

POTENCIAL DE EXPANSÃO DO BIODIESEL DE PINHÃO-MANSO NA AMÉRICA DO SUL: Zoneamento Ecológico nos Cenários De Mudanças Climáticas

Pedro Antonio Lorençone¹

João Antonio Lorençone²

Guilherme Botega Torsoni³

Rafael Fausto de Lima⁴

Lucas Eduardo de Oliveira Aparecido⁵

Energia Renováveis e possibilidades de aplicação

Resumo

O presente estudo foi desenvolvido com o objetivo de verificar a futura expansão do cultivo de pinhão-manso na América do Sul em cenários futuros, e os possíveis impacto das mudanças climáticas. Para isso, foram utilizadas as condições climáticas do período histórico 1991-2020, e dos cenários futuros 2021-2100, com os quatro cenários socioeconômicos do IPCC SSP126, SSP245, SSP370, SSP585 e RCP8.5. As variações de temperatura e precipitação foram avaliadas a fim de identificar os locais de máximo potencial de cultivo ao longo do tempo. No presente, 36,65% do território sul-americano são considerados com aptidão para o cultivo da espécie, com destaque ao Brasil com 60,15%. No entanto, cenários mais adversos, como o SSP585, apontam severas reduções de áreas, com 9,54% da América do Sul apta entre 2081-2100, e 12,97% para o Brasil. Chile e Suriname encontram deficiência térmica, enquanto Argentina e Uruguai apresentam grande risco de geada, comprometendo regiões ao sul desses países. Bolívia e Venezuela, sobretudo, apresentam altas temperaturas e excesso de água. Tal redução demonstra a necessidade de expansão do cultivo adaptativo, com linhagens mais tolerantes e práticas mais resilientes as novas condições.

Palavras-chave: Zoneamento climático, Pinhão-manso, Mudanças climáticas. Adaptação agrícola, Biodiesel.

¹Aluno do Curso de graduação em agronomia, Instituto Federal de Mato Grosso do Sul – Departamento de Agrometeorologia, pedro.lorencone@estudante.ifms.edu.br

²Aluno da graduação em agronomia, Instituto Federal de Mato Grosso do Sul – Departamento de Agrometeorologia, joao.lorencone@estudante.ifms.edu.br

³Prof. Dr. Instituto Federal de Mato Grosso do Sul – Departamento de Agrometeorologia, guilherme.torsoni@ifms.edu.br

⁴Mestrando em produção vegetal pela Universidade Estadual Paulista - Jaboticabal, departamento de agrometeorologia, rafael.lima@unesp.br

⁵Prof. Dr. Instituto Federal do Sul de Minas – Departamento de Agrometeorologia, lucas.aparecido@muz.ifsuldeminas.edu.br

REALIZAÇÃO



INTRODUÇÃO

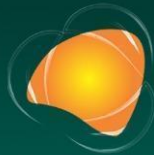
O pinhão manso (*Jatropha curcas* L.) uma planta que vem ganhando destaque como uma fonte renovável de energia (ACHTEN et al., 2007; RUATPUIA et al., 2023). Essa atenção se deve especialmente ao seu potencial como matéria-prima não comestível, de baixo custo e de fácil manejo, tornando-a uma opção promissora no setor de biocombustíveis (JASPAL et al., 2023; PATIL; GUDE; DENG, 2009).

A produção de biocombustíveis a partir de recursos não alimentícios, como o pinhão-manso, é considerada ideal por ser um recurso renovável com alta produtividade e cultivo mínimo, sem competir com o mercado alimentício (AHMED et al., 2021). Além disso, a interdependência entre a produção de energia, alimentos e água, conhecida como nexos Food, Energy, Water (FEW), destaca que o uso de um recurso implica no consumo dos outros dois (ZHANG et al., 2019). A Agência Internacional de Energia (IEA) estima que a bioenergia poderá reduzir 20% das emissões globais de CO₂ até 2060, reforçando a relevância dos biocombustíveis na mitigação das mudanças climáticas. (VINOOTH et al., 2020, REUMERMAN et al., 2020).

