

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

**Proposição de indicadores de vulnerabilidade para o plantio de Teca (*Tectona grandis* L.f.): clima presente e futuro.**

Fernanda Caroline de Oliveira Santos<sup>1</sup> (IC), Fabrina Bolzan Martins (PQ)<sup>1</sup>

Universidade Federal de Itajubá

**Palavras-chave:** Indicadores de risco. Mudanças climáticas. Pragas e doenças florestais. Manejo florestal

**Introdução**

A crescente demanda por madeira de alto valor tem impulsionado a expansão de plantios florestais rentáveis no Brasil. Nesse sentido, a teca (*Tectona grandis* L.f) se destaca como uma alternativa estratégica. Sua madeira possui características superiores, como densidade entre 0,44 e 0,82 g/cm<sup>3</sup>, excelente resistência mecânica e durabilidade (Souza, et.al 2016).

No entanto, a teca também está sujeita a riscos climáticos e suscetibilidades, como estresses por temperatura, deficiência hídrica (Matos, 2018), doenças e pragas como a lagarta-da-teca (*Hyblaea puera*), que pode reduzir em até 44% o volume de madeira comercializável (Ferreira et al., 2008).

Dada a inexistência de estudos sobre os riscos climáticos da teca no Brasil, este trabalho propõe 14 indicadores de risco para analisar as vulnerabilidades do plantio em Minas Gerais e recomendar medidas de adaptação.

**Metodologia**

Para alimentar os indicadores de risco, foram utilizados dados diários de temperatura mínima (Tasmin, °C) média (Tas, °C) e máxima (Tasmax, °C) do ar, umidade relativa (Hurs, %), precipitação (Pr, mm dia<sup>-1</sup>) e radiação solar global (Rsds, MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>) provenientes de 16 Modelos de Circulação Geral (MCGs) do NASA *Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections* (NEX-GDDP-CMIP6) (ACCESS-CM2, ACCESS-ESM1-5, CanESM5, CMCC-ESM2, EC-Earth3, EC-Earth3-Veg-LR, GFDL-ESM4, INM-CM4-8, INM-CM5-0, IPSL-CM6A-LR, MIROC6, MPI-ESM1-2-HR, MPI-ESM1-2-LR, MRI-ESM2-0, NorESM2-LM e NorESM2-MM) com resolução espacial de 0,25° x 0,25° (latitude e longitude). Todos os indicadores foram simulados para o clima presente (CP, 1995-2014) e projetados para o futuro próximo (FP, 2041-2060) e futuro distante (FD, 2081-2100) em dois cenários socioeconômicos: SSP3-7.0 e SSP5-8.5.

**Tabela 1.** Faixas bioclimáticas dos indicadores de risco para teca.

Sigla	Nome comum/científico	Faixas bioclimáticas	Referências
-------	-----------------------	----------------------	-------------

IH	Estresse por requerimento hídrico	$P_{anual} \leq 1200$ mm ano <sup>-1</sup>	Reis; Oliveira e Santos (2023)
IDH	Estresse por deficiência hídrica	$DEF_{anual} \geq 402$ mm ano <sup>-1</sup>	Reis; Oliveira e Santos (2023)
ITB	Estresse por temperaturas basais	$Tas \leq 22$ °C ou $Tas \geq 27$ °C	Reis; Oliveira e Santos (2023)
ITasmax	Estresse por temperatura máxima	$Tasmax \geq 43$ °C	Ferreira et al. (2008)
Igeada	Estresse por geada	$Tasmin \leq 4$ °C	Lima (2011)
IQP	Quebra de produtividade por estresse hídrico	Entre 0 e 1, obtido a partir da equação 2	Rao, et al. (1988)
IPhyb	Lagarta da teca <i>Hyblaea puera</i>	$24$ °C $\leq Tas \leq 28$ °C $Hurs \geq 75$ %	Dhobe et al. (2014)
IPxyl	Broca da madeira <i>Xyleborus affinis</i>	$21$ °C $\leq Tas \leq 30$ °C $Hurs \geq 75$ %	Rojano et al. (2021)
IPcop	Cupim-de-cerne <i>Coptotermes testaceus</i>	$15$ °C $\leq Tas \leq 25$ °C $Hurs \geq 75$ %	Pozo-Santiago et al. (2020)
IPmac	Cochonilha rosada <i>Maconellicoccus hirsutus</i>	$27$ °C $\leq Tas \leq 32$ °C $Hurs \geq 75$ %	Chong; Roda; Mannion (2008)
IPnez	Percevejo verde <i>Nezara viridula</i>	$20$ °C $\leq Tas \leq 26$ °C $Hurs \geq 75$ %	Hirose; Panizzi; Cattelan (2006)
IDcer	Murcha de <i>Ceratocystis fimbriata</i>	$24$ °C $\leq Tas \leq 27$ °C $Hurs \geq 75$ %	Stahr e Quesada-Ocampo (2020)
IDlas	Cranco da Teca <i>Lasiodiplodia theobromae</i>	$27$ °C $\leq Tas \leq 35$ °C $Hurs \geq 75$ %	Venkatesh et al. (2023)
IDoli	Ferrugem da Teca <i>Olivea tectonae</i>	$24$ °C $\leq Tas \leq 30$ °C $Hurs \geq 75$ %	Sales et al. (2017)

