

*Revista Brasileira de Meteorologia*

**IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO ZONEAMENTO  
ECOLÓGICO DAS ESPÉCIES FLORESTAIS**  
**IMPACTS OF CLIMATE CHANGE ON ECOLOGICAL ZONING  
OF FOREST SPECIES**

Rosana Clara Victoria Higa<sup>1</sup>  
Giampaolo Queiroz Pellegrino<sup>2</sup>  
Marcos Silveira Wrege<sup>3</sup>

#### RESUMO

A maioria da comunidade científica suporta a evidência que o clima está mudando e que decisões devem ser tomadas para minimizar os possíveis impactos negativos no setor produtivo de base florestal e na conservação de nossa biodiversidade. A vulnerabilidade de espécies arbóreas é um assunto complexo e envolve diferentes áreas do conhecimento. Este trabalho aborda alguns aspectos relacionados com o uso de projeções do clima futuro.

**Palavras chave:** clima, vulnerabilidade, impacto, diversidade genética

#### SUMMARY

The majority of the scientific community agrees that climate is changing and, more importantly, decisions should be taken to minimize possible negative impacts on the productive sector and conservation of our forest biodiversity. Tree species vulnerability is a complex issue and involves different areas of knowledge. This paper addresses some aspects related to the projected future climate.

**Key words:** climate, vulnerability, impact, genetic diversity.

#### INTRODUÇÃO

A análise da série histórica dos registros meteorológicos sugere que o clima da Terra está mudando rapidamente. O aumento da temperatura global também tem sido medido indiretamente, através de análises de núcleos de gelo. Globalmente, a superfície da Terra aqueceu-se cerca de 0,7 °C desde o início de 1900 (STERN, 2006). Os cientistas têm relacionado estas mudanças com o aumento dos gases de efeito estufa resultantes de atividades humanas principalmente após a revolução industrial.

Independentemente das incertezas em relação às alterações climáticas levantadas esporadicamente na mídia, algumas decisões não podem esperar. Embora muitos estudos recentes sobre a adaptação das florestas às alterações climáticas mostrem resultados promissores, poucos têm documentado evidências de estratégias de adaptação bem-sucedidas.

<sup>1</sup> Eng. Agrônoma Dra. Embrapa Florestas

<sup>2</sup> Eng. Florestal Dr. Embrapa Informática Agropecuária

<sup>3</sup> Eng. Agrônomo Dr. Embrapa Florestas

Outros aspectos que têm sido alvos de muitas discussões são as causas dessas mudanças climáticas e a capacidade de mitigação das florestas, especialmente aquela ligada ao lado comercial de venda de crédito de carbono. Esses assuntos ocuparam muito espaço dentro do tema mudanças climáticas, em detrimento de outros, como por exemplo, o efeito dessas mudanças nas florestas naturais e nas plantações florestais. Isso porque, o clima é, sem dúvida, o principal fator determinante da adaptação e crescimento das árvores. Assim, ações imediatas são necessárias para prevenir ou minimizar possíveis impactos negativos, tanto nas nossas reservas de biodiversidade constituídas pelas florestas naturais, como para as plantações florestais que são as principais responsáveis pelo suprimento da madeira industrial no país.

## **FLORESTA E CLIMA**

A variação genética do crescimento e características adaptativas de espécies arbóreas é, geralmente, resultante da adaptação das plantas aos ambientes locais e do fluxo gênico originado de populações vizinhas.

Hamrick (2004) cita que as espécies arbóreas têm capacidade para suportar mudanças ambientais. Resultados de pesquisas paleoecológicas indicam que as distribuições geográficas das espécies florestais têm se expandido e contraído desde a última glaciação e, para a maioria das espécies, estes intervalos não causaram qualquer perda aparente de diversidade genética. Uma possível explicação que distingue a maioria das árvores de muitas plantas herbáceas é que, grande parte da variação genética de espécies arbóreas é encontrada dentro e não entre as suas populações.