Abedin et al. (2014) observaram que o uso de misturas de biodiesel de pinhão manso resultou em uma redução significativa nas emissões de HC (hidrocarbonetos), que são compostos orgânicos emitidos devido à combustão incompleta do combustível, e de CO (monóxido de carbono).

Nesse contexto, o pinhão manso é uma planta que vem ganhando destaque como uma fonte renovável de energia (ACHTEN et al., 2007; RUATPUIA et al., 2023). Essa atenção se deve especialmente ao seu potencial como matéria-prima não comestível, de baixo custo e de fácil manejo, tornando-a uma opção promissora no setor de biocombustíveis (JASPAL et al., 2023; PATIL; GUDE; DENG, 2009). Em se tratando de uma espécie perene, a expansão de áreas produtivas com lavouras de pinhão manso representa maior segurança para a transição energética à qual as nações têm se comprometido na assinatura de tratados internacionais, bem como asseguram a intensificação sustentável de áreas agricultáveis subutilizadas, que passam a promover maior descarbonização atmosférica.

O pinhão manso é conhecido por sua robustez e capacidade de adaptação a condições climáticas



EXTREMOS CLIMÁTICOS: **IMPACTOS ATUAIS** E RISCOS FUTUROS

adversas, o que o torna uma espécie promissora para a agricultura em áreas com limitações de solo e água. A planta prefere climas quentes, com temperaturas médias anuais variando entre 23,4°C e 26,2°C (HAMMER; HELLER, 1998; MAES et al., 2009).

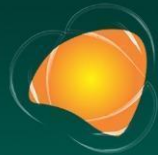
Quanto à precipitação, *Jatropha curcas L.* se desenvolve bem com precipitação anual entre 1207 mm a 2001 mm (ACHTEN et al., 2007; FRANCIS; EDINGER; BECKER, 2005; MAES et al., 2009). Essa planta é relativamente tolerante à seca, podendo sobreviver em condições de baixa umidade, mas para produção de sementes em larga escala, é necessário um suprimento de água adequado.

No entanto, as mudanças climáticas globais previstas para as próximas décadas ameaçam alterar as condições ambientais de maneira que pode impactar a viabilidade agrônômica e econômica do cultivo do pinhão manso. Assim, o zoneamento climático torna-se uma ferramenta essencial para a gestão sustentável desta cultura, permitindo a identificação de regiões onde o cultivo possa expandir sob diferentes cenários climáticos.

O objetivo deste projeto é realizar um zoneamento ecológico e climático detalhado para o cultivo de pinhão manso (*Jatropha curcas L.*) nos países da América do Sul, considerando os cenários projetados de mudanças climáticas globais. O estudo busca identificar as regiões que serão mais adequadas para o cultivo da espécie nas próximas décadas, assim como as áreas que poderão se tornar menos favoráveis devido às variações climáticas. Para tanto, utilizamos dados climáticos históricos e projeções futuras fornecidas pelos modelos climáticos do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), incluindo diferentes cenários de emissões (SSP-1 2.6, SSP-2 4.5, SSP-3 7.0 e SSP-5 8.5) para os períodos de 2021 a 2100.

METODOLOGIA

O estudo foi conduzido abrangendo o território sul-americano, com uma extensão de aproximadamente 17,8 milhões de km², englobando 12 países: Argentina, Bolívia, Brasil, Chile, Colômbia, Equador, Guiana, Paraguai, Peru, Suriname, Uruguai, Venezuela. De acordo com a classificação climática de Köppen (1948), a América do Sul apresenta uma variedade de tipos climáticos, desde climas equatoriais úmidos na região amazônica até climas desérticos e semiáridos em



EXTREMOS CLIMÁTICOS: **IMPACTOS ATUAIS** E RISCOS FUTUROS

áreas do litoral do Pacífico e do interior do continente, sendo a zona tropical "A" predominante.

