

REVISTA
DESAFIOS

ISSN: 2359-3652

V. 11, n. 7, Outubro/2024. Dossiê Especial: Agroenergia Digital
DOI: https://doi.org/10.20873/Agroenergia_2024_v11_n7_4

EFEITOS DAS MUDANÇAS DO CLIMA NO ZONEAMENTO AGROCLIMÁTICO DO *Eucalyptus urophylla* NA REGIÃO DO MATOPIBA, CONSIDERANDO OS MODELOS Eta-MIROC5 e Eta-HadGEM2-ES

*EFFECTS OF CLIMATE CHANGE ON THE AGROCLIMATIC ZONING OF *Eucalyptus urophylla* IN THE MATOPIBA REGION, CONSIDERING THE ETA-MIROC5 AND ETA-HADGEM2-ES MODELS*

*EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICA EM LA ZONIFICACIÓN AGROCLIMÁTICA DE *Eucalyptus urophylla* EM LA REGIÓN DE MATOPIBA, CONSIDERANDO LOS MODELOS ETA-MIROC5 Y ETA-HADGEM2-ES*

Rodrigo Barbosa Sellos Lopes:

Mestre em Agroenergia pela Universidade Federal do Tocantins - UFT, Palmas, TO, Brasil.
E-mail: rodrigobarbosa.amb@gmail.com. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5340-9350>

André de Moura Andrade:

Mestre em Agroenergia pela Universidade Federal do Tocantins - UFT, Palmas, TO, Brasil.
E-mail: andrema@mail.uft.edu.br. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2063-2457>

Erich Collicchio:

Professor Associado III do curso de Engenharia Ambiental e do Programa de Pós-graduação em Agroenergia Digital, Universidade Federal do Tocantins - UFT, Palmas, TO, Brasil.
E-mail: ecollicchio@uft.edu.br. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3452-6249>

Artigo recebido em janeiro de 2024 aceito em setembro de 2024 publicado em outubro de 2024

Como citar este artigo:

LOPES, R. B. S.; ANDRADE, A. de M.; COLLICCHIO, E. Efeitos das mudanças do clima no zoneamento agroclimático do *Eucalyptus urophylla* na região do Matopiba, considerando os modelos ETA-MIROC5 E ETA-HADGEM2-ES. *Desafios. Revista Interdisciplinar da Universidade Federal do Tocantins*. Palmas, v. 11, n. 7, p. 1 - 17, out. 2024. DOI: https://doi.org/10.20873/Agroenergia_2024_v11_n7_4

RESUMO

A demanda por energias renováveis, incluindo a biomassa florestal, cujos cultivos são dependentes do clima, portanto, torna-se importante a elaboração do zoneamento agroclimático do eucalipto, na região do Matopiba. Este estudo objetivou elaborar o zoneamento agroclimático do *Eucalyptus urophylla* para o Matopiba, considerando os possíveis efeitos da mudança do clima. Utilizou-se o banco de dados meteorológicos para calcular o balanço hídrico considerando duas CADs, e associando-se às classes de aptidão da espécie e usando-se os resultados dos modelos regionais, Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5, e cenários RCP 4.5 e 8.5 (2041 e 2070). Foram gerados os zoneamentos agroclimáticos para o clima atual e de mudanças do clima. Considerando o clima atual, observou-se que as classes de aptidão ‘apta’ e ‘marginal’, ocorrem em 15% e 33% da região respectivamente, e situadas nas partes sul e centro-oeste. Os resultados dos modelos e cenários, não apresentaram áreas ‘aptas’, e as áreas com classe ‘marginal’ foram insignificantes. Notou-se um aumento significativo das áreas ‘restritas’ e ‘inaptas’, que juntas variam de 95,5% a 100% da área total. Considerando as tecnologias adotadas atualmente e confirmando-se essas projeções, a produção do *E. urophylla*, poderia ser inviabilizada nesta região.

Palavras-chave: Eucalipto; Aptidão agroclimática; Alterações climáticas.

ABSTRACT

The demand for renewable energies, including the forest biomass, whose crops are dependent on the climate, makes it important to elaborate the agroclimatic zoning of eucalyptus, in the Matopiba region, which is considered the last agricultural frontier in Brazil. This study aimed to elaborate the agroclimatic zoning of Eucalyptus urophylla for Matopiba, considering the possible climate changes. The meteorological database was used to calculate the water balance considering two AWCs, and associating it with the species aptitude classes and using the results of the regional models, Eta-HadGEM2-ES and Eta-MIROC5, and scenarios RCP 4.5 and 8.5 (2041 and 2070). Agroclimatic zoning for current climate and climate change were generated. Considering the current climate, it was observed that the ‘apt’ and ‘marginal’ aptitude classes occur in 15% and 33% of the region, respectively and located in the southern and central-western parts. The results of the models and scenarios did not show ‘apts’ areas, and the areas with ‘marginal’ class were insignificant. There was a significant increase in ‘restricted’ and ‘unapt’ areas, which together range from 95.5% to 100% of the total area. Considering the technologies currently adopted and confirming these projections, the production of E. urophylla could be unfeasible in this region.

Keywords: Eucalyptus; Agroclimatic aptitude; Climate changes.

RESUMEN

La demanda de energías renovables, incluida la biomasa forestal, cuyos cultivos dependen del clima, hace importante desarrollar una zonificación agroclimática para el eucalipto en la región de Matopiba. Este estudio tuvo como objetivo desarrollar la zonificación agroclimática de Eucalyptus urophylla para Matopiba, considerando los posibles efectos del cambio climático. Se utilizó la base de datos meteorológica para calcular el balance hídrico considerando dos CAD, y asociándolo con las clases de aptitud de las especies y utilizando los resultados de los modelos regionales, Eta-HadGEM2-ES y Eta-MIROC5, y los escenarios RCP 4.5 y 8.5 (2041 y 2070). Se generó una zonificación agroclimática para el clima actual y el cambio climático. Considerando el clima actual, se observó que las clases de condición física ‘fit’ y ‘marginal’, ocurren en 15% y 33% de la región respectivamente, y ubicadas en las partes sur y medio oeste. Los resultados de los modelos y escenarios no mostraron áreas de ‘ajuste’, y las áreas con clase ‘marginal’ fueron insignificantes. Hubo un aumento significativo en las áreas ‘restringidas’ y ‘no aptas’, que juntas van del 95,5% al 100% del área total. Considerando las tecnologías actualmente adoptadas y confirmando estas proyecciones, la producción de E. urophylla podría ser inviable en esta región.

Descriptores: Eucalipto; Aptitud agroclimática; Cambio climático.