Assim, a extinção de uma proporção relativamente grande de populações de uma espécie arbórea "resultaria em pouca perda de diversidade genética". Além disso, estudos filogeográficos indicam que, para algumas espécies arbóreas, a heterogeneidade do habitat (elevação, declive, umidade, etc.) dos refúgios glaciares pode ter preservado a variação genética adaptativa que, quando recombinados e expostos à seleção em ambientes recém-colonizados dão origem a adaptação atual.

No entanto, estas explicações são, em geral, válidas para populações naturais pouco antropizadas e não para plantações florestais, especialmente as plantações clonais onde a variabilidade genética é muito restrita. Mais preocupante ainda, é o fato observado no Brasil, onde as plantações florestais estão se expandindo em regiões com condições edafoclimáticas estressantes para as espécies comercialmente importantes (STAPE, 2007; LEITE, 2007; HIGA, 2007), sem considerar o tempo necessário para observar os resultados de estudos sobre os efeitos desses ambientes no desenvolvimento destas espécies para tomada de decisão (FEARNSIDE, 1999).

Alguns estudos indicam possíveis impactos do clima em florestas. Um exemplo é o trabalho desenvolvido por Booth (1996, 1990), que mostra que algumas espécies do gênero *Eucalyptus* ocupam naturalmente uma faixa limitada de temperatura e que poderão ser bastante afetadas. O autor comenta, ainda, que os limites de ocorrência natural não são necessariamente estabelecidos pelo efeito direto do clima, mas pela competição ou outros fatores

e, que provavelmente, o metabolismo das plantas C3 (incluem todas as espécies florestais) aumente com o aumento da concentração de CO<sub>2</sub>

#### FERRAMENTAS E ESTUDOS

Os possíveis efeitos das alterações climáticas em florestas vêm sendo mais estudados a partir dos anos 1980, tanto com enfoque no ecossistema como em espécies individuais. Estes estudos têm mostrado que os diferentes processos a que estão submetidos os ecossistemas florestais e as plantações florestais são sensíveis ao clima. Recentemente tem crescido o interesse em estudo sobre impactos socioeconômicos das mudanças climáticas globais, através da integração de modelos de circulação geral e exigências climáticas das espécies (FAO, 2005).

Para medidas de adaptação, no entanto, é necessário o desenvolvimento de ferramentas que auxiliem na orientação das tendências de alterações climáticas e, como as mesmas afetam o desenvolvimento de uma cultura agrícola ou florestal.

Segundo o IPCC (2007 a, 2007b), a vulnerabilidade é "o grau em que um sistema é suscetível ou incapaz de lidar com os efeitos adversos das alterações climáticas, incluindo a variabilidade climática e os extremos. A vulnerabilidade é uma função do caráter, magnitude e taxa de variação climática ao qual um sistema está exposto, sua sensibilidade e sua capacidade de adaptação". Assim, é necessário determinar quais espécies, habitats e ecossistemas serão mais vulneráveis, os aspectos da sua biologia ecológica e evolutiva, e o que é possível fazer para gerenciar essa vulnerabilidade e minimizar os impactos.

Existe uma literatura emergente sobre as características específicas da vulnerabilidade frente às mudanças climáticas, bem como uma ampla literatura sobre os fatores que geralmente influenciam a vulnerabilidade das espécies. No entanto, pouco se sabe sobre os mecanismos de adaptação ecológica ou evolutiva resultante das mudanças climáticas, embora seja cada vez mais reconhecida sua importância como uma componente essencial da avaliação da vulnerabilidade (WILLIAMS et al., 2008).

A comunidade científica mundial tem mostrado sua preocupação com o assunto. Eastaugh publicou em 2008, um relatório abordando os principais aspectos sociais, ambientais, econômicos e ecológicos dos impactos de mudanças climáticas nas florestas. Este documento chama atenção para a necessidade de estudos e projeções futuras, mesmo que esses possam apresentar lacunas e incertezas. Isto mostra que ainda existem grandes desafios na análise dos impactos de mudanças climáticas em espécies florestais.