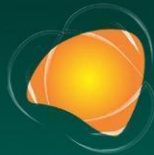
Os dados de temperatura média do ar (T_{mean}) e precipitação acumulada anual (Prec) para os cenários atuais e futuros foram obtidos da plataforma WorldClim versão 2.1 (FICK; HIJMANS, 2017), usando as normais climatológicas mais recentes (1991-2020). Esses dados foram fornecidos em formato GeoTiff (.tif) com uma resolução espacial de 30 segundos ($\sim 1 \text{ km}^2$).

Foram utilizados quatro cenários SSP (Shared Socioeconomic Pathways) disponíveis na plataforma WorldClim para quatro períodos futuros (2021-2040, 2041-2060, 2061-2080 e 2081-2100): SSP-1 2.6, SSP-2 4.5, SSP-3 7.0 e SSP-5 8.5 (RIAHI et al., 2017). Os cenários SSP são calculados com base no nível de forçamento radiativo, variando desde o cenário otimista de $2,6 \text{ W/m}^2$ até o pessimista de $8,5 \text{ W/m}^2$, associados a diferentes trajetórias socioeconômicas e de mitigação das emissões de gases de efeito estufa (Kriegler et al., 2017; Van Vuuren et al., 2011). O modelo climático global escolhido foi o IPSL-CM6A-LR, pertencente à fase seis do Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) (LURTON et al., 2020).

A chave de classificação climática para *Jatropha curcas L.* foi desenvolvida com base em pesquisas sobre condições climáticas ótimas para seu crescimento, segundo Yamada e Sentelhas (2014) (Tabela 1).

Tabela 1. Chave de classificação climática para *Jatropha curcas L.* usando os principais elementos climáticos.

Classificação	Descrição	Unidade
	<i>Temperatura média T_m</i>	(°C)
Adequado		23-27
Marginal	Deficiência térmica	15 – 22,9
Marginal	Alta temperatura	26,9 - 28
Inadequado	Risco de geada	<15
Inadequado	Excesso térmico	>28,1
	<i>Déficit hídrico (WD)</i>	<i>mm ano⁻¹</i>
Adequado		≤360
Marginal	Deficiência hídrica	361-720



EXTREMOS CLIMÁTICOS: IMPACTOS ATUAIS E RISCOS FUTUROS

Inadequado	Deficiência hídrica	>721
<i>Excedente hídrico (WS)</i>		<i>mm ano⁻¹</i>
Adequado		≤1200
Marginal	Excesso hídrico	1201 - 2400
Inadequado	Excesso hídrico	>2401

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 1 é apresentada a variação de temperatura entre o cenário atual e o cenário SSP-5 8.5 para os períodos 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080 e 2081-2100. Pode-se observar que para o período entre 2021-2040 a projeção é de que a temperatura se eleve entre 1 e 2 °C em todo o território sul-americano, exceto uma pequena faixa ao Sul do Peru que deve apresentar maior variação (2-3 °C) e algumas áreas da Argentina e Chile que devem experimentar uma variação menor que 1oC (Figura 3A). No intervalo entre 2041-2060 projeta-se uma variação maior de temperatura (2-3 °C) exceto na região litorânea próxima ao oceano Atlântico e parte do território da Argentina, Chile e Uruguai que deve apresentar variação entre 1 e 2 °C (Figura 1).

Da mesma forma, para o período de 2061-2080 verifica-se tendência de aumento entre 3 e 4 °C em relação à temperatura média atual, exceto na região litorânea próxima ao oceano Atlântico e parte do território da Argentina, Chile e Uruguai que devem apresentar variação um pouco menor (Figura 3C). Por fim, no intervalo de 2081 a 2100 há previsão de variações ainda maiores de temperatura com estas se elevando entre 4 e 5°C para a maior parte do território sul-americano. No norte da região amazônica, por exemplo, há tendência de aumentos ainda mais significativos de temperatura (5-6 °C).

