

MUDANÇAS CLIMÁTICAS E PRODUÇÃO DE HORTALIÇAS

PROJEÇÕES, IMPACTOS, ESTRATÉGIAS ADAPTATIVAS E MITIGADORAS



Editores Técnicos

Carlos Eduardo Pacheco Lima
Mariana Rodrigues Fontenelle
Marcos Brandão Braga



**Mudanças climáticas e produção de hortaliças:
projeções, impactos, estratégias adaptativas e
mitigadoras**

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

**Mudanças climáticas e produção de hortaliças:
projeções, impactos, estratégias adaptativas e
mitigadoras**

*Carlos Eduardo Pacheco Lima
Mariana Rodrigues Fontenelle
Marcos Brandão Braga
Editores Técnicos*

Embrapa
*Brasília, DF
2015*

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Hortaliças

Rodovia BR 060, trecho Brasília-Anápolis, km 09

Caixa Postal 218

Brasília – DF

CEP 70.351-970

Fone: (61) 3385.9000

Fax: (61) 3556.5744

www.embrapa.br

www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Unidade responsável pelo conteúdo e pela edição

Embrapa Hortaliças

Comitê Local de Publicações

Presidente

Warley Marcos Nascimento

Editor Técnico

Ricardo Borges Pereira

Supervisor Editorial

George James

Secretária

Gislaine Costa Neves

Membros

Miguel Michereff Filho

Milza Moreira Lana

Marcos Brandão Braga

Valdir Lourenço Júnior

Daniel Basilio Zandonadi

Caroline Pinheiro Reyes

Carlos Eduardo Pacheco Lima

Mirtes Freitas Lima

Normalização Bibliográfica

Antônia Veras de Souza

Editoração Eletrônica

André L. Garcia

1ª edição

1ª impressão (2015): 1.000 exemplares

Todos os direitos reservados.

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

Dados internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Hortaliças

Mudanças climáticas e produção de hortaliças: projeções, impactos, estratégias adaptativas e mitigadoras / editores técnicos, Carlos Eduardo Pacheco Lima, Mariana Rodrigues Fontenelle, Marcos Brandão Braga; autores, Alessandra Duarte de Oliveira... [et al.]. – Brasília, DF: Embrapa, 2015.

177 p. : il. color. ; 17 cm x 24 cm.

ISBNXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

1. Climatologia. 2. Condição ambiental. 3. Efeito estufa. 4. Temperatura. 5. Sistema de cultivo. 6. Doença de planta. I. Lima, Carlos Eduardo Pacheco. II. Fontenelle, Mariana Rodrigues. III. Braga, Marcos Brandão. IV. Oliveira, Alessandra Duarte de. V. Embrapa Hortaliças.

CDD 635.0469

©Embrapa, 2015

Autores

Alexsandra Duarte de Oliveira

Engenheira-agrônoma, doutora em Agronomia (Produção Vegetal), pesquisadora da Embrapa Cerrados, Brasília, DF.

Alfredo José Barreto Luiz

Engenheiro-agrônomo, doutor em Sensoriamento Remoto, pesquisador da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP.

Aline Holanda Nunes Maia

Engenheira-agrônoma, doutora em Fitotecnia, Pesquisadora da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP.

Andrea Almeida Carneiro

Graduação em Ciências, Ph.D in Plant Sciences, pesquisadora da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG.

Arminda Moreira de Carvalho

Engenheira-agrônoma, doutora em Ecologia, pesquisadora da Embrapa Cerrados, Brasília, DF.

Bruno Rodrigues Alves

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciências do Solo, pesquisador da Embrapa Agrobiologia, Seropédica, RJ.

Carlos Eduardo Pacheco Lima

Engenheiro Ambiental, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisador da Embrapa Hortaliças, Brasília, DF.

Eduardo Delgado Assad

Engenheiro Agrícola, docteur em Hydrologie et Mathématique, pesquisador da Embrapa Informática Agropecuária, Campinas, SP.

Elizabeth de Oliveira Sabato

Bióloga, doutora em Fitopatologia, pesquisadora da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG.

Emilia Hamada

Engenheira Agrícola, doutor em Engenharia Agrícola, pesquisadora da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP.

Fábio Akyoshi Suinaga

Engenheiro-agrônomo, doutor em Genética e Melhoramento de Plantas, pesquisador da Embrapa Hortaliças, Brasília, DF.

Fábio Rodrigues de Miranda

Engenheiro-agrônomo, doutor em Engenharia de Biosistemas, pesquisador da Embrapa Agroindústria Tropical, Fortaleza, CE.

Flávia Ferreira Mendes Guimarães

Engenheira Agrônoma, doutora em Genética e Melhoramento de Plantas, bolsista de Pós-doutorado da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG.

Ítalo Moraes Rocha Guedes

Engenheiro Agrônomo, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisador da Embrapa Hortaliças, Brasília, DF.

Juscimar da Silva

Engenheiro-agrônomo, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisador da Embrapa Hortaliças, Brasília, DF.

Karísia Mara Lima de Oliveira

Tecnóloga em Irrigação e Drenagem, mestre em Engenharia Agrícola, estagiária da Embrapa Agroindústria Tropical, Fortaleza, CE.

Kleberson Worsley de Souza

Engenheiro-agrônomo, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisador da Embrapa Cerrados, Brasília, DF.

Lauro José Moreira Guimarães

Engenheiro-agrônomo, doutor em Genética e Melhoramento de Plantas, pesquisador da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG.

Luís Henrique Bassoi

Engenheiro Agrônomo, doutor em Ciências (Energia Nuclear na Agricultura), Pesquisador da Embrapa Semiárido, Petrolina, PE.

Marcos Brandão Braga

Engenheiro-agrônomo, doutor em Agronomia (Irrigação e Drenagem), pesquisador da Embrapa Hortaliças, Brasília, DF.

Maria Lucrécia Gerosa Ramos

Bióloga, doutora em Ecofisiologia Vegetal, professora da Universidade de Brasília, Brasília, DF.

Maria Marta Pastina

Engenheira-agrônoma, doutora em Genética e Melhoramento de Plantas, pesquisadora da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG.

Mariana Rodrigues Fontenelle

Bióloga, doutora em Microbiologia Agrícola, pesquisadora da Embrapa Hortaliças, Brasília, DF.

Michelli de Souza dos Santos

Engenheira-agrônoma, doutora em Proteção de Plantas, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Botucatu, SP.

Newton Portilho Carneiro

Biólogo, Ph.D in Plant Sciences, pesquisador da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG.

Nuno Rodrigo Madeira

Engenheiro-agrônomo, doutor em Fitotecnia, pesquisador da Embrapa Hortaliças, Brasília, DF.

Raquel Ghini

Engenheira-agrônoma, doutora em Fitopatologia, pesquisadora da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP.

Rubens Sonsol Gondim

Engenheiro-agrônomo, doutor em Engenharia Civil, pesquisador da Embrapa Agroindústria Tropical, Fortaleza, CE.

Sidney Netto Parentoni

Engenheiro-agrônomo, doutor em Genética e Melhoramento de Plantas, pesquisador da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG.

Sílvio Roberto Medeiros Evangelista

Estatístico, doutor em Engenharia Elétrica, pesquisador da Embrapa Informática Agropecuária, Campinas, SP.

Thaís Rodrigues Coser

Engenheira-agrônoma, doutora em Agronomia, bolsista de Pós-doutorado da Embrapa Cerrados, Brasília, DF.

Wagner Rodrigues Soares

Meteorologista, doutor em Meteorologia, pesquisador do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Cachoeira Paulista, SP.

Willian R. D. de Oliveira

Engenheiro-agrônomo, doutor em Agronomia, Engenheiro-agrônomo da Companhia Nacional de Abastecimento, Brasília, DF.

Prefácio

As mudanças climáticas globais, decorrentes do aquecimento global provocado pelo aumento das concentrações atmosféricas de gases de efeito estufa, representam um tema atual, de ampla discussão e que, segundo projeções, ameaçam diversos setores socioeconômicos. Os impactos de tais mudanças sobre as atividades agropecuárias vêm sendo amplamente estudados nas últimas décadas. Também vastos têm sido os estudos visando a mitigação dos impactos da produção agropecuária sobre as emissões atmosféricas de gases de efeito estufa. Entretanto, os esforços lançados não levaram ao esgotamento do tema, sendo muitas ainda as lacunas do conhecimento existentes. Faz-se necessária, então, a intensificação das pesquisas, com vistas a garantir a sustentabilidade da produção agrícola brasileira. Em especial, existe a necessidade de geração de conhecimento sobre o comportamento dos sistemas produtivos de hortaliças num cenário de mudanças climáticas. As hortaliças constituem um grande grupo de espécies vegetais, das quais boa parte delas apresenta-se sensível às alterações do clima projetadas para o fim do Século 21. Tendo o exposto em vista, a presente obra foi resultado do II Workshop sobre Efeitos das mudanças climáticas sobre a produção de hortaliças, realizado na Embrapa Hortaliças, em Brasília – DF, no ano de 2013. Ela visa apresentar e discutir linhas temáticas que vêm sendo trabalhadas por diversas equipes multidisciplinares e interinstitucionais que podem ser utilizadas para subsidiar e/ou alavancar pesquisas que visem entender a interação entre mudanças climáticas e produção de hortaliças, com foco na apresentação das projeções climáticas para o final do Século 21 no território brasileiro, dos potenciais impactos sobre os sistemas produtivos e de estratégias adaptativas e de mitigação.

Carlos Eduardo Pacheco Lima
Pesquisador em Mudanças Climáticas da
Embrapa Hortaliças

Apresentação

Os impactos das mudanças climáticas sobre os sistemas produtivos de hortaliças são uma preocupação de todos os setores que compõem a cadeia produtiva. Cabe ressaltar que as hortaliças são essencialmente destinadas ao mercado doméstico, sendo de suma importância para a manutenção de uma dieta equilibrada. Os produtos olerícolas ainda apresentam-se, em boa parte, especialmente susceptíveis aos impactos das mudanças climáticas. Essa susceptibilidade está ligada às características das espécies que compõem esse grupo de produtos, às características peculiares de seus sistemas produtivos e às exigências dos mercados. Como exemplo, a existência e a de muitas espécies olerícolas originárias de regiões de clima frio e/ou ameno às quais um grande esforço está sendo destinado ao seu melhoramento genético e, conseqüentemente, à adaptação ao clima tropical, ainda apresentam-se muito impactadas negativamente pela ocorrência das altas temperaturas, comuns nas regiões Norte e Nordeste do país. A maior ocorrência de extremos climáticos, tais como o aumento da ocorrência de eventos como geadas, secas prolongadas e chuvas intensas e concentradas também devem ser encaradas com preocupação. A adaptação aos fenômenos citados deve ser adotada como estratégia prioritária para manutenção da sustentabilidade da olericultura brasileira. É necessário, portanto, a busca por genótipos tolerantes ao calor, eficientes no uso de água e nutrientes, bem como resistentes à doenças e pragas emergentes nas novas condições climáticas. Também necessária é a busca por sistemas de produção capazes de mitigar os impactos das mudanças climáticas sobre a produção de hortaliças e promover o sequestro de carbono nos solos. Vale ressaltar a existência de importantes áreas de produção em regiões montanhosas cujo uso agrícola intensivo leva ao esgotamento do solo, fenômeno que deve ser intensificado face à ocorrência mais frequente de eventos de precipitação intensos e concentrados. Espera-se, portanto, que esse livro constitua-se no ponto de partida para que as discussões e pesquisas que visem adaptar os sistemas produtivos de hortaliças à futura realidade climática se tornem mais intensas.

Jairo Vidal Vieira

Chefe-Geral da Embrapa Hortaliças

Sumário

Metodologias para elaboração de mapas de cenários climáticos futuros	17
1. Introdução.....	17
2. Cenários climáticos futuros e modelos climáticos.....	18
3. Abordagens metodológicas para elaboração de mapas	21
4. Considerações finais.....	29
5. Referências.....	30
Projeções de mudanças climáticas para o Brasil no final do Século 21	33
1. Introdução	33
2. Fatos	34
3. Incertezas nas projeções das mudanças climáticas.....	35
4. Modelagem do clima e cenários climáticos.....	36
5. Análise de anomalias de temperatura e precipitação para o final do século no Brasil.....	38
6. Impactos das mudanças climáticas no Brasil no final do Século	42
7. Considerações finais.....	43
8. Referências.....	44
Os sistemas produtivos de hortaliças frente às mudanças climáticas: projeções e desafios	47
1. Introdução	47
2. Projeções climáticas para o final do Século 21.....	49
3. Impactos das mudanças climáticas sobre os sistemas agrícolas de produção.....	54
4. Impactos das mudanças climáticas sobre os sistemas produtivos de hortaliças e possíveis medidas mitigadoras e adaptativas.....	60
5. Considerações finais.....	70
6. Referências.....	71

Projeções de demanda hídrica para irrigação do meloeiro no Nordeste brasileiro sob cenários de mudanças climáticas	79
1. Introdução	79
2. Mudanças climáticas: aspectos conceituais	81
3. Modelos de circulação global e regional.....	83
4. Climatologia de base do modelo	84
5. Incertezas das mudanças climáticas	85
6. Correção de viés.....	86
7. Integração de modelos visando à análise de impactos das mudanças climáticas na demanda de água de irrigação	91
8. A análise de impactos na demanda hídrica	93
8.1. Cálculo na necessidade hídrica bruta da cultura (NHB).....	94
8.2. O modelo climático regionalizado Eta-CPTEC/HadCM3	96
8.3. Projeções da necessidade hídrica bruta.....	97
9. Identificação de medidas adaptativas e mitigadoras e considerações finais	99
10.Referências.....	101

Efeitos das mudanças climáticas esperadas para o Brasil sobre a produção e doenças de hortaliças.....	107
1. Introdução	107
2. Efeitos sobre a produção de hortaliças	108
3. Efeitos sobre os fitopatógenos.....	112
4. Efeitos sobre doenças de hortaliças.....	113
5. Considerações finais	121
6. Referências	121

Melhoramento genético vegetal visando adaptação às mudanças climáticas.....	127
1. Introdução	127
2. Melhoramento para tolerância à deficiência hídrica e ao calor.....	128
2.1. Caracterização de “sítios” para avaliações de estresses abióticos	129
2.2. Planejamento experimental.....	130
2.3. Fenotipagem em larga escala	132
3. Biotecnologia no melhoramento de plantas para estresses associados às mudanças climáticas.....	132
3.1. Melhoramento assistido por marcadores moleculares	133

3.2. Engenharia genética para tolerância à deficiência hídrica em plantas.....	135
3.3. Perspectivas sobre a utilização de biotecnologia no melhoramento de plantas para estresses	137
4. Doenças de plantas no contexto de mudanças climáticas.....	137
4.1. Os efeitos de mudanças do clima	138
4.2. A resistência às doenças	139
4.3. O melhoramento para resistência a doenças no clima futuro	140
5. Referências.....	141

Avaliação das Emissões Atmosféricas de Gases de Efeito Estufa

na Agropecuária	151
1. Introdução	151
2. Produção de N ₂ O e NO do solo e co-variáveis.....	155
3. Emissões Atmosféricas de Gases de Efeito Estufa em Sistemas de Produção.....	157
3.1. Sistemas agropecuários.....	157
3.2. Sistemas de produção de hortaliças.....	163
4. Necessidades de pesquisa	169
5. Referências.....	170

Metodologias para elaboração de mapas de cenários climáticos futuros

Emília Hamada

1. Introdução

Ao longo das últimas décadas, as mudanças climáticas têm se tornado tema de interesse nos diversos setores, bem como para o público em geral. O entendimento de suas causas e seus impactos e as propostas de mitigação e de adaptação, no entanto, ainda figuram como um dos maiores desafios da ciência. O assunto é complexo e abrangente, demandando uma abordagem multidisciplinar para a sua compreensão e atuação.

Neste sentido, desde 1990, os relatórios de avaliação vêm sendo divulgados periodicamente pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) e visam fornecer uma visão clara e atualizada sobre o estado atual do conhecimento científico relevante para a mudança climática.

Segundo o Quinto Relatório de Avaliação (IPCC, 2013), é extremamente provável (95% a 100% de probabilidade) que a influência antrópica seja a causa dominante do aquecimento observado desde meados do Século 20, tendo os gases de efeito estufa (GEE) concorrido para o provável (66% a 100% de probabilidade) aquecimento médio da superfície global de 0,5 °C a 1,3 °C no período de 1951 a 2010, com a contribuição de outras forçantes antrópicas. Para o clima futuro, o IPCC (2013) considera provável o aumento das temperaturas médias da superfície no planeta de 0,3 °C a 1,7 °C para o período de 2081 a 2100, comparado a 1986 a 2005, no cenário mais otimista, de baixa emissão de gases de efeito estufa (*Representative Concentration Pathways* - RCP2.6) e de 2,6 °C a 4,8 °C no cenário de mais pessimista ou de alta emissão (RCP8.5), considerando as simulações dos modelos do sistema terrestre do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5* (CMIP5).

As mudanças do clima no futuro devem afetar de forma distinta os diferentes setores e seus impactos devem ser estudados em sua particularidade e, em geral, contam como ponto de partida as projeções climáticas futuras.

Neste capítulo são descritos os cenários climáticos futuros, modelos climáticos e as diferentes abordagens metodológicas para elaboração de seus mapas.

2. Cenários climáticos futuros e modelos climáticos

Um dos aspectos mais relevantes nos estudos dos efeitos das mudanças climáticas é o emprego das simulações dos cenários climáticos futuros, oriundas das projeções dos modelos climáticos e que, juntamente com as informações adicionais obtidas de dados observados, fornecem uma base quantitativa para estimar as probabilidades de muitos aspectos das mudanças do clima do futuro. Assim, os modelos climáticos são uma importante ferramenta de pesquisa para estudar e simular o clima, são baseados em princípios físicos bem estabelecidos e descrevem características do clima recente e alterações do clima passado. Ainda, com considerável confiança, fornecem boas estimativas quantitativas da mudança do clima futuro (RANDALL et al., 2007).

Os modelos climáticos podem ser separados em globais e regionais e se distinguem em relação à resolução espacial que apresentam. Para definir os cenários do clima futuro da Terra, as simulações numéricas dos modelos climáticos globais do Quarto Relatório do IPCC, por exemplo, têm resolução típica de 100 km e, segundo Dias e Dias (2007), o primeiro impacto da baixa resolução é na definição da superfície em termos de topografia e do estabelecimento dos limites das regiões cobertas por água (oceano, lagos, rios) e da cobertura vegetal. Assim, os modelos climáticos globais fornecem informações de grande utilidade para estudos de mudanças climáticas em larga escala e em médio e longo prazos (MARENGO, 2007).

O IPCC, por meio de seus relatórios de avaliação, disponibiliza abertamente em seu sítio¹ na internet as simulações de diversos e sofisticados modelos globais de circulação atmosférica, desenvolvidos por renomadas instituições e executados de acordo com diferentes cenários de emissão de gases de efeito estufa. Segundo IPCC (2008), progressos significativos têm sido obtidos desde o Terceiro Relatório de Avaliação do IPCC (2001) na compreensão de como o clima está mudando no espaço e no tempo, graças à melhoria da análise de numerosos conjuntos de dados, à cobertura geográfica mais ampla, à melhor compreensão das incertezas e à maior variedade de medições. Esse considerável crescimento no conhecimento dos processos do clima foi sendo incorporado aos modelos climáticos e, em função disso, a complexidade e a confiabilidade desses modelos também aumentaram ao longo das últimas décadas. A Figura 1 apresenta uma visão esquemática do desenvolvimento de modelos climáticos ao longo dos últimos 35 anos, com diferentes componentes acoplados aos modelos climáticos ao longo do tempo. Em cada aspecto constituinte, a complexidade e a diversidade dos processos vêm aumentando com o tempo.

Tem havido também um aumento contínuo na resolução horizontal e vertical desses modelos globais, com mais modelos com maior resolução disponíveis para mais regiões. Na Figura 2 pode-se verificar o grande efeito sobre a representação da superfície de um espaçamento de diferentes resoluções espaciais.

¹ Disponível em: <<http://www.ipcc-data.org/>>.

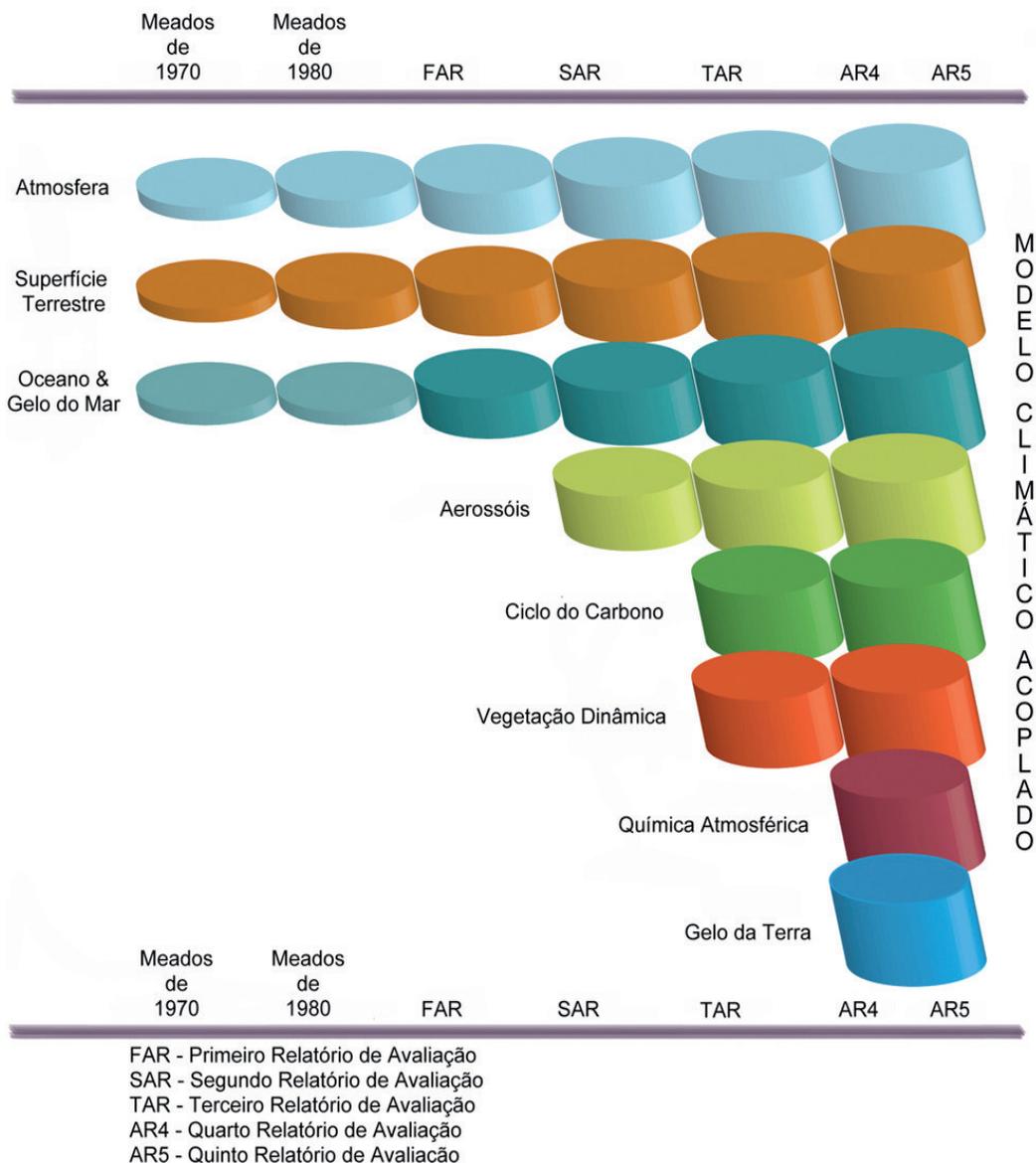


Figura 1. Desenvolvimento de modelos climáticos ao longo dos últimos 35 anos, com diferentes componentes acoplados aos modelos climáticos ao longo do tempo.

Fonte: adaptado de Cubasch et al. (2013).

Por outro lado, as projeções dos modelos regionais têm como característica o aumento na resolução espacial e temporal, possibilitando detalhar os cenários climáticos fornecidos pelos modelos globais com uma relativa economia computacional

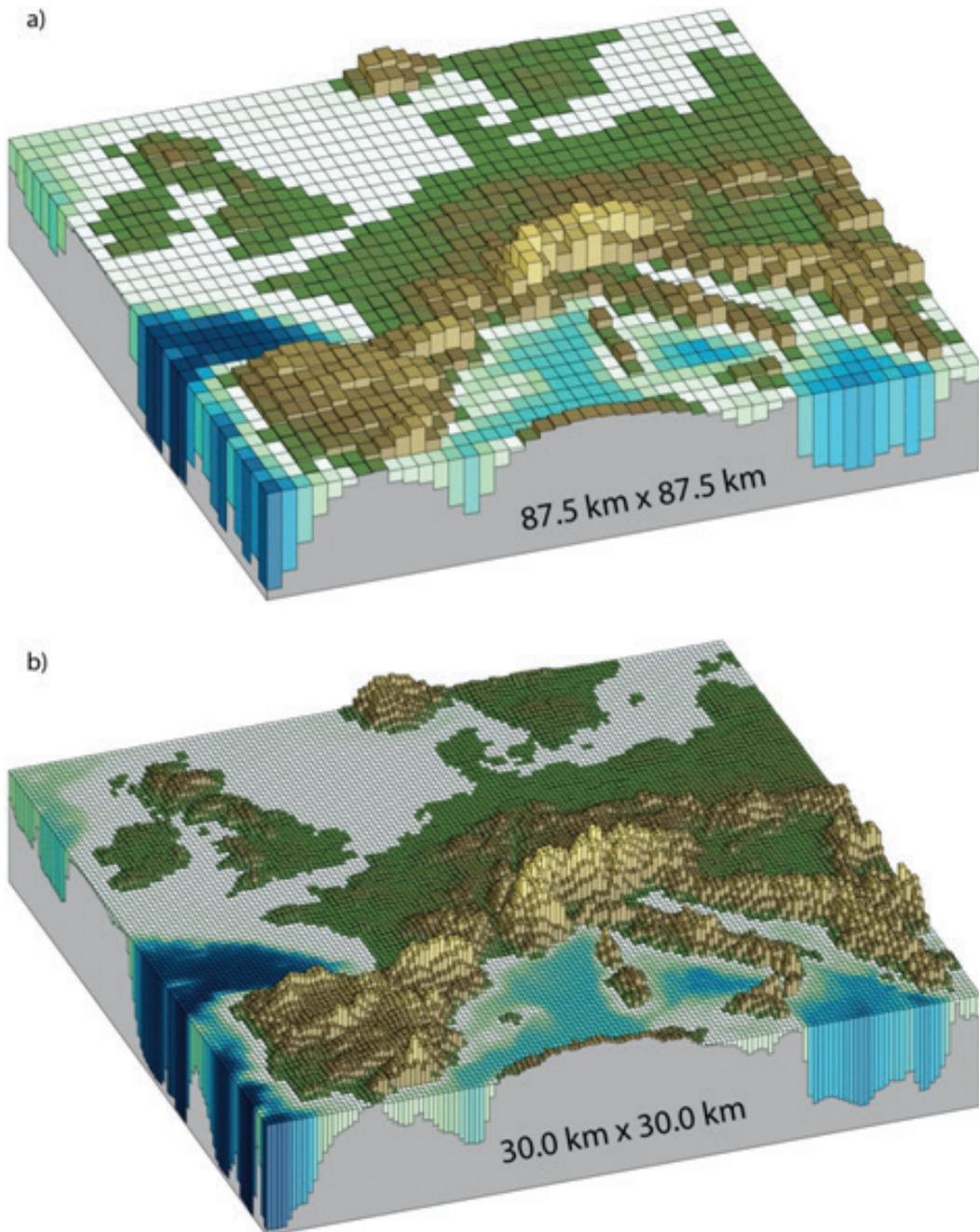


Figura 2. Resolução espacial considerada nos atuais modelos de alta resolução e em modelos de muita alta resolução atualmente em teste: (a) Ilustração da topografia europeia na resolução de 87,5 km X 87,5 km; (b) mesmo de (a) porém com resolução de 30,0 × 30,0 km.

Fonte: Cubasch et al. (2013).

em relação aos modelos globais. As simulações desses modelos seriam úteis para estudos sobre os impactos da mudança do clima em áreas como gerenciamento de recursos hídricos, ecossistemas e atividades agrícolas em escopo regional ou local (MARENGO, 2007). A maior desvantagem no emprego dos modelos regionais, no entanto, está relacionada ao requerimento das condições de fronteiras de sua área de abrangência para o processo de refinamento de escala (regionalização ou *downscaling*) a partir das projeções dos modelos globais e com a incorporação de informações locais. Diferentes técnicas de regionalização podem produzir diferentes previsões locais ainda que geradas a partir de um mesmo modelo global. Também é preciso observar que o desempenho de um modelo regional depende substancialmente do desempenho do modelo global original, pois, se esse não simular bem os processos importantes em pequena escala, então o regional não conseguirá capturar corretamente o clima em maior resolução (BETTS et al., 2011).

A mudança no clima não é projetada somente considerando a alteração dos valores de temperatura, mas também no ritmo esperado de outras variáveis climáticas (precipitação, umidade, ventos, etc.). As projeções dos modelos apresentam níveis de incertezas, pois é uma característica intrínseca a qualquer modelo. Segundo Betts et al. (2011), na predição de um evento climático futuro a incerteza está relacionada a um desconhecimento das emissões futuras de gases de efeito estufa e da variabilidade natural do tempo e clima, conjugada às incertezas próprias da modelagem.

3. Abordagens metodológicas para elaboração de mapas

A escolha metodológica para a elaboração de mapas dos cenários climáticos futuros deve levar em consideração o objetivo de sua aplicação. Desta forma, avaliam-se as necessidades das informações climáticas provenientes dos modelos climáticos quanto às suas características, como sua resolução espacial e temporal, conjugado à disponibilidade dessas informações e balanceando-as com as possíveis vantagens/acréscimos e desvantagens/limitações de cada escolha metodológica.

Como ponto de partida estão as projeções do clima e, portanto, a escolha dos modelos climáticos: global ou regional. As projeções de modelos regionais possibilitam o ganho de informação por sua maior resolução espacial e temporal; no entanto, existem incertezas, pois diferentes previsões locais podem ser produzidas em função de diferentes técnicas de regionalização adotadas, embora geradas de um mesmo modelo global. Por outro lado, existem projeções de um grande número de modelos globais de fácil acesso e disponibilizados pelo IPCC, mas sua resolução espacial é baixa e sua resolução temporal é mensal.

São apresentadas, a seguir, as alterações do clima previstas no Brasil com as mudanças climáticas e um exemplo de abordagem metodológica adotada para a elaboração de mapas dos cenários climáticos futuros para uma aplicação em particular.

De acordo com o Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (2013), no Brasil, conforme a região do país, são previstas mudanças profundas e variáveis no clima, sendo esperado que essas mudanças afetem os ecossistemas aquáticos e terrestres brasileiros. O país possui dimensões continentais, apresentando grande diversidade de regimes climáticos e de influências sobre seu clima, o que certamente dificulta a aquisição de séries de dados observacionais de mais longo período; além disso, o ciclo sazonal das chuvas é afetado pelas variações interanuais, o que pode produzir alterações no ciclo de chuvas, como, por exemplo, a ocorrência de seca durante a estação chuvosa, ou mesmo uma estação chuvosa abundante.

Considerando a extensão continental do Brasil, segundo Marengo (2007), os modelos globais certamente oferecem informações de grande utilidade sobre mudanças do clima, contribuindo para antever as características gerais do clima futuro. Segundo Nobre et al. (2011), todos os modelos simulam elevações na temperatura global para o próximo século, com alguns padrões gerais de mudança que são comuns a todos os cenários de emissões, diferindo quanto à intensidade. Porém, para as projeções de chuvas para o futuro existe certa divergência entre os modelos quanto aos padrões ou até mesmo, em alguns lugares, quanto à tendência da mudança. Marengo (2007) observa que as projeções de mudança nos regimes e distribuição de chuva dos modelos globais previstas pelo IPCC, sobretudo para climas mais quentes, não são conclusivas.

Hamada et al. (2011) elaboraram mapas de cenários climáticos futuros para o Brasil objetivando avaliar os impactos das mudanças climáticas na distribuição espacial e temporal de problemas fitossanitários de culturas agrícolas. Para tanto, utilizaram as projeções de 15 modelos climáticos globais do Quarto Relatório do IPCC (2007) para o Brasil, considerando dois cenários de emissão B1 (mais otimista) e A2 (mais pessimista) para o período de 2071 a 2100 e comparado ao período de referência de 1961 a 1990. Foi utilizado o Sistema de Informações Geográficas (SIG) Idrisi 32, software desenvolvido pela Universidade de Clark, EUA. Os dados das variáveis climáticas foram inseridos no banco de dados do SIG, adotando-se o sistema de coordenadas geográficas latitude e longitude, com resolução espacial de 0,5° X 0,5°.

O comportamento das projeções dos diferentes modelos globais para temperatura média e precipitação pluviométrica para o período de 2071-2100, cenário A2, considerando a área do país, estão apresentadas na Figura 3. As projeções de

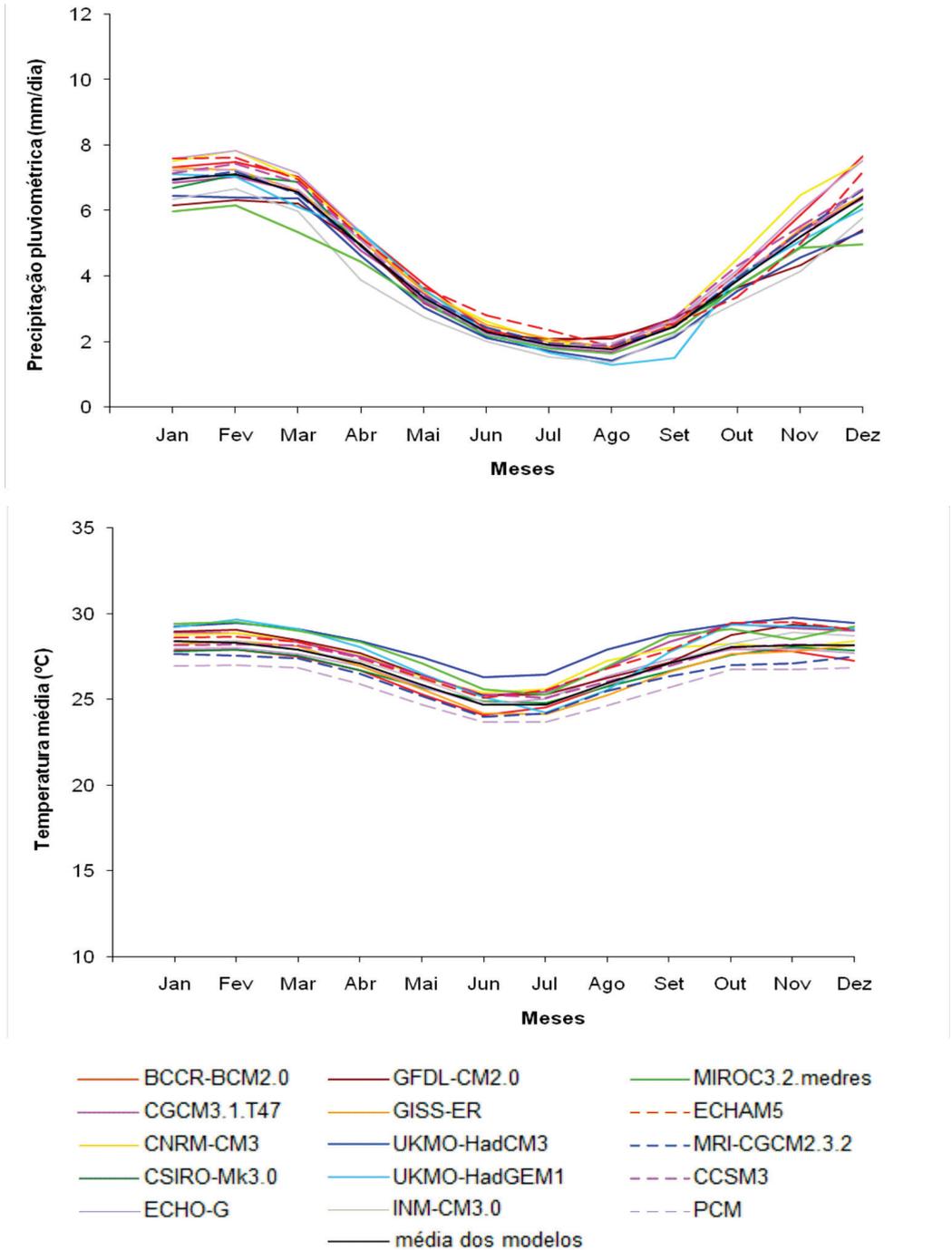


Figura 3. Precipitação pluviométrica (mm/dia) e temperatura média (°C) projetadas por 15 modelos climáticos globais e a média dos modelos do Quarto Relatório do IPCC para o período de 2071 a 2100, cenário A2, para o Brasil.

Fonte: Hamada et al. (2011).

temperatura média apresentam variações mais uniformes entre os modelos, indicando maior concordância entre eles quando comparado às projeções de precipitação, que apresentam padrões de projeção entre os modelos mais variáveis entre si. Porém, todos os modelos para temperatura média e precipitação seguem o comportamento sazonal (HAMADA et al., 2011).

Em função da variação das projeções entre os diversos modelos climáticos globais para o Brasil e atender ao objetivo do estudo, Hamada et al. (2011) decidiram utilizar a média entre os modelos e também a média das projeções mensais no período de 2071 a 2100, integrando 30 anos, considerando que o período comparativo adotado como referência foi a normal climatológica de 1961 a 1990. Os cenários de emissão de gases de efeito estufa B1 e A2 foram escolhidos, pois são os cenários extremos disponíveis.

Nas Figuras 4 e 5 estão apresentados os mapas mensais de distribuição espacial da temperatura média para o período de 1961 a 1990 e do futuro em 2071 a 2100, em ambos os cenários. A média das projeções dos modelos climáticos estima um aumento na temperatura média do ar no Brasil para o período de 2071 a 2100, em todos os meses, comparado ao período de referência, em ambos os cenários. Os padrões de comportamento espacial da temperatura média para o Brasil foram diferenciados nas diversas regiões do país e ao longo dos meses do ano, demonstrando também o efeito sazonal.

Os resultados então foram agregados nas estações do ano: verão (dezembro a fevereiro), outono (março a maio), inverno (junho a agosto) e primavera (setembro a novembro). Os acréscimos na temperatura média do ar ou anomalias positivas ocorrerão tanto na média do país, como igualmente em todas as regiões e estações do ano, conforme pode ser visto na Figura 6. São previstas anomalias positivas da temperatura média para o Brasil no período de 2071 a 2100, comparado ao período de 1961 a 1990, de 2,0 °C a 2,4 °C (cenário B1) e de 3,4 °C a 3,9 °C (cenário A2), entre as estações do ano (Tabela 1). Entre as regiões do país, as anomalias variarão para a região Norte, de 2,2 °C a 2,7 °C (cenário B1) e 3,7 °C a 4,5 °C (cenário A2); região Nordeste, de 2,0 °C a 2,2 °C (B1) e 3,3 °C a 3,7 °C (A1); região Centro-Oeste, de 2,1 °C a 2,8 °C (B1) e 3,5 °C a 4,5 °C (A2); região Sudeste, de 2,0 °C a 2,4 °C (B1) e 3,3 °C a 3,9 °C (A2); e região Sul, de 1,8 °C a 2,0 °C (B1) e 2,9 °C a 3,2 °C (A2). As maiores anomalias na temperatura ocorrerão na primavera para todas as regiões, exceto para o Sul, que ocorrerá no inverno. Os maiores incrementos ocorrerão nas regiões Norte e Nordeste, com estimativa de 4,5 °C, no pior cenário (A2) e, na média do país, o maior incremento será de 3,9 °C (A2) na primavera e a menor anomalia estimada será de 2,9 °C (A2) na região Sul, durante o verão.

