

Impactos de mudanças do clima em plantios de eucalipto no Sul do Brasil



**Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Florestas
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**

DOCUMENTOS 349

**Impactos de mudanças do clima em plantios
de eucalipto no Sul do Brasil**

*Eduardo Delgado Assad
Josiléia Acordi Zanatta
Marcos Fernando Gluck Rachwal
Vanessa Silva Pugliero
Márcia Ribeiro Zanetti
Eduardo de Moraes Pavão
Maria Leonor Ribeiro Casimiro Lopes Assad
José Eduardo Boffino de Almeida Monteiro
Daniel de Castro Victoria
Alan Massaru Nakai
Bruno Bordron
Wilson Anderson Holler*

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Florestas

Estrada da Ribeira, km 111, Guaraituba,
Caixa Postal 319
83411-000, Colombo, PR, Brasil
Fone: (41) 3675-5600
www.embrapa.br/florestas
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações da
Embrapa Florestas

Presidente
Patrícia Póvoa de Mattos

Vice-Presidente
José Elidney Pinto Júnior

Secretária-Executiva
Elisabete Marques Oaida

Membros
Annete Bonnet
Cristiane Aparecida Fioravante Reis
Guilherme Schnell e Schühli
Krisle da Silva
Marcelo Francia Arco-Verde
Marcia Toffani Simão Soares
Marilice Cordeiro Garrastazu
Valderês Aparecida de Sousa

Supervisão editorial
José Elidney Pinto Júnior

Revisão de texto
José Elidney Pinto Júnior

Normalização bibliográfica
Francisca Rasche

Projeto gráfico da coleção
Carlos Eduardo Felice Barbeiro

Editoração eletrônica
Neide Makiko Furukawa

Foto capa
Josileia Acordi Zanatta

1ª edição

Versão digital (2021)

Todos os direitos reservados.

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte,
constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Florestas

Impactos de mudanças do clima em plantios de eucalipto no Sul do
Brasil. [recurso eletrônico] / Eduardo Delgado Assad ... [et al.]. -
Colombo : Embrapa Florestas, 2021.

80 p. : il. color. - (Documentos / Embrapa Florestas, ISSN 1980-
3958 ; 349)

Modo de acesso: World Wide Web:

<<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/item/221>>

1. *Eucalyptus*. 2. Mudança de clima. 3. Plantação florestal. 4. Solo florestal. 5. Carbono. I. Assad, Eduardo Delgado. II. Zanatta, Josiléia Acordi. III. Rachwal, Marcos Fernando Gluck. IV. Pugliero, Vanessa Silva. V. Zannetti, Marília Ribeiro. VI. Pavão, Eduardo de Moraes. VII. Assad, Maria Leonor Ribeiro Casimiro Lopes. VIII. Victoria, Daniel de Castro. IX. Nakai, Alan Massaru. X. Monteiro, José Eduardo Boffino de Almeida. XI. Bordon, Bruno. XII. Holler, Wilson Anderson. XIII. Série.

CDD (21. ed.) 634.97342

Autores

Eduardo Delgado Assad

Engenheiro-agrícola, doutor em Manejo e Ciências da Água, pesquisador da Embrapa Informática Agropecuária, Campinas, SP

Josiléia Acordi Zanatta

Engenheira-agrônoma, doutora em Ciência do Solo, pesquisadora da Embrapa Florestas, Colombo, PR

Marcos Fernando Gluck Rachwal

Engenheiro-agrônomo, doutor em Engenharia Florestal, pesquisador da Embrapa Florestas, Colombo, PR

Vanessa Silva Pugliero

Engenheira-ambiental, bolsista do CNPq, Embrapa Informática Agropecuária, Campinas, SP

Marilia Ribeiro Zannetti

Engenheira-ambiental, bolsista do CNPq, Embrapa Informática Agropecuária, Campinas, SP

Eduardo de Moraes Pavão

Engenheiro-agrônomo, bolsista do CNPq, Embrapa Informática Agropecuária, Campinas, SP

Maria Leonor Ribeiro Casimiro Lopes Assad

Engenheira-agrônoma, doutora em Ciência do Solo, professora titular aposentada da Universidade Federal de São Carlos, SP

Daniel de Castro Victoria

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciências, pesquisador da Embrapa Informática Agropecuária, Campinas, SP

Alan Massaru Nakai

Bacharel e doutor em Ciência da Computação, analista na Embrapa Informática Agropecuária, Campinas, SP

José Eduardo Boffino de Almeida Monteiro

Engenheiro-agrônomo, doutor em Agrometeorologia, pesquisador da Embrapa Informática Agropecuária, Campinas, SP

Bruno Bordron

Biólogo, doutor em Recursos Florestais, consultor do Ministério da Ciência e Tecnologia, Comunicação e Inovação (MCTIC) e da Embrapa Florestas, Colombo, PR

Wilson Anderson Holler

Engenheiro cartógrafo, mestre em Desenvolvimento Tecnologia, analista da Embrapa Florestas, Colombo, PR

Apresentação

A mudança do clima pode imprimir modificações significativas na produtividade das culturas, inclusive em plantios florestais, devido às alterações nos parâmetros climáticos. Esses impactos podem ser mais intensos em algumas regiões do país. A investigação científica baseada em dados de campo de longo prazo e a projeção de cenários são importantes ferramentas de planejamento e de tomada de decisão que podem auxiliar na redução da vulnerabilidade e dos riscos climáticos diretos no setor florestal no futuro próximo. Neste sentido, este estudo, que contou com o apoio da empresa de base florestal Klabin S.A., atenta aos cenários de mudanças no horizonte discute o comportamento climatológico de algumas regiões do Brasil, importantes polos de produção de eucalipto, e a projeção de impacto na produtividade e na capacidade de emissão/remoção de carbono das florestas de eucalipto, no cenário de mudança do clima.

O trabalho tem como destaque o uso do modelo HadGEM2-ES para projeção até 2040 em intervalos de 10 anos, da precipitação pluviométrica, da temperatura média, da evapotranspiração, da deficiência hídrica, da ocorrência de geadas e da temperatura mínima. Trata-se de um diferencial visto que outros estudos adotam intervalos maiores.

O estudo aponta os riscos climáticos e qual o impacto na produção do eucalipto na região Sul do Brasil. Entretanto, o detalhamento da investigação nos municípios de Itapetininga, Telêmaco Borba e Otacílio Costa indica variações na vulnerabilidade desses ambientes. O estudo também detalha o potencial de acúmulo de carbono da floresta de eucalipto, indicando como e em que quantidade este poderá ser afetado.

Antever as possíveis mudanças é uma forma inteligente de se preparar e até mesmo amenizar os riscos de impactos advindos das mudanças climáticas. E assim, manter o elevado potencial da região e das florestas de eucalipto em contribuir para a qualidade ambiental bem como confirmar as oportunidades do setor florestal dentro do contexto de economia verde e de descarbonização da economia.

Marcílio José Thomazini

Chefe Adjunto de Pesquisa e Desenvolvimento
Embrapa Florestas

Sumário

Introdução.....	9
Cultura de eucalipto no Brasil e principais riscos climáticos	11
Temperatura.....	12
Regime de chuvas: máxima, mínima e média	13
Evapotranspiração de referência.....	14
Disponibilidade hídrica e déficit hídrico para eucalipto.....	15
Metodologia	16
Caracterização da região estudada	17
Critérios de seleção dos dados	17
Estações selecionadas	17
Tabulação das séries e preenchimento de falhas	18
Coleta e organização dos mapas de solo	18
Padronização das indicações de solos no Zoneamento Agrícola	19
Mapeamento dos solos em função da capacidade de retenção de água.....	19
Análise dos dados de pluviometria e temperatura: presente e futuro	20
Análise e estimativa da produtividade.....	21
Resultados	25
Caracterização climática da região estudada	25
Avaliação da deficiência hídrica por tipo de solos.....	35
Análise da produtividade	36
Análise do impacto na produtividade do eucalipto, nas unidades de produção florestal da Klabin ...	39
Itapetininga (SP)	39
Telêmaco Borba (PR)	48
Otacílio Costa (SC).....	57
Acúmulo de carbono na floresta plantada com eucalipto.....	65
Carbono da biomassa vegetal	66
Carbono do solo florestal.....	70
Conclusões.....	73
Agradecimentos	74
Referências	75

Introdução

A Terra tem cerca de 4,6 bilhões de anos e a espécie *Homo sapiens* surgiu há cerca de 300 mil anos apenas (Press et al., 2008). Ao longo desses bilhões de anos, ocorreram mudanças drásticas na superfície e na atmosfera terrestre, com diversos episódios de resfriamento e aquecimento climático. No início da formação do planeta a atmosfera era densa e rica em nitrogênio, vapor d'água e dióxido de carbono (CO_2), proveniente das erupções vulcânicas e de colisões cósmicas. Atualmente, o nitrogênio é o principal gás da atmosfera (78%) e o oxigênio ocupa 21% (Marin et al., 2008). O 1% restante é ocupado por CO_2 e outros gases.

A presença de vida na Terra só se viabilizou com a formação de água no estado líquido, devida ao resfriamento do planeta e à formação da litosfera e da atmosfera. As primeiras bacias oceânicas datam de 3,6 a 3,9 bilhões de anos (Press et al., 2008). Ainda existem muitas controvérsias quanto aos seres vivos mais antigos. Para alguns cientistas, os primeiros organismos vivos eram bactérias primitivas, que apresentavam características celulares simples, tais como uma parede celular rudimentar, poucas enzimas e ausência de citocromos, e datariam de 3,5 bilhões de anos. Recentemente, cientistas descobriram minúsculos filamentos, pedaços e tubos em rochas localizadas no Canadá que teriam até 4,28 bilhões de anos. Caso a estimativa de idade desses microfósseis esteja realmente correta, o surgimento da vida teria acontecido “pouco tempo” depois da formação do planeta.

Nos bilhões de anos de vida na Terra sempre ocorreu variação na temperatura da superfície do planeta e, conseqüentemente, da atmosfera terrestre e existem evidências de que estas temperaturas estiveram em níveis bem mais elevados do que os atuais, reflexo principalmente da concentração de CO_2 . A título de exemplo, sabe-se hoje que a Terra e Vênus têm a mesma quantidade de CO_2 . Em Vênus, onde o gás prende os raios solares na atmosfera, a temperatura atinge 400 °C; na Terra o CO_2 está presente na atmosfera, no solo e nos seres vivos.

A temperatura da Terra vai continuar variando. Estudos apontam que, ao longo dos 4,6 bilhões de anos do planeta Terra, ocorreram mudanças no regime climático global que duraram de cem mil a um milhão de anos e causaram extinções em massa de muitas espécies. Outros estudos indicam que o núcleo terrestre, que tem cerca de 3.500 km de espessura e temperaturas que variam de 3.700 °C a 6.000 °C, na sua parte mais interna, está esfriando. Afinal, essa temperatura já foi da ordem de milhões de graus Celsius e alguns cientistas estimam que o esfriamento total pode chegar daqui a uns 4 bilhões de anos. Então, se o processo é geológico, por que se fala em aquecimento global e se aponta a influência do homem? Porque centenas de medições feitas apontam isto. A constatação é do Painel Intergovernamental de Mudanças do Clima (IPCC, na sigla em inglês), em seu quinto relatório lançado em setembro de 2013 pelas Nações Unidas. Segundo o IPCC (Stocker et al., 2013), o homem, com 95% de certeza, tem responsabilidade sobre o aquecimento global e este está se acelerando. As análises climáticas apontam que desde 1850 (início da era industrial) o aumento médio de temperatura foi de aproximadamente 0,9 °C, sendo que mais de 66% desse aquecimento aconteceu nos últimos 60 anos. Nas últimas três décadas esse aumento foi de 0,2 °C por década. A taxa de aumento do CO_2 também se acelerou desde que, em 1958, começou-se a acompanhar continuamente a composição da atmosfera. Esse aumento passou de 0,7 partes por milhão (ppm) ao ano para uma média de 2,2 ppm ao ano, nas últimas décadas. Em razão do aumento progressivo da concentração de gases de efeito estufa (GEE), em maio de 2013 os níveis de CO_2 atingiram 400 ppm pela primeira vez na história recente da humanidade. Dados de 25 de março de 2018, medidos pelo Observatório de Mauna Loa, no Havaí, apontam que a concentração de CO_2 era 410,16 ppm. Em 2017, o recorde foi em 26 de abril, quando a concentração de CO_2 atingiu

412,63 ppm (IPMA, 2018). Segundo o IPCC, até o fim do século XXI a concentração de CO₂ pode chegar ao dobro da atual, atingindo aproximadamente 800 ppm.

As principais causas deste aumento estão associadas ao modelo de desenvolvimento e de uso dos recursos naturais disponíveis no planeta, que provocam emissões de gases decorrentes da queima de combustíveis fósseis e às mudanças no uso do solo, como a conversão de florestas nativas em área agrícolas ou urbanas. Na prática, esse aumento que, segundo o IPCC (Stocker et al., 2013), está maior que 1 °C em alguns locais do planeta, provoca sérios impactos diretos em diversos setores como biodiversidade, agricultura, recursos hídricos e zonas costeiras. Também provoca impactos indiretos nas cidades, energia, indústria e infraestrutura, transportes e saúde. Na Figura 1 são indicados quais os possíveis impactos decorrentes de mudanças climáticas que poderão acontecer regionalmente no Brasil, até o final do século XXI.

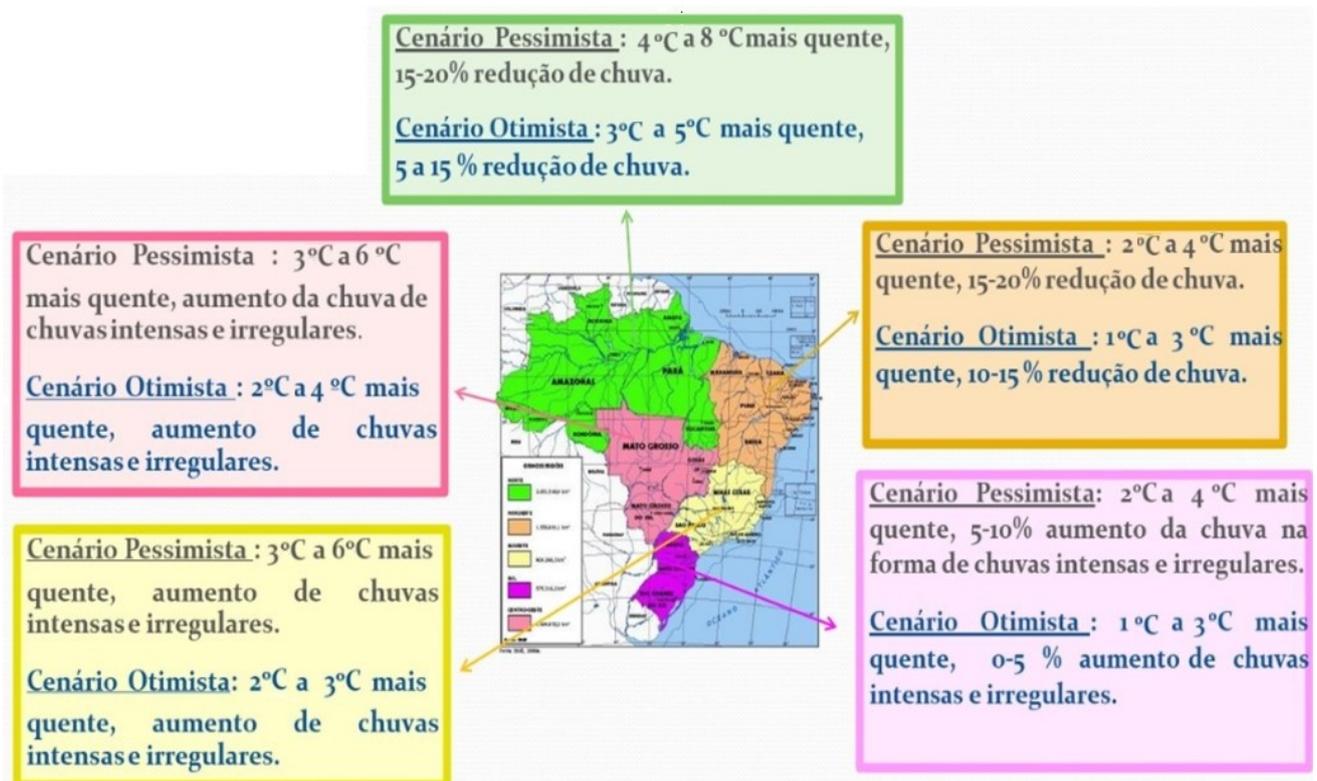


Figura 1. Cenários de clima futuro para o Brasil até o final do século XXI. Adaptado de Souza et al. (2014).

Diversas ações estão em andamento para tentar mitigar as emissões GEE. Desde 2007 o Brasil vem fazendo um esforço grande na implantação da Política Nacional sobre Mudança do Clima (Lei nº 12.187/2009) (Brasil, 2009). Foi firmado o compromisso de Copenhague em 2009, para redução de emissões, e foram criados dez planos setoriais visando, num primeiro momento, a mitigação de GEE. Houve um grande esforço de redução do desmatamento da Amazônia e, como consequência, a agricultura aparece com mais destaque nas emissões globais brasileiras. Com isso, o Brasil incentivou as práticas agrícolas e o uso de sistemas de produção integrados com baixa emissão de carbono. O Brasil tem um importante exemplo que é a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), que financia práticas como plantio direto na palha, integração lavoura-pecuária, integração lavoura-pecuária-floresta, integração floresta-pecuária, sistemas agroflorestais, florestas plantadas e fixação biológica de nitrogênio. Todos esses sistemas têm balanço positivo no fluxo de carbono,

ou seja, funcionam como sumidouros de GEE ou evitam emissões de GEE. São, portanto, importantes na mitigação dos gases de efeito estufa. Na maioria dos sistemas, o componente florestal aparece com muito destaque, como importante prática de redução de emissões de carbono.

Outro caminho é a intensificação das pesquisas genéticas. O impacto das mudanças do clima ocorre sobre os múltiplos níveis de organização biológica. Pouco se sabe, ainda, como esse impacto afeta os processos moleculares, bioquímicos e fisiológicos que determinam as respostas em uma cadeia que vai de indivíduos até ecossistemas globais. Por isso, é necessária a incorporação das ciências genômicas aos estudos ecológicos.

Em termos de adaptação, basicamente deve-se privilegiar pesquisa e desenvolvimento nos seguintes tópicos:

- Identificação de variedades mais adaptadas (resistentes/tolerantes) aos estresses abióticos decorrentes das mudanças do clima, tais como a concentração de CO₂ elevado, seca, calor, entre outras, sob condições controladas.
- Descoberta de mecanismos moleculares, bioquímicos e fisiológicos mediando respostas e adaptação a tais estresses.
- Desenvolvimento de marcadores moleculares (genéticos e bioquímicos) para seleção assistida de variedades mais adaptadas em programas de melhoramento genético.
- Descoberta de genes envolvidos em adaptação (resistência/tolerância) com valor biotecnológico.

Outros estudos mais detalhados devem ser feitos no sentido de procurar a adaptação das culturas às novas pragas e doenças que surgem com o desequilíbrio climático. Identificar, sistematizar as informações, analisar as vulnerabilidades e mapear a expansão de novas pragas e doenças são práticas que devem ser prioritárias para buscar a adaptação das culturas face ao aquecimento global.

Neste sentido, este trabalho procurou identificar, nas principais regiões do Brasil com grandes áreas de florestas plantadas, as vulnerabilidades regionais e os impactos possíveis na produtividade do eucalipto face aos cenários dos modelos climáticos. Também é feita uma avaliação do balanço de emissões para plantações de eucalipto, considerando principalmente o estoque de carbono em solo cultivado com eucalipto.

Cultura de eucalipto no Brasil e principais riscos climáticos

Segundo o relatório da Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ, 2020), o setor florestal impulsiona a economia nacional com um produto interno bruto (PIB) setorial de R\$ 86,6 bilhões, que representa 1,3% do PIB brasileiro e 6,9% do PIB industrial. Em 2019, o saldo da balança comercial alcançou o recorde de US\$ 11,4 bilhões. O mesmo relatório aponta que as mudanças do clima trazem riscos e oportunidades para a indústria de base florestal. Entre os desafios do setor estão a discussão da precificação de carbono e a consolidação de um mercado global voltado à bioeconomia. Em 2018, o estoque de CO₂ eq. do segmento somou 4,2 bilhões de toneladas.

A área total de árvores plantadas no Brasil em 2019 foi 9,0 milhões de hectares, que representam um aumento de 2,4% em relação a 2018. Os plantios de eucalipto ocuparam 6,97 milhões de hectares, enquanto as áreas com pinus somaram 1,64 milhões de hectares; outras espécies, como seringueira, acácia, teca e paricá representaram cerca de 390 mil hectares (IBÁ, 2020). Já o IBGE

(2018) indica uma área maior de eucalipto, totalizando 7,5 milhões de hectares e de 1,9 milhões de hectares de pinus. Cabe destacar que os dados do IBGE são declaratórios e abrangem plantios industriais e plantios em pequenas propriedades e médias propriedades.

Os plantios de eucalipto estão localizados principalmente nos estados de Minas Gerais (28%), São Paulo (17%) e Mato Grosso do Sul (16%) (IBÁ, 2020). Nos últimos anos, o crescimento médio da área de eucalipto foi 1,1% ao ano, com o Mato Grosso do Sul liderando esta expansão, apresentando sozinho uma taxa média anual de 7,4% de crescimento (IBÁ, 2020). Os plantios de pinus concentram-se no Paraná (44%) e em Santa Catarina (26%), seguidos do Rio Grande do Sul (17%) e São Paulo (9%) (IBÁ, 2020).

O potencial produtivo das florestas de eucalipto plantadas em regiões tropicais, especialmente no Brasil, é muito superior ao de outras regiões do globo, com poucas exceções. Essa alta competitividade do Brasil, no setor florestal, baseia-se nas condições ambientais favoráveis e na eficiência da tecnologia empregada, fruto de consistentes investimentos em pesquisa e desenvolvimento, por parte das empresas, em conjunto com as universidades e outros órgãos de pesquisa (Ribeiro et al., 2009).

O conhecimento das relações entre as condições físicas do ambiente, em especial, solo e atmosfera, e as diversas espécies cultivadas permitem a obtenção de informações mais precisas acerca da influência do tempo e do clima no crescimento, no desenvolvimento e na produtividade das culturas. De modo geral, as principais variáveis meteorológicas que afetam o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade das culturas são a precipitação pluviométrica (volume, intensidade, regime e distribuição), temperatura do ar e radiação solar (Hoogenboom, 2000), havendo ainda a influência do fotoperíodo, da umidade do ar e do solo, da velocidade e da direção do vento (Pereira et al., 2002; Mavi; Tupper, 2004).

Temperatura

As altas temperaturas observadas nos trópicos favorecem a produção de eucalipto. Durante o inverno, as plantas não entram no processo de dormência, como ocorre nas latitudes elevadas, pois raramente atingem valores médios diários abaixo da temperatura basal do eucalipto.

Na amplitude térmica em que a fotossíntese ocorre, três variáveis podem ser definidas: temperatura mínima ou basal inferior (T_{bi}), temperatura ótima (T_{ot}) e temperatura máxima ou basal superior (T_{bs}). Segundo Almeida et al. (2004), e considerando a cultura do eucalipto no norte do Espírito Santo, a temperatura ótima para fotossíntese seria de 25 °C, com limite inferior de 8 °C e limite superior de 36 °C. Silva (2006) considerou 25 °C como temperatura ótima, 8 °C como temperatura inferior, e 40 °C como superior, para produção de eucalipto na região centro-leste de Minas Gerais. Para além desses limites, deve-se considerar as temperaturas críticas inferior (T_{ci}) e superior (T_{cs}).

Em muitas espécies vegetais a temperatura crítica inferior é aquela em que ocorre o congelamento e, conseqüentemente, morte das células vegetais. Porém, o ponto de congelamento varia de acordo com a espécie, dependendo da sua capacidade de produzir proteínas anticongelamento e açúcares crioprotetores. Plantas lenhosas, em particular, possuem maior resistência ao congelamento devido a mecanismos protetores como a desidratação.

Floriani et al. (2013), avaliando o efeito da aclimação sobre a tolerância ao frio em espécies de eucalipto, observou que em mudas não aclimatadas a TL50 (temperatura letal em que ocorre 50% da mortalidade celular) foi -4,5 °C para *Eucalyptus benthamii*, -3,9 °C para *E. dunnii* e -2,0 °C para

E. grandis e *E. saligna*. Quando se pretende conhecer os impactos do aquecimento global na cultura do eucalipto, o conhecimento dos limites de temperatura mínima é importante para verificar como os eventos extremos (ondas de calor e ondas de frio) podem atingir a cultura.

Dependendo da espécie considerada, a temperatura letal crítica inferior pode ser diferente. Em análises de ocorrência de temperaturas baixas, normalmente, considera-se como referência a temperatura de relva, ou seja, a temperatura mais próxima ao solo. Ao nível do solo, ou da cultura quando se trata de culturas anuais de baixo porte, a temperatura chega a ser, geralmente, 2 °C menor que a registrada no abrigo meteorológico. Porém, isso não corresponde à realidade do eucalipto, a não ser no caso de mudas recém-plantadas, quando ainda estão pequenas e mais próximas ao nível do solo.

Segundo Dibax (2007), as árvores de eucalipto afetadas por temperaturas congelantes apresentam vários danos e, quando observadas à distância, possuem um aspecto de queima ou bronzeamento da folhagem. Higa e Higa (1997) citam que, além de danos diretos, como morte total ou parcial da copa, até a morte plena da planta, os danos indiretos que são os mais frequentes, podem não apenas restringir o potencial de crescimento das plantas, como também contribuir para a susceptibilidade à infecção por patógenos e, até mesmo, inviabilizar a formação de povoamentos comerciais de eucaliptos.

Com a expansão das áreas de plantio de eucalipto na região Sul do País, a escolha de material genético resistente à geada é um grande desafio. Higa e Higa (1997), em estudo realizado em Campo do Tenente, PR, classificou a espécie *E. dunnii* como uma das melhores do gênero, em crescimento e resistência às injúrias causadas pela geada, com desempenho similar ao de *E. viminalis* já testado nestas condições.

Nesse contexto, para a avaliação dos riscos climáticos de temperatura para o eucalipto, os limites de referência serão os especificados na Tabela 1.

Tabela 1. Temperaturas cardinais consideradas para avaliação de potencial e riscos climáticos em cultivos de *Eucalyptus grandis*, *E. urophylla* ou híbrido *urograndis*.

Tamanho da planta	Temperatura Cardinal (°C)				
	Tci	Tbi	Tot	Tbs	Tcs
Mudas e plantas novas <50 cm	0	8	25	36	40
Planta >50cm altura	-2	8	25	36	40

Nota: Tci – temperatura crítica ou letal inferior; Tbi – temperatura mínima ou basal inferior; Tot – temperatura ótima; Tbs – temperatura máxima ou basal superior; Tcs – temperatura crítica ou letal superior.

Fonte: Adaptado de Almeida et al. (2004), Silva (2006) e Floriani et al. (2013).

Regime de chuvas: máxima, mínima e média

Nos trópicos, a disponibilidade hídrica de uma região é uma das características climáticas mais importantes para o crescimento de plantas. Ao contrário dos demais elementos meteorológicos, a chuva é muito mais variável, constituindo-se no principal fator determinante da produtividade. Para eucalipto, a Tabela 2 indica os valores de referência.

Tabela 2. Valores de referência estabelecidos para a implantação de povoamentos de produção de eucalipto para as espécies *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*.

Espécie	Pluviosidade anual favorável		Evento extremo de chuva máxima diária (mm)
	Mínima (mm)	Máxima (mm)	
<i>Eucalyptus grandis</i>	1.000	1.800	100
<i>Eucalyptus urophylla</i>	1.000	1.500	100

Fonte: Adaptado de Ribeiro et al. (2009).

Tanto a falta quanto o excesso de chuvas pode ser prejudicial. O eucalipto submetido ao excesso de água, decorrente da alta pluviosidade, pode apresentar anomalias como a necrose foliar, a presença da seca de ponteiros nos galhos e na haste principal, brotações adventícias ao longo do fuste e dos galhos, lançamento de folhas com limbo afilado, deformado e com sintomas de deficiência nutricional, em árvores adultas, além de obstrução com tiloses em vasos do xilema da haste, do lenho e das raízes. A doença do ponteiro seco, por exemplo, tem sido relacionada tanto ao déficit, quanto ao excesso hídrico, indicando que existe relação entre esta doença e o regime hídrico local (Maschio et al., 2000).

A forma mais adequada de se avaliar a disponibilidade de água para um cultivo é por meio do balanço hídrico, abordagem que será adotada neste trabalho. No entanto, mesmo sem o desenvolvimento mais elaborado do balanço hídrico, é possível estabelecer alguns indicadores mais simples e diretos a partir da pluviosidade de um local.

Evapotranspiração de referência

A evapotranspiração é o processo simultâneo de transferência de água para a atmosfera por evaporação da água do solo e por transpiração das plantas. A evapotranspiração de referência (ET_o) é a quantidade de água que seria evaporada e transpirada por uma vegetação em condições padronizadas e sem restrição hídrica. Dessa forma, a ET_o é limitada apenas pelo balanço vertical de energia, ou seja, pelas condições do ambiente local (Pereira et al., 2002).

Logo, a ET_o é o valor indicativo da demanda evapotranspirativa da atmosfera em um dado local, num dado período.

Se, por um lado, a chuva constitui a fonte principal de água para as culturas agrícolas, por outro, a evapotranspiração representa o consumo ou a demanda hídrica. É a diferença entre a oferta e demanda que definirá a disponibilidade hídrica para a cultura, fator primordial na definição da produtividade.

Em áreas extensas ou em períodos passados, como em séries de dados meteorológicos, a maneira mais prática de se estimar a disponibilidade ou deficiência hídrica para uma cultura é mediante cálculo do balanço hídrico do solo.

Porém, a despeito das incertezas ou eventuais dificuldades para o levantamento de parâmetros necessários para um balanço hídrico preciso, a evapotranspiração se apresenta como um indicador muito mais simples e prático para a identificação de períodos críticos de demanda ou consumo hídrico. Em períodos críticos com ET_o já elevada ou em elevação, com ausência ou escassez de chuvas, é fundamental a existência de reserva hídrica suficiente nos solos. Em mudas jovens de eucalipto, com sistema radicular ainda pouco desenvolvido, a reserva hídrica do solo esgota-se rapidamente em condições de elevada demanda com ausência de chuvas, sendo necessário irrigação suplementar ou de “salvamento” para garantir a sobrevivência das mudas ao período adverso.

Dessa forma, a ETo é um importante indicador, simples e prático, para avaliar o impacto de mudanças do clima na demanda hídrica de um local.

Para as análises deste estudo orientado à quantificação de condições de estresse vegetal e risco de produção, no presente e em cenários futuros, serão consideradas as categorias de evapotranspiração alta e muito alta, conforme identificadas na Tabela 3.

Tabela 3. Classificação de intervalos de evapotranspiração de referência (ETP) para as análises de frequência e risco.

ETP	ETo (mm/dia)	Impacto esperado
Baixa	0 a 3	- Baixa demanda hídrica, normalmente associada a dias nublados e/ou com baixas temperaturas. Necessidades da planta são atendidas mesmo com armazenamento baixo. Não representa risco imediato.
Média	3 a 5	- Pouco ou nenhum impacto. Condições ótimas para consumo de água.
Alta	5 a 7	- Alta demanda hídrica, normalmente associada a dias ensolarados e altas temperaturas. Condição de alta demanda hídrica desfavorável para a maioria dos cultivos. O eucalipto, por ser uma espécie com excelente controle estomático, é menos afetado e terá suas necessidades de água supridas em solo com armazenamento elevado. As plantas podem apresentar sintomas de deficiência nas horas mais quentes do dia, mesmo com elevado armazenamento, principalmente mudas. Essa intensidade de ETo normalmente ocorre depois de uma sequência de vários dias sem chuva, e se intensificam à medida que a umidade do ambiente decresce e as temperaturas aumentam progressivamente. Há maior respiração com menor fotossíntese, resultando em redução ou parada temporária do crescimento. Representa condição de risco alto para mudas recém-plantadas.
Muito alta	>7	- Condição muito desfavorável para agricultura de modo geral, mesmo para as culturas mais resistentes a altas temperaturas. - Alta demanda hídrica, normalmente associada a dias ensolarados, altas temperaturas e umidades do ar muito baixas e, ou vento intenso. - O eucalipto, por ser uma espécie com excelente controle estomático, é menos afetado, perderá menos água. As suas necessidades de água não são supridas nem em solo com armazenamento elevado. As plantas apresentam evidentes sintomas de deficiência nas horas mais quentes do dia, mesmo com elevado armazenamento, principalmente mudas. Essa intensidade de ETo só ocorre depois de uma sequência de muitos dias sem chuva, resultado de um processo de agravamento à medida que a umidade do ambiente decresce e as temperaturas aumentam progressivamente. Há maior respiração com menor fotossíntese, resultando em redução ou parada temporária do crescimento. É comum ocorrer ressecamento e morte de ponteiros muito tenros em mudas jovens. Representa condição de altíssimo risco para mudas recém-plantadas.

Adaptado de Caldato et al. (2013) 507-516, e Liu et al. (2017).