Na região Centro-Oeste e Sudeste do Brasil, Paraguai e parte da Bolívia e Sul da Argentina a tendência é a redução da precipitação entre 0 e 50 mm (Figura 1). No intervalo entre 2041-2060, espera-se maiores variações na precipitação, inclusive com algumas regiões ao Norte do Brasil, Guiana Francesa, Suriname e parte da Guiana e Venezuela apresentando até 250 mm de redução de chuvas (Figura 1). Da mesma forma, para o período de 2061-2080 verifica-se alterações ainda mais acentuadas dos padrões de chuva, com extensas áreas ao Norte do Brasil, Guiana Francesa, Suriname, Guiana e Venezuela apresentando reduções de mais de 250 mm do volume de chuva. Por outro lado, regiões da



EXTREMOS CLIMÁTICOS: **IMPACTOS ATUAIS** E RISCOS FUTUROS

Amazônia apresentam tendência ao aumento de mais de 250 mm de chuva neste período (Figura 1).

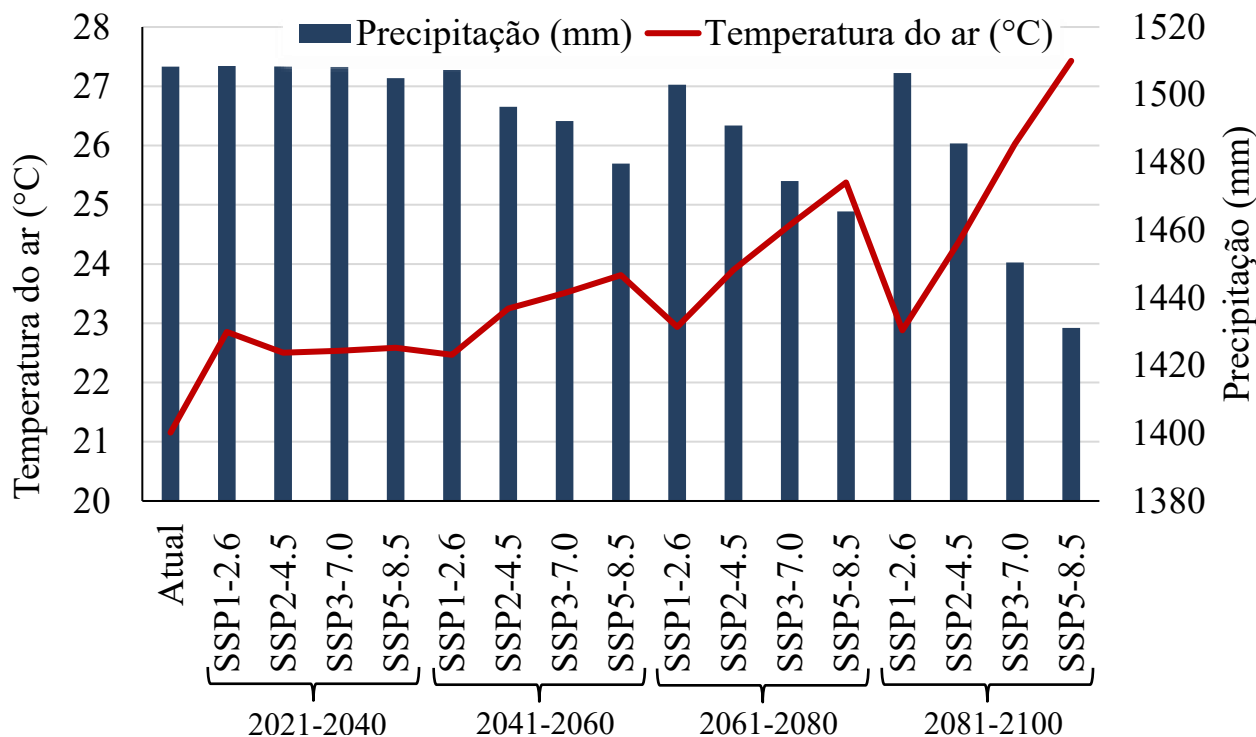


Figura 1. Variação climática nos possíveis cenários de mudanças climáticas para América do Sul.