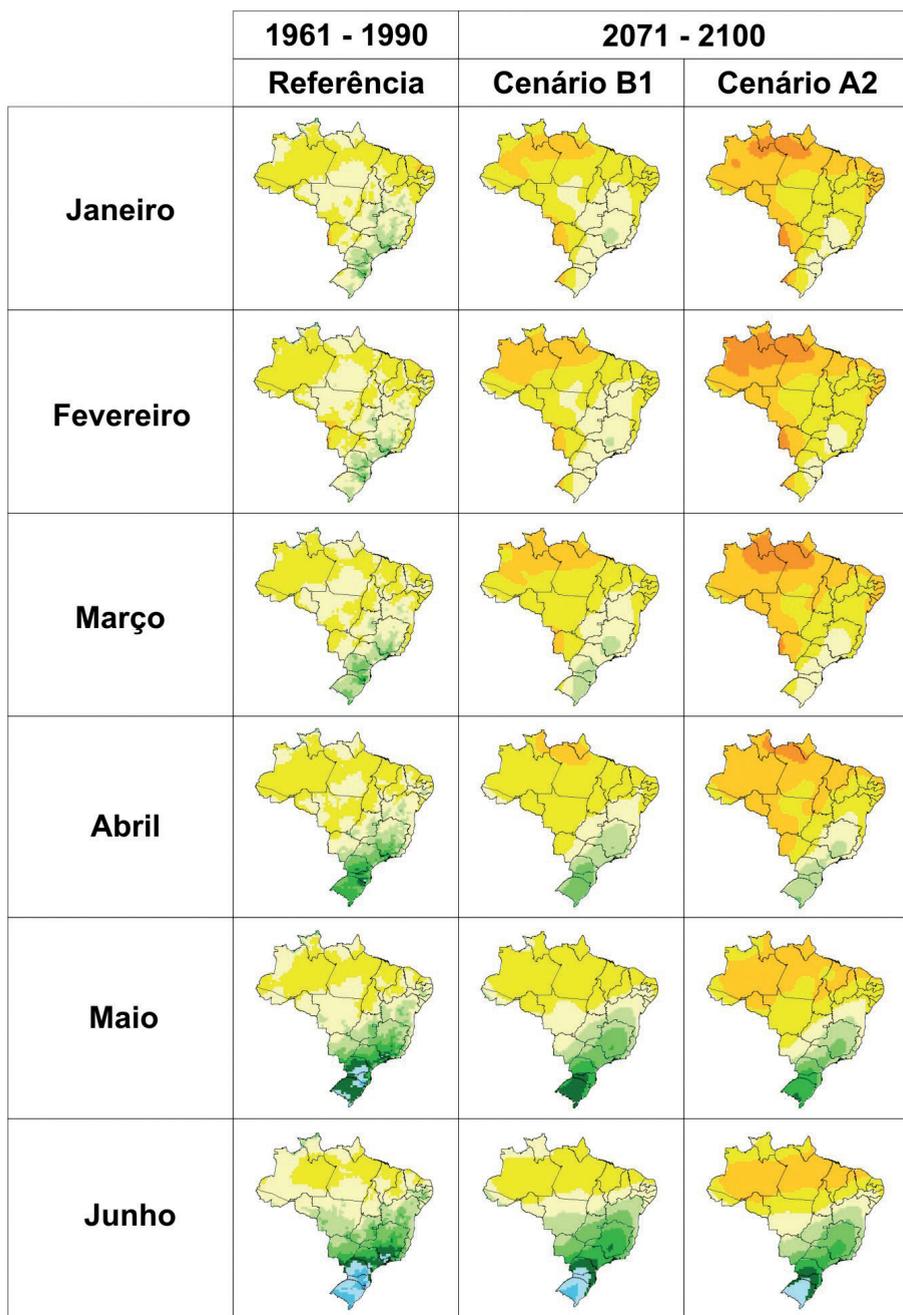


Figura 4. Temperatura média do ar (°C) de janeiro a junho no clima de referência de 1961 a 1990 e no futuro do período de 2071 a 2100, cenários B1 e A2, das projeções do Quarto Relatório do IPCC. Fonte: adaptado de Hamada et al. (2011).

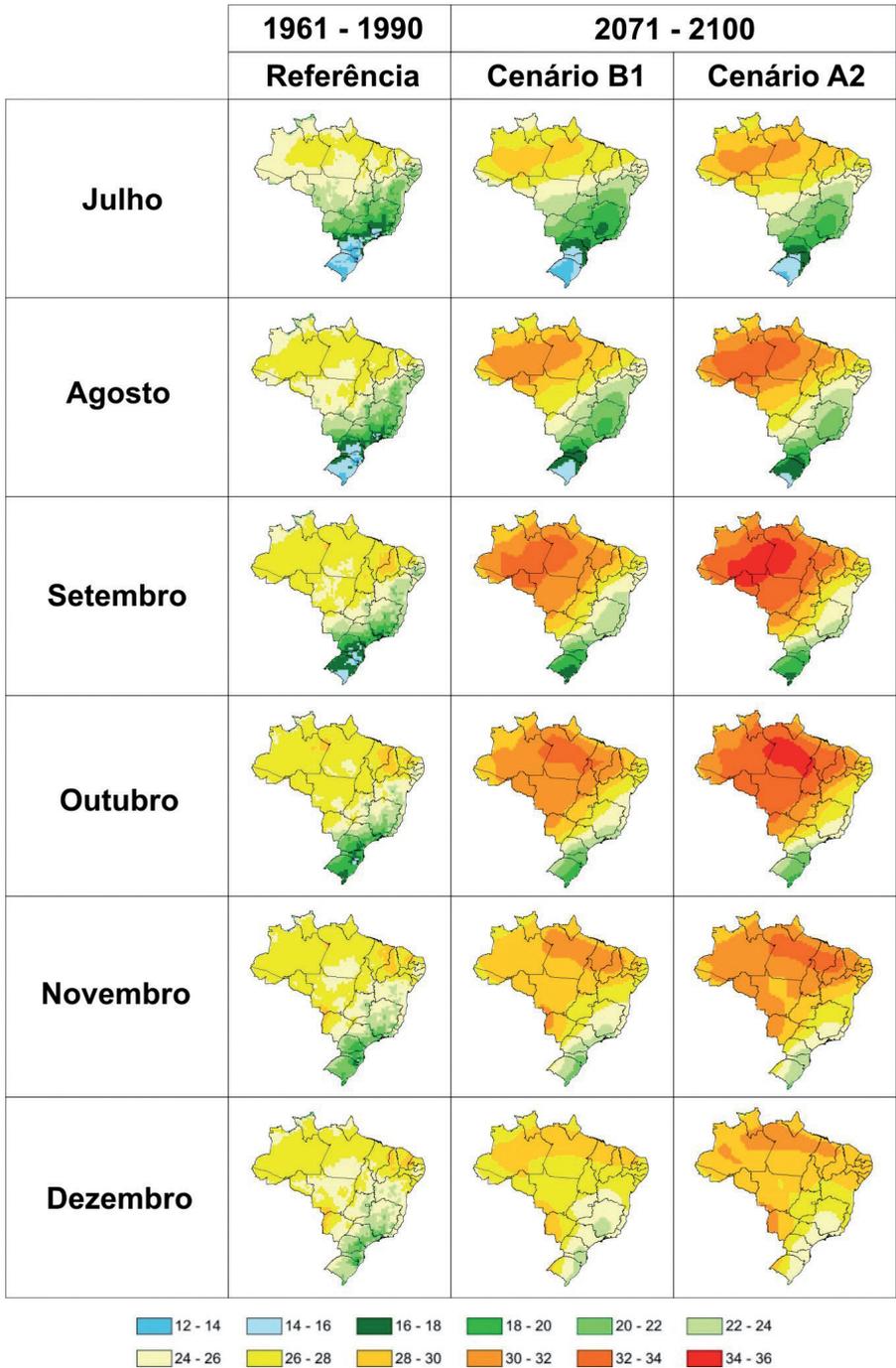


Figura 5. Temperatura média do ar (°C) de julho a dezembro no clima de referência de 1961 a 1990 e no futuro do período de 2071 a 2100, cenários B1 e A2, das projeções do Quarto Relatório do IPCC. Fonte: adaptado de Hamada et al. (2011).

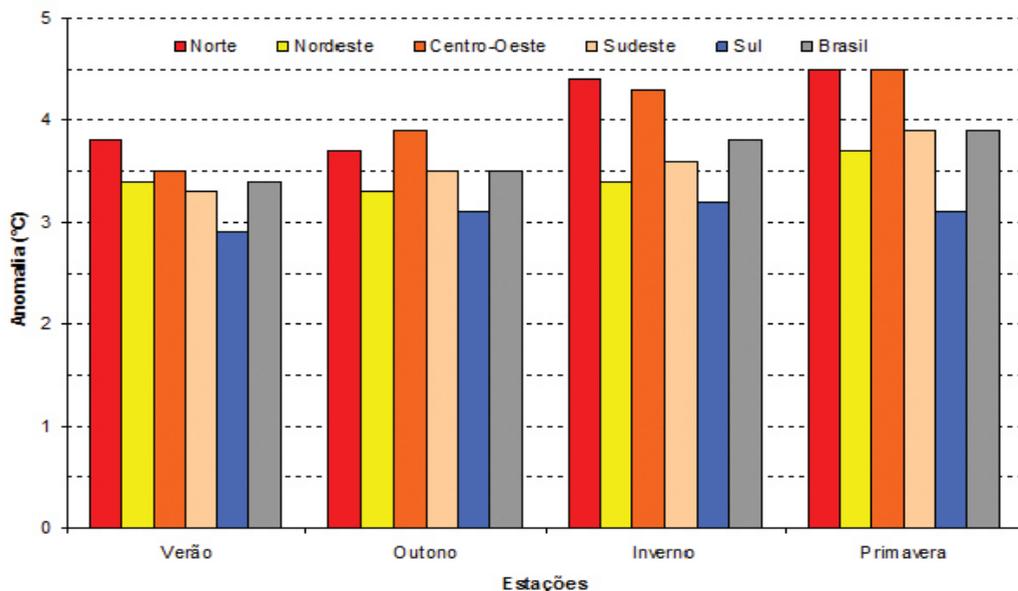


Figura 6. Anomalias de temperatura média do ar do período de 2071 a 2100, cenário A2, comparadas ao período de 1961 a 1990, para as estações do ano, nas regiões e no Brasil.

Fonte: Hamada et al. (2011).

Tabela 1. Temperatura média mensal do ar (°C) e anomalias comparadas para o período de referência (1961 a 1990) e futuro corrigido (2071-2100) nos cenários A2 e B1, para as regiões e para o país nas estações do ano.

Regiões	Estações	1961 – 1990 Temperatura	2071 - 2100			
			Cenário B1		Cenário A2	
			Temperatura	Anomalia	Temperatura	Anomalia
Norte	Verão	26,1	28,3	2,2	29,9	3,8
	Outono	26,1	28,2	2,2	29,7	3,7
	Inverno	25,8	28,5	2,7	30,2	4,4
	Primavera	26,8	29,5	2,7	31,3	4,5
Nordeste	Verão	26,1	28,2	2,1	29,5	3,4
	Outono	25,5	27,4	2,0	28,8	3,3
	Inverno	24,4	26,4	2,0	27,8	3,4
	Primavera	26,3	28,5	2,2	30,0	3,7
Centro-Oeste	Verão	25,8	27,8	2,1	29,3	3,5
	Outono	25,0	27,3	2,2	28,9	3,9
	Inverno	23,3	25,9	2,5	27,6	4,3
	Primavera	25,9	28,6	2,8	30,4	4,5

Continua...

Tabela 1. Continuação.

Regiões	Estações	1961 – 1990 Temperatura	2071 - 2100			
			Cenário B1		Cenário A2	
			Temperatura	Anomalia	Temperatura	Anomalia
Sudeste	Verão	24,0	26,0	2,0	27,3	3,3
	Outono	22,5	24,6	2,1	26,0	3,5
	Inverno	19,5	21,6	2,1	23,2	3,6
	Primavera	22,6	25,0	2,4	26,5	3,9
Sul	Verão	23,2	25,0	1,8	26,1	2,9
	Outono	19,4	21,2	1,8	22,5	3,1
	Inverno	14,8	16,6	1,9	17,9	3,2
	Primavera	18,9	20,8	2,0	21,9	3,1
Brasil	Verão	25,0	27,1	2,0	28,4	3,4
	Outono	23,7	25,7	2,0	27,2	3,5
	Inverno	21,6	23,8	2,2	25,3	3,8
	Primavera	24,1	26,5	2,4	28,0	3,9

Fonte: adaptado de Hamada et al. (2011).

As projeções das anomalias de precipitação pluviométrica ao longo das estações do ano no período de 2071 a 2100 (cenário A2), comparado ao período de 1961 a 1990, preveem alterações também nessa variável climática (Figura 7), porém com maior variação que para temperatura média. São previstas anomalias positivas de precipitação em todas as regiões do país durante o verão, enquanto que para as outras estações isso variará (HAMADA et al., 2011). Na primavera, todas as regiões terão anomalia negativa, exceto a região Sul. A região Nordeste, por sua vez, somente apresentará anomalia positiva no verão e nas outras estações com anomalias negativas, o que é preocupante em função da diminuição prevista das chuvas no futuro. Da mesma forma, prevê-se também para a região Sudeste diminuição das chuvas nas estações de outono, inverno e primavera, porém em menor grau que na região Nordeste.

Após a elaboração dos mapas dos cenários climáticos futuros gerados pelas projeções dos modelos climáticos, utilizando-se a metodologia escolhida, essas informações vão então servir de dado de entrada para outros modelos que simulem o fenômeno/tema proposto no estudo. Nesse caso, são selecionados para utilização os modelos de doença de planta cujos “inputs” ou entrada de informações do clima estão ajustados com as características de resolução espacial e temporal dos resultados obtidos pelos mapas dos modelos globais. Assim, as características de resolução

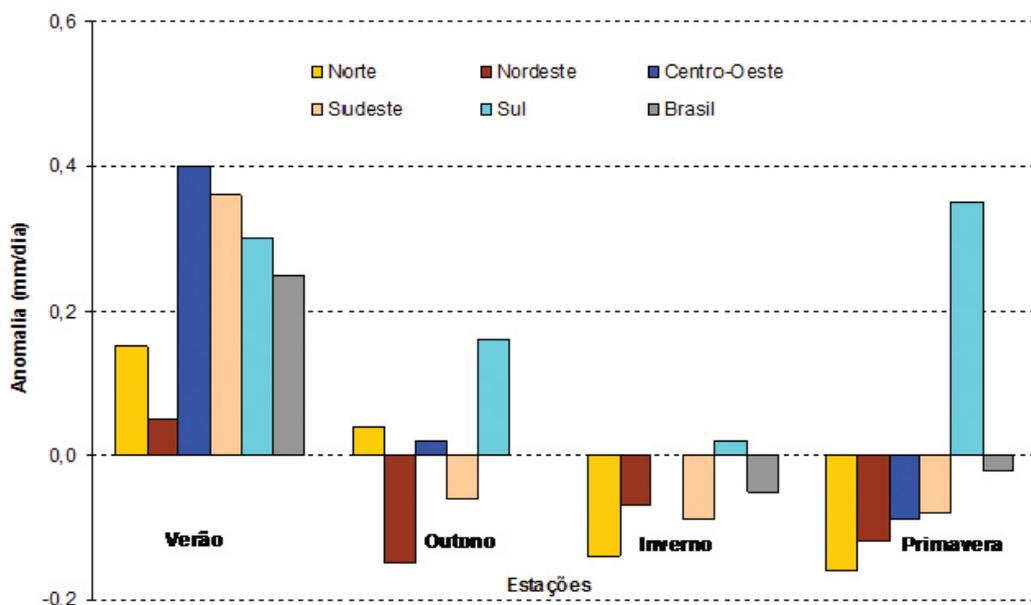


Figura 7. Anomalias de precipitação pluviométrica do período de 2071 a 2100, cenário A2, comparadas ao período de 1961 a 1990, para as estações do ano, nas regiões e no Brasil.

Fonte: Hamada et al. (2011).

temporal e espacial dos mapas das projeções do clima futuro devem estar de acordo com as necessidades dos modelos do fenômeno/tema do estudo, definidas na sua calibração e parametrização.

4. Considerações finais

As mudanças do clima no futuro devem afetar de forma distinta os diferentes setores e seus impactos devem ser estudados em sua particularidade e, em geral, têm como ponto de partida as projeções climáticas futuras.

A escolha metodológica para a elaboração de mapas dos cenários climáticos futuros deve levar em consideração o objetivo de sua aplicação. Desta forma, avalia-se as necessidades das informações climáticas provenientes dos modelos climáticos quanto às suas características, como sua resolução espacial e temporal, conjugado à disponibilidade dessas informações e balanceando-as com as possíveis vantagens/acréscimos e desvantagens/limitações de cada escolha metodológica.

Também deve-se considerar que os “inputs” ou entrada de informações do clima dos modelos que descrevem o fenômeno/tema proposto no estudo, em particular, deverão combinar com as características de resolução espacial e temporal dos mapas dos cenários do clima futuro elaborados a partir dos modelos climáticos adotados.

6. Referências

BETTS, R.; NOBRE, C.; KAY, G.; SAMPAIO, SHOU, S. C. Como modelamos o clima. In: MARENGO, J. A.; BETTS, R. (Coord.). **Riscos das mudanças climáticas no Brasil: análise conjunta Brasil- Reino Unido sobre os impactos das mudanças climáticas e do desmatamento na Amazônia**. São José dos Campos: INPE, 2011. p. 32-38. Disponível em: <<http://www.inpe.br/noticias/arquivos/pdf/relatorioport.pdf>>. Acesso em: 1 ago. 2014.

CUBASCH, U.; WUEBBLES, D.; CHEN, D.; FACCHINI, M. C.; FRAME, D.; MAHOWALD, N.; WINTHER, J. -G. Introduction. In: IPCC. **Climate change 2013: the physical science basis**. Contribution of working group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. p. 119-158. Editado por T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P. M. Midgley. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_Chapter01_FINAL.pdf>. Acesso em: 28 dez. 2014.

DIAS, M. A. F. S.; DIAS, P. L. S. As incertezas regionais nos cenários de mudanças climáticas globais. **Boletim da Sociedade Brasileira de Meteorologia**, Rio de Janeiro, v. 31, n. 1, p. 12-16, abr. 2007.

HAMADA, E.; GHINI, R.; MARENGO, J. A.; THOMAZ, M. C. Projeções de mudanças climáticas para o Brasil no final do Século 21. In: GHINI, R.; HAMADA, E.; BETTIOL, W. (Ed.). **Impactos das mudanças climáticas sobre doenças de importantes culturas no Brasil**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2011. p. 41-74. Disponível em: <<http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/956619>>. Acesso em: 1 ago. 2014.

IPCC. **Climate change 2001: the scientific basis**. Contribution of working group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 881 p. Editado por J. T. Houghton, Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, C. A. Johnson.

IPCC. **Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability**. Contribution of working group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 976 p.

Editado por M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden, C. E. Hanson. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg2/ar4_wg2_full_report.pdf>. Acesso em: 28 dez. 2014.

IPCC. **Climate change 2007**: synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC, 2008. 104 p. Editado por Núcleo da Equipe de Redação, R. K. Pachauri, A. Reisinger. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_full_report.pdf>. Acesso em: 3 mar. 2015.

IPCC. Summary for policymakers. In: IPCC. **Climate change 2013**: the physical science basis. Contribution of working group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 29 p. Editor por T. F. Stocker, D. Qin, G. -K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P. M. Midgley. Disponível em: <http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_SPM_FINAL.pdf>. Acesso em: 1 ago. 2014.

MARENGO, J. A. **Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade**: caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do Século 21. 2. ed. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente-Secretaria de Biodiversidade e Florestas, 2007. 212 p. (Biodiversidade, 26). Disponível em: <http://mudancasclimaticas.cptec.inpe.br/~rmclima/pdfs/prod_probio/Livro2_completo.pdf>. Acesso em: 1 ago. 2014.

NOBRE, C.; MARENGO, J.; SAMPAIO, G.; BETTS, R.; KAY, G. Mudanças climáticas globais e regionais. In: MARENGO, J. A.; BELLS, R. (Coord.). **Riscos das mudanças climáticas no Brasil**: análise conjunta Brasil- Reino Unido sobre os impactos das mudanças climáticas e do desmatamento na Amazônia. São José dos Campos: INPE, 2011. p. 25-29. Disponível em: <<http://www.inpe.br/noticias/arquivos/pdf/relatorioport.pdf>>. Acesso em: 1 ago. 2014.

PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. **Sumário executivo**: base científica das mudanças climáticas. Rio de Janeiro, 2013. 24 p. Disponível em: <http://www.pbmc.coppe.ufrj.br/documentos/MCTI_PBMC_Sumario%20Executivo%204_Finalizado.pdf>. Acesso em: 3 mar. 2015.

RANDALL, D. A.; WOOD, R. A.; BONY, S.; COLMAN, R.; FICHEFET, T;
FYFE, J.; KATTISOV, V.; PITMAN, A.; SHUKLA, J.; SRINIVASAN, J.;
STOUFFER, R. J.; SUMI, A.; TAYLOR K. E. Climate models and their evaluation.
In: IPCC. **Climate change 2007: the physical science basis**. Contribution of
Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel
on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007. p. 589-662.
Editor por S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt,
M. Tigno, H. L. Miller. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-chapter8.pdf>>. Acesso em: 3 mar. 2015.

Projeções de mudanças climáticas para o Brasil no final do Século 21

Wagner R. Soares
Pesquisador / Instituto Nacional de
Pesquisas Espaciais (INPE)

1. Introdução

O Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), composto por centenas de cientistas do mundo e de várias áreas do conhecimento, vem gerando relatórios de avaliações a cerca das mudanças climáticas a partir de estudos científicos desde a década de 1990. Assim, com embasamento científico, vem sinalizando que possíveis variações climáticas vão ocorrer no clima futuro.

As avaliações feitas pelo IPCC vêm sinalizando que excessivas emissões de gases de efeito estufa podem provocar mudanças permanentes e irreversíveis no clima do planeta. A temperatura da superfície média global poderá aumentar, em média, entre 2,5 °C e 6 °C devido a maiores emissões e concentrações de gases de efeito estufa e de aerossóis na atmosfera. Da mesma forma, no Brasil, projeções de clima para o final do século apontam aumento de temperatura e variações na precipitação. Ressalta-se que o efeito estufa natural é o responsável pela vida em nosso planeta como a conhecemos e mantém a temperatura média da superfície do planeta em 15 °C, sem ele, a temperatura média da superfície seria em torno de 18 °C negativos.

Aumentos nas concentrações dos gases de efeito estufa e conseqüentemente uma intensificação do efeito estufa natural nos remete ao termo *mudanças climáticas globais*, que segundo o IPCC refere-se a uma mudança no estado do clima que pode ser identificada (por exemplo, usando testes estatísticos) por mudanças na média e/ou na variabilidade de suas propriedades, e que persiste por um longo período, tipicamente décadas ou mais. De fato, variações na temperatura média da superfície do planeta podem causar modificações nos recursos hídricos, nos sistemas ecológicos, na produtividade do solo, nos oceanos e na química da atmosfera (MARENGO; SOARES, 2003).

A alteração do clima causado pelo homem se dá pelas altas emissões dos gases de efeito estufa através de processos industriais, principalmente oriundos do Hemisfério Norte, China e países desenvolvidos e pelo uso da terra em países da América do Sul, África e Ásia.

Mudanças climáticas podem acontecer devido a processos internos e/ou forçantes externas. Exemplos de influências externas, que ocorrem naturalmente, são: mudanças na radiação solar e atividade vulcânica, que contribuem para a variabilidade natural total do sistema climático. Resultado da atividade humana, outra influência externa, é a mudança na composição da atmosfera que teve início a partir da revolução industrial. Já a variabilidade interna está presente em todas as escalas de tempo. Os processos atmosféricos que geram a variabilidade interna são conhecidos por atuarem em escalas de tempo situadas desde instantaneamente (ex: condensação do vapor d'água nas nuvens) até anos (ex: trocas entre troposfera-estratosfera ou entre hemisférios). Já as componentes do sistema climático como grandes camadas de gelo e o oceano, atuam em escalas de tempo maiores. Estas componentes produzem sua própria variabilidade interna, mas interagem com a variabilidade rápida na atmosfera. Em adição, a variabilidade interna é produzida por interações acopladas entre as componentes, tal como o El-Niño Oscilação Sul.

Diferenciar os efeitos das influências externas e da variabilidade interna do clima requer uma cuidadosa comparação entre as mudanças observadas e aquelas mudanças que são supostamente resultantes das forçantes externas. Baseado nos princípios físicos que regem o sistema climático, este entendimento pode ser obtido por modelos conceituais ou ser quantificado por modelos climáticos.

2. Fatos

O aquecimento do sistema climático devido às causas antropogênicas pode ser detectado em observações de temperatura em superfície, na troposfera e nos oceanos. As análises de detecção e atribuição, que quantificam a contribuição de diferentes forçantes naturais e antropogênicas em relação às mudanças observadas, mostram que a forçante resultante dos gases de efeito estufa durante a última metade do século teria, provavelmente, resultado em um aquecimento maior do que o observado caso não tivesse havido um resfriamento compensatório ocasionado pelos aerossóis e outras forçantes. O termo forçante afere a influência dos fenômenos naturais e antropogênicos no aumento das radiações que atingem a Terra.

Estimativas baseadas nas limitações observacionais indicam que é muito provável que a sensibilidade climática de equilíbrio seja maior do que 1,5 °C, com um valor mais provável entre 2 °C e 3 °C. Isto suporta todas as avaliações baseadas em estudos observacionais e de modelagem em que a sensibilidade de equilíbrio climático é provavelmente de 2 °C a 4,5 °C, com um valor mais provável de aproximadamente 3 °C. Segundo o IPCC (2007, 2013), a resposta climática transiente, baseada em limitações observacionais, é muito provavelmente maior do que 1 °C e muito improvável ser

maior do que 3,5 °C para o dobro do CO₂ atmosférico, em resposta a um aumento de 1% ao ano das concentrações desse gás, dessa forma suportando todas as avaliações de que a resposta climática transiente é muito improvavelmente maior do que 3 °C.

Segundo o IPCC (2013), em comparação as décadas a partir de 1850, as três últimas foram as mais quentes, sendo a primeira década do Século 21 a mais quente de todas neste período. O período de 1983 até 2012 foi “muito provavelmente” (90% de probabilidade) o mais quente dos últimos 800 anos. No entanto, considerando o período de 1951 até 2012, o IPCC avalia ter ocorrido uma queda na taxa de aquecimento do planeta nos últimos 15 anos. Essa taxa teria passado de 0,12 °C/década para 0,05 °C/década, quando se considera apenas o período entre 1998 a 2012 (15 anos). A diminuição na taxa de aquecimento do planeta entre 1951 e 2012 pode ser devido a dois principais fatores: o primeiro pode estar relacionado com a maior absorção de calor em águas profundas nos oceanos e o outro estaria associado a maior frequência de fenômenos La Niña, os quais modificam as taxas de transferência de calor da atmosfera para os oceanos.

Ainda segundo o IPCC (2013), medições a partir de 1958 mostram que as concentrações de CO₂ na atmosfera já teriam aumentado em mais de 20%, e a partir de estimativas, cerca de 40% desde 1750. Além disso, estima-se que as taxas médias de dióxido de carbono, metano e óxido nitroso do último século sejam as mais altas dos últimos 22 mil anos. Já mudanças na irradiação solar e a atividade vulcânica contribuíram com uma pequena fração da alteração climática. O IPCC estabelece, com 95% de certeza, que a influência humana sobre o clima causou mais da metade do aumento da temperatura observado entre 1951 e 2010. Além disso, existem evidências de degelo, principalmente na região do Ártico e com 90% de certeza que a taxa de redução da camada de gelo tenha sido entre 3,5% e 4,1% por década desde 1979 até 2012. Também com probabilidade de 90% de certeza que o número de dias e noites frias diminuíram, enquanto os dias e noites quentes aumentaram em escala global.

3. Incertezas nas projeções das mudanças climáticas

Apesar dos acelerados avanços verificados nos últimos anos, as projeções climáticas são ainda cercadas de imperfeições e incertezas, oriundas da própria dinâmica do sistema climático. No que concerne à possibilidade de projetar um clima futuro sob influência de cenários de aquecimento global, tais incertezas ficam ainda mais evidentes quando se observa as dificuldades quanto às medições e estimativas de emissões de gases de efeito estufa, e os efeitos reais ou potenciais de outros eventos, como erupções vulcânicas.

Segundo o IPCC (2007, 2013), melhoramentos adicionais nos modelos e nas técnicas de análise aumentaram a confiança no entendimento da influência das forçantes externas no clima desde o terceiro relatório (TAR) do IPCC. Entretanto, estimativas de algumas forçantes radiativas permanecem incertas, incluindo a forçante por aerossóis e variações inter-decadais na forçante solar. A forçante líquida dos aerossóis durante o Século 20, a partir de estimativas inversas baseadas no aquecimento observado, provavelmente situa-se entre $-1,7 \text{ W.m}^{-2}$ e $-0,1 \text{ W.m}^{-2}$. A consistência desse resultado com estimativas futuras da forçante total de aerossóis fortalece a confiança na estimativa dessa variável, apesar das incertezas remanescentes. As incertezas na forçante e na resposta dos resultados de atribuição de temperatura em superfície tem sido avaliada utilizando-se vários modelos climáticos. Existe uma confiança menor no entendimento de mudanças de forçantes em relação a outras variáveis, tal como pressão à superfície e precipitação, e em escalas espaciais menores.

Melhor precisão instrumental na obtenção dos dados climáticos observados, e melhorias nos modelos climáticos, têm aumentado à confiança na variabilidade interna do clima simulado pelos modelos. Porém, as dúvidas ainda permanecem. Por exemplo, existem aparentes discrepâncias entre estimativas da variabilidade do conteúdo de energia térmica nos oceanos provenientes de modelos e observações.

Apesar da redução das incertezas existentes no terceiro relatório (IPCC-TAR) em relação aos dados de radiossondagem atmosférica e de satélite, estes ainda afetam a confiança nas estimativas da contribuição antropogênica para as mudanças de temperatura troposférica.

Os conjuntos de dados globais incompletos e as incertezas persistentes nos modelos ainda restringem o entendimento das mudanças nos extremos e da atribuição das causas das mudanças climáticas, embora o entendimento das mudanças na intensidade, frequência e risco de extremos hidro-climáticos tenha melhorado. Porém, é necessário enfatizar que todo avanço no conhecimento científico a cerca do clima e dos processos físicos do sistema são incorporados a cada nova geração de modelos utilizados nas simulações climáticas, afim de melhor representar o clima e sua variabilidade.

4. Modelagem do clima e cenários climáticos

Para se fazer projeções de clima são utilizados os modelos climáticos Globais ou Regionais, os quais tentam representar a natureza da forma mais realística possível, dado o nível de conhecimento e ferramentas computacionais atuais. De acordo com Jones et al. (2004), cenários climáticos são representações plausíveis das emissões futuras de substâncias ativas do ponto de vista radiativo (gases de efeito estufa) ou que possuam a característica de afetar outros constituintes que são ativos do mesmo ponto de vista

radiativo (como por exemplo, o dióxido de enxofre que forma aerossóis de sulfato). Os cenários de emissão *Special Report on Emissions Scenarios* (SRES) (NAKICENOVIC et al., 2000), utilizados no quarto relatório do IPCC, são baseados em um conjunto de suposições coerentes e fisicamente consistentes sobre suas forçantes, tais como demografia, desenvolvimento socioeconômico e mudanças tecnológicas.

O IPCC-AR5 (Fifth Assessment Report) de 2013-2014 introduz os novos cenários Representative Concentration Pathways (RCPs) – (MOSS et al., 2010) que usam um sistema mais completo, e levam em conta os impactos das emissões, ou seja, o quanto haverá de alteração no balanço de radiação no sistema terrestre. O balanço de radiação é calculado pela razão entre a quantidade de radiação solar que entra e aquela que sai da Terra, bem como em função das concentrações de gases de efeito estufa e de aerossóis, obtendo-se o quanto de energia ficou armazenada no sistema terrestre.

A Figura 1 mostra a evolução temporal dos cenários RCPs desde o ano 2000 até o final do século. São quatro cenários, que vão do mais otimista (2.6) até um

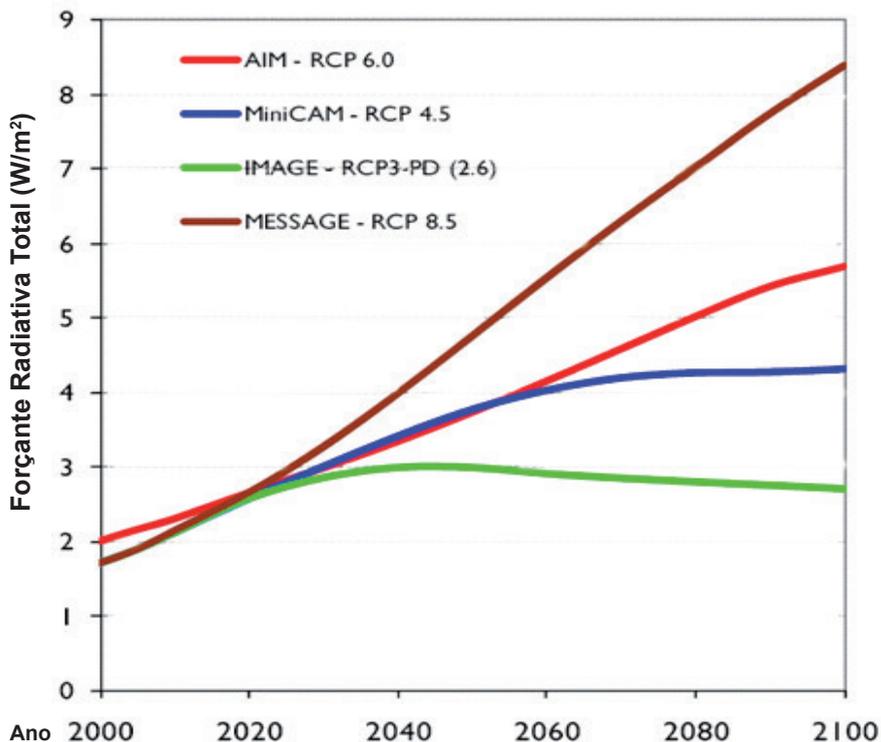


Figura 1. Quatro caminhos representativos dos RCPs. Forçante radiativa total em W/m².
Fonte: adaptado de Moss et al. (2010).

cenário mais pessimista (8.5). As principais características como forçante radiativa, concentração de CO₂ equivalente, comportamento ao longo do Século 21, variação da temperatura e nível do mar desses quatro cenários estão contidas na Tabela 1.

Tabela 1. Características dos cenários RCPs do IPCC-AR5

RCP	Forçante Radiativa:	Concentração (ppm) CO ₂ -equiv.	Comportamento	Elevação da Temp. no Planeta	Elevação do Nível do mar
2.6	Pico de 3Wm^{-2} em 2100 e então declina até 2.6	~ 490	Elevação com pico em 2040 e declina	Entre 0,3 °C e 1,7 °C	Entre 26 cm e 55 cm
4.5	Armazenamento adicional de ~4.5Wm ⁻² estabiliza depois de 2100	~650	Elevação até 2060 e estabiliza	Entre 1,1 °C e 2,6 °C	Entre 32 cm e 63 cm
6.0	Armazenamento adicional de ~6Wm ⁻²	~850	Elevação até 2100 e estabiliza	Entre 1,4 °C até 3,1 °C	Entre 33 cm e 63 cm
8.5	Armazenamento em torno de 8.5Wm ⁻² adicionais	>1370	Elevação até 2100	Entre 2,6 °C e 4,8 °C	Entre 45 cm e 82 cm

5. Análise de anomalias de temperatura e precipitação para o final do século no Brasil

A seguir são mostrados resultados de simulações do modelo regional Eta-CPTEC com resolução de 40km, onde foi utilizada a técnica *Perturbed Physics Ensemble* (PPE). Neste trabalho foram utilizados quatro membros de um conjunto de simulações a partir do cenário SRES A1B do IPCC-AR4. Esses membros são os seguintes: *sem perturbação*, ou seja, sem utilizar a técnica PPE, e outros três membros (derivados do cenário A1B) que foram obtidos a partir da técnica PPE. Essas três simulações refletem cenários de *alta, média e baixas* emissões, ou seja, quatro caminhos possíveis em relação às concentrações de gases de efeito estufa ao longo do tempo. Mais informações sobre a PPE, validação do modelo e projeções podem ser obtidas em Chou et al. (2012) e Marengo et al. (2012).

Nas Tabelas 2 e 3 são mostrados os valores da temperatura e precipitação simuladas pelo modelo regional para a climatologia de 1961-1990 (considerado o clima atual) e as projeções para dois timeslices (fatias de tempo, que neste estudo são de 30 anos), quais sejam: o timeslice 50s que é a média para o período entre 2041

e 2070 e o timeslices 80s que é a média entre o período de 2071 e 2100. O termo ensemble representa a média de vários membros obtidos de simulações, no caso específico deste trabalho, o ensemble representa a média dos membros a, b, c e d mencionados anteriormente, a coluna E representa o ensemble para o clima atual (1961-1990); a coluna K o ensemble para o timeslices 50s; e a coluna Q o ensemble para o timeslices 80s. Os valores do desvio padrão dos quatro membros, em cada timeslices, são mostrados nas colunas F, L e R. Os cálculos foram feitos para quatro regiões: todo o Brasil, bacia Amazônica, bacia do São Francisco e bacia Paraná.

Nas duas tabelas, nas colunas D1 e D2, estão representadas as anomalias dos ensembles, onde, para a temperatura (Tabela 2), são observados os seguintes possíveis impactos: para todo o território brasileiro, um aquecimento de 3,2 °C e 4,51 °C para os timeslices de 50s e 80s respectivamente; para a bacia do São Francisco, são observados os menores valores de aquecimento, 2,76 °C nos 50s e 3,85 °C nos 80s; para bacia do Paraná, o aquecimento é maior, 3,22° C nos 50s e 4,51 °C nos 80s; para a bacia Amazônica, são observados os maiores valores de aquecimento em relação ao clima atual, com valores de 3,54 °C nos 50s e chegando até 5,01 °C nos 80s. Concordando com vários resultados obtidos de outros estudos e diferentes modelos, as simulações do modelo regional Eta-CPTEC mostra que região amazônica poder ser afetada com maior aumento de temperatura em comparação a outras regiões do Brasil.

Tabela 2. Simulações de Temperatura (°C) do modelo Eta-CPTEC.

Membros das simulações						
	Alta	Média	Baixa	Sem perturbação		
	A	B	C	D	E	F
	Media 1961_1990	Media 1961_1990	Media 1961_1990	Media 1961_1990	Ensemble (A, B, C, D)	Desv. P. (A, B, C, D)
Brasil	25,18	25,24	24,13	24,41	24,74	0,56
Amazônia	26,51	26,60	25,43	25,68	26,05	0,59
São Francisco	23,04	23,04	21,99	22,22	22,57	0,55
Paraná	24,10	24,04	23,02	23,44	23,65	0,52
Membros das simulações						
	Alta	Média	Baixa	Sem perturbação		
	G	H	I	J	K	L

Continua...

Tabela 2. Continuação.

	50s	50s	50s	50s	Ensemble (G, H, I, J)	Desv. P. (G, H, I, J)
Brasil	28,80	28,82	26,44	27,68	27,94	1,13
Amazônia	30,51	30,49	28,01	29,35	29,59	1,19
São Francisco	26,11	26,16	23,95	25,12	25,34	1,04
Paraná	27,75	27,85	25,31	26,58	26,88	1,19
Membros das simulações						
	Alta	Média	Baixa	Sem perturbação		
	M	N	O	P	Q	R
	80s	80s	80s	80s	Ensemble (M, N, O,P)	Desv. P. (M, N, O,P)
Brasil	30,63	30,16	27,44	28,77	29,25	1,44
Amazônia	32,45	31,97	29,18	30,63	31,06	1,47
São Francisco	27,70	27,23	24,81	25,93	26,42	1,31
Paraná	29,69	29,33	26,07	27,54	28,16	1,68
Anomalia dos Ensembles						
	D1	D2				
	Dif (K-E)	Dif (Q-E)				
Brasil	3,20	4,51				
Amazônia	3,54	5,01				
São Francisco	2,76	3,85				
Paraná	3,22	4,51				

Em relação à precipitação, as anomalias obtidas pelo modelo Eta-CPTEC mostram para todo o território Brasileiro, uma redução de 14,22% no timeslices 50s e chegando até -18,09% nos 80s. Para a região Amazônica, o modelo estima redução na chuva da ordem de -15,53% nos 50s e -19,31 nos 80s. Uma grande redução da precipitação pode ser observada na bacia do São Francisco, onde nos 50s o valor é de -27,54% e chega até -35,64% nos 80s, indicando que esta bacia pode ser bastante impactada com maior deficiência de chuva e disponibilidade hídrica. Já as projeções para a bacia do Paraná, apresentam uma pequena redução, menor que 2.5%, tanto nos 50s como nos 80s.