Disponibilidade hídrica e déficit hídrico para eucalipto

Cerca de 80% da variabilidade da produção agrícola no mundo deve-se à variabilidade das condições meteorológicas durante o ciclo de cultivo, especialmente para as culturas de sequeiro, já que os agricultores não podem exercer nenhum controle sobre tais fenômenos naturais (Petr, 1991; Fageria, 1992; Hoogenboom, 2000; Sentelhas; Monteiro, 2009).

No Brasil, a maior parte da área agrícola está situada em regiões sujeitas a restrições hídricas mais ou menos intensas, de forma que essa é a principal causa da variabilidade da produção agrícola nacional, inclusive do eucalipto. Mesmo os efeitos deletérios diretos causados por temperatura elevadas estão, até o presente, normalmente associadas aos períodos mais longos de estiagem.

Nesse contexto, a deficiência hídrica se apresenta como o principal fator de risco para a produção do eucalipto no Brasil.

Para a caracterizar e quantificar esse risco, é necessário levar em conta algumas características do eucalipto que lhe conferem melhor adaptação a situações de restrição hídrica, especialmente em híbridos de *E. grandis* x *E. urophylla*, do que na maioria das outras espécies cultivadas.

Uma dessas características é o eficiente controle estomático (Almeida; Soares, 2003), permitindo que o eucalipto minimize perdas de água por transpiração em situações de baixa disponibilidade hídrica ou de muito alta demanda atmosférica. Carneiro (2004), em um experimento na região de Belo Oriente (MG), quantificou a necessidade hídrica de plantios jovens de eucalipto e o efeito da sazonalidade no uso da água em plantios clonais de híbridos de *E. grandis* x *E. urophylla*, irrigados e não irrigados, com dois anos de idade. Foram realizadas medições de condutância estomática no período úmido, início do período seco e no período seco, tendo sido encontrados valores médios variando de 0,41 mol m⁻² s⁻¹ a 0,22 mol m⁻² s⁻¹, para o tratamento irrigado e, de 0,38 mol m⁻² s⁻¹ a 0,24 mol m⁻² s⁻¹, para o tratamento não irrigado. Verificou-se, basicamente, que o controle estomático é dependente do produto das variáveis meteorológicas déficit de pressão de vapor e temperatura, com o inverso da irradiância solar global.

Outra característica importante é o sistema radicular que, em solos favoráveis, consegue alcançar grandes profundidades. Almeida e Soares (2003) compararam o uso de água em plantações de *E. grandis* em área de Floresta Ombrófila Densa (Mata Atlântica), e concluíram, considerando o ciclo de crescimento como sendo de sete anos, que o eucalipto pode consumir menos água que a mata nativa, na região estudada. Nos anos em que a precipitação pluviométrica se aproximou da média histórica, ocorreu equilíbrio da evapotranspiração para os dois ecossistemas. E, nos anos em que a precipitação pluviométrica foi inferior à média histórica, a mata atlântica apresentou taxas de evapotranspiração superiores àquelas do eucalipto. No entanto, esta característica em particular nem sempre se manifesta plenamente devido às limitações dos solos. Solos com impedimentos físicos ou químicos podem limitar severamente o desenvolvimento radicular em profundidades maiores.

Esses aspectos condicionam a resposta do eucalipto às situações de alta e baixa demanda evapotranspirativa, alta e baixa oferta hídrica e definem seu consumo hídrico. Sacramento Neto (2000) obteve, para plantios de um e dois anos, taxas médias de evapotranspiração real (ET_r) aproximadamente iguais 5,0 mm d⁻¹ e 1,4 mm d⁻¹, nos períodos úmidos e secos do ano, respectivamente. Neves (2000) determinou, para plantios adultos, com 10 anos de idade, ET_r aproximada de 5,7 mm d⁻¹ e 2,3 mm d⁻¹, nos períodos úmido e seco do ano, respectivamente.

Essas respostas podem ser adequadamente representadas pelo balanço hídrico, permitindo produzir indicadores objetivos de favorabilidade ou desfavorabilidade do ambiente, no presente ou em cenários futuros. Um dos indicadores mais utilizados para determinar o estado hídrico para um certo local e cultura é o déficit hídrico (DH), por ser facilmente relacionável com condições limítrofes ou críticas. Por exemplo, o déficit hídrico derivado do balanço hídrico climatológico tem sido utilizado como indicador para a escolha de materiais genéticos de eucalipto. Em regiões com DH elevado, com déficit anual entre 100 mm/ano e 200 mm/ano, recomendam-se espécies ou híbridos de média a alta tolerância à seca; em regiões com déficit entre 200 mm/ano e 400 mm/ano, consideradas de DH muito elevado, recomendam-se apenas espécies ou híbridos de alta tolerância à seca (Gonçalves, 2014).

Metodologia

O estudo está baseado no conceito de clima. O clima diz respeito às variações das condições atmosféricas ao longo de um período. Quando se refere à climatologia, especificamente quantifica-se as condições climatológicas ao longo de um período. Normais climatológicas são os valores obtidos para as condições climáticas num período mínimo de 30 anos.

Caracterização da região estudada

Considerando a distribuição dos plantios de eucalipto no Brasil e visando uma primeira avaliação de vulnerabilidade, este estudo se concentrou na região sul do Brasil abrangendo os estados do Paraná e Santa Catarina, e parte da região produtiva no estado de São Paulo.

Critérios de seleção dos dados

O período ideal de um estudo das normais climatológicas deve abranger séries de observações com, no mínimo, 30 anos de dados e que estejam atualizadas até o presente. Considerando a heterogeneidade espacial das regiões em estudo e suas diferenças em termos de disponibilidade de dados, faz mais sentido investir tempo num processo de seleção mais rigoroso que resulte em boas séries de dados, do que incluir um número grande de estações meteorológicas e ter que gerenciar complexos algoritmos de controle de qualidade e preenchimento de falhas, que pode adicionar incerteza aos resultados.

Inicialmente foram identificadas todas as estações meteorológicas localizadas na região Sul e parte da região no estado de São Paulo. Essa pré-seleção foi formada pelo conjunto das estações que apresentavam menos de 30% de falhas e duração da série temporal superior a 15 anos. Entretanto, muitas estações identificadas nas regiões não se enquadravam nesses critérios e, portanto, foram descartadas. Constatou-se que o ano completo mais recente era 2010.

Nesse sentido, para a seleção das estações meteorológicas, foi admitido uma frequência máxima de falhas de 4%. O valor de 4% foi determinado com base na distribuição espacial das estações que atendem a esse critério, pois, se esse limite fosse reduzido, o número de estações meteorológicas em algumas partes das regiões indicadas seria insuficiente. Foi realizada uma análise de consistência dos dados, eliminando-se valores discrepantes ou sequências anômalas de dados.

Foram selecionadas todas as séries de temperatura disponíveis no período de 1980 a 2010, completando, assim, as séries de 30 anos de dados. Esse conjunto de dados também passou por análise de consistência, sendo eliminados dados inconsistentes ou valores fora da faixa normal da região, ou ainda com desvios sistemáticos em relação às estações vizinhas.

Os dados de temperatura das estações meteorológicas localizadas dentro das regiões indicadas, que representam uma área com raio variando de 10 km a 13 km, foram utilizados para a reconstrução de séries nos mesmos pontos das estações pluviométricas, por meio de interpolação com correção de altitude.

Estações selecionadas

As normais climatológicas foram definidas considerando o período de 1980 a 2010. Assim, todas as estações selecionadas têm série histórica de chuva e de temperatura igual ou maior que este período, o que permitiu **definir a climatologia das regiões e caracterizar as zonas climaticamente homogêneas**, com séries, de pelo menos, 30 anos de dados completos.

Na região Sul e parte da região no estado de São Paulo, foram identificadas todas as estações pluviométricas existentes e um conjunto de estações pré-selecionadas de diversas instituições já integradas à base de dados da Agência Nacional de Águas (ANA).

Na região do estudo e no entorno, identificou-se a localização do conjunto de todas as séries de dados de temperatura disponíveis, a partir de séries de dados de satélite e estações no solo, com resolução de 0,5 x 0,5 graus de latitude. Os dados foram cedidos pelo Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project (projeto AGMIP), coordenado pelo United States Department of Agriculture (USDA), pela National Aeronautics and Space Administration (NASA) e pela Universidade de Columbia (USA). Foram selecionadas 143 estações para um total de 372 municípios.

Tabulação das séries e preenchimento de falhas

A partir da aplicação dos critérios de seleção descritos, foram selecionadas 143 estações pluviométricas, localizadas conforme indicado na Figura 2. A frequência média de falhas de dados nas estações selecionadas foi 1%. Nesses casos, o preenchimento das falhas foi feito com os valores da estação vizinha mais próxima.

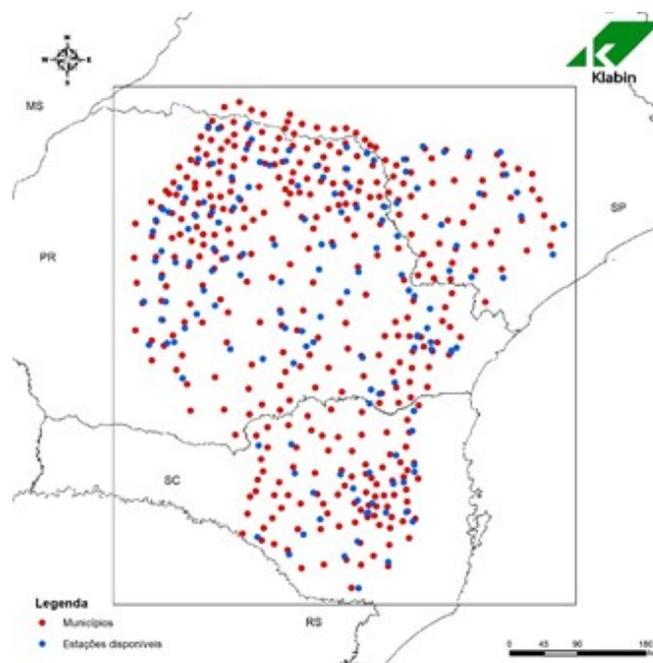


Figura 2. Conjunto de estações pluviométricas identificadas na região estudada. Os pontos em vermelho indicam a posição dos municípios e os pontos em azul indicam a posição das estações selecionadas com, pelo menos, 30 anos de dados diários.

Nos mesmos pontos das estações pluviométricas, foram geradas as séries de temperatura por interpolação e correção de altitude.

Coleta e organização dos mapas de solo

Foram identificados os mapeamentos de solos existentes, na escala de 1:250.000, seguindo o padrão estabelecido pelo Zoneamento Agroecológico da Cana de Açúcar no Brasil, publicado pela Embrapa (Manzatto et al., 2010).

Para organizar a distribuição espacial dos solos, são necessárias informações que permitam avaliar seu comportamento enquanto reservatório de água. Inúmeros atributos interferem na capacidade de armazenamento de água no solo. No entanto, é possível fazer uma razoável estimativa a partir de dados de profundidade, de teor de argila, areia e silte e da avaliação do gradiente textural. A profundidade do solo é um dado que consta nos mapeamentos de solos, desde aqueles elaborados a partir de levantamentos em pequena escala até levantamentos feitos em propriedades (grande escala). Além disso, pode ser facilmente medida no campo pelo produtor rural, por extensionistas e técnicos de diferentes formações. O gradiente textural é avaliado a partir da relação entre os teores de argila de dois horizontes ou camadas consecutivas de solos.

É importante salientar que, neste trabalho, os parâmetros de fertilidade de solos não foram utilizados porque: i) a fertilidade do solo pode ser modificada utilizando-se corretamente adubos e corretivos; ii) embora alguns atributos de fertilidade como a capacidade de troca catiônica (CTC) e o teor de matéria orgânica possam influenciar a capacidade de armazenamento de água no solo, essa influência não é considerada nos modelos de previsão da retenção de água no solo.

Padronização das indicações de solos no Zoneamento Agrícola

Considerando que a estimativa da capacidade de armazenamento de água do solo depende da profundidade do solo e de sua capacidade de reter água e considerando a necessidade de padronização de critérios por meio de atributos de fácil utilização pelos diferentes tipos de usuários das informações organizadas neste trabalho, foram adotadas as seguintes categorias de solos na avaliação do risco climático para a cultura do eucalipto:

Solos tipo 1: Englobam solos: i) cujo teor de argila é superior a 10% e inferior a 15% nos primeiros 50 cm de solo; e ii) solos com teor de argila entre 15% e 35% e com teores de areia inferiores a 70%, que apresentam variação abrupta de textura nos primeiros 50 cm de solo, isto é, que nos 50 primeiros centímetros, um horizonte ou camada de solo tem 15% ou mais de argila, em valor absoluto, do que o outro.

Solos tipo 2: Englobam solos com teor de argila entre 15% e 35% e com teores de areia inferiores a 70% nos primeiros 50 cm de solo (sem variação abrupta do teor de argila).

Solos tipo 3: Englobam: i) solos com teor de argila maior que 35% nos primeiros 50 cm de solo; e ii) solos com menos de 35% de argila e menos de 15% de areia (textura siltosa) nos primeiros 50 cm de solo.

Mapeamento dos solos em função da capacidade de retenção de água.

Aplicando a classificação por tipos de solos, o mapeamento final para os estados de São Paulo, Paraná e Santa Catarina estão ilustrados na Figura 3.

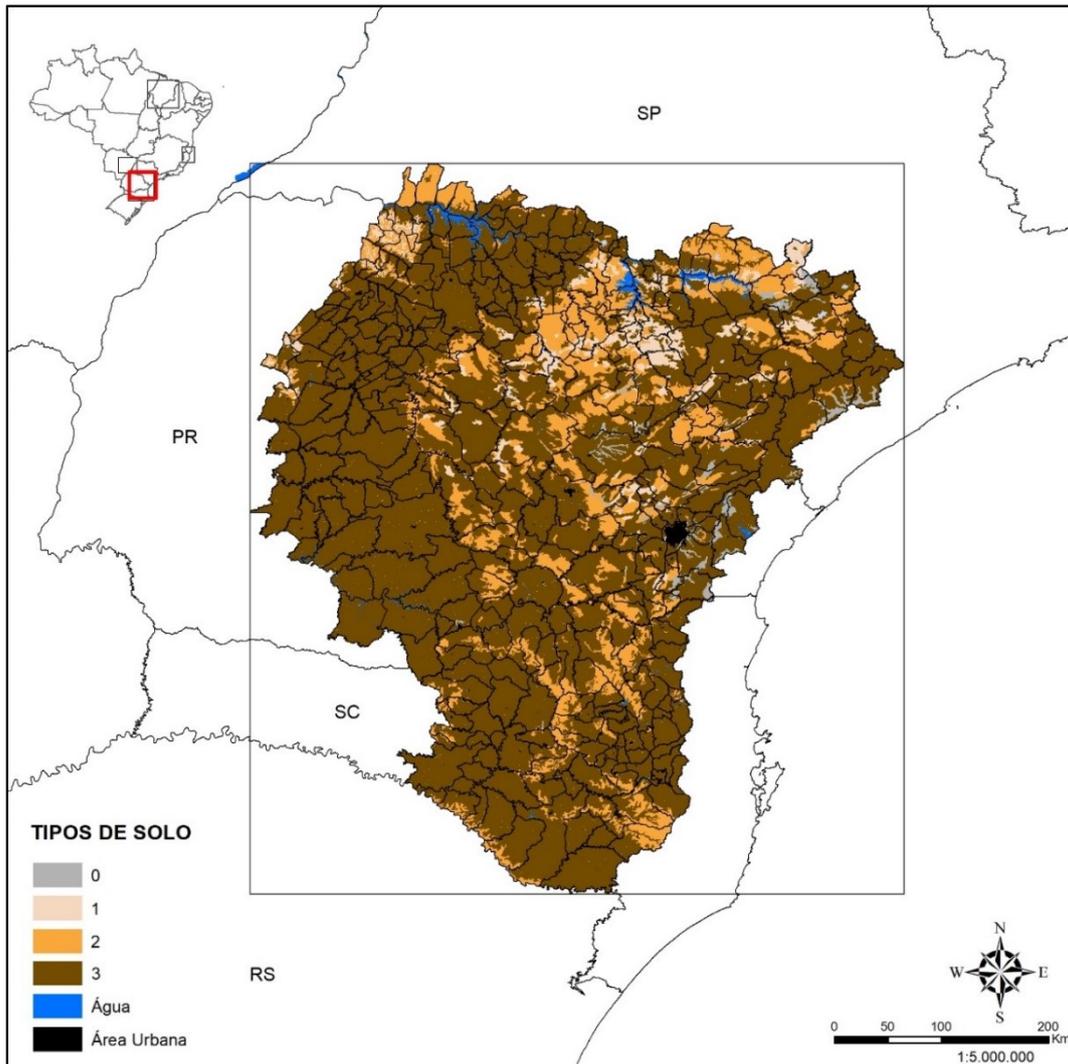


Figura 3. Mapeamento dos solos da região estudada, segundo critérios do Zoneamento Agrícola de Riscos Climáticos.

Nota: Tipos de solo - 0 = não classificado; 1 = solos cujo teor de argila é superior a 10% e inferior a 15% nos primeiros 50 cm de solo e solos com teor de argila entre 15% e 35% e com teores de areia inferiores a 70%, que apresentam variação abrupta de textura nos primeiros 50 cm de solo, isto é, que nos 50 primeiros centímetros, um horizonte ou camada de solo tem 15% ou mais de argila, em valor absoluto, do que o outro; 2 = solos com teor de argila entre 15% e 35% e com teores de areia inferiores a 70% nos primeiros 50 cm de solo; 3 = solos com teor de argila maior que 35% nos primeiros 50 cm de solo; e ii) solos com menos de 35% de argila e menos de 15% de areia (textura siltosa) nos primeiros 50 cm de solo.

Análise dos dados de pluviometria e temperatura: presente e futuro

Após as etapas de obtenção e preparação das séries de dados meteorológicos e da definição de limites críticos das principais variáveis meteorológicas para a análise de potencial e risco climático da cultura do eucalipto, esta etapa consistiu na análise dos dados de temperatura e precipitação pluviométrica no período de referência e nas projeções futuras.

Os cenários futuros utilizados neste estudo foram gerados pelo e HadGEM2-ES, RCP 8.5. O cenário RCP 8.5 é o mais extremo dentre aqueles indicados pelo IPCC (Stocker et al., 2013). Entretanto, no presente momento, e considerando o fluxo de emissões de CO₂, este é o cenário mais realista, em termos de aquecimento global. Isto porque as emissões medidas desde 2010 pelos inventários de GEE apontam valores iguais ou maiores do que os previstos nas curvas do cenário RCP 8.5 indicadas em IPCC (Stocker et al., 2013).

As séries de dados utilizados neste estudo foram geradas pelo método da aplicação dos desvios (D), conforme Assad et al. (2016), estimados pelo modelo nas diferentes janelas temporais. Foram

calculados os desvios entre o período de referência adotado pelo modelo climático e as projeções dos modelos para 2011-2020, 2021-2030 e 2031-2040. Os desvios foram aplicados às séries de dados reais, observados, para reconstrução de séries nos cenários futuros até 2040.

A técnica de aplicação dos desvios às séries observadas é utilizada a fim de manter preservada a estrutura original e a variabilidade natural das séries temporais de variáveis meteorológicas, tal qual de fato ocorrem. Isso minimiza eventuais vieses introduzidos pelos modelos na distribuição das variáveis, o que é particularmente sensível para a análise de eventos extremos.

Com o conjunto de dados finalizado foram gerados os valores de precipitação pluviométrica e temperatura para o período de referência 1981 a 2010 (normal climatológica) e para os cenários HadGEM2-ES de 2011-2020, 2021-2030 e 2031-2040. As séries temporais de cada uma das quatro regiões avaliadas (Figura 8) foram resumidas pela média ou total com agregação mensal, quadrimestral e anual.

A partir dos resultados mensais, para cada variável, foram definidos os quadrimestres de interesse em função das características da estacionalidade (verão/inverno) das áreas estudadas. Para precipitação pluviométrica, foi definido o quadrimestre mais chuvoso (Quad.+) e menos chuvoso (Quad.-) e para temperatura foram definidos os quadrimestres mais quentes (Quad.+) e menos quentes (Quad.-) ou mais frios.

A partir das séries de 30 anos de dados observados (1981-2010) foi ajustada a tendência observada por regressão linear, para os totais ou médias mensais das regiões estudadas.

Foram gerados mapas interpolados a partir da climatologia dos quadrimestres de interesse de cada variável, no período de referência e cenários climáticos projetados.

Um modelo de distribuição de frequência foi ajustado às séries temporais de temperatura mínima. Para as séries de temperatura máxima foi utilizado um modelo normal de distribuição. Os modelos ajustados foram utilizados para estimativas de ocorrência de eventos adversos de baixa e alta temperatura. Para a ocorrência de eventos extremos de chuva foi utilizada uma análise frequencial direta.

Análise e estimativa da produtividade

Na estimativa e análise da produtividade foram considerados os impactos do aquecimento global na produtividade do eucalipto, para São Paulo, Paraná e Santa Catarina. As regiões de abrangência dos municípios de Itapetininga (SP), Telêmaco Borba (PR) e Otacílio Costa (SC) foram consideradas como referência porque nelas se dispõe de séries temporais de produtividade que se estendem de 1980 a 2015. Em função disso, as séries climáticas utilizadas nas análises locais de Itapetininga (SP), Telêmaco Borba e Otacílio Costa foram estendidas até 2015.

Nessa etapa, a análise espacial foi feita considerando principalmente o índice de satisfação de necessidade de água (ISNA) do eucalipto, que é um indicador de produtividade e risco climático adotado no zoneamento agrícola de risco climático. Foi feito um estudo de impacto relativo na produtividade de madeira, utilizando como base de cálculo a produtividade de 57 m³ madeira /ha/ano.

Nas áreas de referência local, foram considerados os seguintes incrementos médios anuais (IMA) indicados pela Klabin S/A:

- Itapetininga, SP: IMA= 50 m³/ha/ano.

- Telêmaco Borba, PR: IMA = 57 m³/ha/ano.
- Otacílio Costa, SC: IMA = 37 m³/ha/ano.

Em todos os casos foram utilizadas as projeções 2010-2020, 2020-2030 e 2030-2040 para os locais, com ano base 1980-2010. Para tanto foi necessário identificar os riscos climáticos associados à produtividade do eucalipto nas áreas de Itapetininga, Telêmaco Borba e Otacílio Costa, considerando o período de 1980 a 2015.

Os principais riscos climáticos avaliados foram:

- Quantidade e frequência de seca intensa.
- Temperatura mínima (considerar geada).
- Temperatura média.
- Evapotranspiração potencial.
- Deficiência Hídrica.

A textura dos solos foi estimada de acordo com as orientações do Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC) do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Mapa). Foi gerado o mapa de textura do solo e, por meio deste, foi determinada a capacidade de água disponível (CAD) do solo para cálculo do balanço hídrico e determinação do déficit hídrico. Em seguida, gerou-se o mapa de balanço hídrico local/regional.

Após as etapas de obtenção e preparação das séries de dados meteorológicos e da definição de limites críticos das principais variáveis meteorológicas para a análise de potencial e risco climático da cultura, procedeu-se à análise dos impactos dos indicadores climáticos sobre a produtividade do eucalipto.

Devido à inexistência de séries históricas confiáveis de umidade relativa, saldo de radiação e velocidade do vento, a evapotranspiração de referência (ET_o) não pode ser estimada pelo método de Penman Monteith, considerado o mais preciso e exato e recomendado pela Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) como método preferencial (Allen et al., 1998). Dos métodos existentes que se utilizam apenas de temperatura máxima e mínima, o de Hargreaves e Samani apresenta o melhor desempenho quando calibrado para as condições locais. Assim, os dados de ET_o foram estimados a partir das temperaturas mínimas e máximas diárias, pela equação de Hargreaves e Samani (1985), com parametrização otimizada para as condições climáticas das regiões indicadas para este estudo (Eq. 1).

$$ET_o = 0,0018 * Q_o * ((T_{max} - T_{min})^{0,83}) * (T_{med}) - 0,5 \quad [\text{Equação 1}]$$

Onde:

ET_o = evapotranspiração de referência

Q_o = radiação no topo da atmosfera

T_{max} = temperatura máxima

T_{min} = temperatura mínima

T_{med} = temperatura média

A partir dos dados de evapotranspiração potencial, precipitação pluviométrica e dos parâmetros fisiológicos do eucalipto, foi calculado o balanço hídrico da cultura pelo método climatológico de Thornthwaite e Matter, que permite quantificar as variações de água no solo em função da oferta e demanda hídrica no ambiente de cultivo.

O balanço hídrico foi calculado para a condição da cultura com **dossel completamente formado**, o que ocorre a partir de 12 meses de idade. Os parâmetros de cultura necessários para o cálculo do balanço hídrico são a curva de coeficiente de cultura (K_c) ao longo do ano e a CAD, dada em função de um solo de média capacidade de armazenamento e do sistema radicular profundo do eucalipto.

Avaliando a disponibilidade e a demanda hídrica na fase inicial de desenvolvimento do eucalipto, foram determinados os seguintes valores médios): coeficiente de evaporação da água do solo (K_e) = 0,57; coeficiente basal da cultura (K_{cb}) = 0,13; e coeficiente de cultura único (K_c) = 0,70. Na fase média de desenvolvimento da cultura, os valores foram: K_e = 0,01; K_{cb} = 0,81; e K_c = 0,82 (Alves, 2013).

Em plantios com um e dois anos de idade, Sacramento Neto (2000) obteve taxas médias de evapotranspiração real (ET_r) aproximadamente iguais, sendo 5,0 mm d⁻¹ nos períodos úmidos e 1,4 mm d⁻¹ nos períodos secos do ano. Em plantios adultos com 10 anos de idade, Neves (2000) determinou ET_r aproximada de 5,7 mm d⁻¹ e 2,3 mm d⁻¹, nos períodos úmido e seco do ano, respectivamente.

Considerando os resultados acima e o eficiente controle estomático do eucalipto (Almeida; Soares, 2003), seria apropriado admitir um valor médio de K_c entre 0,8 e 0,9 para plantios de eucaliptos com dossel plenamente formado. Para o período do ano mais favorável, com crescimento ativo, adotou-se 0,9 e para os meses mais secos do ano, com crescimento reduzido, adotou-se 0,8. Para os meses de condição intermediária, adotou-se K_c igual a 0,85.

Outro parâmetro fundamental a ser estimado é a CAD considerando o tipo de solo e a profundidade do sistema radicular. Almeida e Soares (2003) avaliaram a quantidade de água disponível no solo em uma plantação de eucalipto adulto até a profundidade de 2,5 m. Nessa camada, a curva de variação de água disponível no solo raramente foi superior a 160 mm, indicando um provável referencial para a capacidade máxima de armazenamento do solo.

Apesar das raízes do eucalipto alcançarem profundidades até maiores que dois metros, a quantidade de raízes e o volume de solo explorado diminui drasticamente com a profundidade. A porosidade total do solo, a profundidade a ser aerada e o nível de consumo de oxigênio influem significativamente na porosidade de aeração mínima necessária para uma oxigenação completa de um sistema radicular (Van Lier, 2001). Assim, não se pode adotar uma correspondência direta da profundidade radicular com o volume de solo efetivamente explorado pelas raízes e, conseqüentemente, com a CAD. Apesar de alcançar maiores profundidades, o sistema radicular não cresce tão profusamente quanto na superfície e, portanto, não pode explorar todo o volume de solo. Dessa forma, em culturas de sistema radicular muito profundo, não deve ocorrer muita variação de CAD em função da textura do solo como ocorre em culturas de sistema radicular raso. Em um solo arenoso, por exemplo, o armazenamento de água é menor do que em um solo argiloso, mas a maior aeração do solo arenoso permite o desenvolvimento de um sistema radicular mais denso nas camadas profundas, diferentemente do que ocorre em um solo argiloso e menos aerado (Costello et al., 1991; Bartholomeus et al., 2008).

A profundidade viável do solo é um fator preponderante, assim como a distribuição da densidade radicular ao longo do perfil do solo. O eucalipto apresenta uma densidade radicular elevada nas camadas superficiais do solo. Por isso, a aferição das profundidades viáveis do solo, ou seja, sem

impedimentos físicos ou químicos, é fundamental para uma correta estimativa de CAD para eucalipto. Nessa cultura, para determinação da CAD, além de se considerar que 80% das raízes ativas estão situadas até 30 cm de profundidade, foi determinada a CAD para 1,5 m a 2,0 m.

Para determinar a deficiência hídrica por tipo de solo conforme a caracterização feita anteriormente, foram consideradas que as capacidades de retenção seriam:

- Solos arenosos (solos tipo 1) = 0,7 mm de água/cm de solo.
- Solos de textura média (solos tipo 2) = 0,9 mm de água/cm de solo.
- Solos argilosos (solos tipo 3) = 1,0 mm de água/cm de solo.

Estes resultados foram baseados em diversas curvas de retenção obtidas ao longo dos últimos 30 anos para a execução do Zoneamento de Riscos Climáticos do Brasil, adotado oficialmente pelo Ministério da Agricultura, nos últimos 24 anos.

A partir da distribuição radicular no perfil do solo e da densidade de raízes presente em cada camada, é possível estimar a fração útil da água armazenada para o cálculo da efetiva capacidade de água disponível (Yu et al., 2007; Besharat et al., 2010). Dessa forma, é possível ajustar um fator de ponderação para a fração útil de água no solo, em função da distribuição radicular do eucalipto na profundidade do solo. Considerou-se 100% de aproveitamento para densidade radicular acima de 0,30 g/dm³, com redução proporcional para densidades menores.

Assim, para determinação da deficiência hídrica para cada região, os balanços hídricos foram calculados com os seguintes valores para CAD:

- Solo tipo 1 = 105 mm.
- Solo tipo 2 = 135 mm.
- Solo tipo 3 = 150 mm.

A partir desses referenciais, foi possível estimar a evapotranspiração de referência (ET_o) que define a demanda atmosférica; a evapotranspiração potencial da cultura (ET_c); a evapotranspiração real da cultura (ET_r); o índice de satisfação das necessidades de água (ISNA) dado pela relação ET_r / ET_c e o déficit hídrico da cultura (DEF). Essas variáveis foram calculadas para todas as séries completas, para o período de referência 1981 a 2010, e para os cenários HAdgeM2-ES de 2011-2020, 2021-2030 e de 2031-2040. Em geral, o modelo HadGEM-ES é mais realista e capta as distribuições espaciais e sazonais, bem como a distribuição da taxa de chuva em todas as regiões da América do Sul (Yin et al., 2013), o que permite utilizar este modelo com segurança para as projeções futuras.

O déficit hídrico ocorre sempre que ET_r < ET_c e implica em fechamento estomático e redução na produção de biomassa. No cômputo do efeito da deficiência sobre a produtividade da cultura, esta pode ser determinada pela Equação 2.

$$PR = [1 - K_y (1 - ET_r / ET_o * K_c)] * PPf \quad \text{[Equação 2]}$$

Onde:

PR = produtividade real

K_y = coeficiente de ajuste

ET_r = evapotranspiração real da cultura

E_{To} = evapotranspiração de referência

K_c = coeficiente de cultura

PP_f = produtividade potencial final

O valor de K_y varia de acordo com a cultura e com sua fase fenológica. Normalmente, as fases de florescimento e de formação da produção são as mais sensíveis ao estresse hídrico. Trata-se de um coeficiente bem conhecido para culturas anuais (Doorenbos; Kassan, 1994).

Para as culturas perenes, onde a produtividade real é obtida por meio do incremento médio anual (IMA), o indicador climatológico pode ser simplificado, buscando uma relação direta entre a PP_r e o ISNA, também anual.

A partir dos resultados mensais, para cada variável, foram definidos os balanços hídricos das áreas de estudo e determinados os valores de ISNA anuais, para as regiões avaliadas.

Mapas interpolados com os valores de ISNA da região de estudo foram gerados a partir da climatologia de interesse de cada variável no período de referência e nos quatro cenários climáticos.

As séries temporais de E_{To} diário de cada local da região de estudo foram utilizadas para o cálculo de frequência de ocorrência em classes de demanda hídrica atmosférica baixa (<3 mm/dia), média (3 mm/dia a 5 mm/dia), alta (5 mm/dia a 7 mm/dia) e muito alta (>7 mm/dia), conforme descrito anteriormente. As séries temporais de ISNA anual de cada local da região de estudo foram utilizadas para o cálculo de frequência de ocorrência em classes de ISNA muito baixo a muito alto, em intervalos de dois décimos (adimensional).

Resultados

Caracterização climática da região estudada

A climatologia e as projeções do clima futuro para região de estudo analisada são apresentadas considerando as variações da pluviosidade (Figuras 4 e 5; Tabela 4), da temperatura (Figuras 6 e 7; Tabela 5), da evapotranspiração (Figura 8) e da deficiência hídrica (Figura 9). Cabe destacar que se observa, em todas as regiões, uma oscilação decadal de eventos climáticos, gerando fenômenos como El Niño e La Niña que, segundo o modelo de simulação, podem ser mais acentuados no período 2021-2030. A variação da temperatura mínima indica redução do risco de geada (temperatura < 2 graus centígrados) está indicada na Figura 10.

Os resultados obtidos para a região de estudo apontam que a pluviosidade não é um fator limitante para o crescimento do eucalipto. Na saída do modelo HadGEM2-ES para o cenário de 2021-2030, há uma indicação de redução de pluviosidade, mas que fica próxima do limite inferior do crescimento da cultura. Este fato, que se repete em todas as regiões, reflete a oscilação decadal principalmente no Oceano Pacífico.