INTRODUÇÃO

Muitos países vêm trabalhando para ter uma matriz energética mais limpa devido especialmente à crise climática global (IPCC, 2013). Esses países têm buscado alternativas que minimizem os problemas como o abastecimento energético, o equilíbrio econômico e ambiental, e as questões climáticas ligadas ao aumento da concentração de gases do efeito estufa (SANQUETTA et al., 2014), sobretudo mediante a intensificação do uso de fontes renováveis, incluindo a biomassa florestal (SIMIONI et al., 2018). Os investimentos em florestas plantadas, vem obtendo grande interesse e crescendo devido a possibilidade de aplicações em bioenergia, como os usos tradicionais, da lenha e em especial do carvão, além da produção de bio óleo, gás de síntese, hidrogênio e etanol (DAMASO et al., 2013, IBÁ, 2021). O Brasil tem se destacado a nível mundial, como pode ser observado pela oferta interna de energia de origem de fontes renováveis, que atingiu 44,7% em 2021 (EPE, 2022). Desse total, a energia proveniente da biomassa da cadeia-açúcar contribuiu com 16,4%, a hidráulica com 11,0%, a lenha e o carvão vegetal representaram 8,7% e as outras renováveis corresponderam a 8,7% (EPE, 2022).

Em 2020, o setor contribuiu para a geração de mais de 536 mil empregos diretos e 1,5 milhão de postos de trabalho indiretos, e considerando os efeitos induzidos, atingiu-se a quase 2,91 milhões de postos de trabalho (IBÁ, 2021). Os produtos que compõem esta cadeia produtiva geraram um crescimento da contribuição do setor no saldo da balança comercial brasileira no período de 2010 a 2020, apesar de uma retração em 2019 e 2020, devido à pandemia do COVID 19 que afetou fortemente o fluxo do comércio internacional. Contudo este setor continuou superavitário em 2020, registrando um saldo de US\$ 8,9 bilhões. Com relação a área de plantio de florestas plantadas no país em 2020, foi de 9,55 milhões de hectares, sendo que o cultivo do eucalipto representou 78% da área total, correspondendo a 7,47 milhões de hectares, atingindo uma produtividade média de 36,8m³/ha/ano (IBÁ, 2021).

A região do Matopiba, cujo nome é um acrônimo formado com as iniciais dos estados que o formam, Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia, é considerada a última fronteira agrícola brasileira e de acordo Souza e Pereira (2019) as relações sociais e políticas recentes nesta região propiciaram o surgimento de uma região com forte atuação do agronegócio, além de promover ferramentas para viabilizar a atração de investimento privado no setor. Com relação ao cultivo do eucalipto nos estados que compõem o Matopiba, a área plantada

correspondeu a 890.433 hectares em 2020, sendo que o crescimento da área em cada Estado (Bahia, Pará e Tocantins) no período de 2009 a 2019, foi distinto, contudo nesses três últimos anos houve uma estabilização da área plantada nesses estados. Destaca-se que no Tocantins ocorreu um aumento da área de plantio de cerca de 236% (IBÁ, 2021). Esse fato é devido especialmente ao estímulo que houve pelo governo estadual e à proximidade de parques siderúrgicos localizados no sul do Maranhão e leste do Pará (DUARTE; COLLICCHIO, 2020), bem como de uma indústria de papel e celulose, instalada em Imperatriz – MA (LUSTOSA; COLLICCHIO, 2021).

O cultivo de eucalipto no país apresenta uma ampla adaptação a diferentes tipos de clima e solos, porém para que a cultura obtenha um bom desempenho num determinado ambiente, é necessário obter informações edafoclimáticas regionais. O balanço hídrico permite produzir indicadores objetivos de ambientes favoráveis ou desfavoráveis para a situação climática atual e em cenários futuros, sendo o déficit hídrico um dos indicadores mais utilizados, pois estima estado hídrico numa localidade e de uma cultura. A estimativa do déficit hídrico favorece na escolha de clones de eucalipto para plantio numa região (ASSAD; MONTEIRO; PUGLIERO, 2021).

Sendo assim, o zoneamento agroclimático é uma ferramenta estratégica, que permite a delimitação de regiões com melhor aptidão climática para cultivo agrícola e florestal (FRAGA et al., 2018). Nesse contexto, diversos estudos têm sido realizados no país referentes ao zoneamento agroclimático do eucalipto (SPERANDIO, CAMPANARO; NAPPO, 2010; LOUREIRO JÚNIOR et al., 2015; SOUZA et al., 2015; FLORES et al., 2016; ASSAD; MONTEIRO; PUGLIERO, 2021).

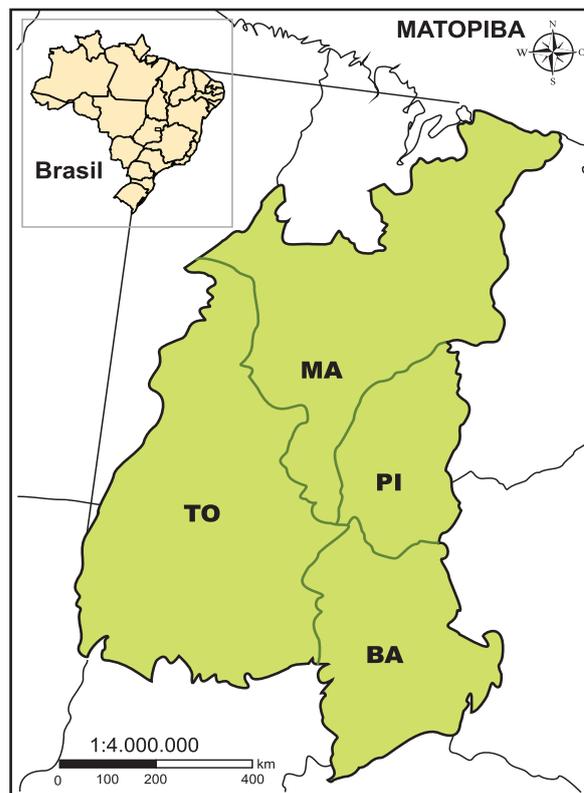
Contudo, poderá ocorrer à elevação do risco climático, devido à possível influência das mudanças do clima nas regiões produtoras (IPCC, 2013; IPCC 2021). Considerando que as mudanças climáticas poderão afetar o setor florestal do país, estudos sobre os seus possíveis reflexos no zoneamento agroclimático do eucalipto, têm sido realizados no Brasil (BAESSO; RIBEIRO; SILVA, 2010; RODY et al., 2012; DOHLER et al., 2012; GARCIA et al., 2014; ELLI; SENTELHAS; BENDER, 2020; ASSAD; MONTEIRO; PUGLIERO, 2021; NUNES; COLLICCHIO, 2022).

Nesse sentido, o presente trabalho teve como objetivo verificar os possíveis efeitos das mudanças do clima sobre o zoneamento de aptidão agroclimática do *Eucalyptus urophylla* na região do Matopiba, utilizando dados de saída dos modelos climáticos, Eta-MIROC5 e Eta-HadGEM2-ES, considerando dois cenários de emissões para o período de 2041 a 2070.

