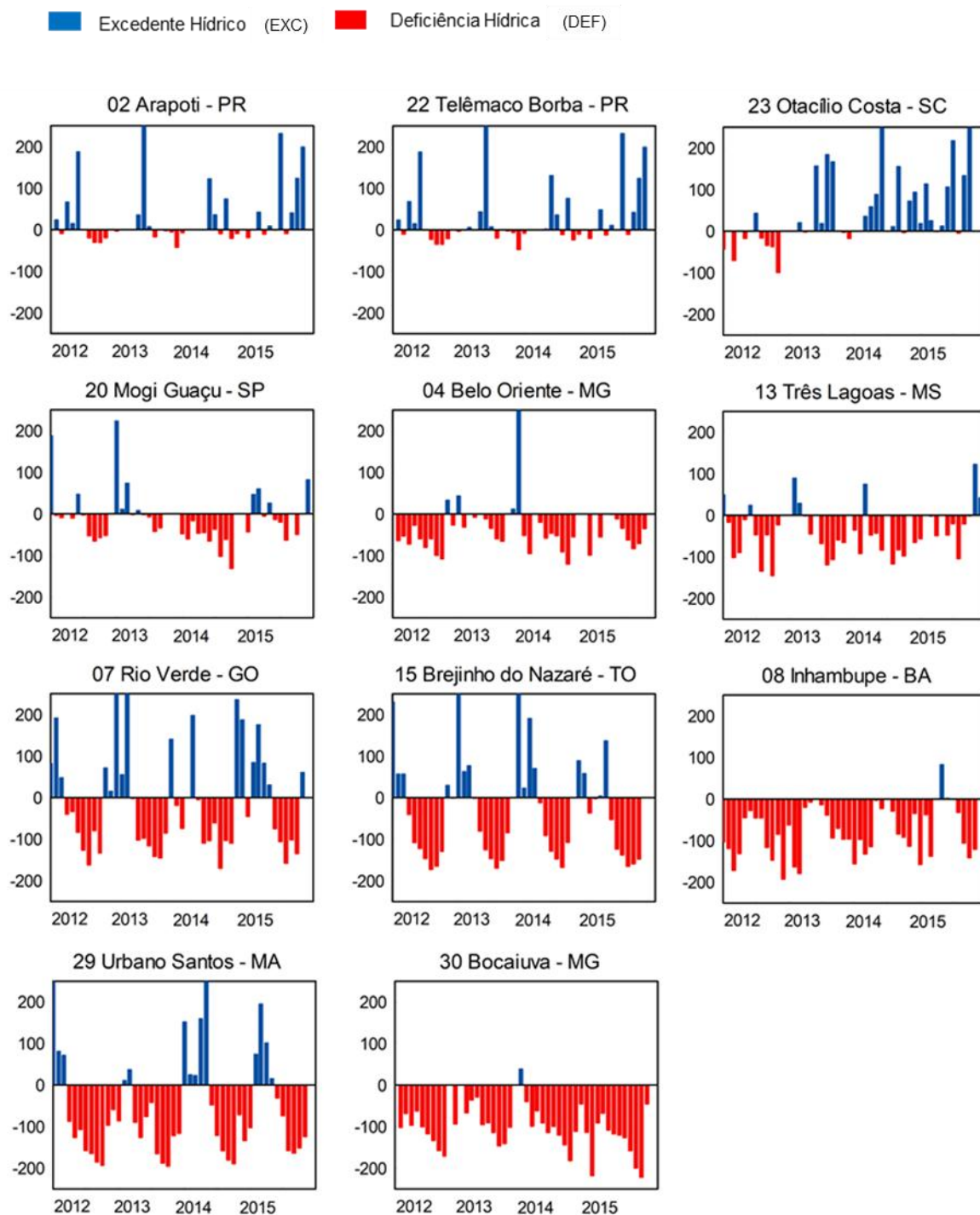
T: Temperatura; Ppt: precipitação; DPVmáx: déficit de pressão de vapor máximo; SazT: Sazonalidade da temperatura; SazPPT: Sazonalidade da precipitação; CAD: Capacidade de armazenamento de água no solo.