O balanço hídrico sequencial da cultura (BHS) foi obtido pelo método de Thornthwaite e Mather (1955), utilizando como entradas: precipitação acumulada (Pr, mm mês<sup>-1</sup>), evapotranspiração da cultura (ETc, mm mês<sup>-1</sup>) e capacidade de água disponível no solo (CAD).

**“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”**

A evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) foi estimada pelo método de Turc (1961) representado pela equação 1:

$$ET_o = (0.3107 \times R_{sds} + 0.65) * \frac{T_{as} \times a_t}{T_{as} + 15} \quad (1)$$

Em que: R<sub>sds</sub> = radiação solar global (MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>); T<sub>as</sub> = temperatura média (°C); a<sub>t</sub> = fator de ajuste calculado com base na umidade relativa do ar média (adimensional); assumindo a<sub>t</sub> = 1 quando Hurs ≥ 50%, ou at = 1 + (50 – Hurs) / 70 para valores inferiores a 50%.

A evapotranspiração da cultura (ET<sub>c</sub>) foi calculada multiplicando-se a ET<sub>o</sub> pelo coeficiente de cultura (K<sub>c</sub>) da teca (1,2, adimensional) (Attarod et al., 2006).

A capacidade de água disponível no solo (CAD) foi obtida pelo produto entre o comprimento radicular da teca (Z<sub>r</sub> = 390 cm) (Stone; Kalisz, 1991) e a capacidade de retenção de água do solo (CRAS, mm cm<sup>-1</sup>). Os valores de CRAS foram extraídos do banco de dados GLDAS-2 da Nasa. As classes texturais foram agrupadas em: argilosos (1,52 mm cm<sup>-1</sup>), francos (0,97 mm cm<sup>-1</sup>) e arenosos (0,60 mm cm<sup>-1</sup>).

O indicador de quebra de produtividade por estresse hídrico (I<sub>qp</sub>) representa a redução da produtividade de uma cultura devido à escassez de água no solo (Dias et al., 2024) expresso por:

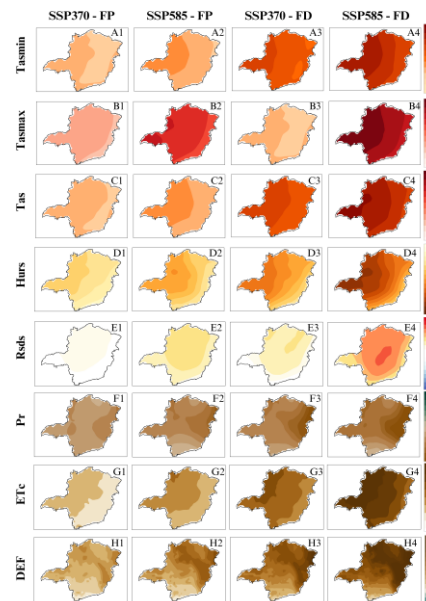
$$IQP = \prod_{i=1}^n \left[ 1 - K_y * \left( 1 - \frac{E_{tr}}{ET_c} \right) \right] \quad (2)$$

Em que: IQP = indicador de quebra de produtividade (adimensional), K<sub>y</sub> = coeficiente de sensibilidade ao estresse hídrico específico para a teca (K<sub>y</sub> = 1,1, adimensional) (Matos, 2018), E<sub>tr</sub> = Evapotranspiração real mensal (mm mês<sup>-1</sup>) e ET<sub>c</sub> = evapotranspiração da cultura mensal (mm mês<sup>-1</sup>).