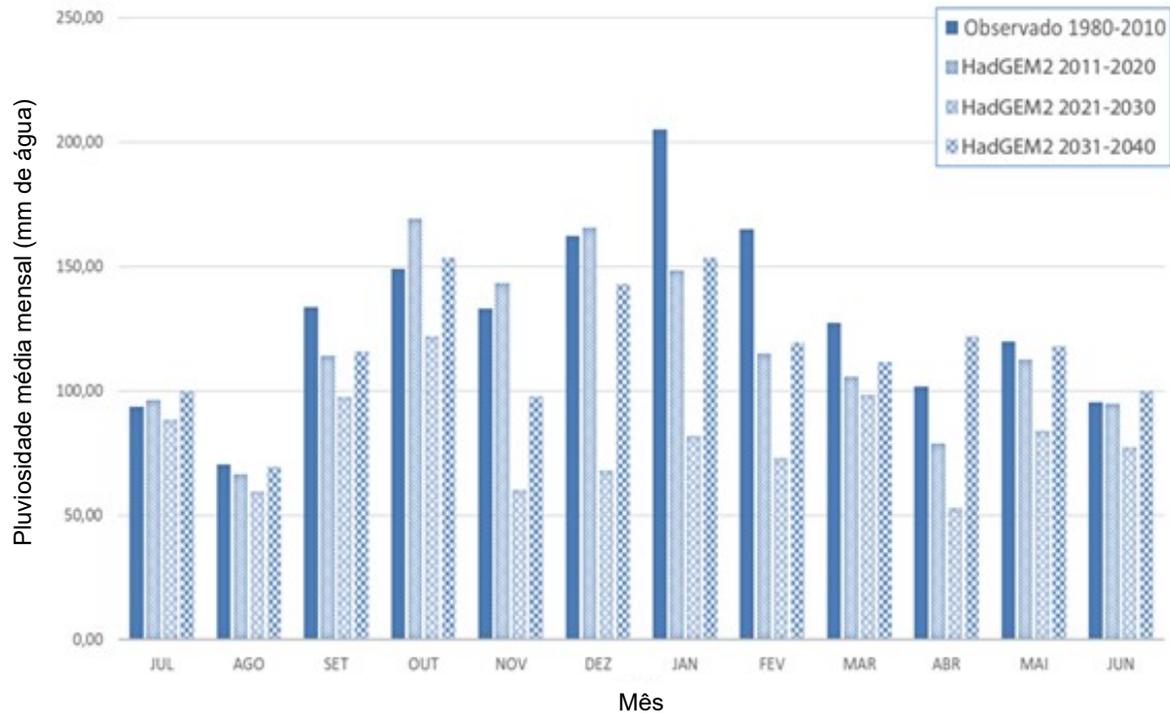


Figura 4. Pluviosidade média mensal da região de estudo no período observado de 1981-2010 e nos cenários HadGEM2-ES para 2011-2020, 2021-2030 e 2031-2040.

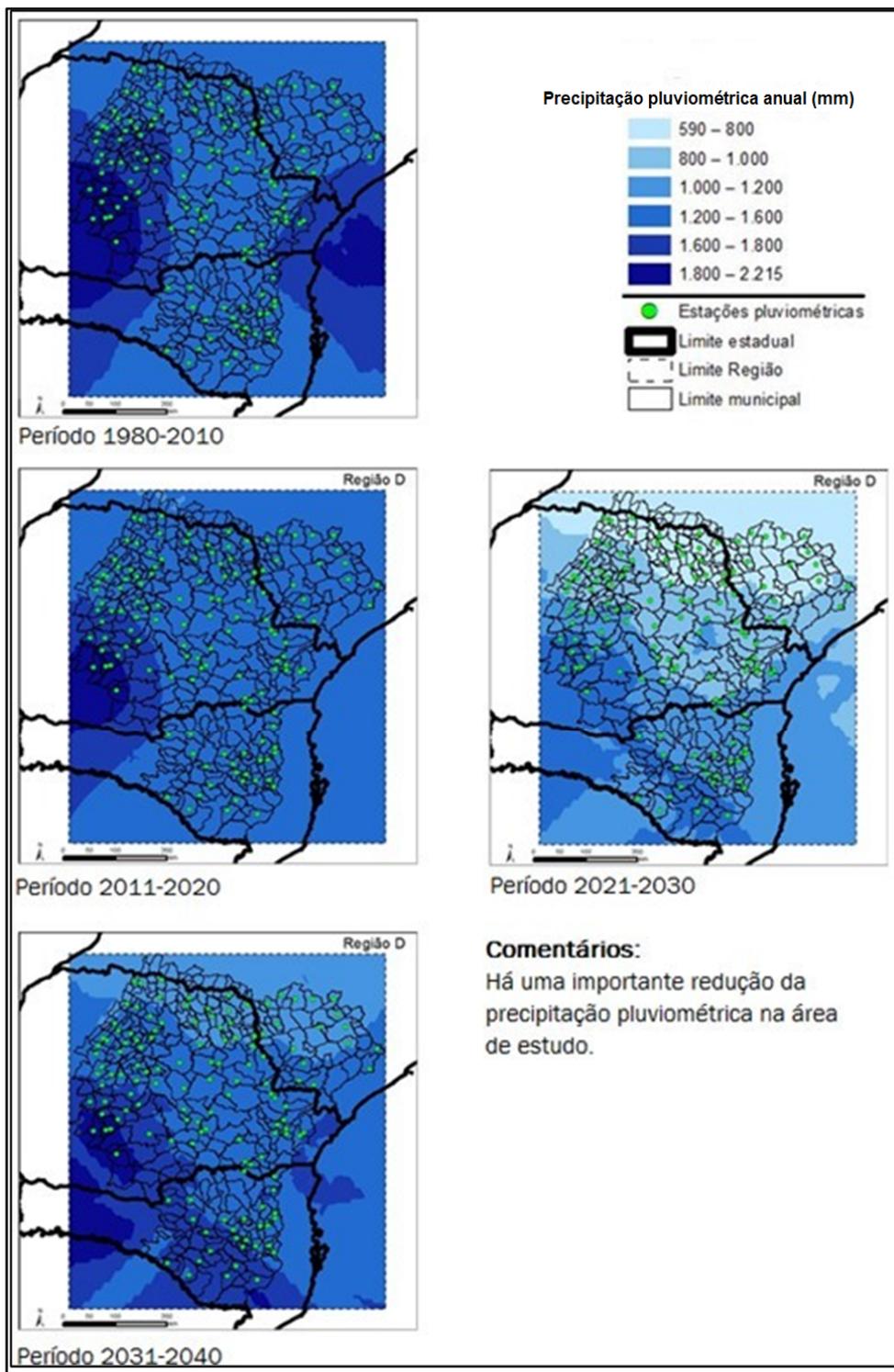


Figura 5. Variação da precipitação pluviométrica da região de estudo no período observado de 1981-2010, e nos cenários futuros de 2011-2020, 2021-2030, 2031-2040 nos cenários futuros, do modelo HadGEM2-ES.

Tabela 4. Pluviosidade média mensal do quadrimestre mais chuvoso (Quad.+), do quadrimestre menos chuvoso (Quad.-), média do total anual, e percentuais do total anual no quadrimestre mais chuvoso e menos chuvoso, na região de estudo no período observado de 1981-2010, e nos cenários futuros obtidos pelo modelo HadGEM2-ES, para os períodos 2011-2020, 2021-2030 e 2031-2041.

Mês	Observado 1980-2010	HadGEM2-ES 2011-2020	HadGEM2-ES 2021-2030	HadGEM2-ES 2031-2040
Jul	93,79	96,48	88,41	99,90
Ago	70,58	66,54	59,49	69,44
Set	133,74	114,20	97,63	115,83
Out	149,07	169,32	121,97	153,48
Nov	133,19	143,26	60,22	97,87
Dez	162,38	165,57	68,17	142,95
Jan	205,18	148,37	81,86	153,72
Fev	165,14	114,97	73,07	119,61
Mar	127,25	105,81	98,49	111,83
Abr	101,77	78,99	52,85	121,87
Mai	119,83	112,62	84,15	118,02
Jun	95,39	94,85	77,43	99,93
Quad.+	665,90	626,52	332,24	548,03
Quad.-	379,59	370,49	309,49	385,10
Total Anual	1.557,31	1.410,98	963,76	1404,46
Quad.+ (%)	43	44	34	39
Quad.- (%)	24	26	32	27

meses chuvosos meses secos

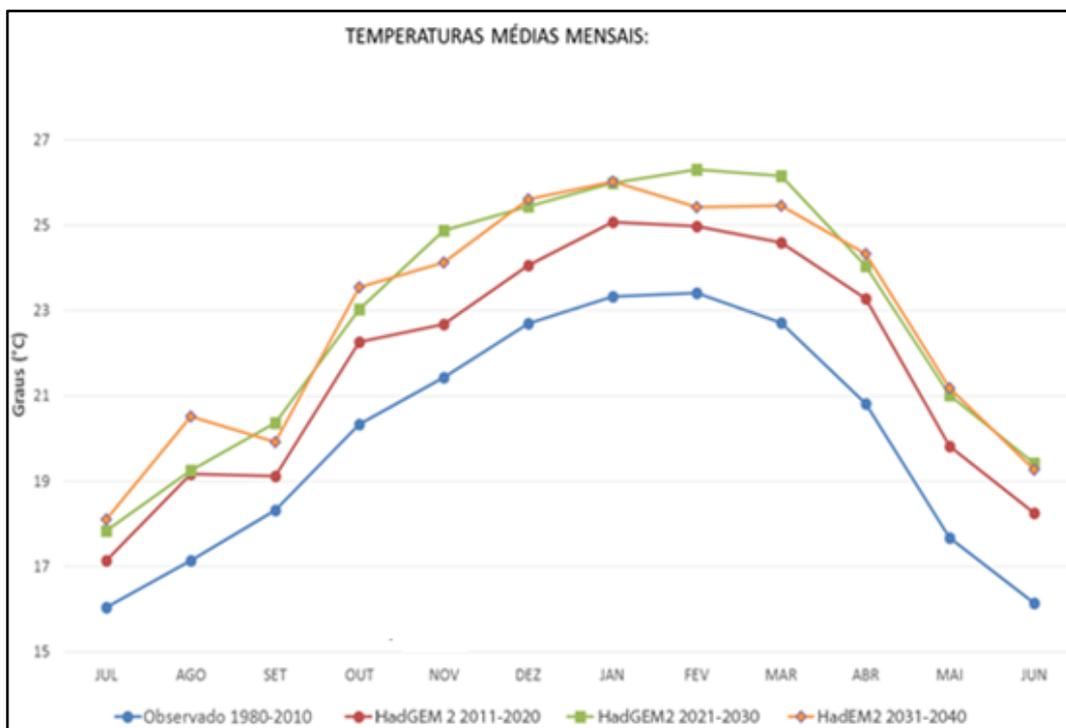


Figura 6. Médias mensais das temperaturas médias diárias na região de estudo, no período observado de 1981-2010, e nos cenários futuros de 2011-2020, 2021-2030, 2031-2040 nos cenários futuros do modelo HadGEM2-ES.

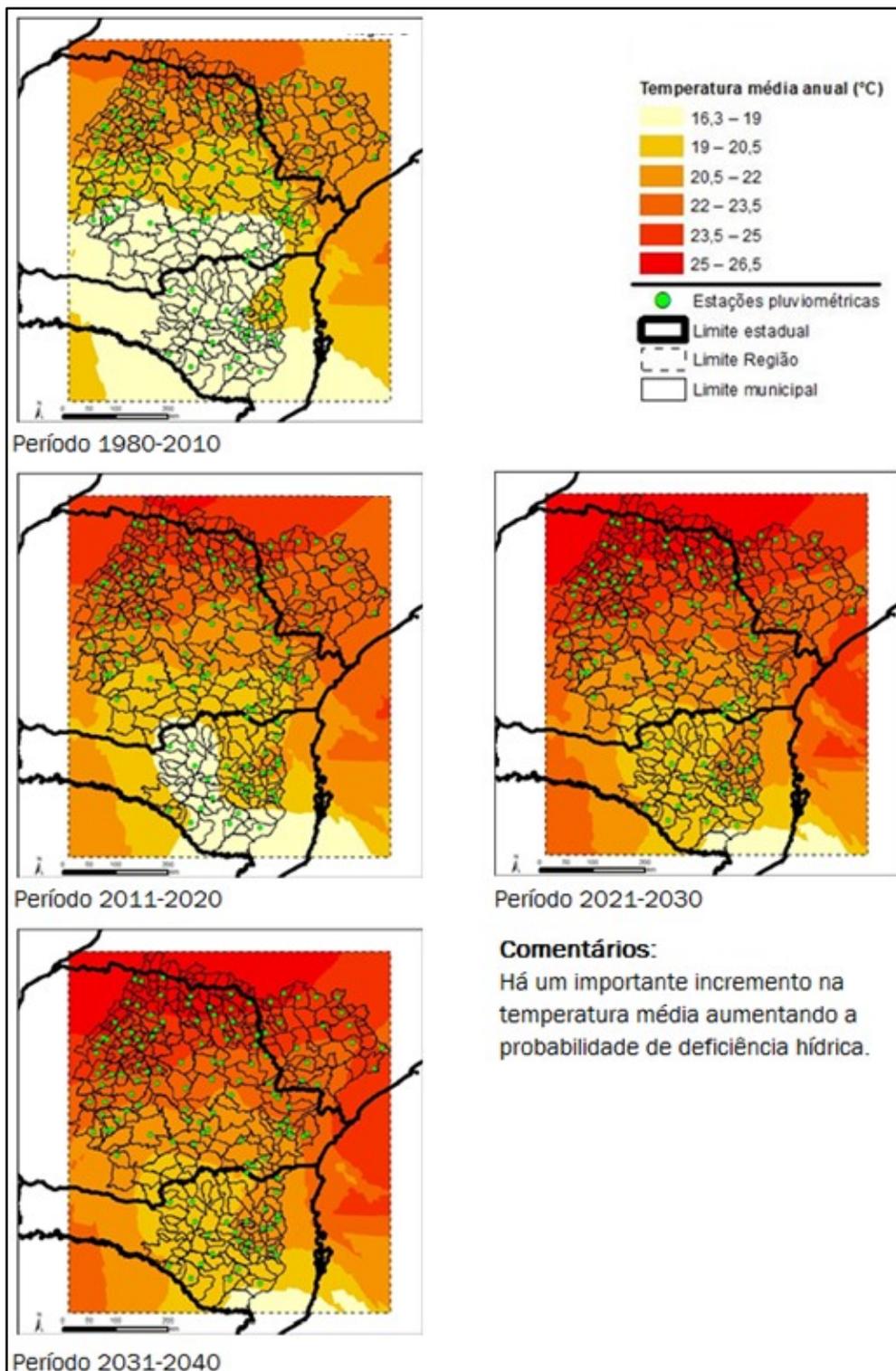


Figura 7. Variação espacial da temperatura média na região de estudo, no período observado de 1981-2010, e nos cenários futuros de 2011-2020, 2021-2030, 2031-2040 nos cenários futuros do modelo HadGEM2-ES.

Tabela 5. Médias mensais das temperaturas médias diárias (°C) na região de estudo, no período observado de 1981-2010, e nos cenários futuros de 2011-2020, 2021-2030, 2031-2040 nos cenários futuros do modelo HadGEM2-ES.

Mês	Observado 1980-2010	HadGEM2-ES 2011-2020	HadGEM2-ES 2021-2030	HadGEM2-ES 2031-2040
Jul	16,04	17,15	17,85	18,11
Ago	17,14	19,18	19,26	20,52
Set	18,33	19,13	20,37	19,92
Out	20,33	22,26	23,02	23,55
Nov	21,43	22,67	24,87	24,13
Dez	22,70	24,05	25,44	25,61
Jan	23,32	25,07	25,99	26,02
Fev	23,41	24,98	26,31	25,43
Mar	22,71	24,60	26,15	25,45
Abr	20,82	23,29	24,05	24,32
Mai	17,68	19,82	21,02	21,19
Jun	16,16	18,26	19,43	19,27

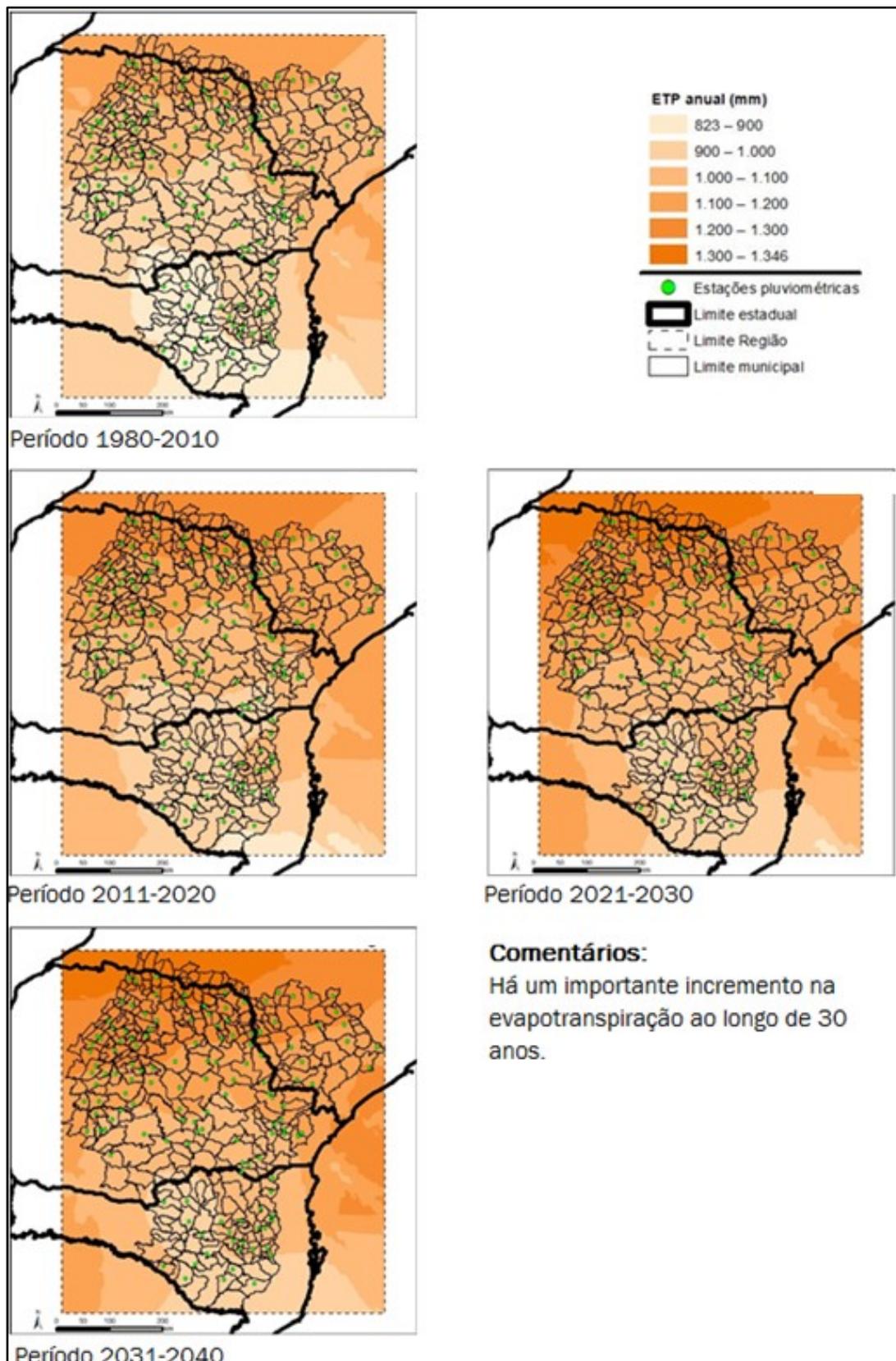


Figura 8. Variação espacial da evapotranspiração na região de estudo, no período observado de 1981-2010 e nos cenários HadGEM2-ES para 2011-2020, 2021-2030 e 2031-2040.

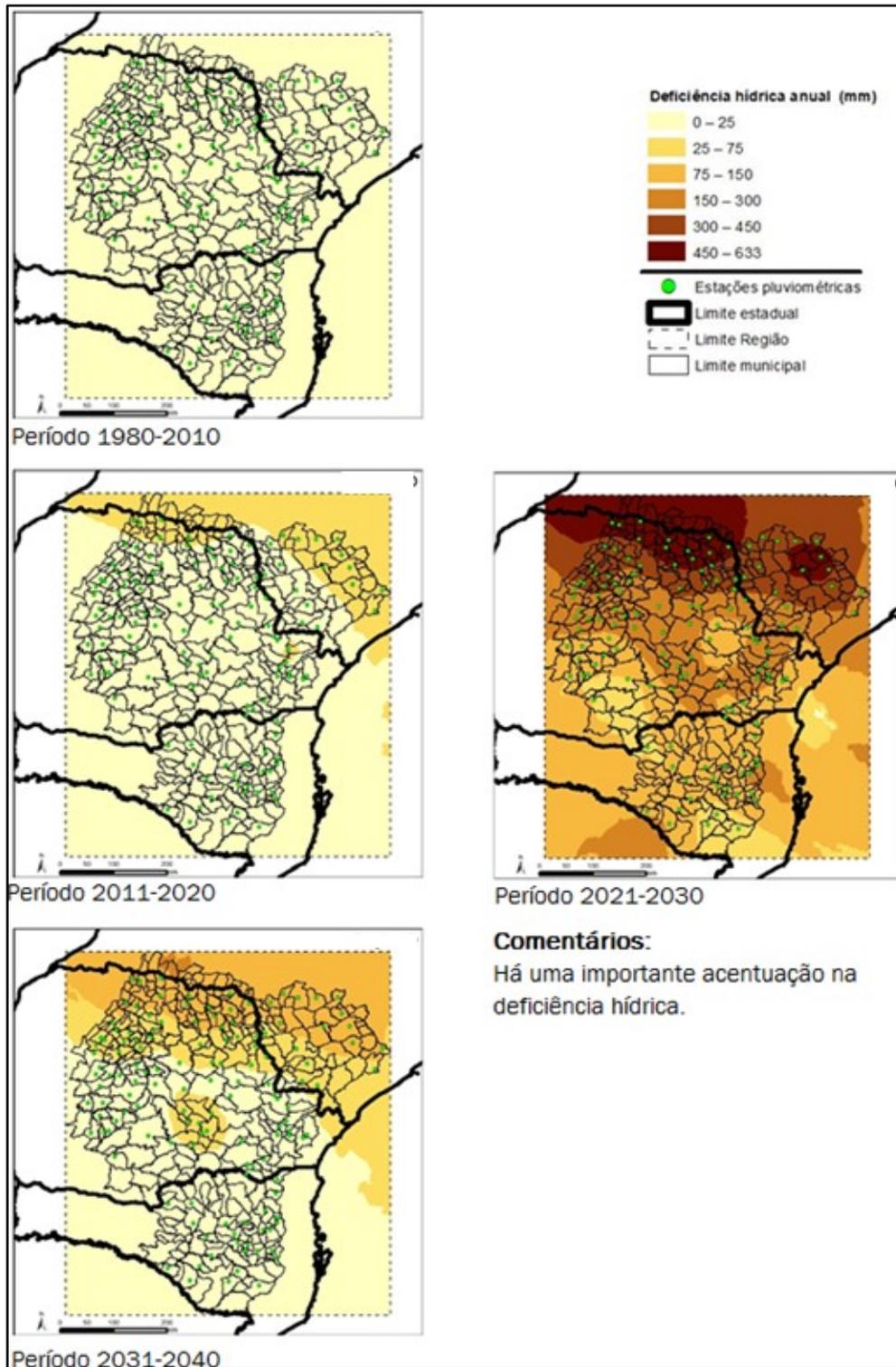


Figura 9. Variação espacial da deficiência hídrica na região de estudo, no período observado de 1981-2010 e nos cenários HadGEM2-ES para 2011-2020, 2021-2030 e 2031-2040.

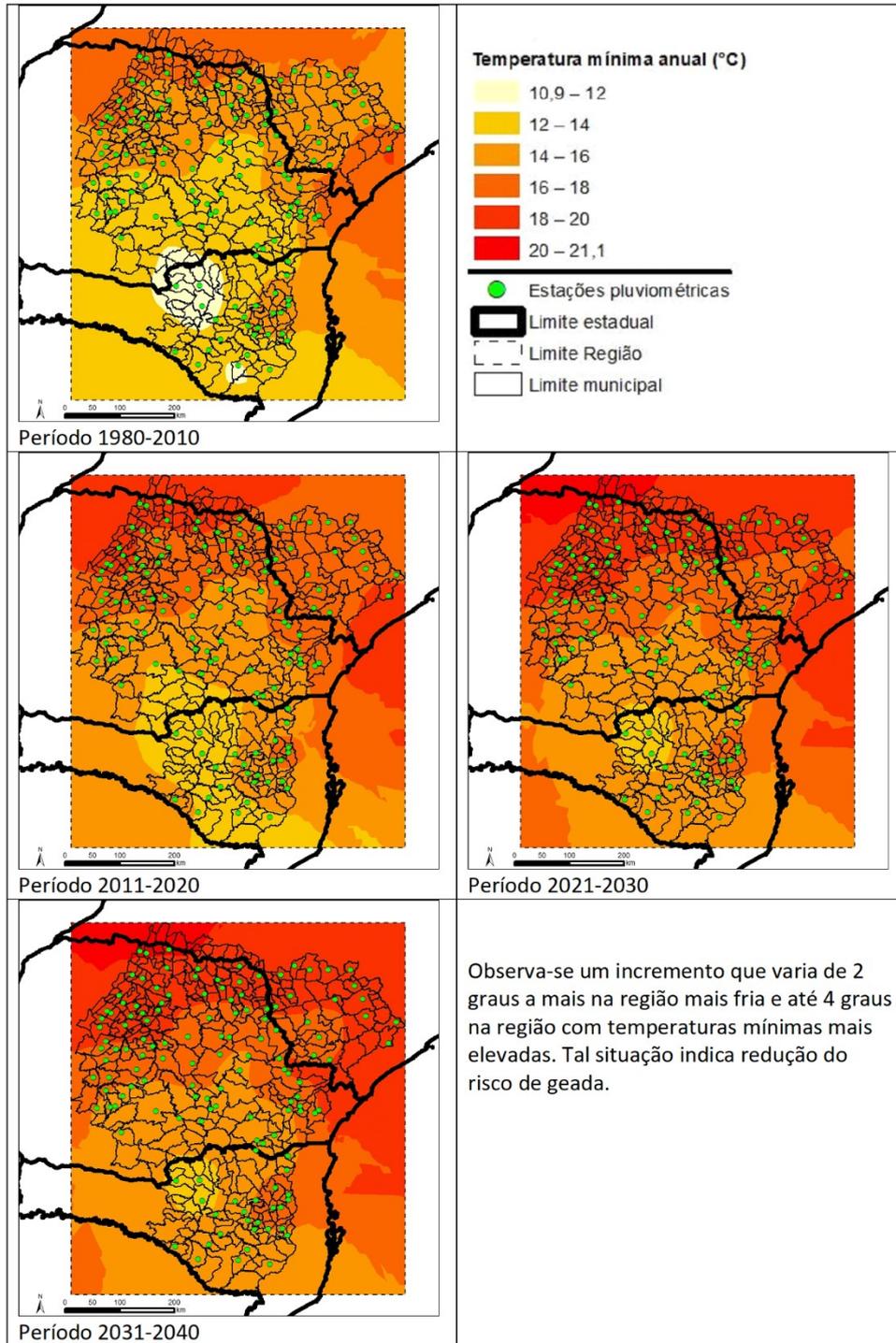


Figura 10. Variação espacial da temperatura mínima entre 1980 à 2040. Nesta situação observa-se nitidamente o efeito do aquecimento global elevando a temperatura mínima, que vai reduzindo o risco de geada ao longo do tempo.

Os resultados observados na região de estudo apontam que poderá haver limitação de crescimento em função da temperatura crítica inferior. Cabe salientar que, na região de estudo, são registradas temperaturas mínimas abaixo de 2 °C (Tabela 6). A temperatura ótima (Tot), no seu limite inferior, está abaixo de valores aceitáveis, promovendo a redução na taxa de crescimento, no período de inverno. As temperaturas basais superiores estão abaixo dos limites superiores para os quatro cenários analisados (Tabelas 5 e 7). Isto significa que a temperatura máxima não será um fator limitante para o crescimento do eucalipto, na região de estudo.

Os valores da evapotranspiração média diária na região de estudo não são limitantes para a produção da cultura (Figura 8). Estão no limite de média a inferior da demanda hídrica, normalmente associada a dias parcialmente nublados e, ou com temperaturas moderadas, indicando necessidades de água para as plantas que podem ser supridas com armazenamento médio e alto. Os valores de evapotranspiração obtidos não representam risco imediato e nem futuro.

Tabela 6. Temperaturas observadas em relação às temperaturas cardinais de referência na região de estudo (Tci > 2 °C; Tbi > 10 °C; Tot de 16 °C a 26 °C; Tbs de 21 °C a 31 °C; e Tcs < 31 °C).

Tamanho da planta	Temperaturas Cardinais (°C)				
	Tci	Tbi	Tot	Tbs	Tcs
Mudas e plantas novas <50 cm	0	8	25	36	40
Planta >50cm altura	-2	8	25	36	40

Nota: Tci – temperatura crítica ou letal inferior; Tbi – temperatura mínima ou basal inferior; Tot – temperatura ótima; Tbs – temperatura máxima ou basal superior; Tcs – temperatura crítica ou letal superior.

Tabela 7. Probabilidade de ocorrência de temperatura > 34 graus nas regiões avaliadas em percentagem.

Ano	2010	2015	2025	2035
Região estudada	1,74	6,14	13,75	11,74

A deficiência hídrica **não é um fator limitante para a produção do eucalipto**, exceto para as regiões limítrofes entre o estado do Paraná e São Paulo que, nos períodos analisados entre 2021 a 2040, poderá chegar a valores superiores a 300 mm/ano (Figura 9). Entre os estados analisados, Paraná e Santa Catarina são os que apresentam as melhores condições climáticas presentes e futuras, para produção do eucalipto.

Na Tabela 8 encontram-se as probabilidades de ocorrência de geadas. O que se observa é que, com o aumento da temperatura mínima ao longos dos períodos, o risco de geada diminui de 73%, no período 1980-2010, para 22% ao período 2031 a 2040.

Tabela 8. Probabilidade de ocorrência de geadas.

	Probabilidade de ocorrência de geadas (%)			
	1980-2010	2011-2020	2021- 2030	2031-2040
Região estudada	0,73	0,36	0,25	0,22

Os resultados obtidos indicam, a partir da climatologia, que existe vulnerabilidade seja por temperaturas baixas, seja por alta deficiência hídrica, em escalas variadas.

Avaliação da deficiência hídrica por tipo de solos

Para determinar a deficiência hídrica por tipo de solo foram consideradas que as capacidades de retenção seriam 0,7 mm H₂O/cm solo, 0,9 mm H₂O/cm solo e 1,0 mm H₂O/cm solo, para os solos arenosos, médios e argilosos respectivamente. Neste trabalho são apresentados apenas os resultados obtidos para solos tipo 2 (Figura 11).

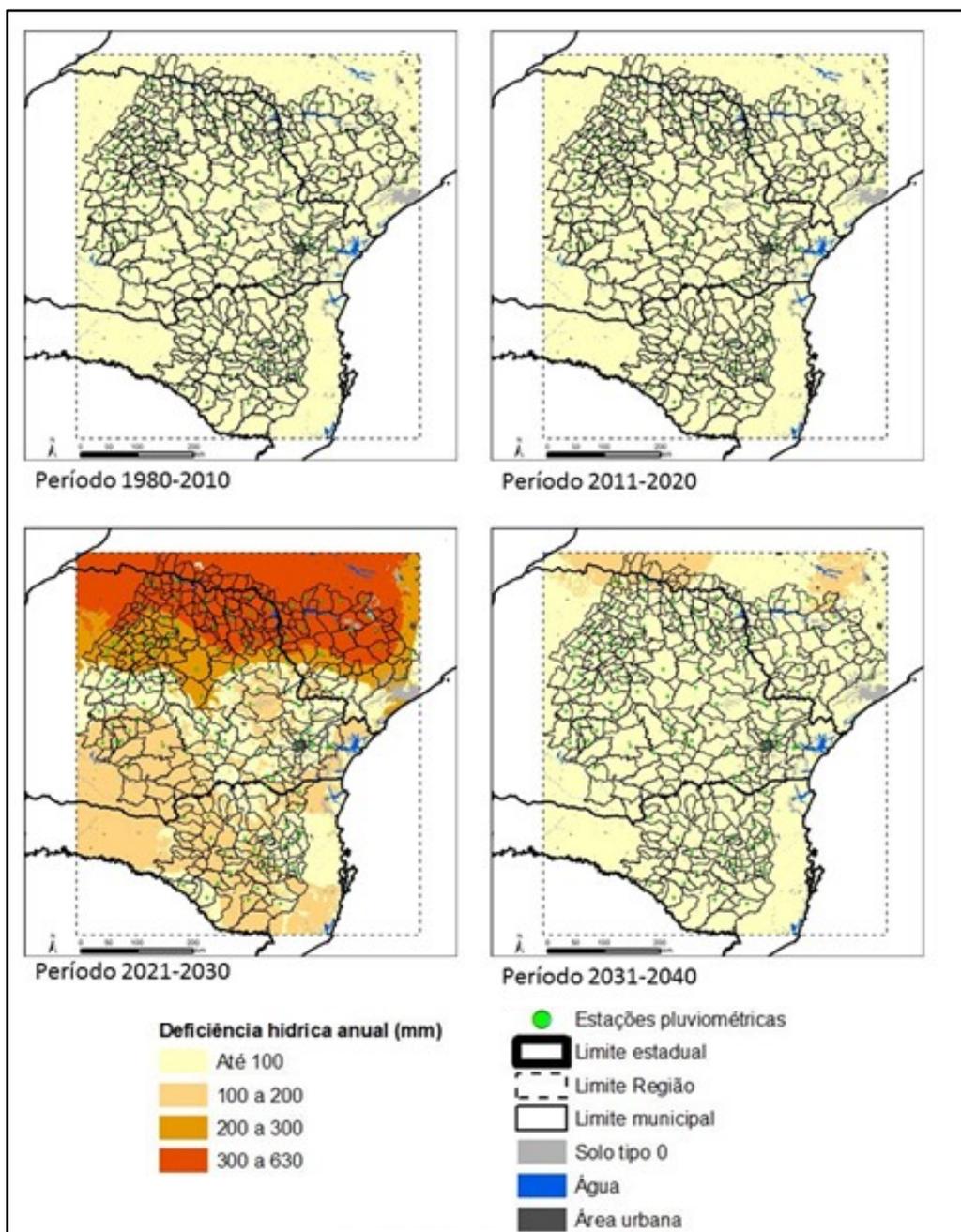


Figura 11. Deficiência hídrica na região de estudo, para os solos tipo 2, nos anos de 2010, e nas décadas de 2011-2020, 2021-2030 e 2031-2040.