APÊNDICE C – Precipitação e temperatura médias mensais para o período de 2012 a 2015 para 11 locais do Brasil em que foram cultivados 04 clones de eucalipto.

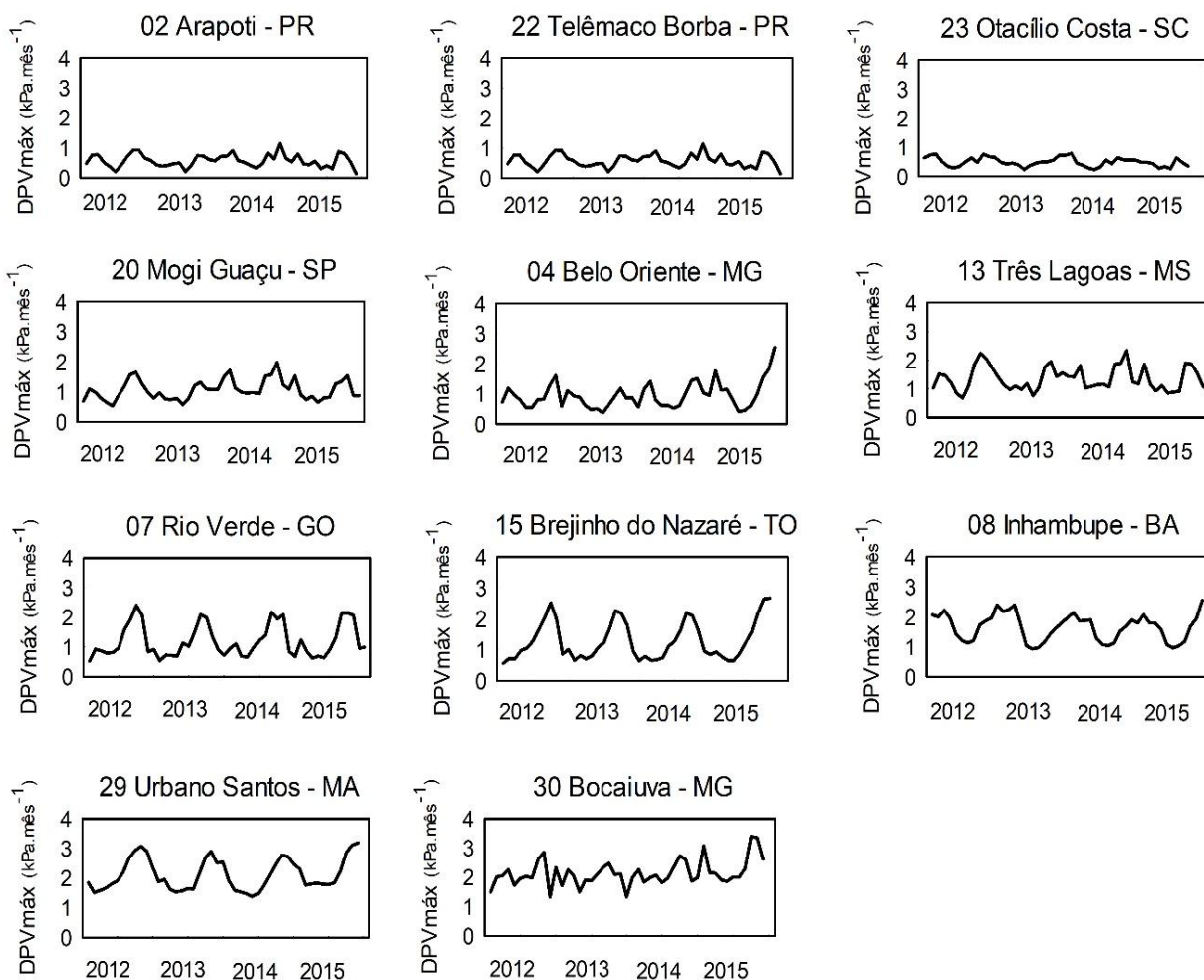
Precipitação Temperatura