De forma geral, 36,65% do território sul-americano foi classificado como adequado (SUI) para a cultura de pinhão-manso (Figura 2). O país com maior extensão territorial apta foi o Brasil, com 60,15% de áreas apropriadas. A diferença entre as áreas territoriais adequadas (SUI) do Brasil e outros países indica um potencial elevado de expansão desta cultura no país. De outro modo, países como Chile e Suriname apresentaram 0,00% de área adequadas (SUI), e, portanto, grande parte de seu território marginalizado por deficiência térmica (MTD), com respectivamente 91,36% e 99,84%.

Deve-se assim, considerar a presença do fator temperatura, sendo assim um grande limitante nessas localidades. O risco de geadas, em sua média, está presente em 12,43% das áreas territoriais sul-americanas. A Argentina foi o país que registrou o índice mais alto, com 51,79% de sua área podendo ser atingida, restringido a viabilidade da densidade de áreas mais ao sul, as quais possuem temperaturas



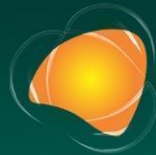
EXTREMOS CLIMÁTICOS: **IMPACTOS ATUAIS** E RISCOS FUTUROS

mais brandas.

A Bolívia apresenta uma proporção relevante de áreas adequadas (SUI), 27,39% alocadas, contudo, uma grande proporção de território marginalizado pela deficiência térmica, 34,12% e pelo excesso de água, 7,24%. Dessa maneira, nota-se a existência de uma variação extremamente significativa de fatores climatológicos dentro de um mesmo país, possibilitando ainda assim que regiões possam ser consideradas para a implementação desta cultura.

O Brasil tem um grande potencial para a produção de biodiesel a partir do pinhão-mansão, uma planta adaptada ao clima e amplamente cultivável no território nacional. Com 60,15% do território brasileiro, aproximadamente 5,1 milhões de km², considerados aptos para o cultivo dessa planta, a capacidade produtiva de biodiesel poderia ser imensa. Utilizando uma produtividade média de 2.000 litros de biodiesel por hectare, (PORTELA et al., (2011), o Brasil teria o potencial de produzir mais de 10 bilhões de litros de biodiesel anualmente. Esse volume ultrapassaria o consumo anual de diesel no Brasil, que é, em média, 6 bilhões de litros por ano (BORBA et al., 2017).

REALIZAÇÃO



EXTREMOS CLIMÁTICOS: IMPACTOS ATUAIS E RISCOS FUTUROS

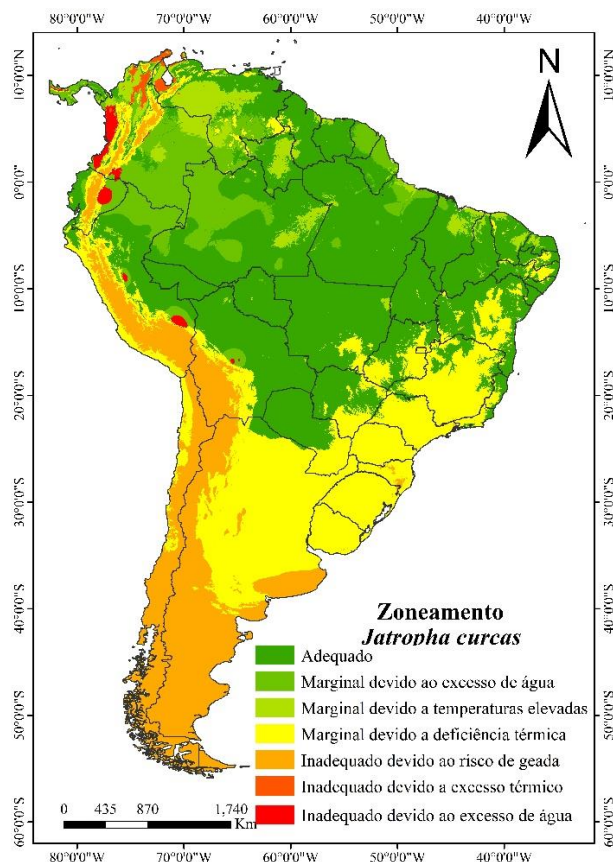
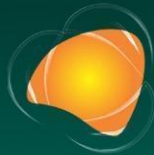