Análise da produtividade

Para a análise de produtividade, foram estimados os valores do ISNA, conforme estabelecido na metodologia. Para efeito de demonstração dos resultados, os mapeamentos serão apresentados somente para o solo tipo 2.

A Tabela 9 apresenta os resultados dos valores de ISNA para a região de estudo, para todos os tipos de solo. Os resultados obtidos para o cálculo do ISNA, em função do aumento das temperaturas e da variação na pluviosidade ao longo do tempo, e no futuro (2025 e 2035), apontam quase nenhum impacto no ISNA, na região de estudo.

Tabela 9. Variação anual dos índices de satisfação de necessidade de água, (ISNA), incluindo a projeção futura do aquecimento global, para a região de estudo.

Ano	Solo 1	Solo 2	Solo 3	Ano	Solo 1	Solo 2	Solo 3
1980	0,86	0,86	0,86	1997	0,80	0,81	0,82
1981	0,73	0,74	0,75	1998	0,84	0,85	0,85
1982	0,80	0,81	0,82	1999	0,80	0,81	0,81
1983	0,85	0,85	0,85	2000	0,82	0,83	0,83
1984	0,82	0,83	0,83	2001	0,86	0,86	0,86
1985	0,65	0,67	0,68	2002	0,81	0,82	0,83
1986	0,81	0,82	0,83	2003	0,80	0,81	0,81
1987	0,82	0,83	0,83	2004	0,82	0,82	0,83
1988	0,72	0,74	0,75	2005	0,80	0,81	0,81
1989	0,86	0,86	0,86	2006	0,72	0,74	0,74
1990	0,86	0,86	0,86	2007	0,77	0,78	0,79
1991	0,80	0,81	0,81	2008	0,83	0,83	0,84
1992	0,84	0,84	0,85	2009	0,82	0,83	0,83
1993	0,84	0,85	0,85	2010	0,84	0,84	0,84
1994	0,80	0,81	0,81	2015	0,83	0,84	0,84
1995	0,82	0,83	0,83	2025	0,84	0,84	0,84
1996	0,82	0,83	0,83	2035	0,83	0,83	0,83

Para efeito de indicação das variações, utilizou-se o valor central dos valores de ISNA das séries. Assim, na série 2011-2020, utilizou-se o ISNA central, ou seja 2015. Isso foi feito para as demais séries. Quanto mais próximo o ISNA estiver do valor 1.0, menor o impacto na produtividade.

Na Figura 12 pode-se observar a variabilidade do ISNA, em função do tempo, para os períodos 1980-2010, 2011-2020, 2021-2030 e 2031-2040. São apresentados aqui os resultados alcançados para solos tipo 2.

No caso de solos do tipo 2, o ISNA ficará cada vez mais restritivo à medida que se avança no tempo. Observa-se que, na região noroeste do PR e sudoeste de SP, o ISNA pode ser inferior a 50%, significando que os plantios terão a metade do volume de água de que necessitam para obter a produtividade potencial. Assim, espera-se uma perda de produtividade nessa região, com restrição climática em função da maior ocorrência de verânicos e maior duração do período seco.

Na média global da região de estudo, relacionando o ISNA com o valor de incremento médio anual potencial de 57 m³/ha/ano, o impacto na produtividade do eucalipto foi inferior a 5%, quando foram considerados solos tipo 2 (Tabela 10).

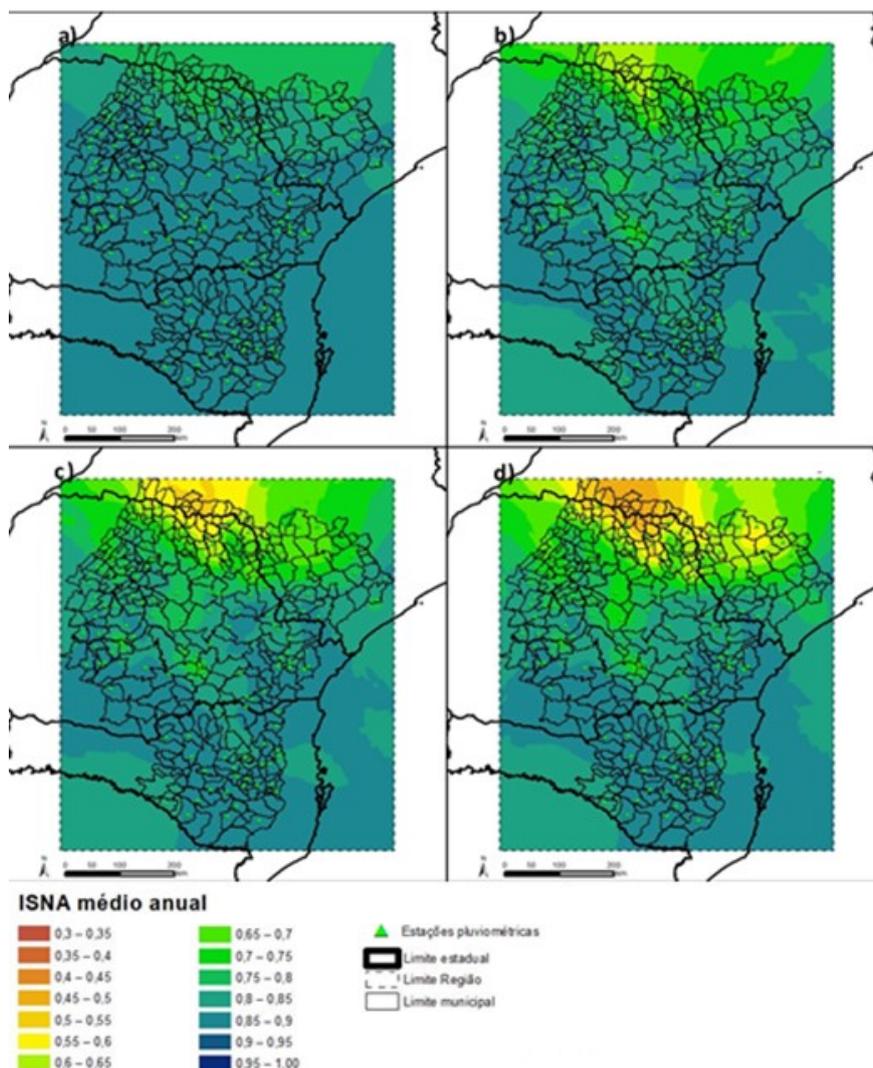


Figura 12. Variação espaço-temporal dos valores de ISNA para solo tipo 2 da região de estudo, considerando: a) ano de 2010; b) ano de 2015; c) ano de 2025; e d) ano de 2035.

Tabela 10. Valores de IMA (incremento médio anual) ajustados em função da variação dos índices de satisfação da necessidade de água (ISNA) no solo tipo 2, considerando o IMA potencial de 57 m³/ha/ano para a região analisada.

Ano	Região de estudo	Ano	Região de estudo	Ano	Região de estudo
1980	57,0	1993	56,1	2005	53,7
1981	49,0	1994	53,4	2006	48,8
1982	53,8	1995	54,9	2007	51,9
1983	56,5	1996	55,1	2008	55,3
1984	55,0	1997	53,9	2009	55,0
1985	44,5	1998	56,1	2010	55,7
1986	54,6	1999	53,6	2015	55,5
1987	55,0	2000	54,9	2025	55,7
1988	49,2	2001	56,9	2035	55,2
1989	56,9	2002	54,5	Médio	54,2
1990	57,1	2003	53,5	Máximo	57,1
1991	53,6	2004	54,6	Mínimo	44,5
1992	55,9				

A variação temporal do IMA para o período 1980-2040, considerando o impacto na produtividade do eucalipto, em função do aumento de temperatura e da variação de chuva, foi determinada pelo Modelo HadGEM2-ES, nos períodos 1981-2010, 2011-2020, 2021-2030 e 2031-2040, para solos tipo 2 (Figura 13).

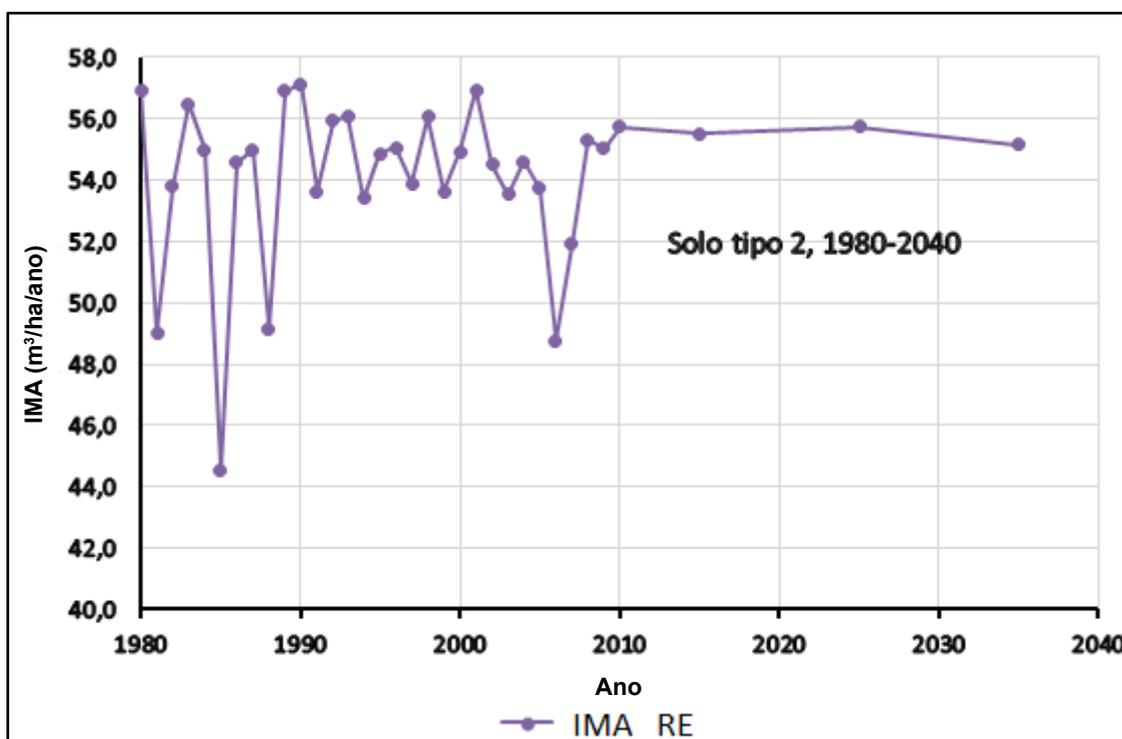


Figura 13. Variação temporal dos valores de incremento médio anual ajustado (IMA RE), considerando o impacto do aumento de temperatura e da variação de chuva pelo Modelo HadGEM2-ES2, na produtividade do eucalipto, nos períodos 1981-2010, 2011-2020, 2021-2030 e 2031-2040, para solos tipo 2 (textura).

Nas Tabelas 11, 12 e 13 encontram-se as probabilidades de ocorrência dos valores de ISNA anuais e o ISNA médio futuro, para a região, para os três tipos de solos, considerando as médias anuais e os quadrimestres menos chuvoso e mais chuvoso.

Tabela 11. Probabilidade de ocorrência dos índices de satisfação da necessidade de água (ISNA) anuais e médio, presente (2015) e futuro, para a região de estudo, conforme o tipo de solo, considerando as médias anuais de precipitação pluviométrica.

Indicador	Solo 1	Solo 2	Solo 3	
Probabilidade (%)				
ISNA	Até 0,5	0,0	0,0	0,0
	0,5 a 6,0	0,0	0,0	0,0
	6,1 a 7,0	3,2	3,2	3,2
	7,1 a 8,0	25,8	12,9	12,9
	>8,1	71,0	83,9	83,9
ISNA				
Anos	2015	0,83	0,84	0,84
	2025	0,84	0,84	0,84
	2035	0,83	0,83	0,83

Tabela 12. Probabilidade de ocorrência dos índices de satisfação da necessidade de água (ISNA) anuais e o médio futuro, para a região de estudo, conforme o tipo de solo, considerando o quadrimestre menos chuvoso.

Indicador		Solo 1	Solo 2	Solo 3
Probabilidade (%)				
ISNA	Até 0,5	3,2	3,2	3,2
	0,5 a 6,0	9,7	3,2	3,2
	6,1 a 7,0	19,4	16,1	12,9
	7,1 a 8,0	67,7	77,4	80,6
	>8,1	0,0	0,0	0,0
ISNA				
Anos	2015	0,77	0,78	0,78
	2025	0,78	0,79	0,79
	2035	0,75	0,76	0,76

Tabela 13. Probabilidade de ocorrência dos índices de satisfação da necessidade de água (ISNA) anuais e médio presente (2015) futuro, para a região de estudo, conforme o tipo de solo, considerando o quadrimestre mais chuvoso.

Indicador		Solo 1	Solo 2	Solo 3
Probabilidade (%)				
ISNA	Até 0,5	0,0	0,0	0,0
	0,5 a 6,0	0,0	0,0	0,0
	6,1 a 7,0	3,2	3,2	0,0
	7,1 a 8,0	3,2	0,0	3,2
	>8,1	93,5	96,8	96,8
ISNA				
Anos	2015	0,90	0,90	0,90
	2025	0,90	0,90	0,90
	2035	0,86	0,86	0,87

Análise do impacto na produtividade do eucalipto, nas unidades de produção florestal da Klabin

Itapetininga (SP)

Para análise das condições críticas do município de Itapetininga, em São Paulo, foi inicialmente estabelecido o balanço hídrico para os anos 1980 a 2015, com dados meteorológicos diários¹. Tratando-se de um balanço hídrico climático, a CAD estabelecida padrão foi de 100 mm. Na Tabela 14 estão indicados os parâmetros de entrada do balanço e na Tabela 15 estão indicados os parâmetros médios mensais para estabelecimento do balanço hídrico.

Na Tabela 16 são apresentadas as probabilidades de ocorrência da ETR para o município de Itapetininga (SP), nos meses de janeiro a dezembro, considerando solos tipo 2 e tipo 3, visto que a ocorrência de solos tipo 1 é muito pequena nesse município. Observa-se que não ocorreram condições desfavoráveis para silvicultura de modo geral, e baixa é a possibilidade de haver ETR maior que 5 mm, indicando que o eucalipto é uma cultura resistente a altas temperaturas. Nos meses de maio a julho, porém, é quase certo que haverá ETR de até 3 mm, independente do tipo de solo.

¹ O período foi estendido até 2015, em função das curvas de produtividade que serão analisadas posteriormente.

Tabela 14. Parâmetros de entrada do balanço hídrico de Thornthwaite para a cultura do eucalipto em Itapetininga, SP, considerando o período 1980-2015.

Localização	
Latitude (graus)	-23,63 S
Altitude (metros)	650
Solo e clima	
Capacidade de água disponível (mm)	100
Estimativa de temperatura (°C)	Temperatura média
Índice I*	106,88
Índice a*	2,28

* Os índices I e a são índices de ajuste do balanço hídrico de Thornthwaite.

Tabela 15. Dados climáticos médios mensais para estabelecimento do balanço hídrico em Itapetininga, SP.

Mês	Precipitação pluviométrica (mm)	Temperatura (°C)		
		Máxima	Mínima	Média
Janeiro	230	28,70	19,15	23,92
Fevereiro	175	29,26	19,28	24,27
Março	138	28,41	18,52	23,46
Abril	73	26,79	16,84	21,82
Mai	78	23,99	13,93	18,96
Junho	64	22,98	12,29	17,63
Julho	58	23,10	11,85	17,48
Agosto	36	24,93	12,70	18,81
Setembro	89	25,46	14,13	19,80
Outubro	116	26,93	16,06	21,49
Novembro	121	27,79	17,10	22,44
Dezembro	180	28,51	18,36	23,44

Tabela 16. Probabilidade de ocorrência de ETR, em porcentagem, em Itapetininga, SP, no período de 1980 a 2015.

Mês	ETR (mm)							
	Solo tipo 2				Solo tipo 3			
	0 a 3	3 a 5	5 a 7	> 7	0 a 3	3 a 5	5 a 7	> 7
Probabilidade de ocorrência de ETR (%)								
Janeiro	3	69	28	0	0	75	25	0
Fevereiro	3	91	6	0	3	91	6	0
Março	3	97	0	0	3	97	0	0
Abril	94	6	0	0	94	6	0	0
Mai	100	0	0	0	100	0	0	0
Junho	100	0	0	0	100	0	0	0
Julho	100	0	0	0	100	0	0	0
Agosto	94	6	0	0	94	6	0	0
Setembro	47	53	0	0	44	56	0	0
Outubro	22	75	3	0	22	75	3	0
Novembro	22	70	8	0	22	70	8	0
Dezembro	0	69	31	0	0	69	31	0

Na Tabela 17 encontram-se indicados os valores de ETR futura, em milímetros, nos meses de janeiro a dezembro dos anos de 2015, 2025 e 2035, considerando solos tipo 2 e tipo 3, pois, como mencionado, a ocorrência de solos tipo 1 é muito pequena. A demanda de água projetada para o futuro atinge os maiores valores nos meses de dezembro e janeiro, quando pode chegar a mais de 5 mm. Nos meses seguintes a demanda de ETR é reduzida até maio/junho e retorna a subir gradativamente nos meses seguintes. A menor ETR foi projetada para os meses de abril até agosto, quando ETR fica entre 2 mm e 3 mm, independente do tipo de solo.

Tabela 17. ETR futura, em milímetros, nos meses de janeiro a dezembro dos anos de 2015, 2025 e 2035, considerando solos tipo 2 e tipo 3 em Itapetininga, SP.

Mês	Tipo 2			Tipo 3		
	2015	2025	2035	2015	2025	2035
ETR futura (mm)						
Janeiro	5,11	5,29	5,47	5,11	5,29	5,47
Fevereiro	4,90	4,84	4,48	4,90	4,86	4,53
Março	4,01	3,85	3,69	4,02	3,88	3,73
Abril	2,96	2,85	2,72	2,99	2,88	2,76
Maio	2,37	2,32	2,21	2,37	2,33	2,23
Junho	2,27	2,38	2,49	2,27	2,38	2,49
Julho	2,56	2,66	2,76	2,56	2,66	2,76
Agosto	2,86	2,86	2,86	2,92	2,94	2,94
Setembro	2,99	3,14	3,30	3,05	3,20	3,36
Outubro	4,19	3,78	3,33	4,23	3,85	3,43
Novembro	4,04	3,45	2,81	4,10	3,53	2,90
Dezembro	5,37	5,18	4,45	5,37	5,20	4,48

Na Tabela 18 tem-se o balanço hídrico anual-normal para o período de 1980 a 2015. Chama a atenção que a deficiência hídrica é nula ou muito baixa durante todo ano e há um excedente hídrico nos meses de janeiro a março. Isto mostra a necessidade de se verificar se o eucalipto está cultivado em solos bem drenados.

Tabela 18. Balanço hídrico anual-normal para o período de 1980 a 2015, no município de Itapetininga, SP.

Mês	Precipitação pluviométrica	Deficiência	Armazenamento	Excedente
	mm água			
Janeiro	230	0	100	26
Fevereiro	175	0	100	46
Março	138	0	100	21
Abril	73	-1	87	0
Maio	78	0	99	0
Junho	64	0	100	2
Julho	58	-1	85	0
Agosto	36	-26	43	0
Setembro	89	-18	33	0
Outubro	116	-19	25	0
Novembro	121	-22	19	0
Dezembro	180	0	42	0

Com estes resultados é possível estabelecer o gráfico da variação do balanço hídrico na unidade de produção de Itapetininga (Figura 13). Conforme evidenciado na Figura 14, não foi observada deficiência hídrica acentuada. Como o cálculo foi feito para CAD de 100 mm, que é o balanço hídrico climático normal, os resultados serão ainda melhores para as CAD de 105 mm, 135 mm e 150 mm correspondentes aos solos tipo 1, 2 e 3, respectivamente.

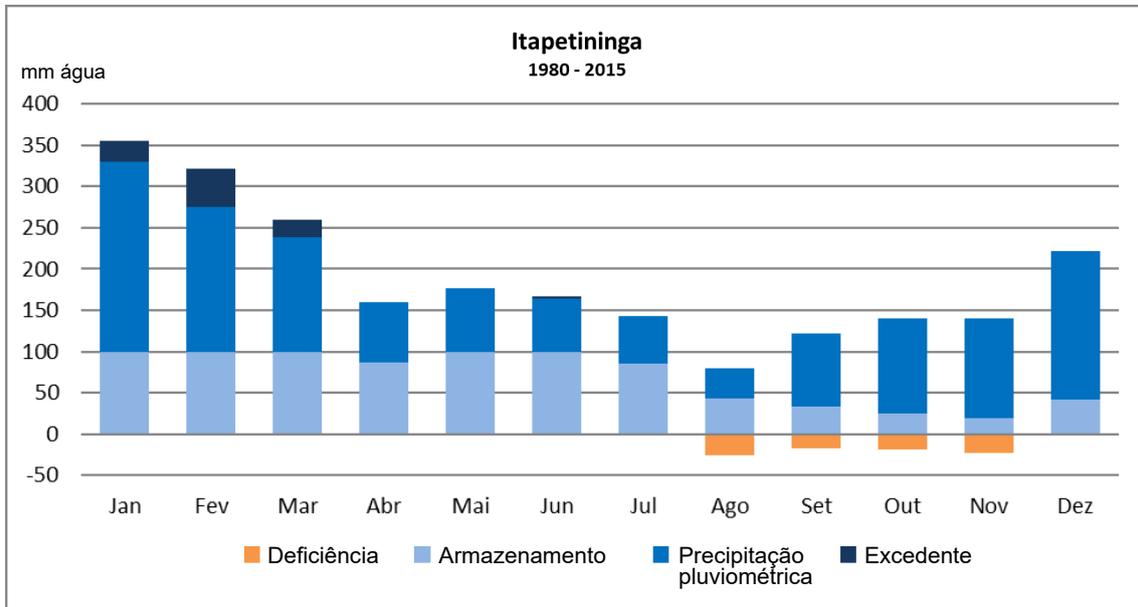


Figura 14. Balanço hídrico normal para Itapetininga (SP), no período 1980 a 2015.

Para verificar o impacto do aquecimento global nos anos futuros, períodos 2010-2020, 2020-2030 e 2030-2040, foram estabelecidos os balanços hídricos para estes anos, considerando o ano central de cada série. Os resultados encontram-se nas Figuras 15, 16 e 17.

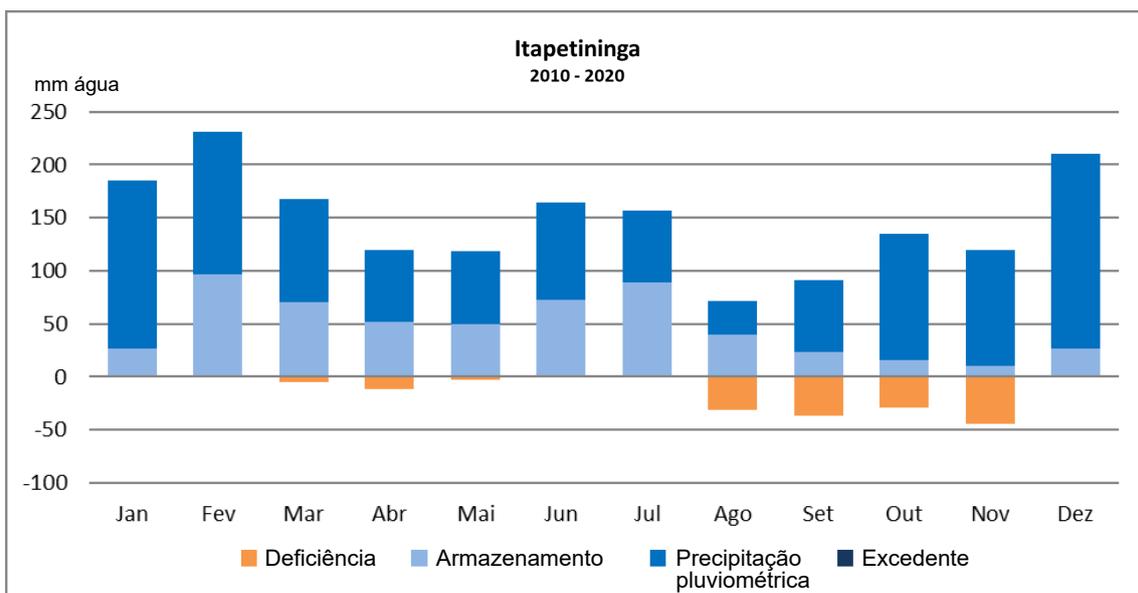


Figura 15. Balanço hídrico em Itapetininga (SP), para o período de 2011 a 2020.

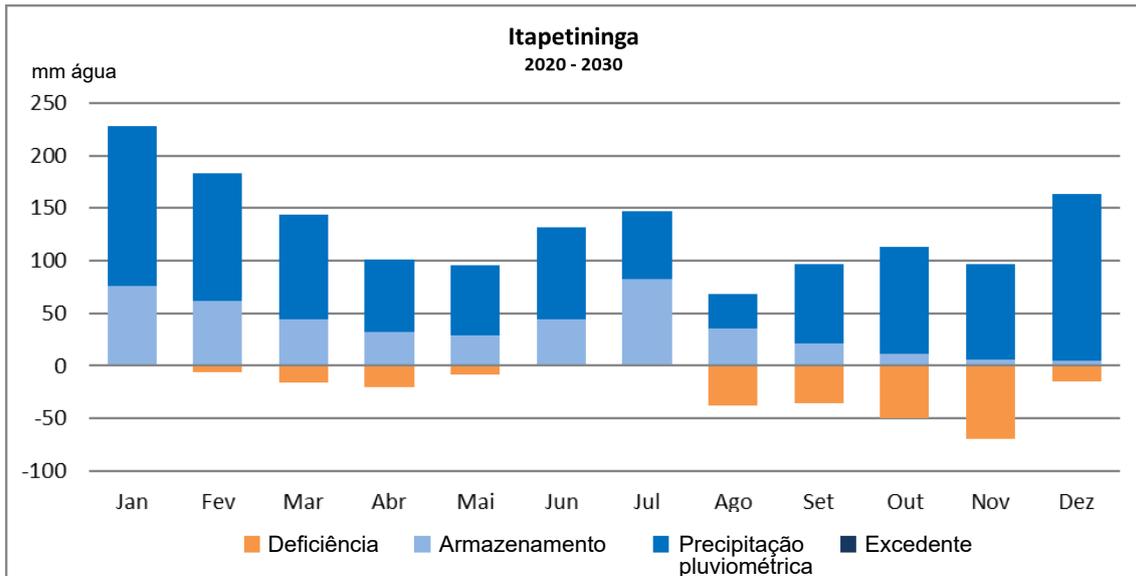


Figura 16. Balanço hídrico em Itapetininga (SP), para o período de 2020 a 2030.

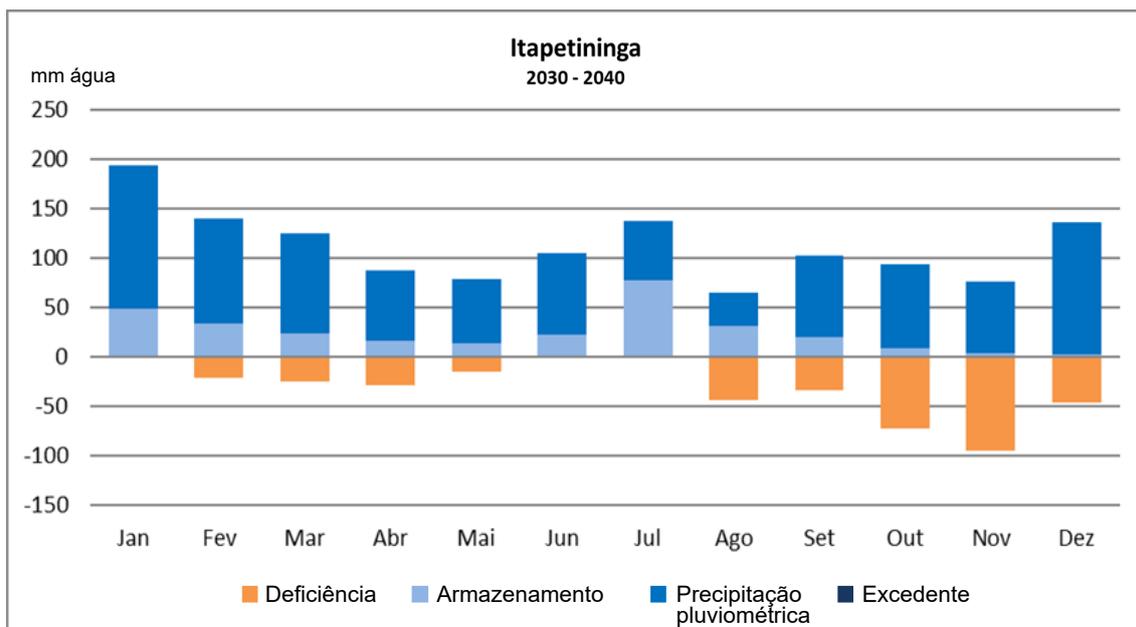


Figura 17. Balanço hídrico em Itapetininga (SP), para o período de 2030 a 2040.

Com o incremento da temperatura em função da estimativa obtida no modelo HadGEM2, a **deficiência hídrica ultrapassa o valor crítico de 200 mm/ano**. Poderá, portanto, haver penalização na produtividade, em função desta deficiência.

Na análise de fenômenos extremos no período 1980 a 2015, foram observados para os meses de setembro, outubro, novembro, dezembro e janeiro, respectivamente 19, 26, 13 e 12 ocorrências de temperatura superior a 34 °C. Não existe uma tendência marcante de crescimento de fenômenos extremos de ondas de calor na região. O mesmo pode ser dito sobre o risco de geada. Em 13.601 valores de temperatura mínima analisados, 16 registraram temperaturas menores que 2 °C no abrigo, o que significa -1,34 °C na superfície da planta, caracterizando a geada. Considerando a chuva máxima, foi observado somente um evento em 35 anos com chuva superior a 100 mm, não havendo, portanto, encharcamentos dos solos que possam trazer prejuízos para a cultura.

Na Tabela 19 são apresentadas as frequências de dias consecutivos sem chuvas no período de 1980 a 2015. Esses períodos sem chuva podem ocorrer durante todos os meses. Quando ocorrem em um período de estiagem, acompanhado por calor intenso (25-35 °C), forte insolação e baixa umidade relativa em plena estação chuvosa ou em pleno inverno, trata-se de um fenômeno meteorológico chamado de veranico. São períodos críticos prejudiciais à agricultura. Observa-se que, ao longo de 35 anos de análise, foram constatadas em Itapetininga (SP) frequências de, pelo menos, 43% de ocorrência de veranicos superiores a 30 dias nos meses de janeiro, março e dezembro (Tabela 19). Estes podem trazer prejuízos ao eucalipto.

Tabela 19. Frequências de ocorrência de dias sem chuva, expressas em porcentagem, observadas no período de 1980 a 2015 em Itapetininga (SP), destacando os veranicos.

Mês	Duração do período sem chuva (dias)						
	Até 5	6 a 10	11 a 15	16 a 20	21 a 25	26 a 30	31 a 35
Janeiro	26	63	6	3	0	0	43*
Fevereiro	23	43	20	0	0	43	0
Março	23	63	26	3	3	0	43*
Abril	11	43	29	9	3	49	0
Mai	11	26	20	20	3	3	46
Junho	14	40	23	3	3	49	0
Julho	6	20	17	11	6	0	51
Agosto	14	23	23	11	6	3	46
Setembro	11	37	17	6	6	51	0
Outubro	20	31	9	9	3	3	43
Novembro	11	49	11	3	6	49	0
Dezembro	29	71	3	3	0	0	43*

* Veranico.