### Resultados e discussão

A figura 1 mostra o padrão espacial de mudanças nas variáveis Tasmin, Tas, Tasmx, R<sub>sds</sub>, Pr, Hurs, ET<sub>c</sub> e deficiência hídrica anual (DEF) para o FP e FD nos dois SSPs (3-7.0 e 5-8.5). São projetados aumentos na temperatura do ar (Tasmin, Tas e Tasmx) em Minas Gerais entre 0,5 e 2,5 °C no FP (Fig. 1A1, A2, B1, B2, C1, C2) e entre 2,5 e 5,5 °C no FD (Fig. 1A3, A4, B3, B4, C3, C4). De maneira geral, os maiores aumentos são localizados na porção central e no oeste do estado. Os padrões de mudanças para Hurs são similares aos de temperatura, porém com sinais opostos (de redução) variando de -0,5 % -4,5 % no FP (Fig. 1M e N) e -1% até -7% no FD (Fig. 1O e P).

Quanto a R<sub>sds</sub> projeta-se um aumento principalmente na porção centro-norte, variando no FP de 0,1 a 0,4 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> (Fig. 1E1 e E2) e no FD de 0,1 a 0,8 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> (Fig. 1E4 e E5). Observam-se diminuições na Pr entre -25 a -150 mm ano<sup>-1</sup> no FP (Fig. 1F1 e F2) e no FD (Fig. 1F3 e XF4), principalmente na parte leste.



**Figura 1.** Padrão climatológico espacial de projeções de mudanças (futuro projetado – clima presente) nas variáveis Tasmin, (°C) (Fig.2 A1-A4), Tasmx, (°C) (Fig.2 B1-B4), Tas, (°C) (Fig.2 C1-C4), Hurs (%) (Fig.2 D1-D4), R<sub>sds</sub> (MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>) (Fig.2 E1-E4), Pr (mm ano<sup>-1</sup>) (Fig.2 F1-F4), ET<sub>c</sub> (mm ano<sup>-1</sup>) (Fig.2 G1-G4) e DEF (mm ano<sup>-1</sup>) (Fig.2 H1-H4).

Todas as figuras foram feitas utilizando a média dos 16 MCGs do NEX-GDDP.