Tabela 3. Simulações de Precipitação (mm.d⁻¹) do modelo Eta-CPTEC.

Membros das simulações						
	Alta	Média	Baixa	Sem perturbação		
	A	B	C	D	E	F
	Media 1961_1990	Media 1961_1990	Media 1961_1990	Media 1961_1990	Ensemble (A, B, C, D)	Desv. P. (A, B, C, D)
Brasil	4,32	4,46	4,45	4,41	4,41	0,07
Amazônia	5,25	5,36	5,27	5,26	5,28	0,05
São Francisco	2,53	3,0	3,08	2,92	2,88	0,24
Paraná	4,31	4,02	4,27	4,02	4,16	0,16
Membros das simulações						
	Alta	Média	Baixa	Sem perturbação		
	G	H	I	J	K	L
	50s	50s	50s	50s	Ensemble (G, H, I, J)	Desv. P. (G, H, I, J)
Brasil	3,65	3,6	4,19	3,69	3,78	0,27
Amazônia	4,30	4,39	4,82	4,34	4,46	0,24
São Francisco	1,86	1,66	2,89	1,95	2,09	0,55
Paraná	4,16	3,92	4,15	3,98	4,05	0,12
Membros das simulações						
	Alta	Média	Baixa	Sem perturbação		
	M	N	O	P	Q	R
	80s	80s	80s	80s	Ensemble (M, N, O,P)	Desv. P. (M, N, O,P)
Brasil	3,48	3,44	4,01	3,52	3,61	0,26
Amazônia	4,18	4,23	4,55	4,11	4,26	0,19
São Francisco	1,52	1,47	2,52	1,9	1,86	0,49
Paraná	4,02	3,72	4,44	4,07	4,06	0,30
Anomalia dos Ensembles (%)						
	D1	D2				
	Dif (K-E)	Dif (Q-E)				
Brasil	-14,22	-18,09				
Amazônia	-15,53	-19,31				
São Francisco	-27,54	-35,64				
Paraná	-2,50	-2,23				

6. Impactos das mudanças climáticas no Brasil no final do Século

Com base em resultados de simulações de modelos globais e regionais (AMBRIZZI et al., 2007; MARENGO et al., 2010; MENDES; MARENGO, 2010; SOARES; MARENGO, 2009), na tabela 4, será mostrado um resumo das principais mudanças do clima e possíveis impactos para o Brasil no final deste século.

Tabela 4. Projeções de mudanças climáticas para o Brasil e possíveis impactos.

Região	Temperatura	Precipitação	Possíveis impactos
Norte	Altas emissões: 4-7 °C mais quente	Altas emissões: 20-30% de redução	-Perdas nos ecossistemas e biodiversidade na Amazônia -Mais eventos extremos de chuva e secas mais severas
	Médias emissões: 3-5°C mais quente	Médias emissões: 5-15% de redução	-Condições favoráveis para mais queimadas
Centro-Oeste	Altas emissões: 3-6 °C mais quente	Altas e médias Emissões: Aumento da chuva na forma de chuvas intensas e irregulares	-Impactos no Pantanal e Cerrado (maior risco de fogo) -Mais eventos extremos de chuva e secas -Maior taxa de evaporação e veranicos com ondas de calor
	Médias Emissões 2-4 °C mais quente		-Impactos na saúde, agricultura e geração de hidro-energia
Nordeste	Altas emissões: 2-4 °C mais quente	Altas emissões: 20-30% redução de chuva	-Mais veranicos -Tendência para aridização -Alta taxa de evaporação afetando o nível dos açudes e agricultura de subsistência
	Médias emissões: 1-3 °C mais quente	Médias emissões: 10-15% redução de chuva	-Maior escassez de água
Sudeste	Altas emissões: 3-6 °C mais quente	Altas e médias Emissões: Possível aumento da chuva na forma de chuvas intensas e irregulares	-Mais eventos extremos de chuva e períodos de secas - Ondas de calor -Impactos saúde, agricultura e geração de hidro-energia -Possível elevação do Nível do Mar
	Médias emissões: 2-3 °C mais quente		
Sul	Altas emissões: 2-4 °C mais quente,	Altas e Médias Emissões: Aumento de 20% até 40%	-Mais eventos intensos de chuva -Aumento na frequência de noites quentes
	Médias Emissões: 1-3 °C mais quente		-Altas temperaturas e variabilidade de chuvas afetando a agricultura

7. Considerações finais

Nas últimas décadas o efeito estufa e a perspectiva de aquecimento global tem sido uma preocupação constante do meio científico. Aumentos históricos nas concentrações de CO₂ têm sido documentados, segundo os quais projeções de médio prazo sugerem uma quase duplicação nas concentrações atuais (aprox. 380 ppm) para até 700 ppm, por volta do ano 2100 (IPCC, 2007). Assim, o aumento nas concentrações dos gases de efeito estufa irá, provavelmente, alterar os padrões globais de temperatura e precipitação no final deste século. Evidências científicas têm servido de combustível para essa preocupação e as variabilidades quanto às frequências e intensidade de ocorrência de determinados eventos climáticos sugerem que tais discussões se façam com base no foco da sustentabilidade. Segundo o IPCC (2013), as mudanças climáticas, hoje, já não são simples prognósticos científicos, mas vem se tornando uma realidade. Os aumentos antropogênicos nas emissões de gases de efeito estufa e aerossóis na atmosfera resultam em uma mudança na forçante radiativa e um aumento na temperatura da Terra, influenciando também nas precipitações.

Os relatórios do IPCC vem sinalizando que mudanças na temperatura e precipitação podem conduzir mudanças e afetar o acesso aos recursos hídricos. Áreas afetadas por secas, assim como eventos extremos de chuva devem crescer em extensão, assim como a magnitude desses eventos, conduzindo à impactos negativos em diversos setores da sociedade tais como a agricultura, o abastecimento de água, a saúde e a produção de energia. Além disso, a elevação da temperatura poderá influenciar ainda mais nas propriedades da água doce, com impactos mais negativos nas espécies e na qualidade da água.

Assim, mantido o atual padrão de desenvolvimento, as mudanças climáticas poderão ter consequências graves em setores da agricultura, como a horticultura, que poderá ser afetada pela combinação entre efeitos da mudança do clima como enchentes, secas, incêndios associados a outros fatores como mudança de uso da terra, poluição, fragmentação e grande exploração de recursos naturais. São necessários mais estudos acerca dos impactos das mudanças climáticas na agricultura, assim como a busca de alternativas viáveis em relação aos possíveis impactos nos recursos hídricos o qual poderá ser afetado por mudanças no clima.

8. Referências

AMBRIZZI, T.; ROCHA, R.; MARENGO, J. A.; PISNITCHENKO, I.; ALVES, L. N.; FERNANDEZ, J. P. **Cenários regionalizados de clima no Brasil para o Século 21**: projeções de clima usando três modelos regionais. 1). Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2007. 108 p. (Relatório 3. Projeto Mudanças climáticas globais e efeitos sobre a biodiversidade. Subprojeto: Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do Século 21.

CHOU, S. C.; MARENGO, J. A.; LYRA, A.; SUEIRO, G.; PESQUERO, J. F.; ALVES, L. M.; KAY, G.; BETTS, R.; CHAGAS, D.; GOMES, J. L.; BUSTAMANTE, J.; TAVARES P. Downscaling of South America present climate driven by 4-member HadCM3 runs. **Climate Dynamics**, Berlin, v. 38, n. 3-4, p. 635-653, Feb. 2012.

IPCC. **Climate change 2007**: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of working group II to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. p. 7-22. Editado por M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden, C. E. Hanson. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg2/ar4-wg2-spm.pdf>>. Acesso em: 28 dez. 2014.

IPCC. **Climate change 2013**: the physical science basis. Working group I contribution to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 1552 p. Editado por Thomas F. Stocker, Dahe Qin, Gian-Kasper Plattener, Melinda M. B. Tignor, Simon k. Allen, Judith Boschung, Alexander Nauels, Yu Xia, Vincent Bex, Pauline M. Midgley. Disponível em:<<http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>>. Acesso em: 14 nov. 2014.

JONES, R. G.; NOGUER, M.; HASSEL, D. C.; HUDSON, D.; WILSON, S. S.; JENKINS, G. J.; MITCHELL, J. F. B. **Generating high resolution climate change scenarios using PRECIS**. Exeter: Meteorological Office Hadley Centre, 2004. 44 p. Disponível em: <http://www.metoffice.gov.uk/media/pdf/6/5/PRECIS_Handbook.pdf>. Acesso em: 26 dez. 2014.

MARENGO, J. A.; AMBRIZZI, T.; ROCHA, R. P.; ALVES, L. M.; CUADRA, S. V.; VALVERDE, M. C.; TORRES, R. R.; SANTOS, D. C.; FERRAZ, S. E. T. Future change of climate in South America in the late twenty-first century: intercomparison of scenarios from three regional climate models. **Climate Dynamics**, Berlin, v. 35, n. 6, p. 1089-1113, 2010.

MARENGO, J. A.; SOARES, W. R. Impactos das mudanças climáticas no Brasil e possíveis futuros cenários climáticos: síntese do terceiro relatório do IPCC. In: TUCCI, C. E. M.; BRAGA, B. (Org.). **Clima e recursos Hídricos no Brasil**. Porto Alegre: Associação brasileira de recursos hídricos, 2003. p. 209-242. (Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 9).

MARENGO, J. A.; CHOU, C. S.; KAY, G.; ALVES, L. M.; PESQUERO, J. F.; SOARES, W. R.; SANTOS, D. C.; LYRA, A. M.; SUEIRO, G.; BETTS, R. CHAGAS, D.; GOMES, J.; BUSTAMANTE, J.; TAVARES, P. Development of regional future climate change scenarios in South America using the Eta CPTEC/HadCM3 climate change projections: Climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Parana River Basins. **Climate Dynamics**, Berlin, v. 38, n. 9-10, p. 1829-1848, May 2012.

MENDES, D.; MARENGO, J. A. Temporal downscaling: a comparison between artificial neural network and autocorrelation techniques over the Amazon Basin in present and future climate change scenarios. **Theoretical and Applied Climatology**, Wien, v. 100, n.3/4, p. 413, May 2010.

MOSS, R. H.; EDMONDS, J. A. E. A.; HIBBARD, K. A.; MANNING, M. R.; ROSE, S. K.; VAN VUUREN, D. P.; CARTER, T. R.; EMORI, S.; EMORI, S.; KAINUMA, M.; KRAM, T.; MEEHL, G. A.; MITCHELL, J. B. F.; NAKICENOVIC, N.; RIAHI, K.; SMITH, S. J.; STOUFFER, R. J.; THOMSON, A. M.; WEYANT, J. P.; WILBANKS, T. J. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. **Nature**, London, v. 463, p. 747-756, 2010.

NAKICENOVIC, N.; ALCAMO, J.; DAVIS, G.; DE VRIES, B.; FENHANN, J.; GAFFIN, S.; GREGORY, K.; GRUBLER, A.; JUNG, T. Y.; KRAM, T.; LA ROVERE, E. L.; MICHAELIS, L.; MORI, S.; MORITA, T. PEPPER, W.; PITCHER, H.; PRICE, L.; RIAHI, K.; ROEHL, A.; ROGNER, H. H.; SANKOVSKI, A.; SCHLESINGER, M.; SHUKLA, P.; SMITH, S.; SWART, R.;

VAN ROOIJEN, S.; VICTOR, N.; DADI, Z. **Special report on emissions scenarios**. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 599 p.

SOARES, W. R.; MARENGO, J. A. Assessments of moisture fluxes east of the Andes in South America in a global warming scenario. **International Journal of Climatology**, Chichester, v. 29, n. 10, p. 1395-1414, Aug. 2009.

Os sistemas produtivos de hortaliças frente às mudanças climáticas: projeções e desafios

Carlos Eduardo Pacheco Lima
Eduardo Delgado Assad
Mariana Rodrigues Fontenelle
Nuno Rodrigo Madeira
Fábio Akyoshi Suinaga
Marcos Brandão Braga
Juscimar da Silva
Ítalo Moraes Rocha Guedes

1. Introdução

O equilíbrio do planeta, observado durante o holoceno, vem sendo fortemente ameaçado pela ação do homem sobre o meio ambiente. A severidade dos impactos de tais ações é tamanha que Crutzen (2002) e Zalasiewicz et al. (2010) propõem que chamemos essa nova época, inaugurada provavelmente com a revolução industrial e, onde a ação humana é um dos principais mecanismos capaz de promover diversas alterações ambientais, de “Antropoceno”.

Dentro desse contexto, Rockstrom et al. (2009) relatam as principais mudanças provocadas pelo ser humano capazes de provocar tal instabilidade e, por consequência, ameaçar a sobrevivência de diversas espécies no planeta, sendo elas: 1) mudanças climáticas globais; 2) perda de biodiversidade; 3) alterações no ciclo do N; 4) alterações no ciclo do P; 5) depreciação da camada de ozônio estratosférico; 6) acidificação dos oceanos; 7) uso de água doce; 8) mudanças no uso da terra; 9) entrada de aerossóis na atmosfera e 10) poluição química. O entendimento desses processos e o conhecimento dos limites dos mesmos são de extrema importância para reduzir o impacto das atividades antrópicas sobre o meio ambiente. Nesse sentido, os autores citados procuraram estimar os limites dos processos anteriormente citados e chegaram à conclusão que os três primeiros já alcançaram índices que, muito provavelmente, não permitem volta à condição inicial. Cabe então apenas a adaptação aos novos cenários e a elaboração de técnicas que reduzam a vulnerabilidade do homem e dos

diversos compartimentos ambientais a esses fenômenos, bem como técnicas que visem mitigar seus impactos.

Contrapondo as questões ambientais, existe uma clara necessidade de incremento dos índices de produtividade agrícola visando o abastecimento de uma população mundial crescente (RAY et al., 2013). Assim, as atividades agrícolas têm papel importante na manutenção da segurança alimentar mundial. Ao mesmo tempo, os impactos das mudanças climáticas sobre os sistemas agrícolas pode comprometer sensivelmente a capacidade produtiva destes. Faz-se necessário, portanto, que mecanismos capazes de adaptar tais sistemas às novas condições climáticas sejam urgentemente desenvolvidos. Ainda, produzir alimentos com a adoção de práticas e sistemas conservacionistas torna-se cada vez mais fortemente recomendado, pois, além de ser parte dos mecanismos de adaptação às novas condições, também podem atuar como mitigadores dos impactos dos sistemas produtivos sobre o meio ambiente.

Nesse ponto, é necessário lembrar que o setor que engloba atividades ligadas à agricultura, florestas e outros usos da terra é o segundo maior emissor mundial de gases de efeito estufa (GEEs), correspondendo a 24% do total de emissões (IPCC, 2014). No Brasil, os dados do Sistema de Estimativa de Emissão de Gases de Efeito Estufa (SEEG, 2015), o setor de mudança de uso da terra ainda representa a maior parcela das emissões (35%). Mas o setor de energia teve aumento expressivo de participação, e alcança agora 30% das emissões, e é seguido da agropecuária (27%), processos industriais (6%) e resíduos (3%). Considerando-se as diferentes atividades econômicas, o setor agropecuário continua a ser a principal fonte de emissões (considerando-se suas emissões diretas e a parcela do setor em desmatamento, energia e resíduos), com 63,4% das emissões em 2013. Mas sua participação diminuiu entre 2010 e 2013. Em 2010, o setor era responsável por 68% das emissões brasileiras. Neste mesmo período (2010-2013), cresceram a participação do setor de transportes (11% para 13%) e de produção de combustíveis e energia elétrica (4,5% para 6,1%).

O presente capítulo tem como objetivo discutir os possíveis impactos das mudanças climáticas sobre os sistemas produtivos de hortaliças. Adicionalmente, projeções climáticas para o fim do Século 21, mecanismos de adaptação às novas condições climáticas, bem como a adoção de sistemas conservacionistas de produção agrícola que permitam a mitigação dos impactos dos sistemas produtivos sobre as emissões atmosféricas de GEEs serão abordados ao longo do texto.

2. Projeções climáticas para o final do Século 21

Apesar de todos os estudos e esforços da comunidade científica para encontrar formas de conter o aquecimento global causado pelas emissões atmosféricas de gases

de efeito estufa, observou-se, entre 2000 e 2010, um crescimento dessas emissões maior do que nas três décadas anteriores. Para que se tenha uma ideia da magnitude dessa questão, estima-se que aproximadamente 50% das emissões antropogênicas de GEEs, registradas no período de 1750 a 2012, ocorreu nos últimos 40 anos. A consequência desse fato é que as temperaturas da superfície da Terra, nas últimas três décadas, foram sucessivamente mais quentes que aquelas registradas em qualquer outra década desde 1850 (IPCC, 2014).

Caso a tendência de crescimento das emissões de GEEs continue, o processo de aquecimento global também o fará. Assim, Rowlands et al. (2012) encontrou, por meio simulações, provável incremento na temperatura média do planeta entre 1,4 °C e 3 °C até 2050. Ainda, o quinto relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2014) reforçou as tendências de alterações do clima, já previstas em relatórios anteriores. Segundo esse relatório, é extremamente provável que mais da metade do aumento da temperatura da superfície terrestre entre 1951 e 2010 tenha sido causado pelo aumento das concentrações atmosféricas de GEEs, associadas a outras forçantes antropogênicas. A temperatura média global deve, até 2100, no pior cenário, aumentar entre 2,6 °C e 4,8 °C (Tabela 1) em comparação às médias do período de referência (1986 a 2005).

Na Tabela 1 é possível observar os prováveis incrementos de temperatura, em dois períodos distintos, para cada cenário abordado em IPCC (2013). O cenário Representative Concentration Pathways (RCP) 2,6, que pressupõe que o sistema terrestre armazenará 2,6 W.m⁻² de energia adicionais na superfície terrestre até o final do século, é aquele que assume que ações mitigadoras rigorosas serão adotadas e, portanto, representa o cenário mais otimista. Os cenários RCP 4,5 e RCP 6,0, que pressupõem armazenamentos adicionais de 4,5 e 6,0 W.m⁻² de energia na superfície terrestre, são intermediários. Por fim, o cenário RCP 8,5, que pressupõe armazenamento adicional de 8,5 W.m⁻² de energia na superfície terrestre, assume que as concentrações atmosféricas de CO₂ continuarão crescer fortemente ao longo do século e, portanto, é o mais pessimista de todos. A Figura 1 mostra as curvas geradas pelos cenários compreendidos entre RCP 2,6 a RCP 8,5, segundo IPCC (2014).

Com o aumento da temperatura, são esperadas alterações no clima do planeta (Tabela 2) que, contudo, sofrem variações regionais e locais. São esperadas ocorrências mais frequentes de extremos climáticos. Dessa forma, espera-se maior ocorrência de dias quentes, bem como diminuição de dias e noites frios. Devem ser ainda observadas maiores ocorrências de ondas de calor. Chuvas concentradas e intensas, bem como períodos secos maiores, mais duradouros e intensos também possivelmente se tornarão mais frequentes (IPCC, 2013). Nesse sentido, o trabalho

Tabela 1. Médias e faixas de incrementos da temperatura média global projetadas, para os períodos 2046-2065 e 2081-2100, e para os quatro RCPs avaliados, em relação àquela observada no período de referência (1986-2005).

Cenários	2046-2065		2081-2100	
	Média (°C)	Faixa de temperatura (°C)	Média (°C)	Faixa de temperatura (°C)
RCP 2.6	1,0	0,4 – 1,6	1,0	0,3 – 1,7
RCP 4.5	1,4	0,9 – 2,0	1,8	1,1 – 2,6
RCP 6.0	1,3	0,8 – 1,8	2,2	1,4 – 3,1
RCP 8.5	2,0	1,4 – 2,6	3,7	2,6 – 4,8

Fonte: adaptado de IPCC (2013)

Tabela 2. Algumas mudanças do clima global projetadas para o início e para o final do Século 21.

Fenômenos	Início do Século 21 (2016-2035)	Final do Século 21 (2081-2100)
Aquecimento e/ou menor ocorrência de dias e noites frios	Provável	Virtual certeza
Aquecimento e/ou maior ocorrência de dias e noites quentes	Provável	Virtual certeza
Maior ocorrência e duração de ondas de calor	Não avaliado formalmente	Muito provável
Maior frequência, intensidade e quantidade de chuvas intensas	Provável	Muito provável
Aumento da intensidade e duração das secas	Baixa confiança	Provável

Fonte: adaptado de IPCC (2013)

de Coumou e Rahmstorf (2012) reforça a possibilidade do aumento da temperatura causar mudanças importantes no clima do planeta. Nele, os autores mostram associações entre o aumento já observado da temperatura e fenômenos climáticos extremos registrados na última década, sobretudo na ocorrência de ondas de calor e precipitação intensa.

Para o território brasileiro, dados de Hamada et al. (2012) confirmam a tendência de aquecimento para todas as regiões e estações do ano. Os autores projetaram que a menor temperatura média do país, no fim do Século 21, provavelmente ocorrerá nos meses de junho e julho e será de 24,9 °C. A maior temperatura média, por sua vez, provavelmente ocorrerá em fevereiro, 28,5 °C. Regionalmente o comportamento

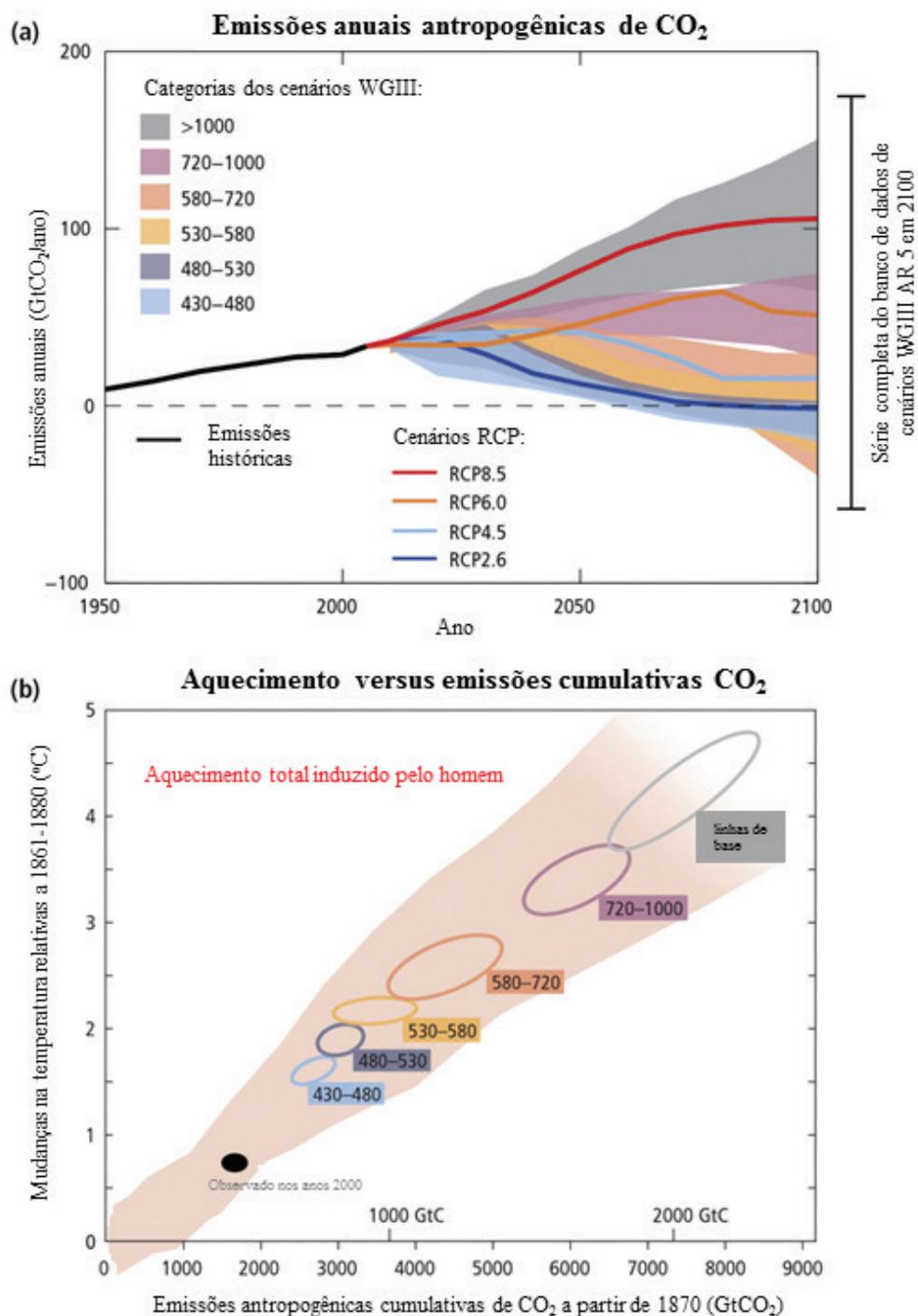


Figura 1. Projeção das emissões atmosféricas de GEEs.
 Fonte: adaptado de IPCC (2014).

deverá ser o seguinte: Região Norte – menor temperatura média igual a 29,7 °C nos meses de janeiro, fevereiro, março, maio e junho e maior temperatura média igual a 31,5 °C nos meses de setembro e outubro; Região Nordeste - menor temperatura média igual a 27,5 °C no mês de julho e maior temperatura média igual a 30,3 °C no mês de novembro; Região Centro-Oeste menor temperatura média igual a 26,9 °C no mês de junho e maior temperatura média igual a 30,9 °C no mês de outubro; Região Sudeste - menor temperatura média igual a 22,5 °C no mês de julho e maior temperatura média igual a 27,7 °C no mês de fevereiro; e Região Sul - menor temperatura média igual a 17,4 °C no mês de julho e maior temperatura média igual a 26,5 °C no mês de janeiro e fevereiro.

As mudanças nos índices pluviométricos devem variar a depender da região. Dessa forma, são esperados, por exemplo, aumento da precipitação média anual, sob o cenário RCP 8,5, para as altas latitudes e para o Pacífico Equatorial. Nas latitudes médias e nas regiões subtropicais, que atualmente constituem regiões secas, é esperado um decréscimo da precipitação média anual. Já nas regiões também situadas em latitudes médias ou em regiões subtropicais onde, porém, atualmente são registrados altos índices pluviométricos, deve ser observada maior precipitação média anual, no futuro. Ainda, eventos de precipitação extrema devem ser tornar mais intensos e frequentes em regiões tropicais húmidas e em latitudes médias (IPCC, 2014).

Hamada et al. (2012) também avaliaram as modificações na precipitação pluviométrica para o território brasileiro, considerando o período de 2071-2100, e as compararam com o período de referência (normais climatológicas de 1961-1990). Os resultados apresentaram grande variação, a depender do modelo utilizado, da região avaliada e da estação do ano, tornando-os pouco conclusivos. Essa grande variabilidade de dados projetados visando avaliação de possíveis mudanças nos índices pluviométricos para o território brasileiro também já havia sido detectada por Marengo (2007), levando-o a concluir que os modelos atuais não permitiriam inferir com precisão sobre tal fenômeno. Porém, de modo geral, Hamada et al. (2012) evidenciaram a observação de incrementos da precipitação projetada entre os meses de novembro a março e redução entre os meses de abril e outubro. Marengo (2007) ainda discute que, embora pouco conclusivos ao nível nacional e para a maioria das regiões brasileiras, a média de todos os modelos por ele utilizados indica, com razoável confiança, reduções nos índices pluviométricos das regiões nordeste e norte do país, mesmo nos meses em que normalmente o período chuvoso é mais intenso. Ele ainda relata que as projeções apontam, para o clima futuro do nordeste, déficit hídrico em praticamente todo o ano, o que pode tornar árida parte da região atualmente semiárida. Maior certeza, entretanto, se tem com relação ao aumento da frequência

dos fenômenos extremos. Análises feitas no Centro de Pesquisas Meteorológicas para agricultura (Cepagri) da Universidade de Campinas evidenciam o aumento da frequência de ocorrência de dias com temperatura maiores que 34 °C, conforme a Figura 2. São temperatura extremas que provocam ondas de calor atingindo a agricultura e a pecuária. Os efeitos na produção de olerícolas, por exemplo, é evidente, com aumento da evapotranspiração de água, maior demanda para irrigação, aumento de danos físicos, aumento do abortamento de flores, aumento da ocorrência de doenças, entre outros.

Número de dias com temperatura máxima acima de 34°C média de 291 estações no Brasil

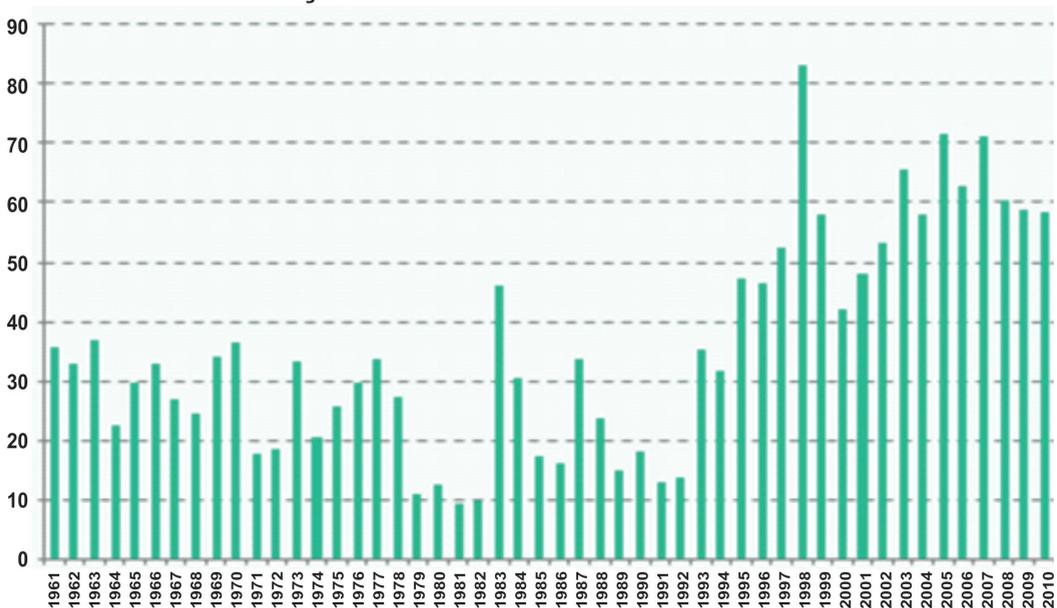


Figura 2. Frequência de ocorrência de dias com temperatura iguais ou maiores que 34 °C, segundo os dados meteorológicos do Inmet, analisados pelo Cepagri/Unicamp.

Com relação à intensidade das chuvas, Porto de Carvalho et al. (2014) analisou a ocorrência desse fenômeno em diversos biomas brasileiros e identificou um crescente aumento na intensidade, independente do Bioma. Ficou claro que as séries de chuva não são mais estacionárias, com alta variação na sua média por década. O mesmo para mudanças de intensidade para períodos de retorno menores. Essas chuvas intensas atingem diretamente a produção de hortaliças, pelo aumento da ocorrência de processos como a inundações dos solos, enxurradas, taxas erosivas, perdas de fertilidade e conseqüentemente perdas de produção.

3. Impactos das mudanças climáticas sobre os sistemas agrícolas de produção

IPCC (2014), baseado em avaliações de diversos estudos que cobrem regiões e culturas agrícolas distintas, afirma que os impactos negativos das mudanças climáticas devem ser mais comuns do que os impactos positivos. Ainda segundo IPCC (2014), em regiões de clima tropical e de clima temperado, as mudanças climáticas, sem a adoção de mecanismos adaptativos, devem ter impacto negativo na produção de trigo, arroz e milho, com um acréscimo de 2 °C ou maior, na temperatura local em comparação com aquela registrada no fim do Século 20. Globalmente, acredita-se que um aumento médio de 4 °C ou maior em relação aos níveis de temperatura registrados no fim do Século 20, combinado com o aumento da demanda por alimentos, possa causar sérios riscos à segurança alimentar. Vale também ressaltar que as mudanças climáticas devem causar redução nos recursos renováveis de água, superficial e subterrânea, na maioria das regiões secas, intensificando a competição pelos múltiplos usos desse recurso.

Em uma compilação de resultados de diversos trabalhos, Pellegrino et al. (2007) citam que um aumento da temperatura em torno de 3 °C, ao fim do Século 21, ocasionaria em perda de área cultivada no Brasil de: 18% para o arroz, 11% para o feijão, 39% para a soja, 58% para o café e 7% para o milho. Os autores ainda discutem que, num cenário futuro com elevada temperatura, plantas que apresentam ciclo fotossintético C4 devem apresentar-se mais adaptadas do que aquelas que apresentam ciclo fotossintético C3. Isso explicaria a menor porcentagem de perda de área do milho (gramínea que apresenta ciclo fotossintético C4), ao passo que valores maiores foram encontrados para o arroz, o feijão, a soja e o café (espécies que apresentam ciclo fotossintético C3).

Marin et al. (2007) e Barbarisi et al. (2007), avaliando os efeitos das mudanças climáticas sobre aspectos relacionados à produção da cana-de-açúcar nos estados de São Paulo e Goiás, respectivamente, encontraram resultados que corroboram com a boa adaptação de plantas C4 num cenário de aquecimento da temperatura média do ar. Entretanto, os autores relatam que fator limitante para este cultivo agrícola, numa condição futura de aquecimento, tende a ser o déficit hídrico. Nesse sentido, caso os índices pluviométricos sejam, em média, mantidos, o aumento da temperatura deve causar maior déficit hídrico e, como consequência, danos à produção.

Outros trabalhos como os de Assad et al. (2004), para a cultura do café nos estados de Goiás, Minas Gerais, São Paulo e Paraná; Dias e Assad (2009), para a cultura da mamona no estado de Pernambuco; e Assad et al. (2013) para a cultura do algodão no Brasil; apontam para um cenário preocupante para a agricultura brasileira no final do século, com redução significativa das áreas de cultivo. Para contornar tal situação é

necessário que medidas rápidas, que objetivem a promoção da adaptação dos cultivos agrícolas, tais como alterações nos sistemas produtivos e o melhoramento genético buscando a seleção de novas cultivares, sejam tomadas. Vale ressaltar que ambos os processos devem ser conduzidos buscando adaptação às condições climáticas projetadas como, por exemplo, às altas temperaturas, à elevada concentração de CO₂ e ao estresse hídrico, seja este último por déficit ou por condições de intensa precipitação.

É possível que o impacto negativo das mudanças climáticas sobre os cultivos agrícolas, conforme mencionado nos parágrafos anteriores, levem a perdas monetárias significativas. Nesse sentido, Zullo Júnior et al. (2008) procuraram quantificar essas prováveis perdas para a cultura da soja, nos estados do Mato Grosso e Paraná; e para a cultura do café, nos estados de São Paulo e Minas Gerais. Para tal, os autores consideraram três possíveis cenários de aquecimento da temperatura média ao final do Século 21, quais sejam: aumento de 1 °C, aumento de 3 °C e aumento de 5,8 °C, em comparação ao período de referência (1961-1990). Os resultados mostraram dados preocupantes com perdas monetárias que podem superar os US\$ 2 bilhões no estado do Paraná e US\$ 1,6 bilhões no estado do Mato Grosso, para a cultura da soja, no cenário mais pessimista (aumento de 5,8 °C). A cultura do café, por sua vez, caso medidas adaptativas não sejam tomadas, deve experimentar uma perda superior aos US\$ 2,1 bilhões no estado de Minas Gerais e US\$ 460 milhões no estado de São Paulo, para o mesmo cenário anteriormente citado.

Outra vertente importante, quando da análise dos impactos das mudanças climáticas sobre a produção agrícola, é a tentativa de projeção da ocorrência de doenças no novo cenário esperado. Visando esse objetivo, para as condições brasileiras, Ghini e Hamada (2008) e Ghini et al. (2011) apresentam uma avaliação do efeito das mudanças climáticas sobre a produção e a ocorrência de doenças de importantes culturas agrícolas para o Brasil. Embora exploratórias, as obras citadas marcam o início da discussão de um tema de suma importância num contexto climático futuro e, a partir delas, é possível que trabalhos mais específicos, em condições regionais ou locais, sejam conduzidos de forma direcionada ao alcance de resultados que permitam a adaptação dos sistemas produtivos ou a mitigação dos impactos projetados.

Mosier (1998), em uma abrangente revisão de literatura, relata que os solos e as mudanças climáticas estão relacionados por interações bidirecionais. Em suma, os processos dos solos podem afetar as mudanças climáticas diretamente pelo aumento da emissão ou consumo de CO₂, CH₄ e N₂O e indiretamente pela produção ou consumo de NH₃, NO_x e CO. Na prática, os três primeiros gases são os mais importantes. As atividades agrícolas podem emitir CO₂, CH₄ e N₂O por meio de processos como a degradação de matéria orgânica e perdas relacionadas à fertilização

nitrogenada. Já o consumo desses gases pode se dar em decorrência do sequestro de carbono proporcionado pela adoção de sistemas conservacionistas de produção, tais como o sistema de plantio direto, os sistemas agroflorestais, os sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta, sistema orgânico, dentre outros. Por outro lado, as mudanças climáticas podem causar modificações na temperatura dos solos, na disponibilidade de água e nutrientes. Ainda, o aumento das concentrações atmosféricas de CO₂ pode alterar a resposta das plantas a parâmetros ambientais. Em condições experimentais frequentemente tem sido observado aumento na eficiência do uso de N e água, muitas vezes resultando em aumento da produtividade em culturas anuais, em decorrência do aumento destas concentrações. Em ambientes naturais, entretanto, a interação entre a elevação da concentração atmosférica e outros fatores ambientais, tais como a elevação da temperatura do ar e do solo, maior evaporação de água do solo, redução da disponibilidade quantitativa e qualitativa de recursos hídricos, maior ocorrência de pragas e doenças específicas, entre outros, podem resultar em resultados negativos para grande parte dos cultivos agrícolas.

Dentre as mudanças climáticas esperadas em decorrência do aquecimento global está a maior ocorrência e duração das secas, resultando em maior ocorrência de queimadas (IPCC, 2014) em ecossistemas naturais e agrícolas, seja ocasionado por fatores naturais ou antropogênicos. Portanto, faz-se razoável que sejam discutidas as consequências desse fenômeno sobre a qualidade dos solos. Nesse sentido, Marcos et al. (2007) discute que existe uma grande dificuldade de se controlar a intensidade e o tempo de ocorrência de incêndios em condições de campo e sugerem a utilização de experimentos em laboratório, com o controle dessas variáveis, para a obtenção de estimativas da avaliação dos impactos desse processo sobre a qualidade dos solos. Os autores ainda relatam que, via de regra, as modificações provocadas pelo fogo depende da sua duração, da profundidade de ocorrência e da intensidade do fenômeno. Geralmente, os impactos são observados em profundidade igual ou menor que 5 cm, levando em conta que a temperatura raramente supera os 150 °C. Em eventos extremos e de longa duração é razoável supor que camadas mais profundas que a anteriormente citada possam ser impactadas, tendo em vista que a temperatura pode exceder os 300 °C.