MATERIAIS E MÉTODOS

A área do presente estudo refere-se à região do Matopiba, composta pelos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia, a qual encontra-se situado na região Norte e Nordeste do Brasil, com uma área total de 73.173.485 ha, contendo 337 municípios e uma população de 5.901.789 habitantes (MIRANDA; MAGALHÃES; CARVALHO, 2015). A região encontra-se inserida dentro dos seguintes limites geográficos: nas Latitudes $20^{\circ}12'30''$ S, no extremo norte: norte do Maranhão/Oceano Atlântico, e $15^{\circ}16'30''$ S, no extremo sul: divisa do estado do Tocantins/Goiás e nas Longitudes $41^{\circ}48'30''$ W, no extremo leste: parte do estado da Bahia e do estado do Piauí e $50^{\circ}45'10''$ W, no extremo oeste: estado do Pará e parte do estado do Mato Grosso (Figura 1).

Figura 1 - Localização da região do Matopiba



Para o desenvolvimento deste trabalho, utilizou-se dados de precipitação média mensal de 110 estações meteorológicas e pluviométricas situadas no estado do Tocantins e estados circunvizinhos (COLLICCHIO et al., 2015). Dados complementares que abrangem os demais estados da região do Matopiba, considerando-se séries históricas do período de 1982 a 2000, foram disponibilizados pela Embrapa, totalizando assim, 378 estações meteorológicas e pluviométricas na área de estudo. Em seguida, foram estimadas as temperaturas

para as coordenadas correspondentes ao acervo pluviométrico citado, por meio da metodologia utilizada por Santos et al. (2015), que envolveu a regressão linear múltipla das médias mensais em um ambiente de Sistema de Informações Geográficas - SIG, o ArcGIS.

A equação está apresentada a seguir:

$$T = \beta_0 + \beta_1 Y + \beta_2 X + \beta_3 \text{ALT} \quad (1)$$

Sendo T: temperatura do ar (°C); β_0 : constante de regressão; Y: coordenada geográfica Y (Latitude), em graus e décimos (valores negativos); X: coordenada geográfica X (Longitude), em graus e décimos (valores negativos); ALT: altitude (m) e β_1 , β_2 e β_3 : coeficientes de regressão para as variáveis Y, X e ALT.

A correlação da variável climática temperatura, com a latitude, a longitude e a altitude, foi atestada estatisticamente pelo SIG, sendo que as estimativas obtidas para as coordenadas das estações pluviométricas foram conseguidas valorando a altitude das mesmas, por meio do modelo digital de elevação da região, obtido por meio de dados de radar *Shuttle Radar Topography Mission* – SRTM.

Com a posse das médias de temperatura e precipitação mensal das 378 amostras, executou-se a rotina algorítmica desenvolvida por Victoria et al. (2007) em linguagem *Python* para cálculo do balanço hídrico climatológico (BHC) (PEREIRA, 2005), considerando duas Capacidades de Água Disponível (CADs), sendo de 100 mm (equivalente a solos de média capacidade de armazenamento, geralmente siltosos) e de 150 mm (solos considerados de alta capacidade de armazenamento, siltosos ou argilosos bem estruturados), conforme indicado por Assad; Monteiro; Pugliero (2021).

O algoritmo foi criado para utilizar a calculadora de mapas do software Grass GIS, que usou das equações de Thornthwaite (1948) para simulação das evapotranspirações médias mensais e subsequentemente das equações de Thornthwaite; Mather (1955) para o BHC. Para fins de simplificação desta operação, os autores deste trabalho elaboraram um *plugin* entre o ArcGIS e o Grass GIS, sendo possível determinar, dentre as variáveis do balanço hídrico mensuradas, a deficiência hídrica anual (Da).

As exigências hídricas e térmicas desta espécie, consistem em uma precipitação oscilando entre 900 e 2.000 mm e uma faixa ótima de temperatura média anual, variando de 16°C a 29°C (GOLFARI, 1975; SPERANDIO et al., 2010; FLORES et al., 2016). Destaca-se que a pluviometria média anual e temperatura média anual superior a 2.000 mm e 23°C, respectivamente, podem favorecer o cancro do eucalipto, que é uma infecção causada por *Cryphonectria cubensis*.

Com relação às classes restritivas segundo o critério da deficiência hídrica anual (Da), estas foram baseadas em Loureiro Júnior et al. (2015), que avaliaram as produtividades potenciais em função deste parâmetro.

Tendo como referência esses autores e Souza et al. (2015), definiu-se faixas de aptidão para a Da, sendo considerada ‘apta’ para o intervalo, $30 < Da < 250$ mm, ‘marginal’ para $250 < Da < 350$ mm e ‘restrita’ com $Da > 350$ mm.

Considerando-se estas necessidades hídricas e térmicas da cultura, obteve nove classes de aptidão para o *E. urophylla*, as quais foram agrupadas, em apenas quatro classes, com a finalidade de propiciar uma melhor visualização e interpretação dos mapas gerados (Quadro 1).

A partir dos mapas de temperatura média anual (Ta), precipitação (Pa), e deficiência hídrica anual (Da) referente ao clima atual, delimitou-se as classes de aptidão. Para fins de zoneamento agroclimático do *E. urophylla*, a espacialização das aptidões foi realizada usando-se o método de interpolação de *Spline* com Regularização de Tensões do ArcGIS.

Quadro 1 - Resumo do agrupamento de classes de aptidão agroclimática para o *Eucalyptus urophylla*

Classe de Aptidão	Classes agrupadas	Observações
APTA	Classe Apta e Apta*	*Condição térmica e hídrica favoráveis, porém com observância à incidência de doenças.
MARGINAL	Classe Marginal e Marginal*	*Condição térmica favorável e restrição hídrica. Apta com irrigação complementar, porém com observância à incidência de doenças.
RESTRITA	Classe Restrita, Restrita* e Restrita**	*Condição térmica favorável e restrição hídrica acentuada. Apta com irrigação plena, porém com observância à incidência de doenças; **Condição térmica e hídrica favoráveis, porém com observância a produtividade da cultura devido à baixa pluviometria no ciclo da cultura.
INAPTA	Classe Inapta e Inapta*	* Condição térmica desfavorável ao cultivo da cultura.