Figura 2. Zoneamento climático de *Jatropha curcas* L. no período atual para a América do Sul.

Os cenários futuros do cultivo de pinhão-mansão apontam para grandes variações nas áreas adequadas e marginalizadas ao longo do tempo e em diferentes trajetórias de desenvolvimento socioeconômico (SSP) (Figura 3). No cenário SSP126, entre 2021 e 2040, 19,56% do território sul-americano é considerado adequado, em que o Brasil representa 52,40%. Por outro lado, o Chile e o Uruguai detêm quase totalidade de marginalizadas por deficiência térmica (MTD), em 94,29% e 100%, respectivamente.

Para o cenário SSP245, entre 2021 e 2040, a adequação reduz para 16,08% da América do Sul, onde o Brasil é responsável por 33,16%, enquanto o Uruguai mantém 100% de sua área marginalizadas por MTD. No cenário SSP370, entre 2021 e 2040, ainda existem 19,81% de território sul-americano adequado, e mais uma vez o Brasil é responsável pela maior parte, 42,33% de área. Em contrapartida,



EXTREMOS CLIMÁTICOS: **IMPACTOS ATUAIS** E RISCOS FUTUROS

o Chile ainda é o país sul-americano com a maior parte de território marginalizadas por MTD, com 21,07%.

No cenário SSP585, de 2021 a 2040, a área adequada cai 13,26% em toda a América do Sul, com o Brasil respondendo por 41,98%, enquanto Chile e Uruguai seguem com a maior parte de seus territórios marginalizadas. Nos cenários mais adiantados, como SSP370, entre 2081 – 2100, há uma grande diminuição na adequação, em que apenas 9,15% do território é adequado para o cultivo de pinhão-manso. O Brasil possui uma parcela de 12,62%, evidenciando uma grande redução. No caso mais severo, SSP585, entre 2081-2100, a situação também é gradativa, havendo apenas 9,54% da América do Sul adequada e o Brasil representando 12,97%.

Observando os cenários mais avançados, como SSP370, percebe-se um declínio de adequação que chega a 9,15% do território. Ou seja, o país passa a ter apenas pouco mais de 9% de seu espaço adequado para o cultivo da planta. No SSP585, o índice fica ainda pior, e apenas 9,54% do território sul-americano passa a ser adequado, tendo sido o Brasil reduzido para 12,97% de adequação.

Para o intervalo SSP126, o cenário 2081-2100, a Argentina enfrentou 47,43% de UFR. No caso dos riscos de geadas, essa característica limitante para o crescimento das variedades de cultivo foi extremamente limitante. Sob o contexto SSP245, 2081-2100, o Peru apresentou 24,85% de território UTE, e a Venezuela representou condições de 24,42% de RF, ou seja, prompt para produção, porém ainda muito impactado pelos extremos climáticos.

Com o passar do tempo, o caso do SSP585 também 2081-2100, o zoneamento foi capaz de identificar uma dinâmica desfavorável para o Chile, que classificava 85,74% do território térmico deficiente, ficando o Uruguai com 77,22% de marginalização. Em geral, esses resultados apontam para um cenário de vulnerabilidade dos países ao sul, indicando a necessidade de estratégias de adaptação climática para a produção sustentável de pinhão-manso nas próximas décadas.