O uso de modelos de crescimento tem aplicação limitada pela falta de conhecimentos básicos da própria floresta ou espécie (LANDSBERG, 1999; LINDNER et al., 2002). Os autores ressaltam a necessidade de estudos direcionados para aquisição de dados ou de melhoria de conhecimentos básicos ligados ao crescimento de espécies florestais, assim como na melhoria da elaboração de mapas, levantamentos e monitoramento florestal. Modelos

empíricos usados para predição são úteis para manejo florestal. No entanto, modelos baseados em processos, necessários para entendimento dos fatores de crescimento, são mais complexos, pois exigem mais informações sobre a ecofisiologia das espécies (JOHNSEN et al., 2001), em uma situação onde a disponibilidade de informações básicas de crescimento, mesmo para as espécies mais plantadas comercialmente, é escassa.

Saxeet al. (2001), chamam atenção para o fato de que a maior parte das reações químicas, incluindo processos ligados a fotossíntese, são sensíveis a temperatura. Os autores relatam que, de maneira geral, a fotossíntese aumenta com o aumento da temperatura até um ponto ótimo, mas que após este ponto, o aumento contínuo na temperatura provoca um efeito inverso. Considerando estas premissas, espera-se que um aumento na temperatura de 2 a 3 graus Celsius seja benéfico para a fotossíntese. No entanto, esse efeito pode ser negativo à medida que este aumento na temperatura possa provocar, também, um aumento no estresse hídrico em muitas regiões. Os autores ressaltam, ainda, que aspectos relacionados à química do solo, fenologia, genética, aclimatação à geadas e dormência, ainda apresentam muitas incertezas.

Estudos dessa natureza têm sido desenvolvidos com algumas espécies florestais de importância econômica e em diferentes regiões, como vários países da Europa (KELLOMAKI; LEINONEM, 2005); Austrália (JOVANOVIC; BOOTH, 2002), Estados Unidos (IVERSON; PRASAD, 2001; IVERSON et al., 2008). Estes estudos sobre estratégias de adaptação futura não devem ser apenas consideradas para avaliar os efeitos na produção, mas também para conservação de espécies e ecossistemas florestais, especialmente para espécies com área de ocorrência restrita, uma vez que os limites de áreas de conservação baseados nos conhecimentos atuais podem ser significativamente alterados no futuro (MACIVER; WHEATON, 2005; KAMALJIT; DAYANANDAN, 1998).

De acordo com Stern (2006) cerca de 15 a 40% das espécies florestais são potencialmente vulneráveis a extinção com apenas 2°C de aumento de temperatura. Isto pode significar que, por exemplo, a Floresta Amazônica poderá ser significativamente afetada com um aumento de temperatura previsto.

Deve-se notar, contudo, que a grande maioria dos estudos sobre os efeitos das mudanças climáticas globais nas espécies arbóreas tem sido realizada com árvores da zona temperada. Assim, há uma necessidade de mais estudos de longa duração, com amostragem adequada e considerando outras zonas ecológicas para possibilitar melhor entendimento do processo em uma maior variedade de condições climáticas (COWIE; FAIRWEATHER, 2007; PERCY et al. 2002).

No entanto, como já salientado anteriormente, mesmo com as incertezas decorrentes de escassez de informações sobre a dinâmica de crescimento de espécies florestais, os estudos de projeções podem ser instrumentos de grande utilidade. Apesar de nem sempre ser possível, principalmente em áreas como a Amazônia, pesquisas na área de agrometeorologia com base em séries climáticas homogeneizadas são necessários para projeções futuras com maior confiabilidade para tomadas de decisões sobre medidas estratégicas de produção e conservação florestal (PERARNAUD et al. 2005). Deve ser lembrado

que, a acurácia pode ser sempre melhorada com a inclusão de novos dados sobre o comportamento de espécies/ecossistemas em função do clima.