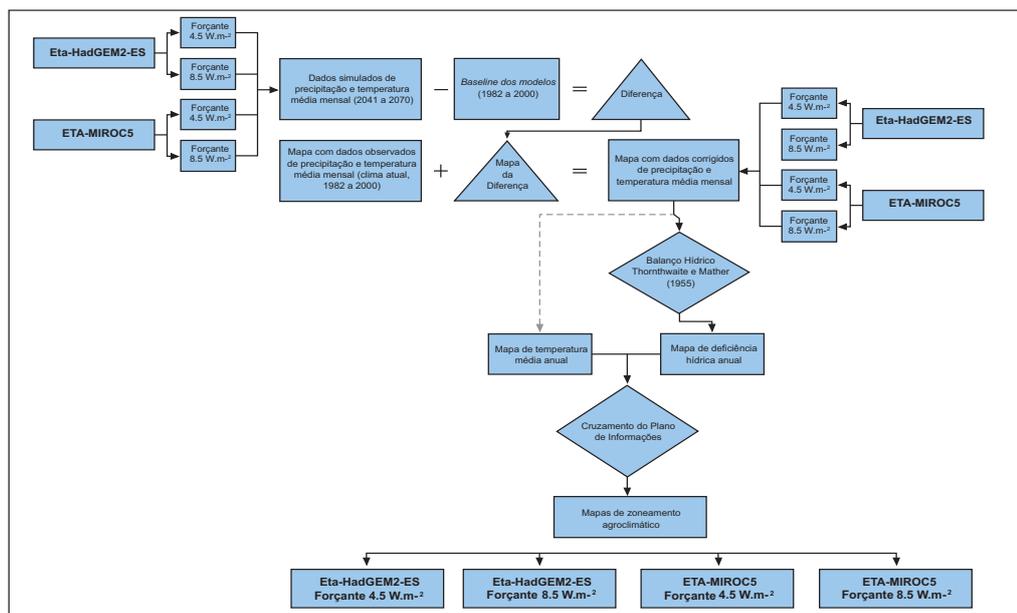
No que se refere à análise dos possíveis efeitos das mudanças do clima sobre o zoneamento de aptidão agroclimática do *E. urophylla* na região do Matopiba, utilizou-se os dados de saída (precipitação e temperatura média mensal) dos modelos regionais Eta MIROC5 e Eta HadGEM2-ES, os quais são resultantes de um downscaling dos modelos climáticos globais, MIROC5 e HadGEM2-ES respectivamente.

O modelo MIROC5 por exemplo, que possui 150 km de resolução, na sua composição regional (RCM) é de 20 km (SOUSA et al., 2018).

Nesse contexto considerou-se para cada modelo climático, dois cenários representativos, o RCP 4.5 (intermediário) e o RCP 8.5 (pessimista), associadas as duas CADs (100 e 150 mm), para o período de 2040 a 2070.

As etapas para a elaboração dos zoneamentos agroclimáticos considerando os modelos/cenários (2040 a 2070), estão apresentadas no fluxograma da Figura 2.

Figura 2 - Fluxograma mostrando as etapas da metodologia de correção dos dados climáticos, balanço hídrico e os zoneamentos agroclimáticos considerando as distintas CADs e modelos/cenários



Fonte: Próprio autor

A aquisição dos dados de precipitação e temperatura média mensal dos dois modelos climáticos para os dois cenários de emissões, foram disponibilizados gratuitamente acessando a plataforma *online* do Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CCST/INPE).

A disponibilização destes elementos em seus diferentes cenários, se deu por uma extensão em formato de arquivo NETCDF (.nc). Devido à falta de algumas instrumentações para manipulação destes dados multidimensionais, os autores desenvolveram uma ferramenta no ArcGIS que permitiu a extração, a operação, o recorte e transformação destes arquivos. Com essa aplicação, foram corrigidas as estimativas do modelo, diminuindo suas medidas de tendência de erro em relação aos dados observados (LENDERINK; BUIHAND; Van DEURSEN, 2007). Por fim foram efetuados novos balanços hídricos com o mesmo *plugin* descrito anteriormente para tal finalidade, um para cada cenário de mudanças climáticas, RCP 4.5 e RCP 8.5, considerando cada CAD e com suas respectivas temperaturas e precipitações médias estimadas e corrigidas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados médios anuais estimados de temperatura, precipitação e da deficiência hídrica da climatologia atual e dos modelos/cenários estão apresentados na Tabela 1.

Notou-se que a média de temperatura anual obtida para o ‘clima atual’, foi de 24,2°C, variando de 21,1°C a 27,3°C e para a pluviosidade média anual, atingiu 1.430 mm (Tabela 1).

Para o modelo Eta-HadGEM2-ES e cenário RCP 4.5, verificou-se o valor de temperatura média anual de 26,3°C, sendo mais elevado em média de 2,1°C em relação ao clima atual. Já para o cenário RCP 8.5, observou-se um aquecimento maior, com temperatura média anual de 28,1°C.

Tabela 1 - Valores médios anuais da temperatura (T em °C), precipitação (P em mm) e déficit hídrico anual (Da em mm), considerando a CAD = 100 e 150 mm e os diferentes modelos e cenários

Modelos/Cenários	T (°C)	P (mm)	Da (mm)	
			(CAD = 100)	(CAD = 150)
Clima Atual	24,2	1.430	518,1	503,5
Eta-HadGEM2-ES 4.5	26,3	1.268	817,4	796,9
Eta-HadGEM2-ES 8.5	28,1	1.114	991,2	970,3
Eta-MIROC5 4.5	25,8	1.359	740,2	719,7
Eta-MIROC5 8.5	26,4	1.189	932,0	911,4

Fonte: Próprio autor

Com relação a precipitação média anual estimada pelo modelo para os cenários RCP 4.5 e 8.5, constatou-se os seguintes valores, 1.268 mm e 1.114 mm, com reduções médias anuais de 162 mm e 446 mm, respectivamente em relação à condição climática atual.

Considerando o modelo Eta-MIROC5 e cenário RCP 4.5, percebeu-se que o valor de temperatura média anual foi de 25,8°C, ocorrendo um aumento médio de 1,6°C em relação ao clima atual, sendo inferior ao obtido pelo modelo Eta-HadGEM2-ES, para o mesmo cenário. Para o cenário RCP 8.5, observou-se que a temperatura média anual atingiu 26,4°C, correspondendo a um aumento médio de 2,2°C em relação ao clima atual. No que concerne à chuva média anual, para o RCP 4.5, o valor estimado foi de 1.359 mm, e para o RCP 8.5, foi de apenas 1.189 mm, ambos com valores inferiores à climatologia atual.

Constatou-se, pelos dados Tabela 1, que os valores médios da deficiência hídrica anual (Da), tanto para a situação climática atual, quanto para os modelos e cenários analisados, são muito elevados, variando de 518,1 mm e 503,5 mm (clima atual – CAD = 100 mm e 150 mm) a 932,0 e 970,3 mm (modelo Eta-HadGEM2-ES e RCP 8.5 – CAD = 100 mm e 150 mm). De acordo com Loureiro Júnior et al. (2015), tal situação, indica que o potencial produtivo desta espécie, torna-se baixo, devido a elevada restrição hídrica. Nessa situação com $Da > 400$ mm são consideradas de Da muito elevada, recomendando apenas o plantio de espécies ou híbridos de alta tolerância à seca (ASSAD; MONTEIRO; PUGLIERO, 2021).