A partir dos dados de IMA e ICA e de produção comercial fornecidos pela Klabin foi possível construir as curvas de crescimento e as relações com o ISNA no município de Itapetininga. Na Figura 18 observa-se que, em Itapetininga, o valor do máximo crescimento de ICA se dá no terceiro ano após o plantio e para o IMA é o quarto ano após o plantio.

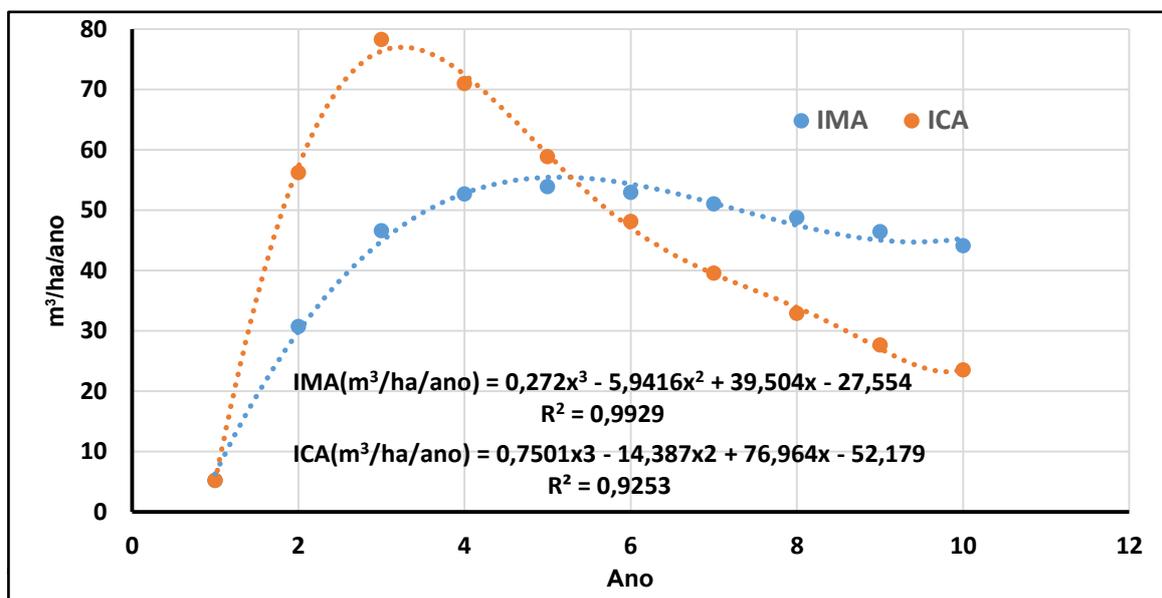


Figura 18. Curvas ajustadas de crescimento para IMA e ICA de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* em Itapetininga (SP), no período de 2005 a 2015.

A partir de parâmetros meteorológicos e de dados de campo disponibilizados pela Klabin, foi possível calcular o IMA e o ISNA para os sete primeiros anos da cultura do eucalipto em Itapetininga (SP) (Tabela 20).

Calculado o ISNA para este período, foi ajustada a curva de crescimento em função do ISNA, ou seja, dado um determinado ISNA qual o valor de IMA estimado pelo modelo. O cálculo para determinação do IMA máximo foi até o sétimo ano, considerado como o principal ano de corte.

A relação entre o ISNA e o IMA é apresentada na Figura 19, na qual se observa que o ISNA explica 93% da variância do IMA, ou seja, uma boa relação entre IMA observado e ISNA estimado. A variação temporal do IMA no período 1980 a 2040 é apresentada na Figura 20.

Tabela 20. Variação de IMA e ISNA, após ajuste de curvas, nos primeiros sete anos de cultura de eucalipto em Itapetininga (SP).

Ano	IMA (m ³ /ha/ano)	ISNA
1º	5	0,13
2º	31	0,30
3º	47	0,38
4º	53	0,52
5º	54	0,73
6º	53	0,73
7º	51	0,69

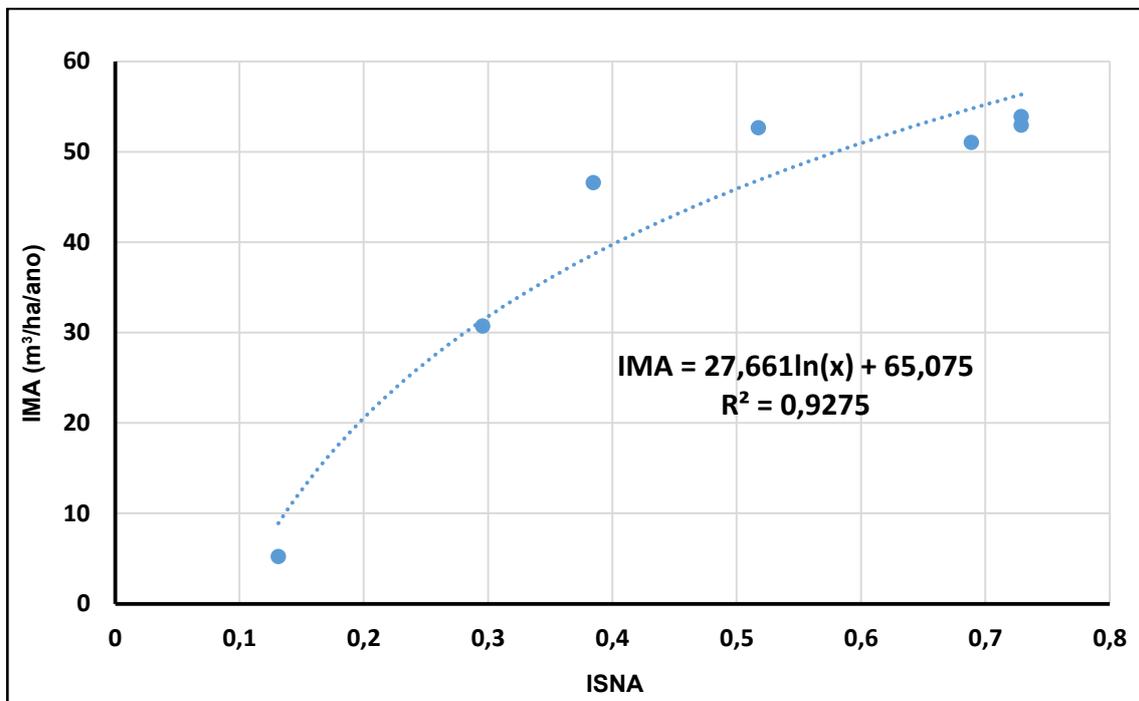


Figura 19. Valor de IMA ajustado em função do ISNA em Itapetininga (SP), para o período 2005 a 2015.

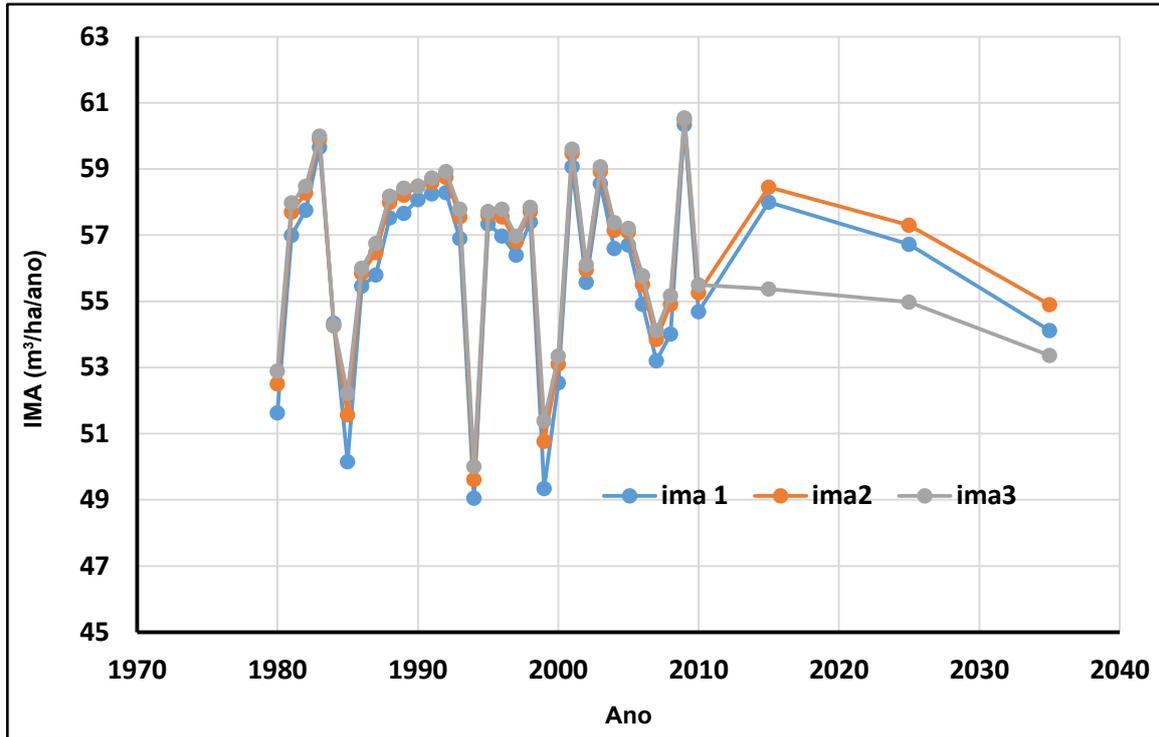


Figura 20. Variação temporal do IMA (incremento médio anual) de 1980 a 2040, para Itapetininga (SP), considerando solo tipo 1 (IMA1), solo tipo 2 (IMA2) e solo tipo 3 (IMA3).

As variações anuais do ISNA são mais evidentes nos anos 1980, 1985, 1994 e 1999, onde aparece uma redução do IMA (Tabela 21). Neste caso a chuva anual é de 1357 mm, e a diferença da oferta pluviométrica para os anos mais secos é aproximadamente 400 mm. Essa redução pode ser explicada pela redução da oferta pluviométrica observada na região, conforme dados da Tabela 22. Ressalte-se que o modelo HadGEM2 indica um cenário de redução na produtividade, mas não muito realçada, ficando entre 1 m³/ha/ano e 5 m³/ha/ano, no intervalo de 30 anos.

Tabela 21. Variação anual do ISNA e do IMA (m³/ha/ano) para solos tipo 1, tipo 2 e tipo 3 em Itapetininga (SP), no período 1980-2035, realçados em amarelo os anos de menor oferta pluviométrica.

Ano	ISNA1	ISNA2	ISNA3	IMA 1	IMA2	IMA3
1980	0,61	0,63	0,64	51,63	52,50	52,90
1981	0,74	0,76	0,77	57,00	57,70	57,97
1982	0,76	0,78	0,79	57,76	58,28	58,48
1983	0,82	0,83	0,83	59,65	59,90	59,99
1984	0,67	0,67	0,67	54,34	54,26	54,28
1985	0,58	0,61	0,62	50,16	51,57	52,21
1986	0,70	0,71	0,72	55,46	55,85	56,00
1987	0,71	0,73	0,74	55,80	56,47	56,75
1988	0,76	0,77	0,78	57,52	57,99	58,19
1989	0,76	0,78	0,78	57,66	58,21	58,43
1990	0,77	0,79	0,79	58,07	58,48	58,48
1991	0,78	0,79	0,79	58,25	58,59	58,73
1992	0,78	0,79	0,80	58,29	58,75	58,93
1993	0,74	0,76	0,77	56,89	57,55	57,78
1994	0,55	0,57	0,57	49,05	49,61	50,01
1995	0,75	0,76	0,76	57,35	57,61	57,72
1996	0,74	0,76	0,77	56,98	57,55	57,79
1997	0,73	0,74	0,74	56,40	56,81	56,98
1998	0,75	0,76	0,77	57,40	57,72	57,84
1999	0,56	0,59	0,60	49,34	50,77	51,39
2000	0,63	0,64	0,65	52,54	53,10	53,34
2001	0,80	0,82	0,82	59,07	59,48	59,60
2002	0,71	0,72	0,72	55,58	55,95	56,10
2003	0,79	0,80	0,80	58,56	58,93	59,07
2004	0,73	0,75	0,75	56,60	57,15	57,38
2005	0,74	0,75	0,75	56,71	57,10	57,20
2006	0,69	0,70	0,71	54,91	55,51	55,78
2007	0,65	0,66	0,67	53,20	53,85	54,12
2008	0,67	0,69	0,69	54,01	54,91	55,17
2009	0,84	0,85	0,85	60,34	60,49	60,55
2010	0,68	0,70	0,70	54,69	55,26	55,50
2015*	0,77	0,78	0,70	58,00	58,45	55,37
2025*	0,74	0,75	0,69	56,72	57,31	54,98
2035*	0,67	0,69	0,65	54,12	54,90	53,37

*Valores estimados pelo modelo HadGEM2.

Tabela 22. Valores de chuva total anual, em milímetros, para a região de Itapetininga (SP), nos anos em que o modelo estimou IMAs menores.

Ano	Chuva anual (mm)	Caracterização do ano
1980	1.156	Seco
1985	968	Seco
1994	927	Seco
1999	932	Seco

Telêmaco Borba (PR)

Para análise das condições críticas no município de Telêmaco Borba, no Paraná, foi inicialmente estabelecido o balanço hídrico entre os anos 1980 a 2015, com dados meteorológicos diários². Tratando-se de um balanço hídrico climático, a CAD estabelecida foi 100 mm. Na Tabela 23 são indicados os parâmetros de entrada do balanço.

Tabela 23. Parâmetros de entrada do balanço hídrico de Thornthwaite para a cultura do eucalipto em Telêmaco Borba (PR), considerando o período 1980 - 2015.

Localização	
Latitude (graus)	-24,13 S
Altitude (metros)	741
Solo e clima	
Capacidade de água disponível (mm)	100
Estimativa de temperatura (°C)	Temperatura média
Índice I*	99,83
Índice a*	2,12

* Os índices "I e a" fazem parte do ajuste do balanço hídrico de Thornthwaite.

Na Tabela 24 estão indicados os parâmetros médios mensais para estabelecimento do balanço hídrico.

Tabela 24. Dados climáticos médios mensais para estabelecimento do balanço hídrico em Telêmaco Borba (PR).

Mês	Precipitação pluviométrica (mm)	Temperatura (°C)		
		Máxima	Mínima	Média
Janeiro	215	28,70	19,15	23,92
Fevereiro	166	29,26	19,28	24,27
Março	121	28,41	18,52	23,46
Abril	102	26,79	16,84	21,82
Mai	123	23,99	13,93	18,96
Junho	114	22,98	12,29	17,63
Julho	92	23,10	11,85	17,48
Agosto	66	24,93	12,70	18,81
Setembro	138	25,46	14,13	19,80
Outubro	154	26,93	16,06	21,49
Novembro	136	27,79	17,10	22,44
Dezembro	174	28,51	18,36	23,44

Na Tabela 25 são apresentadas as probabilidades de ocorrência da ETR para o município de Telêmaco Borba (PR), nos meses de janeiro a dezembro, considerando solos tipo 2 e tipo 3, visto que a ocorrência de solos tipo 1 é muito pequena. Observa-se que não ocorreram condições desfavoráveis para silvicultura de modo geral, mesmo para as culturas mais resistentes a altas temperaturas.

² O período foi estendido até 2015 em função das curvas de produtividade que serão analisadas posteriormente.

Tabela 25. Probabilidade de ocorrência de evapotranspiração real (ETR), em porcentagem, em Telêmaco Borba (PR), no período de 1980 a 2015.

Mês	ETR (mm)							
	0 a 3	3 a 5	5 a 7	> 7	0 a 3	3 a 5	5 a 7	> 7
	Solo tipo 2				Solo tipo 3			
	Probabilidade de ocorrência de ETR (%)							
Janeiro	6	69	25	0	6	69	25	0
Fevereiro	0	100	0	0	0	100	0	0
Março	3	97	0	0	3	97	0	0
Abril	94	6	0	0	94	6	0	0
Mai	100	0	0	0	100	0	0	0
Junho	100	0	0	0	100	0	0	0
Julho	100	0	0	0	100	0	0	0
Agosto	92	8	0	0	92	8	0	0
Setembro	31	69	0	0	31	69	0	0
Outubro	8	92	0	0	8	92	0	0
Novembro	6	86	8	0	6	86	8	0
Dezembro	3	67	31	0	3	67	31	0

Na Tabela 26 encontram-se indicados os valores de ETR futura, em milímetros, nos meses de janeiro a dezembro dos anos de 2015, 2025 e 2035, considerando solos tipo 2 e tipo 3, pois, como mencionado, a ocorrência de solos tipo 1 é muito baixa.

Tabela 26. Evapotranspiração (ETR) futura, em milímetros, de janeiro a dezembro de 2015, 2025 e 2035, em Telêmaco Borba (PR), considerando solos tipo 2 e tipo 3.

Mês	Tipo 2			Tipo 3		
	2015	2025	2035	2015	2025	2035
	ETR futura (mm)					
Janeiro	4,98	5,63	5,41	4,98	5,63	5,58
Fevereiro	4,82	4,51	4,10	4,83	4,56	4,16
Março	3,97	3,70	3,42	4,00	3,75	3,48
Abril	2,94	3,08	3,37	2,96	3,10	3,37
Mai	2,35	2,46	2,57	2,35	2,46	2,57
Junho	2,14	2,23	2,32	2,14	2,23	2,32
Julho	2,36	2,45	2,54	2,36	2,45	2,54
Agosto	3,33	3,45	3,13	3,36	3,33	2,93
Setembro	3,91	4,00	4,01	3,91	4,01	4,02
Outubro	4,97	5,12	4,94	4,97	5,13	4,98
Novembro	5,27	4,85	3,97	5,30	4,91	4,08
Dezembro	5,56	5,07	4,35	5,56	5,12	4,42

Na Tabela 27 é indicado o balanço hídrico anual-normal para o município de Telêmaco Borba (PR), no período de 1980 a 2015. Chama a atenção que a deficiência hídrica é nula ou muito baixa no ano todo, e há um excedente hídrico.

Tabela 27. Balanço hídrico anual-normal para o período de 1980 a 2015, no município de Telêmaco Borba (PR).

Mês	Precipitação pluviométrica	Deficiência	Armazenamento	Excedente
Janeiro	215	0	100	66
Fevereiro	166	0	100	43
Março	121	0	100	4
Abril	102	0	100	16
Mai	123	0	100	61
Junho	114	0	100	59
Julho	92	0	100	25
Agosto	66	-5	72	0
Setembro	138	0	99	0
Outubro	154	0	100	14
Novembro	136	-1	87	0
Dezembro	174	0	100	3

Com estes resultados a situação é favorável à cultura, existindo restrições climáticas no período seco onde a ETR está entre 2,0 mm a 3,0 mm, indicando baixa demanda hídrica. Não foi observada deficiência hídrica.

Finalmente, a Figura 21 apresenta um resumo completo do balanço hídrico para Telêmaco Borba, no período 1980 a 2015. Como o cálculo foi feito para CAD 100 mm, que é o balanço hídrico normal, os resultados serão ainda melhores para os valores de CAD de 105 mm, 135 mm e 150 mm correspondentes aos solos tipo 1, tipo 2 e tipo 3.

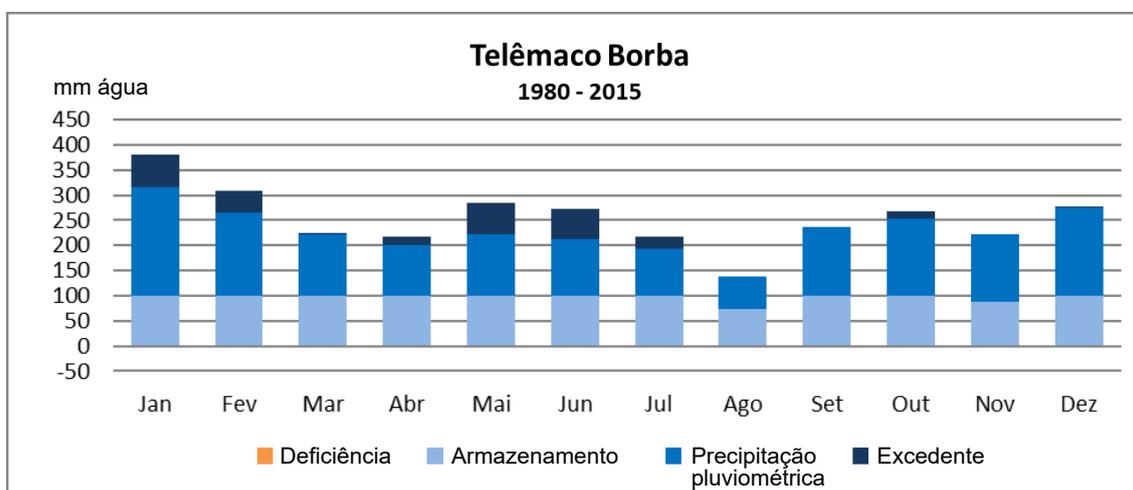


Figura 21. Balanço hídrico normal para Telêmaco Borba (PR), no período 1980 a 2015.

Para verificar o impacto do aquecimento global nos anos futuros, 2010-2020, 2020-2030 e 2030-2040, foram estabelecidos os balanços hídricos para estes anos, considerando o ano central de cada série. Os resultados estão nas Figuras 22, 23 e 24.

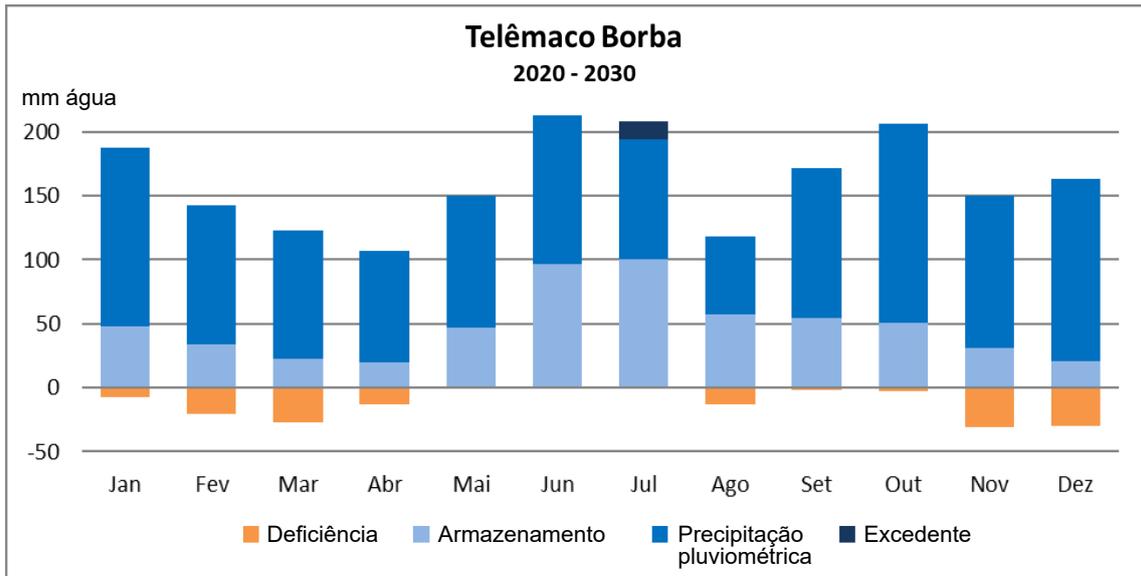


Figura 22. Balanço hídrico em Telêmaco Borba (PR), para o período de 2010 a 2020.

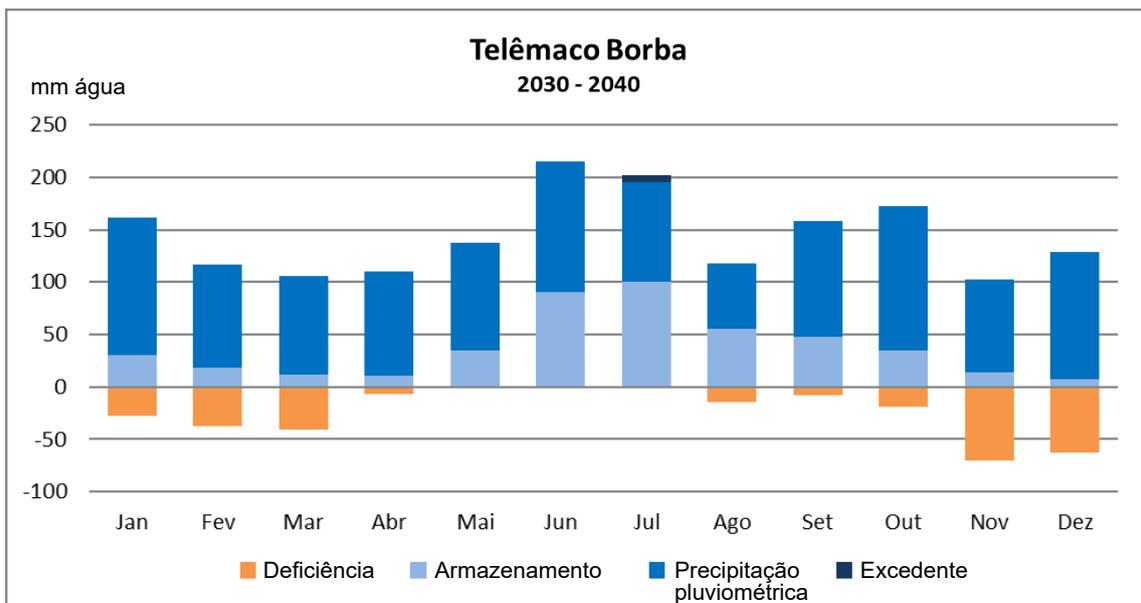


Figura 23. Balanço hídrico para o período de 2020 a 2030, em Telêmaco Borba (PR).

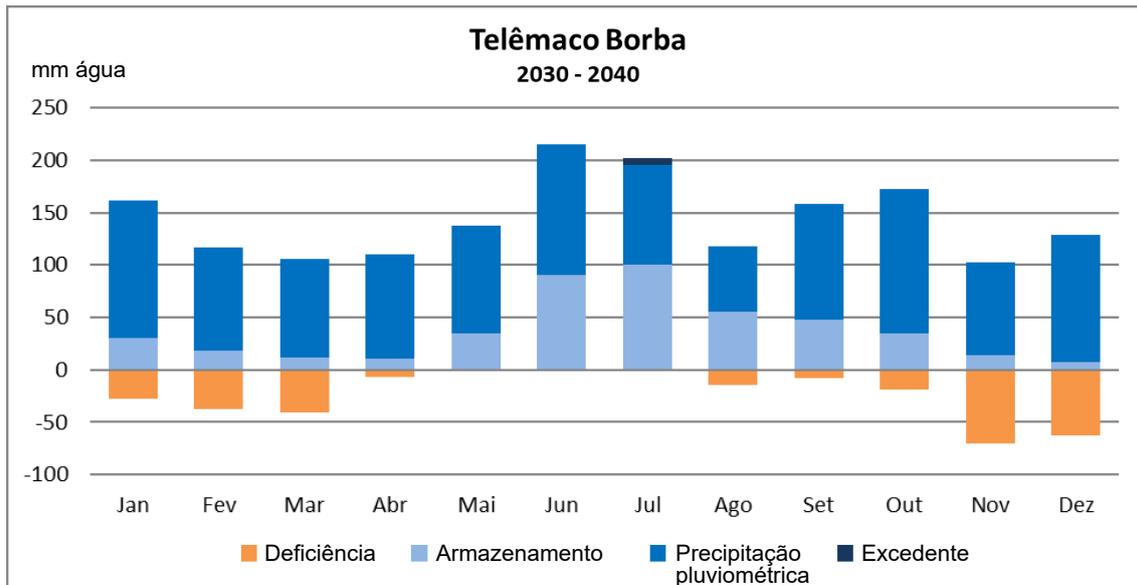


Figura 24. Balanço hídrico para o período de 2030 a 2040, em Telêmaco Borba (PR).

Com o incremento da temperatura em função da estimativa obtida no modelo HadGEM2-ES, a deficiência hídrica ultrapassa o valor crítico de 200 mm/ano no período de 2030 a 2040. O valor máximo estimado foi de deficiência próxima de 287 mm/ano. Poderá haver penalização na produtividade em função desta deficiência.

Na análise de fenômenos extremos no período 1980 a 2015, foram observados para os meses de setembro, outubro, novembro, dezembro e janeiro, respectivamente, 19, 26, 13 e 12 ocorrências de temperatura superior a 34 °C. Não existe uma tendência marcante de crescimento de fenômenos extremos de onda de calor na região. O mesmo pode ser dito sobre o risco de geada. Em 13.011 valores de temperatura mínima analisados, 54 registraram temperaturas menores que 2 °C no abrigo, o que significa, -1,34 °C na superfície da planta, caracterizando a geada. Ou seja, menos de 1% de chance de ocorrência de geadas nessa região. Considerando a precipitação pluviométrica máxima, foram observados três eventos em 35 anos com chuva superior a 100 mm/dia, não havendo, portanto, encharcamentos dos solos, que possam trazer prejuízos para a cultura.

Na Tabela 28 são apresentadas as frequências de ocorrência de dias sem chuva no período de 1980 a 2015. Conforme mencionado anteriormente, períodos sem chuva podem ocorrer durante todos os meses, como indicado na tabela 28, mas podem constituir um veranico, quando ocorrem em período de estiagem com calor intenso. Neste caso são prejudiciais à agricultura. Em Telêmaco Borba, ao longo de 35 anos de análise, foram observadas frequências de, pelo menos, 12% a 14% de ocorrência de veranicos superiores a 30 dias, nos meses de janeiro e dezembro (Tabela 28), ou seja, foi constatada baixa frequência de ocorrência de veranicos.

Tabela 28. Frequências de ocorrência de dias sem chuva, expressas em porcentagem, observados no período de 1980 a 2015 em Telêmaco Borba (PR), destacando os veranicos.

Mês	Duração do período sem chuva (dias)						
	Até 5	6 a 10	11 a 15	16 a 20	21 a 25	26 a 30	31 a 35
Janeiro	40	57	10	2	0	0	12*
Fevereiro	38	48	10	2	0	12	0
Março	26	86	19	5	0	0	17
Abril	24	71	36	7	0	24	0
Mai	24	86	24	10	10	0	17
Junho	24	86	24	10	3	21	0
Julho	29	62	36	14	10	2	14
Agosto	26	60	29	5	10	7	24
Setembro	43	60	19	10	2	14	0
Outubro	21	100	10	0	0	0	14
Novembro	26	86	17	2	0	14	0
Dezembro	45	64	7	7	0	0	14*

* Veranico.

Curvas de crescimento e impacto na produtividade em Telêmaco Borba

A partir dos dados de IMA, incremento corrente anual (ICA) e de produção comercial foi possível construir as curvas de crescimento e as relações com o ISNA, no município de Telêmaco Borba. Na Figura 25 são apresentadas as curvas ajustadas de crescimento para o IMA e ICA na região de Telêmaco Borba, no período de 2005 a 2015. Essas curvas foram ajustadas para dez anos de dados de *E. saligna* e de *E. grandis* x *E. urophylla*. As curvas de IMA e ICA foram ajustadas com os dois conjuntos de dados. Na Figura 25 observa-se que, em Telêmaco Borba, o crescimento máximo se dá no quarto ano após o plantio e o IMA é máximo no quinto ano.

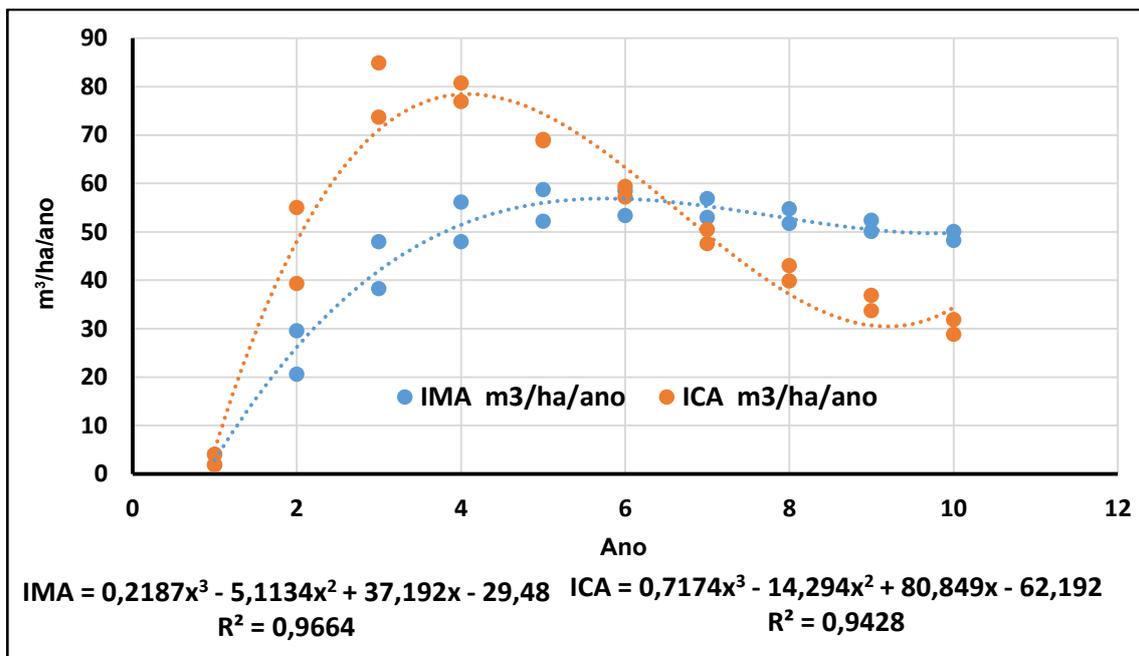


Figura 25. Curvas ajustadas de crescimento para incremento médio anual (IMA) e incremento corrente anual (ICA) de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus saligna* em Telêmaco Borba (PR), no período de 2005 a 2015.