Com o objetivo de verificar as modificações que o aquecimento extremo causam sobre um Cambissolo Húmico, simulando a ocorrência do fogo em condições de laboratório, Marcos et al. (2007) submeteram amostras do citado solo ao aquecimento utilizando duas técnicas distintas, quais sejam, a Análise Térmica Diferencial (ATD) e o aquecimento controlado em forno de mufla (ACM). Os resultados da ATD, que foi conduzida em atmosfera de ar (oxidante), mostraram a ocorrência de dois picos, sendo: o primeiro endotérmico no intervalo entre a temperatura ambiente e

aquela igual a 177 °C; e o outro exotérmico, entre a temperatura igual a 229 °C e aquela igual a 579 °C. O primeiro pico foi atribuído à perda de água higroscópica e substâncias voláteis enquanto o segundo é característico de reações de decomposição e combustão da matéria orgânica. O ACM, por sua vez, mostrou que o aquecimento a temperaturas entre 100 °C e 200 °C, em curtos períodos, não produziram impactos significativos naquele Cambissolo. Já as amostras de solo submetidas a temperaturas a partir de 200 °C por 15 minutos até 500 °C durante curtos períodos de tempo (5 minutos) apresentaram incremento no P disponível e cátions solúveis em água (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+}), mudanças que, segundo os autores, estariam associadas a incêndios moderados. Por fim, amostras de solo submetidas a temperatura de 500 °C durante períodos de tempo superiores a 15 minutos mostraram-se muito afetadas, com alterações negativas nos teores de MOS e N, bem como em características físicas como cor e estrutura. Esta última faixa de temperatura e tempo representaria estimativas dos efeitos de grandes incêndios sobre o solo avaliado.

Para solos brasileiros, Guedes (2008) e Lima (2010) verificaram os efeitos de altas temperaturas sobre os teores de matéria orgânica. O primeiro autor avaliou os efeitos de temperaturas variando entre 100 e 500 °C, controladas e mantidas em forno de mufla por 2 horas, sobre os teores de matéria orgânica de solos (MOS) altimontanos de uma área de preservação ambiental no estado de Minas Gerais. O autor obteve resultados que mostraram que a maior resistência à termodegradação da MOS foi registrada para um Cambissolo Húmico e um Espodosolo. Nestes, a presença de materiais fibrosos e a formação de pontes metálicas com o alumínio, respectivamente, surgem como possíveis explicações para esta maior resistência.

Lima (2010), por sua vez, avaliou a resistência à termodegradação da MOS de amostras dos horizontes A e B de oito solos comumente encontrados no estado de Minas Gerais, todos argilosos ou muito argilosos, com mineralogia contrastante e sob pastagem em bom estado de conservação. Este autor verificou, utilizando ATD e ACM, uma forte relação entre a resistência da MOS à termodegradação e a presença de óxidos em solos, especialmente os de alumínio, tais como a Gibbsita. Portanto, é razoável inferir que, do conjunto de solos avaliado, aqueles oxidícos tenderiam a perder menos carbono quando da ocorrência do fogo nos ecossistemas naturais e agrícolas. Esse fato pode estar ligado à proteção físico-química proporcionada pelos óxidos, com destaque para a formação de pontes metálicas entre estes minerais e os compostos orgânicos. Outro fator importante é a proteção física promovida pela estrutura granular, tipicamente encontrada em solos oxidícos, onde a MOS parece ficar “encapsulada” nos “grãos de solo”. Por fim, não se pode perder de vista a possibilidade dessa maior resistência à termodegradação estar ligada à “evolução” da matéria orgânica em solos muito intemperizados. Nesse sentido, destacam-se a

possibilidade da MOS evoluir em função de dois aspectos importantes, quais sejam: a formação a partir de superfícies oxídicas que funcionariam como catalisadores para a formação de moléculas estáveis e; a evolução em ambientes onde a ocorrência de fogo é relativamente comum, tais como aqueles do bioma cerrado, onde solos oxídicos são de comum ocorrência, levando à formação de compostos orgânicos estáveis naquela condição ambiental.

Tendo em vista os potenciais impactos das mudanças climáticas nos agroecossistemas, outros aspectos cuja discussão é de suma importância são aqueles relacionados à vulnerabilidade dos solos. O termo vulnerabilidade dos solos pode ser definido como a capacidade de um solo ser danificado em uma ou mais de suas funções ecológicas (BATJES; BRIDGES, 1993). Entre as principais funções ecológicas estão àquelas relacionadas à produção de alimentos, ao ciclo hidrológico e à retenção de poluentes, que podem ser afetadas pelas mudanças do clima. Nesse sentido, especial preocupação se dá à maior ocorrência de eventos extremos, sobretudo das chuvas intensas e secas severas, que podem alterar aspectos como a ocorrência de escoamento superficial, capacidade de drenagem dos solos, salinização, entre outros, modificando assim as condições edáficas e ocasionando na maior ocorrência de processos erosivos severos, bem como em modificações da capacidade do solo em reter contaminantes. Portanto, a definição da vulnerabilidade dos solos a processos como perda de solo por erosão, além de retenção e lixiviação de contaminantes, se torna de suma importância para aumentar a capacidade preditiva dos impactos relacionados às mudanças climáticas, bem como planejar o uso e ocupação dos solos sob as condições climáticas empregadas.

Reforçando esta linha de raciocínio, Smidt (1991) cita as mudanças climáticas como um dos principais agentes que podem atuar na liberação de contaminantes previamente armazenados em solos, tornando estes, portanto, mais vulneráveis à liberação de contaminantes para outros compartimentos ambientais, especialmente os recursos hídricos, sejam eles subterrâneos ou superficiais. Dessa forma, analogamente às bombas relógio, pode-se entender o processo de acúmulo contínuo de contaminantes em solos, com posterior repentina liberação deles influenciada por mudanças ambientais, tais como as mudanças climáticas, como “Bombas Relógio Químicas” (STIGLIANI, 1991). As “Bombas Relógio Químicas” podem ser definidas como o conceito que se refere a uma cadeia de eventos, resultando na ocorrência de efeitos danosos retardados e repentinos devido à mobilização de compostos ou elementos químicos estocados em solos e sedimentos em resposta a lentas alterações no ambiente (STIGLIANI, 1988). Assim, solos com alta capacidade atual de reter poluentes podem, sob as novas condições climáticas, não mais tê-la, causando impactos negativos sobre aspectos como produção de biomassa e qualidade

dos recursos hídricos. Essa é uma linha de pesquisa hoje pouco explorada e que deve, sem sombra de dúvida, ter maior importância a ela atribuída num futuro próximo.

Por fim, mas não menos importante, estão as questões relativas aos impactos das mudanças climáticas sobre a ocorrência de eventos extremos e a disponibilidade hídrica. Como já discutido anteriormente, autores como Marengo (2007) e Hamada et al. (2012), avaliando alterações no regime de precipitação pluviométrica para o território brasileiro, têm encontrado resultados que apresentam alta variabilidade e, portanto, são pouco conclusivos. Entretanto, seus resultados são concordantes no que tange respeito ao aumento de ocorrência de eventos extremos, como comprovado por Porto de Carvalho et al. (2014) como chuvas intensas e secas. Outros eventos extremos, tais como a ocorrência de ondas de calor e frio, geadas e tempestades de granizo, entre outros, também podem se tornar mais frequentes, conforme discutido no item anterior.

A ocorrência dos citados eventos extremos, portanto, provavelmente terão, sob as novas condições climáticas, impactos de magnitudes variadas sobre os cultivos agrícolas e, portanto, devem ser considerados quando da adoção de estratégias mitigadoras ou adaptativas. Chuvas intensas, por exemplo, podem significar maior ocorrência de processos erosivos e consequentes perdas da camada fértil dos solos, resultando em maior necessidade do uso de insumos como fertilizantes e sementes. Além disso, o comprometimento da qualidade dos solos e os danos físicos causados à lavoura por este fenômeno podem levar a uma maior predisposição à ocorrência de doenças e pragas, redução da produtividade comercial, entre outros impactos. Ainda, é possível que aconteça o comprometimento quantitativo e qualitativo da disponibilidade hídrica em algumas regiões. Com relação à qualidade dos corpos d'água, por exemplo, são esperados impactos como a redução da concentração de oxigênio dissolvido em razão do aumento da temperatura, a redução da capacidade de autodepuração quando da redução da precipitação pluviométrica e o aumento do carreamento de poluentes e de partículas de solo quando do aumento da mesma, entre outros. Dessa forma, as mudanças climáticas tendem a aumentar a pressão sobre a disponibilidade de água de qualidade para atendimento aos múltiplos usos desse recurso, reforçando a necessidade de busca de alternativas viáveis para a gestão dos recursos hídricos.

4. Impactos das mudanças climáticas sobre os sistemas produtivos de hortaliças e possíveis medidas mitigadoras e adaptativas

Atualmente, a produção de hortaliças no Brasil está em torno de 19 milhões de toneladas ao ano, correspondendo a uma geração de renda que pode chegar a R\$ 40,6 bilhões, incluindo o varejo, e empregando 7,3 milhões de pessoas.

A área plantada está em torno de 809 mil hectares (ANUÁRIO BRASILEIRO DE HORTALIÇAS, 2013).

Os cultivos brasileiros de hortaliças têm-se concentrado historicamente nas regiões sudeste e sul, caracterizadas por condições mais amenas. Entretanto, a necessidade de abastecimento de mercados consolidados e daqueles emergentes tem levado à expansão das regiões produtoras para, principalmente, as regiões centro-oeste e nordeste (ANUÁRIO BRASILEIRO DE HORTALIÇAS, 2013). Existem ainda fortes demandas para o cultivo de hortaliças no norte do Brasil que tem como a principal limitação as adversas condições climáticas.

Quanto às exigências termoclimáticas, Filgueira (2012) classifica e exemplifica as hortaliças com base naquelas observadas para a maior parte do ciclo cultural em:

- Hortaliças de clima frio: abrange aquelas espécies que apresentam melhor produção sob temperaturas baixas, podendo inclusive suportar geadas pesadas. Por exemplo, Acelga verdadeira, Aipo, Alcachofra, Alho, Alho-porró, Aspargo, Beterraba, Cebola, Cebolinha, Couve-brócolos, Couve-chinesa, Couve-de-bruxelas, Couve-flor, Couve-folha, Couve-rábano, Couve tronchuda, Ervilha, Espinafre verdadeiro, Fava italiana, funcho, Mandioquinha-salsa, Morango, Mostarda-de-folha, Nabo, Rabanete, Rábano “daikon” e Repolho.
- Hortaliças de clima ameno: abrange aquelas espécies que apresentam melhor produção sob temperaturas amenas, podendo algumas delas suportar geadas leves. Por exemplo: Abobrinha italiana, Agrião d’água, Alface, Almeirão, Batata, Cenoura, Chicória Moranga híbrida, Rúcula, Salsa e Tomate.
- Hortaliças de clima quente: abrange aquelas que apresentam intolerância ao frio, sendo exigentes em temperaturas diurnas e noturnas elevadas e intolerantes à geadas. Podem ser citados como exemplos desse grupo: Abóbora rasteira, Batata-doce, Berinjela, Cará, Chuchu, Coentro, Espinafre-neozelandês, Feijão-de-corda, Feijão-de-lima, Feijão-vagem, Inhame, Jiló, Maxixe, Melancia, Melão, Milho-doce, Milho-verde, Moranga, Pepino, Pimenta, Pimentão, Quiabo e Taioba.

Ao se projetar o clima futuro para o território brasileiro, com foco na temperatura esperada, é razoável supor que serão observados maiores impactos negativos na produção daquelas hortaliças exigentes em clima frio ou ameno. Porém, cabe citar que os programas de melhoramento genético já tem buscado, ao longo do tempo, a adaptação dessas espécies oleráceas às condições climáticas presentes na maior parte do território brasileiro. Como resultado desse processo têm sido

conseguidas cultivares ditas “de verão” de couve-brócolos, couve-chinesa, couve-flor, repolho, cenoura, alface, dentre outras, melhor adaptadas às temperaturas altas comumente encontradas em boa parte do país (FILGUEIRA, 2012). As condições climáticas esperadas para o fim do Século 21 ressaltam a importância de continuidade desses programas de melhoramento genético com vistas à obtenção de cultivares tolerantes ao calor, mesmo para aquelas espécies que já apresentam cultivares “de verão”. Adicionalmente, não seria um erro inferir que a ciência e tecnologia brasileiras já acumulam conhecimento e técnicas que permitem alavancar os programas de melhoramento genético de espécies oleráceas com o objetivo de adaptar os sistemas produtivos de hortaliças às condições climáticas projetadas.

Não obstante, apesar de todos os esforços demandados para a adaptação dos cultivos de hortaliças às condições climáticas tipicamente encontradas no território brasileiro, esta ainda é uma necessidade premente. Uma rápida análise dos dados dispostos no Anuário Brasileiro de Hortaliças (2013) revela que, em 2011, as exportações brasileiras de hortaliças somavam 353 mil toneladas frente as 236 mil toneladas registradas em 2000, ou seja, uma evolução de 33,14%. No mesmo período, as importações de produtos oriundos da olericultura cresceram de 269 mil toneladas para 772 mil toneladas, um aumento de 186,99%. Vários aspectos provavelmente contribuem para esses números, dentre eles aqueles relacionados ao clima. As exportações são concentradas maciçamente em espécies melhor adaptadas a climas quentes, caso principal do melão, seguido da melancia. A venda dessas duas hortaliças para o exterior representa cerca de 83% das exportações do setor. Já a importação das quatro principais hortaliças de destaque no Brasil (Batata-inglesa, tomate, cebola e alho), exigentes em climas frio ou ameno, representam cerca de 82% das compras de produtos oriundos do exterior. A importância destas quatro hortaliças é ainda ressaltada quando são verificados os números referentes à sua produção no território nacional. Em 2011, a produção total destas culturas foi de 8,5 milhões de toneladas, quantidade insuficiente para atender todo o consumo interno. No mesmo ano, outras vinte e quatro hortaliças (alcachofra, aspargos, abóboras, alface, berinjela, beterraba, couve, couve-flor, cogumelos, ervilhas verde e seca, espinafre, grão-de-bico, inhame, lentilha, milho-verde, morangos, pepinos, pimentas, pimentões, quiabo, repolho, taro e vagem) apresentaram soma das produções em torno de 5,2 milhões de toneladas (ANUÁRIO BRASILEIRO DE HORTALIÇAS, 2013), número razoavelmente inferior àquele citado anteriormente para as quatro principais hortaliças.

Caso medidas que objetivem a adaptação dos sistemas produtivos de hortaliças às condições climáticas projetadas não sejam adotadas, é possível que o quadro de dependência das importações das principais espécies oleráceas comercializadas no

país, bem como de produtos agroindustriais ligados à olericultura, seja agravado. Para orientar a adoção dessas medidas, diversos trabalhos têm sido conduzidos, mundo a fora, com o objetivo de avaliar os impactos das mudanças climáticas sobre a produção de hortaliças. Muitos desses, mesmo aqueles que não foram conduzidos nas condições edafoclimáticas comumente encontradas no Brasil, podem servir como base para adoção das citadas medidas adaptativas.

Citando a realidade norte-americana, Melillo et al. (2014) relata a possibilidade de perdas de capacidade produtiva para hortaliças que se desenvolvem melhor em clima frio ou ameno devido ao aumento da temperatura. Exemplos dessas hortaliças são: espinafre, batata, couve-brócolos, alface cenoura, couve-flor, cebola, alho, tomate, entre outras. Por outro lado, são esperados impactos positivos sobre a capacidade produtiva de hortaliças que apresentam melhor desenvolvimento em clima quente, tais como: quiabo, batata-doce, jiló, melão e melancia, entre outros.

Baseado nas projeções climáticas para o fim do Século 21 no Brasil, diversos autores têm conduzido trabalhos cujos objetivos são a avaliação dos potenciais impactos das mudanças climáticas na olericultura brasileira. Lopes et al. (2011), por exemplo, discutem que a cultura da batata apresenta desenvolvimento satisfatório entre 10 °C e 30 °C, com desenvolvimento ótimo entre 10 °C e 25 °C. Ainda, é desejável que exista uma razoável amplitude térmica entre o dia e a noite. Altas temperaturas podem causar a redução da síntese de fotoassimilados, assim como inibir a sua partição aos tubérculos, afetando a produção. Além disso, pode causar aumento na ocorrência de doenças e distúrbios fisiológicos, tais como lenticeloses, rachaduras, embonecamento e manchas internas, alterando negativamente a qualidade dos tubérculos (LOPES; SILVA, 2014). Levando em consideração esses aspectos e assumindo um incremento na temperatura média do ar no território brasileiro de 5 °C, Lopes et al. (2011) ainda avaliaram o impacto na aptidão de seis municípios, representativos das principais regiões produtoras de batatas, quais sejam: São Joaquim-SC, Guarapuava-PR, Cristalina-GO, Mucugê-BA, Vargem Grande do Sul-SP e Araxá-MG. Os autores então concluíram que, neste cenário de aquecimento, todos os municípios apresentariam os doze meses do ano com temperatura mínima apta ao cultivo dessa hortaliça. Entretanto, em quatro deles a temperatura máxima ótima (25 °C) não seria atendida em nenhum mês do ano, quais sejam: Cristalina-GO, Mucugê-BA, Vargem Grande do Sul-SP e Araxá-MG. Os outros dois municípios, São Joaquim-SC e Guarapuava-PR, apresentariam, respectivamente, 7 meses e 2 meses do ano com temperatura máxima dentro da faixa ótima para a produção.

A avaliação dos impactos do aumento da temperatura média e de alterações nos regimes pluviométricos sobre a cultura da alface, em nove regiões produtoras

do Brasil, foi tema do trabalho de Kobori et al. (2012). As regiões consideradas para esse estudo de caso foram: estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina; estado do Paraná; regiões sul e sudeste do estado de São Paulo, região serrana do estado do Rio de Janeiro; região do cinturão verde de Belo Horizonte, no estado de Minas Gerais; estado de Goiás e Distrito Federal; região da cidade de Campo Grande, no estado de Mato Grosso do Sul; região da Chapada dos Guimarães, no estado de Mato Grosso; e região da Zona da Mata de Pernambuco. Ao considerarem as projeções climáticas específicas para cada uma dessas regiões para o período de 2071 a 2100 em comparação àquele de referência (1961-1990), os autores concluíram que a produção futura de alface no país deve sofrer grandes prejuízos. Eles ainda ressaltam que, considerando as cultivares atualmente disponíveis no mercado, a condução de cultivos de alface continuará sendo possível ao longo do ano nas regiões sul e sudeste. Porém, nestas regiões, nas estações mais quentes, a temperatura máxima atingirá o limiar superior (considerado por eles como sendo de 28 °C), ou até mesmo ultrapassá-lo, aumentando o risco de ocorrência de danos aos cultivos, tais como formação de plântulas anormais, morte da semente, desuniformidade de estande, queima de borda (esta em decorrência da deficiência de cálcio e boro), florescimento precoce, acúmulo de látex e produção de folhas amargas, entre outros. Nas regiões produtoras do centro-oeste e nordeste a produção dessa hortaliça ficará restrita aos meses mais frios ou ficará inviabilizada durante todo o ano.

Brunelli et al. (2012) avaliaram os impactos das mudanças climáticas, focalizando o incremento da temperatura média e alterações pluviométricas, sobre os cultivos das três principais brássicas cultivadas no Brasil, definidas em função da área cultivada, volume de empregos gerados e de produção, quais sejam: repolho, couve-flor e brócolis. Os autores, de acordo com as projeções climáticas para o período de 2071-2100 em comparação com o período de referência (1961-1990), de sete importantes regiões produtoras dessas hortaliças (nordeste do Rio Grande do Sul, Paraná, sul e leste de São Paulo, sudeste de Minas Gerais, Rio de Janeiro e Espírito Santo, Goiás e Distrito Federal, microclima serrano da Chapada Diamantina-Bahia – e microclima serrano da serra de Ibiapaba-Ceará), avaliaram os possíveis impactos das mudanças climáticas sobre os cultivos de brássicas no Brasil. Assim como discutido para a cultura da alface, os cultivos continuarão sendo possíveis nas regiões sul e sudeste do país. Entretanto, sobretudo para regiões produtoras do sudeste, as temperaturas máximas nos meses mais quentes do ano aproximarão ou superarão o limiar superior (considerado pelos autores como sendo de 28 °C para cultivares adaptadas a climas tropicais) para essas hortaliças, tornando-se mais provável a ocorrência de danos fisiológicos como: dificuldade de germinação de

sementes, anomalia de plântulas, formação de cabeças pouco compactas ou acefalia em **repolho**; excesso de crescimento vegetativo, redução de tamanho e peso de cabeça, arroxamento, pilosidade na inflorescência e formação de folhas ou brácteas no pedúnculo, necrose nas inflorescências e rachaduras na base da planta (esses dois últimos causados por deficiência de cálcio e boro), entre outros, em **couve-flor**; retardamento da formação, redução do tamanho e deformação das cabeças, entre outros, para **brócolis**. Mesmo na região sul, mais fria, é possível que o cultivo de brássicas seja possível apenas com o uso de cultivares adaptadas a climas tropicais na maior parte do ano. É o caso, por exemplo, daquelas de brócolis do tipo ramoso ou daquelas de couve-flor “de verão”. Nas regiões centro-oeste e nordeste os cultivos dessas hortaliças tornar-se-ão de difícil condução no futuro, com restrições quanto a cultivar utilizada (somente possível com o uso daquelas tolerantes ao calor) e à época do ano (restrita aos meses com temperaturas mais frias ou amenas).

Impactos negativos de temperaturas altas sobre os cultivos de hortaliças têm ainda sido relatados mundo a fora. Nesse sentido, Warland et al. (2006), avaliando dados históricos de cultivos de repolho, brócolis, couve-flor, rabanete e couve-nabo, no Canadá, encontraram correlações negativas entre a produtividade e o aumento de dias com temperatura superior a 30 °C .

Sato et al. (2006), por sua vez, demonstraram que mesmo elevações moderadas na temperatura diurna ou noturna podem afetar negativamente a produtividade do tomateiro. Esses autores relataram que o aumento moderado da temperatura de 28 °C/22 °C (temperaturas diurna e noturna, respectivamente), para 32 °C/26 °C, reduziram significativamente a frutificação, sem, contudo, alterar o desenvolvimento das plantas. Esse fato se deu basicamente pela redução da viabilidade e disponibilidade de pólen, ocasionada por eventos fisiológicos e genéticos específicos, amplamente discutido por eles. Tais eventos afetaram principalmente o desenvolvimento reprodutivo masculino. Os efeitos negativos do aumento da temperatura sobre a frutificação do tomateiro, sem, contudo, alterar as taxas fotossintéticas e de respiração noturna, foram também encontrados por Sato et al. (2000). Esses resultados são ainda reforçados pelos trabalhos de Peet et al. (1997), Sato et al. (2002) e Sato e Peet (2005).

Outra linha de trabalho frequentemente adotada por grupos de pesquisa com vistas à avaliação de impactos das mudanças climáticas sobre a produção de hortaliças, bem como de proposição de estratégias adaptativas, é a avaliação dos efeitos das altas temperaturas sobre o potencial de germinação de sementes. O trabalho de Pinheiro et al. (2014), por exemplo, objetivou a avaliação da germinação de sementes de três cultivares de cebola em cinco temperaturas distintas (15 °C, 20 °C, 25 °C, 30 °C e 35 °C). Estes autores encontraram resultados que mostram efeito da temperatura

sobre a germinação, velocidade de germinação, índice de germinação e tempo médio de germinação. Ainda, eles observaram que a faixa ótima para germinação das cultivares de cebola variou de 15 °C a 22 °C, com temperaturas acima de 30 °C sendo desfavoráveis para essa característica. Por fim, foram encontradas diferenças no comportamento das cultivares quando suas sementes foram submetidas às altas temperaturas, reforçando a ideia de que a adoção de cultivares adaptadas é uma boa estratégia para adaptação aos impactos do aquecimento do clima.

Trabalho similar ao de Pinheiro et al. (2014) foi conduzido por Pereira et al. (2007), que buscaram avaliar o efeito de cinco temperaturas (20 °C, 24 °C, 28 °C, 32 °C e 36 °C) sobre a germinação de sementes de cenoura “de verão”, cultivar Brasília. Os autores ainda avaliaram as taxas de germinação de sementes de 28 lotes comerciais quando submetidos às temperaturas amena (20 °C) e elevada (35 °C). Os resultados obtidos mostraram, apesar da elevada variação dos resultados relativos às sementes dos lotes comerciais avaliados, efeito negativo de altas temperatura, mesmo quando estas são oriundas de cultivares “de verão”. Houve, por exemplo, na temperatura de 36 °C, redução da taxa de germinação para 27% das sementes da cultivar Brasília.

Além da temperatura, outras variáveis climáticas podem afetar a produção de hortaliças num cenário de mudanças climáticas. Nesse sentido, De la Peña e Hughes (2007) ressaltam que as hortaliças são geralmente sensíveis aos extremos ambientais. Estes, por sua vez, tendem a ser potencializados no futuro e fenômenos como dias e noites quentes, ocorrência de geadas, secas intensas e duradouras, chuvas intensas, vendavais, entre outros, devem tornar-se mais comuns. É importante, portanto, que as discussões sobre como adaptar os sistemas produtivos às mudanças climáticas abranjam também essas questões. Vale ressaltar, entretanto, que o tema aqui discutido é amplo e seria pouco provável esgotá-lo em apenas um capítulo.

De la Peña e Hughes (2007) ainda citam os estresses ambientais como a maior causa de perdas dos cultivos agrícolas no mundo, fator esse potencializado em regiões tropicais. Os autores citados afirmam que podem ser magnificados, num futuro próximo, processos como o aumento da temperatura do ar, a limitação de água disponível para irrigação, inundação de terrenos e a salinização do solo, que, segundo eles, devem ser os principais problemas para os cultivos sustentáveis de hortaliças. Adicionalmente consideram ser possível que outros impactos como a redução da fertilidade dos solos e o incremento dos processos erosivos tenham sua importância aumentada. Com relação a estes últimos, é necessário frisar que grande parte dos cultivos de hortaliças no Brasil é conduzida em ambientes montanhosos, tais como aqueles mostrados nas Figuras 3 e 4. Não obstante, em muitos casos não são utilizadas

práticas conservacionistas, aumentando o risco de erosão, sobretudo em condições em que chuvas intensas devem tornar-se mais frequentes.

Foto: Italo Ludke



Figura 3. Área de produção de hortaliças na região serrana do Espírito Santo.

Diversos trabalhos têm sido conduzidos no Brasil para avaliar os efeitos da salinização dos solos ou de diferentes níveis de salinidade da água de irrigação sobre a produção de hortaliças. Oliveira et al. (2011) avaliaram o comportamento de cinco cultivares de alface em condições distintas de salinidade da água utilizada para irrigação. Os resultados mostraram que a produção de números de folhas, área foliar, comprimento do caule, massa fresca total e massa seca total decresceram com aumento da salinidade. O comportamento das cultivares também foi afetado, com a susceptibilidade a perdas sendo dependente também do genótipo utilizado. Prejuízos à produção e aspectos a ela ligados em decorrência do excesso de salinidade também foram encontrados para beterraba (SILVA et al., 2013), para melão (FREITAS et al., 2006), rúcula (SILVA et al., 2008), entre outras hortaliças. Dentre as muitas estratégias para controle do processo de salinização e para o uso de águas salinas ou salobras têm sido sugeridas ações como o manejo racional da adubação ou da fertirrigação, uso de cultivares tolerantes, utilização de porta-enxertos (BLANCO, 1999), injeção de CO_2 em água de irrigação (FRIZZONE et al., 2005), utilização de compostos orgânicos

(SILVA et al., 2008), entre outras, que podem ser utilizadas como estratégias de adaptação e convivência às mudanças climáticas.



Figura 4. Área de produção de hortaliças na região serrana do Rio de Janeiro.

A ocorrência de chuvas intensas também é outra questão de suma importância para a produção de hortaliças. A qualidade visual dos produtos oleráceos é ponto fundamental para que haja a comercialização do produto e, nesse sentido, a ocorrência de precipitações, por vezes concentradas em pequenos intervalos de tempo, podem causar prejuízos de difícil mensuração. Somados a essa questão, o aumento da ocorrência de outros eventos, tais como as precipitações na forma de granizo ou a de ventos fortes, também tendem a causar danos às lavouras de hortaliças num futuro de mudanças climáticas. A ocorrência de precipitações intensas e concentradas pode ainda levar a um processo de acúmulo de água no solo levando a perdas na produção de importantes culturas agrícolas. Nesse sentido, Costa et al. (2008) verificaram o efeito do excesso de água no solo sobre a produção de beterraba. Esses autores verificaram que tal processo é capaz de gerar prejuízos à produção de beterraba, principalmente quando o encharcamento ocorre no terceiro estágio do desenvolvimento das plantas. Torna-se, portanto, desejável o desenvolvimento de sistemas de produção que minimizem a ocorrência de injúrias físicas pelas intensas precipitações, aumentem a capacidade de infiltração de água no solo, bem como reduzam a possibilidade de danos causados pelo acúmulo de água no solo. Também é importante que cultivares tolerantes a esses processos sejam desenvolvidas.

Outra questão ainda pouco discutida quando se trata de cultivos agrícolas de hortaliças é aquela referente ao efeito das elevadas concentrações atmosféricas de CO₂ sobre os cultivos de hortaliças. Alguns exemplos de trabalhos conduzidos nesse sentido são aqueles de Mavrogianopoulos et al. (1999), para melão, e Juknys et al. (2012), para tomate, que apontam para crescimento da produção em função do aumento da concentração desse gás. Entretanto, é possível que exista um patamar onde, a partir dele, concentrações atmosféricas de CO₂ maiores levariam a queda da produtividade e da qualidade do produto final.

Por fim, é possível que a elevação das concentrações atmosféricas de CO₂, associada às mudanças climáticas projetadas, possam ter influência sobre a dinâmica de importantes doenças e pragas para a olericultura brasileira. Nesse sentido, Gioria et al. (2008) relatam que as mudanças climáticas em curso provavelmente aumentarão a importância de doenças do tomateiro como o oídio (*Leveillula taurica*), pinta-preta (*Alternaria solani*), murcha-do-fusarium (*Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*), murcha-bacteriana (*Ralstonia solanacearum*), vira-cabeça (*Tomato spotted wilt virus* – TSWV, *Tomato chlorotic spot virus* – TCSV, *Groundnut ring spot virus* – GRSV, *Chrysanthemum stem necrosis virus* – CSNV) e mosaico-dourado do tomateiro (*Geminivirus*). Outras doenças como a requeima (*Phytophthora infestans*), murcha-de-verticilium (*Verticilium albo-atrum*) e podridão-de-esclerotinia (*Sclerotinia sclerotiorum*) provavelmente terão sua importância reduzida, enquanto outras como o mosaico-do-tomateiro (*Tomato mosaic virus* – ToMV) não sofrerão alterações em relação ao que é hoje observado.

Já Kobori et al. (2012), estimam, para a cultura da alface, um favorecimento de doenças como tombamento de plantas (*Pythium* spp.), podridão ou murcha-de-esclerócio (*Sclerotium rolfsii*), queima-da-saia (*Rhizoctonia solani*), fusariose ou murcha-de-fusário da alface (*Fusarium oxysporum* f. sp. *lactucae*), murchadeira ou podridão-negra-das raízes (*Thielaviopsis basicola*), Mancha-de-cercóspora (*Cercospora longissima*), Oídio (*Erysiphe cichocarum*), podridão-mole (*Pectobacterium carotovorum*), Vira-cabeça (*Tomato spotted wilt virus* and *Groundnut ring spot virus*). Por sua vez, doenças como a podridão-de-esclerotinia (*Sclerotinia sclerotiorum* e *Sclerotinia minor*), Septoriose (*Septoria lactucae*), Míldio (*Bremia lactucae*), Mancha-bacteriana (*Pseudomonas cichorii*, *Xanthomonas axonopodis* pv. *vitians*), Espessamento clorótico das nervuras ou “Big Vein” (Complexo viral formado pelos vírus *Mirafiori lettuce virus* e *Lettuce big vein virus*) devem ser desfavorecidas pelas mudanças climáticas, enquanto outras como Mosaico da alface (*Lettuce mosaic virus* and *Lettuce mottle virus*) tendem a apresentar importância e severidade parecidas com o que é hoje observado.

As projeções para a ocorrência de doenças de brássicas, por sua vez, foi tema de discussão do trabalho de Brunelli et al. (2012). Os autores citam que num futuro de mudanças climáticas doenças como mancha-de-alternaria (*Alternaria brassicae* e

Alternaria brassicicola), míldio (*Peronospora parasitica*), podridão-de-esclerotínia (*Sclerotinia sclerotiorum*), mancha-foliar-bacteriana (*Pseudomonas syringae* pv. *maculicola*) tendem a apresentar importância similar, ou perde-la, em relação a atualmente observada. Outras doenças como a hérnia (*Plasmodiophora brassicae*), podridão-de-escleródio (*Sclerotium rolfsii*), podridão-negra (*Xanthomonas campestris* pv. *campestris*) e podridão-mole (*Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum*), por outro lado, podem ter sua importância aumentada segundo as projeções dos autores.

Muitas são as estratégias para mitigação e convivência com o fenômeno de mudanças climáticas reportadas na literatura. Uma delas, a introdução dos sistemas conservacionistas, tais como sistemas integrados com espécies florestais, o sistema de plantio direto e o sistema orgânico de produção, caracterizam-se também por agirem como mitigadores das emissões atmosféricas de GEEs pela agricultura. Linhas de pesquisa com o sistema de plantio direto e agricultura orgânica estão em curso atualmente na Embrapa Hortaliças.

Com relação ao sistema de plantio direto de hortaliças (SPDH), os resultados têm mostrado a manutenção de elevada produtividade, similar ou superior ao convencional, para cebola, couve-flor, brócolis, repolho, tomate, abóbora e melão. Também tem sido observado a economia de água para irrigação (MAROUELLI et al., 2010), redução das perdas de solo e água (CAIXETA et al., 2009), redução da temperatura e amplitude térmica do solo (Figuras 5 e 6), descompactação dos solos e aumento dos teores de matéria orgânica do solo e de frações lábeis e recalcitrantes desta.

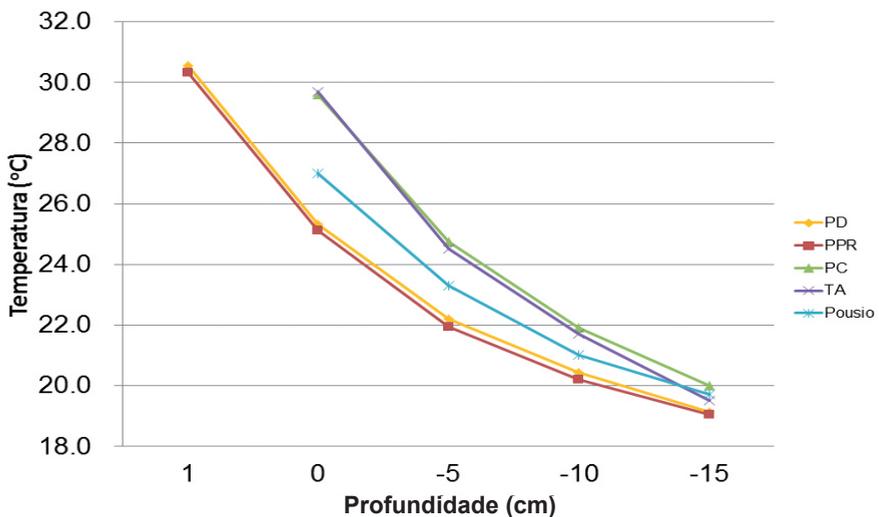


Figura 5. Temperatura do solo em cultivo de brócolis cujo solo foi manejado distintamente (PD – Sistema de Plantio Direto; PPR – Sistema de Preparo Reduzido; PC – Sistema de Preparo Convencional; TA – Tratamento adicional sem rotação de culturas). Fonte: Kim (2010).



Figura 6. Exemplo do processo de medição da temperatura do solo, em diferentes profundidades, em cultivo de brócolis cujo solo foi manejado distintamente.

Fonte: Kim (2010).

5. Considerações finais

A certeza de que o clima do planeta está aquecendo foi recentemente reforçado pelo V relatório do IPCC. Dentre os impactos esperados estão fenômenos como aumento de dias e noites quentes, redução de dias e noites frias e ocorrência de eventos climáticos extremos com maior frequência e intensidade. Projeções para o clima brasileiro também corroboram com a ocorrência desses fenômenos e devem impactar de maneira diferenciada, a depender da região, do sistema de produção adotado, entre outros fatores, a olericultura brasileira. É fato, porém, que algumas das hortaliças de maior importância socioeconômica no Brasil são mais bem adaptadas a clima frio ou ameno e são sensivelmente afetadas pelos extremos climáticos. Assim, é possível que fortes impactos negativos sejam sentidos pela cadeia produtiva de hortaliças caso mecanismos efetivos de adaptação às mudanças climáticas não sejam adotados. Exemplos desses mecanismos são, por exemplo, o desenvolvimento de cultivares e de sistemas de produção que mitiguem tais impactos.

6. Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil**: informe 2012. Ed. Especial. Brasília, DF, 2012. 215 p.

ANUÁRIO BRASILEIRO DE HORTALIÇAS. Santa Cruz do Sul: Gazeta, 2013. 92 p.

ASSAD, E. D.; MARTINS, S. C.; BELTRÃO, N. E. M.; PINTO, H. S. Impacts of climate change on the agricultural zoning of climate risk for cotton cultivation in Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 48, p. 1-8, jan. 2013.

ASSAD, E. D.; PINTO, H. S.; ZULLO JÚNIOR, J.; ÁVILA, A. M. H. Impactos das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 39, p. 1057-1064, 2004.

BARBARISI, B.; MARIN, F. R.; PILAU, F. G.; ASSAD, E. D.; PACHECO, L. R. F. Efeito das mudanças climáticas sobre a aptidão climática para cana-de-açúcar no estado de Goiás. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 15., 2007, Aracaju. Efeito das mudanças climáticas na agricultura:[**anais...**] Aracaju: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2007. 5 p.

BATJES, N. H., BRIDGES, E. M. Soil vulnerability to pollution in Europe. **Soil Use and Management**, Oxford, v. 9, p. 25-29, Mar. 1993.

BLANCO, F. F. **Tolerância do pepino enxertado à salinidade em ambiente protegido e controle da salinização do solo**. 1999. 122 f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. **Estimas anuais de emissão de gases de efeito estufa no Brasil**. Brasília, 2013. 80 p.

BRUNELLI, K. R.; GIORIA, R.; KOBORI, R. F. Impacto potencial das mudanças climáticas sobre as doenças das brássicas no Brasil. In: GHINI, R.; HAMADA, E.; BETTIOL, W. (Ed.). **Impactos das mudanças climáticas sobre doenças de importantes culturas no Brasil**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2012. p. 145-160.

CAIXETA, R. P.; ALCÂNTARA, F. A.; MADEIRA, N. R.; ABDALLA, R. P. **Perdas de água, solo, nutrientes e matéria orgânica em área cultivada com cebola sob diferentes sistemas de manejo do solo.** Brasília, DF: Embrapa Hortaliças, 2009. 20 p. (Embrapa Hortaliças. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 51).

COSTA, R. N. T.; VASCONCELOS, J. P.; SILVA, L. A.; NESS, R. L. L. Interferência do excesso de água no solo e componentes de produção em beterraba. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 26, n. 1, p. 74-77, mar. 2008.

COUMOU, D.; RAHMSTORF, S. A decade of weather extremes. **Nature Climate Change**, v. 2, 491-496, Feb. 2012.

CRUTZEN, P. J. Geology of mankind. **Nature**, London, v. 415, n. 6867, p. 23, Jan. 2002.

DE LA PEÑA, R.; HUGHES, J. Improving vegetables productivity in a variable and changing climate. **Journal of SAT Agricultural Research**, v. 4, n. 1, p. 1-22, Dec. 2007.

DIAS, N. D. H.; ASSAD, E. D. Impacto das mudanças climáticas no zoneamento de risco climático da mamona no estado de Pernambuco. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 16., 2009, Belo Horizonte. Mudanças climáticas, recursos hídricos e energia para uma agricultura sustentável: [resumos...]. Belo Horizonte: SBA; Viçosa, MG: UFV; Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2009.

FILGUEIRA, F. A. R. **Novo manual de olericultura: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças.** 3. ed. rev. ampl. Viçosa: UFV, 2012. 421 p.

FREITAS, R. S.; AMARO FILHO, J.; MOURA FILHO, E. R. Efeito da salinidade na germinação e desenvolvimento de plantas de meloeiro. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Pombal, v. 1, n. 2, p. 113-121, 2006.

FRIZZONE, J. A.; CARDOSO, S. S.; REZENDE, R. Produtividade e qualidade de frutos de meloeiro cultivado em ambiente protegido com aplicação de dióxido de carbono e de potássio via água de irrigação. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 27, n. 4, p. 707-717, 2005.