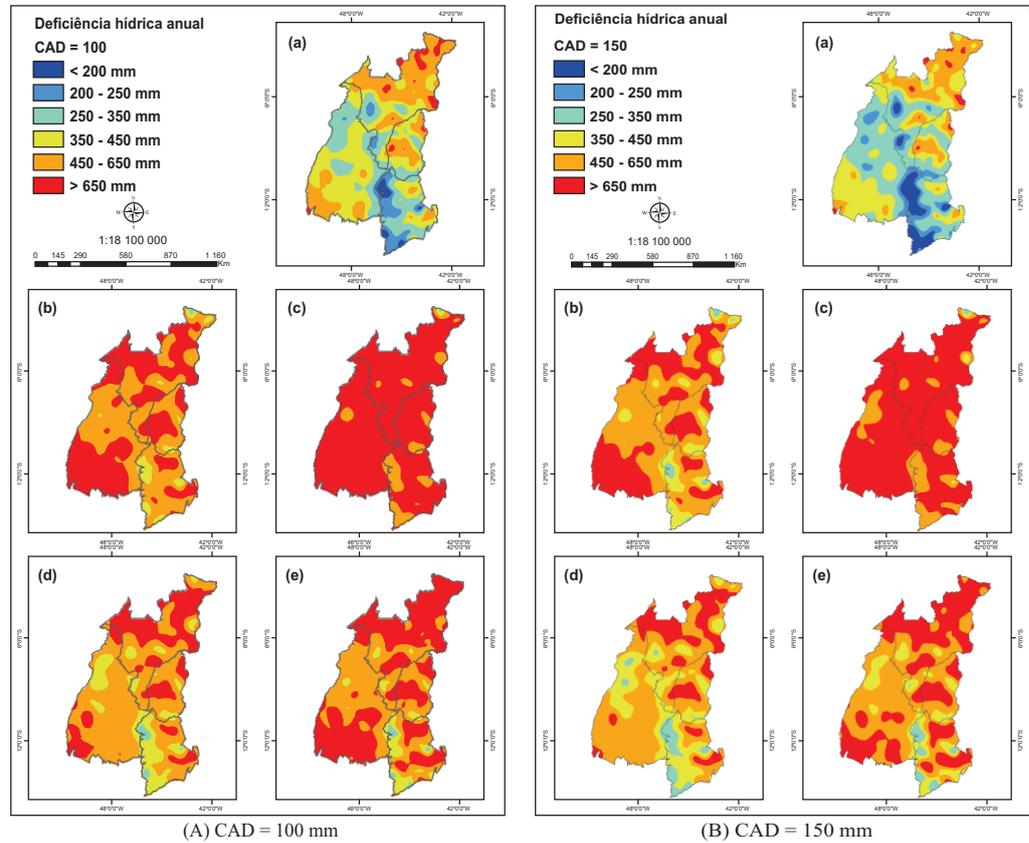
Na condição do clima atual, considerando o solo com CAD = 100 mm, constatou-se que apenas 7,28% da área do Matopiba apresentou classe de aptidão para deficiência hídrica (Da), considerada ‘apta’ ($30 < Da < 250$ mm), 25,13% ‘marginal’ ($250 < Da < 350$ mm) e 67,59 % foi considerada ‘restrita’ ($Da > 350$ mm). Pela Figura 3Aa percebe-se algumas áreas espalhadas pela região com condições mais favoráveis ao plantio do *E. uroplhylla*, que ocorrem no sul/sudoeste do Maranhão, noroeste, centro e leste do Tocantins, sul do Piauí e áreas com maior aptidão agrícola na porção oeste da Bahia.

Considerando a CAD = 150 mm, para a situação climática atual, apenas 15% da área do Matopiba tinha classe de aptidão para deficiência hídrica, considerada ‘apta’ ($30 < Da < 250$ mm), 34,07% ‘marginal’ ($250 < Da < 350$ mm) e 50,90% foi considerada ‘restrita’ ($Da > 350$ mm).

Na condição do clima atual em solo com a CAD = 150 mm, pela Figura 3Ba, observa-se a ocorrência da intensificação de áreas mais favoráveis ao cultivo desta espécie, devido a deficiência hídrica ser de menor valor (Da até 350 mm), numa faixa transversal partindo da região sudeste da Bahia, passando pelo centro do Matopiba e atingindo a porção oeste e noroeste do Tocantins, bem como no sul do Maranhão e parte do Piauí. A soma das áreas das classes de aptidão ‘apta’ e ‘marginal’, ou seja, que potencialmente apresentaria de alta (> 35 m³/ha/ano) à média produtividade (25 a 35 m³/ha/ano) no cultivo de eucalipto (LOUREIRO JÚNIOR et al., 2015), correspondem a quase 50% da área do Matopiba.

As maiores deficiências hídricas que se referem à classe ‘restrita’ foram constatadas especialmente nas regiões sul e sudoeste do estado do Tocantins, nas regiões noroeste e extremo norte do Maranhão e em pequenas proporções ao leste dos estados do Piauí e da Bahia.

Figura 3. Deficiência hídrica anual na região do Matopiba, considerando: (a) clima atual; (b) Eta-HadGEM2-ES (4.5 W.m⁻²); (c) Eta-HadGEM2-ES (8.5 W.m⁻²); (d) Eta-MIROC5 (4.5 W.m⁻²) e (e) Eta-MIROC5 (8.5 W.m⁻²), para (A) CAD = 100 mm e (B) CAD = 150 mm