### **MEDIDAS DE ADAPTAÇÃO**

Recente estudo apoiado pelo Banco Mundial (SEDJO, 2010) aponta que, parte das medidas de adaptações está associada às plantações florestais. A decisão de plantar envolve considerações sobre localização, espécie, qualidade de estoque e muitos outros fatores. A mesma espécie pode ser usada para estabelecimento de plantações de curta rotação, utilizando sementes de procedências mais apropriadas, escolhidas pela sua capacidade de adaptação, produtividade e outros indicadores sócio-econômicos e ambientais. O mesmo estudo também aponta que, para o Brasil, além de ajustar o material genético (espécies/procedências/clones de híbridos) a adaptação ao aquecimento global pode envolver a realocação das plantações. Outro grande desafio é estudar a variação adaptativa relacionada com os efeitos das variáveis ambientais nas frequências alélicas ao longo do genoma (HAMAN; WANG, 2010).

O fato é que o aquecimento provavelmente permitirá maior a expansão da área com vocação florestal em áreas mais frias e, abandono de outras áreas. Além disso, o grande número de espécies de eucaliptos e possibilidades de gerar híbridos inter-específicos facilitam a adaptação das plantações florestais com finalidades produtivas. Isso demandará, no entanto, melhor conhecimento das exigências ecofisiológicas e qualidade da madeira das espécies potenciais. Assim, a escolha das espécies deve ser revista regularmente, especialmente em ambientes de transição climática. Também é importante salientar a importância da seleção cuidadosa, mesmo para as condições atuais, pois as espécies atuais podem não tolerar os estresses que poderão ser causados pelas futuras alterações climáticas (GUARIGUATA et al., 2008).

A escolha de medidas de adaptação será determinada não só pelas mudanças que ocorrem provavelmente em uma floresta, mas também a finalidade da floresta (que pode mudar em função da mudança climática), a sua história, e uma série de outros fatores. Um aspecto crítico de qualquer quadro de adaptação será garantir que os silvicultores locais tenham a flexibilidade suficiente para escolher a medida mais adequada para as suas condições (LUCIER et al., 2010).

Apesar das alterações climáticas afetarem a biologia reprodutiva das árvores, provocando, por exemplo, a redução da polinização, prejudicando assim o avanço das gerações de melhoramento genético, esse problema não deverá ser crítico para as espécies florestais. Isso porque, diferentemente das culturas agrícolas em que o produto é a semente, o produto florestal é, na maioria das vezes, a madeira. Além disso, a mudança nos locais de instalação das áreas produtoras de sementes e os avanços na genômica e biotecnologia poderão também ajudar na solução de alguns destes desafios. (ANDERSON; CHMURA, 2009).

### **DESAFIOS E PRIORIDADES**

Apesar de existir ainda grandes desafios na análise de impactos de

mudanças climáticas em espécies florestais, alguns autores, como Fearnside (1998, 1999, 2004) salientam que as alterações climáticas globais podem representar grande ameaça à indústria brasileira de base florestal, diminuindo a vantagem na produtividade alcançada no Brasil quando comparada a outros países.

Mapas das normais climáticas interpoladas foram usadas em muitas pesquisas de modelagem florestais nos últimos anos. Normais climáticas são calculadas a partir dos dados de estações meteorológicas e são definidas como a média aritmética das medições meteorológicas ao longo de três décadas consecutivas (WMO, 1989). No entanto, esses mapas devem ser usados com restrições em função da baixa densidade de estações meteorológicas em muitas regiões, principalmente nas regiões potenciais para expansão das plantações florestais nesses próximos vinte anos.

## **CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Até hoje, o setor produtivo florestal tem se beneficiado da alta produtividade das plantações florestais brasileiras. No entanto, as tendências das mudanças climáticas observadas nesse último século e as propostas das lideranças políticas, empresários, ONG's e da comunidade científica para enfrentar esses desafios, sugerem a necessidade de medidas urgentes a serem tomadas de forma integrada.

A contribuição da academia, que envolve as universidades e instituições de pesquisa governamentais e privadas, poderia, por exemplo, ser materializada na ampliação dos mecanismos que facilitassem a geração e o compartilhamento de informações e conhecimentos sobre os efeitos das mudanças climáticas nas nossas plantações florestais e na biodiversidade representada pelas nossas florestas nativas.