EXTREMOS CLIMÁTICOS: IMPACTOS ATUAIS E RISCOS FUTUROS

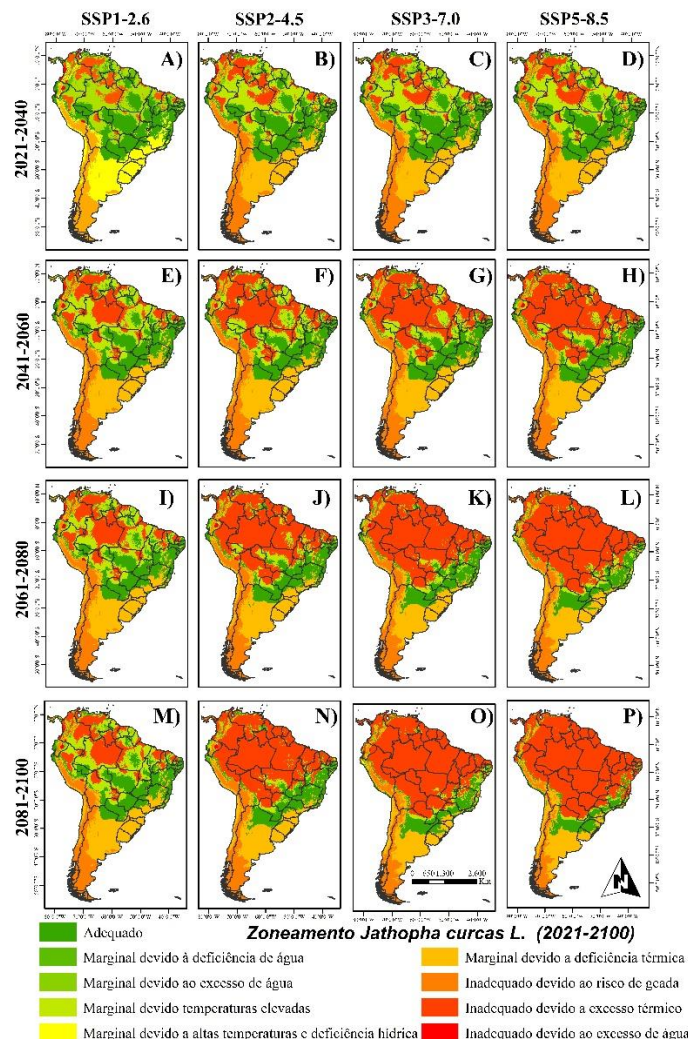


Figura 3. Zoneamento de *Jatropha curcas* L. para a América do Sul nos períodos climáticos futuros 2021-2100, para os cenários futuros.

CONCLUSÕES

Os resultados deste estudo apontam para um cenário desafiador para o cultivo do pinhão-mansão na América do Sul. As projeções indicam que o cultivo de pinhão-mansão na América do Sul terá um declínio de adequação em extensão. O Brasil continua sendo o país com maior potencial para a expansão da cultura, cobrindo até 60% de seu território no cenário atual, mas essa porcentagem cai para cerca de 13% nos cenários mais severos até 2100.



EXTREMOS CLIMÁTICOS: **IMPACTOS ATUAIS** E RISCOS FUTUROS

Argentina e Uruguai são adversamente afetados pelo risco de geadas, e a província de San Juan na Argentina muitas vezes experimenta déficit hídrico. Em geral, grande parte do território dos dois países se torna inadequada. Chile e Suriname apresentam quase a totalidade de seus territórios marginalizados por deficiência térmica, indicando que as temperaturas são um fator limitante nessas regiões.

Bolívia e Venezuela têm áreas adequadas; no entanto, essas áreas também sofrem extremos climáticos, como alta temperatura e excesso de água. Esses resultados indicam a necessidade de ter em mente medidas de adaptação e mitigação, como o desenvolvimento de novas variedades de culturas e práticas de manejo adaptativo.