GHINI, R.; HAMADA, E. BETTIOL, W. **Impactos das mudanças climáticas sobre doenças de importantes culturas no Brasil**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2011. 356 p.

GHINI, R.; HAMADA, E. **Mudanças climáticas: impactos sobre doenças de plantas no Brasil**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. 331 p.

GIORIA, R.; BRUNELLI, K. R.; KOBORI, R. F. Impacto potencial das mudanças climáticas sobre as doenças do tomate no Brasil. In: GHINI, R.; HAMADA, E. (Ed.). **Mudanças climáticas: impacto sobre as doença de plantas no Brasil**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2008, p. 95-128.

GUEDES, I. M. R. **Geoambientes, estoques de carbono e termodegradação da matéria orgânica de solos da área de proteção ambiental estadual Cachoeira das Andorinhas, Ouro Preto, Minas Gerais**. 2008. 75 f. (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

HAMADA, E., GHINI, R., MARENGO, J. A., THOMAZ, M. C. Projeções de mudanças climáticas para o Brasil no final do Século 21. In: GHINI, R.; HAMADA, E.; BERTIOL, W. **Impactos das mudanças climáticas sobre as doenças de importantes culturas do Brasil**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2012. p. 43-74.

IPCC. **Summary for Policymakers**. In: CLIMATE change: 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, 2013. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>>. Acesso em: 04 mar. 2015.

IPCC. **Climate change 2014 synthesis report: summary for policymakers**. Cambridge: IPCC, 2014. 40 p. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>>. Acesso em: 03 mar. 2015.

JUKNYS, R.; JANUŠKAITIENĖ, I.; DIKŠAITYTĖ, A.; ŠLIUMPAITĖ, I. Impact of warming climate on barley and tomato growth and photosynthetic pigments. **Biologija**, v. 58, n. 2, p. 87-97, 2012.

KIM, Y. **Training in horticulture**. Brasília, DF, 2010. 17 p. (Relatório de estágio da Embrapa Hortaliças).

KOBORI, R. F.; BRUNELLI, K. R.; GIORIA, R. Impacto potencial das mudanças climáticas sobre as doenças da alface no Brasil. In: GHINI, R.; HAMADA, E.; BERTIOL, W. (Ed.). **Impactos das mudanças climáticas sobre doenças de importantes culturas no Brasil**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2012. p. 129-144.

LIMA, C. E. P. **Termoanálises de matéria orgânica e vulnerabilidade à contaminação por metais pesados de solos do estado de Minas Gerais**. 2010. 175 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

LOPES, C. A.; SILVA, G. O. da. Clima. In: SILVA, G. O. da (Ed.). **Batata**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2014. Disponível em: <<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/batata/arvore/CONT000gnc4knh202wx5ok0edacx15y26tik.html>>. Acesso em: 04 dez. 2014.

LOPES, C. A.; SILVA, G. O. da; CRUZ, E. M.; ASSAD, E. D.; PEREIRA, A. S. Uma análise do efeito do aquecimento global na produção de batata no Brasil. **Horticultura Brasileira**, Brasília, DF, v. 29, n. 1, p. 7-15, jan./mar. 2011.

MARCOS, E.; TÁRREGA, R.; LUIS, E. Changes in a Humic Cambissol heated (100-500 °C) under laboratory conditions: the significance of heat time. **Geoderma: an international journal of soil science**, Amsterdam, v. 138, p. 237-243, 2007.

MARENGO, J.; NOBRE, C. A.; SALATI, E.; AMBRIZZI, T. **Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do Século 21**. Brasília, DF: [s.n.], 2007. 50 p. (Sumário técnico).

MARENGO, J. A. Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade: caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do Século 21. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2006. 159 p. il. (Biodiversidade, 26). Contém anexos.

MARIN, F. R.; ASSAD, E. D.; BARBARISI, F. G.; PILAU, F. G., PACHECO, L. F. R.; ZULLO JÚNIOR, J.; PINTO, H. Efeito das mudanças climáticas sobre a aptidão climática para cana-de-açúcar no estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 15, 2007, Aracaju. **Anais...** Aracaju: [s.n.], 2007. 6 p.

MAROUELLI, W. A.; ABDALLA, R. P.; MADEIRA, N. R.; OLIVEIRA, A. S.; SOUZA, R. F. Eficiência de uso da água e produção de repolho sobre diferentes quantidades de palhada em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 45, n. 4, p. 369-375, 2010.

MAVROGIANOPOULOS, G. N.; SPANAKIS, J.; TSIKALAS, P. Effect of carbon dioxide enrichment and salinity on photosynthesis and yield melon. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 79, n. 1/2, p. 51-63, Feb. 1999.

MELILLO, J. M.; RICHMOND, T. C.; YOHE, G. W. **Climate change impacts in the United States: the third national climate assessment**. Washington, D.C: United States Global Research Program, 2014. 841 p. Disponível em: <http://s3.amazonaws.com/nca2014/high/NCA3_Climate_Change_Impacts_in_the_United%20States_HighRes.pdf> Acesso em: 03 mar. 2015.

MOSIER, A. R. Soil processes and global change. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 27, n. 3, p. 221-229, July 1998.

OLIVEIRA, F. A.; CARRILHO, M. J. S.; MEDEIROS, J. F.; MARACAJÁ, P. B.; OLIVIERA, M. K. T. Desempenho de cultivares de alface submetidas a diferentes níveis de salinidade da água de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 8, p. 771-777, Aug. 2011.

PEET, M. M.; WILLITS, D. H.; GARDNER, R. Response of development and post-pollen production processes in sterile tomatoes to chronic sub-acute high temperature stress. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 48, n. 1, p. 101-111, 1997.

PELLEGRINO, G. P.; ASSAD, E. D.; MARIN, F. R. Mudanças climáticas globais e a agricultura no Brasil. **Revista Multiciência**, Campinas, v. 8, p. 139-162, maio 2007.

PEREIRA, R. S.; NASCIMENTO, W. M.; VIEIRA, J. V. Germinação e vigor de sementes de cenoura sob condições de altas temperatura. **Horticultura Brasileira**, Brasília, DF, v. 25, n. 2, p. 215-219, abr./jun. 2007.

PINHEIRO, G. S.; ANGELOTTI, F.; SANTANA, C. V.; DANTAS, B. F.; COSTA, N. D. Efeito da temperatura sobre a germinação de sementes de cebola. **Scientia Plena**, v. 10, n. 11, p. 1-6, 2014.

PORTO DE CARVALHO, J. R.; ASSAD, E. D.; OLIVEIRA, A. F.; SILVEIRA PINTO, H. S. Annual maximum daily rainfall trends in the midwest, southeast and southern Brazil in the last 71 years. **Weather and Climate Extremes**, v. 5-6, p. 7-15, Oct. 2014.

RAY, D. K.; MUELLER, N. D.; WEST, P. C.; FOLEY, J. A. Yield trends are insufficient to double global crop production by 2050. **Plos one**, v. 8, n. 6, p. 1-9, June 2013.

ROCKSTROM, J.; STEFFEN, W.; NOONE, K.; PERSSON, A.; CHAPIN, F. S.; LAMBIN, E. F.; LENTON, T. M.; SCHEFFER, M.; FOLKE, C.; SCHELLNHUBER, H. J.; NYKVIST, B.; WIT, C. A.; HUGHES, T.; VAN DER LEEUW, S.; RODHE, H.; SORLIN, S.; SNYDER, P. K.; CONSTANZA, R.; SVEDIN, U.; FALKINMARK, M.; KARLBERG, L.; CORELL, R. W.; FABRY, V. J.; HANSEN, J.; WALKER, B.; LIVERMAN, D.; RICHARDSON, K.; CRUTZEN, P.; FOLEY, J. A safe operating space for humanity. **Nature**, London, v. 461, n. 7263, p. 472-475, Set. 2009.

ROWLANDS, D. J.; FRAME, D. J.; ACKERLEY, D.; AINA, T.; BOOTH, B. B. B.; CHRISTENSEN, C.; COLLINS, M.; FAULL, N.; FOREST, C. E.; GRANDY, B. S.; GRYSPEERDT, E.; HIGHWOOD, E. J.; INGRAM, W. J.; KNIGHT, S.; LOPEZ, A.; MASSEY, N.; MCNAMARA, F.; MEINSHAUSEN, N.; PIANI, C.; ROSIER, S. M.; SANDERSON, B. M.; SMITH, L. A.; STONE, D. A.; THURSTON, M.; YAMAZAKI, K.; YAMAZAKI, Y. H.; ALLEN, M. R. Broad range of 2050 warming from an observationally constrained large climate model ensemble. **Nature Geoscience**, v. 5, n. 4, p. 256-260, Apr. 2012.

SATO, S.; KAMIYAMA, M.; IWATA, T.; MAKITA, N.; FURUKAWA, H.; IKEDA, H. Moderate increase of mean daily temperature adversely affects fruit set of *Lycopersicon esculentum* by disrupting specific physiological processes in male reproductive development. **Annals of Botany**, London, v. 97, n. 5, p. 731-738, May 2006.

SATO, S.; PEET, M. M. T. The effects of moderately elevated temperature stress on the timing of pollen release and germination in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). **Journal of Horticultural Science & Biotechnology**, Ashford, v. 80, n. 1, p. 23-28, Jan. 2005.

SATO, S.; PEET, M. M.; THOMAS, J. F. Determining critical pre-and post-anthesis periods and physiological processes in *Lycopersicon esculentum* Mill. Exposed to moderately elevated temperatures. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 53, p. 1187-1195, 2002.

SATO, S.; PEET, M. M.; THOMAS, J. F. Physiological factors limit fruit set of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) under chronic, mild heat stress. **Plant Cell and Environment**, Oxford, v. 23, p. 719-726, 2000.

SEEG. **Emissões totais**. Disponível em: <<http://www.seeg.eco.br/emissoes-totais/>>. Acesso em: 24/06/2015.

SILVA, A. O.; KLAR, A. E.; SILVA, E. F. F.; TANAKA, A. A.; SILVA JUNIOR, J. F. Relações hídricas em cultivares de beterraba em diferentes níveis de salinidade do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, p. 1143-1151, 2013.

SILVA, J. K. M.; OLIVEIRA, F. A.; MARACAJÁ, P. B.; FREITAS, R. S.; MESQUITA, L. Efeito da salinidade e adubos orgânicos no desenvolvimento da rúcula. **Caatinga**, Mossoró, v. 21, p. 30-35, 2008.

SMIDT, G. R. B. Introduction and framework of the chemical time bombs project. In: MAPPING OF SOIL AND TERRAIN VULNERABILITY TO SPECIFIED CHEMICAL COMPOUNDS IN EUROPE AT A SCALE OF 1:5 M, 1991, Wageningen, Holanda. **Anais...** Wageningen, Holanda: 1991.

STIGLIANI, W. Changes in Valued “Capacities” of Soils and Sediments as Indicators of Nonlinear and Time-Delayed Environmental Effects, **Environmental Monitoring and Assessment**, Dordrecht, v. 10, p. 245-347, 1988.

STIGLIANI, W. M. **Chemical time bombs**: definition, concepts and examples. Laxenburg: International Institute for Applied Systems Analysis, 1991. (Executive report 16).

WARLAND, J.; MCKEOWN, A. W.; MCDONALD, M. R. Impact of high air temperatures on Brassicaceae crops in southern Ontario. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, v. 86, p. 1209-1215, 2006.

ZALASIEWICZ, J.; WILLIAMS, M.; STEFFEN, W.; CRUTZEN, P. The new world of the Anthropocene. **Environmental Science & Technology**, Easton, v. 44, n. 7, p. 2228-2231, Feb. 2010.

ZULLO JÚNIOR, J.; PINTO, H. S.; ASSAD, E. D.; EVANGELISTA, S. R. M. Potential economic impacts of global warming on two Brazilian commodities, according to IPCC prognostics. **Terra**, Campinas, v. 3, p. 28-39, 2008.

Projeções de demanda hídrica para irrigação do meloeiro no Nordeste brasileiro sob cenários de mudanças climáticas

Rubens Sonsol Gondim

Aline de Holanda Nunes Maia

Sílvia Roberto Medeiros Evangelista

Alfredo José Barreto Luiz

Luís Henrique Bassoi

Fábio Rodrigues de Miranda

Karísia Mara Lima de Oliveira

1. Introdução

Há elevada confiança que o contraste de precipitação média entre regiões secas e úmidas e entre estações secas e úmidas irá aumentar sobre a maior parte do globo terrestre, à medida que a temperatura se eleva. Muitas regiões semiáridas provavelmente, irão experimentar menos precipitação (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2013).

A demanda de água para agricultura, particularmente para irrigação, é considerada mais sensível às mudanças climáticas que a demanda industrial e para consumo urbano. Há dois efeitos potenciais em áreas irrigadas: a demanda total de água durante o ciclo da cultura e a época de irrigação. Períodos prolongados sem chuva podem levar ao aumento de demanda, mas esta última, também, pode ser reduzida se houver um aumento da precipitação e conseqüentemente da umidade do solo (IPCC, 2001).

Apesar da importância do assunto ser um consenso, os impactos das mudanças climáticas na demanda de água para irrigação têm sido pouco estudados no Brasil, principalmente porque os Modelos de Circulação Global, os quais são largamente utilizados para simular cenários climáticos futuros, são geralmente inadequados para gerar projeções de mudanças climáticas em escalas locais. Binder (2006) recomenda maior detalhamento das projeções de mudanças climáticas para a escala de bacia

hidrográfica, que uma vez integradas a modelos hidrológicos, possibilitam o estudo de impactos das mudanças climáticas em recursos hídricos.

O aumento das médias das temperaturas globais do período de 2003-2012 em relação ao período de 1850-1900 foi de 0,78 °C (0,72 °C a 0,86 °C) (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2013).

A agricultura irrigada influencia diretamente a disponibilidade da água numa bacia hidrográfica, especialmente numa região onde essa atividade é intensiva. O conhecimento local sobre o impacto de mudanças climáticas na demanda de água para irrigação fornece diretrizes para o desenvolvimento de políticas que visem a redução de impactos e as vulnerabilidades.

Segundo o IBGE (2013), em 2012 a região Nordeste foi responsável por mais de 87% da área colhida de melão no Brasil, que naquele ano atingiu o total nacional de 22.789 ha. Nessa área foram colhidas quase 550 mil toneladas do produto, gerando mais de 440 milhões de reais de renda aos produtores.

As condições climáticas em parte da região nordeste do Brasil, em determinadas épocas do ano, são caracterizadas por altos níveis de temperatura e radiação solar, o que têm propiciado alta produtividade e a obtenção de frutos de qualidade superior, elevando o *status* da cultura de melão ao nível de produto de exportação. Um dos pontos fundamentais para a sustentabilidade da produção do meloeiro é a exigência de suplementação hídrica. Considerando os riscos de mudanças significativas nos regimes de precipitação pluviométrica preconizados pelas projeções dos modelos climáticos globais ou regionais, o planejamento de medidas preventivas ou mitigadoras é essencial para propiciar segurança hídrica para as regiões produtoras.

O objetivo desta publicação é sintetizar um conjunto de resultados de estudos de impactos de mudanças climáticas sobre a demanda de água para irrigação, em regiões produtoras de melão no Nordeste brasileiro, desenvolvidos no âmbito do Projeto CliMelão, liderado pela Embrapa Agroindústria Tropical.

2. Mudanças climáticas: aspectos conceituais

Mudanças climáticas referem-se a um conjunto de alterações no estado do clima, tanto em relação às médias quanto à variabilidade das suas propriedades, e que persistem por períodos extensos, superiores a décadas. Podem ocorrer devido a processos internos ou forçantes externas. Algumas influências externas, tais como radiação solar e vulcanismo, ocorrem naturalmente e contribuem para a variabilidade total natural do sistema climático. Outras mudanças externas, como composição da atmosfera, que se intensificaram com a revolução industrial, são resultantes das

atividades humanas (antropogênicas). Hegerl et al. (2007) chamam atenção para o fato de que alterações que resultam de forçantes externas antropogênicas se diferenciam das naturais e, como tais, podem ser distinguidas das mudanças e variabilidades naturais que resultam de processos internos do sistema climático. Há portanto, distinção entre forçante de mudança do clima, tais como: natural (radiação solar e vulcanismo) de antropogênica (emissão de gases de efeito estufa, mudança de uso e ocupação do solo), todos externos ao próprio sistema climático

A variabilidade interna das variáveis meteorológicas está presente em todas as escalas de tempo. Processos atmosféricos que geram variabilidade interna são conhecidos por operarem em pequenas escalas de tempo, variando do instantâneo até alguns anos. Componentes como os oceanos e grandes lençóis de gelo tendem a operar em escalas temporais mais longas. Estes componentes produzem variabilidade interna. Adicionalmente a variabilidade interna é também produzida pela combinação de componentes, como por exemplo, o fenômeno *el niño / southern oscillation* (ENSO) (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2013).

Há um razoável consenso entre os cientistas que o aumento da concentração de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera aumenta a temperatura global (CARTER et al., 2007). Emissões futuras desses gases são produtos de um sistema dinâmico (processo ou conjunto de processos, cuja evolução no tempo é governada por um conjunto determinístico de leis físicas) muito complexo, determinado por forçantes, quais sejam: crescimento demográfico, desenvolvimento sócio-econômico e mudanças tecnológicas. Cenários climáticos são representações do futuro que são consistentes com hipóteses sobre emissões futuras de gases de efeito estufa e outros poluentes, considerando-se as forçantes que os influenciam (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2000).

A distinção entre os efeitos de influências externas e a variabilidade climática interna requer uma comparação cuidadosa entre as mudanças observadas, resultantes de uma forçante externa (mudanças climáticas forçadas) e aquelas que são esperadas em decorrência da variabilidade interna. Estas expectativas são baseadas na compreensão física do sistema climático. Este entendimento pode ser representado por modelos conceituais ou quantificado via modelos climáticos. Um arranjo de modelos climáticos é utilizado para quantificar expectativas neste sentido, variando de simples modelos de balanço de energia para modelos de complexidade intermediária, até modelos acoplados, tais como combinações de modelos oceânicos e atmosféricos (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2007).

3. Modelos de circulação global e regional

Os Modelos de Circulação Global (GCMs) são geralmente utilizados para simular o clima presente e projetar o clima futuro com forçantes de gases de efeito estufa e aerossóis. Para modelagem dos processos, a atmosfera e o oceano são subdivididos em grades de resolução horizontal de 2° a 4° de latitude e longitude com 10 a 20 camadas na vertical. Em geral, a maioria dos GCMs simulam processos na escala global ou continental e provêm uma representação de precisão razoável da média climática planetária (DIBIKE; COULIBALY, 2004a, 2004b, 2005). Por outro lado, os GCMs são incapazes de representar características locais numa resolução adequada para estudos regionalizados de impacto.

Modelos climáticos são baseados em princípios físicos bem estabelecidos e espera-se que sejam capazes de reproduzir características de clima recente e mudança climática passada. Há considerável confiança que Modelos de Circulação Global Oceânico-Atmosféricos provêm estimativas quantitativas aceitáveis das mudanças climáticas futuras, particularmente em escala continentais.

Modelos numéricos representando processos físicos na atmosfera, oceano, criosfera e superfície da terra (Modelos de Circulação Global) são as mais avançadas ferramentas disponíveis para simular a resposta do sistema climático global ao aumento da concentração de gases de efeito estufa. Enquanto modelos mais simples também têm sido utilizados para prover estimativas globais e regionais da resposta do clima, apenas os GCMs, geralmente em conjunto com modelos regionais aninhados (acoplados) ou outros métodos de redução de escala, possuem potencial para fornecer estimativas físicas e geograficamente consistentes de mudanças climáticas regionais (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 1994, citado por CARTER et al., 2007).

Os GCMs representam o clima utilizando uma malha de quadrículas tridimensionais sobre o globo com uma resolução horizontal entre 250 km e 600 km, 10 a 20 camadas verticais na atmosfera e algumas vezes 30 camadas nos oceanos. Sua resolução é um tanto grosseira, em relação à escala da maioria dos trabalhos de avaliação de impactos (CARTER et al., 2007).

Além do mais, muitos processos físicos, tais como aqueles relacionados a nuvens, também ocorrem em escalas menores e não podem ser adequadamente modelados pelos GCMs. Por outro lado, suas propriedades conhecidas devem ser estimadas sobre a escala maior, através de técnicas conhecidas como parametrização. Esta é uma fonte de incerteza em simulações do clima futuro baseadas em GCMs. Desta forma, diferentes GCMs podem projetar respostas bem diferentes para uma

mesma forçante, simplesmente por causa da forma de como certos processos e respectivas respostas são modeladas (CARTER et al., 2007).

Com a evolução dos modelos climáticos e aumento da potência computacional, vem ocorrendo um gradativo aumento da resolução espacial das projeções dos modelos. Alguns GCMs antigos operavam numa resolução horizontal de cerca de 1.000 km com 2 a 10 níveis na vertical. Modelos mais recentes são processados com aproximadamente 250 km de resolução espacial, com 20 níveis verticais (> 20 em alguns modelos oceânicos). Entretanto, embora modelos de maior resolução contenham mais detalhes espaciais (como topografia, melhor definição de bordas terra/mar, etc.), isto não necessariamente garante um desempenho superior do modelo (CARTER et al., 2007).

Em simulações de mudanças climáticas, modelos são utilizados para gerar projeções de possíveis alterações em escala de tempo de muitas décadas. O grau de confiança num modelo pode ser quantificado através da comparação de simulações para períodos passados com dados observados. Não há como fazer testes diretamente para avaliar a qualidade das projeções, uma vez que não há períodos de observação suficientes de mudanças forçadas exatamente como aquelas esperadas para o Século 21. Em geral, o grau de confiança nas projeções de GCMs é maior para algumas variáveis climáticas, como temperatura, que para outras, como precipitação (RANDALL et al., 2007).

Há razoável confiança a respeito do aumento da precipitação média sobre áreas de média latitude do hemisfério Norte, a partir de 1901 e alta confiança após 1951. Para outras latitudes, há pouca confiança sobre aumentos ou reduções de longo prazo. Por outro lado, a variabilidade na precipitação relacionada ao fenômeno *El Niño* / Oscilação Sul (ENOS) provavelmente será intensificada (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2013).

O método usado para converter saídas dos Modelos de Circulação Global em variáveis meteorológicas locais requeridas para modelagem hidrológica viável é geralmente referido como técnicas de redução de escala (*downscaling*) (DIBIKE; COULIBALY, 2004a, 2004b, 2005).

Redução de escala dinâmica envolve o aninhamento de um Modelo de Circulação Regional (RCM) a uma resolução mais grosseira de um Modelo de Circulação Global (GCM). O RCM utiliza o GCM para definir as condições de contorno atmosféricas variáveis com o tempo, em torno de um domínio finito, no qual a dinâmica física da atmosfera é modelada, utilizando-se uma malha horizontal espaçada de 20 – 50 km.

4. Climatologia de base do modelo

A climatologia de base ou de referência pode ser definida como aquela em relação à qual uma mudança é mensurada, o que torna a caracterização climática da região de suma importância em estudos de impactos de mudanças climáticas. A escolha da climatologia de base e dos cenários pode influenciar fortemente os resultados. Um dos critérios de avaliação da qualidade de um GCM ou RCM é seu desempenho em simular o clima presente de uma região. Isto pode ser realizado comparando-se a climatologia de base do modelo com dados correspondentes observados na região, determinando-se assim, a habilidade do modelo climático em simular padrões de circulação (CARTER et al., 2007).

Questões a serem consideradas na seleção da climatologia de base incluem tipos de dados requeridos, duração do período de referência, fontes de dados e como podem ser aplicados na avaliação de impactos.

Conforme recomendações do Intergovernmental Panel on Climate Change (1994) citadas por Carter et al. (2007), a climatologia de base do modelo deve ser selecionada, de acordo com os critérios abaixo:

- ser representativa do clima atual ou englobar médias recentes da região de estudo;
- ter uma duração que abranja as variações climáticas, incluindo um número significativo de anomalias climáticas (como secas severas ou estações amenas);
- incluir um período para o qual dados da maioria das variáveis climáticas sejam abundantes, adequadamente distribuídos sobre o espaço e prontamente disponíveis;
- incluir dados de alta qualidade para uso em avaliações de impactos;
- ser consistente e prontamente comparável com climatologias de base utilizadas em outros estudos de impactos.

Normais climatológicas de um período de 30 anos, conforme definidas pela Organização Mundial de Meteorologia, podem ser utilizadas como referência ou padrão. O período geralmente utilizado em estudos de impacto é a tridécada 1961-1990. Há um número de fontes alternativas de dados de climatologia de base que podem ser aplicadas em estudos de impactos: séries históricas de agências ou arquivos de meteorologia, conjunto de dados globais, saídas de modelos climáticos e geradores climáticos para períodos passados (*hindcasts*). Um dos conjuntos de dados globais disponíveis de domínio público, útil para avaliação de GCMs ou RCMs, na ausência de densas redes de dados observados na região de estudo é a base de dados do *Climate Research Unit* - CRU (MITCHELL; JONES, 2005).

Há dois tipos de informações oriundas de GCMs que podem ser úteis na descrição da climatologia de base: reanálise dos dados ou saídas das simulações dos modelos de circulação global ou regional para períodos passados. A reanálise de dados é um processo em que dados de resolução fina são gerados pela combinação de dados observados com simulados oriundos de modelos numéricos. Este processo é conhecido como assimilação. Projeções retrospectivas (*hindcasts*) dos GCMs ou RCMs são outra fonte de informação do clima presente. Tais simulações tratam da representação da dinâmica do sistema climático global não forçado por mudanças antropogênicas na composição da atmosfera. Para algumas regiões e em algumas escalas temporais, estes modelos estimam a variabilidade natural de forma bastante semelhante à observada (TETT et al., 1997 citado por CARTER et al., 2007).

Uma das formas de avaliar a destreza de um GCMs ser usado na construção de cenários regionalizados de mudanças climáticas, em simular o clima presente na região, é a comparação de suas projeções retrospectivas com dados observados (CARTER et al., 2007).

5. Incertezas das mudanças climáticas

A comparação entre mudanças observadas e aquelas que são naturalmente esperadas é realizada de várias maneiras. Detecção formal e atribuição recorrem a métodos estatísticos para pesquisar se dados climáticos observados contêm evidência de respostas esperadas a forçantes externas, as quais são diferentes da variação gerada dentro do sistema climático (variabilidade natural interna). Estes métodos não se limitam a simples análises lineares ou de tendências. Abrangem a identificação de respostas observadas a uma ou várias forçantes, através da reprodução do padrão temporal e espacial das respostas esperadas (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2007).

Detecção é o processo de demonstração que o clima mudou em algumas de suas propriedades, utilizando-se dados empíricos, sem a justificativa para a mudança, considerando-se que a variabilidade interna sozinha é considerada pequena. Atribuição das causas das mudanças climáticas é o processo de estabelecimento das causas mais prováveis para a mudança detectada com determinado nível de confiança. Uma atribuição inequívoca requereria experimentação controlada do sistema climático. Como isto não é possível, a atribuição de mudanças climáticas a causas antropogênicas é compreendida como a demonstração que uma mudança detectada é consistente com respostas estimadas para uma dada combinação de forçantes naturais e antropogênicas e não consistente com explicações físicas plausíveis (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2007).

A influência humana foi detectada no aquecimento da atmosfera e oceanos, em mudanças no ciclo global da água, em reduções de neve e gelo, na elevação da média do nível dos mares e em mudanças em alguns extremos climáticos (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2013).

Jones et al. (2004) alertam para as incertezas nos principais passos da avaliação de impactos de mudanças climáticas, através da aplicação de diferentes cenários. Tais incertezas devem ser consideradas nas opções de avaliação de impactos e vulnerabilidade, bem como de adaptação às mudanças climáticas. Embora ainda não possam ser quantificadas, podem ser apontadas as seguintes fontes de incertezas:

- incertezas sobre emissões futuras de GEE: há incertezas nas hipóteses-chave sobre a relação entre população futura, desenvolvimento socioeconômico e mudanças tecnológicas que fazem a base dos cenários do IPCC. Este tipo de incerteza pode ser aceita fazendo-se projeções climáticas para uma gama de cenários de emissões que cubram maior parte da amplitude da incerteza. Carter et al. (2007) recomendam o uso e elaboração de múltiplos cenários. As emissões são atualmente consideradas como uma das duas maiores fontes de incertezas das projeções climáticas futuras;
- incertezas nas concentrações futuras de GEE: o entendimento imperfeito de alguns processos físicos no ciclo do carbono e reações químicas na atmosfera gera incertezas na conversão das emissões para concentrações de gases. Uma incerteza potencialmente maior é a questão do clima, ciclo de carbono e química atmosférica. A fim de se refletir esta incerteza nos cenários climáticos, o uso de Modelos de Circulação Global Oceânico-Atmosférico que explicitamente simulem o ciclo do carbono e química de todas as substâncias presentes torna-se necessário;
- incertezas na resposta climática às concentrações dos GEE: existem lacunas de conhecimento sobre diversos processos do sistema climático e incertezas surgem por causa de descrição incorreta ou incompleta de processos-chave e suas respectivas implicações nos prognósticos dos modelos. Tal realidade é ilustrada pelo fato de que atualmente GCMs que contêm representações diferentes do sistema climático, projetam diferentes padrões e magnitudes de mudanças climáticas para o mesmo período futuro, para um mesmo cenário de concentrações de gases de efeito estufa. Esta é considerada uma das maiores fontes de incertezas, juntamente com as emissões futuras, discutidas acima;
- incertezas devido à variabilidade natural do clima: o clima varia nas escalas temporais de anos e décadas, devido a interações naturais entre atmosfera, oceano e terra. Espera-se que tal variabilidade natural persista no futuro. Tal incerteza ainda

não deve ser removida, mas pode ser quantificada, através do processamento de conjuntos de projeções futuras do clima. Cada membro do conjunto usa o mesmo modelo e o mesmo cenário de emissão ou concentração, mas cada um é inicializado de um ponto de partida diferente no clima de controle. O processamento do modelo para períodos de 10 a 30 anos fornecerá uma amplitude de possibilidades futuras;

- incertezas relativas aos métodos de redução de escala: todas as técnicas de regionalização das projeções de GCMs carregam consigo erros associados aos campos de forçantes. Técnicas diferentes de redução de escala (*downscaling*) podem fornecer projeções distintas, até quando baseadas na mesma projeção do GCM.

6. Correção de viés

Os modelos climáticos globais (GCMs) e regionalizados (RCMs), apesar dos contínuos aperfeiçoamentos das últimas décadas, ainda apresentam discrepâncias na representação do clima presente (EHRET et al., 2012), especialmente para a variável precipitação pluviométrica, uma das mais importantes em estudos de impactos de mudanças climáticas. Divergências sistemáticas entre projeções retrospectivas dos modelos (*hindcasts*) e séries de dados observados de variáveis prognósticas (ex. chuva, temperatura) são denominadas vieses (*bias*). Os vieses podem ser mensurados de diferentes formas, desde uma simples diferença entre médias anuais até métricas mais complexas como distâncias entre distribuições de probabilidade simuladas e observadas de variáveis prognósticas.

Assim, a correção de viés é uma importante etapa do pré-processamento de dados para uso em estudos de impacto. No entanto, existem ainda importantes problemas metodológicos a serem elucidados: na maioria dos métodos atualmente propostos para correção de viés, o processo de correção é feito isoladamente para cada variável (métodos univariados), sem considerar a correlação entre elas. Dessa forma, há um questionamento sobre os métodos univariados em função de prováveis distorções das malhas de correlação entre as variáveis climáticas de interesse, geradas pelo processo de correção de viés.

Para os métodos univariados, Maia e Hamada (2013) propuseram o uso de métodos geostatísticos (*Model Based Geostatistics*, MBG) - Diggle et al., (2003) para modelagem espacial de vieses. A abordagem MBG permite, via métodos de máxima verossimilhança, o teste de hipóteses estatísticas relacionadas aos padrões de viés, como por exemplo, a presença de tendências espaciais. As superfícies suavizadas de viés derivadas dos valores preditos dos modelos geostatísticos são então usadas para

correção de viés das projeções futuras dos GCM ou RCM. Métodos mais refinados de correção foram propostos por Piani e Haerter (2012), buscando manter a interrelação entre chuva e temperatura, utilizando métodos de cópula bivariada.

A quantificação de viés de modelos globais ou regionalizados para uma região de interesse é feita comparando-se suas projeções retrospectivas com dados observados. Na ausência de uma malha densa de estações locais, são utilizados dados de bases globais de observações climáticas construídas pela interpolação de estações meteorológicas ao redor do mundo, como a base de dados mensais da *Climate Research Unit* (CRU) da Universidade de East Anglia, Inglaterra (MITCHELL; JONES, 2005).

Num estudo realizado para a principal região de cultivo irrigado do melão no Nordeste (NE) brasileiro, Luiz et al. (2013) avaliaram a concordância entre dados de mensais de precipitação da base CRU e de séries de dados disponíveis, coletados em estações da FUNCEME e do INMET, na região entre 4,5° e 6,5° de latitude Sul e entre 36,5° e 39,5° de longitude Oeste.

Foram utilizados os dados de precipitação pluviométrica, latitude, longitude e altitude de 20 estações meteorológicas nacionais (INMET) ou estaduais (FUNCEME), que estão localizadas próximas e ao redor da área delimitada pelos pontos CRU considerados no estudo (Figura 1). Das séries disponíveis foram selecionadas apenas as informações referentes aos anos de 1961 a 1990, para coincidir com o período usado como referência (*baseline*) do RCM utilizados no estudo de impacto de mudanças climáticas sobre a demanda hídrica do meloeiro Gondim et al., (2013).

Os resultados da comparação entre as precipitações mensais médias estimadas nos pontos CRU e observadas nas estações mais próximas, indicaram uma superestimação dos dados CRU nos meses de seca. Um exemplo da análise gráfica para a estação de Mossoró é apresentado na Figura 2. Observou-se uma alta consistência entre os dados CRU e os dados correspondentes das estações locais, o que aponta para a utilidade das séries CRU em estudos de padrões espaciais de viés.

Em estudo sobre impactos de mudanças climáticas sobre a demanda hídrica do meloeiro desenvolvido por Gondim et al. (2013) para a região produtora no vale do São Francisco, as variáveis meteorológicas de interesse são médias mensais de trinta anos para chuva, temperatura mínima ($T_{\text{máx}}$) e temperatura máxima ($T_{\text{mín}}$). Para correção de viés, foi utilizado o método mais simples que calcula, em cada elemento da área de interesse, a diferença entre a média das projeções retrospectivas e a média dos correspondentes dados observados. Os mapas de viés para chuva, $T_{\text{máx}}$ e $T_{\text{mín}}$, nos meses de dezembro, como exemplo, são apresentados nas Figuras 3 a 5, respectivamente.

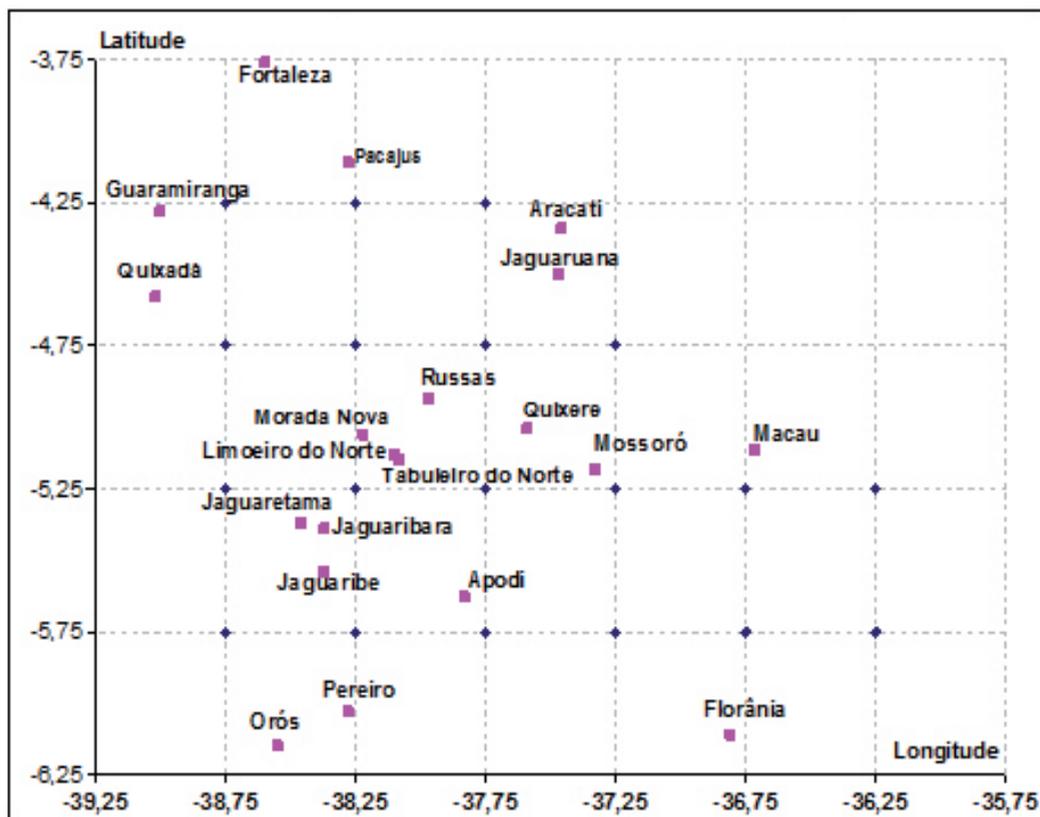


Figura 1. Localização das estações meteorológicas (rosa) e dos pontos de CRU (azul).

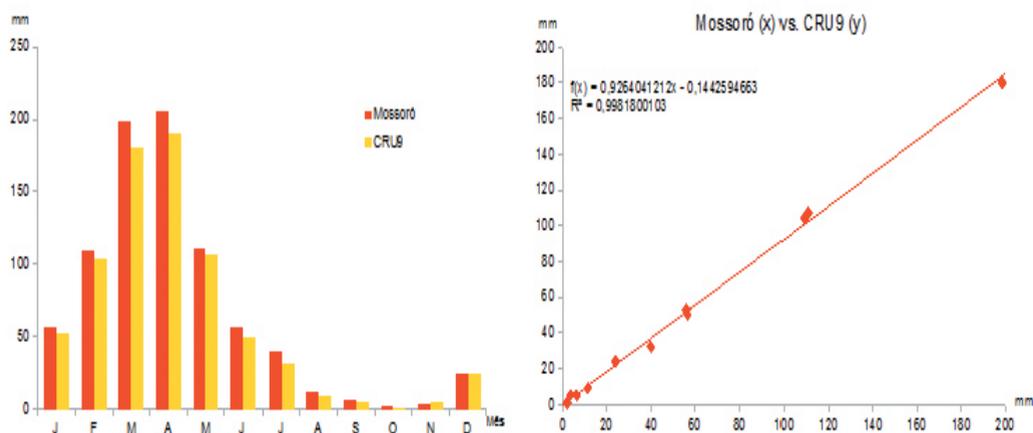


Figura 2. Representações da relação entre a precipitação mensal média (mm) observada na estação de Mossoró-CE, e estimada para o ponto CRU mais próximo.