Questões como: quais os efeitos das mudanças climáticas na fisiologia e desenvolvimento de espécies florestais? Na fitossanidade e a produtividade das plantações florestais? Na atual distribuição das florestas naturais? Nas práticas silviculturais atualmente adotadas? Estas questões precisam ser respondidas para fundamentar ações práticas que possam contribuir para a sustentabilidade sócio-econômica e ambiental do setor florestal.

O papel das florestas como mitigadora, incluindo o seqüestro de carbono e a redução das emissões de gases de efeito estufa pode ser completamente contrário ao esperado. As emissões podem ser drasticamente aumentadas pela degradação causada por fatores abióticos adversos com as conseqüências já mencionadas e não cumprir seu papel e não atender as demandas da sociedade.

## **REFERÊNCIAS**

- ANDERSON, P. D.; CHMURA, D. J. Silvicultural approach to maintain forest health and productivity under current and future climates. *Western Forester*, p 6-8, Jan./Feb., 2009. Disponível em: [http://tafcc.forestry.oregonstate.edu/pdf/Anderson\\_Chmura\\_2009.pdf](http://tafcc.forestry.oregonstate.edu/pdf/Anderson_Chmura_2009.pdf) Acesso em 16 jun. 2009.

- BOOTH, T H. Tree selection and growth prediction. In: DIETERS, M. J. et al. Tree improvement for sustainable tropical forestry. Brisbane: Queensland Forestry Research Institute, 1996. p. 311-316.
- BOOTH T.H. et al. Niche analysis and tree species introduction. *Forest Ecology and Management*. v. 23, n. 1, p. 47-59, 1988,
- BOOTH, TH. Mapping regions climatically suitable for particular tree species at the global scale. *Forest Ecology and Management*, v. 36, n. 1, p. 47-60, 1990.
- EASTAUGH, C. Adaptations of forests to climate change: a multidisciplinary review. Viena: IUFRO, 2008. 89 p. (IUFRO occasional paper, 21).
- FAIRWEATHER, H.; COWIE, A. Climate change research priorities for NSW primary industries: discussion paper. State of New South Wales: NSW department of Primary Industry, 2007. Disponível em: <<http://www.dpLns.w.gov.au/research/topics/climate-change/discussion-paper>>. Acesso em: 18 fev. 2011.
- FAO. Adaptation of forest ecosystems and the forest sector to climate change. Rome, 2005. 87 p. (Forests and climate change working paper, 2).
- FEARNSIDE, P. M. Plantation forestry in Brazil: projection to 2050. *Biomass and Bioenergy*, v. 15, n. 6, p. A37-45, 1998.
- FEARNSIDE, P. M. Plantation forestry in Brazil: the potential impacts of climatic change. *Biomass and Bioenergy*, v. 16, n. 2, p. 91-102, 1999.
- FEARNSIDE, PM, Are climate change impacts already affecting tropical forest biomass? *Global Environmental Change*, v. 14, n. 4, p. 299-302, 2004.
- GUARIGUATA, M. R. et al. Mitigation needs adaptation: tropical forestry and climate change. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, v. 13, n. 8, p. 793-808, 2008.
- HAMANN, A.; WANG TL. Models of climatic normals for dendroecology and climate change studies in British Columbia. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 128, p. 211-221, 2005.
- HAMRICK, J. L. Response of forest trees to global environmental change. *Forest Ecology and Management*. v. 197, p. 323-335, 2004
- HIGA, A R. How to beat the Brazilians. *Opiniões*, Ribeirão Preto, p. 1-8, 2007.
- IPCC(a). Climate change 2007: the physical science bases. Switzerland: IPCC, 2007a. 184 p. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
- IPCC(b). Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability. Cambridge, UK: IPCC, 2007b. 973 p. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
- IVERSON, L.R; PRASAD, A.M. Potential changes in tree species richness and forest community types following climate change. *Ecosystems*, v. 4, p. 186-199, 2001.
- IVERSON, L.R; PRASAD, A.M.; MATHEWS, S.N.; PETERS, M. Estimating potential habitat for 134 eastern US tree species under six climate scenarios. *Forest Ecology and Management*, v. 254, p. 390-406, 2008.
- JOHNSON, K.; SAMUELSON, L.; TESKEY, R; STEVE MCNULTY, S.; FOX, T. Process Models as Tools in Forestry Research and Management. *Forest Science*, v. 47, n. 1, p. 1-8, 2001.
- JOVANOVIĆ, T; BOOTH, T. Improved species climatic profiles: MDBC Joint Venture Agroforestry Program. RIRDC Publication, n. 2/095, July, 2002.