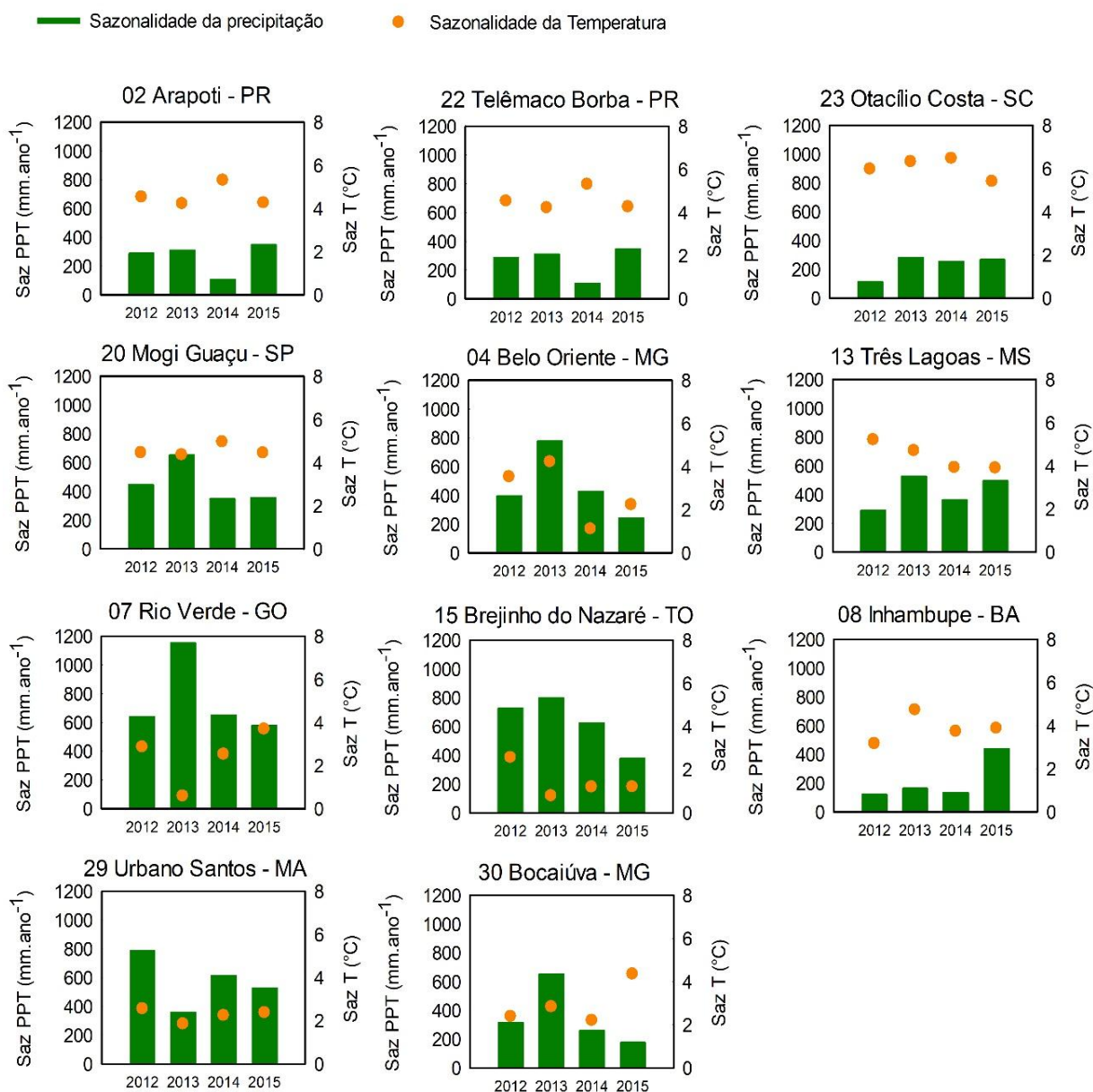
APÊNDICE D – Extrato do Balanço Hídrico Climatológico de Thornthwaite e Mather em escala mensal para o período de 2012 a 2015 em 11 locais do Brasil em que foram cultivados 04 clones de eucalipto.



