INSTITUTO DE PESQUISAS E ESTUDOS FLORESTAIS
ISSN 0100-3453

Produtividade atingível de eucalipto em diferentes ciclos climáticos para o estado de Rondônia
Eucalyptus attainable productivity in different climatic cycles for the Rondônia state

Dany Roberta Marques Caldeira
Clayton Alcarde Alvares
Otávio Camargo Campoe
Rodrigo Eiji Hakamada
Iraê Amaral Guerrini
Ítalo Ramos Cegatta
José Luiz Stape

CIRCULAR TÉCNICA

N° 215 NOVEMBRO 2020

www.ipef.br/publicacoes/ctecnica/

CIRCULAR TÉCNICA IPEF
n. 215, p. 01-17, novembro de 2020

Produtividade atingível de eucalipto em diferentes ciclos climáticos para o estado de Rondônia

Eucalyptus attainable productivity in different climatic cycles for the Rondônia state

Dany Roberta Marques Caldeira[a,b,*], Clayton Alcarde Alvares[a,c], Otávio Camargo Campoe[a,d], Rodrigo Eiji Hakamada[e], Iraê Amaral Guerrini[a], Ítalo Ramos Cegatta[c], José Luiz Stape[a]

RESUMO

O modelo 3-PG, associado a Sistemas de Informações Geográficas, foi utilizado para estimar a produtividade atingível de um clone de *Eucalyptus urophylla* no estado de Rondônia em 31 ciclos climáticos reais, que compreendem o período de 1980 a 2016 em intervalos (rotações) de sete anos. Foram utilizados mapas de temperatura máxima e mínima, de precipitação, de radiação global e de umidade relativa do ar com 0,25° x 0,25° de resolução. As informações relacionadas aos solos foram obtidas do Zoneamento Ecológico Econômico do Estado e do mapa de solos Radambrasil, escala 1:1.000.000. O modelo foi sensível às diferenças ambientais e, desta forma, foi capaz de indicar áreas propensas a maior e menor produtividade atingível para a cultura. As regiões sudeste e centro-nordeste do estado foram as regiões que apresentaram os maiores valores médios de produtividade, enquanto a região sul foi a que apresentou os menores valores, 81 e 46 m^3 ha^{-1} ano^{-1} respectivamente. O valor médio da produtividade atingível aos 7 anos de idade foi de 69 m^3 ha^{-1} ano^{-1}. A produtividade foi menor nos ciclos que apresentaram maiores temperaturas, para cada grau acrescido, houve perda de 13,55 m^3 ha^{-1} ano^{-1}. Este trabalho poderá servir como referência para planejamento de negócios, incluindo investimentos em aquisição de áreas, extensão do plantio e tecnologias no processo de produção.

Palavras-chave: Planejamento. Variabilidade climática. *Eucalyptus urophylla*. Modelo 3-PG.

ABSTRACT

The 3-PG model, associated to Geographic Information Systems, was used to determine the attainable productivity of a *Eucalyptus urophylla* clone in the state of Rondônia in 31 real climatic cycles that comprise the period from 1980 to 2016 in intervals (rotations) of seven years. Maps of maximum and minimum temperature, precipitation, global radiation and relative humidity with 0.25° x 0.25° resolution were used for it. The information related to soils was obtained from the State Economic Ecological Zoning and the Radambrasil soil map, scale 1:1,000,000. The model was sensitive to environmental differences and thus was able to identify susceptible areas to higher and lower yields for cultivation. The southeast and central-northeast regions of the state had the highest average productivity, while the southern region had the lowest, 81 and 46 m^3 ha^{-1} $year^{-1}$, respectively. The average productivity attainable at 7 years of age was 69 m^3 ha^{-1} $year^{-1}$. The productivity was lower in the cycles that presented higher temperatures, for each increased degree there was a loss of 13.55 m^3 ha^{-1} $year^{-1}$. This work may serve as a reference for business planning, including investments in area acquisition, extension of planting and technologies in the production process.

Keywords: Planning. Climate variability. *Eucalyptus urophylla*. 3-PG model.

[a] Departamento de Ciência Florestal, Solos e Ambiente, Universidade Estadual de São Paulo - UNESP, 18610-034, Botucatu, SP, Brazil

[b] Departamento de Agronomia, Instituto Federal de Rondônia, 76993-000, Colorado do Oeste, RO, Brazil

[c] Suzano SA, 41810-012, Limeira, SP, Brazil

[d] Universidade Federal de Lavras – UFLA, 37200-000, Lavras, MG, Brazil

[e] Departamento de Ciência Florestal, Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE, 52171-900, Recife, PE, Brazil

INTRODUÇÃO

Os modelos florestais baseados em processos são ferramentas indicadas para avaliar os impactos de novas condições climáticas nos ecossistemas florestais (AUGUSTYNCZIK et al., 2017). O modelo 3-PG (LANDSBERG; WARING, 1997) tem sido utilizado em diversos locais do mundo para estimar a produtividade florestal em áreas extensas e em diferentes ciclos temporais.

Há uma previsão de que as mudanças climáticas afetem importantes processos florestais, como a assimilação de carbono, o balanço hídrico, a ciclagem de nutrientes e a distribuição de espécies (AUGUSTYNCZIK et al., 2017; DAVIS et al., 2017). Compreender as condições que proporcionam ambientes adequados para uma produção florestal satisfatória e como estas condições podem ser alteradas com as mudanças climáticas é fundamental para uma melhor compreensão de onde seja provável que a produtividade florestal reduza ou aumente.

A produtividade florestal é afetada por fatores bióticos (genótipo, pragas e doenças) e abióticos (clima e sítio) e conforme os níveis de restrição de recursos, o seu rendimento é dividido em potencial, atingível e real (ELLI et al., 2019). Os riscos relacionados à ocorrência de pragas, doenças e ervas daninhas são importantes, tanto em áreas tradicionais quanto em expansão. A região Norte do Brasil, por exemplo, que possui clima Af, Am, Aw e As, está exposta a maior severidade de ferrugem causada por *Austropuccinia psidi* (ALVARES et al., 2017) e de manchas foliares por *Cylindrocladium quinqueseptatum* (BOOTH et al., 2000; SILVA et al., 2019a). Estas propensões podem gerar quebras de produtividade.

O setor de florestas plantadas no Brasil teve início nas regiões Sul e Sudeste há aproximadamente 100 anos e se expandiu para outras regiões, como Centro-Oeste (Mato Grosso do Sul), Norte (Tocantins e Pará) (ALVARES et al., 2017) e Nordeste (sul da Bahia e Maranhão). Embora muitas regiões tenham suas áreas consolidadas, ainda há muitas outras que estão iniciando as atividades, como no caso do estado de Rondônia. Rondônia é um dos estados pertencentes à região norte do país e teve seu histórico marcado pela forte exploração de florestas naturais. O extrativismo e a industrialização da madeira formaram a base da economia da região por muitos anos. O setor de florestas plantadas está se estabelecendo na região e tem como objetivo suprir as demandas local e regional. Os estudos de ciclos climáticos são fundamentais para compreender a resposta das espécies em diferentes perspectivas e, desta forma, auxiliar as políticas públicas e as empresas na gestão florestal. O objetivo deste trabalho foi avaliar a produtividade atingível do clone de eucalipto de maior plasticidade fenotípica do Brasil para o estado de Rondônia em diferentes ciclos climáticos e, desta forma, analisar como o clima influencia a produtividade da cultura.

MATERIAL E MÉTODOS

Local de estudo

Rondônia ocupa uma área de 237.576 km^2 e situa-se entre as latitudes 8 e 13 Sul e as longitudes 60 e 66 Oeste, com altitudes variando entre 100 e 1100 m (Figura 1). O clima, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Am, tropical quente e úmido e com duas estações hídricas bem definidas (ALVARES et al., 2013).

3-PG Espacializado

O modelo de predição de crescimento florestal utilizado neste trabalho é o 3-PG (*Physiological Principles in Prediction Growth*), associado ao sistema de informações geográficas. O modelo foi parametrizado para o clone de maior plasticidade fenotípica do Brasil (AEC 144 - *Eucalyptus urophylla* – código do registro nacional de sementes e mudas n° 21874) (ARAUJO et al., 2019).