A partir de parâmetros meteorológicos e de dados de campo, foi possível calcular o IMA e o ISNA para os sete primeiros anos da cultura de *E. grandis* x *E. urophylla* e *E. saligna*, em Telêmaco Borba (PR) (Tabela 29). Calculado o ISNA para este período, a curva de crescimento do IMA em função do ISNA foi ajustada, ou seja, dado um determinado ISNA qual seria o valor de IMA estimado pelo modelo. O cálculo para determinação do IMA máximo foi até o sétimo ano, considerado como o principal ano de corte para *E. grandis* x *E. urophylla* e *E. saligna*.

Tabela 29. Variação de IMA (incremento médio anual) e ISNA (índice de satisfação da necessidade de água) após ajuste de curvas, nos primeiros sete anos de cultura de eucalipto, em Telêmaco Borba (PR).

Ano	IMA (m ³ /ha/ano)	ISNA	Ano	IMA (m ³ /ha/ano)	ISNA
<i>Eucalyptus saligna</i>			<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>		
1º	2	0,13	1º	4	0,13
2º	21	0,28	2º	30	0,28
3º	38	0,43	3º	48	0,43
4º	48	0,56	4º	56	0,56
5º	52	0,72	5º	59	0,72
6º	53	0,79	6º	58	0,79
7º	53	0,83	7º	57	0,83

A relação entre o ISNA e o IMA encontra-se na figura 26 e observa-se que o ISNA explica 94% da variância do IMA, ou seja, há uma boa relação entre IMA observado e ISNA estimado.

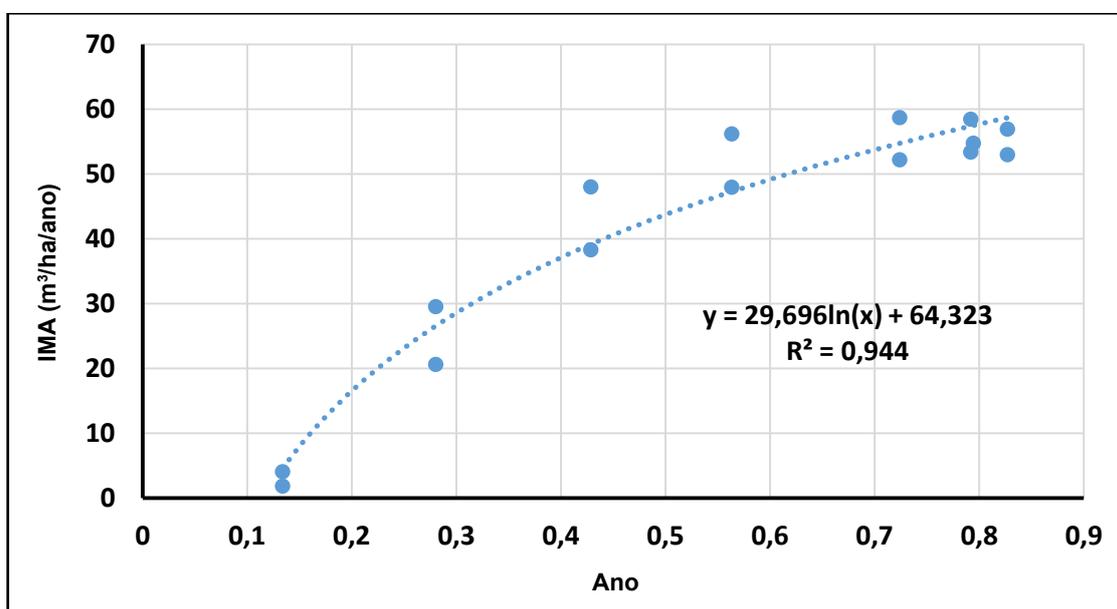


Figura 26. Valor de IMA (incremento médio anual) ajustado em função do ISNA (índice de satisfação da necessidade de água) em Telêmaco Borba (PR), para o período 2005 a 2015.

A variação temporal do IMA no período 1980 a 2040 encontra-se na Figura 27.

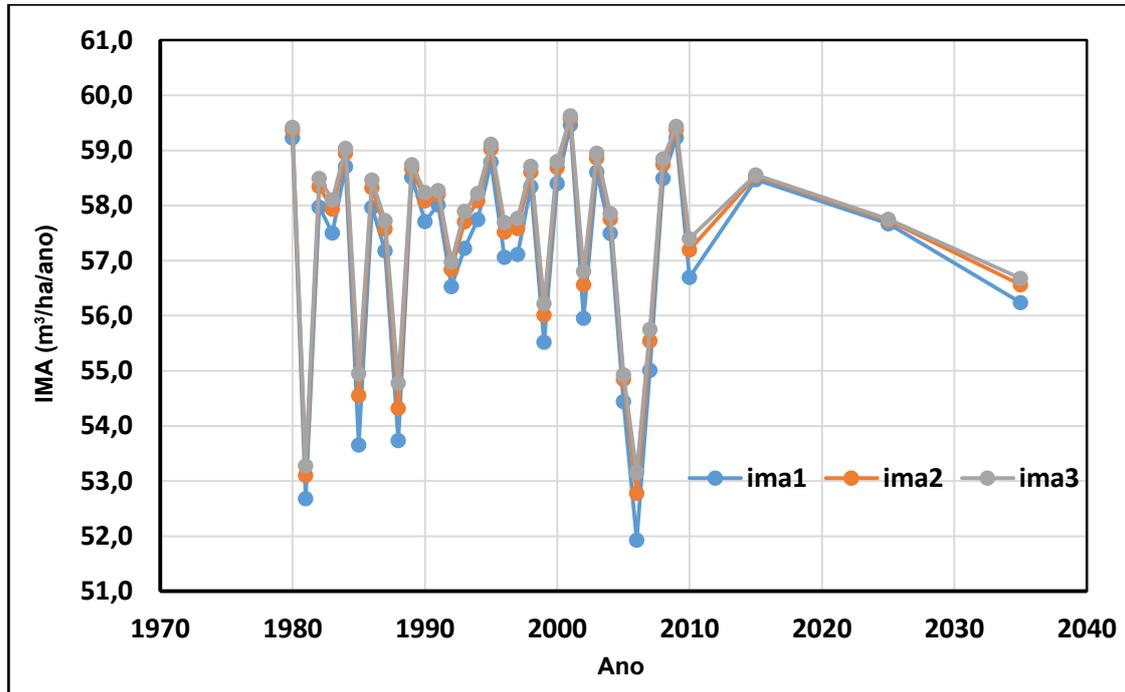


Figura 27. Variação temporal do IMA (incremento médio anual) de 1980 a 2040, para Telêmaco Borba (PR), considerando solo tipo 1 (IMA1), solo tipo 2 (IMA2) e solo tipo 3 (IMA3).

As variações anuais do ISNA (Tabela 30) são mais evidentes nos anos 1981, 1985, 1988 e 2006, onde ocorre uma redução do IMA.

Tabela 30. Variação anual do ISNA (índice de satisfação da necessidade de água) e do IMA (incremento médio anual), para solos tipo 1, 2 e 3 em Telêmaco Borba (PR), no período 1980-2035, com realce em amarelo para os anos de menor oferta pluviométrica.

Ano	ISNA1	ISNA2	ISNA3	IMA1	IMA2	IMA3
m ³ /ha/ano						
1980	0,84	0,85	0,85	59,2	59,4	59,4
1981	0,68	0,69	0,69	52,7	53,1	53,3
1982	0,81	0,82	0,82	58,0	58,4	58,5
1983	0,79	0,81	0,81	57,5	57,9	58,1
1984	0,83	0,83	0,84	58,7	58,9	59,0
1985	0,70	0,72	0,73	53,7	54,6	55,0
1986	0,81	0,82	0,82	58,0	58,3	58,5
1987	0,79	0,80	0,80	57,2	57,6	57,7
1988	0,70	0,71	0,73	53,7	54,3	54,8
1989	0,82	0,83	0,83	58,5	58,7	58,7
1990	0,80	0,81	0,81	57,7	58,1	58,2
1991	0,81	0,81	0,82	58,0	58,2	58,3
1992	0,77	0,78	0,78	56,5	56,8	57,0
1993	0,79	0,80	0,81	57,2	57,7	57,9
1994	0,80	0,81	0,81	57,7	58,1	58,2
1995	0,83	0,84	0,84	58,8	59,0	59,1
1996	0,78	0,80	0,80	57,1	57,5	57,7
1997	0,78	0,80	0,80	57,1	57,6	57,8
1998	0,82	0,82	0,83	58,3	58,6	58,7
1999	0,74	0,76	0,76	55,5	56,0	56,2
2000	0,82	0,83	0,83	58,4	58,7	58,8
2001	0,85	0,85	0,85	59,5	59,6	59,6
2002	0,75	0,77	0,78	56,0	56,6	56,8
2003	0,83	0,83	0,83	58,6	58,9	59,0
2004	0,79	0,80	0,80	57,5	57,8	57,9
2005	0,72	0,73	0,73	54,4	54,8	54,9
2006	0,66	0,68	0,69	51,9	52,8	53,2
2007	0,73	0,74	0,75	55,0	55,5	55,8
2008	0,82	0,83	0,83	58,5	58,7	58,8
2009	0,84	0,85	0,85	59,2	59,4	59,4
2010	0,77	0,79	0,79	56,7	57,2	57,4
2015*	0,82	0,82	0,82	58,5	58,5	58,6
2025*	0,80	0,80	0,80	57,7	57,7	57,8
2035*	0,76	0,77	0,77	56,2	56,6	56,7

*Valores estimados pelo modelo HadGEM2-ES.

Nos anos 1981, 1985, 1988 e 2006, a chuva total anual foi cerca de 350 mm menor do que a média anual, que foi 1.602 mm. Essa redução pode ser explicada pela redução da oferta pluviométrica observada na região, conforme dados da Tabela 31. Ressalte-se que o modelo HADEGEM2-ES2 indica uma tendência de redução de produtividade, mas com impacto muito pequeno em Telêmaco Borba, da ordem de 1 m³/ha/ano a 2 m³/ha/ano.

Tabela 31. Valores de chuva total anual, em milímetros, para a região de Telêmaco Borba (PR), nos anos em que o modelo estimou IMAs menores.

Ano	Chuva anual (mm)	Caracterização do ano
1981	1310	normal
1985	1207	normal
1988	1256	normal
2006*	1242	normal

*Neste ano foram observados dois veranicos de 25 dias e um veranico de 35 dias que podem ter causado a redução do ISNA.

Otacílio Costa (SC)

Para análise das condições críticas, foi inicialmente estabelecido o balanço hídrico para os anos 1980 a 2015, com dados meteorológicos diários³. Por se tratar de um balanço hídrico climático, a CAD estabelecida foi 100 mm. Na Tabela 32 estão os parâmetros de entrada do balanço e na Tabela 33 estão os parâmetros médios mensais para estabelecimento do balanço hídrico.

Tabela 32. Parâmetros de entrada do balanço hídrico de Thornthwaite para a cultura do eucalipto, em Otacílio Costa (SC), considerando o período 1980 - 2015².

Localização	
Latitude (graus)	-27,63 S
Altitude (metros)	884
Solo e clima	
Capacidade de água disponível (mm)	100
Estimativa de temperatura (°C)	Temperatura média
Índice I*	81,52
Índice a*	1,76

* "I e a" são índices de ajuste do balanço hídrico de Thornthwaite.

Tabela 33. Dados climáticos médios mensais para estabelecimento do balanço hídrico, em Otacílio Costa (SC).

Mês	Precipitação pluviométrica (mm)	Temperatura (°C)		
		Máxima	Mínima	Média
Janeiro	178	26,71	16,72	21,72
Fevereiro	166	26,60	16,89	21,74
Março	119	25,61	15,88	20,74
Abril	102	23,01	13,58	18,30
Maiο	114	19,78	10,44	15,11
Junho	112	18,16	8,81	13,48
Julho	139	17,88	8,25	13,06
Agosto	113	19,76	9,32	14,54
Setembro	160	20,11	10,41	15,26
Outubro	172	22,10	12,54	17,32
Novembro	131	24,10	13,94	19,02
Dezembro	151	25,85	15,59	20,72

³ O período foi estendido até 2015, em função das curvas de produtividade.

Na Tabela 34 são apresentadas as probabilidades de ocorrência da ETR para o município de Otacílio Costa (SC), nos meses de janeiro a dezembro, considerando solos tipo 2 e tipo 3, visto que a ocorrência de solos tipo 1 é muito baixa. Observa-se que não ocorreram condições desfavoráveis para silvicultura de modo geral.

Tabela 34. Probabilidade de ocorrência, em porcentagem, de evapotranspiração real (ETR) no período de 1980 a 2015, em Otacílio Costa (SC).

Mês	ETR (mm)							
	Solo tipo 2				Solo tipo 3			
	0 a 3	3 a 5	5 a 7	> 7	0 a 3	3 a 5	5 a 7	> 7
	Probabilidade de ocorrência de ETR (%)							
Janeiro	0	92	8	0	0	92	8	0
Fevereiro	3	97	0	0	3	97	0	0
Março	36	64	0	0	36	64	0	0
Abril	100	0	0	0	100	0	0	0
Mai	100	0	0	0	100	0	0	0
Junho	100	0	0	0	100	0	0	0
Julho	100	0	0	0	100	0	0	0
Agosto	100	0	0	0	100	0	0	0
Setembro	97	3	0	0	97	3	0	0
Outubro	8	92	0	0	8	92	0	0
Novembro	0	100	0	0	0	100	0	0
Dezembro	6	94	0	0	3	97	0	0

Na Tabela 35 encontram-se os valores de ETR futura, em milímetros, nos meses de janeiro a dezembro dos anos de 2015, 2025 e 2035, considerando solos tipo 2 e tipo 3, pois, como mencionado, a ocorrência de solos tipo 1 é muito baixa.

Tabela 35. Evapotranspiração real (ETR) futura, em milímetros, nos meses de janeiro a dezembro dos anos de 2015, 2025 e 2035, considerando solos tipo 2 e tipo 3, em Otacílio Costa (SC).

Mês	Tipo 2			Tipo 3		
	2015	2025	2035	2015	2025	2035
	ETR futura (mm)					
Janeiro	4,72	4,85	4,96	4,72	4,85	4,96
Fevereiro	4,13	4,16	4,20	4,13	4,16	4,20
Março	3,39	3,46	3,52	3,39	3,46	3,52
Abril	2,44	2,49	2,54	2,44	2,49	2,54
Mai	1,61	1,67	1,72	1,61	1,67	1,72
Junho	1,46	1,50	1,54	1,46	1,50	1,54
Julho	1,51	1,58	1,65	1,51	1,58	1,65
Agosto	2,41	2,53	2,66	2,41	2,53	2,66
Setembro	2,74	2,80	2,86	2,74	2,80	2,86
Outubro	3,63	3,74	3,85	3,63	3,74	3,85
Novembro	4,35	4,51	4,66	4,35	4,51	4,66
Dezembro	4,74	4,96	5,18	4,74	4,96	5,18

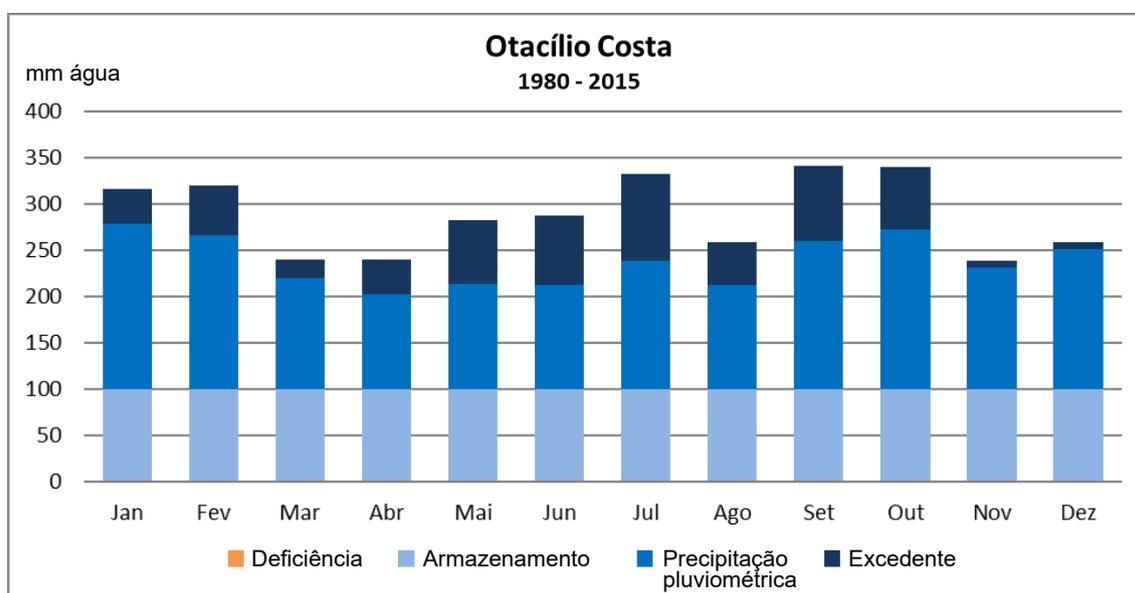
Na Tabela 36 tem-se o balanço hídrico anual-normal para o período de 1980 a 2015. Chama a atenção que a deficiência hídrica é nula ou muito baixa no ano todo, e há um excedente hídrico.

Tabela 36. Balanço hídrico anual-normal para o período de 1980 a 2015, no município de Otacílio Costa (SC).

Meses	Precipitação pluviométrica	Deficiência	Armazenamento	Excedente
Janeiro	178	0	100	38
Fevereiro	166	0	100	54
Março	119	0	100	21
Abril	102	0	100	37
Mai	114	0	100	69
Junho	112	0	100	74
Julho	139	0	100	93
Agosto	113	0	100	45
Setembro	160	0	100	81
Outubro	178	0	100	38
Novembro	166	0	100	54
Dezembro	119	0	100	21

Estes resultados indicam situação favorável à cultura do eucalipto em Otacílio Costa, existindo restrições climáticas no período seco, quando a ETR está entre 2,0 mm e 3,0 mm, indicando baixa demanda hídrica. Não foi observada deficiência hídrica.

Como o cálculo foi feito para CAD 100 mm, que é o balanço hídrico normal, os resultados serão ainda melhores para as CAD de 105 mm, 135 mm e 150 mm correspondentes aos solos tipo 1, tipo 2 e tipo 3, respectivamente. Finalmente, a Figura 28 apresenta um resumo completo do balanço hídrico para Otacílio Costa, no período 1980 a 2015.

**Figura 28.** Balanço hídrico normal para Otacílio Costa (SC), no período 1980 a 2015.

Para verificar o impacto do aquecimento global nos anos futuros, 2010-2020, 2020-2030 e 2030-2040, foram estabelecidos os balanços hídricos para estes anos, considerando o ano central de cada série, e que encontram nas Figuras 29, 30 e 31, respectivamente.

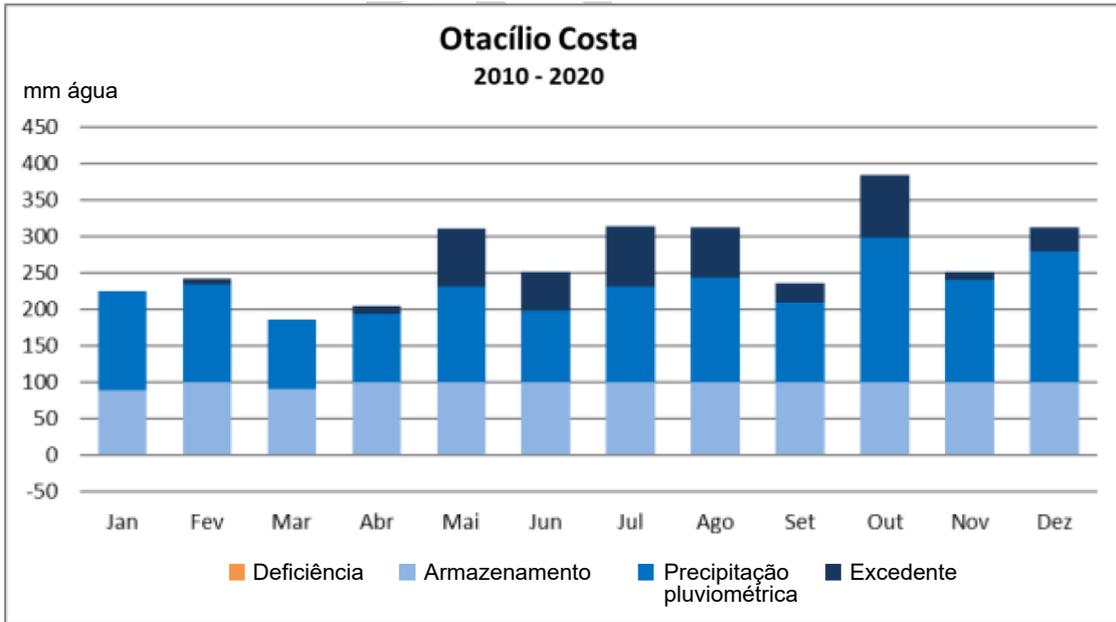


Figura 29. Balanço hídrico em Otacílio Costa (SC) para o período de 2010 a 2020.

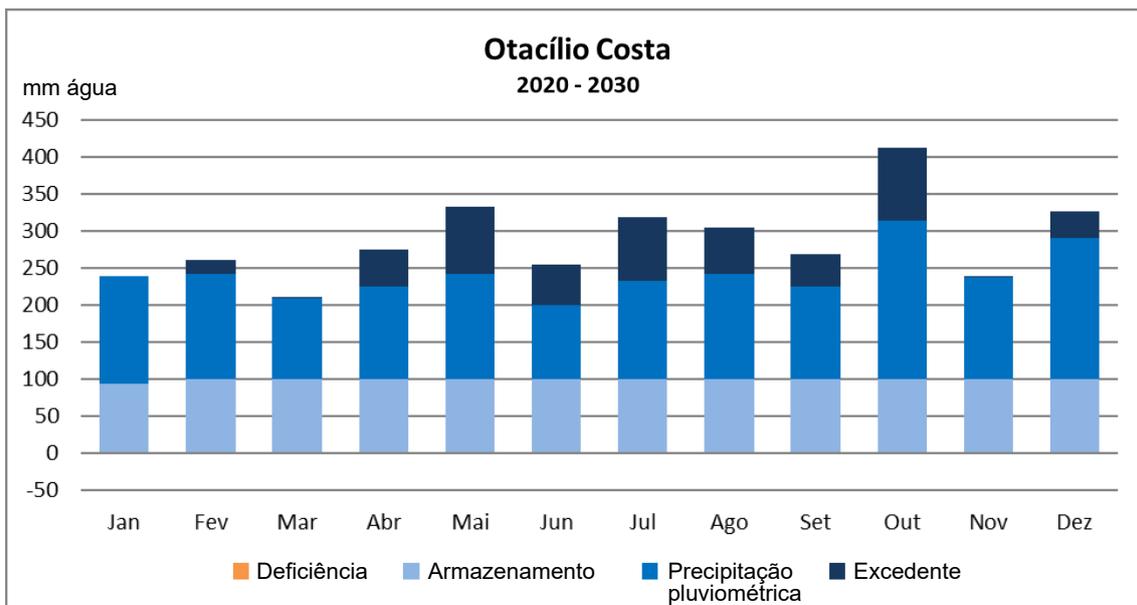


Figura 30. Balanço hídrico em Otacílio Costa (SC), para o período de 2020 a 2030.

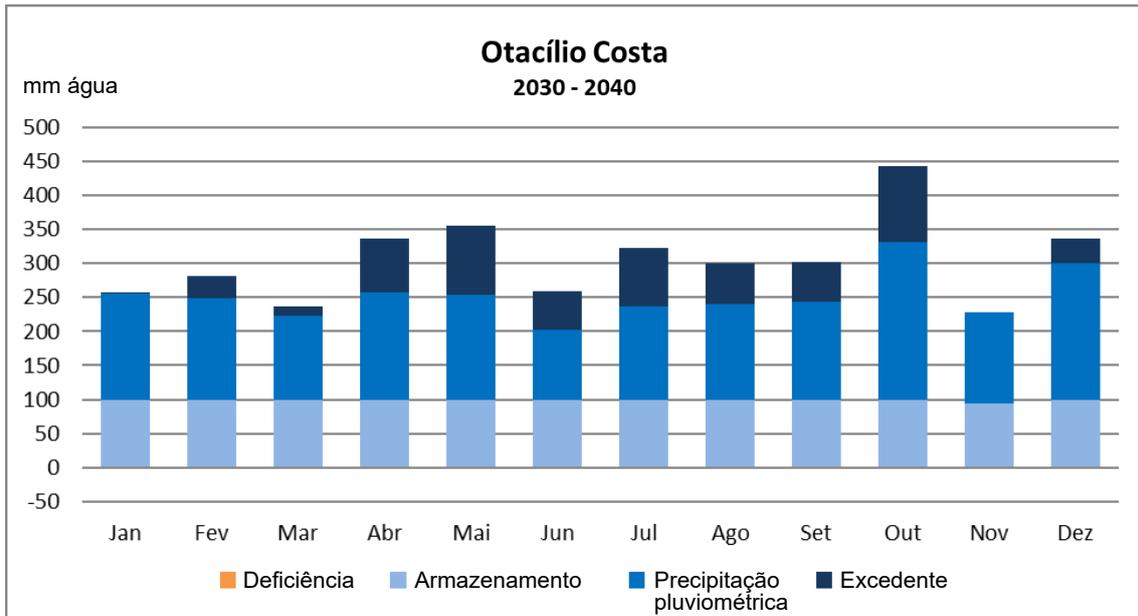


Figura 31. Balanço hídrico em Otacílio Costa (SC), para o período de 2030 a 2040.

Com o incremento da temperatura em função da estimativa obtida no modelo HadGEM2-ES, a deficiência hídrica em nenhum momento ultrapassa o valor crítico de 200 mm/ano, no período de 2010 a 2040.

Na análise de fenômenos extremos foram observadas cinco ocorrências de temperatura superior a 34 °C nos meses de outubro, novembro, dezembro e janeiro. Não existe uma tendência marcante de crescimento de fenômenos extremos de onda de calor na região. O mesmo não pode ser dito sobre o risco de geada. Em 13.092 valores de temperatura mínima analisados, 244 foram temperaturas menores que 2 °C no abrigo, o que significa -1,34 °C na superfície da planta, caracterizando a geada. Portanto, a região é fortemente propícia à ocorrência de geadas. Considerando a precipitação pluviométrica máxima, em 35 anos foi observado somente um evento de chuva superior a 100 mm/dia, não havendo, portanto, risco de encharcamento de solo, que possa trazer prejuízos para a cultura. Não se observou deficiência hídrica, mas um cuidado adicional deve ser tomado com os solos mais rasos, que podem causar deficiência de oxigenação às raízes.

Na Tabela 36 são apresentadas as frequências de dias consecutivos sem chuvas no período de 1980 a 2015. Observa-se que não existem períodos críticos com veranicos marcantes no município de Otacílio Costa, dada a muita baixa frequência de ocorrência de veranicos (Tabela 36).

Tabela 36. Frequências de ocorrência de dias sem chuva, expressas em porcentagem, observadas no período de 1980 a 2015, em Otacílio Costa (SC).

Mês	Duração do período sem chuva (dias)						
	Até 5	6 a 10	11 a 15	16 a 20	21 a 25	26 a 30	31 a 35
Janeiro	62	74	9	3	0	0	0
Fevereiro	29	62	12	0	0	0	0
Março	53	100	15	6	0	0	0
Abril	41	100	44	9	3	0	0
Mai	44	88	29	12	9	0	6
Junho	59	100	38	12	0	0	0
Julho	26	100	26	6	3	0	0
Agosto	26	100	38	9	6	9	0
Setembro	47	94	21	0	3	6	0
Outubro	50	91	15	0	0	0	3
Novembro	41	100	12	0	0	6	0
Dezembro	47	100	18	3	0	0	3

A partir dos dados de IMA, ICA e de produção comercial, foi possível construir curvas de crescimento e as relações com o ISNA, no município de Otacílio Costa. Na Figura 32 observa-se que, em Otacílio Costa, o máximo valor de crescimento de ICA se dá no quarto ano após o plantio e para o IMA é o quinto ano após o plantio.

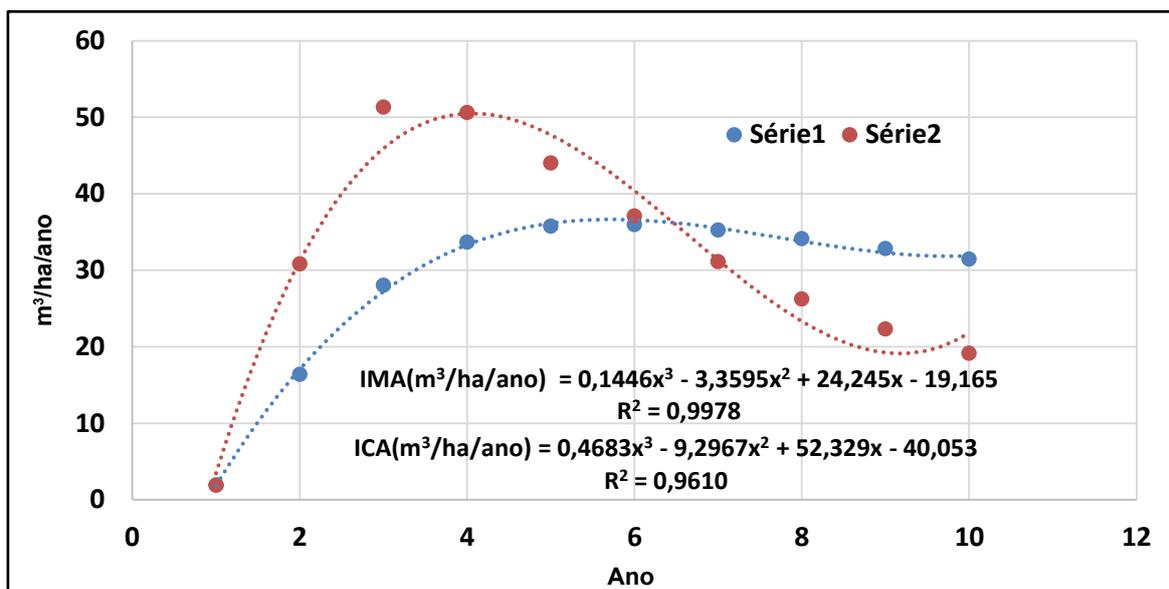


Figura 32. Curvas ajustadas de crescimento para incremento médio anual (IMA) e incremento corrente anual (ICA) de *Eucalyptus benthamii* e *Eucalyptus dunnii* em Otacílio Costa (SC), no período de 2005 a 2015.

A partir de parâmetros meteorológicos e de dados de campo, foi possível calcular o IMA e o ISNA para os sete primeiros anos da cultura do eucalipto em São Paulo (Tabela 37).

Tabela 37. Variação de incremento médio anual (IMA) e índice de satisfação de necessidade de água (ISNA), após ajuste de curvas, nos primeiros sete anos de cultura de eucalipto, em Otacílio Costa (SC).

Ano	IMA (m ³ /ha/ano)	ISNA	Ano	IMA (m ³ /ha/ano)	ISNA
<i>Eucalyptus dunnii</i>			<i>Eucalyptus benthamii</i>		
1º	1	0,14	1º	2	0,14
2º	14	0,34	2º	16	0,34
3º	27	0,50	3º	28	0,50
4º	34	0,60	4º	34	0,60
5º	37	0,75	5º	36	0,75
6º	39	0,87	6º	36	0,87
7º	39	0,86	7º	35	0,86

Calculado o ISNA para este período, foi ajustada a curva de crescimento em função do ISNA, ou seja, dado um determinado ISNA qual o valor de IMA estimado pelo modelo. O cálculo para determinação do IMA máximo foi até o sétimo ano, considerado como o principal ano de corte.

A relação entre o ISNA e o IMA é apresentada na Figura 33, na qual se observa que o ISNA explica 97% da variância do IMA, ou seja, há uma boa relação entre IMA observado e ISNA estimado. A variação temporal do IMA no período 1980 a 2040 é apresentada na Figura 34.