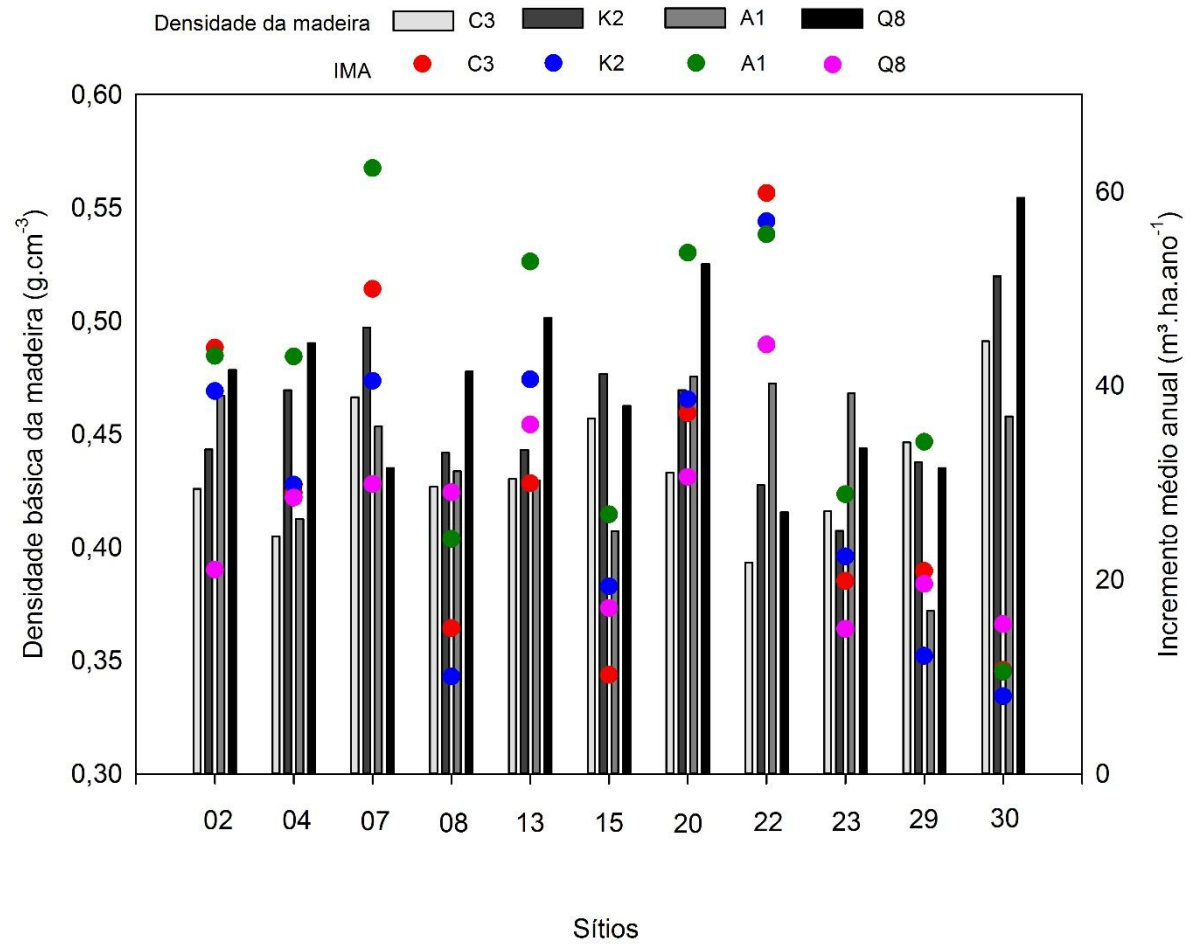
APÊNDICE E – Déficit de pressão de vapor máximo em escala mensal para o período de 2012 a 2015 em 11 locais do Brasil em que foram cultivados 04 clones de eucalipto.