Este clone utilizado no modelo foi avaliado por Binkley et al. (2020) em sítios que apresentaram o mesmo tipo climático de Köppen que Rondônia. Em Chapadão do Sul-MS, aos 5 anos o IMA foi de 75 m^3 ha^{-1} ano^{-1} e a sobrevivência foi de 99%; em Inocência-MS aos 6 anos, o IMA foi de 58 m^3 ha^{-1} ano^{-1} e a sobrevivência foi de 96% e em Monte Dourado – PA aos 4 anos, o IMA foi de

17 m^3 ha^{-1} ano^{-1} e a sobrevivência foi de 76 %. Ainda em Monte Dourado - PA, Silva et al. (2019b) selecionaram famílias estáveis de *Eucalyptus urophylla* e obtiveram o IMA de 20 m^3 ha^{-1} ano^{-1} e a sobrevivência de 54 %, devido a ocorrência de doença na região de Monte Dourado.

Para reduzir as falhas causadas pela incerteza dos valores da parametrização do modelo (MÄKELÄ et al., 2000; REYER et al., 2016), utilizou-se a parametrização desenvolvida a partir de dados obtidos pela rede experimental do "Programa Cooperativo sobre Tolerância de *Eucalyptus* Clonais aos Estresses Hídrico, Térmico e Biótico" (TECHS - https://www.ipef.br/techs/; BINKLEY et al., 2017). O conjunto de dados utilizado representou a diversidade edafoclimática

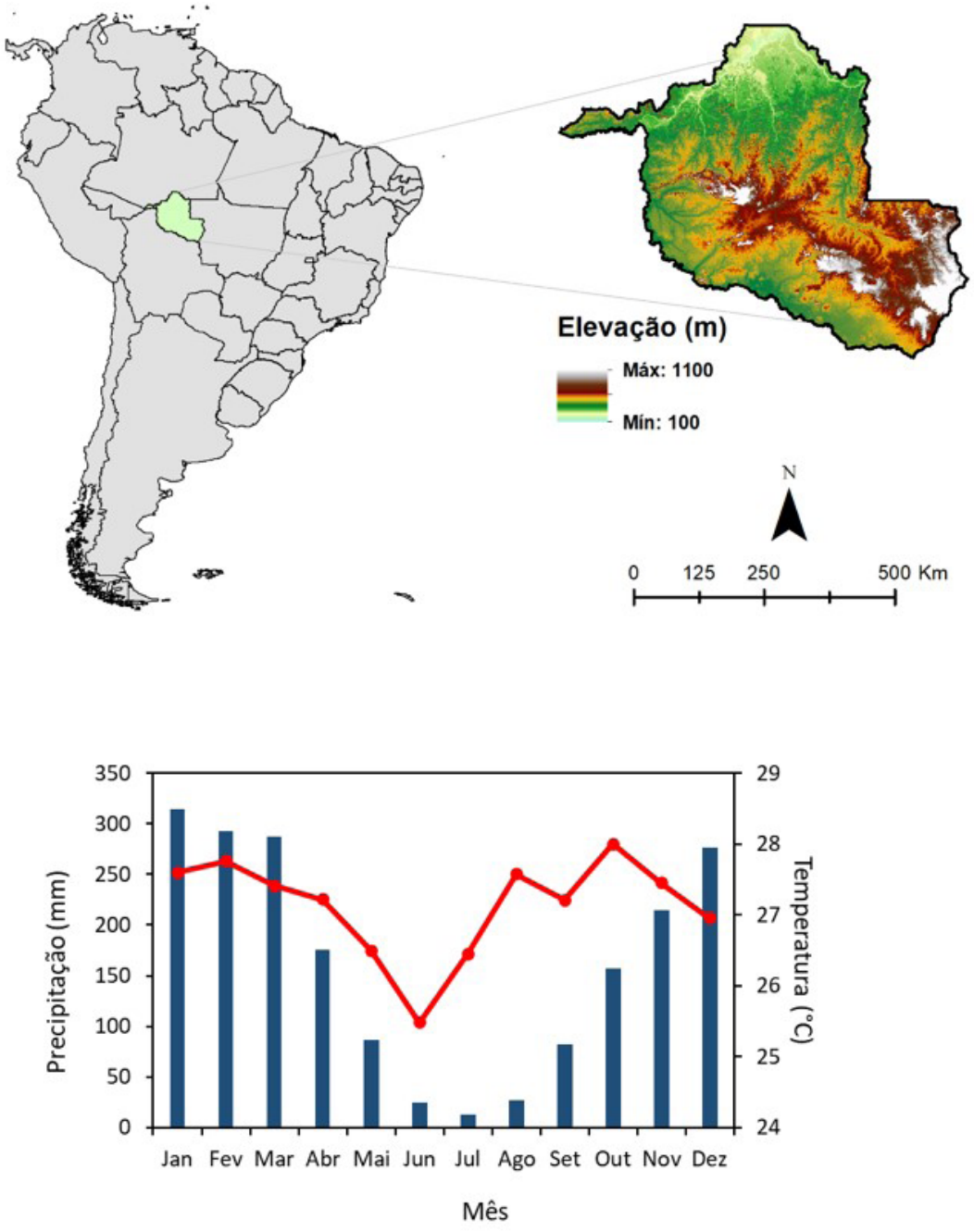

Figura 1. Localização e representação da elevação de Rondônia. O diagrama climático com os valores médios para 37 anos de monitoramento é apresentado abaixo.

Figure 1. Location and elevation representation of the Rondônia. The climate diagram with the average values for 37 years of monitoring is presented below.

do Brasil em um gradiente de 3.500 km, o que possibilitou uma parametrização com acuracidade satisfatória para diferentes tipologias climáticas (CALDEIRA et al., 2020).

Dados de entrada do modelo

Informações locais

O mapa do estado foi dividido em 317 células quadradas (devido a resolução das informações meteorológicas) e cada célula foi associada a um ponto localizado no centro do polígono. Os pontos foram ligados às coordenadas do sistema de projeção Universal Transversa de Mercator (UTM) e aos dados de entrada e de saída do modelo.

Os pares de coordenadas foram obtidos de cada centroide e os valores referentes à altitude foram retirados do modelo digital de elevação.

Informações meteorológicas

As informações meteorológicas mensais requeridas foram: temperatura máxima e mínima do ar (°C), precipitação (mm), radiação global (MJ m^{-2} $mês^{-1}$) e umidade relativa do ar (%), as quais foram coletadas da base de dados de acesso aberto e confiável desenvolvida por Xavier, King e Scanlon (2016) - resolução de 0,25° x 0,25° em passos diários. As simulações de produtividade foram desenvolvidas entre 1980 e 2016, período de registro dos dados meteorológicos. Foram realizadas 31 simulações com intervalos de sete anos, sendo a primeira realizada entre 1980 e 1986 e a última entre 2010 e 2016. Os dados que foram obtidos em passos diários foram convertidos para passos mensais.

A partir da temperatura máxima e mínima foi obtida a temperatura média, e com o uso das informações de temperatura máxima, mínima e da umidade relativa do ar, foi calculado o déficit de pressão de vapor (DPV - kPa).

Dados edáficos

A base de dados edáficos foi obtida do Zoneamento Socioeconômico Ecológico do estado de Rondônia (ZSEE). Foram analisadas aproximadamente 11.000 amostras de solos que estavam divididas em três ou quatro profundidades (2.915 pontos). Desta base foram obtidos os valores de classes de profundidade, da taxa de fertilidade, da retenção máxima de água e dos parâmetros modificadores da quantidade de água no solo, o déficit de razão de umidade (c_θ) e a potência do déficit de razão de umidade (n_θ).