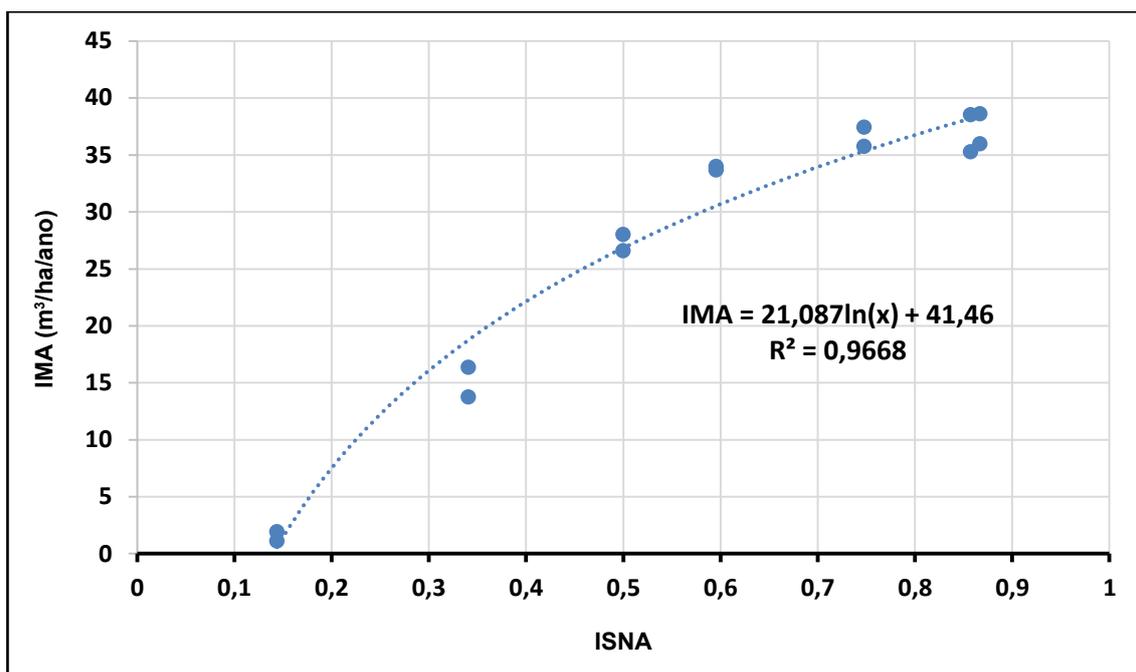


Figura 33. Valor de incremento médio anual (IMA) ajustado em função do índice de satisfação de necessidade de água (ISNA) determinado, para região de Otacílio Costa, no período 2005 a 2015.

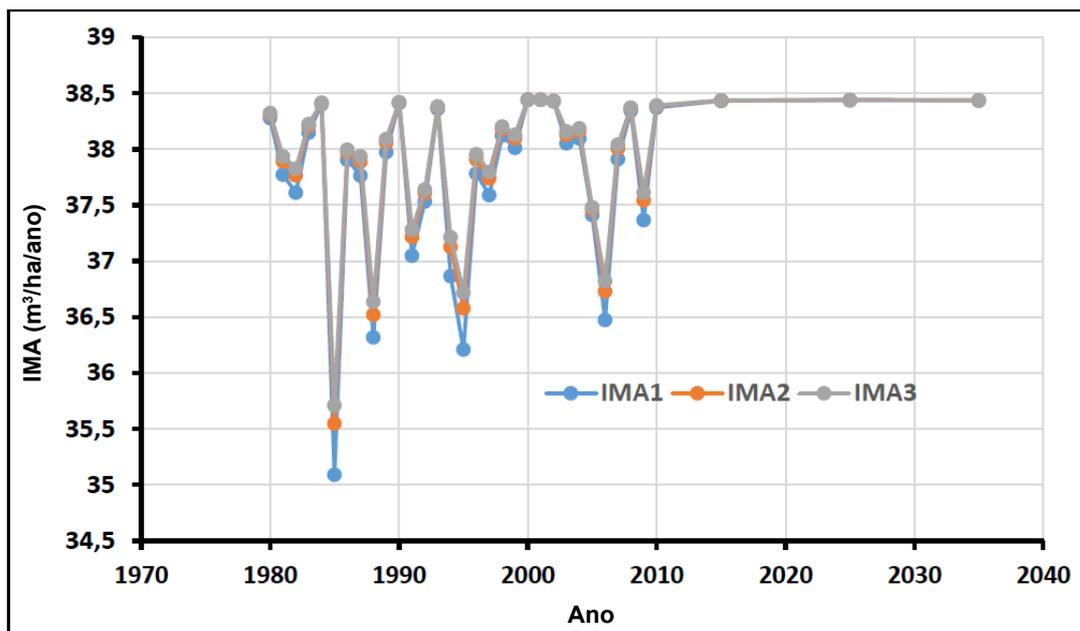


Figura 34. Variação temporal do incremento médio anual (IMA) de 1980 a 2040, para Otacílio Costa (SC), considerando solo 1 (IMA3), solo 2 (IMA2) e solo 3 (IMA1).

Nos anos 1985, 1988, 1995 e 2006, a precipitação pluviométrica total anual foi aproximadamente 400 mm menor que a média anual que foi 1.658 mm (Tabela 38). Por isso, as variações anuais do ISNA (Tabela 39) são mais evidentes nesses anos, quando aparece uma redução do IMA. Ressalte-se que o modelo HadGEM2-ES não indica uma tendência de redução de produtividade do eucalipto nesta região.

Tabela 38. Valores de chuva total anual, em milímetros, para a região de Otacílio Costa, nos anos em que o modelo estimou IMAs menores.

Ano	Chuva anual (mm)	Caracterização do ano
1985	1210	seco
1988	1123	seco
1995	1256	seco
2006	1037	seco

Tabela 39. Variação anual do índice de satisfação de necessidade de água (ISNA) e do IMA (m³/ha/ano) para solos tipo 1, tipo 2 e tipo 3 em Otacílio Costa (SC), no período 1980-2035, com realce em amarelo para os anos de menor oferta pluviométrica.

ANO	ISNA1	ISNA2	ISNA3	IMA 1	IMA2	IMA3
1980	0,86	0,86	0,86	38,27	38,31	38,32
1981	0,84	0,84	0,85	37,77	37,89	37,94
1982	0,83	0,84	0,84	37,61	37,77	37,83
1983	0,85	0,86	0,86	38,15	38,21	38,23
1984	0,87	0,87	0,87	38,40	38,41	38,41
1985	0,74	0,76	0,76	35,09	35,55	35,71
1986	0,84	0,85	0,85	37,91	37,97	38,00
1987	0,84	0,84	0,85	37,77	37,89	37,94
1988	0,78	0,79	0,80	36,32	36,52	36,64
1989	0,85	0,85	0,85	37,98	38,06	38,09
1990	0,87	0,87	0,87	38,41	38,42	38,42
1991	0,81	0,82	0,82	37,05	37,22	37,28
1992	0,83	0,83	0,83	37,53	37,61	37,64
1993	0,86	0,86	0,86	38,36	38,38	38,38
1994	0,80	0,81	0,82	36,87	37,13	37,21
1995	0,78	0,79	0,80	36,21	36,58	36,72
1996	0,84	0,85	0,85	37,78	37,91	37,96
1997	0,83	0,84	0,84	37,59	37,74	37,80
1998	0,85	0,86	0,86	38,12	38,18	38,20
1999	0,85	0,85	0,85	38,01	38,10	38,13
2000	0,87	0,87	0,87	38,44	38,44	38,44
2001	0,87	0,87	0,87	38,44	38,44	38,44
2002	0,87	0,87	0,87	38,43	38,43	38,43
2003	0,85	0,85	0,86	38,05	38,13	38,16
2004	0,85	0,86	0,86	38,10	38,16	38,19
2005	0,83	0,83	0,83	37,41	37,46	37,48
2006	0,79	0,80	0,80	36,47	36,73	36,82
2007	0,85	0,85	0,85	37,91	38,01	38,04
2008	0,86	0,86	0,86	38,35	38,37	38,37
2009	0,82	0,83	0,83	37,37	37,54	37,61
2010	0,86	0,86	0,86	38,37	38,39	38,39
2015*	0,87	0,87	0,87	38,43	38,44	38,44
2025*	0,87	0,87	0,87	38,44	38,44	38,44
2035*	0,87	0,87	0,87	38,44	38,44	38,44

*Valores estimados pelo modelo HadGEM2-ES.

Acúmulo de carbono na floresta plantada com eucalipto

Nos países em desenvolvimento, a agricultura, a pecuária, a pesca e a silvicultura respondem por 25% dos danos e perdas relacionados a eventos extremos ocasionados pelas alterações nos padrões climáticos, relacionados a mudanças do clima (FAO, 2015a). Considerando-se a perspectiva de aumento da ocorrência desses eventos, num cenário de aumento populacional e, por consequência, das demandas por alimentos, fibras e energia, o desafio é entender como os ambientes e as culturas serão afetadas, para orientar os esforços no sentido de minimizar o impacto por meio das estratégias de adaptação e mitigação, evitando ou, ao menos, reduzindo as perdas do potencial produtivo.

Mundialmente, entre 1991 e 2015, as florestas plantadas foram responsáveis por um sumidouro médio de aproximadamente $1,1 \text{ Gt CO}_2 \text{ ano}^{-1}$ (Federici et al., 2015). Desde o estabelecimento da Convenção de Mudanças do Clima em 1992, tem-se observado um rápido e complexo reconhecimento do papel das florestas na política das mudanças globais do clima, seja pelo compromisso do protocolo de Kyoto, das ações de mitigação nacionalmente apropriadas, REDD+ ou mesmo pelo Acordo de Paris (Brasil, 2016), onde o Brasil se comprometeu em reduzir 37% das emissões nacionais de GEE, do ano de 2005 até 2025. Entre as ações elencadas para atingir essa meta está o indicativo de restaurar e reflorestar 12 milhões de hectares. Segundo dados das IBÁ (2014; 2020), o incremento da área plantada com florestas verificado entre 2006 e 2019 foi 2,8 milhões de ha, abaixo da meta nacional estabelecida pelo Plano ABC, que era de três milhões de ha até 2020 (Brasil, 2012). Todavia, a expansão da eucaliptocultura nesse mesmo período atingiu 3,5 milhões de hectares (IBÁ, 2014, 2020).

Percebe-se que o setor de florestas plantadas está inserido nos compromissos nacionais como estratégia para a mitigação da emissão de GEE. Os principais reservatórios de carbono da floresta são a biomassa vegetal e o carbono do solo. Segundo a FAO (2015b), esses dois compartimentos representam mais de 75% do carbono contido na floresta. Para contabilizar o carbono contido no reservatório da biomassa vegetal são adotadas relações com a produtividade das culturas, como aquelas representadas no guia metodológico do IPCC (Eggleston et al., 2006). Já para estimar os estoques de carbono no solo, o guia se vale de relações entre as conversões de uso envolvendo as florestas plantadas.

Carbono da biomassa vegetal

A eucaliptocultura brasileira é mundialmente reconhecida pelo alto potencial produtivo, alcançando incremento médio anual maior que $40 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{ano}$ em plantios comerciais não raras vezes, e como média nacional $35,3 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{ano}$ (IBÁ, 2020). Todo esse incremento em produtividade decorre do melhoramento genético e de práticas de manejo silviculturais altamente especializadas, que foram aperfeiçoadas ao longo de décadas de produção. As práticas de manejo das florestas plantadas com respeito à proteção florestal, têm mudado seu enfoque. Tempos atrás, as principais preocupações quanto aos riscos para as florestas plantadas se concentravam em incêndios, pragas e doenças. Recentemente, os danos causados por ventos têm sido um dos principais problemas, juntamente com a ocorrência de secas (Foelkel, 2014), sendo que os impactos desses fenômenos estão sendo intensificados pelas mudanças climáticas.

Como exemplo da dimensão desses problemas, no Mato Grosso do Sul, um dos estados com maior aumento da área plantada de eucalipto na última década, entre os anos de 2014 a 2019, os danos causados por ventos atingiram 8% da área de florestas plantadas. Esse impacto refletiu na perda total de 40% desses reflorestamentos, resultando em prejuízos econômicos diretos advindos da redução na produtividade, além de outros de ordem operacional tais como a dificuldade nas operações de silvicultura, a elevação dos riscos de acidentes e o aumento do custo de colheita (Dias; Silva, 2019). Segundo estudos desenvolvidos em Minas Gerais, o aumento do custo operacional da colheita de florestas com esses danos pode ser de 38% a 55%, dependendo do nível de dano (Cardoso et al., 2011).

No período entre 2002 e 2016, percebeu-se uma retração do IMA da cultura do eucalipto (IBÁ, 2014, 2020). Entre os aspectos ponderados para essa variação negativa estão dois fatores climáticos registrados neste período:

- Em Minas Gerais, estado com maior área plantada de eucalipto, as variações climáticas e a escassez de chuvas têm sido eventos frequentes, principalmente no Cerrado mineiro. No final da última década, dados da Emater/MG indicavam perdas em mais de 150 mil hectares de cultivos (Paula, 2018);
- A seca na região Sudeste do Brasil, em 2014–2017, com chuvas irregulares e pouco expressivas entre 2013 e 2015, se iniciou em São Paulo e estendeu-se aos demais estados do Sudeste; abrangendo várias áreas dos estados de Minas Gerais e Espírito Santo em 2016 e 2017 (Gonçalves et al., 2017).

Como já demonstrado nas seções anteriores e nos exemplos breves mencionados anteriormente, as alterações nos padrões climáticos (chuva, temperatura, evapotranspiração e déficit hídrico) podem afetar a produtividade das culturas florestais e, por conseguinte, a produção de produtos madeireiros e os estoques de carbono contidos na floresta, afetando inclusive o potencial de remoção de carbono das florestas plantadas.

Baseado na projeção dos IMAs até 2035 da região e dos municípios analisados individualmente (Tabelas 10; 21; 30 e 39), desenvolveu-se a estimativa do potencial de remoção anual de carbono pela floresta de eucalipto e do estoque de carbono acumulado contido nas florestas de eucalipto, mensurando qual o impacto no estoque de carbono devido às mudanças projetadas nas variáveis climáticas.

As estimativas se basearam nas metodologias empregadas no 3º Relatório de referência de emissões e remoções do “setor uso da terra, mudança do uso da terra e floresta” (Brasil, 2015), segundo IPCC (Eggleston et al., 2006). O método preconizado pelo IPCC (Eggleston et al., 2006) para a estimativa do carbono de plantios florestais sugere o uso da produtividade média das florestas em volume (IMA) como a base para o cálculo de carbono. A partir do IMA em volume foram estimados os incrementos anuais de C do eucalipto, que considerou a contribuição da biomassa vegetal da parte aérea e das raízes (IncRef). Os parâmetros adotados na estimativa do IncRef são apresentados na Tabela 40. Assim, o incremento médio anual de carbono na biomassa do eucalipto (em t C ha⁻¹ ano⁻¹) foi obtido pelo produto do IMA, pela densidade básica da madeira, fator de expansão de biomassa, razão biomassa parte aérea/raiz e %C na biomassa vegetal.

Tabela 40. Parâmetros empregados na estimativa do incremento médio de carbono anual da cultura do eucalipto em t C/ha/ano.

Parâmetros	Valor	Fonte
Densidade madeira (kg/m ³)	0,425	Brasil (2015)
Fator expansão biomassa	1,2	Brasil (2015)
Razão raiz/parte aérea	0,35	Brasil (2015)
Teor de C na biomassa (%)	0,47	Eggleston et al. (2006)

O incremento médio anual do eucalipto foi estimado pelos IMAs médios da região estudada e dos municípios. Para as estimativas regionais de estoque de carbono, considerou-se como área de plantio de eucalipto aquela correspondente à soma dos estados de SC, PR e SP, representando a região de estudo. A evolução da área plantada com eucalipto nessa região é ilustrada na Figura 35. Nos últimos anos o ritmo do plantio de floresta na região esteve acima de 100 mil hectares por ano, o que é uma taxa de plantio quatro vezes maior que aquela ocorrida no período anterior (2004-2014) e indica um investimento consistente no setor florestal.

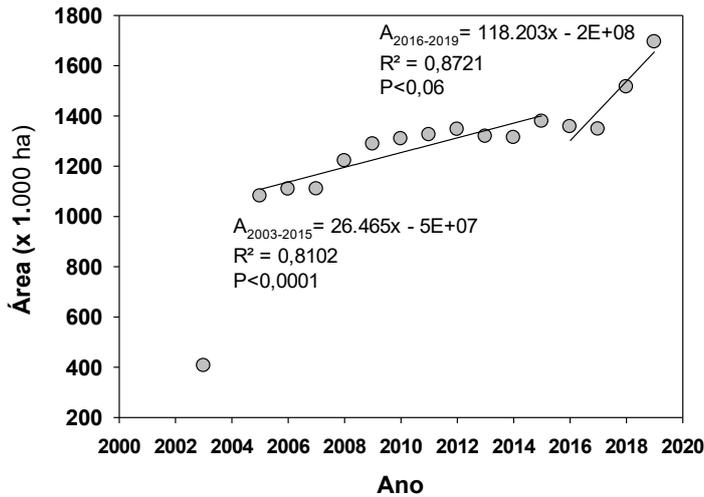


Figura 35. Evolução da área plantada com florestas de eucalipto nos estados de SP, PR e SC.

Fonte: Adaptado de IBÁ (2020).

O C retirado da atmosfera pelo eucalipto, no ano de 2019, na região de estudo correspondeu a aproximadamente 30 milhões de toneladas, com estoque armazenado nas florestas de eucalipto equivalente a 137 Mt de C (Figura 36). O IncRef do eucalipto, entre 2003 e 2035, variou de 15,8 t a 18 t C/ha/ano, e tem como valor potencial 18,4 t C/ha/ano (Figura 36). O valor projetado para 2035 foi 17,9 t C/ha/ano, que reflete a perda de menos de 1% no incremento anual de carbono projetado e de 3% em relação ao valor máximo, considerado aqui como potencial (Figura 36). Essa queda no IncRef projetado para 2035 se originou de uma perda no potencial do IMA de 0,3 m³/ha/ano apenas (Tabela 10). Nesse cenário, em 2035, o Brasil deixaria de retirar da atmosfera aproximadamente 580 mil toneladas de C/ano. Caso essa perda não seja registrada, ou seja, evitada por práticas de adaptação e mitigação, e a área de produção continue com o ritmo de crescimento observado no período de 2016 a 2019 (aproximadamente 118 mil hectares/ano), o potencial de remoção anual de carbono pelo eucalipto nessa região atingirá 320 milhões de toneladas de carbono em 2035 (Figura 36). No entanto, se a projeção de perda no IMA for confirmada, a remoção de carbono que deixará de ser contabilizada pode chegar a oito milhões de toneladas (Figura 36). Essa redução potencial na remoção do carbono em 2035 seria equivalente a negligenciar o C acumulado por 450 mil de hectares de florestas de eucalipto no País.

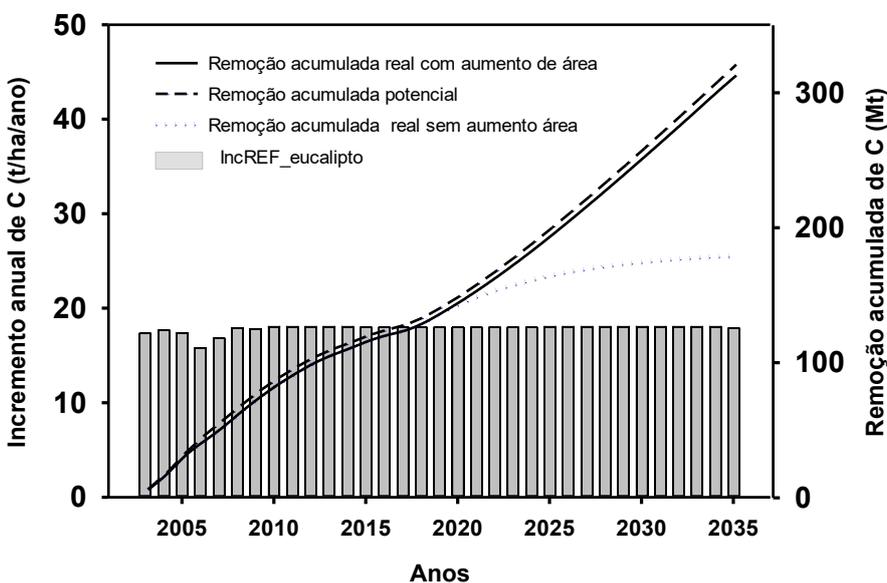


Figura 36. Incremento médio anual (IncRef) e remoção acumulada de carbono pela cultura do eucalipto, no período de 2003 e 2019 e a projeção até 2035.

O IncRef foi calculado para os municípios de Itapetininga, Telêmaco Borba e Otacílio Costa (Tabela 41). Na comparação, Itapetininga e Telêmaco Borba apresentaram valores de IncRef para o eucalipto muito semelhantes, variando de 17 tC/ha/ano a 20 tC/ha/ano. Já para Otacílio Costa, o IncRef do eucalipto variou de 11,8 tC/ha/ano a 12,4 tC/ha/ano, ou seja, inferior ao mencionado nos demais municípios. Os valores de IncRef projetados para 2025 e 2035, tanto para Itapetininga como para Telêmaco Borba, indicam perdas no incremento anual de até 2 tC/ha/ano, enquanto para Otacílio Costa não deve haver perdas. Portanto, praticamente não haverá redução na capacidade de remover C pelo eucalipto em Otacílio Costa, mas em Itapetininga e Telêmaco Borba poderá haver perdas de até 5% e 12%, respectivamente.

Tabela 41. Incremento médio anual (IncRef) em t C/ha/ano do eucalipto nos municípios de Itapetininga (SP), Telêmaco Borba (PR) e Otacílio Costa (SC).

Anos	Itapetininga			Telêmaco Borba			Otacílio Costa		
	Solo1	Solo2	Solo3	Solo1	Solo2	Solo3	Solo1	Solo2	Solo3
2003	18,9	19,1	19,1	19,0	19,1	19,1	12,3	12,3	12,3
2004	18,3	18,5	18,6	18,6	18,7	18,7	12,3	12,3	12,4
2005	18,4	18,5	18,5	17,6	17,7	17,8	12,1	12,1	12,1
2006	17,8	18,0	18,1	16,8	17,1	17,2	11,8	11,9	11,9
2007	17,2	17,4	17,5	17,8	18,0	18,1	12,3	12,3	12,3
2008	17,5	17,8	17,9	18,9	19,0	19,0	12,4	12,4	12,4
2009	19,5	19,6	19,6	19,2	19,2	19,2	12,1	12,1	12,2
2010	17,7	17,9	18,0	18,3	18,5	18,6	12,4	12,4	12,4
2015	18,8	18,9	17,9	18,9	18,9	19,0	12,4	12,4	12,4
2025	18,4	18,5	17,8	18,7	18,7	18,7	12,4	12,4	12,4
2035	17,5	17,8	17,3	18,2	18,3	18,3	12,4	12,4	12,4
Potencial	19,5	19,6	19,6	19,3	19,3	19,3	12,4	12,4	12,4

*Valor potencial é o mais alto valor já registrado ou projetado.

O tipo de solo praticamente não afetou a perda do IncRef do eucalipto, com variações inferiores a 3% em Itapetininga e 1% em Telêmaco Borba. Muito se discute a capacidade de solos com maior teor de argila em reter maiores quantidades de água no solo e, assim, contribuir para amenizar estresses hídricos das plantações. Porém, nesta comparação, as diferenças na quantidade de água disponível dos solos tipo 1, tipo 2 e tipo 3 não refletiu em acúmulo de C na biomassa do eucalipto.

É evidente que as mudanças do clima estão afetando o potencial de acúmulo de carbono dos plantios florestais. Contudo, algumas regiões serão mais impactadas que outras, assim como alguns ambientes ou sítios de produção podem ser mais suscetíveis, dependendo das suas características. Também é importante ressaltar que as perdas não devem ser restritas ao C armazenado na biomassa vegetal, uma vez que florestas plantadas são transformadas em produtos florestais que podem também ser drenos de C por longos períodos, dependendo da manufatura a que se destina.

Diante dessas projeções, entre as melhores estratégias para proteger as florestas da perda de potencial produtivo, e por consequência da capacidade de mitigação de gases de efeito estufa, deve estar a melhoria dos materiais genéticos, incluindo características quanto à resistência aos principais riscos a que o eucalipto esteja propenso, resistência a estresse hídrico, elevadas temperaturas, menor evapotranspiração e resistência a ventos. De forma otimista, é possível que parte dessa redução na capacidade de mitigação seja compensada por ganhos de produtividade pela seleção e melhoramento genético. Contudo, as práticas silviculturais também podem ser preponderantes para determinar maior resiliência dos cultivos florestais frente aos efeitos das mudanças do clima, principalmente, servindo de dreno de C e medida adaptativa ao mesmo tempo.

Carbono do solo florestal

A mudança de uso do solo impacta os estoques de carbono no solo, refletindo na capacidade de mitigação de gases de efeito estufa (GEE), com efeitos nas estratégias de controle das mudanças do clima (Fialho; Zinn, 2014; Higa et al., 2017; Veloso-Gomes et al., 2018). O acúmulo de carbono no solo é definido como a transferência de CO₂ atmosférico para o solo, através das plantas via resíduos vegetais principalmente, que são armazenados e retidos no solo como parte da matéria orgânica do solo (Lal et al., 2015). O acúmulo de carbono no solo, além da contribuição para a mitigação da emissão de GEE, está também relacionado a um conjunto maior de benefícios em favor da qualidade do solo, como melhorias na ciclagem de nutrientes, atividade biológica, propriedades físicas, armazenamento de água, entre outros (Rangel et al., 2008; Campanha et al., 2009).

Vários fatores impactam o acúmulo de C nos solos, entre os quais destacam-se o uso anterior do solo, o clima, espécies florestais, idade do plantio, práticas silviculturais e também a textura do solo (Paul et al., 2002; Caldeira et al., 2003; Jandl et al., 2007; Shi; Cui, 2010; Denardin et al., 2014; Fialho et al., 2019). Nesta seção, será feita uma análise de como o uso anterior do solo e o clima atuam na determinação da magnitude do fator de alteração do carbono do solo em plantios de eucalipto, no Brasil, e como esse fator altera a contribuição desse reservatório na remoção/emissão de GEE. Essa análise será baseada no conjunto de resultados compilados de Zanatta et al. (2020).

O Brasil, segundo o estudo de Alvarez et al. (2013) baseado na classificação climática de Köppen, tem nove tipos climáticos predominantes, que relacionam temperatura e precipitação pluviométrica, assim brevemente definidos:

- Af: clima tropical, com temperatura média do mês mais frio maior que 18 °C e sem estação seca (no mínimo 60 mm de chuva por mês).
- Am: clima tropical, com temperatura média do mês mais frio maior que 18 °C e monções (curta estação seca).
- As: clima tropical, com temperatura média do mês mais frio maior que 18 °C e verão seco.
- Aw: clima tropical, com temperatura média do mês mais frio maior que 18 °C e inverno seco.
- BSh: clima seco, semiárido, com baixas latitudes e longitudes, e temperatura média anual maior que 18 °C.
- Cwa: clima subtropical úmido, com temperatura média do mês mais frio menor que 18 °C e maior do que -3 °C; temperatura do mês mais quente é superior a 22 °C e no mínimo 4 meses com temperatura maior que 10 °C; inverno seco.
- Cwb: clima subtropical úmido, com temperatura média do mês mais frio menor que 18 °C e maior do que -3 °C; nenhum mês com temperatura média superior a 22 °C e no mínimo 4 meses com temperatura maior que 10 °C; inverno seco.
- Cfa: clima subtropical úmido, com temperatura média do mês mais frio menor que 18 °C e maior do que -3 °C; temperatura média do mês mais quente maior que 22 °C e no mínimo 4 meses com temperatura maior que 10 °C; sem estação seca.
- Cfb: clima subtropical úmido, com temperatura média do mês mais frio menor que 18 °C e maior do que -3 °C; temperatura média do mês mais quente menor que 22 °C e no mínimo 4 meses com temperatura maior que 10 °C; sem estação seca.

O Brasil possui plantios de eucalipto em todos esses tipos climáticos (Tabela 42), com maior representação nos tipos Aw, Cfa, e Cwa, onde concentra-se mais de 65% da área produtiva de eucalipto. Em virtude dessa concentração da área produtiva nesses tipos climáticos, o levantamento sobre alterações dos estoques de carbono no solo registrou nesses climas o maior número de estudos. Em levantamento nas publicações disponíveis, foram encontradas 22 comparações envolvendo a conversão floresta nativa/eucalipto e 28 comparações considerando a conversão pastagem/eucalipto.

Tabela 42. Distribuição dos plantios florestais entre os tipos climáticos observados no Brasil em 2017.

Tipo climático	Área de eucalipto (ha)	Tipo climático	Área de eucalipto (ha)
Af	421.930	Cfa	1.598.688
Am	708.889	Cfb	762.958
As	183.482	Cwa	934.176
Aw	2.280.740	Cwb	505.334
BSh	12.332		

Fonte: IBGE (2019).

Considerando os tipos climáticos, o fator de alteração do carbono no solo (fC) foi estimado pela média das relações entre estoque de carbono no solo da floresta de eucalipto e do uso original ou anterior (Tabelas 43 e 44).

Tabela 43. Fator de alteração do estoque de carbono no solo, pela conversão de florestas nativas em plantios de eucalipto, por tipo climático no Brasil.

Clima	Profundidades (cm) e probabilidade (p)				Fonte
	0-20	p<	0-100	p<	
Aw	0,93 (7)	0,05	0,96 (3)	0,06	Zinn et al. (2002, 2011); Rezende et al. (2007); Schulthais (2009)
Am	0,80 (3)	0,33	0,76 (1)	-	Beldini et al. (2009); Lopes et al. (2015)
Cfa	0,98 (7)	0,19	1,02 (2)	-	Antunes (2007); Sandi (2009); Sotomayor (2009); Teixeira et al (2009); James et al. (2019)
Cwa	0,98 (8)	0,19	0,98 (3)	0,45	Demolinari et al. (2007); ; Schulthais et al. (2007); Lima (2008); Pulrolnik et al. (2009); Fialho et al. (2019)
Cwb	0,94 (1)	-	-	-	Inácio (2009)
Média nacional	0,94	0,07	0,95	0,09	

() = entre parênteses, número de dados que gerou a média.

Na Tabela 43 são apresentados os resultados de fC quando a conversão de uso foi de florestas nativas para plantios de eucalipto. Para todas as condições de implantação de plantios de eucalipto após a retirada de floresta nativa, houve a redução dos estoques de carbono no solo, com predomínio de valores entre 1% e 20%. Na média dos estudos/locais essa redução foi de 5-6%. Powers et al. (2011), também estudando alterações de estoque de C em região tropical, observaram perdas de 15% a 18% nos estoques de carbono, nas conversões de florestas primárias e savanas para plantios florestais. Algumas razões principais podem ser enumeradas para explicar o decréscimo dos estoques de carbono em plantios florestais, quando estes substituem áreas de florestas nativas, a saber: o menor aporte de resíduos vegetais pelo cultivo florestal, especialmente na fase inicial da cultura (Barros et al., 2017), o revolvimento do solo para a implantação do cultivo em linha, causando a ruptura de agregados e liberação de carbono protegido fisicamente (Qu et al., 2019), aumento

da atividade microbiana decompositora devido à maior oxigenação e temperatura do solo e menor ciclagem da serapilheira devido à maior recalcitrância dos resíduos vegetais (Silva, 2008).

Ainda na conversão de florestas nativas para plantio de eucalipto, o fC observado no clima Aw (0,93) foi ligeiramente superior ao observado no clima Am (0,80). Na condição subtropical, o fC foi semelhante entre os climas Cfa e Cwa (0,98). Na comparação entre o Aw e Am, a presença de inverno seco pode favorecer o maior fC no clima Aw, uma vez que a precipitação pluviométrica e a maior umidade do ambiente são fatores que aceleram a decomposição dos resíduos vegetais e da matéria orgânica no solo.

Nos climas tropicais (Aw e Am), o fC variou de 0,80 a 0,93 na camada superficial e de 0,76 a 0,96 na camada de 0-100 cm, enquanto nos climas subtropicais úmidos (Cfa, Cwa e Cwb) o valor do fC variou de 0,94 a 0,98 e de 0,98 a 1,02 nas camadas de 0-20 cm e 0-100 cm, respectivamente. A interpretação desses resultados sugere uma tendência de que, nos climas tropicais, o fC seja menor do que nos climas subtropicais úmidos. Devido a ocorrência de maiores temperaturas nos climas tropicais, possivelmente, pode ocorrer, simultaneamente, maior produção de biomassa e altas taxas de decomposição, fazendo com que ocorra menor reposição de carbono no solo, em relação aos climas subtropicais úmidos. Esse comportamento proporciona maiores perdas relativas de carbono na implantação de áreas na região tropical, especialmente em climas Am e, nesse sentido, maiores serão os desafios para manter os estoques de carbono no solo e mitigar as emissões de GEE e, por conseguinte, o risco climático nessa região.

Em relação à conversão de uso de pastagem para plantio de eucalipto, contrariamente ao observado na conversão da floresta nativa/eucalipto, a maioria dos fC indicou ganho de estoque de carbono no solo, pela implantação da floresta plantada. Nesse caso, o acréscimo nos estoques de carbono no solo variou de 7% a 19% (Tabela 44). Provavelmente, essa condição de ganho de carbono pode ser explicada pelo histórico do uso do solo, principalmente pela capacidade produtiva das pastagens substituídas, medida pela sua biomassa. Segundo Dias Filho (2014), as plantações florestais no Brasil avançaram sobre a área de pastagens que, na sua maioria, apresentavam baixo rendimento. Logo, a implantação de sistemas de produção mais bem manejados e que proporcionem aporte de resíduos vegetais ao solo favorece o maior o incremento de carbono. Essa condição justifica o ganho de carbono no solo observado pela implantação do eucalipto, como reportado também em outros estudos (Scott et al., 2006; Shi; Cui, 2010).