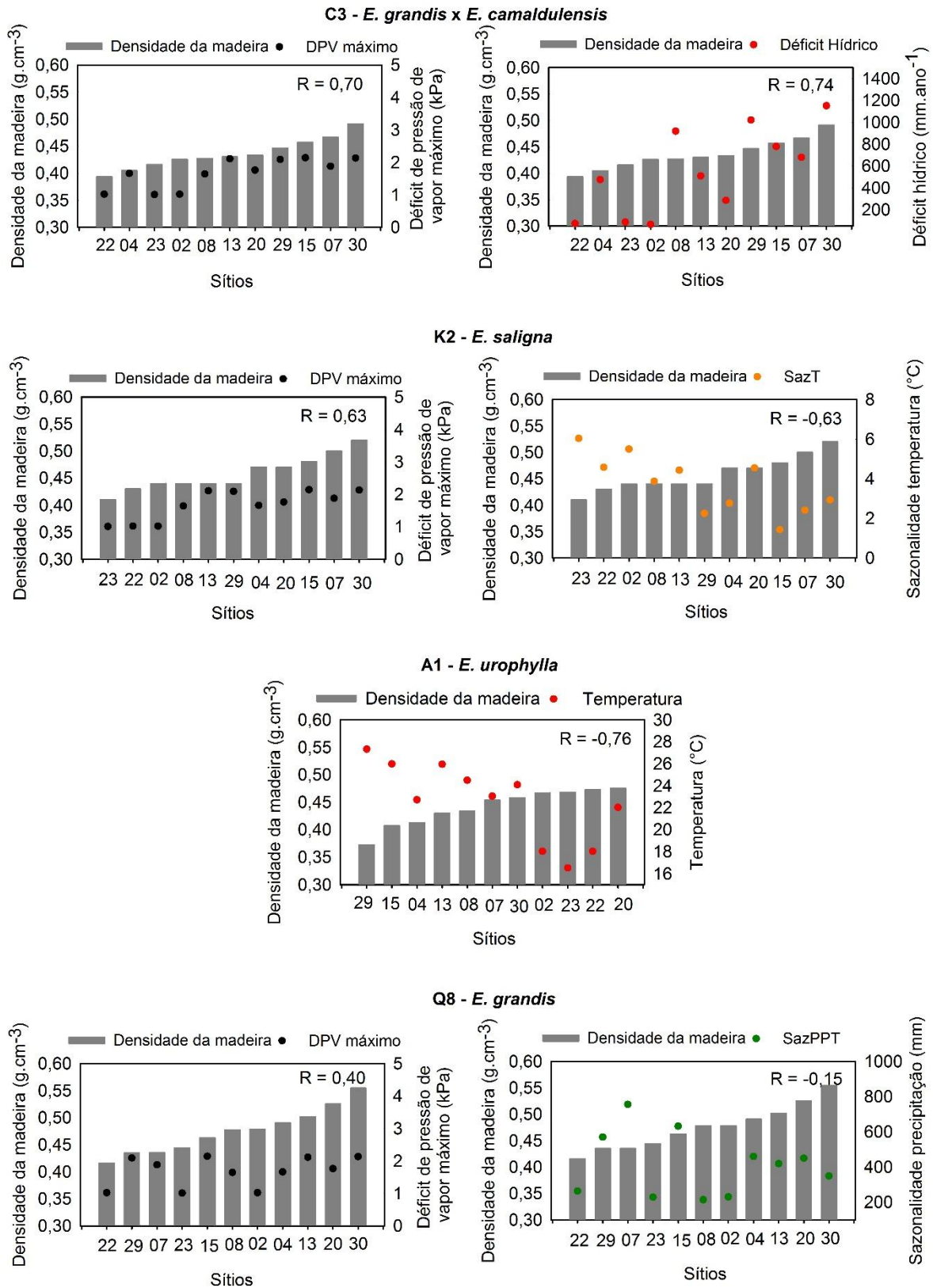
APÊNDICE F – Sazonalidade da precipitação e temperatura em escala anual para o período de 2012 a 2015 em 11 locais do Brasil em que foram cultivados 04 clones de eucalipto.



APÊNDICE G – Densidade básica da madeira de 4 clones de eucalipto aos 4 anos de idade versus o IMA em 11 locais do Brasil.



APÊNDICE H – Dispersão entre a densidade básica da madeira de 04 clones de eucalipto e o conjunto de variáveis que melhor estimam a propriedade aos quatro anos em 11 locais do Brasil.



R: Correlação de Pearson.