A base de dados ZSEE é bastante detalhada, entretanto há locais que não ocorreram análises (58 grids); desta forma, foi necessário buscar o preenchimento destas falhas em outra base confiável. A base selecionada foi a Radambrasil (1974), escala 1:1.000.000, e como os dados observados são qualitativos, foi preciso convertê-los em quantitativos. Foram realizados os passos:

1. Interseção dos arquivos Xavier, King e Scanlon (2016) com a base Radambrasil e com os dados do ZSEE (Figura 2).
2. Uma tabela de atributos com dados coincidentes para cada centroide. Foram analisadas a classificação do solo para cada centroide (dado qualitativo) e as características físico-químicas deste local.
3. A coerência dos dados foi conferida pela comparação entre a análise qualitativa e a quantitativa de um mesmo ponto.
4. Em um grid, poderia existir de 1 até 35 análises de solo (ZSEE). Com uma tabela dinâmica contendo os dados do ZSEE, foram gerados valores médios para cada grid.
5. Havia 28 tipos de solos classificados em quatro níveis: ordem, subordem e grande grupo nos 58 grids que não possuíam informações quantitativas. Os tipos de solos foram analisados individualmente e, com o auxílio da classificação brasileira de solos, foram estipulados valores para cada atributo (SANTOS et al., 2018).

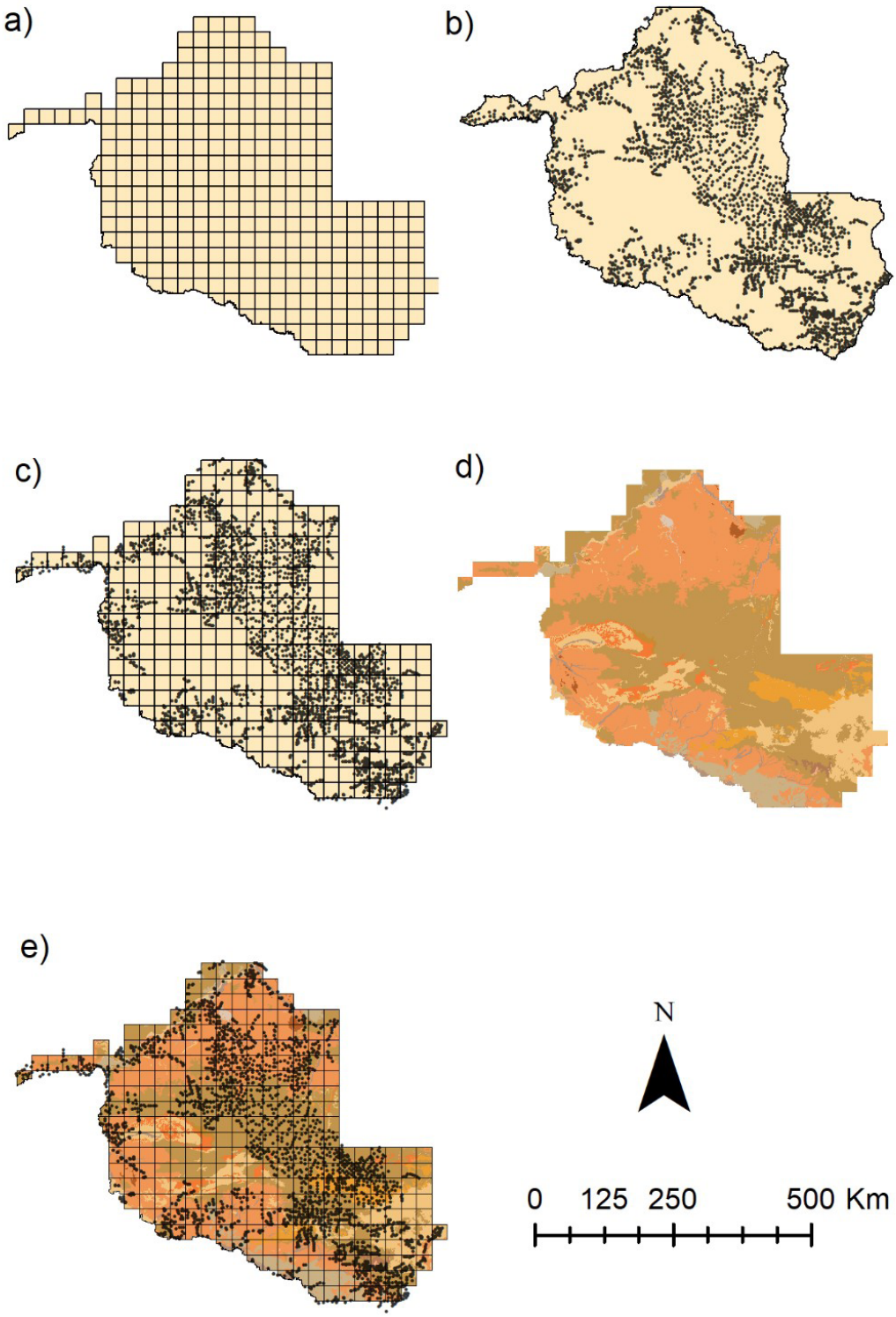

Figura 2. Representação das bases utilizadas para determinação dos parâmetros edáficos. Grids (a), pontos de solos analisados pelo ZSEE (b), união de informações do grid e ZSEE (c), dados Radambrasil em escala 1:1.000.000 (d) e a interseção das informações anteriores (e).

Figure 2. Representation of the bases used to determine the soil parameters. Grids (a), soil points analyzed by the ZSEE (b), union of grid and ZSEE information (c), Radambrasil data in scale 1:1,000,000 (d) and the intersection of the previous information (e).

O déficit de razão de umidade (c_θ) e a potência do déficit de razão de umidade (n_θ), parâmetros modificadores da quantidade de água no solo, foram determinados conforme Landsberg e Waring (1997) (Figura 3a).

A capacidade de água disponível no solo foi estimada a partir da equação elaborada por Stape (2002) e variou entre 20 e 180 mm para uma profundidade de 2 m (Figura 3b).

A profundidade efetiva do solo foi determinada pelo tipo de solo, variando entre 50 e 200 cm; valores mínimos foram destinados a Neossolos Litólicos e valores máximos a Latossolos.

O índice de fertilidade do solo (FR), que varia entre 0 e 1 (solo de maior e menor fertilidade, respectivamente), foi estimada de acordo com a equação proposta por Alvares (2011) e variou em função da capacidade de troca catiônica.

$$FR = 0,5483 + 3,1575[1-e^{(-0,0036x)}] \quad (1)$$

onde FR é o índice de fertilidade do solo e x é a capacidade de troca catiônica efetiva (CTCe – $mmol_c\ kg^{-1}$).

Os valores de FR variaram entre 0,57 e 0,68 (Figura 3c). Geralmente a fertilidade do solo é menor em solos arenosos, enquanto em solos argilosos são mais altos (ALMEIDA et al., 2010).

O número de registros exclusivos de solos com classificação em quatro níveis foi 36; entretanto, com a seleção do tipo de solo mais representativo, a partir do cálculo da área de ocupação de cada tipo de solo em cada grid, o número foi reduzido para 29 (Tabela 1).

Simulações do modelo

Foram estimados o volume aos sete anos, a área basal da parcela (AB) e o valor médio do diâmetro à altura do peito (DAP) para cada célula quadrática. As simulações da produtividade atingível foram feitas com base nos 37 anos de registros climáticos do estado, os quais possibilitaram a definição de 31 ciclos climáticos reais (que compreendem o período de 1980 a 2016), em intervalos (rotações) de sete anos.

Foram avaliadas as relações entre a produtividade e o clima em cada grid. Não foi possível avaliar a eficiência do modelo, pois a região não dispõe de informações de monitoramento contínuo de crescimento, devido à existência de poucas plantações de eucalipto no estado e também ao fato de que as mesmas não foram monitoradas de forma adequada.

RESULTADO E DISCUSSÃO

Considerando os 31 ciclos climáticos, a diferença entre a temperatura média mínima de maior e menor registro foi de 1,4 °C, para a temperatura média foi de 1,1 °C e para a temperatura máxima foi de 0,8°C. A diferença entre os registros extremos de precipitação foi de 10%, oscilando entre 1848 e 2029 mm (Tabela 2).

Com base nos valores médios do monitoramento de 37 anos, os meses que apresentaram as temperaturas médias extremas (Tmáx e Tmín) foram agosto e julho com 34,9 e 18,4 °C, respectivamente. Os meses de janeiro e julho apresentaram os valores máximos e mínimos de precipitação, respectivamente (Tabela 3). O maior volume de chuva aconteceu entre outubro e março e representa 79% da precipitação total. O terceiro trimestre do ano foi o mais seco, com 0,6% da precipitação total anual.