- KAMALJIT, S.B.; DAYANANDAN, S. Global climate change and tropical Forest genetics resources. *Climate change*, v. 39, p. 473-485, 1998.
- KELLOMÄKI, S., LEINONEN, S. (Ed.) Management of European Forests Under Changing Climatic Conditions. *TiedonantojalResearch Notes*, n. 163, 2005. 427 p.
- LANDSBERG, J. J. Impacts of global change on Australian forests: modelling studies. In: HOWDEN, S. M.; GORMAN, J. T. *Impacts of global change on Australian Temperate Forests*. Canberra: CSIRO Wildlife and Ecology, 1999. (Working paper series, 99/08).
- LANDSBERG, J.J.; WARING, R.H.A generalized model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance, and partitioning. *Forest Ecology and Management*, v. 95, p. 209-228, 1997.
- LEITE, N.B. Brasil: uma potência florestal emergente. *Opiniões, Ribeirão Preto*, p.10, 2007.
- LINDNER, M.; SOHNGEN, B.; JOYCE, L. A.; PRICE, D.T; BERNIER, P.Y.; KARJALAINEN, T. Integrated forestry assessments for climate change. *Forest Ecology and Management, Amsterdam*, v. 162, p. 117-136, 2002.
- LUCIER, A.; et al. Forest responses and vulnerabilities to recent climate change. In: SEPPÄLÄ, R.; BUCK, A.; KATILA, P. (Eds). *Adaptation of forests and people to climate change: a global assessment report* Viena: IUFRO, 2009. p. 29-52. (IUFRO World Series, v. 22).
- MACIVER, D.; WHEATON, E. Tomorrow's forests: adapting to a changing climate. *Climatic Change*, v. 70, p. 273-282, 2005.
- PERCY, K. et al. Altered performance of forest pests under atmospheres enriched by CO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub>. *Nature*, v. 420, n. 28, p. 403-407, 2002.
- PEREZ-GARCIA, J. et al. Impacts of climate change on the global forest sector. *Climatic Change*, v. 54, p. 439-461, 2002.
- PERNAUD, V. et al. Agrometeorological research and applications needed to prepare agriculture and forestry to 21st century climate change. *Climatic Change*, v. 70, p. 319-340, 2005.
- SAXE, H. et al. Tree and forest functioning in response to global warming. *New Phytologist*, v. 149, p. 369--400, 2001.
- SEDJO, R. A. *Adaptation of Forests to Climate Change Some Estimates*. Washington, DC: Resources for the future, 2010. 54 p. (Discussion papers, RFF DP, RFF DP 10-06) Disponível em: <<http://www.rff.org/documents/RFF-DP-10-06.pdf>> Acesso em: 14 maio 2010.
- STAPE, J.L. A expansão florestal no hemisfério sul. *Opiniões, Ribeirão Preto*, p.5, 2007.
- STERN, N. *The economics of climate change*. England: Cabinet Office - HM Treasury, 2006. Disponível em: <[http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/http://www.hm-treasury.gov.uk/independent\\_reviews/stern\\_review\\_economics\\_climate\\_change/stern\\_review\\_report.cfm](http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/http://www.hm-treasury.gov.uk/independent_reviews/stern_review_economics_climate_change/stern_review_report.cfm)>. Acesso em: 21 jan. 2008.
- WILLIAMS, S. E. et al. Towards an integrated framework for assessing the vulnerability of species to climate change. *PLoS Biol*, v. 6, n. 12, 2008.
- WMO. *Calculation of monthly and annual 30 year standard normals*. Geneva: WMO, 1989. (WMO. Technical document, n. 341; WCDP, n. 10).