A presença das alterações climáticas também destaca a necessidade de procedimentos de adaptação e abrandamento que sustentem o desenvolvimento continuamente no futuro modo de vida produtivo do pinhão do manso. Visto que a própria cultura pode contribuir para a redução das mudanças climática por meio do biodiesel de pinhão-manso, oferece uma alternativa sustentável aos combustíveis fósseis, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa, como uma fonte renovável de energia

REFERÊNCIAS

ABEDIN, M. J. et al. Performance, emissions, and heat losses of palm and jatropha biodiesel blends in a diesel engine. *Industrial crops and products*, v. 59, p. 96–104, 2014.

ACHTEN, W. M. et al. Jatropha biodiesel fueling sustainability? *Biofuels, Bioproducts and Biorefining: Innovation for a sustainable economy*, v. 1, n. 4, p. 283–291, 2007.

AHMED, S. et al. Systematic review on effects of bioenergy from edible versus inedible feedstocks on food security. *npj Science of Food*, v. 5, n. 1, 2021

BORBA, B. S. M. C. et al. Diesel imports dependence in Brazil: A demand decomposition analysis. *Energy strategy reviews*, v. 18, p. 63–72, 2017.

FICK, S. E.; HIJMANS, R. J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, v. 37, n. 12, p. 4302–4315, out. 2017.



EXTREMOS CLIMÁTICOS: **IMPACTOS ATUAIS** E RISCOS FUTUROS

FRANCIS, G.; EDINGER, R.; BECKER, K. A concept for simultaneous wasteland reclamation, fuel production, and socio-economic development in degraded areas in India: Need, potential and perspectives of *Jatropha* plantations. *Natural resources forum. Anais...Wiley Online Library*, 2005.

HAMMER, K.; HELLER, J. Promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops. *Schriften Genet Resour*, v. 8, p. 223–227, 1998.

JASPAL, N. et al. *Jatropha curcas* L.: A sustainable resource for biofuel feedstock with medicinal and commercial attributes. *Journal of Innovative Agriculture*, v. 10, n. 3, p. 1–13, 2023.

LURTON, T. et al. Implementation of the CMIP6 Forcing Data in the IPSL-CM6A-LR Model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, v. 12, n. 4, abr. 2020.

MAES, W. H. A. et al. Climatic growing conditions of *Jatropha curcas* L. *Biomass and bioenergy*, v. 33, n. 10, p. 1481–1485, 2009.

PATIL, P. D.; GUDE, V. G.; DENG, S. Biodiesel production from *Jatropha curcas*, waste cooking, and *Camelina sativa* oils. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 48, n. 24, p. 10850–10856, 2009.

PORTELA, F. M. et al. Assessing the potential of producing methylic biodiesel from *Jatropha* oil. 2011.

REUMERMAN, P. et al. Bioenergy Retrofits For Europe ' S Industry -The Biofit Project. n. June 2019, 2020.

RIAHI, K. et al. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, v. 42, p. 153–168, jan. 2017.

RUATPUIA, J. V. L. et al. Green biodiesel production from *Jatropha curcas* oil using a carbon-based solid acid catalyst: A process optimization study. *Renewable Energy*, v. 206, p. 597–608, abr. 2023.

VINOTH K; DEVARAJ, A.; SUBRAMANI, K. Produção de biodiesel usando *Jatropha*: O combustível para o futuro. **Int. J. Energia Ambiental** 2020 41, 289–295. (*Jatropha curcas* L.)

WU, J.; ZHANG, J. Research and Development of Natural Vegetable Insulating Oil Based on *Jatropha curcas* Seed Oil. *Energies*, v. 13, n. 17, p. 4319, 20 ago. 2020.

YAMADA, E. S.; SENTELHAS, P. C. Agro-climatic zoning of *Jatropha curcas* as a subside for crop planning and implementation in Brazil. *International journal of biometeorology*, v. 58, p. 1995–2010, 2014.

ZHANG, P. et al. Food-energy-water (FEW) nexus for urban sustainability: A comprehensive review. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 142, n. December 2018, p. 215–224, 2019.

REALIZAÇÃO