As temperaturas máxima, mínima e média variaram entre 29,5 e 36,4 °C; 17,5 e 24,4 °C; e 24,1 e 30,2 °C, respectivamente. A temperatura média ótima para o crescimento (Queiroz, 2020, no prelo) do clone é de 23,95 °C, a temperatura máxima para o crescimento do clone estudado é de 28,65 °C (Barroso, 2020, no prelo) e a temperatura mínima é de 7,25 °C. Em 37 anos de monitoramento, apenas 0,01% dos dias apresentaram temperatura máxima acima de 28,65 °C

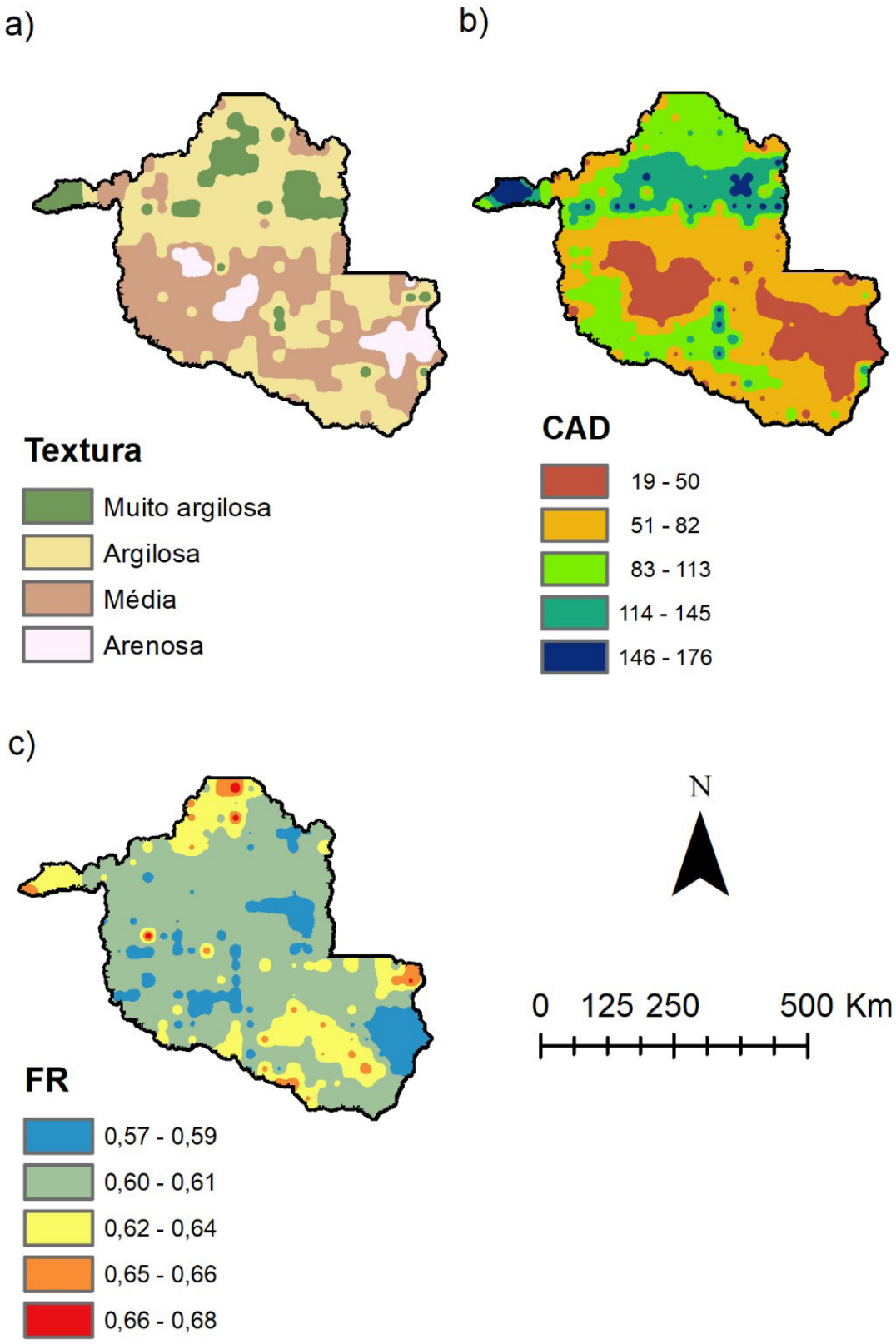

Figura 3. Textura dos solos (a), capacidade de água disponível no solo em mm (b) e índice de fertilidade dos solos (c).
Figure 3. Soil texture (a), available soil water capacity in mm (b) and soil fertility index (c).

Tabela 1. Parâmetros de solos utilizados no modelo 3-PG. Classificação dos solos mais representativos dos grids, profundidade e textura.
Table 1. Soil parameters used in the 3-PG model. Classification of the most representative soils of grids, depth and texture.

Classificação em quatro níveis	Profundidade (cm)	Textura
ARGISSOLO-VERMELHO-AMARELO-Distrófico-plintossólico	100	Média
LATOSSOLO-AMARELO-Distrófico-típico	200	Argilosa
ARGISSOLO-VERMELHO-AMARELO-Distrófico-típico e plintossólico	100	Argilosa
GLEISSOLO-HÁPLICO-Tb Distrófico-típico	80	Muito argilosa
LATOSSOLO-AMARELO-Distrófico-típico e plintossólico	150	Argilosa
ARGISSOLO-VERMELHO-AMARELO-Distrófico-plintossólico e típico	100	Argilosa
LATOSSOLO-VERMELHO-AMARELO-Distrófico-típico e úmbrico	200	Média
PLINTOSSOLO-ARGILÚVICO-Alumínico-típico e abrúptico	80	Média
ARGISSOLO-VERMELHO-AMARELO-Distrófico-típico	100	Média
LATOSSOLO-VERMELHO-AMARELO-Distrófico-típico	200	Argilosa
LATOSSOLO-VERMELHO-AMARELO-Alumínico-típico	200	Muito argilosa
PLINTOSSOLO-ARGILÚVICO-Distrófico-típico	80	Média
ARGISSOLO-VERMELHO-AMARELO-Alítico-plintossólico	100	Muito Argilosa
ARGISSOLO-VERMELHO-AMARELO-Distrófico-típico e léptico	100	Argilosa
ARGISSOLO-VERMELHO-AMARELO-Eutrófico-típico	100	Média
NEOSSOLO-QUARTZARÊNICO-Hidromórfico-típico	80	Argilosa
NEOSSOLO-LITÓLICO-Distrófico-típico	50	arenosa
NITOSSOLO-VERMELHO-Distroférrico-típico	80	Muito argilosa
ARGISSOLO-VERMELHO-AMARELO-Distrófico-petroplíntico	100	Média
CAMBISSOLO-HÁPLICO-Tb Distrófico-típico	80	Argilosa
CAMBISSOLO-HÁPLICO-Ta Eutrófico-típico	80	Argilosa
NEOSSOLO-FLÚVICO-Tb Distrófico-típico	80	Média
NEOSSOLO-QUARTZARÊNICO-Órtico-típico	80	arenosa
ARGISSOLO-VERMELHO-AMARELO-Eutrófico-léptico	100	Argilosa
LATOSSOLO-VERMELHO-AMARELO-Distrófico-petroplíntico	200	Média
CAMBISSOLO-HÁPLICO-Alumínico-léptico	80	Média
LATOSSOLO-VERMELHO-Distrófico-típico	200	Muito argilosa
LUVISSOLO-CRÔMICO-Órtico-típico	100	Média
LATOSSOLO-VERMELHO-AMARELO-Ácrico-típico	150	Argilosa

Ordem, Subordem, Grande Grupo e Subgrupo

Tabela 2. Valores médios de temperatura máxima, mínima e média, de radiação global e de precipitação para cada quadro climático.
Table 2. Average values of maximum, minimum and average temperature, global radiation and precipitation for each climate cycle.