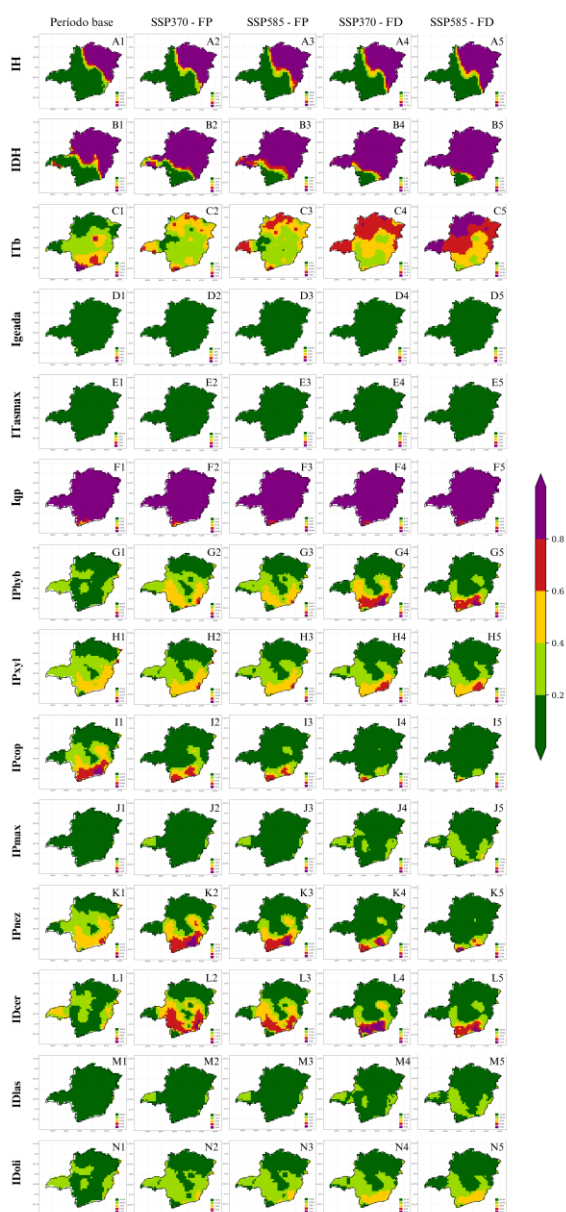
Além disso, há incrementos na ET<sub>c</sub> de até 125 mm ano<sup>-1</sup> no FP (Fig.1G1 e G2) e até 200 mm ano<sup>-1</sup> no FD (Fig.1G3 e G4), ambos mais intensos no cenário SSP5-8.5. Com relação a DEF nota-se que no FP há um aumento até 175 mm ano<sup>-1</sup> (Fig.1H1 e H2) e até 300 mm ano<sup>-1</sup> no FD (Fig.1H3 e H4) com áreas mais intensas no centro-norte e no centro-leste.

A Figura 2 apresenta o padrão espacial dos 14 indicadores de risco utilizados neste estudo para o CP, FP e FD no SSP3-7.0 e SSP5-8.5. No CP os indicadores climáticos que mais afetam a teca são (em ordem de severidade): I<sub>qp</sub> (Fig. 3F1) com risco muito alto em ~98 % do estado, IDH (Fig.3B1) (~60%), IH (Fig. 3A1) (~33%), ambos apresentando riscos menores na porção sul do estado. Já para os indicadores de pragas e doenças são (em ordem de severidade): IP<sub>cop</sub> (Fig. 3I1), IP<sub>nez</sub> (Fig. 3K1) e IP<sub>xyl</sub> (Fig. 3H1) em ~28%, ~27% e ~22% de risco moderado a alto no estado, respectivamente.

Em contrapartida, os indicadores I<sub>geada</sub> e IT<sub>asmx</sub> apresentaram risco baixo ou muito baixo (IN ≤ 0,4) em quase toda a área de estudo (~99% da área) no CP, FP e FD em ambos os SSPs (3-7.0 e 5-8.5).

Ao longo do século XXI, as projeções indicam um aumento dos riscos climáticos, principalmente para I<sub>qp</sub>, IDH, IP<sub>hyb</sub> e ID<sub>cer</sub>, isso se dá devido ao aumento da temperatura (até 5,5°C) e redução da umidade (até -7%).

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”



**Figura 2.** Distribuição espacial dos indicadores de riscos normalizados para *T. grandis*

Para IPhyb e IDcer será ligeiramente intensificado em magnitude e área, principalmente no sul de Minas, variando de ~1% (risco alto) (FP e SSP3-7.0) (Fig. 3G2) para ~12% (risco alto a muito alto) (FD e SSP3-7.0) (Fig. 3G3) para IPhyb e de ~0,2% (risco muito alto) (FP e SSP5-8.5) (Fig. 3L3) a ~7% (risco muito alto) (FD e SSP3-7.0) (Fig. 3L4) para IDcer. Por outro lado, indicadores como o IPcop tendem a ter seus riscos reduzidos de ~8% (risco moderado a alto) (FP e SSP5-8.5) (Fig. 3I3) para ~1% (risco moderado) (FD e SSP5-8.5) (Fig. 3I5).