Tabela 44. Fator de alteração do estoque de carbono no solo, pela conversão de pastagem em plantios de eucalipto, por tipo climático no Brasil.

Clima	Profundidades (cm) e probabilidade				Fonte
	0-20	p<	0-100	p<	
Aw	1,15 (8)	0,13	0,88 (3)	-	Lima (2004); Pegoraro et al. (2014); Vicente (2016)
Af	1,13 (2)	-	1,19 (2)	-	Silva (2008)
Cfa	1,14 (15)	0,12	1,17 (9)	0,14	Maquere et al. (2008); Rufino (2009); Santos et al. (2009); 2013); Soares (2009); Sotomayor (2009); Wink (2009); Godoi (2012); Wink et al. (2015)
Cfb	0,76 (1)	-	-	-	Klug (2014)
Cwa	1,07 (5)	0,27	-	-	Lima (2004); Teixeira et al. (2020)
Média nacional	1,11	0,06	1,12	0,11	

() = entre parênteses número de dados que gerou a média.

Ainda dentro da conversão de uso pastagens/eucalipto, entre os tipos climáticos, o fC nos climas tropicais e no Cfa foram muito similares entre si (média 1,14), e ligeiramente maiores do que aquele observado no Cwa (1,07). Entre as camadas de solo, apenas no clima Aw houve uma clara tendência de redução do estoque de carbono na camada de 0-100 cm, enquanto na camada superficial houve ganho de 15%. Nos demais tipos climáticos, a análise da camada de 0-20 cm ou de 0-100 cm produziu resultados muito semelhantes, com incrementos de C variando de 13% a 19%. Na média nacional, o fator de alteração de carbono é 1,11 na camada de 0-20 cm e 1,12 na camada de 0-100 cm, indicando que na conversão de pastagens (de baixa produtividade) para plantios de eucalipto observa-se incrementos nos estoques de carbono do solo.

Atualmente, independente da cultura anterior, o Brasil adotou até a 3ª Comunicação Nacional, o fator 0,67 (Brasil, 2015). No entanto, ao analisar estudos no Brasil, em conversões de uso envolvendo plantios florestais, observa-se que plantios florestais de eucalipto não determinam perdas tão significativas de carbono e até mesmo promovem acréscimos de C no solo, quando implantados sobre pastagens. Essas estimativas são uma primeira aproximação do fC para plantios eucalipto no Brasil e necessita de aprimoramento pela inclusão de estudos considerando os ambientes pouco investigados, mas igualmente importantes para produção florestal, com grande contribuição aos estudos de risco climático em cenários de mudanças do clima.

Conclusões

A proposta deste trabalho foi verificar o comportamento climatológico na região Sul do Brasil, e a capacidade de emissão/remoção de carbono em solos cultivados com eucalipto. Na região de estudo, as projeções indicam aumento de temperatura e aumento de deficiência hídrica, porém com valores de deficiência hídrica inferiores ou próximos de 200 mm/ano, com excessão da região de Itapetininga. Nesta região, ao longo dos anos, haverá aumento de deficiência hídrica que poderá comprometer a produtividade do eucalipto. Esta área pode ser classificada como de baixo risco para produção de eucalipto nos próximos trinta anos.

Os trabalhos desenvolvidos nos últimos anos e que utilizaram os dados das projeções do modelo HadGEM2-ES trataram de projeções com intervalos de mais de 20 anos entre eles. Este é o primeiro trabalho que utiliza períodos de dez anos. Ao aumentar a resolução temporal do modelo, aparecem as incertezas e, neste caso, estão centradas no período de 2021 a 2030. Uma análise mais fidedigna dos resultados deste modelo e considerando que o aumento de temperatura, a variação da precipitação pluviométrica e a estimativa de deficiência hídrica são lineares, entre o período de 2021 a 2040, permite projetar os resultados do último período (2031 a 2040).

Objetivamente, os resultados finais em termos de riscos climáticos apontam para os riscos de produção menores na região de estudo. Com a possibilidade de aumento da temperatura mínima e o pequeno déficit hídrico, a região de estudo é a mais adaptada para a produção de eucalipto nos próximos 30 anos. O índice de satisfação das necessidades de água (ISNA) apresentou pouca variação na região de estudo e nos municípios de interesse (Itapetininga, Telêmaco Borba e Otacílio Costa), como consequência tanto do aumento da ETo quanto da redução da chuva. Os períodos de déficit hídrico se tornarão mais intensos, onde o déficit hídrico começa a ser crítico no final do período de 2020 a 2030, para a região de Itapetininga e Telêmaco Borba..

Importante ressaltar que o impacto na produtividade do eucalipto, analisando a variação do IMA, indica um nível baixo na região de estudo, principalmente em Itapetininga, e pouco ou nenhum impacto em Telêmaco Borba e em Otacílio Costa, onde quantitativamente o impacto em 30 anos é menor que 3 m³/ha/ano.

Em termos de carbono na biomassa da floresta de eucalipto, a região permanecerá com elevado potencial de acúmulo de carbono, com impacto do clima reduzindo a remoção do C em menos de 10%, dependendo da região. A região mais afetada será Itapetininga, onde a redução na taxa de incremento anual de carbono pelo eucalipto pode atingir 2,3 tC/ha/ano. Em Telêmaco Borba as perdas projetadas no incremento anual de C do eucalipto será de 1tC/ha/ano e, mantendo as condições deste estudo, não haverá perdas em Otacílio Costa. No entanto, é necessário pontuar que o potencial produtivo do eucalipto em Otacílio Costa é quase 30% menor em Telêmaco Borba e Itapetininga, fazendo com que as perdas na região sejam bastante significativas, principalmente por que ocorrem em regiões de elevado potencial produtivo. Por outro lado, o tipo de solo, dentro do mesmo município, teve pouco efeito sobre as taxas de acúmulo de carbono na biomassa do eucalipto.

Apesar da aparente resiliência que os dados relativos colocam sobre a taxa anual de incremento de carbono na floresta, as perdas acumuladas em termos absolutos são significativas e podem chegar na região de estudo a mais de oito milhões de toneladas de carbono em 2035, representando perda de 2,5% do carbono armazenado nas florestas, nos estados de SP, PR e SC. Caso mantido o ritmo de crescimento, a região deve responder por aproximadamente 320 milhões de toneladas de carbono sequestrado pelas florestas de eucalipto em 2035, demonstrando o elevado potencial dessa região em contribuir para a qualidade ambiental e as políticas de controle das mudanças climáticas. Também abre uma excelente oportunidade para a comercialização de carbono na forma de créditos, uma vez que a região estudada responde por quase 20% da área cultivada com eucalipto no País.

Essa oportunidade de comercialização de créditos de carbono da floresta deve ser beneficiada pelos estoques de carbono do solo. O impacto das florestas plantadas nos estoques de carbono no solo dependem do uso anterior, mais do que em função das variações entre os tipos climatológicos no País, o que reflete as diferenças na precipitação pluviométrica e temperatura. Plantios de eucalipto que foram adotados na conversão de pastagens, na média dos estudos, apresentaram ganhos nos estoques de carbono no solo. Uma vez que as florestas da região tem se expandido amplamente sobre usos já consolidados como pastagens e uso agrícola, pode-se esperar um aumento dos estoques de carbono no solo, ampliando os benefícios ambientais das florestas plantadas.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia para Mudanças Climáticas - INCT-MC (CHAMADA INCT – MCTI/CNPq/CAPES/FAPs nº 16/2014), ao CNPq, Capes, Fapesp e à Rede Clima - Subrede Clima e Agricultura do MCTIC pelo apoio financeiro e tecnológico, à Klabin Papel e Celulose, Embrapa, Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável.

Referências

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. (FAO. Irrigation and drainage paper, 56).
- ALMEIDA, A. C.; LANDSBERG, J. J.; SANDS, P. J. Parameterisation of 3-PG model for fast-growing *Eucalyptus grandis* plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 193, p. 179-195, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.01.029>.
- ALMEIDA, A. C.; SOARES, J. V. Comparação entre uso de água em plantações de *Eucalyptus grandis* e floresta ombrófila densa (Mata Atlântica) na costa leste do Brasil. **Revista Árvore**, v. 27, n. 2, p. 159-170, 2003.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONCALVES, J. L. D.; SPAROVEK, G. **Koppen's climate classification map for Brazil**. Meteorologische Zeitschrift, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.
- ALVES, M. E. B.; MANTOVANI, E. C.; SEDIYAMA, G. C.; NEVES, J. C. L. Estimate of the crop coefficient for eucalyptus cultivated under irrigation during initial growth. **Cerne**, v. 19, n. 2, p. 247-253, 2013.
- ANTUNES, L. O. **Estoque e labilidade da matéria orgânica em um argissolo sob sistemas de produção de eucalipto**. 2007. 84 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.
- ASSAD, E. D.; OLIVEIRA, A. F.; NAKAI, A. M.; PAVÃO, E.; PELLEGRINO, G. Q.; MONTEIRO, J. E. B. A.. Impactos e vulnerabilidade da agricultura brasileira às mudanças climáticas. In: TEIXEIRA, B. S.; ORSINI, J. M.; CRUZ, M. R. da (org.). **Modelagem climática e vulnerabilidades setoriais à mudança do clima no Brasil**. Brasília, DF: Ministério da Ciência e Tecnologia, 2016. v. 1. p. 127-186.
- BARROS, N. F.; SCHUMACHER, M. V.; NEVES, J. C. L.; DE BARROS, N. F.; VALADARES, S. V. Tree Growth and nutrient dynamics in pine plantations in Southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 41, e0160400, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/18069657rbcS20160400>.
- BARTHOLOMEUS, R. P.; WITTE, J. P. M.; VAN BODEGOM, P. M.; VAN DAM, J. C.; AERTS, R. Critical soil conditions for oxygen stress to plant roots: substituting the Feddes-function by a process-based model, **Journal of Hydrology**, v. 360, n. 1-4, p. 147-165, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.07.029>.
- BELDINI, T. P.; MCNABB, K. L.; LOCKABY, B. G.; SANCHEZ, F. G.; NAVEGANTES-CANCIO, O.; DE OLIVEIRA, R. C. The effect of plantation silviculture on soil organic matter and particle-size fractions in Amazonia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 6, p. 1593-1602, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000600008>.
- BESHARAT, S.; NAZEMI, A. H.; SADRADDINI, A. A. Parametric modeling of root length density and root water uptake in unsaturated soil. **Turkish Journal of Agriculture and Forestry**, v. 34, n. 5, p. 439-449, 2010.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Plano setorial de mitigação e de adaptação às mudanças climáticas para a consolidação de uma economia de baixa emissão de carbono na agricultura: plano ABC**. Brasília, DF, 2012. (Agricultura de baixa emissão de carbono).
- BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. Coordenação-Geral de Mudanças Globais de Clima. **Relatório de referência "Emissões de Gases do efeito estufa no setor uso da terra, mudança do uso da terra e florestas: emissões de CO₂ pelo uso da terra, mudança do uso da terra e florestas"**. Brasília, DF, 2015. 342 p.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Acordo de Paris**. Brasília, DF, 2016. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris>. Acesso em: 7 nov. 2016.
- BRASIL. Presidência da República. Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/l12187.htm. Acesso em: 7 nov. 2020.
- CALDATO, S. L.; SCHUMACHER, M. V. O uso de água pelas plantações florestais: uma revisão. **Ciência Florestal**, v. 23, n. 3, p. 507-516, 2013. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509810562>.
- CALDEIRA, M. V. W.; SCHUMACHER, M. V.; BARICHELLO, L. R.; VOGEL, H. L. M. Determinação de carbono orgânico em povoamentos de *Acacia mearnsii* De Wild. plantados no Rio Grande do Sul. **Revista Acadêmica: ciências agrárias e ambientais**, v. 1, n. 2, p. 47-54, 2003.
- CAMPANHA, M. M.; NOGUEIRA, R. da S.; OLIVEIRA, T. S. de; TEIXEIRA, A. dos S.; ROMERO, R. E. **Teores e estoques de carbono no solo de sistemas agroflorestais e tradicionais no semiárido brasileiro**. Sobral: Embrapa Caprinos e Ovinos, 2009. 13 p. (Embrapa Caprinos e Ovinos. Circular técnica, 42).

- CARDOSO, A. L.; ROSADO, A. M.; SILVA, A. G. Danos provocados por ventos em floresta de eucalipto em diferentes altitudes e as implicações para a colheita florestal. In: ENCONTRO LATINO AMERICANO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 15., 2011, São José dos Campos. **Anais** [...]. São José dos Campos, SP: Universidade do Vale do Paraíba, 2011.
- CARNEIRO, R. L. C. **Modelagem da resistência estomática e estimativa da eficiência do uso da água em plantios jovens de eucalipto irrigados e não irrigados na região da Bacia do Rio Doce**. 2004. 68f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- COSTELLO, L. R.; MACDONALD, J. D.; JACOBS, K. A. Soil aeration and tree health: correlating soil oxygen measurements with the decline of established oaks. In: SYMPOSIUM ON OAK WOODLANDS AND HARDWOOD RANGELAND MANAGEMENT, 126, 1990, Davis, California. **Proceedings** [...]. Berkeley, CA: Pacific Southwest Research Station, Forest Service, U.S. Department of Agriculture, 1991. p. 295-299.
- DEMOLINARI, D. S. M.; SILVA, I. R.; VERGUTZ, L. T. N., N.; NOVAIS, R. F. Estoques de carbono e nitrogênio do solo sob povoamentos de eucalipto sob diferentes manejos na região do cerrado no centro-oeste de Minas Gerais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 23., 2007, Gramado. **Proceedings** [...]. Viçosa, MG: SBCS, 2007.
- DENARDIN, R. B. N.; MATTIAS, J. L.; WILDNER, L. D. P.; NESI, C. N.; SORDI, A.; KOLLING, D. F.; BUSNELLO, F. J.; CERUTTI, T. Carbon stock in soil under different forest formations, Chapecó, Santa Catarina. **Ciência Florestal**, v. 24, n. 1, p. 59-69, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.5902/1980509813323>.
- DIAS, S. M.; SILVA, J. F. D. Eventos climáticos. **Revista Opiniões**, v. 16, p. 40-41, 2019.
- DIAS FILHO, M. B. **Diagnóstico das pastagens no Brasil**. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2014. 36 p. (Embrapa Amazônia Oriental. Documentos, 402).
- DIBAX, R. **Transformação e expressão do gene PC5SF129-A em *Eucalytus saligna***. Curitiba. 2007. 113 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Campina Grande: UFPB, 1994. 306 p. (FAO. Estudos FAO. Irrigação e drenagem, 33).
- EGGLESTON, S.; BUENDIA, L.; MIWA, K.; NGARA, T.; TANABE, K. (ed.). **2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories, prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme**. Kanagawa: Institute for Global Environmental Strategies, 2006. Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>. Acesso em: 11 fev. 2021.
- FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **The impact of natural hazards and disasters on agriculture and food security and nutrition: a call for action to build resilient livelihoods**. Rome, 2015a. Disponível em: <http://www.fao.org/3/a-i4434e.pdf>. Acesso em: 3 fev. 2018.
- FAO. **Global forest resources assessment 2015: how are the world's forests changing?** Rome. 2015b.
- FEDERICI, S. N.; FRANCESCO, M. S.; TUBIELLO, J. H.; SCHMIDHUBER, J. New estimates of CO₂ forest emissions and removals: 1990–2015. **Forest Ecology and Management**, v. 352, p. 89-98. 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2015.04.022>.
- FIALHO, R. C.; ZINN, Y. L. Changes in soil organic carbon under eucalyptus plantations in Brazil: a comparative analysis. **Land Degradation and Development**, v. 25, n. 5, p. 428-437, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.2158>.
- FIALHO, R. C.; TEIXEIRA, R. S.; TEIXEIRA, A. P. M.; REIS, T. G.; SILVA, I. R. Fertilization and irrigation affect soil carbon under eucalyptus plantation in the Cerrado. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. 4, p. 1-10, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.067917>.
- FAGERIA, N. K. **Maximizing crop yields**. New York: Marcel Dekker, 1992.
- FLORIANI, M. M. P.; STEFFENS, C. A.; CHAVES, D. M.; AMARANTE, C. V. T.; PIKART, T. G.; RIBEIRO, M. S. Relação entre concentrações foliares de carboidratos solúveis totais e tolerância ao frio em diferentes espécies de *Eucalyptus* spp. **Ciência Florestal**, v. 23, n. 1, p. 165-174, 2013. DOI: <https://doi.org/10.5902/198050988450>.
- FOELKEL, C. O fenômeno de danos em árvores pela ação de ventos em florestas plantadas de eucaliptos. **Eucalyptus Newsletter**, v. 46, p. 1-22, 2014.
- GODOI, S. G. **Fluxo de gases de efeito estufa em solo do pampa gaúcho sob silvicultura**. 2012. 81 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas) – Universidade Federal do Pampa, São Gabriel.
- GONÇALVES, J. L. M. Escolha de materiais genéticos de eucalipto em função do uso e das condições edafoclimáticas. In: SIMPÓSIO SOBRE TÉCNICAS DE PLANTIO E MANEJO DE EUCALYPTUS PARA USOS MÚLTIPLOS, 8., 2014, Piracicaba. **Anais** [...]. Piracicaba, SP: Escola Superior Luiz de Queiroz, 2014.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Reference crop evapotranspiration from temperature. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 1, n. 2, p. 96-99, 1985.

HIGA, R. C. V.; HIGA, A. R. Efeitos de danos causados por geadas na sobrevivência e crescimento de *Eucalyptus viminalis*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE FISILOGIA VEGETAL, 6., 1997, Belém. **Anais [...]**. Belém: Sociedade Brasileira de Fisiologia Vegetal, 1997. p. 263.

HIGA, R. C. V.; ZANATTA, J. A.; RACHWAL, M. F. G. Plantações florestais comerciais e a mitigação na mudança do clima. In: OLIVEIRA, Y. M. M. D.; OLIVEIRA, E. B. D. (ed.). **Plantações florestais: geração de benefícios com baixo impacto ambiental**. Brasília, DF: Embrapa, 2017. p. 67-112. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1076153>.

HOOGENBOOM, G. Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its application. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 103, p. 137-157, 2000.

IBA. Indústria Brasileira de Árvore. **Relatório Iba 2014**: ano base 2013. Brasília, DF, 2014.

IBA. Indústria Brasileira de Árvore. **Relatório Iba 2020**: ano base 2019. Brasília, DF, 2020.

IBGE. **Produção da extração vegetal e da silvicultura**: PEVS. 2019. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pevs>. Acesso em: 11 fev. 2021.

INÁCIO, E. S. B. **Distribuição vertical de carbono orgânico em latossolo sob diferentes usos**. 2009. 102 f. Tese (Doutorado em Ciência do solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.

IPMA. Instituto Português do Mar e da Atmosfera. **O Clima**: gases atmosfera com efeito estufa: dióxido carbono. Disponível em: <https://www.ipma.pt/pt/oclima/gases.estufa/index-mauna.jsp?var=data>. Acesso em: 25 mar. 2018.

JAMES, J. N.; GROSS, C. D.; DWIVEDI, P.; MYERS, T.; SANTOS, F.; BERNARDI, R.; FARIA, M. F. de; GUERRINI, I. A.; HARRISON, R.; BUTMAN, D. Land use change alters the radiocarbon age and composition of soil and watersoluble organic matter in the Brazilian Cerrado. **Geoderma**, v. 345, p. 38-50, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.03.019>.

JANDL, R.; LINDNER, M.; VESTERDAL, L.; BAUWENS, B.; BARITZ, R.; HAGEDORN, F.; JOHNSON, D. W.; MINKKINEN, K.; BYRNE, K. A. How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? **Geoderma**, v. 137, n. 3-4, p. 253-268, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.09.003>.

KLUG, I. **Estoque e frações granulométricas do carbono em solo de altitude do Rio Grande do Sul sob diferentes vegetações**. 2014. 80 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages.

LAL, R.; NEGASSA, W.; LORENZ, K. Carbon sequestration in soil. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 15, p. 79-86, 2015.

LIMA, A. M. N. **Estoque de carbono e frações da matéria orgânica do solo sob povoamento de eucalipto no Vale do Rio Doce-MG**. 2004. 120 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do solo) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

LIMA, A. M. N. **Frações da matéria orgânica do solo sob povoamentos de eucalipto no Brasil e simulação de sua dinâmica com modelos processuais**. 2008. 91 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

LIU, W.; WU, J.; FAN, H.; DUAN, H.; LI, Q.; YUAN, Y.; ZHANG, H. Estimations of evapotranspiration in an age sequence of *Eucalyptus* plantations in subtropical China. **PLoS One**, v. 12, n. 4, e0174208, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0174208>.

LOPES, R. S.; RODRIGUES, S. J. S. C.; ALBUQUERQUE, M. P. F.; VASCONCELLOS, S. S. Estoque de carbono e densidade do solo em plantio de *Eucalyptus grandis* na Amazônia Oriental. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 35., 2015, Natal, RN. **Anais [...]**. Natal, RN: SBCS, 2015.

MANZATTO, C. V.; BACCA, J. F. M.; PEREIRA, S. E. M.; ASSAD, E. D.; MEIRELLES, M. S. P.; BACCA, A. F. M.; NAIME, U. J.; MOTTA, P. E. P. Zoneamento Agroecológico da cana-de-açúcar: abordagem metodológica para integração temática de grandes áreas territoriais. In: PRADO, R. B.; TURETTA, A. P. D.; ANDRADE, A. G. (org.). **Manejo e conservação do solo e água no contexto das mudanças climáticas**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2010. v. 1, p. 184-193.

MAQUERE, V.; LACLAU, J. P.; BERNOUX, M.; AINT-ANDRE, L.; GONCALVES, J. L. M.; CERRI, C. C.; PICCOLO, M. C.; RANGER, J. Influence of land use (savanna, pasture, *Eucalyptus* plantations) on soil carbon and nitrogen stocks in Brazil. **European Journal of Soil Science**, v. 59, n. 5, p. 863-877, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2008.01059.x>.

- MARIN, F. R.; ASSAD, E. D.; PILAU, F. G. **Clima e ambiente, introdução a climatologia para ciências ambientais**. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2008. 126 p.
- MASCHIO, L. M. A.; ANDRADE, F. M.; AUER, C. G. Contribuição e fatores climáticos na ocorrência da seca de ponteiros de *Eucalyptus grandis* em Arapoti-PR. **Boletim de Pesquisa Florestal**, n. 41, p. 55-63, 2000.
- MAVI, H. S.; TUPPER, G. J. **Agrometeorology**: principles and application of climate studies in agriculture. New York: Food Products Press, 2004. 364 p.
- NEVES, J. C. L. **Produção e partição de biomassa, aspectos nutricionais e hídricos em plantios clonais de eucalipto na região litorânea do Espírito Santo**. 2000. 191 f. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes.
- PAUL, K. I.; POLGLASE, P. J.; NYAKUENGAMA, J. G.; KHANNA, P. K. Change in soil carbon following afforestation. **Forest Ecology and Management**, v. 168, p. 241-257, 2002.
- PAULA, R. N. D. Produtividade do eucalipto no Cerrado de Minas Gerais. **Revista Opiniões**, v. 15, p. 14-16, 2018.
- PEGORARO, R. F.; SILVA, I. R. da; NOVAIS, R. F. de; BARROS, N. F. de; CANTARUTTI, R. B.; FONSECA, S. Carbon and nitrogen stocks in the alfisol submed to the *Eucalyptus urograndis* monoculture and *Acacia mangium* rotation. **Ciência Florestal**, v. 24, n. 4, p. 935-946, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/1980-509820142404013>.
- PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia**: fundamentos e aplicações práticas. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478 p.
- PETR, J. **Weather and yield**. Amsterdam: Elsevier, 1991.
- POWERS, J. S.; CORRE, M. D.; TWINE, T. E.; VELDKAMP, E. Geographic bias of field observations of soil carbon stocks with tropical land-use changes precludes spatial extrapolation. **Proceeding National Academy of Sciences**, v. 108, n. 15, p. 6318-6322, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1016774108>.
- PRESS, F.; SIEVER, R.; GROTZINGER, J.; JORDAN, T. R. **Para entender a terra**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2008. 650 p.
- PULROLNIK, K.; BARROS, N. F. de; SILVA, I. R.; NOVAIS, R. F.; BRANDANI, C. B. Carbon and nitrogen pools in soil organic matter under eucalypt, pasture and savanna vegetation in Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 5, p. 1125-1136, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000500006>.
- QU, Z.; JIANG, R.; WANG, K.; LI, M. Soil organic carbon, aggregates, and fractions under different land uses in the Loess Plateau, China. **Polish Journal of Environmental Studies**, v. 28, n. 3, p. 1877-1885, 2019. DOI: <https://doi.org/10.15244/pjoes/90094>.
- RANGEL, O. J. P.; SILVA, C. A.; GUIMARAES, P. T. G.; MELO, L. C. A.; OLIVEIRA, A. C. de. Soil organic Carbon and total Nitrogen as related with coffee spacing. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 5, p. 2051-2059, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000500026>.
- REZENDE, M. C.; SILVA, I. R.; VERGUTZ, L.; DEMOLINARI, M. S. M.; NOVAIS, R. F.; LEITE, F. P. Estoques de Carbono e Nitrogênio no solo e na matéria orgânica leve de solos sob eucalipto, pastagem e Mata Atlântica, na Região Centro-Leste de Minas Gerais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 31., 2007, Gramado. **Proceedings** [...]. Viçosa, MG: SBCS, 2007.
- RIBEIRO, A.; PAIVA, Y. G.; BAESSO, R. C. E.; AMEIDA, A. Q.; OLIVEIRA, A. S.; OLIVEIRA, R. A.; HAMAKAWA, J. P.; SILVA, M. P. Eucalipto. In: MONTEIRO, J. E. B. A. (org.). **Agrometeorologia dos cultivos**: o fator meteorológico na produção agrícola. Brasília, DF: INMET, 2009. 530 p.
- RUFINO, A. M. M. **Estoque de carbono em solos sob plantios de eucalipto e fragmento de cerrado**. 2009. 60 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, São Paulo.
- SACRAMENTO NETO, O. B. **Balanco hídrico em plantios jovens de eucalipto na região de Belo Oriente - MG**. 2001. 82 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- SANDI, J. T. T. **Estoque de carbono no solo sob diferentes coberturas vegetais, Chapecó-SC**. 2009. 83 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Comunitária Regional de Chapecó, Chapecó.
- SANTOS, D. C.; PILLON, C. N.; FLORES, C. A.; LIMA, C. L. R.; SANDRINI, W. C. Frações da matéria orgânica de um Argissolo Vermelho do Sudoeste do Estado do RS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 32., 2009, Fortaleza. **Proceedings** [...]. Viçosa, MG: SBCS, 2009.

SANTOS, D. C.; PILLON, C. N.; FLORES, C. A.; LIMA, C. L. R.; SANDRINI, W. C. Fracionamento químico e físico da matéria orgânica de um Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso. **Ciência Rural**, v. 43, n. 5, p. 838-844, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782013005000037>.

SCHULTHAIS, F.; NOVAIS, R. F.; LIMA, A. M. N.; SILVA, I. R.; DAMBROZ, C. S.; BARROS, N. F.; TAKAHASHI, E. N. Influência do uso do solo no carbono orgânico total e biomassa microbiana na região de Luís Antônio-SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 31., 2007, Gramado. **Proceedings** [...]. Viçosa, MG: SBCS, 2007.

SCHULTHAIS, F. **Dinâmica da matéria orgânica em solos sob plantios de eucalipto**. 2009. 37 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

SHI, J.; CUI, L. L. Soil carbon change and its affecting factors following afforestation in China. **Landscape and Urban Planning**, v. 98, n. 2, p. 75-85, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.07.011>.

SCOTT, N. A.; TATE, K. R.; ROSS, D. J.; PARSHOTAM, A. Processes influencing soil carbon storage following afforestation of pasture with *Pinus radiata* at different stocking densities in New Zealand. **Soil Research**, v. 44, n. 2, p. 85-96, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1071/SR05013>.

SENTELHAS, P. C.; MONTEIRO, J. E. B. de A. Informações para uma agricultura sustentável. In: MONTEIRO, J. E. B. A. (org). **Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola**. Brasília, DF: INMET, 2009. p. 3-12.

SILVA, E. F. D. **Frações da matéria orgânica e decomposição de resíduos da colheita de eucalipto em solos dos tabuleiros costeiros da Bahia**. 2008. 124 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

SILVA, G. Gr. C. **Nutrition, growth, and growth modeling of eucalypt stands submitted to distinct water and nutrient availability**. 2006. 116 f. Tese (Doutorado em Fertilidade do solo e nutrição de plantas; Gênese, Morfologia e Classificação, Mineralogia, Química,) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

SOARES, E. M. B. **Frações da matéria orgânica e composição molecular das substâncias húmicas de solos sob cultivo de eucalipto em biomas distintos**. 2009. 136 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

SOTOMAYOR J. F. M. **Métodos de amostragem de solos para a determinação de carbono em três ambientes**. 2009 101 f. Dissertação (Mestrado Nutrição Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, SP.

SOUZA, E. B. de; MANZI, A. O.; SAMPAIO, G.; CÂNDIDO, L. A.; ROCHA, E. J. P. da; ALVES, J. M. B.; CARDOSO, M. F.; SOUSA, A. M. L. de; COUTINHO M. M. Mudanças ambientais de curto e longo prazo: projeções, reversibilidade e atribuição. In: AMBRIZZI, T.; ARAUJO, M. (ed.). **Base científica das mudanças climáticas: contribuição do Grupo de Trabalho 1 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas**. Rio de Janeiro, RJ: COPPE; Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: http://www.pbmc.coppe.ufrj.br/documentos_publicos/GT1/GT1_volume_completo_cap9.pdf. Acesso em: 25 out. 2020.

STOCKER, T. F.; QIN, D.; PLATTNER, G.-K.; TIGNOR, M.; ALLEN, S. K.; BOSCHUNG, J.; NAUELS, A.; XIA, Y.; BEX, V.; MIDGLEY P. M. (ed.). IPCC 2013: resumo para Decisores. In: _____. **Climate Change 2013: the physical science basis: contribuição do Grupo de Trabalho I para o Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas**. New York: Cambridge University Press, 2013.

TEIXEIRA, R. S.; SILVA, I. R.; SOARES, B. E. M.; FIALHO, R. C.; BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F. Impacto do cultivo do eucalipto na fração de carbono lábil em solos de texturas distintas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 32., 2009, Fortaleza. **Proceedings** [...]. Viçosa, MG: SBCS, 2009.

TEIXEIRA, R. D.; FIALHO, R. C.; COSTA, D. C.; SOUSA, R. N. de; SANTOS, R. S.; TEIXEIRA, A. P. M.; REIS, T. G.; SILVA, I. R. da. Land-use change with pasture and short rotation eucalypts impacts the soil C emissions and organic C stocks in the Cerrado biome. **Land Degradation and Development**, v. 31, n. 7, p. 909-923, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.3480>.

VELOSO-GOMES, M.; DIECKOW, J.; ZANATTA, J. A.; BAYER, C.; HIGA, R. C. V.; BREVILIERI, R. C.; COMERFORD, N. B.; STOPPE, A. M. Reforestation with loblolly pine can restore the initial soil carbon stock relative to a subtropical natural forest after 30 years. **European Journal of Forest Research**, v. 137, p. 593-604, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10342-018-1127-y>.

VAN LIER, J. Q. Oxigenação do sistema radicular: uma abordagem física. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 1, p. 233-238, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832001000100025>.

VICENTE, L. D. C. **Origem do carbono orgânico em solos e estoques em agregados sob plantações de seringueira e eucalipto no bioma Mata Atlântica.** 2016. 61 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual do Norte Fluminense - Darcy Ribeiro, Campo dos Goytacazes, RJ.

WINK, C.; REINERT, D. J.; TORNQUIST, C. G.; SILVA, I. R. Carbon and nitrogen dynamics under eucalyptus plantations in Southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 6, p. 1623-1632, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/01000683rbc20140182>.

WINK, C. **Estoque de carbono em plantações de *Eucalyptus* sp. implantados em campo nativo.** 2009. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal da Santa Maria, Santa Maria, RS.

ZANATTA, J. A.; BORDRON, B.; HOLLER, W. A.; RACHWAL, M. F. G.; ROSSI, L. M. B.; HIGA, R. C. V. **Índice de alteração do carbono no solo, em conversões de uso do solo envolvendo plantações florestais no Brasil.** Colombo: Embrapa Florestas, 2020. 24 p. (Embrapa Florestas. Documentos 342).

ZINN, Y. L.; RESCK, D. V. S.; SILVA, J. E. da. Soil organic carbon as affected by afforestation with *Eucalyptus* and *Pinus* in the Cerrado region of Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 166, n. 1-3, p. 285-294, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00682-X](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00682-X).

ZINN, Y. L.; LAL, R.; RESCK, D. V. S. Eucalypt plantation effects on organic carbon and aggregation of three different textured soils in Brazil. **Soil Research**, v. 49, n. 7, p. 614-624, 2011.

YIN, L.; FU, R.; DICKINSON, R. E.; SHEVLIKOVA, E. How well can CMIP5 simulate precipitation and its controlling processes over tropical South America? **Climate Dynamics**, v. 41, n. 11/12, p. 3127–3143, 2013.

YU, G-R.; ZHUANG, J.; NAKAYAMA, K.; JIN, Y. Root water uptake and profile soil water as affected by vertical root distribution. **Plant Ecology**, v. 189, p. 15–30, 2007.

Embrapa

Florestas