Ciclo	Tmáx	Tmin	Tmed	Rad	DPV	PPT	UR
		°C		MJ m^{-2}	kPa	mm	%
1980-1986	31,5	20,5	26,0	15,5	0,6	1962	81,6
1981-1987	31,6	20,5	26,1	15,5	0,7	1947	81,2
1982-1988	31,6	20,5	26,0	15,3	0,7	1944	81,1
1983-1989	31,5	20,4	25,9	15,4	0,7	1940	80,8
1984-1990	31,5	20,3	25,9	15,7	0,7	2002	81,1
1985-1991	31,5	20,4	26,0	15,7	0,7	2018	81,3
1986-1992	31,6	20,5	26,0	16,0	0,7	2000	81,5
1987-1993	31,6	20,5	26,0	16,2	0,7	1996	81,6
1988-1994	31,5	20,4	26,0	16,2	0,6	2016	82,1
1989-1995	31,5	20,5	26,0	16,3	0,6	2012	82,3
1990-1996	31,5	20,6	26,0	16,3	0,6	1975	82,6
1991-1997	31,4	20,8	26,1	16,1	0,6	1946	83,0
1992-1998	31,4	20,8	26,1	16,1	0,6	1904	83,7
1993-1999	31,4	20,8	26,1	15,9	0,6	1886	84,4
1994-2000	31,5	20,8	26,2	15,9	0,5	1848	84,6
1995-2001	31,5	20,9	26,2	16,0	0,5	1856	84,7
1996-2002	31,6	21,0	26,3	16,1	0,5	1855	84,7
1997-2003	31,7	21,1	26,4	16,3	0,6	1863	84,2
1998-2004	31,8	21,1	26,4	16,2	0,6	1866	83,7
1999-2005	31,9	21,1	26,5	16,3	0,6	1888	83,2
2000-2006	32,0	21,2	26,6	16,4	0,6	1916	82,7
2001-2007	32,0	21,2	26,6	16,6	0,7	1944	81,9
2002-2008	32,1	21,2	26,6	16,7	0,7	1935	81,0
2003-2009	32,0	21,2	26,6	16,6	0,7	1970	80,6
2004-2010	32,1	21,3	26,7	16,7	0,8	1948	79,7
2005-2011	32,1	21,3	26,7	16,8	0,8	1928	79,1
2006-2012	32,1	21,3	26,7	16,9	0,8	1935	78,7
2007-2013	32,0	21,4	26,7	17,0	0,8	1977	78,4
2008-2014	31,9	21,5	26,7	16,8	0,8	2029	78,3
2009-2015	32,1	21,7	26,9	16,8	0,8	2011	77,8
2010-2016	32,2	21,7	27,0	16,8	0,9	1970	77,1
Máximo	32,2	21,7	27,0	17,0	0,9	2029	84,7
Mínimo	31,4	20,3	25,9	15,3	0,5	1848	77,1
Média	31,7	20,9	26,3	16,2	0,7	1945	81,6

Tabela 3. Valores mensais médios de 37 anos para a temperatura máxima, mínima e média, para a precipitação e seus respectivos desvios-padrão.
Table 3. Average monthly values of 37 years for maximum, minimum and mean temperature for precipitation and their respective standard deviations.

Mês	Tmáx	Tmín	Tméd	UR	PPT	DPV
		°C		%	mm	kPa
Jan	31,8±0,7	23,4±0,5	27,6±0,6	85,9±2,3	314,7±48,5	0,51
Fev	32,3±0,5	23,3±0,5	27,8±0,5	86,0±2,4	292,7±34	0,50
Mar	31,5±0,5	23,4±0,5	27,4±0,5	86,2±2,2	286,8±68,4	0,50
Abr	32,2±0,5	22,2±0,7	27,2±0,5	85,2±2,9	175,8±58	0,53
Mai	31,6±0,5	21,4±0,9	26,5±0,6	83,6±3,7	86,3±24,1	0,57
Jun	31,3±0,5	19,6±1,0	25,5±0,7	80,7±5,1	24,5±17,5	0,65
Jul	34,5±0,5	18,4±1,0	26,4±0,7	75,4±7,3	13,2±3,3	0,82
Ago	34,9±0,5	20,2±0,6	27,6±0,5	71,9±9,3	27,0±13,0	1,03
Set	33,3±0,6	21,1±0,6	27,2±0,5	74,3±6,9	82,6±43,2	0,98
Out	33,5±0,5	22,5±0,5	28,0±0,5	78,7±4,5	157,1±34,5	0,82
Nov	32,1±0,5	22,8±0,7	27,4±0,6	81,9±4,0	214,6±39,8	0,67
Dez	31,0±0,6	22,9±0,6	27±0,6	84,5±3,0	275,8±59,9	0,56

e não houve dias com temperatura igual ou inferior à temperatura mínima. O DPV oscilou entre 0,50 kPa em fevereiro e 1,63 kPa em agosto (influenciado pela umidade relativa do ar maior que 90% e menor que 50%).

Do primeiro ao último ciclo (1980 a 2016), com exceção da precipitação, houve a elevação de valores para todas as variáveis meteorológicas, com 0,7 °C para a temperatura máxima, 1,2 °C para a temperatura mínima, 1 °C para a temperatura média, 1,3 MJ m^{-2} para a radiação global e 0,3 kPa para o déficit de pressão de vapor. Torres et al. (2012) destacaram estas mudanças e ainda reforçaram que a região é considerada um *hotspot* climático, ou seja, áreas com grandes mudanças climáticas regionais.

Ainda que estudos indiquem que o desmatamento provoque uma tendência de redução da precipitação na região (SALATI; NOBRE, 1991; SEIXAS; PINHEIRO, 2014) isso não foi notado no presente trabalho. Houve períodos de redução de até 9% da precipitação, entretanto, diferente da temperatura que apresentou elevação de valores de forma constante, com o passar dos anos voltou a haver acréscimo de valores para esta variável. Franca (2015) analisou a climatologia das chuvas em Rondônia entre os anos de 1981 a 2011 e não encontrou tendência linear significativa de aumento ou redução das chuvas ao longo do período observado.

A região norte do estado apresenta os maiores valores médios de precipitação, com média de 2350 mm, enquanto a região oeste apresenta os menores, com média de 1475 mm. Quanto à temperatura, os maiores valores são encontrados ao norte e ao sudoeste (Figura 4).

O modelo foi sensível às diferenças ambientais e foi capaz de fornecer informações iniciais de valores de produtividade para diferentes quadros espaciais e temporais na região. Diferentes trabalhos foram desenvolvidos para avaliar a influência das mudanças climáticas em cenários futuros (AUGUSTYNCZIK et al., 2017; BAESSO; RIBEIRO; SILVA, 2010; REYER, 2015); neste trabalho, estas influências foram avaliadas em ciclos climáticos reais, baseados em registros passados.

Os ciclos que apresentaram os maiores valores médios de produtividade aos 7 anos foram os que representam os intervalos de 1988 a 1994 e de 1989 a 1995, e os que apresentaram menores valores foram os que estão nos intervalos de 2004 a 2010 e de 2005 a 2011 (Figura 5), com valores de IMA de 76 e 63 m^3 ha^{-1} ano^{-1}, respectivamente, com redução da produtividade média anual de 17%.