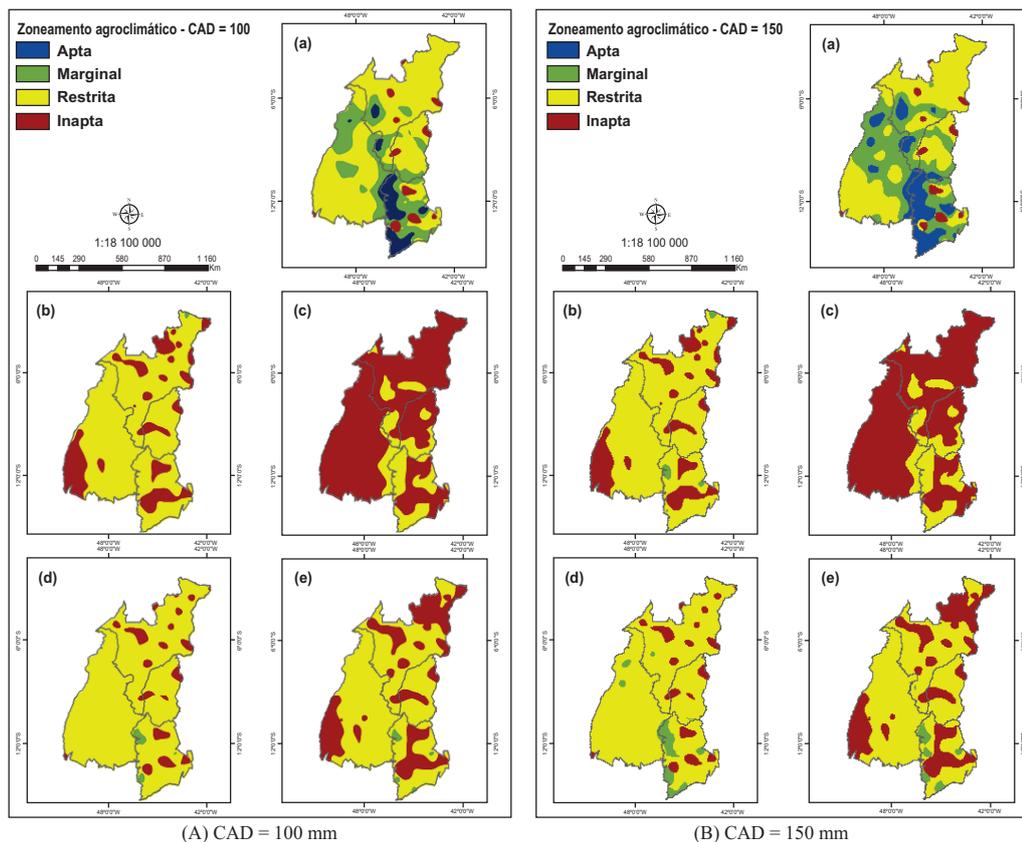


Fonte: Próprio autor

Conforme pode ser visualizado em todas as Figuras 3A e 3B (ambas as CADs), percebe-se que todos os modelos e cenários apresentaram um aumento significativo do déficit hídrico tanto em valor, quanto em área, sendo consideradas áreas muito ‘restritas’ ao plantio, quando comparada com os resultados estimados para o clima atual. Constatou-se que as áreas com aptidão ‘restrita’ em relação a este parâmetro, passaram de 67,59 e de 50,90% (clima atual) para valores acima de 99,00% e 95,00%, referentes aos modelos e cenários analisados, para os CADs 100 mm e 150 mm, respectivamente. Com relação às áreas consideradas ‘marginais’, nota-se que são áreas proporcionalmente muito pequenas, com valores abaixo de 1% para todos os modelos/cenários em solos com CAD = 100 mm. De forma semelhante constata-se em solos com maior capacidade de retenção de água (CAD = 150 mm), variando de 0,29% (modelo Eta- HadGEM2-ES e RCP 4.5) a 4,15% (Eta-MIROC5 e RCP 4.5).

No zoneamento de aptidão agroclimática do *Eucalyptus urophylla*, para a climatologia atual, foram identificadas quatro classes de aptidão distintas (Figura 4 e Tabelas 2 e 3).

Figura 4. Agrupamento das zonas de aptidão agroclimática para o *E. urophylla* na região do Matopiba, para (A) CAD = 100 mm e (B) CAD = 150 mm. Sendo (a) clima atual; (b) Eta-HadGEM2-ES (RCP 4.5); (c) Eta-HadGEM2-ES (RCP 8.5); (d) Eta-MIROC5 (RCP 4.5) e (e) Eta-MIROC5 (RCP 8.5)



Fonte: Próprio autor

Considerando os solos de média capacidade de retenção de água (CAD = 100 mm), observa-se para o clima atual que cerca de 67,8% da área, foi classificada como ‘restrita’ e ‘inapta’ ao cultivo (Tabela 2), cujas áreas encontram-se espalhadas por todo o Matopiba (Figura 4Aa).

O modelo Eta-HadGEM2-ES, cenário RCP 4.5, mostra que áreas identificadas como ‘restritas’ representam 80,0% da área, ou seja, quase que a totalidade da região estudada. Já o Eta-HadGEM2-ES, cenário RCP 8.5, apresenta uma situação mais severa, marcada pelo aumento da classe ‘inapta’ (79,3%), e supressão das classes ‘apta’ e ‘marginal’ ao cultivo. Com relação ao modelo Eta-MIROC5, para os cenários RCP 4.5 e 8.5 observou-se um predomínio de áreas com classe ‘restrita’, correspondendo a 92,3% e 71,2%, respectivamente. As áreas ‘restritas’

e ‘inaptas’ para este modelo e ambos os cenários, correspondem em média a mais de 95% de áreas desfavoráveis ao plantio do *E. urophylla*.

O restante da área o equivalente a 0,5%, seria classificada como ‘marginal’ e estaria concentrada na porção oeste da Bahia (Figuras 4Ad e 4Ae).

Tabela 2 - Áreas (em km² e %) do agrupamento de aptidão agroclimática para a cultura *E. urophylla* na região do Matopiba, considerando a CAD = 100 mm, referentes ao cenário atual e os dados dos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5, para os cenários RCP 4.5 e 8.5

Classes de aptidão	Cenário		Eta-HadGEM2				Eta-MIROC			
	Atual		RCP 4.5		RCP 8.5		RCP 4.5		RCP 8.5	
	km ²	%								
Apta	56 241,11	7,7	---	---	---	---	---	---	---	---
Marginal	179 212,40	24,5	953,26	0,1	---	---	3.650,22	0,5	2.680,12	0,4
Restrita	402 878,14	55,1	585 318,62	80	151.076,04	20,7	675.441,81	92,3	521.090,72	71,2
Inapta	93 403,20	12,7	145 462,97	19,9	580.655,66	79,3	52.642,82	7,2	207.964,01	28,4

Fonte: Próprio autor

Para os solos considerados de alta capacidade de armazenamento, siltosos ou argilosos bem estruturados (CAD = 150 mm) e em relação à condição do clima atual, percebe-se pela Tabela 3 que há predominância de zonas de aptidão ‘restritas’ ao cultivo, com 48,4% da área, seguida de uma grande parcela de aptidão ‘marginal’, correspondente a uma área de 33,4%.

Conforme pode ser visualizado nas Figuras 3Ba e 4Ba, existe uma semelhança dos locais de ocorrência dessas duas classes de aptidão, comparadas com as áreas de restrição hídrica do solo, ou seja, de elevada deficiência hídrica.