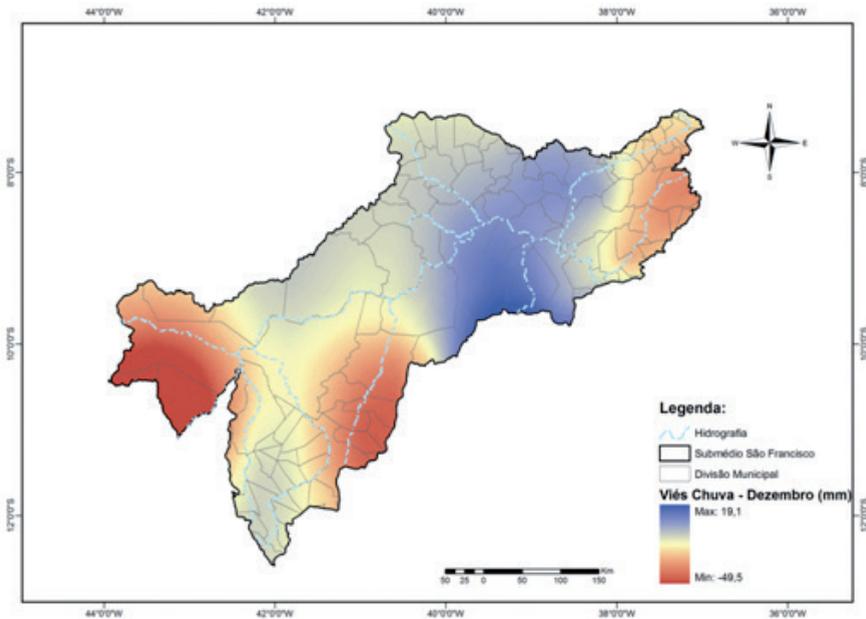


Figura 3. Distribuição espacial do viés da média mensal de chuva para o mês de dezembro (1961-1990) na região produtora de melão no submédio São Francisco

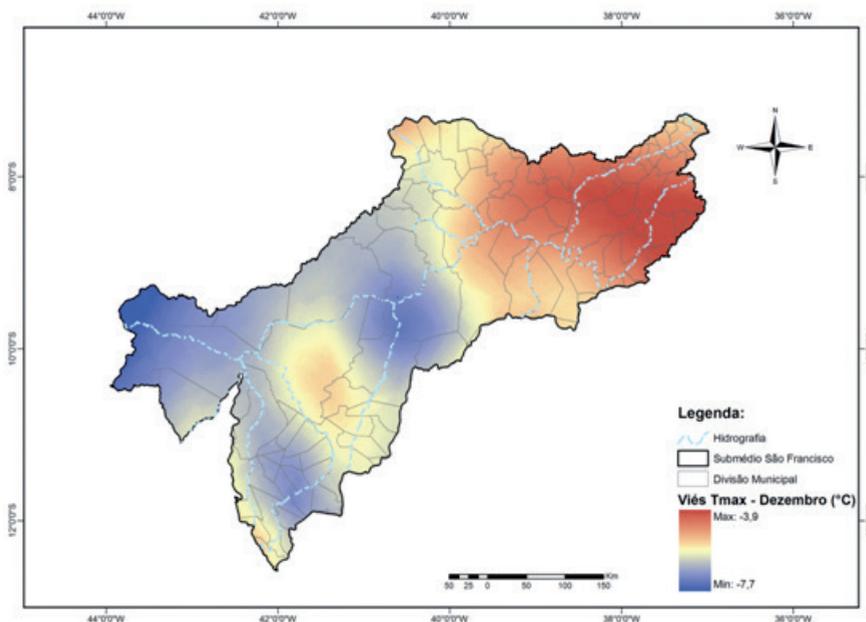


Figura 4. Distribuição espacial do viés das médias das temperaturas máximas (°C) no mês de dezembro (1961-1990), na região produtora de melão no submédio São Francisco.

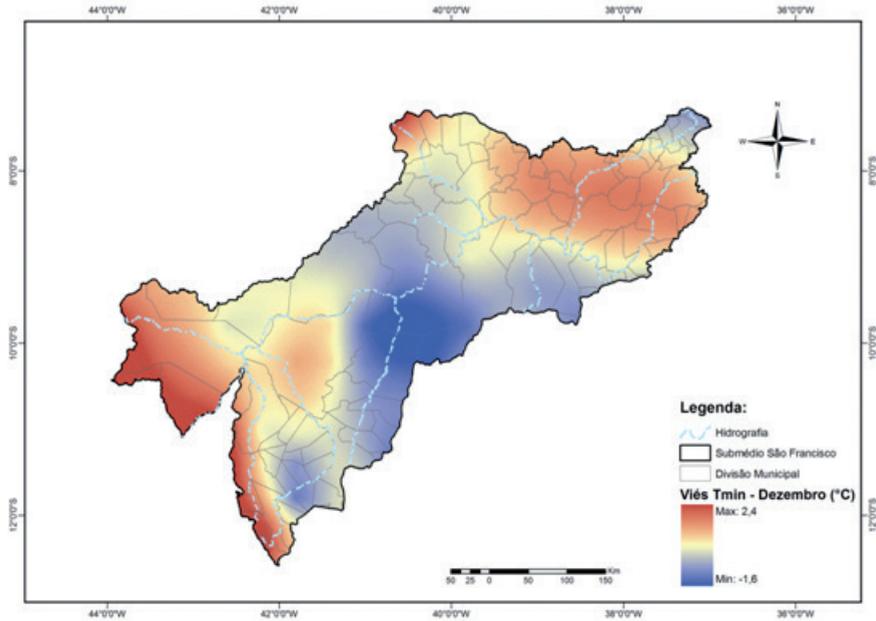


Figura 5. Distribuição espacial do viés da médias das temperaturas mínimas (°C) no mês de dezembro (1961- 1990), na região produtora de melão no submédio São Francisco

7. Integração de modelos visando à análise de impactos das mudanças climáticas na demanda de água de irrigação

Para a quantificação dos impactos de mudanças climáticas sobre a demanda de água para irrigação foi utilizada uma abordagem que integra um modelo climático regional, um modelo de demanda hídrica, utilizando Sistema de Informação Geográfica. A integração proposta possui o seguinte formato com fluxos de entradas e saídas:

A krigagem é uma técnica de interpolação utilizada na Geoestatística para estimar valores de variáveis para locais não mensurados, por meio de observações adjacentes espacialmente correlacionadas. Na krigagem ordinária, os valores desconhecidos das variáveis de interesse são estimados por uma média ponderada de valores vizinhos. Os pesos são escolhidos de modo que esse estimador seja o melhor estimador linear não tendencioso (sem viés), para o caso de variáveis com distribuição Normal. Os pesos são derivados de uma função de covariância denominada variograma, que pode ser representada por diferentes modelos matemáticos. Nesse contexto, a krigagem é usada como um método de suavização das imagens e compatibilização das escalas dos dados da base CRU e da *baseline* do modelo regionalizado.

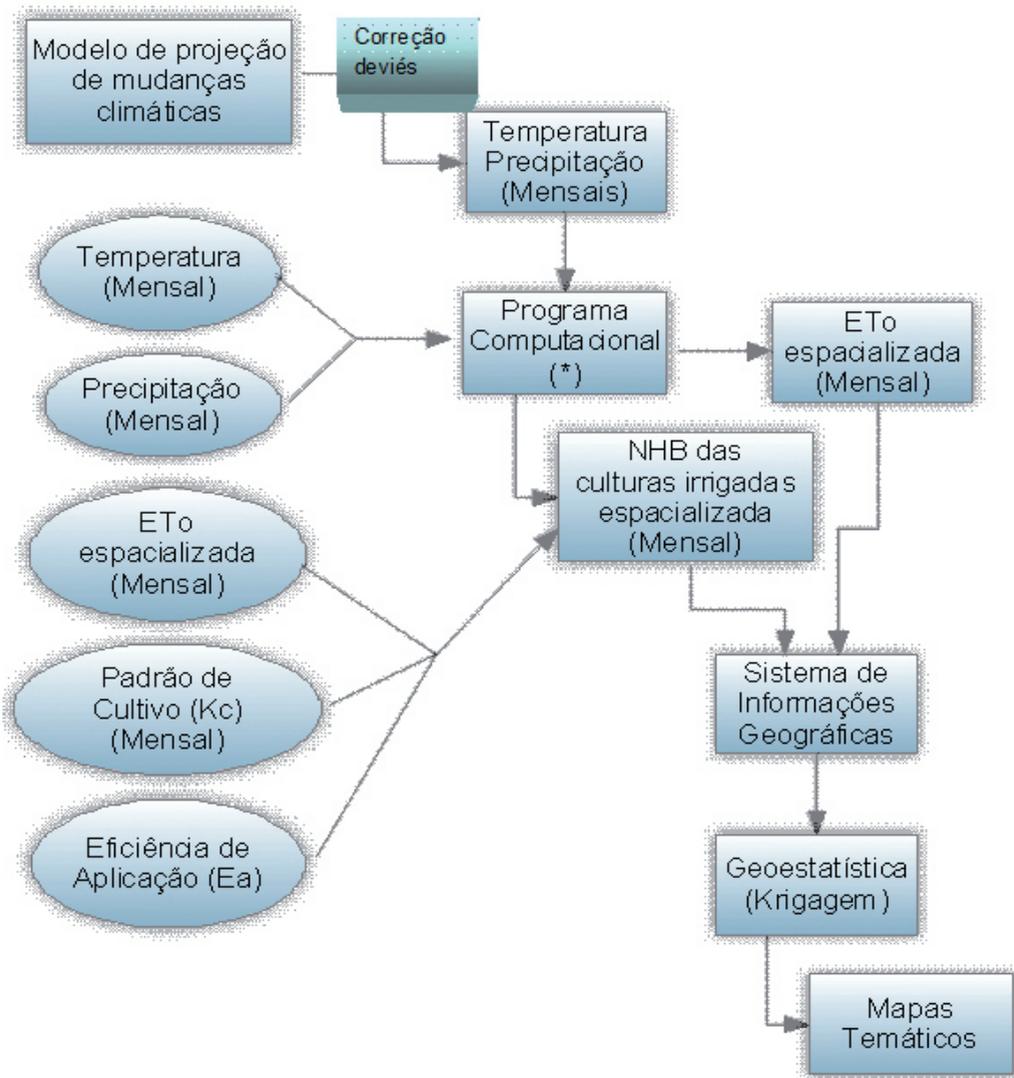


Figura 6. Esquema de integração de modelos para avaliação de impactos das mudanças climáticas na demanda de água de irrigação.

(*) Programa desenvolvido no ambiente SAS® (*Statistical Analysis System*)

Um conjunto de dados composto de uma climatologia de base do modelo de 1961-1990 (*baseline*) e projeções climáticas para períodos de três décadas no futuro é fornecido pelos modelos de mudanças climáticas. Os dados são então extraídos, considerando-se as coordenadas geográficas da região em estudo, na resolução disponível, gerando-se então, dados espacializados para cada variável, a fim de abranger toda a região estudada.

Os dados suavizados do modelo são visualizados espacialmente pela suavização utilizando um sistema de informações geográficas.

8. A análise de impactos na demanda hídrica

Para a estimativa dos impactos das mudanças climáticas sobre a demanda hídrica para irrigação do meloeiro no Nordeste brasileiro foram selecionadas duas áreas de estudo, em virtude de sua importância na produção nacional de melão:

- 1) Região 1 (Jaguaribe-CE/Apodi-RN): delimitada entre $4^{\circ}20'30''$ e $5^{\circ}30'00''$ S e $37^{\circ}05'00''$ e $38^{\circ}30'00''$ W (Figura 7), com superfície de 8.954 km² e abrangendo 11 municípios, sendo quatro do Estado do Rio Grande do Norte (Tibau, Mossoró, Baraúna e Grossos) e sete do Estado do Ceará (Aracati, Icapuí, Limoeiro do Norte, Quixeré, Jaguaruana, Russas e Itaiçaba). A altitude na área varia de 1,5 m a 206 m;



Figura 7. Região produtora de melão compreendendo o Leste dos estados do Ceará e Oeste do estado do Rio Grande do Norte.

Fonte: Oliveira (2012).

- 2) Região 2 (Petrolina-Juazeiro): situada entre as coordenadas $36^{\circ}48'0''$ W e $44^{\circ}0'0''$ W de longitude oeste, $10^{\circ}25'0''$ S e $12^{\circ}36'0''$ S de latitude sul (Figura 8), compreendendo parte dos estados de Pernambuco e da Bahia, com superfície de 8.954 km², abrangendo 17 municípios, sendo 10 do Estado de Pernambuco

(Floresta, Santa Maria da Boa Vista, Orocó, Petrolina, Lagoa Grande, Inajá, Santa Cruz, Parnamirim, Petrolândia e Jatobá) e sete do Estado da Bahia (Juazeiro, Curaçá, Ribeira do Amparo, Casa Nova, Glória, Abaré e Sobradinho). A altitude na área varia de 173 m a 1.050 m.

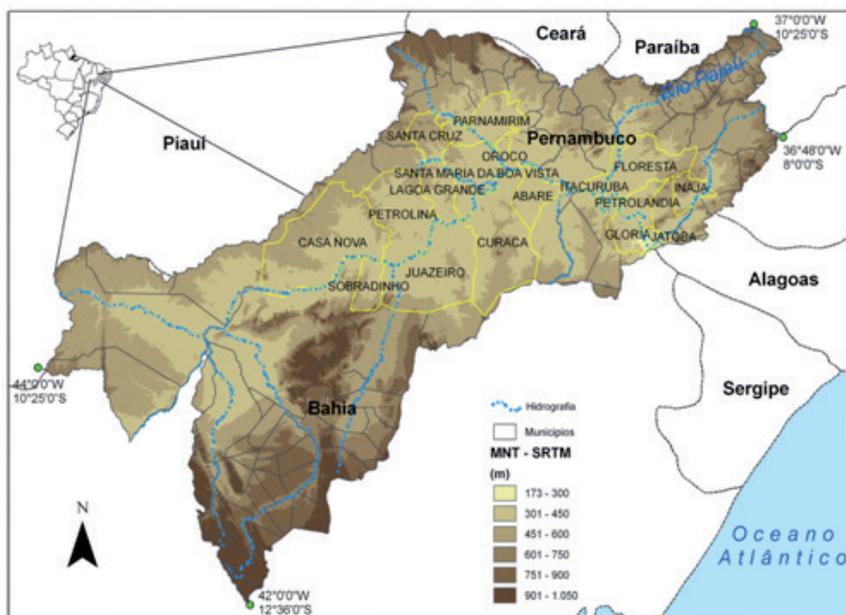


Figura 8. Região produtora de melão no submédio São Francisco.
Fonte: Gondim et al. (2013).

8.1. Cálculo na necessidade hídrica bruta da cultura (NHB)

A necessidade hídrica líquida da cultura (NHL) é definida como a quantidade de água que as plantas cultivadas devem receber para se desenvolverem sem estresse hídrico e foi calculada pela seguinte expressão:

$$NHL = ET_0 PM \cdot Kc - ppt_{efetiva} \quad (1)$$

em que: NHL, é a necessidade hídrica líquida (mm); $ET_0 PM$, evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith (mm); Kc, coeficiente de cultivo (adimensional); e $ppt_{efetiva}$, precipitação efetiva (mm).

O método combinado de Penman-Monteith, recomendado pela FAO para o cálculo da evapotranspiração de referência, conhecido como o método FAO Penman-Monteith ($ET_0 PM$) é padrão mundial para cálculo das necessidades hídricas das culturas. As estimativas mensais da $ET_0 PM$ para a cultura do melão foram obtidas

a partir das projeções corrigidas de temperaturas máxima ($T_{\text{máx}}$) e mínima ($T_{\text{mín}}$) do modelo regionalizado, utilizando-se a metodologia de dados limitados, conforme descrita em Allen et al. (1998). Método similar foi aplicado em estudos de Jabloun e Sahli, (2008), Sentelhas et al., (2010) e Rocha et al., (2011).

Os coeficientes de cultivo e a duração dos estádios de desenvolvimento e número de dias após plantio (DAP) para a cultura do meloeiro estão apresentados na Tabela 1, segundo Miranda et al. (1999).

Tabela 1. Coeficientes de cultivo (Kc), dias após o plantio (DAP) nas fases de desenvolvimento do meloeiro, em três diferentes épocas de plantio.

I – Plantio em 01/07 a 06/09				
Fase ⁽¹⁾	Mês	Kc	DAP	n° de dias do mês
1	Julho	0,26	0-23	23
2	Julho	0,76	24-42	8
	Agosto			11
3	Agosto	1,20	43-60	18
4	Agosto	0,97	61-65	2
	Setembro			3
II – Plantio em 01/08 a 06/10				
1	Agosto	0,26	0-23	23
2	Agosto	0,76	24-42	8
	Setembro			11
3	Setembro	1,20	43-60	18
4	Setembro	0,97	61-65	3
	Outubro			2
III – Plantio em 01/09 a 06/11				
1	Setembro	0,26	0-23	23
2	Setembro	0,76	24-42	7
	Outubro			12
3	Outubro	1,20	43-60	18
4	Outubro	0,97	61-65	1
	Novembro			4

Fase 1- inicial; Fase 2 – crescimento vegetativo; Fase 3 – frutificação; Fase 4 – maturação.

A necessidade hídrica bruta (NHB) é calculada a partir, da NHL, considerando as perdas por escoamento superficial e percolação profunda, indiretamente mensuradas pela eficiência de irrigação.

$$NHB = \frac{NHL}{Ea} \quad (2),$$

em que Ea , é a eficiência de aplicação (adimensional); NHB, necessidade hídrica bruta (mm);

Foi considerado um valor fixo para eficiência de aplicação (Ea), de 85%, alcançável pelo sistema de irrigação por gotejamento, o qual é usualmente adotado pelos produtores de melão das regiões estudadas.

8.2. O modelo climático regionalizado Eta-CPTEC/HadCM3

Foi utilizado o modelo regionalizado Eta acoplado ao modelo global HadCM3, referido aqui como Eta-CPTEC/HadCM3, implementado no Brasil pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Esse acoplamento de modelos conhecido como redução dinâmica de escala, permite o aumento da resolução espacial das projeções e é fundamental para o fornecimento de informações adequadas para estudos de avaliação de impacto em escala regional.

O modelo regionalizado Eta-CPTEC/HadCM3 possui resolução horizontal de 40 km com 38 níveis na vertical, em períodos de tempo de 90 segundos. Para fins de mudança climática, o modelo usa uma representação fixa da concentração de CO_2 equivalente a 330 ppm – cenário de emissões de gases de efeito estufa A1B, de acordo com o Intergovernmental Panel on Climate Change (2000). Foi utilizado um conjunto de dois membros do modelo, limites inferior e superior. Para informações detalhadas sobre o Eta-CPTEC/HadCM3, consultar Chou et al., (2011) e Marengo et al., (2011).

Para a região 1, foram ainda realizadas simulações utilizando-se o modelo HadRM3P (*Hadley Regional Model 3, with Providing Regional Climates for Impacts Studies – PRECIS*) (ALVES; MARENGO, 2010), o qual foi implementado no Brasil pelo CPTEC – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. Sua dinâmica é baseada no HadAM3P, uma versão mais recente da componente atmosférica do HadCM3 (Modelo de Circulação Global) do Hadley Centre, Inglaterra. Possui resolução horizontal de 50 km com 19 níveis na vertical (da superfície até 30 km na estratosfera) e 4 níveis no solo, a especificação de 19 níveis na vertical é benéfico por utilizar o mesmo número de níveis do modelo

global. A resolução espacial é de $0,44^\circ \times 0,44^\circ$ latitude/longitude, o que corresponde a uma grade de aproximadamente 50 km. Quando a finalidade é mudança climática o modelo usa uma representação do ciclo de sulfato e de alguns aerossóis.

8.3. Projeções da necessidade hídrica bruta

O horizonte temporal considerado para avaliação dos impactos das mudanças climáticas em relação à climatologia de base do modelo (1961 a 1990) foi o período de 2025 a 2055 para o HadRM3P (ALVES; MARENGO, 2010), cenários A2 e B2 (OLIVEIRA, 2012) e 2031 a 2060, cenário A1B, para Eta-CPTEC/HadCM3 (GONDIM et al., 2013). As projeções de chuva, temperatura, ET_o e demanda hídrica foram interpoladas utilizando-se a técnica geoestatística de krigagem ordinária associada a um Sistema de Informação Geográfica para elaboração de mapas temáticos (Figura 9) (SILVA et al., 2007; DÍAZ et al., 2007).

Observa-se que para a evapotranspiração de referência é projetado um aumento entre 12,3% e 33,4% na Região 1 (Jaguaribe-CE/Apodi-RN) e de 5,9% a 7,0% na Região 2 (Petrolina-Juazeiro), conforme modelo, cenário e limites superior ou inferior do conjunto de simulações (Tabela 2). Já para precipitação na Região 1, as projeções são contraditórias: 61,9 a 89,9% pelo modelo Eta-CPTEC/HadCM3 e -30,4 a -38,5% pelo HadRM3P. Na Região 2, as projeções são de redução (-36,8 a -40,3%), pelo modelo Eta-CPTEC/HadCM3.

TABELA 2. Evapotranspiração de referência pelo método Penman-Monteith FAO (ET_o PM) e precipitação projetadas pelos modelos nas Regiões 1 e 2.

	ET_o PM (mm ano ⁻¹)			Precipitação (mm ano ⁻¹)		
	Região 1 HadRM3P	Região 1 Eta/CPTEC	Região 2 Eta/CPTEC	Região 1 HadRM3P	Região 1 Eta/CPTEC	Região 2 Eta/ CPTEC
Base-1961-1990	1.636±97	1.389 ± 315	1.609 ± 73	664±29	546±125	653±233
2025 -2055	1.844 a 1.848±73	-	-	408 a 462±30	-	-
2031-2060		1.784 a 1.853 ± 45	1.704 a 1.721±78		884 a 1.037±89,9	390 a 413±213
Mudança (%)	12,3 a 12,9	28,4 a 33,4	5,9 a 7,0	-30,4 a -38,5	61,9 a 89,9	-36,8 a -40,3

Ambos os modelos projetam aumentos de demanda de água para irrigação medida pela NHB da cultura para as duas Regiões estudadas (Tabela 2).

Os modelos HadRM3P e Eta-CPTEC/HadCM3 projetam aumento da NHB em ambas as regiões, variando de 7,5% a 13,5% e de 37,5% a 78,2%, respectivamente

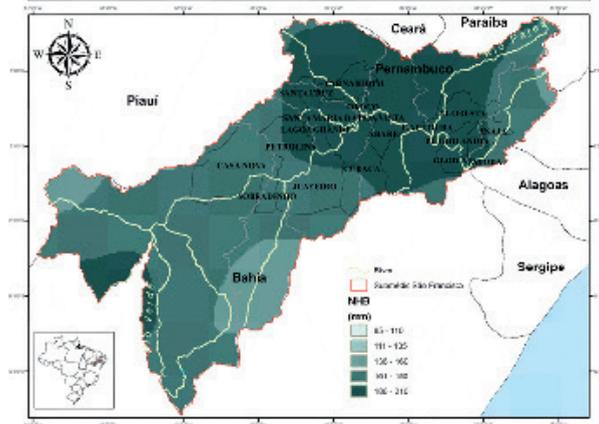
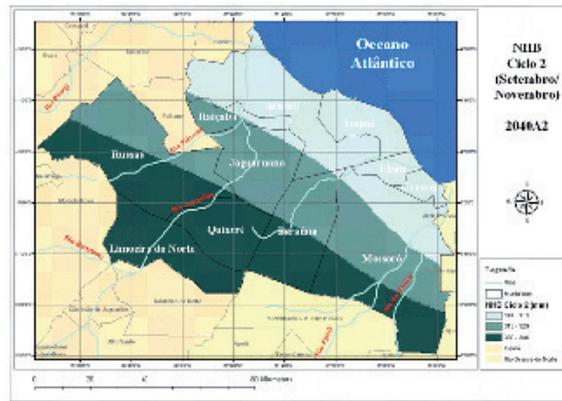
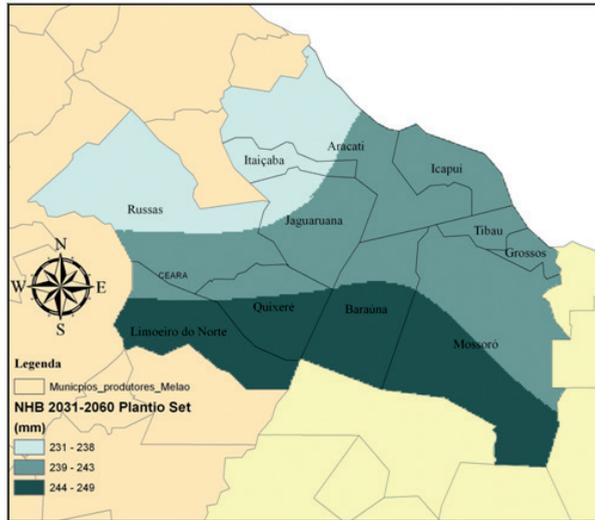


Figura 9. Projeções de necessidade hídrica bruta (mm) no ciclo de produção do meloeiro: (a) região 1, modelo Eta-CPTEC/HadCM3, período 2031-2060; (b) região 1, pelo modelo HadRM3P, período 2025-2055 e (c) região 2, modelo Eta-CPTEC/HadCM3, período 2031-2060.

(Tabela 3). É possível que esses elevados percentuais de aumento observados na demanda pelo modelo Eta-CPTEC/HadCM3 para a Região 1, sejam decorrentes de sub-estimativa na demanda para a climatologia de base (124 a 168 mm por ciclo, conforme Tabela 3). Esta ocasionada por uma sub-estimativa na evapotranspiração presente (1.389 mm, conforme Tabela 2).

Apesar dos aumentos projetados na precipitação para a Região 1, pelo modelo Eta-CPTEC/HadCM3, espera-se maiores incrementos na NHB quando comparados aos projetados pelo modelo HadRM3P. Os incrementos de precipitação coincidem com a quadra chuvosa (fevereiro a junho), o que não implica em redução na demanda de água para irrigação nas épocas de cultivo (julho a dezembro).

Para a Região 2, o modelo ETA/CPTEC projeta incrementos de 6,0% a 13,7% na demanda, valores aproximados aos projetados pelo modelo HadRM3P para a Região 1.

Tabela 3. Necessidade hídrica bruta (NHB) média projetada pelos modelos nas Regiões 1 e 2.

Período	NHB média (mm.ciclo ⁻¹)		
	Região 1 HadRM3P	Região 1 Eta/CPTEC	Região 2 Eta/CPTEC
Base (1961-1990)	260 a 308 ± 19	124 a 168 ± 37	166 a 205 ± 25
2025-2055	288 a 332 ± 13	---	---
2031-2060	---	221 a 241 ± 5	176 a 233 ± 22
Mudança (%)	7,5 a 13,5	37,5 a 78,2	6,0 a 13,7

9. Identificação de medidas adaptativas e mitigadoras e considerações finais

A adaptação aos impactos das mudanças climáticas vem recebendo progressiva atenção no desenvolvimento de políticas, como um mecanismo complementar à mitigação. A adaptação considera a habilidade de conviver ou absorver estresses ou impactos ou ainda recuperar-se deles. Pode também referir-se a ações elaboradas para se tirar vantagens das novas oportunidades que podem surgir como resultados das mudanças no clima. A fim de se estudar e se avaliar o desenvolvimento de estratégias de adaptação, deve-se conhecer o sistema para o qual estratégias de adaptação serão aplicadas (AERTS; DROOGERS, 2004).

Ainda segundo mesmos os autores, a adaptação pode ocorrer de uma forma reativa ou antecipativa (adaptação preventiva). A maioria das adaptações são modificações nas práticas existentes e nos processos de tomada de decisão já existentes na agricultura e no setor de recursos hídricos. Há diversas medidas

possíveis de adaptação que formam a base para o desenvolvimento de estratégias adaptativas (AERTS; DROOGERS, 2004).

Para a Região 1 as mudanças climáticas, conforme os modelos e cenários aplicados, projetam aumentos na demanda de água de irrigação para a cultura do meloeiro, em todas as datas de plantio analisadas, mesmo quando projetando-se aumentos na precipitação anual, os quais concentra-se nos meses tradicionalmente chuvosos, não contribuindo para a redução o déficit hídrico da estação seca.

Temperaturas mais elevadas resultam em elevação na evapotranspiração de referência e conseqüentemente no aumento na demanda de água para irrigação.

Projeta-se que o plantio em julho resulta em menor demanda de água, quando comparado aos plantios de agosto e setembro.

Pelo modelo HadRM3P, são projetados aumentos na temperatura e evapotranspiração de referência e redução na precipitação e também aumentos na demanda hídrica para irrigação da cultura do melão.

Para a Região 2, temperaturas mais elevadas resultam em elevação na evapotranspiração de referência esses efeitos, semelhantemente ao que ocorre na Região 1, implicam no aumento na demanda de água para irrigação, pressionado por reduções futuras na precipitação.

Uma importante medida mitigadora dos efeitos negativos das mudanças climáticas para a cultura do meloeiro irrigado no Nordeste do Brasil é o aumento na eficiência no uso da água, através das seguintes medidas e estratégias:

- adotar preferencialmente a irrigação por gotejamento, bem como avaliar a uniformidade de aplicação da água periodicamente, realizando a manutenção preventiva do sistema para alcance de uma alta uniformidade de distribuição;
- viabilizar a definição pela pesquisa, dos coeficientes de cultivo do meloeiro para diferentes híbridos e sistemas de produção adotados (uso do *mulch* plástico, agrotêxtil ou plantio direto);
- viabilizar o desenvolvimento e adoção pelos produtores, de aplicativos para controle racional da irrigação, baseando-se na evapotranspiração de referência pelo método FAO Penman-Monteith, e nos coeficientes de cultivo da cultura para diferentes híbridos do meloeiro e sistemas de produção adotados.
- na região do Jaguaribe-Apodi (Região 1), onde se irriga com água subterrânea, realizar estudos hidrogeológicos, a fim de permitir a gestão dos recursos hídricos demandados, considerando sua capacidade de recarga.

10. Referências

AERTS, J. C. J. H.; DROOGERS, P. Adaptation for regional water management In: AERTS, J. C. J. H.; DROOGERS, P. (Ed.). **Climate change in contrasting river basins: adaptation strategies for water, food and environment**. Wallingford: CABI, 2004. p. 1-24.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).

ALVES, L. M.; MARENGO, J. A. Assessment of regional seasonal predictability using the PRECIS regional climate modeling system over South America. **Theoretical and Applied Climatology**, Wien, v. 100, n. 3-4, p. 337-350, May 2010.

BINDER, L.C.W. Climate change and watershed planning in Washington state. **Journal of the American Water Resources Association**, Herndon, v. 42, n. 4, p. 915-926, 2006.

CARTER, T. R.; ALFSEN, K.; BARROW, E.; BASS, B.; DAI, X. DESANKER, P.; GAFFIN, S. R.; GIORGI, F.; HULME, M.; LAL, M.; MATA, L. J.; MEARNNS, L. O.; MITCHEL, J. F. B.; MORITA, T.; MOSS, R.; MURDIYARSO, D.; PABON-CAICEDO, J. D.; PALUTIKOF, J. PARRY, M. L.; ROSENZWEIG, C.; SEGUIN, B.; SCHOLLES, R. J.; WHETTTON, P. H. General guidelines on the use of scenario data for climate impact and adaptation assessment - Task group on data and scenario support for impact and climate assesement (TGICA) Geneve: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007. 66 p.

CHOU, S. C.; MARENGO, J. A.; LYRA, A.; SUEIRO, G.; PESQUERO, J.; ALVES, L. M.; KAY, G.; BETTS, R.; CHAGAS, D.; GOMES, J. L.; BUSTAMANTE, J.; TAVARES, P. Downscaling of South America present climate driven by 4-member HadCM3 runs. **Climate Dynamics**, Berlin, v. 38, n. 3-4, p. 1-19, Feb. 2012.

DÍAZ, J. A. R.; WEATHERHEAD, E. K.; KNOX, J. W.; CAMACHO, E. Climate change impacts on irrigation water requirements in the Guadalquivir river basin in Spain. **Regional Environmental Change**, New York, v. 7, n. 3, p. 149-159, 2007.

DIBIKE, Y. B.; COULIBALY, P. Downscaling climate model outputs to study the hydrologic impact of climate change – Part I – calibration and validation of downscaling models. In: LIONG, S. Y.; PHOON, K. K.; BABOVIC, V. (Ed.). **Proceedings of the 6th International Conference on Hydroinformatics, Singapore 2004**. Singapore: World Scientific Publishing Company, 2004a. p. 1441-1448.

DIBIKE, Y. B.; COULIBALY, P. Downscaling climate model outputs to study the hydrologic impact of climate change – Part II– Scenario Simulation and Hydrologic Modeling. In: LIONG, S. Y.; PHOON, K. K.; BABOVIC, V. (Ed.). **Proceedings of the 6th International Conference on Hydroinformatics, Singapore 2004**. Singapore: World Scientific Publishing Company, 2004b. p. 1449-1456.

DIBIKE, Y. B.; COULIBALY, P. Hydrologic impact of climate change in the Saguenay watershed: comparison of downscaling methods and hydrologic models. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 307, n. 1-4, p. 145–163, June 2005.

DIGGLE, P. J.; RIBEIRO JUNIOR, P. J.; CHRISTENSEN, O. F. An introduction to model-based geostatistics. In: MOLLER, J. (Ed.). **Spatial statistics and computational methods**. New York: Springer, 2003. p. 43-86. (Lecture Notes in Statistics, 173).

EHRET, U.; ZEHE, E.; WULFMEYER, V.; WARRACH-SAGI, K., LIEBERT, J. HESS Opinions “Should we apply bias correction to global and regional climate model data?”. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 16, p. 3391-3404, 2012.

GONDIM, R. S.; MAIA, A. de H. N.; EVANGELISTA, S. R. M.; BASSOI, L. H. B.; DUARTE, A. de S.; PACHECO, A. N. P. **Projeções de demanda hídrica para irrigação do meloeiro no Submédio São Francisco sob cenários de mudanças climáticas**. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2013. 29 p. (Embrapa Agroindústria Tropical. Boletim de Pesquisa, 74).

IBGE. **Sistema IBGE de recuperação automática – Sidra**. Disponível em: <www.sidra.ibge.gov.br> Acesso em 28 de out. 2013.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Emissions Scenarios**. New York: Cambridge University Press, 2000. 570 p. Editado por

N. Nakicenovic, R. Swart. Disponível em <<http://www.ipcc.ch/ipccreports/sres/emission/index.htm>> Acesso em: 03.jan.2007.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Summary for Policymakers. In: **Climate change 2013: the physical science basis**. Working group I contribution to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. Editado por Thomas F. Stocker, Dahe Qin, Gian-Kasper Plattener, Melinda M. B. Tignor, Simon k. Allen, Judith Boschung, Alexander Nauels, Yu Xia, Vincent Bex, Pauline M. Midgley. em:<http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_SPM_FINAL.pdf>. Acesso em: 14 nov. 2014.

JABLOUN, M.; SAHLI, A. Evaluation of FAO-56 methodology for estimating reference evapotranspiration using limited climatic data: application to Tunisia. **Agricultural Water Management**,Amsterdam, v. 95, n. 6, p. 707-715, June 2008.

JONES, R. G.; NOGUER, M.; HASSELL, D. C.; HUDSON, D.; WILSON, S.S.; JENKINS, G. J; MITCHELL, J. F. B. **Generating high resolution climate change change scenarios using PRECIS**. Exeter: Met Office Hadley Centre, 2004. Disponível em: http://www.metoffice.gov.uk/media/pdf/6/5/PRECIS_Handbook.pdf

LUIZ, A. J. B.; MAIA, A. de H. N.; GONDIM, R. S. Precipitação na região produtora de melão no NE brasileiro: avaliação da qualidade de conjuntos de dados globais por meio de regressão espacial. In: REUNIÃO ANUAL DA REGIÃO BRASILEIRA DA SOCIEDADE INTERNACIONAL DE BIOMETRIA, 58.; SIMPÓSIO DE ESTATÍSTICA APLICADA À EXPERIMENTAÇÃO AGRONÔMICA, 15., 2013, Campina Grande. Modelagem Estatística em áreas multidisciplinares: Impactos causados pelas mudanças climáticas na Região Nordeste. [**Anais...**] Campina Grande: Sociedade Internacional de Biometria, 2013. 7 p.

MAIA, A. de H. N.; HAMADA, E. Exploring spatial patterns of GCM projection bias via model based geostatistics. In: REUNIÃO ANUAL DA REGIÃO BRASILEIRA DA SOCIEDADE INTERNACIONAL DE BIOMETRIA, 58.; SIMPÓSIO DE ESTATÍSTICA APLICADA À EXPERIMENTAÇÃO AGRONÔMICA, 15., 2013, Campina Grande. Modelagem Estatística em áreas multidisciplinares: Impactos causados pelas mudanças climáticas na Região Nordeste. [**Anais...**] Campina Grande: Sociedade Internacional de Biometria, 2013. 5 p.

MARENGO ORSINI, J. A.; NICHOLLS, N.; PENNER, J. E.; STOTT, P. A. Understanding and Attributing Climate Change. In: INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2007: the physical science basis. contribution of working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** New York: Cambridge University Press, 2007. p. 663 – 745. Editado por M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden, C. E. Hanson.

MARENGO, J. A.; CHOU, S. C.; KAY, G.; ALVES, L.M.; PESQUERO, J.F.; SOARES, W. R.; SANTOS, D.C.; LYRA, A.; SUEIRO, G.; BETTS, R.; CHAGAS, D.; GOMES, J. L.; BUSTAMANTE, J.; TAVARES, P. Development of regional future climate change scenarios in South America using the Eta CPTEC/HadCM3 climate change projections: climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Paraná River basins. **Climate Dynamics**, Berlin, v.35, n. 6, p. 1073-1097, 2011.

MIRANDA, F. R.; SOUZA, F.; RIBEIRO, S. C. F. Estimativa da evapotranspiração e do coeficiente de cultivo para a cultura do melão plantado na região litorânea do Ceará. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 18, n. 1, p. 63-70, 1999.

MITCHELL, T. D.; JONES, P. D. An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. **International Journal of Climatology**, Chichester, v. 25, p. 693-712, 2005.

OLIVEIRA, K. M. L. de. **Impactos das mudanças climáticas na demanda de água para irrigação do meloeiro (*cucumis melo* l.) utilizando modelo regionalizado integrado a um sistema de informações geográficas.** 2012. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, 2012.

PIANI, C.; HAERTER, J. O. Two dimensional bias correction of temperature and precipitation copulas in climate models. **Geophysical Research Letters**, Washington, v. 39, n. 20, 2012.

POPOVA, Z.; KERCHEVA, M.; PEREIRA, L. S. Validation of the FAO methodology for computing ETo with limited data. Application to South Bulgaria. **Irrigation and Drainage**, Slough, v. 55, n. 2, p. 201-215, 2006.

RANDALL, D. A.; WOOD, R. A.; BONY,S.; COLMAN, R.; FICHEFET, T.; FYFE, J.; KATTSOV, V.; PITMAN, A.; SHUKLA, J.; SRINIVASAN, J.; STOUFFER, R. J.; SUMI A.; TAYLOR. K. E. Climate models and their evaluation. In: INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2007: the physical science basis contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.** New York: Cambridge University Press, 2007. p. 589-622. Editado por M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden, C. E. Hanson.

ROCHA, E. da J. T.; EVANGELISTA, S. R. M.; FUCK JUNIOR, S. C. de F.; GONDIM, R. S. Estimativa da ET_0 pelo modelo Penman-Monteith FAO com dados mínimos integrada a um Sistema de Informação Geográfica. **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, n. 1, p.75-83, 2011.

SENTELHAS, P. C.; GILLESPIE, T. J.; SANTOS, E. A. Evaluation of FAO Penman-Monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration with missing data in Southern Ontario, Canada. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 97, n. 5, p. 635-644, 2010.

SILVA, C. S. de; WEATHERHEAD, E. K.; KNOX, J. W.; RODRIGUEZ-DIAZ, J. A. Predicting the impacts of climate change – A case study of paddy irrigation water requirements in Sri Lanka. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 93, n. 1-2, p. 19-29, 2007.

Efeitos das mudanças climáticas esperadas para o Brasil sobre a produção e doenças de hortaliças

Raquel Ghini

Michelli de Souza dos Santos

Emília Hamada

1. Introdução

De acordo com o Quinto Relatório do Intergovernmental Panel on Climate Change (2013), o aquecimento do planeta é inequívoco e, desde a década de 1950, muitas das mudanças observadas são sem precedentes. A atmosfera e o oceano estão se aquecendo, as quantidades de neve e gelo têm diminuído, o nível do mar subiu e as concentrações de gases de efeito estufa aumentaram. Cada uma das três últimas décadas tem sido sucessivamente mais quente na superfície da Terra do que qualquer década anterior desde 1850. No Hemisfério Norte, 1983-2012 foi provavelmente a normal climatológica mais quente dos últimos 1400 anos. Mudanças na ocorrência de eventos extremos foram observados desde a década de 1950. Além disso, o número de dias e noites frias diminuiu e de dias e noites quentes aumentou em escala global. As concentrações atmosféricas de dióxido de carbono (CO₂), metano e óxido nitroso aumentaram para níveis sem precedentes, pelo menos nos últimos 800 mil anos. Todas essas alterações registradas devem continuar ocorrendo, segundo o Intergovernmental Panel on Climate Change (2013), já que a limitação das alterações climáticas vai exigir reduções substanciais e sustentadas de emissões de gases de efeito estufa.