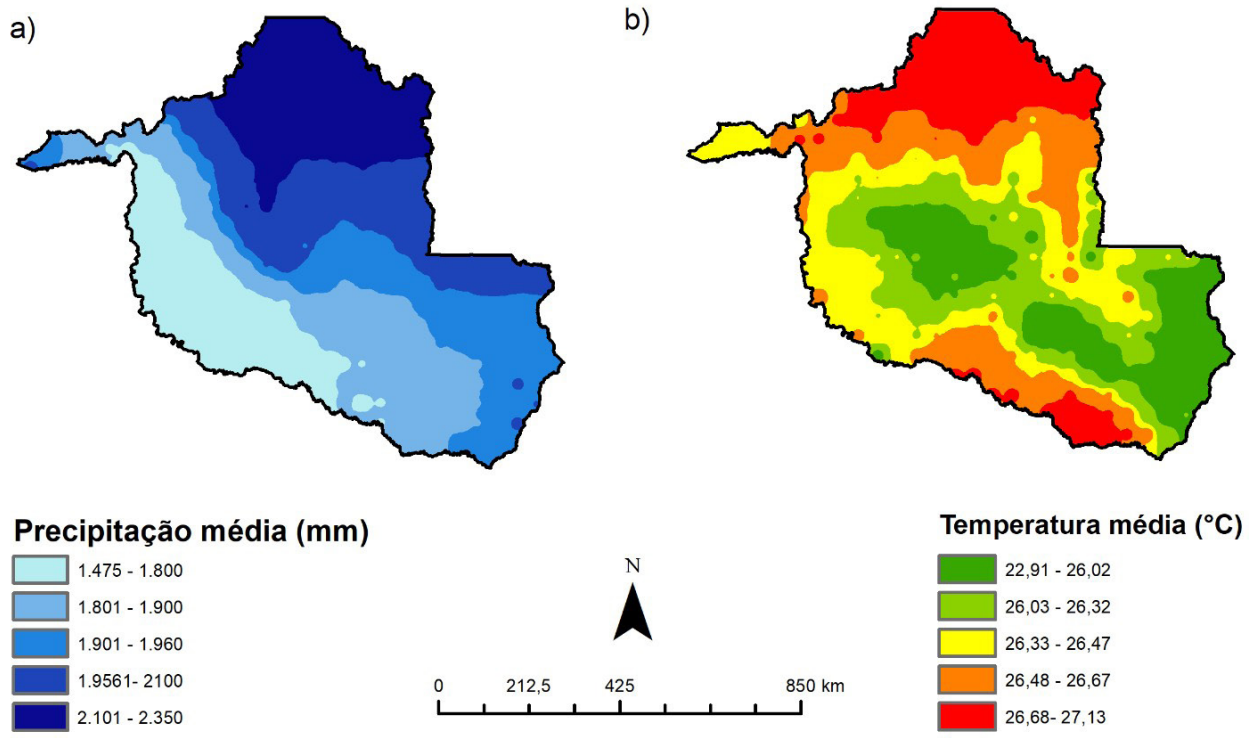

Figura 4. Representação espacial da precipitação anual (a) e da temperatura média anual (b).
Figure 4. Spatial representation of annual precipitation (a) and annual mean temperature (b).

Espacialmente, as regiões que mantiveram estimativas mais altas de produtividade foram a central e a sudeste. Estas regiões foram fortemente influenciadas pelas temperaturas mais amenas (são áreas de maiores altitudes, variando de 500 a 1000 m). Há de se destacar que a região central não deve ser considerada para plantações florestais, visto que são áreas destinadas à conservação e preservação ambiental. O Zoneamento Socioeconômico Ecológico do estado de Rondônia (ZSEE) (SEDAM, 2009) classifica as áreas da região sudeste como potenciais para o cultivo florestal (Sub zona 1.4). São terras descritas como de alta fragilidade natural e baixo potencial econômico. Estas áreas possuem baixa aptidão para a produção de alimentos, entretanto, se bem manejadas podem receber plantios florestais. Estes plantios trazem baixo impacto no solo e auxiliam sua conservação. A região Sul do estado foi a região que apresentou os menores valores de produtividade e representaram até 42% a menos que as áreas mais produtivas. Os limites de produtividade aos sete anos foram de 46 e 80 m^3 ha^{-1} ano^{-1}. O valor mínimo aconteceu na simulação de 1982 a 1988 no município de Pimenteiras, enquanto o valor máximo aconteceu na simulação de 1992 a 1998 no município de Vilhena. O valor mediano da produtividade foi 70 m^3 ha^{-1} ano^{-1}. A Figura 6 representa o volume médio aos 7 anos nos diferentes ciclos climáticos.

Um dos aspectos mais importantes da modelagem espacial baseada em processos é a capacidade de quantificar os fatores que contribuem para a produção florestal (ALMEIDA et al., 2010). As variáveis meteorológicas que melhor explicaram a produtividade foram a temperatura máxima, a temperatura média e o déficit de pressão de vapor, sendo que este último combina a influência da temperatura máxima e mínima e da umidade relativa do ar.

Os ciclos que apresentaram os maiores valores médios de produtividade possuíam em comum menores valores de temperatura média, máxima e mínima, assim como reduzido déficit de pressão de vapor e elevada precipitação.

Binkley et al. (2017) analisaram a influência do clima, do espaçamento e da genética em plantios clonais de eucalipto no Brasil e no Uruguai e observaram uma redução na produção de

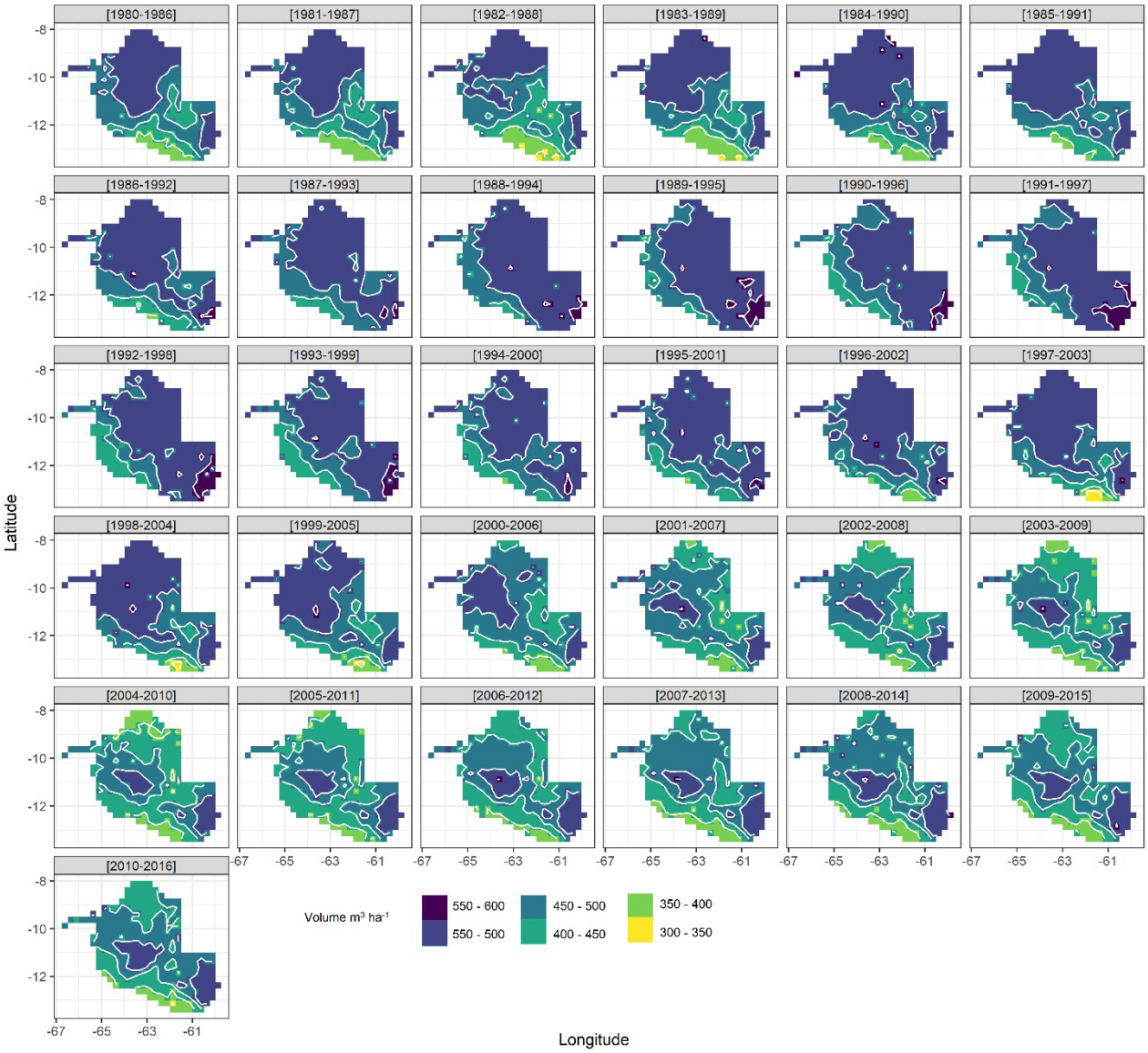

Figura 5. Simulações de mapas de produtividade (volume aos 7 anos) para o estado de Rondônia.
Figure 5. Simulations of productivity maps (volume at 7 years) for the state of Rondônia.

lenho de 2,5 Mg ha^{-1} ano^{-1} para cada aumento de 1°C na temperatura, além de destacarem que esta redução pode ser resultado da perda de carbono na respiração.