Tabela 3 - Áreas (em km² e %) do agrupamento de aptidão agroclimática para a cultura *E. urophylla* na região do Matopiba, considerando a CAD = 150 mm, referentes ao cenário atual e os dados dos modelos climáticos regionais Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5, para os cenários RCP 4.5 e 8.5

Classes de aptidão	Cenário		Eta-HadGEM2				Eta-MIROC			
	Atual		RCP 4.5		RCP 8.5		RCP 4.5		RCP 8.5	
	km ²	%								
Apta	110 475,85	15,1	---	---	---	---	---	---	---	---
Marginal	244 352,18	33,4	4 205,00	0,6	---	---	32.450,23	4,4	15.338,78	2,1
Restrita	353 912,24	48,4	579.704,93	79,2	151.076,04	20,6	646.640,65	88,4	508.432,06	69,5
Inapta	22 994,58	3,1	147 824,92	20,2	580.658,81	79,4	52.643,97	7,2	207.964,01	28,4

Fonte: Próprio autor

As áreas com classes ‘aptas’ ao cultivo do *Eucalyptus urophylla* referem-se a cerca de 15,1%, correspondendo a uma área total de 110.475,85 km². Esta classe está concentrada parcialmente na porção sul do Matopiba e distribuída de forma descontínua pela região central e oeste (Figura 4Ba). Nota-se pela Figura 4Ba, que áreas com aptidões favoráveis estão concentradas nas proximidades do parque siderúrgico localizados no sul do Maranhão e leste do Pará (DUARTE; COLLICCHIO, 2020) e da Suzano indústria de papel e celulose, em operação no município de Imperatriz – MA (LUSTOSA; COLLICCHIO, 2021). Verificou-se, também, um percentual muito baixo de área ‘inapta’, correspondendo a apenas 3,14% de todo o território. Analisando a Tabelas 3 e a Figura 4B, pode-se confirmar que a classe ‘restrita’ foi predominante, tanto para o clima atual, quanto para os modelos climáticos, exceto para o Eta-HadGEM2-ES, RCP 8.5, o qual apresentou 79,4% de área ‘inapta’.

Percebe-se que a influência dos dados de deficiência hídrica anual gerados a partir dos modelos, foi responsável por suprimir a classe de aptidão climática ‘apta’ nos zoneamentos agroclimáticos do *E. urophylla*, para todos os modelos e cenários. Além disso, a Da contribuiu também para ampliar de forma significativa, as classes de aptidão climática ‘restrita’ e ‘inapta’.

As áreas de aptidão climática ‘restritas’ e ‘inaptas’ dos modelos/cenários, juntas correspondem de 95,5% a 100% da área total do Matopiba.

Sendo confirmadas essas projeções, a produção do *Eucalyptus urophylla*, poderia no futuro, ser dificultada ou mesmo inviabilizada nesta região, considerando as tecnologias adotadas atualmente.

CONCLUSÃO

A partir dos resultados depreende-se que a região do Matopiba, deverá ter no futuro (2041 e 2070), características climáticas distintas das atuais, principalmente devido ao aumento da temperatura e o grau de severidade em relação ao déficit hídrico dos solos.

Não haverá restrição térmica para o cultivo do *Eucalyptus urophylla* na região, tanto sob as condições climáticas atuais, quanto para o modelo Eta-MIROC5 e cenário RCP 4.5.

Os valores médios da deficiência hídrica anual (Da), observados a partir dos modelos e cenários analisados, são muito elevados, indicando que o potencial produtivo desta espécie, torna-se-á baixo na maior parte do Matopiba. Esse fato, considerando os genótipos e tecnologias atuais, podem inviabilizar o cultivo e/ou a expansão do plantio do *Eucalyptus urophylla*

na região. Dependendo da intensidade da deficiência hídrica localmente e da viabilidade econômica e ambiental, poderá ser utilizada a irrigação de salvamento ou suplementar, na estação da seca, para oportunizar o plantio.

Destaca-se que a partir dos resultados de todos os modelos e cenários e das capacidades de armazenamento do solo estudadas não foi identificada a classe de aptidão climática ‘apta’ e houve a ampliação altamente significativamente das classes de aptidão climática ‘restrita’ e ‘inapta’ ao cultivo.

Com relação aos modelos climáticos utilizados, verificou-se que o déficit hídrico e a temperatura aumentaram de forma mais expressiva, principalmente no modelo o Eta-HadGEM2-ES.

Ressalta-se que o modelo Eta-MIROC5 e cenário RCP 4.5, foi o que mais se aproximou do cenário do clima atual. Já o pior resultado quanto à severidade climática, foi atribuído ao modelo Eta-HadGEM2-ES e cenário RCP 8.5.

Indica-se o incentivo à realização de pesquisas e inovação nas áreas de biotecnologia e de avaliação de clones e estímulo à elaboração de políticas públicas que visem o enfrentamento às mudanças do clima voltadas para o Matopiba.

Agradecimentos

Ao Programa de Pós-Graduação em Agroenergia Digital da Universidade Federal do Tocantins (UFT); ao Programa Nacional de Cooperação Acadêmica na Amazônia (PROCAD/Amazônia) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Referências Bibliográficas

ASSAD, E. D.; MONTEIRO, J. E. B. de A.; PUGLIERO, V. S. Mudanças do clima e a cultura do eucalipto. In: OLIVEIRA E. B. de, PINTO JUNIOR J. E. (Ed.). **O eucalipto e a Embrapa: quatro décadas de pesquisa e desenvolvimento**. Brasília, Embrapa, cap. 8, p. 357-394.

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. **Ciência Florestal**, v. 20, n. 2, p. 335-344, 2010. DOI: <https://doi.org/10.5902/198050981856>

COLLICCHIO, E.; ROCHA, H. R.; VICTORIA, D. de C.; BALLESTER, M. V. R.; TOLEDO, A. M. A. Implicações das mudanças do clima no zoneamento agroclimático da cana-de-açúcar no Estado de Tocantins, considerando o modelo GFDL. **Revista Brasileira de Geografia Física**. Recife, v. 08, n. 06, p. 1730-1747, 2015. DOI:10.26848/rbgf.v8i6.233686

COLLICCHIO, E.; LOPES, R. B. S.; MARCOLINI, M. de P. Análise dos possíveis efeitos das mudanças do clima no cultivo da cana-de-açúcar e do eucalipto no estado do Tocantins. **Journal of Bioenergy and Food Science**, v. 6, n.1, p. 1-17, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.18067/jbfs.v6i1.259>

DAMASO, M. C. T.; HELM, C. V.; SILVA, P. R.; CONTE, R. A.; GAMBETTA, R. Pesquisa para turbinar biomassa florestal. **Rev. Ambiente Energia**, v 1, n. 2, p. 19- 22, 2013.

DUARTE, F.; COLLICCHIO, E. Desafios e perspectivas do cultivo do *Eucalyptus*, para fins energéticos no estado do Tocantins. **Revista Liberato**, v. 21, n. 35, p. 1-100, 2020. DOI: 10.31514/rliberato.2020v21n35.p15

ELLI, E. F.; SENTELHAS, P. C.; BENDER, F. D. Impacts and uncertainties of climate change projections on *Eucalyptus* plantations productivity across Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 474, oct. 2020. DOI: doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118365

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional (BEN):** relatório final, ano base 2021. Rio de Janeiro: EPE. 2022. 264 p.