O Iqp apresenta variações de ~1% do PB para FD e SSP5-8.5, já o IDH apresenta um aumento de ~64% (PB)

de risco alto a muito alto para ~90% (FD e SSP5-8.5) risco alto a muito alto. A combinação de altos riscos de Iqp em ~99% (Fig. 3F5) do estado e IDH em ~90% (Fig. 3D5) ambos no FD e SSP-5.85 pode tornar quase todo o território de Minas Gerais inadequado para o plantio de teca, com exceção uma pequena parte do sul de Minas.

Para minimizar os riscos climáticos para o cultivo da teca em Minas Gerais ao longo do século XXI serão necessárias medidas de adaptação. A subsolagem profunda e o uso de cobertura morta no solo serão duas estratégias necessárias para melhorar o crescimento radicular e a manter a temperatura do solo em níveis adequados ao desenvolvimento radicular (Rahmawati et al., 2022). Também será necessária intensificar a irrigação com 2L/planta, valor que se apresentou eficiente para sobrevivência das mudas em viveiros e no campo (Ramamamy, et. al., 2021).

Como a praga IPhyb e a doença IDcer serão intensificadas no FP e FD (em área e magnitude) será necessário controlar a lagarta-da-teca e a murcha de *Ceratocystis*. Com relação a lagarta-da-teca deve-se adotar: i) seleção de clones de teca que exibem resistência por não-preferência, como PT-26 e 45 de Seoni Rukhar, ou seja, escolher clones que evitam a busca por alimento, oviposição ou abrigo por parte dos insetos (Rohoudhry, 2022); ii) uso de extratos botânicos, como *Azimate tracantha* em uma concentração de 1,0%, para propriedades anti-alimentação, ocasionando 79-99% de mortalidade da larva da lagarta. (Venkatesh et al., 2023); iii) controle químico com aplicação de espinosade na concentração de 1250 ppm já que possui 100% de mortalidade larval (Venkatesh et al., 2023);

Com relação a murcha causada por *C. fimbriata*, deverão ser adotadas as seguintes estratégias: i) controle cultural com o uso de mudas certificadas, descarte correto de material infectado e esterilização de ferramentas com hipoclorito para reduzir contaminações de um inóculo para outro (Venkatesh et al., 2023); ii) controle químico com fungicidas sistêmicos como Carbendazim e flutriafol nos estágios iniciais da infecção (Herrera et al., 2025; Venkatesh et al., 2023); iii) biocontrole com agentes bacterianos, como *Bacillus amyloliquefaciens*, que possui 100% de inibição da incidência da doença, podendo ser um substituto alternativo para os fungicidas sintéticos (Herrera et al., 2025).

### Conclusões

O maior risco às plantações de Teca no período presente e futuro é atribuído à quebra de produtividade por deficiência hídrica (Iqp), sendo intensificado em área e magnitude (~ 99% da área com risco muito alto no FD para SSP5-8.5). Até 2100, as principais pragas para o

**“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”**

plântio da teca em Minas Gerais são a lagarta-da-teca e a murcha de *C. fimbriata*, que apresentam risco alto a muito alto em ~12% e ~11% da área de estudo (FD e SSP3-7.0), respectivamente, principalmente no sul de Minas.

Para mitigar os riscos, são necessárias estratégias de manejo, como o manejo silvicultural, que deve incluir a subsolagem profunda, e a irrigação por gotejamento para mudas de teca. Para o controle de pragas e doenças, será necessário aprimorar as estratégias de controle à IPHyb e IDcer.

### Agradecimentos

À Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) pelo apoio institucional. À minha orientadora, Fabrina Bolzan, e ao coorientador Rafael Xavier. E ao programa PIBIC-UNIFEI pelo financiamento.

### Referências

ATTAROD, P. et.al. Estimation of Crop Coefficients and Evapotranspiration by Meteorological Parameters in a Rain-fed Paddy Rice Field, Cassava and Teak Plantations in Thailand. **Journal of Agricultural Meteorology**, v. 62, n. 3, p. 93 2006.

CHONG, J.-H.; RODA, A. L.; MANNION, C. M. Life history of the mealybug, *Maconellicoccus hirsutus* (Hemiptera: Pseudococcidae), at constant temperatures. **Environmental Entomology**, v. 37, n. 2, p. 323-332, 2008.