A média de produtividade nacional é de 36 m^3 ha^{-1} ano^{-1} (BINKLEY et al., 2017); entretanto, os valores médios de nosso trabalho estão entre 64 e 74 m^3 ha^{-1} ano^{-1}, valores próximos aos encontrados para a produtividade potencial de plantações de eucalipto (STAPE et al., 2010). Os fatores que podem ter influenciado a elevada produtividade da região são: o reduzido número de dias com a ocorrência de temperatura maior que a máxima e menor que a mínima para o crescimento, a reduzida ocorrência de déficit de pressão de vapor maior que o valor crítico e a elevada precipitação, que variou entre 1848 a 2029 mm ano^{-1}.

A produtividade de uma cultura pode ser dada em termos potenciais, atingíveis ou reais. Na produtividade potencial entende-se que não há limitação hídrica, nutricional ou fitossanitária, ou seja, varia em função das variáveis ambientais e de suas interações com as características das culturas (fatores determinantes). A produtividade atingível é influenciada pelos fatores determinantes e pelo déficit hídrico (fator limitante). A produtividade real, por sua vez, é influenciada pelos fatores determinantes, limitantes e fatores decorrentes do manejo (FREITAS, 2018).

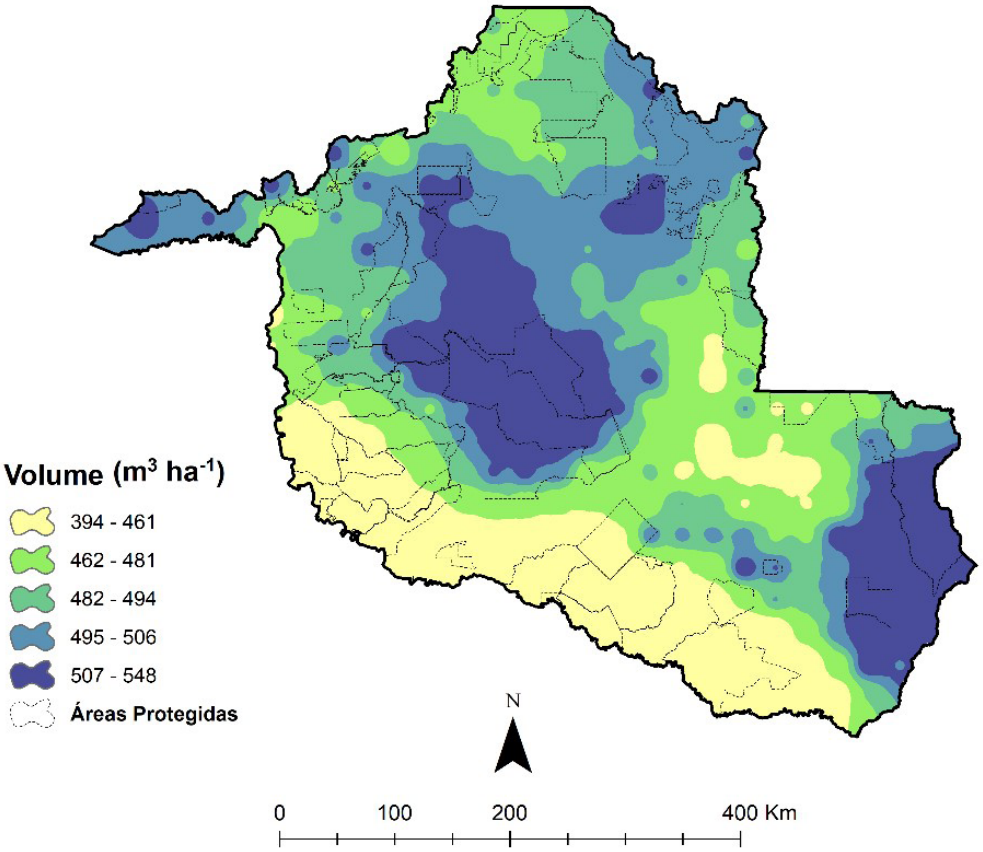

Figura 6. Representação espacial do volume médio aos 7 anos (considerando os valores médios dos 31 ciclos climáticos). As linhas tracejadas representam as áreas protegidas do estado (unidades de conservação e áreas indígenas). Modificado de CALDEIRA et al. (2020).

Figure 6. Spatial representation of the average stem volume at 7 years (as na average value considering all 31 climate cycles). Dashed lines represent the protected areas of the state (conservations units and indigenous lands). Modified from CALDEIRA et al. (2020).

As estimativas de produtividade foram desenvolvidas para valores atingíveis e não reais e, portanto, há de se destacar que ataques de doenças e pragas não são previstos pelo modelo e estes fatores podem afetar a produção. As doenças que ocorrem em campo podem impactar negativamente a sobrevivência e o crescimento das árvores, o que resulta na redução da produção da madeira , tanto no volume como na qualidade energética (AUER; SANTOS, 2011).

A quebra de produtividade justificada ao manejo florestal abaixo do ideal em clima típico do estado de Rondônia, Am - em estudos realizados em Monte Dourado, PA - foi relacionada à alta intensidade da queima das folhas de *Cylindrocladium* (causada por *Cylindrocladium pteridis*) (ELLI et al., 2019; SILVA et al., 2019a). Silva et al. (2019b) trabalharam com a seleção de famílias estáveis e produtivas de *Eucalyptus urophylla* para uma ampla variedade de climas no Brasil. Monte Dourado foi o sítio que apresentou a menor sobrevivência e produtividade, 51% e 19 m^3 ha^{-1} ano^{-1}, respetivamente. Os autores indicaram a necessidade de expandir as avaliações de fontes de sementes para os climas das regiões mais ao norte do país, que são consideravelmente diferentes.

Um outro exemplo é a ferrugem do eucalipto (*Austropuccinia psidii*), que provoca a redução do crescimento das plantas (ZAUZA et al., 2008) e apresenta correlação positiva com com a umidade relativa do ar. Quanto maior a umidade relativa do ar, maior a infestação com a doença. O estado de Rondônia está em uma região favorável à ocorrência da ferrugem do eucalipto na maior parte do ano (ALVARES et al., 2017), porém Silva et al. (2013) destacaram alta herdabilidade para a resistência à esta doença, o que é um indicativo da relevância de estudos voltados a prevenção

e remediação de quebras de produtividade causadas por fatores bióticos e abióticos na região. O número de estações meterorológicas utilizadas pelos pesquisadores que elaborararam os mapas de informações meteorológicas se restringe a 8 e o número de grids é 317. Estes números reduzem a acuracidade do modelo, todavia fornecem estimativas que podem nortear estratégias de plantações florestais para a região.

Este trabalho poderá servir como ferramenta para investidores na região, que poderão avaliar a produtividade potencial em qualquer local do estado em diferentes ciclos climáticos. Como exemplo, o empreendedor florestal poderá utilizar este trabalho como referência para o planejamento de seu negócio, incluindo investimentos em aquisição de áreas, extensão do plantio e tecnologias no processo de produção.

Ainda que não existam informações detalhadas sobre o crescimento de plantações de eucalipto na região estudada para validar os dados estimados, o modelo foi testado em diferentes locais do mundo, o que demonstra sua eficiência e justifica ainda mais seu uso para áreas sem histórico de plantações florestais.

CONCLUSÃO

A produtividade atingível foi fortemente influenciada pela temperatura média máxima, representando a vulneranilidade da cultura. Como há uma tendência de elevação da temperatura ao longo dos anos, existe a necessidade em estabelecer planos para que a viabilidade do plantio não seja afetada por estas mudanças, como a busca por materiais genéticos mais resistentes à seca e/ou o estabelecimento de novas áreas de plantio.

O modelo foi sensível às limitações locais, sejam elas edáficas ou climáticas, podendo servir como ferramenta para propor práticas silviculturais para gerenciar estresses causados por restrições, tais como fertilização, número de plantas por hectare e desbastes.