A produção de hortaliças, assim como outros setores da agricultura, é afetada diretamente pelas mudanças climáticas e pela ocorrência de problemas fitossanitários. Por sua vez, os fatores climáticos, por exemplo, temperatura, regime de precipitação, vento, radiação solar e concentração de CO₂, alteram as interações patógeno-hospedeiro e, como consequência, interferem no ciclo das doenças.

O ambiente pode alterar o crescimento e a suscetibilidade do hospedeiro, as etapas de infecção do patógeno, como a multiplicação, a disseminação, a sobrevivência,

além da interação da planta hospedeira e o patógeno. As mudanças climáticas representam uma grave ameaça à agricultura, devido às prováveis modificações que podem provocar na incidência e severidade de doenças de plantas (JUROSEK; von TIEDEMANN, 2013).

Embora os estudos com mudanças climáticas e doenças de plantas ainda sejam poucos, o interesse pelo assunto vem aumentando nos últimos anos (CHAKRABORTY, 2013). Com relação às hortaliças, apesar da importância dessas culturas e da sensibilidade às variáveis ambientais, os estudos ainda são escassos. Dessa forma, o objetivo deste capítulo é discutir o conhecimento atual sobre os efeitos das mudanças climáticas esperadas para o Brasil sobre a produção e as doenças de hortaliças.

2. Efeitos sobre a produção de hortaliças

A produção agrícola, incluindo de hortaliças, pode apresentar grande variabilidade em função das condições meteorológicas a que a cultura está sujeita durante o seu ciclo de cultivo, influenciando no seu crescimento, desenvolvimento e produtividade. Além disso, esse processo complexo de interação entre os elementos meteorológicos e a cultura resulta em uma variedade de reações biológicas e de condições ambientais em constante mudança (SENTELHAS; MONTEIRO, 2009).

Com base nas projeções das mudanças do clima, no Brasil são esperadas alterações profundas e variáveis no clima conforme a região do país e ao longo dos meses do ano (HAMADA et al., 2011) e considerando a dependência das culturas às condições climáticas, é provável que o cenário de produção de hortaliças seja modificado como efeito das mudanças climáticas. Essa modificação, no entanto, deverá ocorrer de forma diferenciada, pois cada cultura possui particularmente diferentes níveis de requerimentos das condições do ambiente físico visando expressar seu potencial produtivo, demandando, desta forma, estudos específicos para as diferentes culturas. A seguir, são apresentados estudos indicando os requerimentos climáticos de algumas culturas e os efeitos das mudanças do clima esperados para o Brasil sobre a produção de hortaliças.

A alface é uma planta típica de clima ameno, cuja temperatura ótima para a germinação das sementes ocorre ao redor de 20 °C e dias longos associados às temperaturas superiores a 22 °C aceleram o desenvolvimento vegetativo antecipando a fase reprodutiva nas cultivares selecionadas sob clima ameno; mas, com o melhoramento genético realizado nos trópicos, principalmente por pesquisadores brasileiros, algumas cultivares do grupo das lisas suportam temperaturas ao redor de 28 °C sem que ocorra o florescimento prematuro, o mesmo ocorrendo para

algumas do tipo crespa e americana sob temperatura ao redor de 26 °C (KOBORI et al., 2011). Esses autores, avaliando o cenário climático obtido pela média de 15 modelos climáticos globais do Quarto Relatório (Fourth Assessment Report, AR4) do Intergovernmental Panel on Climate Change (2007) para o período de 2071-2100, concluíram que, com o aumento da temperatura, projeta-se um futuro obscuro para a cultura da alface no Brasil, tendo somente as regiões Sul e Sudeste com condições de cultivo, mas com elevação do custo de produção com os danos fisiológicos previstos. Um grande esforço no programa de melhoramento genético para adaptar cultivares e a adoção de novas tecnologias, como o cultivo em hidroponia e suplementação com irrigações, são estratégias sugeridas a fim de tornar viável a produção da alface no território brasileiro nesse cenário de mudança do clima.

A batata requer climas amenos para que ocorra tuberação abundante que garanta boa produtividade aliada à qualidade de tubérculos (LOPES et al., 2008). Segundo Heldwein et al. (2009), a disponibilidade hídrica e a temperatura são fatores importantes para o crescimento e o desenvolvimento das plantas; a disponibilidade de radiação solar é para a produção dos assimilados necessários para sustentar o crescimento da parte aérea e dos tubérculos; e o fotoperíodo crítico para o início da tuberação. Lopes et al. (2011) realizaram análise prospectiva da produção de batata no Brasil, tomando como base o aumento da temperatura de até 5 °C até o final deste século e uma faixa ótima de produtividade da batata de 10 °C e 25 °C, em seis municípios de seis estados representando as regiões geográficas onde se cultiva a batata. Esses autores concluíram que, para municípios com prevalência de temperaturas mais baixas, o aumento de temperatura preconizado não deverá restringir a produção, porém serão necessárias adequações de épocas de plantio; já em regiões e épocas de cultivo sujeitas a temperaturas altas, o cultivo deverá se restringir a poucos meses do ano, contrastando com o plantio contínuo, durante o ano todo, realizado atualmente. O melhoramento genético também é considerado como estratégia para atenuar, pelo menos em parte, o panorama previsto com as mudanças do clima.

As Brassicaceae constituem uma família de plantas consideradas pouco plásticas com relação à exigência ambiental, sendo que grande parte das cultivares de brócolis, couve-flor e repolho exige temperaturas amenas para um adequado desenvolvimento (BRUNELLI et al., 2011). Segundo esses autores, as cultivares de couve-flor possuem exigências termoclimáticas muito específicas, divididas em três grupos: precoce ou de verão, de meia estação e de inverno, sendo que as cultivares de verão são indicadas para regiões e/ou períodos do ano com temperaturas médias em torno de 23 °C a 28 °C; as de meia estação possuem temperaturas adequadas para uma boa produção entre 20 °C e 25 °C; e as de inverno são, em geral, mais tardias e exigem temperaturas baixas, entre 15 °C e 12 °C para uma

adequada formação de cabeça. Como acontece com a couve-flor, o brócolis do tipo cabeça única tem exigências térmicas específicas em regiões e épocas do ano onde as temperaturas médias não passam de 18 °C ou em áreas de latitude acima de 24°S e altitude superiores a 1.100 m; já o brócolis do tipo ramoso suporta temperaturas mais altas, ao redor de 28 °C. As cultivares de repolho, em geral, possuem melhor desenvolvimento vegetativo entre 15 °C e 20 °C, porém aquelas adaptadas a climas tropicais se desenvolvem adequadamente em temperaturas próximas a 26 °C e 28 °C. No cenário previsto para 2071-2100 pelo IPCC-AR4, em função do aumento de temperatura projetado para o Brasil, essas culturas deverão sofrer sérios prejuízos fisiológicos (BRUNELLI et al., 2011), pois mesmo considerando a composição genética utilizada pelos programas de melhoramento genético de muitas das cultivares hoje comercializadas no país, as condições ambientais previstas suplantarão, em determinados períodos do ano e para algumas regiões as temperaturas máximas suportadas atualmente por essas espécies, sendo que os cultivos, em muitos casos, se tornarão viáveis economicamente se novas fontes de resistência a elevadas temperaturas forem utilizadas nas novas cultivares.

Para a cebola, ainda que a duração do dia seja o fator principal para a indução, formação e maturação de bulbo, seus efeitos são modificados por outros fatores, especialmente pela temperatura, sendo de 20 °C a 25 °C a faixa ótima para o crescimento foliar (OLIVEIRA et al., 2009). Ao se avaliarem as alterações ambientais projetadas para o período de 2071-2100 pelo IPCC-AR4, Gioria et al. (2011) verificaram que duas variáveis, a temperatura e a precipitação pluvial, apresentaram alterações consideráveis para o Brasil e, portanto, consideraram-nas como fatores determinantes para avaliar o impacto das mudanças climáticas e concluíram que a interação de ambas as variáveis será, provavelmente, a maior responsável pelas mudanças nas áreas de produção, época de plantio, tecnologia de produção e na escolha de cultivares melhor adaptadas às condições de cultivo, com modificações conforme a região do país e época do ano.

No crescimento e desenvolvimento do tomateiro, as temperaturas ótimas são de 15 °C a 25 °C para germinação; 20 °C a 25 °C para formação de mudas; 18 °C a 24 °C para o florescimento; 14 °C a 17 °C durante a noite e 19 °C a 24 °C durante o dia para o pegamento de frutos; e 20 °C a 24 °C para síntese de licopeno responsável pela coloração vermelha do fruto (GIORIA et al., 2008). Ao avaliarem os efeitos das mudanças climáticas, esses autores observaram que a temperatura provavelmente será a maior responsável pela mudança nas áreas de produção no futuro, visto que tem grande influência sobre a cultura do tomate; além disso, concluíram que o surgimento de híbridos ou variedades com maior tolerância a altas temperaturas poderá permitir ou mesmo viabilizar o plantio em regiões inóspitas à tomaticultura.

O aumento da concentração de CO₂ atmosférico deve resultar em benefícios para o desenvolvimento das plantas, embora possam existir diferenças entre espécies. Em ambiente protegido, a aplicação do gás como técnica de manejo resulta em aumento de produção, como foi observado por diversos autores. Jwa e Walling (2001) citam o exemplo de tomateiros, cultivados em túneis plásticos com elevadas concentrações de CO₂, que apresentaram um aumento de produção de 32% e de 65% a 77% no diâmetro dos frutos, devido à redução da taxa de transpiração e ao aumento da taxa de fotossíntese. No Brasil, Furlan et al. (2002) e Rezende et al. (2003) verificaram que, com a aplicação de CO₂ em ambiente protegido, também houve aumento da produção de frutos de pimentão.

O método mais adequado para estudos dos efeitos do aumento da concentração de CO₂ atmosférico é utilizando experimentos do tipo FACE (Free Air Carbon Dioxide Enrichment). Nesses experimentos, o gás é liberado em condições de campo, no agroecossistema intacto, sem a interferência de artefatos de experimentação. Assim, os resultados são mais realísticos do que os obtidos em condições de ambiente controlado (LONG et al., 2004). Um dos primeiros FACES construídos foi com a cultura da batata, na Itália, em 1995, por Miglietta et al. (1998). Anéis com 8 m de diâmetro, instalados em um cultivo de batata, receberam aplicação de CO₂ nas concentrações de 460, 560, 660 ppm e ambiente. Nas altas concentrações do gás, o florescimento das plantas foi antecipado, houve aumento da taxa de fotossíntese e assimilação de carbono e estímulo na produção de tubérculos, porém o desenvolvimento das plantas não foi afetado.

Estudos realizados em condições de estufa e câmara de topo aberto (OTC) para avaliar o efeito do aumento da concentração de CO₂ sobre a mandioca apresentaram resultados ambíguos. Gleadow et al. (2009) observaram redução da produção de tubérculos em ensaios conduzidos em vasos. Rosenthal et al. (2012), para solucionar a questão, cultivaram plantas de mandioca em experimento FACE e, depois de três meses e meio de crescimento em altas concentrações de CO₂, verificaram que a biomassa da parte aérea aumentou 30% e a massa seca das raízes aumentou mais de 100%. Os autores concluíram que estes resultados estão de acordo com as explicações teóricas sobre os efeitos do CO₂.

Para a cultura da batata, Fagundes et al. (2010) realizaram uma revisão bibliográfica sobre os efeitos das mudanças climáticas e verificaram que o aumento do CO₂, seguido de aumento na temperatura do ar, de maneira geral, resultará em menor crescimento, redução na duração do ciclo de desenvolvimento, menor produtividade e aumento da incidência de doenças. Como estratégia para minimizar esses efeitos, os autores sugerem que sejam desenvolvidas cultivares tolerantes a altas temperaturas, adaptadas as épocas de plantio em cada local, alteradas as práticas de manejo da cultura e até expandidas as áreas de cultivo para regiões mais frias.

3. Efeitos sobre os fitopatógenos

Os microrganismos fitopatogênicos estão entre os primeiros organismos a evidenciar os efeitos das mudanças climáticas devido às numerosas populações, facilidade de multiplicação e dispersão e o curto tempo entre gerações. Assim, constituem um excelente grupo de indicadores das alterações. Além da importância desses microrganismos como agentes causadores de doenças de plantas, comprometendo a segurança alimentar e a produção de fibras, biocombustíveis e outros produtos, os fitopatógenos podem alterar a estrutura, composição e evolução das comunidades vegetais que fornecem serviços ecossistêmicos e “feedback” para o clima global. A participação desses microrganismos nesses processos pode ser positiva ou negativa. Os patógenos estão envolvidos inclusive na emissão de gases de efeito estufa pela agricultura, visto que o manejo adequado de controle evita perdas e a decomposição de material vegetal (CARLTON et al., 2012).

Os impactos diretos das mudanças climáticas sobre fitopatógenos foram pouco estudados e os resultados obtidos, de modo geral, são inconsistentes e específicos (CHAKRABORTY, 2013). A seleção de linhagens mais adaptadas às novas condições climáticas e a mudança na distribuição geográfica serão as principais implicações para patógenos. Novas raças, por exemplo, podem evoluir rapidamente com o aumento da temperatura e concentração atmosférica de CO₂.

As dificuldades no estudo dos efeitos diretos das mudanças climáticas sobre fitopatógenos decorrem do fato de vários fatores interferirem na evolução desses microrganismos. Alterações no manejo e cultivares com diferentes características, entre outros, afetam a seleção de linhagens mais adaptadas às novas condições. A atividade humana está intensificando a dispersão de fitopatógenos, modificando os ambientes naturais e criando, dessa forma, outras oportunidades para a evolução, o que pode colocar em risco o funcionamento dos sistemas (FISHER et al., 2012). Mas, as mudanças climáticas permitem o estabelecimento de patógenos em regiões até então inóspitas. As interações entre as mudanças climáticas, as culturas e doenças são complexas e a dimensão em que as pragas e os patógenos têm alterado suas faixas latitudinais em resposta ao aquecimento global é em grande parte desconhecida, segundo Bebbert et al. (2013). Os autores demonstraram uma mudança média em direção aos polos de $2,07 \pm 0,08$ km/ano, desde 1960, em observações de centenas de pragas e patógenos, porém com uma variação significativa nas tendências entre os grupos taxonômicos. Com esses resultados, os autores concluíram que as tendências latitudinais positivas observadas em muitos táxons suportam a hipótese de que as mudanças climáticas dirigem o movimento de pragas e patógenos. Canto et al. (2009) ilustram essa hipótese com viroses emergentes de hortaliças (tomate e pepino), no sul

da Península Ibérica, onde a população dos vetores sofreu alteração na distribuição geográfica, expandindo para áreas anteriormente não favoráveis.

Para estudar a evolução de fitopatógenos em condições de aumento da concentração de CO₂ atmosférico, Chakraborty e Datta (2003) realizaram mais de 25 ciclos de inoculações sucessivas de dois isolados de *Colletotrichum gloeosporioides* em duas cultivares de *Stylosanthes scabra*, em ambiente com concentração atual e duas vezes a ambiente de CO₂ em condições controladas. O aumento da concentração do gás resultou em aumento da agressividade e fecundidade do patógeno, causador da antracnose, demonstrando que o tratamento selecionou linhagens mais adaptadas à nova condição ambiental.

Carter et al. (1996) simularam mudanças climáticas na Finlândia e concluíram que, com o aumento da temperatura e da concentração de CO₂, o cultivo de batata será beneficiado, com um aumento estimado de 20% a 30% na produtividade. Porém, também está prevista nova distribuição de nematoides fitopatogênicos, expandindo-se para o norte do país, e com maior número de gerações ao ano. Nessa situação, o risco de requeima da batata (*Phytophthora infestans*) é significativamente maior em todas as regiões da Finlândia. Posteriormente, Hannukkala et al. (2007) associaram epidemias da requeima da batata com as mudanças climáticas utilizando dados de 69 anos de incidência da doença na Finlândia. O clima se tornou mais favorável à doença no final da década de 90, resultando em um aumento da venda de fungicidas de aproximadamente quatro vezes, de 1980 a 2002. Os autores concluíram que uma das causas é o fato da epidemia da doença estar iniciando, em média, quinze dias antes do período que ocorria anteriormente. Hannukkala e Segerstedt (2007) organizaram evento onde foram discutidas as relações entre os fitopatógenos da cultura da batata e suas relações com as mudanças climáticas. Uma das conclusões com relação à requeima da batata foi que o aumento da agressividade das linhagens está mais relacionada com as cultivares predominantes do que com as mudanças climáticas.

4. Efeitos sobre doenças de hortaliças

As mudanças nas variáveis do ambiente devem causar impactos sobre as doenças das hortaliças. Essas culturas são muito sensíveis às alterações de temperatura e precipitação, podendo, em condições desfavoráveis, se tornar predispostas ao ataque de fitopatógenos. A evolução desse parasitismo fez com que, de modo geral, as condições que favorecem as plantas também favoreçam os patógenos, assim a nova distribuição geográfica resultante das mudanças climáticas deverá mostrar uma tendência semelhante para os dois grupos de organismos.

No Brasil, diversas doenças de hortaliças são favorecidas por temperaturas em torno de 21 °C a 25 °C. Assim, em regiões onde a temperatura for superior a esse intervalo, a mancha-de-septoria do tomateiro, por exemplo, deve ter sua importância reduzida devido ao aumento da temperatura (Tabela 1). Outras doenças frequentes em hortaliças, como os mosaicos, podridões, oídios, murchas-bacterianas, rizoctonioses e fusarioses, devem ser favorecidas pelas mudanças no clima, principalmente pelo aumento de temperatura que tornará as atuais regiões produtoras mais favoráveis ao desenvolvimento dessas doenças, ressaltando que podem haver diferenças inter e intraespecíficas em diferentes patossistemas. Outro fator importante é a redução do ciclo de chuvas que pode diminuir a disseminação de alguns fitopatógenos importantes, como os causadores de míldios, cujos esporos são carregados pela água e pelo ar; outro fungo importante, *Colletotrichum* sp., agente causal de antracnoses em muitas hortaliças, também deve ter uma menor disseminação devido à redução da precipitação.

No levantamento de discussões sobre os impactos das mudanças climáticas em doenças de hortaliças no Brasil (Tabela 1), das 109 doenças analisadas, 66 doenças apresentam tendência de aumento de importância. Para a alface, por exemplo, seis das principais doenças – cercosporiose, tombamento, podridão-de-esclerotínia, podridão-da-saia, mancha-bacteriana e o vírus-do-mosaico – devem ter aumento de severidade, enquanto duas – o míldio e a septoriose – devem ter diminuição. De modo geral, os autores analisaram somente os impactos de alterações de temperatura e precipitação. Não foram encontrados trabalhos com resultados no Brasil a respeito do aumento da concentração de CO₂ da atmosfera, apesar da importância desse fator e da possibilidade de compensação dos efeitos das outras variáveis do ambiente.

A primeira revisão de literatura a respeito dos efeitos do aumento da concentração de CO₂ do ar sobre doenças de plantas, Manning e Tiedemann (1995) verificaram que, dos nove relatos encontrados com fungos fitopatogênicos necrotróficos, em quatro ocorreu aumento da doença com o aumento da concentração de CO₂ (*Fusarium nivale*, em centeio, *Fusarium oxysporum* f. sp. *cyclaminis*, em ciclame, *Fusarium* sp., em trigo, e *Cladosporium fulvum*, em tomate); em quatro, a doença não foi afetada (*Pythium splendens* e *Thielaviopsis basicola*, em *Poinsettia*, *Botrytis cinerea*, em ciclame, e *Sclerotinia minor*, em alface) e, em um, houve redução (*Rhizoctonia solani*, em beterraba açucareira). Para fungos biotróficos, dos sete trabalhos publicados, em seis foi relatado o aumento da doença (*Ustilago hordei*, em cevada, *Ustilago maydis*, em milho, *Puccinia* spp., em cereais), e redução, em apenas um (*Sphaerotheca pannosa*, em roseiras). Jwa e Walling (2001) realizaram estudos sobre os efeitos do aumento da concentração de CO₂ no desenvolvimento da podridão de raízes, causada por *Phytophthora parasitica*,

em tomateiros. Os autores verificaram que o aumento do teor de CO₂ não afetou o crescimento micelial do patógeno *in vitro*, porém, reduziu a doença e estimulou o crescimento das plantas.

Para os efeitos do UV-B sobre a ocorrência e a severidade de doenças, Manning e Tiedemann (1995) verificaram que, de treze doenças causadas por patógenos necrotróficos, nove tiveram aumentada a sua incidência (*Botrytis cinerea*, em pepino e tomate; *Sclerotinia sclerotiorum*, em berinjela e pepino; *Alternaria dauci*, *Alternaria porri*, *Alternaria solani* e *Botrytis squamosa*, em hortaliças em estufa; *Colletotrichum lagenarium* e *Cladosporium cucumerinum*, em pepino, e *Cercospora beticola*, em beterraba); duas não foram afetadas (*Cladosporium* sp. e *Alternaria* sp., em tomate) e duas tiveram redução (*Colletotrichum lagenarium*, em pepino, e *Diplocarpon rosae*, em rosas). Das quatro doenças causadas por patógenos biotróficos, três tiveram a incidência reduzida (*Puccinia coronata*, em aveia, *Uromyces phaseoli*, em feijoeiro e *Erysiphe graminis*, em trigo) e uma aumentada (*Puccinia recondita* f. sp. *tritici*, em trigo). Porém, os autores argumentam que um problema na comparação dos resultados dos testes é o fato de terem sido utilizados diferentes métodos de exposição, intensidade e qualidade de luz, o que produziu resultados contraditórios como, por exemplo, com *Colletotrichum lagenarium*, em pepino.

Tabela 1. Efeito das mudanças climáticas na severidade/incidência de algumas doenças de hortaliças.

Cultura	Patógeno	Doença	Tendência	Referência
Alface	<i>Pythium</i> spp.	Tombamento de plantas	Aumento	Kobori et al. (2011)
	<i>Sclerotium rolfsii</i>	Murcha de esclerócio		
	<i>Rhizoctonia solani</i>	Queima da saia		
	<i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>lactucae</i>	Fusariose		
	<i>Thielaviopsis basicola</i>	Podridão negra das raízes		
	<i>Cercospora longissima</i>	Mancha de cercospora		
	<i>Erysiphe cichoracearum</i>	Oídio		
	Tomato spotted wilt virus (TSWV), Tomato chlorotic spot virus (TCSV) e Groundnut ring spot virus (GRSV)	Víra-cabeça		
	<i>Pectobacterium carotinarum</i>	Podridão-mole		
	<i>Septoria lactuca</i>	Septoriose		
	<i>Bremia lactuca</i>	Míldio		
	<i>Sclerotinia sclerotiorum</i> e <i>Sclerotinia minor</i>	Mofo-branco		
	<i>Pseudomonas cichorii</i> , <i>Xanthomonas axonopodis</i> pv. <i>vitiata</i>	Mancha-bacteriana		
	<i>Mirafiori lettuce virus</i> (MfLV) e <i>Lettuce big vein virus</i> (LBVV)	Big Vein		
	<i>Lettuce mosaic virus</i> (LMV) e <i>Lettuce motile virus</i> (LeMoV)	Mosaico da alface		

Continua.

Tabela 1. Continuação.

Batata	<i>Clavibacter michiganensis</i> subsp. <i>sepedonicus</i>	Podridão-anelar	Lopes et al. (2008)
	<i>Pectobacterium</i> spp.	Podridão-mole	
	<i>Rakstonia solanacearum</i>	Murcha-bacteriana	
	<i>Alternaria solani</i>	Pinta-preta	
	<i>Helminthosporium solani</i>	Sarna-prateada	
	<i>Sclerotium rolfii</i>	Podridão de esclerócio	
	<i>Meloidogyne</i> spp.	Nematóide de galhas	
	Potato leafroll virus (PLRV)	Enrolamento das folhas	
	Potato virus Y (PVY)	Mosaico	
	<i>Rhizoctonia solani</i>	Rizoctoniose	
	<i>Spongospora subterranea</i>	Sarna-pulverulenta	
	<i>Sclerotinia sclerotiorum</i>	Mofa-branco	
	<i>Streptomyces</i> spp.	Sarna-comum	
	<i>Phytophthora infestans</i>	Requeima	
<i>Alternaria brassicae</i> e <i>Alternaria brassicicola</i>	Mancha de alternaria	Sem alteração	
Brássicas	<i>Xanthomonas campestris</i> pv. <i>campestris</i>	Podridão-negra	Brunelli et al. (2011)
	<i>Plasmodiophora brassicae</i>	Hérnia	
	<i>Pectobacterium carotovorum</i> subsp. <i>carotovorum</i>	Podridão-mole	
	<i>Rhizoctonia solani</i>	Rizoctoniose	
	Fitoplasma	Doença do anel azul	
	<i>Peronospora parasitica</i>	Míldio	
	<i>Sclerotinia sclerotiorum</i>	Podridão de esclerotínia	
	<i>Sclerotium rolfii</i>	Podridão de esclerócio	
	<i>Pseudomonas syringae</i> pv. <i>maculicola</i>	Mancha foliar bacteriana	

Continua.

Tabela 1. Continuação.

Cultura	Patógeno	Doença	Tendência	Referência
Cebola	<i>Alternaria porri</i>	Mancha-púrpura	Aumento	Gioria et al. (2011)
	<i>Colletotrichum gloeosporioides</i> f. sp. <i>cepae</i>	Mal de sete voltas		
	<i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>cepae</i>	Podridão-basal		
	<i>Burkholderia cepacia</i>	Podridão bacteriana da escama		
	<i>Phytophthora nicotinae</i>	Murcha de fitóftora		
	<i>Pyrenochaeta terrestris</i>	Raiz-rosada		
	<i>Colletotrichum circinans</i>	Antracnose da cebola branca		
	<i>Onion yellow dwarf virus</i> (OYDV)	Mosaico em faixas		
	<i>Pectobacterium carotinarum</i> subsp. <i>carotinarum</i>	Podridão-bacteriana		
	<i>Botrytis squamosa</i>	Queima das pontas		
	<i>Peronospora destructor</i>	Míldio		
	<i>Sclerotium cepivorum</i>	Podridão-branca		
	<i>Myosphaerella fragariae</i>	Mancha de micosferela		
	<i>Diplocarpon curtianum</i>	Mancha de diplocarpon		
<i>Dendrophoma obscurans</i>	Mancha de dendrophoma			
<i>Pestalotiopsis longisetula</i>	Mancha de pestalotiopsis			
Morangueiro	<i>Sphaerotheca macularis</i>	Oídio	Aumento	Morandi e Costa (2011)
	<i>Verticillium dahliae</i>	Murcha de Verticillium	Diminuição	
	Desconhecido	Vermelho do morangueiro		
	<i>Fusarium</i> spp., <i>Pythium ultimum</i> , <i>Phytophthora</i> spp.	Podridões de raízes		
	<i>Colletotrichum fragariae</i>	Antracnose do rizoma		
	<i>Phytophthora cactorum</i> , <i>Sclerotinia sclerotiorum</i> e <i>Rhizoctonia solani</i>	Podridões nos frutos		
	<i>Colletotrichum acutatum</i>	Flor-preta		
	<i>Xanthomonas fragariae</i>	Mancha-angular		
	<i>Sclerotinia sclerotiorum</i>	Podridão de esclerotinia		
	<i>Phytophthora cactorum</i>	Podridão de fitóftora		
<i>Botrytis cinerea</i>	Mofocinzento	Sem alteração		

Continua.

Tabela 1. Continuação.

Cultura	Patógeno	Doença	Tendência	Referência
Pimentão	<i>Oidiopsis taurica</i>	Oídio	Aumento	Kobori et al. (2008)
	<i>Sclerotium rolfsii</i>	Patógenos do solo		
	<i>Sclerotinia sclerotiorum</i>	Mancha-bacteriana		
	<i>Xanthomonas campestris</i> pv. <i>vesicatoria</i>	Murcha-bacteriana		
	<i>Ralstonia solanacearum</i>	Podridão-mole		
	<i>Pectobacterium carotovorum</i> subsp. <i>carotovorum</i>			
	<i>Tomato spotted wilt virus</i> (TSWV), <i>Tomato chlorotic spot virus</i> (TCSV), <i>Groundnut ring spot virus</i> (GRSV) e <i>Chrysanthemum stem necrosis virus</i> (CSNV)	Vira-cabeça		
	<i>Potato virus Y</i> (PVY)	Risca do tomateiro		
	<i>Pepper yellow mosaic virus</i> (PepYMV)	Mosaico amarelo		
	<i>Cucumber mosaic virus</i> (CMV)	Mosaico do pepino		
	<i>Phytophthora capsici</i>	Murcha de fitóftora		
	<i>Colletotrichum</i> spp.	Antracnose		
	<i>Clavibacter michiganensis</i> subsp. <i>michiganensis</i>	Cancro-bacteriano		
<i>Botrytis cinerea</i>	Mofo-cinzeno			
<i>Cercospora capsici</i>	Mancha de cercospora	Diminuição		
<i>Stemphylium solani</i>	Mancha de estenfilo	Diminuição/sem alteração dependente da região e período do ano		
<i>Tobacco mosaic virus</i> (TMV), <i>Tomato mosaic virus</i> (ToMV) e <i>Pepper mild mottle virus</i> (PMMoV)	Mosaicos	Sem alteração		

Continua.

Tabela 1. Continuação.

Cultura	Patógeno	Doença	Tendência	Referência
Tomate	<i>Alternaria solani</i>	Pinta-preta	Aumento	Gioria et al. (2008)
	<i>Leveillula taurica</i>	Míldio-pulverulento		
	<i>Sclerotium rolfsii</i>	Podridão de escleróidio		
	<i>Fusicarium oxysporum</i> f. sp. <i>Lycopersici</i>	Murcha de fusário		
	<i>Xanthomonas</i> spp.	Mancha-bacteriana		
	<i>Ralstonia solanacearum</i>	Murcha-bacteriana		
	<i>Pectobacterium</i> spp.	Podridão-mole		
	<i>Tomato spotted wilt virus</i> (TSWV), <i>Tomato chlorotic spot virus</i> (TCSV), <i>Groundnut ring spot virus</i> (GRSV) e <i>Chrysanthemum stem necrosis virus</i> (CSNV)	Virra-cabeça		
	<i>Geminivirus</i>	Mosaico dourado do tomateiro		
	<i>Potato virus Y</i> (PVY)	Risca do tomateiro		
	<i>Pepper yellow mosaic virus</i> (PepYMV)	Mosaico-amarelo		
	<i>Cucumber mosaic virus</i> (CMV)	Mosaico do pepino		
	<i>Tomato yellow top virus</i> (ToYTV)	Topo-amarelo		
	<i>Septoria lycopersici</i>	Mancha de septoria	Diminuição	
	<i>Botrytis cinerea</i>	Mofo-cinzentos		
	<i>Phytophthora infestans</i>	Requeima		
	<i>Verticillium albo-atrum</i>	Murcha de verticilium		
	<i>Sclerotinia sclerotiorum</i>	Podridão de esclerotinia		
	<i>Clavibacter michiganensis</i> subsp. <i>michiganensis</i>	Cancro-bacteriano		
	<i>Pseudomonas syringae</i> pv. <i>tomato</i>	Pinta-bacteriana		
<i>Pseudomonas corrugata</i>	Necrose da medula			
<i>Stemphylium solani</i>	Mancha de estenfilio			
<i>Tomato mosaic virus</i> (ToMV)	Mosaico do tomateiro			

5. Considerações finais

A expansão e a intensificação dos mercados globais de hortaliças têm aumentado o risco de disseminação de fitopatógenos exóticos (LEMMETTY et al., 2011). O material vegetal contaminado é o principal veículo de disseminação entre países. Espécies exóticas podem permanecer não detectadas por longos períodos e se tornar um problema quando a mudança no clima favorece sua multiplicação e dispersão. Dessa forma, o desenvolvimento de métodos de detecção rápidos e eficientes é necessário para a eficiente identificação dos patógenos exóticos, logo após a introdução e antes de sua dispersão. Sistemas de alerta internacionais são também importantes para evitar a entrada e o estabelecimento de patógenos exóticos.

A aplicação de rígidos sistemas de quarentena para materiais vegetais introduzidos e esquemas de certificação de produção e comercialização de plantas saudáveis são fundamentais para evitar a disseminação de patógenos para novas regiões. Muitas hortaliças são propagadas vegetativamente, facilitando a disseminação de patógenos. Assim, sistemas que permitem a multiplicação de material vegetal sadio pode ser uma parte importante do controle de doenças e gestão de risco para a saúde da planta (MACLEOD et al., 2010).

A seleção de novas cultivares precisa levar em consideração as diversas variáveis que estão sendo alteradas pelas mudanças climáticas, especialmente o aumento da temperatura, secas, salinidade, stress abiótico e concentração de CO₂ do ar (CECCARELLI et al., 2012). Dentre elas, o aumento da concentração de CO₂ tem recebido pouca atenção, apesar de causar grandes alterações na fisiologia das plantas (AINSWORTH et al., 2008).

6. Referências

AINSWORTH, E. A. et al. Next generation of elevated [CO₂] experiments with crops: a critical investment for feeding the future world. **Plant Cell and Environment**, Oxford, v. 31, n. 9, p. 1317-1324, Sept. 2008.

BEBBER, D. P., RAMOTOWSKI, M. A. T., GURR, S. J. Crop pests and pathogens move polewards in a warming world. **Nature Climate Change**, London, v. 3, n. 11. p. 985–988, July 2013.

BRUNELLI, K. R.; GIORIA, R.; KOBORI, R. F. **Impacto potencial das mudanças climáticas sobre as doenças das brássicas no Brasil**. In: GHINI, R.; BETTIOL, W.; HAMADA, E. (Ed.). Impactos das mudanças climáticas sobre

doenças de importantes culturas no Brasil. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2011. p. 145-160.

CANTO, T.; ARANDA, M. A.; FERERES, A. Climate change effects on physiology and population processes of hosts and vectors that influence the spread of hemipteran-borne plant viruses. **Global Change Biology**, Oxford, v. 15, n. 8, p. 1884-1894, Aug. 2009.

CARLTON, R. et al. A comparison of GHG emissions from UK field crop production under selected arable systems with reference to disease control. **European Journal of Plant Pathology**, Dordrecht, v. 133, n. 1, p. 333–351, Jan. 2012.

CARTER, T. R.; SAARIKKO, R. A.; NIEMI, K. J. Assessing the risks and uncertainties of regional crop potential under a changing climate in Finland. **Agricultural and Food Science in Finland**, Jokioinen, v. 5, n. 3, p. 329-350, Mar. 1996.

CHAKRABORTY, S. Migrate or evolve: options for plant pathogens under climate change. **Global Change Biology**, Oxford, v. 19, n. 7, p. 1985-2000, July 2013.

CHAKRABORTY, S.; DATTA, S. How will plant pathogens adapt to host plant resistance at elevated CO₂ under a changing climate? **New Phytologist**, Cambridge, v. 159, n. 3, p. 733-742, Sept. 2003.

CECCARELLI, S.; GRANDO, S.; MAATOUGUI, M.; MICHAEL, M.; SLASH, M.; HAGHPARAST, R.; RAHMANIAN, M.; TAHERI, A.; AL-UASSIN, A.; BENBELKACEM, A.; LABDI, M.; MINOUN, H.; NACHIT, M. Plant breeding and climate changes. **The Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 148, n.6, p. 627-637, Dec. 2010.

FAGUNDES, J. D.; PAULA, G. M. de; LAGO, I.; STRECK, N. A.; BISOGNIN, D. A. Aquecimento global: efeitos no crescimento, no desenvolvimento e na produtividade de batata. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 40, n. 6, p. 1464-1472, jun. 2010.

FISHER, M. C.; HENK, D. A.; BRIGGS, C. J.; MADOFF, L. C.; McCRAW, S. L.; GURR, S. J. Emerging fungal threats to animal, plant and ecosystem health. **Nature**, London, v. 484, p. 186-194, Apr. 2012.

FURLAN, R. A. et al. Lâmina de irrigação e aplicação de CO₂ na produção de pimentão cv. Mayata, em ambiente protegido. **Horticultura Brasileira**, Brasília, DF, v. 20, n. 4, p. 547-550, dez. 2002.

GIORIA, R.; BRUNELLI, K. R.; KOBORI, R. F. Impacto potencial das mudanças climáticas sobre as doenças do tomate no Brasil. In: GHINI, R., HAMADA, E. (Ed). *Mudanças climáticas: impactos sobre doenças de plantas no Brasil*. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. p. 93-118.

GIORIA, R.; DELLA VECCHIA, P. T.; BRUNELLI, K. R.; KOBORI, R. F. Impacto potencial das mudanças climáticas sobre as doenças da cebola no Brasil. In: GHINI, R.; BETTIOL, W.; HAMADA, E. (Ed). **Impactos das mudanças climáticas sobre doenças de importantes culturas no Brasil**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2011. p. 177-198.

GLEADOW, R. M. et al. Growth and nutritive value of cassava (*Manihot esculenta* Cranz.) are reduced when grown in elevated CO₂. **Plant Biology**, Stuttgart, v. 11, p. 76-82, Nov. 2009. Supplement.

HAMADA, E.; GHINI, R.; MARENGO, J. A.; THOMAZ, M. C. Projeções de mudanças climáticas para o Brasil no final do Século 21. In: GHINI, R.; BETTIOL, W.; HAMADA, E. (Ed). **Impactos das mudanças climáticas sobre doenças de importantes culturas no Brasil**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2011. p. 41-74.

HELDWEIN, A. B.; STRECK, N. A.; BISOGNIN, D. A. Batata. In: MONTEIRO, J. E. B. A. (Org). **Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola**. Brasília, DF: INMET, 2009. p. 91-107.

HANNUKKALA, A.; SEGERSTED, M.(Ed). **New and old pathogens of potato in changing climate**: proceedings of the EAPR Pathology section seminar, Hattula, Finland, 2007. Jokioinen: MTT Agrifood Research Finland,[2007?]. 51 p. (Agrifood Research Working, 142).

HANNUKKALA, A. O.; KAUKORANTA, T.; LEHTINEN, A.; RAHKONEN, A. Late-blight epidemics on potato in Finland, 1933–2002; increased and earlier occurrence of epidemics associated with climate change and lack of rotation. **Plant Pathology**, London, v. 56, n. 1, p. 167-176, Jan. 2007.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Summary for Policymakers. In: **Climate change 2013: the physical science basis**. Working group I contribution to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. Editado por Thomas F. Stocker, Dahe Qin, Gian-Kasper Plattner, Melinda M. B. Tignor, Simon k. Allen, Judith Boschung, Alexander Nauels, Yu Xia, Vincent Bex, Pauline M. Midgley.em:<http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_SPM_FINAL.pdf>. Acesso em: 14 nov. 2014.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Summary for policymakers. In: **Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability**. Contribution of working group II to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. p. 7-22. Editado por M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden, C. E. Hanson. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg2/ar4-wg2-spm.pdf>>. Acesso em: 28 dez. 2014.

JUROSZEK, P.; von TIEDEMANN, A. Plant pathogens, insect pests and weeds in a changing global climate: a review of approaches, challenges, research gaps, key studies and concepts. **The Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 151, n. 1, p. 163-188, Jan. 2013.

JWA, N. S.; WALLING, L. L. Influence of elevated CO₂ concentration on disease development in tomato. **New Phytologist**, Cambridge, v. 149, n. 3, p. 509-518, March 2001.

KOBORI, R. F.; BRUNELLI, K. R.; GIORIA, R. Impacto potencial das mudanças climáticas sobre as doenças da alface no Brasil. In: GHINI, R.; BETTIOL, W.; HAMADA, E. (Ed). **Impactos das mudanças climáticas sobre doenças de importantes culturas no Brasil**, Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2011. p. 129-144.

KOBORI, R. F.; GIORIA, R.; BRUNELLI, K. R. Impacto potencial das mudanças climáticas sobre as doenças do pimentão no Brasil. In: GHINI, R.; HAMADA, E. (Ed). **Mudanças climáticas: impactos sobre doenças de plantas no Brasil**, Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. p. 119-128.