DHOBE, S.; NAIK, Kumud V. et.al. Relationship between activity of major defoliators of teak and weather parameters under Konkan conditions of Maharashtra State, Indian. **Journal of Entomology and Zoology Studies**, v. 2, n. 6, p. 26–30, 2014.

FERREIRA, R. A. et al. Entomofauna observada na cultura da teca (*Tectona grandis* L.f), no campo. **Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal**, Garça, ano VII, n. 12, ago. 2008.

HERRERA-BALANDRANO, D. et.al. Methods for control of soil-borne pathogen *Ceratocystis fimbriata* on sweet potato: A mini review. **Pedosphere**, [S. l.], v. 35, n. 1, p. 151–160, 2025.

HIROSE, E. et.a. Effect of relative humidity on emergence and on dispersal and regrouping of first instar *Nezara viridula* (L.)(Hemiptera: Pentatomidae). **Neotropical Entomology**, v. 35, p. 757-761, 2006.

LIMA, I. L. de; GARCIA, R.; LONGUI, E. L.; FLORSHEIM, S. M. B. Dimensões anatômicas da madeira de *Tectona grandis* Linn. em função do espaçamento e da posição radial do tronco. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 89, p. 61-68, mar. 2011.

MATOS, F. S. Crescimento de plantas de *Tectona grandis* sob restrição hídrica. **Agrarian**, v.11, n.39, p. 14-21,2018

POZO-SANTIAGO, C. O. et al. Survival of *Coptotermes testaceus* (Isoptera: Rhinotermitidae) to environmental conditions (relative humidity and temperature) and preference to different substrates. **Sociobiology**, v. 67, n. 3, p. 425–432, 2020. DOI: 10.13102/sociobiology.v67i3.5141.

RAHMAWATI, R. B. et al. Effect of spacing on growth, carbon sequestration, and wood quality of 8-year-old clonal teak plantation for sustainable forest teak management in Java monsoon forest, Indonesia. **Biodiversitas**, v. 23, n. 8, p. 4180–4188, 2022. DOI: 10.13057/biodiv/d230840.

RAMASAMY, Y.; GALEANO, E.; Win, T. T. (Ed.). **The Teak Genome**. Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2021. (Compendium of Plant Genomes). ISBN: 978-3-030-79310-4. ISBN (eBook): 978-3-030-79311-1. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-79311-1>.

REIS, C. A. F.; DE OLIVEIRA, E. B.; SANTOS, A. M. Teca (*Tectona grandis* L. f.) no Brasil. 2023.

ROHOUDHRY, N.; CHOURASIA, M.; MISHRA, R. K. Field screening for non-preference resistance in some teak clones of Madhya Pradesh to key insect pests. **Journal of Tropical Forestry**, v. 38, n. 1-2, p. 34, 2022.

ROJANO, F. el. al. Modeling the impact of temperature on the population abundance of the ambrosia beetle *Xyleborus affinis* (Curculionidae: Scolytinae) under laboratory-reared conditions. **Journal of Thermal Biology**, v. 101, p. 103001, maio 2021.

SALES, N. I. S. et. al. Progresso temporal da ferrugem da teca em uma área tropical do estado do Tocantins, Brasil. **Acta Amazonica**, v. 47, n. 3, p. 277-280, 2017.

SOUZA, W. B. de. et.al Variação da cor da madeira de teca em função da densidade e do teor de extrativos. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 23, n. 1, 2016.

STAHR, M.; QUESADA-OCAMPO, L. M. Assessing the role of temperature, inoculum density, and wounding on disease progression of the fungal pathogen *Ceratocystis fimbriata* causing black rot in sweetpotato. **Plant disease**, v. 104, n. 3, p. 930-937, 2020.

STONE, E. L.; KALISZ, P. J. On the maximum extent of tree roots. **Forest Ecology and Management**, v. 46, p. 59–102, 1991.

VENKATESH, Y. N. et.al .Diseases and insect pests challenge to meet wood production demand of *Tectona grandis* (L.), a high-value tropical tree species. **Journal of Plant Diseases and Protection - New Series**, v. 130, n. 5, p. 1–17, maio 2023. DOI: 10.1007/s41348-023-00758-0.