AGRADECIMENTOS

A primeira autora agradece à Fundação de Amparo ao Desenvolvimento das Ações Científicas e Tecnológicas e à Pesquisa de Rondônia - FAPERO (Processo N° 10/2016) pelo apoio a este estudo através de bolsas de doutoramento e ao Instituto Federal de Rondônia pelo apoio à capacitação da servidora. Ao “Programa Cooperativo sobre Tolerância de *Eucalyptus* Clonais aos Estresses Hídrico, Térmico e Biótico” (TECHS-IPEF), que contou com a contribuição de pessoas de 26 empresas florestais, nove universidades e instituições de pesquisa do Brasil, Uruguai e Estados Unidos, o qual forneceu o conjunto de dados utilizados para a parametrização do modelo aplicado neste estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, A. C. et al. Mapping the effect of spatial and temporal variation in climate and soils on Eucalyptus plantation production with 3-PG, a process-based growth model. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 9, p. 1730–1740, 2010.

ALVARES, C. A. Mapeamento e modelagem edafoclimática da produtividade de plantações de Eucalyptus no sul do estado de São Paulo. 2011. Disponível em: http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11150/tde-23052011-161837/

ALVARES, C. A. et al. Köppen’s climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

ALVARES, C. A. et al. Climatic favourability zones for Eucalyptus rust in Brazil. **Forest Pathology**, v. 47, n. 1, p. 1–17, 2017.

ARAUJO, M. J. et al. Adaptability and stability of eucalypt clones at different ages across environmental gradients in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 454, n. June, p. 117631, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117631

AUER, C. G.; SANTOS, Á. F. Dos. Doenças em eucaliptos destinados à produção de energia na região Sul do Brasil. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 68, p. 373–379, 2011.

AUGUSTYNCZIK, A. L. D. et al. Productivity of Fagus sylvatica under climate change – A Bayesian analysis of risk and

uncertainty using the model 3-PG. **Forest Ecology and Management**, v. 401, p. 192–206, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2017.06.061>

BAESSO, R. C. E.; RIBEIRO, A.; SILVA, M. P. IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA PRODUTIVIDADE DO EUCALIPTO NA REGIÃO NORTE DO ESPÍRITO SANTO E SUL DA BAHIA. **Ciencia Florestal**, v. 20, n. 2, p. 335–344, 2010.

BINKLEY, D. et al. The interactions of climate, spacing and genetics on clonal Eucalyptus plantations across Brazil and Uruguay. **Forest Ecology and Management**, v. 405, n. September, p. 271–283, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2017.09.050>

BINKLEY, D. et al. Variation in whole-rotation yield among Eucalyptus genotypes in response to water and heat stresses: The TECHS project. **Forest Ecology and Management**, v. 462, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.117953>. Acesso em: 21 ago. 2020.

BOOTH, T. H. et al. Climatic mapping to identify high-risk areas for Cylindrocladium quinqueseptatum leaf blight on eucalypts in mainland South East Asia and around the world. **Environmental Pollution**, v. 108, n. 3, p. 365–372, 2000.

CALDEIRA, D. R. M. et al. Multisite evaluation of the 3-PG model for the highest phenotypic plasticity Eucalyptus clone in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 462, n. November 2019, p. 117989, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.117989>

DAVIS, R. et al. The normal fire environment—Modeling environmental suitability for large forest wildfires using past, present, and future climate normals. **Forest Ecology and Management**, 2017.

ELLI, E. F. et al. Assessing the growth gaps of Eucalyptus plantations in Brazil – Magnitudes, causes and possible mitigation strategies. **Forest Ecology and Management**, v. 451, n. February, p. 117464, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117464>

FRANCA, R. R. Da. Climatologia das chuvas em Rondônia – período 1981-2011. **Revista Geografias**, v. 1, n. 20, p. 44–58, 2015. Disponível em: <http://www.igc.ufmg.br/portaldeperiodicos/index.php/geografias/article/view/650>

FREITAS, C. H. De. **Adaptação do modelo da zona agroecológica para a estimação do crescimento e produtividade de eucalipto**. 2018. Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2018. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11152/tde-08102018-174547/>

LANDSBERG, J. J.; WARING, R. H. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. **Forest Ecology and Management**, v. 95, n. 3, p. 209–228, 1997.

MÄKELÄ, A. et al. Process-based models for forest ecosystem management: Current state of the art and challenges for practical implementation. **Tree Physiology**, v. 20, n. 5–6, p. 289–298, 2000.

REYER, C. Forest productivity under environmental change—A review of stand-scale modeling studies. **Current Forestry Reports**, v. 1, n. 2, p. 53–68, 2015.

REYER, C. P. O. et al. Integrating parameter uncertainty of a process-based model in assessments of climate change effects on forest productivity. **Climatic Change**, v. 137, n. 3–4, p. 395–409, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-016-1694-1>

SALATI, E.; NOBRE, C. A. Possible climatic impacts of tropical deforestation. **Climatic Change**, v. 19, n. 1–2, p. 177–196, 1991.

SANTOS, H. G. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. - Portal Embrapa**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1094003/sistema-brasileiro-de-classificacao-de-solos>. Acesso em: 22 out. 2018.

SEDAM, S. de E. do D. A. 21 Anos Zoneamento Socioeconômico Ecológico do estado de Rondônia. n. 1, p. 60, 2009.

SEIXAS, I. M.; PINHEIRO, E. D. S. Sensoriamento remoto aplicado à análise chuva-vegetação na Amazônia Central. **GEOUSP: Espaço e Tempo (Online)**, v. 18, n. 3, p. 635, 2014.

SILVA, P. H. M. et al. Selecting for rust (Puccinia psidii) resistance in Eucalyptus grandis in São Paulo State, Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 303, p. 91–97, 2013. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2013.04.002

SILVA, P. H. M. et al. Selection of Eucalyptus grandis families across contrasting environmental conditions. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 19, n. 1, p. 47–54, 2019. a.

SILVA, P. H. M. et al. Selecting for stable and productive families of eucalyptus urophylla across a country-wide range of climates in Brazil. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 49, n. 1, p. 87–95, 2019. b.

STAPE, J. L. **Production ecology of clonal Eucalyptus plantations in Northeastern Brazil**. 2002. Colorado State University, 2002.

STAPE, J. L. et al. The Brazil Eucalyptus Potential Productivity Project: Influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 9, p. 1684–1694, 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2010.01.012>

TORRES, R. R. et al. Socio-climatic hotspots in Brazil. **Climatic change**, v. 115, p. 597–609, 2012.

XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 6, p. 2644–2659, 2016.

ZAUZA, E. Â. V. et al. Eficiência de fungicidas sistêmicos no controle da ferrugem do eucalyptus. **Revista Arvore**, v. 32, n. 5, p. 829–835, 2008.

Equipe Editorial

Editor Chefe / Editor in Chief

Prof. Dr. Paulo Henrique Müller Silva, IPEF - Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, Piracicaba, SP

Conselho Editorial / Editorial Board

Dr. Arno Brune, GP Pusaka, Bintulu, Malásia

Prof. Dr. Edson Luiz Furtado, Unesp - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, SP, Brasil

Dr. Gustavo Pedro Javier Oberschelp, INTA - Instituto Nacional de Tecnologia Agropecuaria, Concordia, Argentina

Prof. Dr. José Antônio Aleixo da Silva, UFRPE - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, PE, Brasil

Prof. Dr. Rinaldo César de Paula, Unesp -Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Jaboticabal, SP, Brasil.

Editor de Inglês / English Editor

Dr. Arno Brune, GP Pusaka, Bintulu, Malásia

Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (IPEF)

Germano Aguiar Vieira (Eldorado Brasil Celulose S/A) - Presidente

Lucas Olstan Rando (Gerdau Aços Longos S.A.) - Vice-Presidente

Empresas Associadas Mantenedoras / Partners

Aperam BioEnergia Ltda

ArcelorMittal BioFlorestas Ltda

Bracel SP Celulose Ltda

Celulose Nipo-Brasileira S/A - CENIBRA

CMPC Celulose Riograndense Ltda.

Duratex Florestal Ltda.

Eldorado Brasil Celulose S/A

Eucatex S/A Indústria e Comércio

Forestal Oriental

Gerdau Aços Longos S.A.

International Paper do Brasil Ltda

Klabin S/A

Suzano S.A.

Vallourec Florestal Ltda

Veracel Celulose S/A

WestRock, Celulose, Papel e Embalagens Ltda

INSTITUTO DE PESQUISAS
E ESTUDOS FLORESTAIS