FLORES, T. B.; ALVARES, C. A.; SOUZA, V. C.; STAPE, J. L. **Eucalyptus no Brasil:** zoneamento climático e guia para identificação. Piracicaba: IPEF, 2016. 448 p.

FRAGA, M. de S.; ULIANA, E. M.; SILVA, D. D. da; CAMPOS, F. B.; CALIJURI, M. L.; SANTOS, D. M. de S. Climatic zoning for *Eucalyptus* cultivation through strategic decision analysis. **Revista Ambiente & Água**, v. 13, n.1, p. 1-13. 2018. DOI: <https://doi.org/10.4136/1980-993X>

GARCIA, L. G.; FERRAZ, S. F. de B.; ALVARES, C. A.; FERRAZ, K. M. P. M. de B.; HIGA, R. C. V. Modelagem da aptidão climática do *Eucalyptus grandis* frente aos cenários de mudanças climáticas no Brasil. **Scientia Forestalis**, v. 42, n. 104, p. 503-511, dez. 2014.

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

IBÁ. **Relatório Anual Indústria Brasileira de Árvores - 2021.** Brasília: Ibá, 2021. 176 p.

IPCC, 2013. **Climate Change 2013:** the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker TFD, Qin GK, Plattner M, Tignor SK, Allen J, Boschung A, Nauels Y, Xia, Bex PM, Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 p.

IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: **Climate Change 2021:** The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. In Press.

LENDERINK, G.; BUIHAND, A.; VAN DEURSEN, W. Estimates of future discharges of the river Rhine using two scenario methodologies: direct versus delta approach. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, n. 3, p. 1145–1159, 2007. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-11-1145-2007>

LOUREIRO JUNIOR, A.; BARBOSA, C. A.; FASOLO, L.; SARTORI, M.; PEDRONI, M. **Aptidão para a silvicultura de eucalipto nas diferentes regiões do Estado do Espírito Santo.** Vitória: Cedagro. 2015. 175 p.

LUSTOSA, F. O. dos S.; COLLICCHIO, E. Uso de geotecnologia na análise da eucaliptocultura na Região Norte do Tocantins. **Rev. Científ. Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, v. 6, n. 1, p. 179-215. 2021.

NUNES, D. da S.; COLLICCHIO, E. Efeito dos cenários climáticos futuros na aptidão agroclimática do *Eucalyptus urophylla* no Estado do Tocantins. In: COLLICCHIO, E.; ROCHA, H. R. da (org). **Agricultura e mudanças do clima no Estado do Tocantins:** vulnerabilidade, projeções e desenvolvimento. Palmas, Ed. UFT, cap. 11, p. 233 – 242. 2022.

MIRANDA E. E.; MAGALHÃES, L. A.; CARVALHO, C. A. de. **Proposta de delimitação territorial do Matopiba**. Campinas: GITE/Embrapa, maio 2014. 18 p. Disponível em: <www.embrapa.br/gite/publicacoes/NT1>. Acesso em: 25 nov. 2023.

PEREIRA, A. R. Agrometeorologia: simplificando o balanço hídrico de Thornthwaite – Mather. **Revista Bragantia**, v. 64, n. 2, p. 311- 313. 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0006-87052005000200019>

RODY, Y. P.; CECÍLIO, R. A.; PEZZOPANE, J. E. M.; RIBEIRO, A.; ALMEIDA, A. Q. de. Influencia del cambio climático en los escenarios del futuro sobre plantaciones de eucalipto. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, n. 3, p 470-477. 2012.

SANTOS, A. R. dos; RIBEIRO, C. A. A. S.; SEDIYAMA, G. C., PELUZIO, J. B. E.; PEZZOPANE, J. E. M.; BRAGANÇA, R. **Espacialização de dados meteorológicos no Arc GIS 10.3**. Alegre: UFES-Caufes, 2015. 66 p.

SANQUETTA, C. R.; BEHLING, A.; CORTE, A. P. D.; SIMON, A.; PSCHIEDT, H.; RUZA, M. S.; MOCHIUTTI, S. Estoques de biomassa e carbono em povoamentos de acácia-negra em diferentes idades no Rio Grande do Sul. **Scientia Forestalis**, v. 12, n. 103, p. 361-370. 2014.

SIMIONI, F. J.; BUSCHINELLI, C. C. A.; DEBONI, T. L.; PASSOS, B. M. Cadeia produtiva de energia de biomassa florestal: O caso da lenha de eucalipto no polo produtivo de Itapeva-SP. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 1, p. 310-323. 2018. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509831602>

SOUSA, R. M. de; VIOLA, M. R.; CHOU, S. C.; ALVES, M. V. G. Qualidade estatística do clima presente simulado pelos modelos climáticos Eta-HADGEM2-ES e Eta-MIROC5 para o estado do Tocantins. **Scientia Agraria**, v. 19, n. 2, p. 197-214. 2018. DOI:<http://dx.doi.org/10.5380/rsa.v19i2.54539>

SOUZA, O. M. M.; COLLICCHIO, E.; PEREIRA, E. Q.; AZEVEDO, M. I. R. Zoneamento edafoclimático para o Eucalyptus urophylla no Estado do Tocantins. **DESAFIOS: Revista Interdisciplinar da Universidade Federal do Tocantins**, v. 1, n. 2. p.121-134, jan/jun. 2015.

SOUZA, O. M. M.; COLLICCHIO, E.; PEREIRA, E. Q.; AZEVEDO, M. I. R. Edaphoclimatic zoning for Eucalyptus urograndis in the State of Tocantins, Brazil. **Journal of Bioenergy and Food Science**, v. 2, n. 2, p. 62-71. 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.18607/jbfs.v2.i.2.36>

SOUZA, G. V. A. de; PEREIRA, M. F. V. MATOPIBA: a Inteligência Territorial Estratégica (ITE) e a regionalização como ferramenta. **Rev. NERA**, Presidente Prudente, v. 22, n. 47, p. 22-45. 2019. DOI: <https://doi.org/10.47946/rnera.v0i47.6264>

SPERANDIO, H. V.; CAMPANHARO, W. A.; CECÍLIO, R. A.; NAPPO, M. E. Zoneamento agroecológico para espécies de eucalipto no Estado do Espírito Santo. **Caminhos de Geografia**, v. 11, p. 203–216, 2010.

THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **The Geographical Review**, v. 38, p. 55-94, 1948.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. Water balance. **Publication in Climatology**, v. 8, n. 8, n.1, p. 1–104, 1955.

VICTORIA, D. de C.; SANTIAGO, A. V.; BALLESTER, M. V. R.; PEREIRA, A. R.; VICTORIA, R. L.; RICHEY, J. E. Water balance for the Ji-Paraná river basin, western Amazon, using a simple method through geographical information systems and remote sensing. **Earth Interactions**, Madison, v.11, n.5, p. 1-21, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1175/EI198.1>.