LEMMETTY, A. et al. Emerging virus and viroid pathogen species identified for the first time in horticultural plants in Finland in 1997-2010. **Agricultural and Food Science**, Helsinki, v, 20, n. 1, p. 29-41, Jan. 2011.

LONG, S. P. et al. Rising atmospheric carbon dioxide: plants face the future. **Annual Review of Plant Biology**, Palo Alto, v. 55, p. 591-628, Jun. 2004.

LOPES, C. A.; REIS, A.; SHIMOYAMA, N. Y. Impacto potencial das mudanças climáticas sobre as doenças da batata no Brasil. In: GHINI, R.; HAMADA, E. (Ed). **Mudanças climáticas: impactos sobre doenças de plantas no Brasil**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. p. 76-92.

LOPES, C. A. et al. Uma análise do efeito do aquecimento global na produção de batata no Brasil. **Horticultura Brasileira**, Brasília, DF, v. 29, n. 1, p. 7-15, 2011.

MACLEOD, A. et al. Evolution of the international regulation of plant pests and challenges for future plant health. **Food Security**, Dordrecht, v. 2, n. 1, p. 49-70, Mar. 2010.

MANNING, W. J.; TIEDEMANN, A. V. Climate change: potential effects of increased atmospheric carbon dioxide (CO₂), ozone (O₃), and ultraviolet-B (UV-B) radiation on plant diseases. **Environmental Pollution**, v. 88, n. 2, p. 219-245, 1995.

MIGLIETTA, F. et al. Free Air CO₂ Enrichment of potato (*Solanum tuberosum* L.): development, growth and yield. **Global Change Biology**, Oxford, v. 4, p. 163-172, 1998.

MORANDI, M. A. B., COSTA, H. Impacto potencial das mudanças climáticas sobre as doenças do morangueiro no Brasil. In: GHINI, R.; BETTIOL, W.; HAMADA, E. (Ed). **Impactos das mudanças climáticas sobre doenças de importantes culturas no Brasil**, Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2011. pp. 285-304.

OLIVEIRA, V. R.; MAROUELLI, W. A.; MADEIRA, N. R. Cebola. In: MONTEIRO, J. E. B. A. (Org.). **Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola**. Brasília, DF: INMET, 2009. p. 153-165.

REZENDE, F. C.; FRIZZONE, J. A.; OLIVEIRA, R. F. CO₂ and irrigation in relation to yield and water use of the bell pepper crop. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 60, n. 1, 7-12, jan./mar. 2003.

ROSENTHAL, D. M. et al. Cassava about-FACE: Greater than expected yield stimulation of cassava (*Manihot esculenta*) by future CO₂ levels. **Global Change Biology**, Oxford, v. 18, 2661-2675, 2012.

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

Melhoramento genético vegetal visando adaptação às mudanças climáticas

Lauro José Moreira Guimarães
Newton Portilho Carneiro
Maria Marta Pastina
Elizabeth de Oliveira Sabato
Andrea Almeida Carneiro
Flávia Ferreira Mendes Guimarães
Sidney Netto Parentoni

1. Introdução

A produção agrícola triplicou nos últimos 50 anos (FAO, 2013), sendo que esse incremento foi impulsionado, principalmente pelo aumento da produção por unidade de área, enquanto que a expansão da área cultivada desempenhou um papel menos importante. Contudo, em algumas regiões, a produtividade de algumas culturas agrícolas ainda se encontra aquém do seu potencial. Isso se deve, em parte, aos estresses bióticos e abióticos, que têm sido apontados como fatores limitantes ao desenvolvimento das plantas.

A agricultura é uma atividade altamente dependente dos elementos climáticos, como temperatura, pluviosidade, umidade e radiação solar, sendo que, qualquer interferência em um ou mais desses fatores pode influenciar o desenvolvimento das plantas. Neste contexto, as mudanças climáticas previstas para as próximas décadas trarão um novo desafio para o setor agrícola, pois é esperado um aumento na média da temperatura do Brasil (HAMADA et al., 2011). Assim, a agricultura poderá sofrer com estresses abióticos mais frequentes e severos, como seca e altas temperaturas, e estresses bióticos, como maior ocorrência de pragas e doenças.

Apesar dos grandes avanços já obtidos pelo melhoramento genético de plantas, ainda existem dificuldades a serem superadas nos processos de desenvolvimento de cultivares para condições limitantes de cultivo devido à complexidade das características relacionadas à tolerância aos estresses. Exemplos de sucesso na geração de cultivares tolerantes a estresses abióticos, como a seca ou calor, por meio da seleção assistida ou de transgenia ainda são poucos, indicando a necessidade de esforços

multidisciplinares nessa área. Nesse capítulo serão abordados aspectos relevantes para programas de melhoramento visando adaptação às mudanças climáticas, enfatizando procedimentos experimentais e a utilização da biologia molecular como ferramenta para auxiliar no desenvolvimento de cultivares mais tolerantes a estresses advindos das mudanças climáticas, como deficiência hídrica, altas temperaturas e alterações na incidência e na severidade de doenças em plantas.

2. Melhoramento para tolerância à deficiência hídrica e ao calor

Estresses abióticos associados às mudanças climáticas, como altas temperaturas e déficit hídrico, estão entre os principais fatores limitantes à produção de alimentos (TURRAL et al., 2011). A deficiência hídrica afeta as culturas agrícolas causando drástica redução na produtividade, e com frequência é acompanhada do estresse por altas temperaturas, que ocasiona alterações nos processos de evapotranspiração e fotossíntese, intensificando os efeitos causados pela baixa disponibilidade de água (MIR et al., 2012). Genótipos mais tolerantes à deficiência hídrica e capazes de maximizar a produção em altas temperaturas serão de alto valor nesse novo cenário.

A maior tolerância à deficiência hídrica (ou maior eficiência no uso da água) é uma característica complexa, envolvendo diversos mecanismos fisiológicos, anatômicos e morfológicos das plantas. Contudo, existem estádios do desenvolvimento vegetativo em que a seleção pode ser mais efetiva para o melhoramento e obtenção de ganhos genéticos. Em milho, por exemplo, o estresse por deficiência hídrica é mais severo nas fases entre o pré-florescimento e o enchimento de grãos. Para essa cultura, trabalhos indicam que, em complementação à produtividade de grãos, a seleção para maior tolerância à seca deve considerar características secundárias em fase reprodutiva, como o intervalo entre florescimento masculino e feminino (IFMF ou *ASI* – do inglês: *Anthesis-silking Interval*), o índice de espigas, *stay green* e medidas obtidas com clorofilômetro (SPAD-502) (BÄNSINGER et al., 2000; CHAPMAN; EDMEADES, 1999; BOLANOS; EDMEADES, 1993). Uma série de características secundárias que incluem atributos anatômicos do sistema radicular, propriedades fisiológicas, como conteúdo osmótico e padrões de trocas gasosas, medidas do status de água nas folhas e a estabilidade de membranas celulares são reconhecidas como componentes importantes para a maior tolerância à deficiência hídrica em cereais (KHAN et al., 2013). Algumas características como potencial de água nas folhas, *stay green* e ajuste osmótico têm apresentado correlações positivas com a produtividade de grãos em cereais e têm sido utilizadas para auxiliar na seleção de plantas mais tolerantes ao estresse por deficiência hídrica.

2.1. Caracterização de “sítios” para avaliações de estresses abióticos

Geralmente, a seleção de genótipos em programas de melhoramento de plantas, é realizada em condições favoráveis de cultivo. Entretanto, a interação genótipos x ambientes (GxA) pode ser um fator limitante quando a seleção ocorre em região ou condição diferente daquela onde se pretende lançar novas cultivares. Dessa forma, é fundamental a definição do ambiente alvo para traçar estratégias de melhoramento que permitam, efetivamente, o desenvolvimento de cultivares mais tolerantes aos estresses por deficiência hídrica e/ou por altas temperaturas, e que apresentem adaptação aos ambientes a que se destinam. O ideal seria a condução dos ensaios e avanço das gerações sob seleção no próprio ambiente alvo (seleção direta), o que minimizaria os efeitos da interação GxA.

Entretanto, quando se pensa em estresse por deficiência hídrica, por exemplo, muitas vezes é difícil praticar seleção no ambiente alvo, pois períodos de estiagem (ou veranicos) podem ocorrer em diferentes épocas, de forma não previsível. Assim, nas fases iniciais dos programas de melhoramento pode ser interessante a caracterização de genótipos em ambientes protegidos (casas de vegetação ou *shelters*) ou sítios específicos para *screening*, onde é possível a condução de ensaios e aplicação de estresse de forma controlada e direcionada para os estádios vegetativos de maior interesse. A avaliação inicial em condições específicas permite a seleção de genótipos que possuam atributos importantes para melhor desempenho em condições de estresse nas fases vegetativas de maior interesse. Entretanto, posteriormente, a interação GxA deve ser considerada, quando os materiais genéticos mais promissores forem avaliados em múltiplos ensaios no ambiente alvo.

Outros fatores também podem interferir na fenotipagem com vistas à identificação de genótipos superiores para o estresse de interesse. Em condições de campo, por exemplo, recomenda-se realizar análises químicas do solo para determinação da disponibilidade dos macro e micronutrientes e dos níveis de pH nas camadas de 0 a 20 e de 20 cm a 40 cm de profundidade. O conhecimento do tipo de solo e de suas propriedades físicas também é importante, pois, as proporções de areia, silte e argila, e a profundidade do solo estão relacionadas à capacidade de retenção de água e influenciam a tomada de decisão para a imposição do estresse. A precipitação, a radiação solar, a temperatura e o vento, dentre outros elementos climáticos, influenciam a evapotranspiração e a fisiologia das plantas, de modo que o levantamento de dados climáticos durante o período vegetativo fornece informações que ajudam a compreender o comportamento da cultura.

Se o nível de estresse for adequado, espera-se que os genótipos que apresentem mecanismos de tolerância se destaquem, devido à expressão de genes ativados nas

condições específicas do estresse. Isso pode causar alterações na classificação dos genótipos em relação à avaliação em ambientes otimizados, ocasionando baixa correlação entre ambientes com e sem estresse, e dessa forma, os efeitos da interação entre genótipos e ambientes deverão ser significativos. Entretanto, apesar da existência de interação GxA, em algumas situações é possível identificar genótipos que se destacam tanto em condições de estresses como em condições favoráveis e, esses genótipos podem ser considerados tolerantes e responsivos às melhorias ambientais. Dessa forma, é importante que os materiais selecionados sejam avaliados em ambientes com e sem estresse, principalmente em fases finais do programa de melhoramento (ensaios de VCU – valor de cultivo e uso), permitindo identificar cultivares superiores e com ampla adaptação e estabilidade de cultivo. Vale ressaltar que o estresse não deve ser severo a ponto de causar mortalidade de plantas ou de parcelas inteiras, pois nessa situação tem-se redução da variabilidade genética, o que dificulta ou impossibilita a seleção.

2.2. Planejamento experimental

Em condições de estresse é necessária maior atenção para o planejamento dos experimentos, reforçando os cuidados no controle do erro experimental. Assim, é interessante a utilização de técnicas que possibilitem a minimização de problemas causados pelos diversos fatores que influenciam o comportamento das plantas. Neste sentido, os fundamentos da estatística experimental devem ser considerados para o planejamento de ensaios visando maior precisão experimental (MONNEVEUX; RIBAUT, 2011).

Em ensaios em blocos casualizados, por exemplo, a herdabilidade no sentido amplo pode ser estimada por meio da expressão: $h^2 = \sigma_G^2 / (\sigma_G^2 + \sigma_e^2 / r)$; onde, σ_G^2 representa a variância genética, e o termo entre parênteses, a variância fenotípica, composta pelos componentes de variância genética e ambiental ou residual (σ_e^2), sendo que r é o número de repetições do ensaio. Percebe-se que o aumento do número de repetições proporciona maiores valores de herdabilidade, decorrente da maior precisão experimental. Desta forma, torna-se mais fácil a detecção de diferenças estatísticas entre os tratamentos e, por sua vez, é possível a obtenção de maiores ganhos com a seleção. Entretanto, existem limitações práticas e financeiras ao aumento exagerado no número de repetições dos ensaios.

O tamanho das parcelas também é um fator que influencia na qualidade do experimento, uma vez que, em condições de estresses os efeitos de bordadura são mais pronunciados. Dessa forma, se possível, as parcelas devem ser constituídas por número de linhas suficiente para que as avaliações sejam realizadas nas linhas centrais. Entretanto, sabe-se que para algumas culturas é inviável a condução de parcelas com

várias linhas de cultivo, principalmente em fases iniciais do processo de seleção e, por isso, o melhorista deve usar o bom senso para determinar as dimensões da parcela. Pode-se adotar práticas simples para minimizar esses problemas como a estratificação dos ensaios por grupos de genótipos com ciclo e porte semelhantes e a não tomada de dados em plantas nas extremidades das parcelas.

Para ensaios que serão conduzidos em condições de estresses também é interessante o emprego de delineamentos em blocos incompletos. A subdivisão das repetições em blocos que abrangem os tratamentos de forma sistemática permite maior controle local, pois as comparações são realizadas considerando-se menor número de tratamentos em parcelas do mesmo bloco. Essa abordagem também possibilita o ajuste das médias após a recuperação da informação inter-blocos. Isso se traduz em maior precisão experimental, ajustamentos mais adequados que a análise de médias simples e menor número de repetições.

Atualmente, vem crescendo o interesse dos melhoristas de plantas por metodologias de análises estatísticas baseadas em modelos lineares mistos. Esta estratégia permite maior flexibilidade de análise, visto que aceita o tratamento de dados com grande desbalanceamento, retornando valores preditos em procedimentos ótimos e não viesados (BLUP – *Best Linear Unbiased Predictor*), ou melhor preditor linear não viesado (RESENDE, 2007). Com essa abordagem, informações de parentesco, obtidas via pedigree e/ou similaridade genética derivada de dados de marcadores moleculares, podem ser incorporadas aos modelos estatísticos possibilitando maior acurácia na obtenção dos valores genotípicos dos materiais sob avaliação.

Existem, ainda, outras formas de tratamento de dados que podem melhorar a qualidade das estimativas dos ensaios de estresses, como as análises espaciais (MONNEVEUX; RIBAUT, 2011). Entretanto, vale salientar que nenhuma metodologia estatística será mais eficiente que uma boa condução do experimento de campo e isso se resume em: planejamento adequado do delineamento (repetição, casualização e controle local), utilização de áreas uniformes, boa condução dos ensaios e adequada coleta de dados. O plantio com maior número de sementes para se conseguir estande desejado após desbaste, também, é uma prática a ser considerada quando se trabalha com estresses abióticos.

2.3. Fenotipagem em larga escala

Atualmente, é possível a obtenção de grande quantidade de dados de marcadores moleculares em curto espaço de tempo e a custos relativamente baixos. Entretanto, um fator limitante aos avanços em ganhos genéticos pode

ser a fenotipagem, que muitas vezes é conduzida para avaliação de características de expressão tardia, como a produção de grãos, frutos, raízes, tubérculos, etc. Dessa forma, para maior efetividade do processo, principalmente quando são utilizadas estratégias de melhoramento molecular, é necessária a identificação de caracteres secundários que possibilitem a fenotipagem com sensores remotos, em fases mais precoces do desenvolvimento das plantas, de forma massiva, rápida, prática, não destrutiva, não invasiva, e que apresentem correlações significativas com a(s) característica(s) de interesse (CABRERA-BOSQUET et al., 2012). Sob condições de estresse, características fisiológicas como a condutância estomática, e parâmetros relacionados à fotossíntese, que sejam de fácil mensuração, são de grande importância em programas de melhoramento modernos (OKOGBENIN et al., 2013).

Neste contexto, termos como “fenômica” ou “*high throughput phenotyping*” (alta capacidade de fenotipagem) têm sido empregados com frequência para descrição de esquemas ou plataformas de fenotipagem que permitem a obtenção de grande quantidade de informações fenotípicas, de forma relativamente rápida. Para tanto, tem sido conduzida a caracterização de parâmetros relacionados ao crescimento e desenvolvimento das plantas (parte aérea ou raízes), ou a atributos fisiológicos relacionados a processos fotossintéticos e de transpiração, por meio de medidas indiretas, obtidas via aparelhos, equipamentos ou plataformas que emitem e/ou captam diferentes comprimentos de ondas do espectro eletromagnético.

3. Biotecnologia no melhoramento de plantas para estresses associados às mudanças climáticas

Os melhoristas têm procurado genótipos que apresentem alta produtividade em condições ótimas de cultivo e com capacidade de manter bom desempenho mesmo em ambientes desfavoráveis. Contudo, a tolerância a estresses abióticos, em geral, constitui um fenótipo de difícil quantificação, e de controle genético poligênico, ou seja, a partir de vários genes, muitos com efeitos individuais reduzidos e sujeitos a interação com fatores ambientais (BLUM, 1988; FRITSCHÉ-NETO; BORÉM, 2012). Assim, para aumentar a precisão experimental, as avaliações fenotípicas demandam grande disponibilidade de espaço e recursos, uma vez que, são realizados ensaios com um número razoável de repetições, em ambientes com e sem estresse, em vários locais e anos. No entanto, apesar dos esforços, caracteres quantitativos, como por exemplo, produção de grãos, apresentam baixa herdabilidade sob condições de estresse, o que reduz a eficiência de seleção de genótipos superiores (EDMEADES et al., 1999; WAHID et al., 2007). Nesse

contexto, a utilização de ferramentas de biotecnologia pode aumentar a eficiência do processo de melhoramento de plantas para tolerância a estresses, tanto por meio de seleção assistida por marcadores moleculares quanto pela incorporação de genes via transgenia ou outros processos de engenharia genética.

3.1. Melhoramento assistido por marcadores moleculares

O melhoramento assistido por marcadores pode reduzir custos com as avaliações fenotípicas, e aumentar a eficiência de seleção para tolerância a estresses associados às mudanças climáticas (VARSHNEY et al., 2011). Com a nova geração de tecnologias para sequenciamento de DNA (NGS - *Next-generation Sequencing*) e, conseqüente, redução dos custos neste processo, é possível a obtenção de um elevado número de polimorfismos de nucleotídeo único (SNP - *Single Nucleotide Polymorphism*) em diferentes espécies de plantas (METZKER, 2010; ELSHIRE et al., 2011). Esses marcadores SNP podem ser utilizados para a identificação de genes e/ou regiões genômicas associados à tolerância a estresses abióticos, por meio do mapeamento de QTLs (*Quantitative Trait Loci*), a partir de análises de ligação em populações experimentais (por exemplo, retrocruzamentos, F₂, RILs - *Recombinant Inbred Lines*, NILs - *Near Isogenic Lines*, e linhagens duplo haplóides) ou análises de associação em populações constituídas por um conjunto de indivíduos que representam grande parte da variabilidade fenotípica observada em um programa de melhoramento.

As análises de associação, também denominadas análises por desequilíbrio de ligação, apresentam como principais vantagens a maior resolução de mapeamento (restrita a 10 - 20 cM nas análises de ligação), devido ao maior número de gerações de recombinação às quais as populações foram submetidas, e à possibilidade de explorar maior variabilidade alélica, que é limitada a dois alelos nas análises de ligação em espécies diploides (MYLES et al., 2009). A alta densidade de marcadores SNP obtidos via NGS tem permitido, também, a realização de estudos de associação genômica ampla (GWAS - *Genome-wide Association Studies*) em diferentes espécies de plantas, com grande cobertura do genoma (por exemplo, CLARK, 2010; MORRIS et al., 2013).

QTLs têm sido identificados, via análises de ligação e/ou de associação, em diferentes espécies de plantas, como arroz, milho, sorgo, trigo, para tolerância a altas temperaturas (PALIWAL et al., 2012; YE et al., 2012; REIMER et al., 2013) e à deficiência hídrica (YUE et al., 2005; MATHEWS et al., 2008; LU et al., 2010; SABADIN et al., 2012; ALMEIDA et al., 2013; EDAE et al., 2013; XUE et al., 2013).

Assim, marcadores moleculares associados a genes ou QTLs que controlam a tolerância a estresses podem ser utilizados para a introgressão de alelos favoráveis

em materiais elite dos programas de melhoramento, via sucessivos retrocruzamentos assistidos por marcadores (MABC - *Marker-assisted Backcrossing*) (HOSPITAL, 2002). Por exemplo, Ribaut e Ragot (2007) utilizaram MABC para a introgressão de alelos favoráveis para cinco QTLs que explicavam cerca de 38% da variabilidade fenotípica observada para o caráter intervalo entre florescimentos masculino e feminino (IFMF ou, do inglês, ASI), o qual está negativamente correlacionado à produção de grãos em condições de deficiência hídrica em milho. Nesse trabalho, os melhores híbridos selecionados com base em dados de marcadores moleculares apresentaram, em média, aumento de 50% na produção de grãos quando comparados às testemunhas (híbridos controle) em condições severas de deficiência hídrica.

A seleção assistida por marcadores tem sido aplicada com sucesso para o desenvolvimento de genótipos superiores para caracteres monogênicos ou àqueles controlados por poucos genes de grande efeito (oligogênicos) (revisado em COLLARD; MACKILL, 2008; XU; CROUCH, 2008). Contudo, poucos exemplos estão disponíveis para caracteres de herança quantitativa, como é o caso da tolerância a estresses abióticos, como altas temperaturas e deficiência hídrica (STEELE et al., 2006; RIBAUT; RAGOT, 2007), os quais são de grande importância para a adaptação das diversas espécies de plantas às mudanças climáticas.

Devido à natureza poligênica ou quantitativa da maioria dos caracteres associados à tolerância a estresses abióticos, geralmente, as estratégias de seleção assistida por marcadores moleculares como o MABC apresentam baixa eficiência, uma vez que para a piramidação de alelos favoráveis para um grande número de QTLs são necessárias populações de retrocruzamento com elevado número de indivíduos (VARSHNEY et al., 2011). Contudo, com a redução dos custos das tecnologias para obtenção de marcadores moleculares em larga escala, e o desenvolvimento de métodos estatísticos e recursos computacionais para o processamento de grande volume de dados, tem sido proposta uma abordagem de melhoramento assistido para caracteres de herança quantitativa, conhecida como seleção genômica (*Genomic Selection*) ou seleção genômica ampla (*Genome-wide Selection*) (MEUWISSEN et al., 2001).

A seleção genômica consiste em determinar os valores genéticos (*Breeding Values*) dos indivíduos candidatos à seleção em um programa de melhoramento, com base apenas nos genótipos de marcadores moleculares. Para isso, inicialmente, os efeitos de marcadores são estimados em uma população de treinamento, para a qual também estão disponíveis medidas fenotípicas do caráter quantitativo de interesse. Na seleção genômica, todos os marcadores são utilizados, sem a necessidade da realização de análises prévias para a identificação de associações entre marcador e fenótipo. Ao utilizar elevado número de marcadores distribuídos ao longo do genoma, a seleção genômica permite estimar, simultaneamente, os efeitos de grande

número de genes, ou regiões cromossômicas, garantindo que boa parte da variância genética seja contabilizada e utilizada para aumentar a acurácia na predição dos valores genéticos de indivíduos presentes nas populações de seleção (MEUWISSEN et al., 2001; JANNINK et al., 2010; HESLOT et al., 2012). Esta particularidade do método é importante, principalmente para caracteres associados à tolerância a estresses abióticos, em geral controlados por vários genes, muitos deles com efeitos individuais reduzidos.

Em milho, Ziyomo e Bernardo (2013), utilizando como população de treinamento um conjunto de linhagens recombinantes obtidas a partir do cruzamento entre B73 e Mo17, verificaram que a resposta por ciclo de seleção genômica foi 24% superior à resposta por ciclo de seleção fenotípica direta para a produção de grãos em condições de deficiência hídrica. Esses resultados indicam que a seleção genômica pode ser uma ferramenta para reduzir custos com avaliações fenotípicas em programas de melhoramento para tolerância ao déficit hídrico, além de contribuir para o aumento dos ganhos genéticos por unidade de tempo, uma vez que múltiplos ciclos de seleção genômica podem ser conduzidos ao longo de um ano. Assim, assumindo que a resposta à seleção por ciclo é constante, três ciclos de seleção genômica realizados ao longo de um ano podem resultar em ganho genético 3,7 vezes maior do que o alcançado com apenas um ciclo de seleção fenotípica direta, que ainda demoraria aproximadamente dois anos para ser concluída (ZIYOMO; BERNARDO, 2013).

Apesar dos resultados positivos, ainda são poucos os relatos sobre o uso da seleção genômica no melhoramento de plantas para tolerância a estresses abióticos associados às mudanças climáticas. Estudos adicionais devem ser conduzidos para a validação do uso da seleção genômica em programas de melhoramento, levando em conta número de marcadores, constituição, e tamanho da população de treinamento, que sejam adequados para a espécie e caráter de interesse. Assim, para que seja alcançada maior acurácia na predição dos valores genéticos dos indivíduos candidatos à seleção, e conseqüentemente, maior chance de sucesso com o uso da seleção genômica, atenção especial deve ser direcionada para a escolha da população de treinamento, que deve ser representativa, em sua constituição genética, em relação à população de seleção (HEFFNER et al., 2009; JANNINK et al., 2010).

3.2. Engenharia genética para tolerância à deficiência hídrica em plantas

Vários genes têm sido descritos como induzidos em resposta à desidratação (THOMASHOW, 1999). Um importante avanço no conhecimento de genes reguladores e regulados associados à tolerância à deficiência hídrica foi a identificação de um elemento de DNA, em *Arabidopsis thaliana*, denominado DRE1 (*Dehydration*

Responsive Element 1) (YAMAGUCHI-SHINOZAKI; SHINOZAKI, 1994; LIU et al., 1998) e fatores de transcrição que interagem com esse elemento: os DREBs (*Dehydration Responsive Element Binding*). Fatores de transcrição DREB induzem a expressão de vários genes envolvidos na resposta ao estresse em plantas (KASUGA et al., 2004; SEKI et al., 2001; FOWLER; THOMASHOW, 2002). A função de alguns produtos destes genes induzidos pelo DRE1 parece estar relacionada a mecanismos de manutenção das estruturas e funções celulares básicas durante a deficiência hídrica, baixas temperaturas ou alta salinidade (SHINOZAKI; YAMAGUCHI-SHINOZAKI, 1996). Outros exemplos de genes de plantas identificados em resposta ao déficit hídrico são os responsáveis pela síntese de proteínas LEA (*Late Embryogenesis Abundant*) (BOHNERT et al., 1995; ZHU et al., 1998), as proteínas de choque térmico (HSP - *Heat Shock Proteins*), os osmólitos como prolina, glicina-betaina, manitol e inositol (SHEN et al., 1997; HARE; CRESS, 1997), as proteínas de transporte (aquaporin - *channel proteins*) (MAUREL et al., 1993; YAMADA et al., 1995), o ácido abscísico (BRAY, 1993; INGRAM; BARTELS, 1996), os açúcares, como trehalose e sacarose (GODDIJN et al., 1997; MULLER et al., 1995; CROWE et al., 1993) e a proteína quinase dependente de cálcio em arroz (OsCDPK7) (SAIJO et al., 2000).

Uma contribuição da engenharia metabólica para tolerância à deficiência hídrica foi a geração de plantas transgênicas de tabaco (KAVI KISHOR et al., 1995) e arroz (ZHU et al., 1997) super-expressando prolina e, plantas de trigo produzindo manitol através da expressão do gene que codifica para a desidrogenase manitol-1-fosfato (mTLD) (ABEBE et al., 2003) – resultando em uma maior biomassa sob condições de estresse.

Ensaio de campo com resultados promissores também foram publicados para plantas de alfafa e arroz super-expressando o gene da superóxido dismutase (MCKERSIE et al., 1996) e os genes NAC1 (HU et al., 2006) e OsLEA3 (XIAO et al., 2007), respectivamente. O maior rendimento sob condições de déficit hídrico, alcançado pelo arroz transgênico OsLEA3 foi devido ao aumento de fertilidade das espiguetas. Esses dados fenotípicos, bem como o fato do gene OsLEA3 estar localizado dentro do intervalo de confiança do QTL identificado para fertilidade de espiguetas em condições de presença e ausência de deficiência hídrica, demonstram o papel fundamental da fertilidade ovariana para a tolerância ao déficit hídrico em arroz (XIAO et al., 2007).

Recentemente, um gene que codifica a aquaporina (NtAQP1) foi identificado em tabaco (*Nicotiana tabacum*) e mostrou estar associado à maior tolerância a condições de salinidade em transgênicos de tomate (*Solanum lycopersicum*) (SADE et al., 2010).

Proteínas do tipo *Zinc Finger Proteins* (ZFPs) também têm sido relatadas como uma ampla família de reguladores de transcrição em plantas e dentro dessa classe, os fatores de transcrição C₂H₂ têm sido relacionados a respostas de plantas a estresse. Um gene codificador de um fator de transcrição do tipo C₂H₂, denominado BcZAT12, foi utilizado para a transformação de tomate e foi capaz de produzir plantas com alta tolerância à deficiência hídrica, com potencial para desenvolvimento de cultivares de tomates com maior tolerância a esse estresse (RAI et al., 2013).

3.3. Perspectivas sobre a utilização de biotecnologia no melhoramento de plantas para estresses

A biotecnologia tem grande potencial para contribuir no melhoramento de plantas visando à obtenção de cultivares com desempenho agrícola superior em condições de estresse. O futuro parece promissor com relação ao desenvolvimento de cultivares que possam utilizar água com maior eficiência utilizando tecnologias emergentes como o RNAi, para silenciar a função de alguns genes (ALI et al., 2010), a engenharia de precisão, usando nucleases do tipo *zinc-fingers* para a substituição ou mutação de genes alvos, a seleção genômica, o sequenciamento de próxima geração e a nanobiotecnologia.

O desenvolvimento de cultivares superiores não está limitado apenas à complexidade genética da tolerância aos principais estresses, mas também, a variações no tempo, duração e intensidade que podem estar interagindo com diferentes estádios do desenvolvimento da planta. Para enfrentar desafios complexos como esse, a pesquisa deve englobar abordagens interdisciplinares como a seleção de um conjunto mais adequado de genes ou QTLs, ênfase na precisão e em grande escala de fenotipagem. Deve haver, ainda, boa compreensão dos processos associados à tolerância aos estresses, em conjunto com novos métodos genômicos e de melhoramento genético convencional (VARSHNEY et al., 2005). Também são necessários investimentos de longo prazo no setor público para o desenvolvimento da próxima geração de cultivos biotecnológicos, maior ênfase na adoção de pesquisa em biotecnologia nos programas de melhoramento (RIBAUT et al., 2010; FARRE et al., 2010), simplificação do processo de regulação da biossegurança de transgênicos (FARRE et al., 2010; FEDOROFF et al., 2010) e a conscientização pública, principalmente em países em desenvolvimento, sobre a utilização de abordagens biotecnológicas na agricultura.

4. Doenças de plantas no contexto de mudanças climáticas

É preciso salientar que, além dos esforços para aumento da produtividade das culturas em condições de estresses abióticos, como a seca e o calor, os melhoristas

de plantas devem estar atentos à dinâmica dos agroecossistemas e das interações entre as plantas cultivadas e os patógenos. Isso é importante para a antecipação de soluções para desafios impostos pelas mudanças climáticas, pois os elementos climáticos influenciam a incidência e a severidade de doenças em plantas. Mudanças na temperatura, distribuição de chuvas, umidade e padrões de vento afetam diretamente o ciclo de vida dos insetos e dos patógenos, além de alterar a fisiologia dos hospedeiros (PATTERSON et al., 1999).

As condições predominantes da temperatura e da umidade do ar podem acentuar ou restringir o desenvolvimento das doenças de origem biótica, seja através de alterações no metabolismo e fisiologia das plantas, seja por efeito direto sobre o crescimento e multiplicação do patógeno (OLIVEIRA et al., 2007, 2011). Esses efeitos podem ainda ser acentuados ou limitados pela disponibilidade de luz e pela concentração de determinados gases na atmosfera (AGRIOS, 2005; PUGLIESE et al., 2013).

Os agentes causais das doenças de plantas podem ser fungos, bactérias, vírus, viroides e nematoides. Os fungos e as bactérias são comumente disseminados pela ação do vento ou da água, por partes da planta infectada e, os nematoides, essencialmente pelo solo e por raízes infectadas. Assim como os vírus e viroides, as bactérias fastidiosas e aquelas da classe Mollicutes dependem de insetos vetores para disseminação. Alguns vírus podem também ser disseminados por fungos vetores. Em cada um desses sistemas, os agentes patogênicos ou os seus vetores podem ser diretamente favorecidos ou desfavorecidos pelas condições do ambiente. Tanto fatores físicos do ambiente, a exemplo de maiores ou menores temperaturas e da disponibilidade ou ausência de água livre, no solo ou na superfície da planta, ou do nível de umidade do ar, quanto fatores bióticos, como a presença ou ausência de microrganismos antagonistas, podem ser favoráveis ou adversos à ocorrência e à proliferação dos patógenos de plantas. O ambiente pode também afetar a planta e favorecer a doença. Algumas doenças podem ser mais severas em plantas com desequilíbrios nutricionais, pelo excesso ou falta de nutrientes (AGRIOS, 2005).

4.1. Os efeitos de mudanças do clima

Os prognósticos atuais de aumento da concentração dos gases de efeito estufa e das conseqüentes mudanças no clima futuro da terra têm alertado também os fitopatologistas, que buscam realizar previsões para as alterações que ocorrerão na distribuição e na importância relativa das doenças das plantas cultivadas. Os fitopatologistas têm intensificado a pesquisa para avaliar em condições controladas os efeitos simulados da atmosfera futura, principalmente da elevação da temperatura

e da concentração dos gases de efeito estufa, sobre as doenças vegetais (TITONE et al., 2008; PUGLIESE et al., 2013; SPARKS et al., 2013; ZHOU et al., 2013). Nesse contexto, têm sido considerados: o conhecimento atual sobre as condições de clima que favorecem cada doença, as normais climatológicas dos últimos 30 anos, e os prognósticos para alterações das variáveis climáticas publicados pelo IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), para determinar a geografia futura das áreas mais favoráveis para cada doença. Em linhas gerais, esses estudos indicam que, aparentemente, doenças que são favorecidas por altas temperaturas poderão aumentar, enquanto outras ficarão restritas a determinadas localidades, ou perderão importância (GHINI; HAMADA, 2008; GHINI et al., 2011). As alterações prognosticadas para a precipitação pluviométrica afetarão a disponibilidade de água no ar, no solo e na superfície das plantas, e de forma diferenciada também afetarão o desenvolvimento das doenças. Os efeitos das mudanças do clima poderão ser diretos sobre os agentes causais das doenças, e afetarão também de forma diferenciada as espécies de plantas que têm diferentes exigências climáticas ideais para o bom desenvolvimento, e limites para extremos das variáveis climáticas. Deve-se considerar de forma particular os efeitos de microclima proporcionado pela altitude, e as condições dos cultivos protegidos, especialmente para a produção de hortaliças, situações que poderão ser diferentes das alterações prognosticadas para o clima futuro. Para projeções sobre as doenças das plantas no futuro é necessário analisar detalhadamente cada patossistema, com suas características de desenvolvimento e exigências climáticas. Nos sistemas complexos, que envolvem vetores, as exigências climáticas do vetor necessitam ser também consideradas.

4.2. A resistência às doenças

As doenças infecciosas das plantas resultam sempre da interação entre dois organismos: a planta hospedeira e o patógeno. A propriedade de resistência ou de suscetibilidade das variedades de plantas, assim como a propriedade de virulência ou avirulência do patógeno para cada variedade em particular são geneticamente controladas, e são herdáveis pelas progênies. Quando a resistência é específica para uma ou para poucas raças do patógeno é denominada resistência vertical, sendo o controle genético do tipo dominante/recessivo. A resistência denominada horizontal é de amplo espectro para todas as raças do patógeno e, nesse caso, além das interações alélicas do tipo dominante/recessivo há efeitos aditivos e interações epistáticas. A resistência do tipo vertical pode ser mais facilmente “quebrada” por variante genética do patógeno, previamente existente ou que surge por mutação, e que pode ser selecionada, ao longo do tempo, por pressão do cultivo da variedade resistente.

Considerando o aspecto quantitativo do controle da resistência, cultivares com resistência monogênica, conferida por um único gene, geralmente mostram resistência completa em diferentes ambientes, porém essa resistência pode ser mais facilmente vencida por uma nova variante do patógeno. Por outro lado, cultivares com resistência poligênica, que corresponde à combinação de diferentes mecanismos de defesa, embora possam ser menos estáveis em diferentes ambientes com relação ao nível de resistência, dificilmente têm essa resistência vencida pelo patógeno. A combinação de ambos os tipos de resistência é sempre desejável no melhoramento para obtenção de cultivares com resistência genética a doenças. O conhecimento do controle genético da resistência à doença contribui para a aplicação dos processos de melhoramento genético visando seleção dessa resistência (VANDERPLANK, 1984; CAMARGO, 1995; AGRIOS, 2005).

4.3. O melhoramento para resistência a doenças no clima futuro

Em princípio, o melhoramento genético para resistência a doenças no clima futuro não será diferente do atual, visto que, há variabilidade genética tanto nas espécies vegetais hospedeiras quanto nos agentes causais de doenças, o que certamente permitirá a ambos a seleção para adaptação às novas condições do clima. Vivendo a espécie hospedeira no clima futuro, viverão também os agentes causais de doenças, embora alguns possam ser mais favorecidos que outros. Certamente serão aplicáveis no futuro os mesmos processos de melhoramento genético aplicáveis na atualidade, mesmo que possam ser futuramente incorporadas novas técnicas da biologia molecular, para aumento da eficiência desses processos.

Porém, quando se pretende antecipar agora a seleção de genótipos resistentes a doenças, para mitigar possíveis efeitos do clima futuro, diversos aspectos devem ser considerados. É essencial conhecer ou determinar antes os efeitos de variáveis climáticas e da concentração de gases de efeito estufa sobre o desenvolvimento do patógeno e da doença em questão e definir, aprioristicamente, o comportamento desse sistema no ambiente futuro. Os efeitos adversos do ambiente futuro sobre a espécie vegetal também necessitam ser prognosticados com base em experimentos atuais de simulação da atmosfera futura. Dessa forma, avaliações de diferentes genótipos da cultura de interesse, submetidos à inoculação com isolados ou com raças de um dado patógeno, nas condições da atmosfera futura, experimentalmente simulada, podem permitir a identificação de fontes de resistência para uso futuro, seja em materiais de banco de germoplasma ou em materiais melhorados.

Por outro lado, considerando a geografia atual e aquela prognosticada para o futuro, para as plantas cultivadas e para as doenças, seria possível realizar hoje nas

regiões quentes do território nacional, o melhoramento de plantas de clima temperado que necessitarão se adaptar ao clima quente. Ainda, nos casos em que o cultivo deverá apenas migrar para determinadas localidades, para atender a suas exigências climáticas, assim como no caso dos cultivos protegidos, o melhoramento genético para resistência a doenças em um cenário de clima futuro terá a mesma importância, e proporcionará à sociedade os mesmos benefícios que proporciona hoje.

5. Referências

ABEBE, T.; GUENZI, A.; MARTIN, B.; CUSHMAN, J. C. Tolerance of mannitol-accumulating transgenic wheat to water stress and salinity. **Plant Physiology**, Bethesda, v. 131, p. 1748–1755, 2003.

AGRIOS, G. N. **Plant pathology**. San Diego: Elsevier, 2005. 922 p.

ALI, N.; DATTA, S. K.; DATTA, K. RNAi in designing transgenic crops. **GM Crops**, v. 1, n. 4, p. 1-7, 2010.

ALMEIDA, G. D.; MAKUMBI, D.; MAGOROKOSHO, C.; NAIR, S.; BORÉM, A.; RIBAUT, J. M.; BÄNZINGER, M.; PRASANNA, B. M.; CROSSA, J.; BABU, R. QTL mapping in three tropical maize populations reveals a set of constitutive and adaptive genomic regions for drought tolerance. **Theoretical and Applied Genetics**, New York, v. 126, p. 583-600, 2013.

BÄNZINGER, M.; EDMEADES, G. O.; BECK, D.; BELLON, M. **Breeding for drought and nitrogen stress tolerance in maize: from theory to practice**. Mexico: CIMMYT, 2000. 69 p.

BLUM, A. **Plant breeding for stress environments**. Boca Raton: CRC Press, 1988. 223 p.

BOHNERT, H. J.; NELSON, D. E.; JENSEN, R. G. Adaptations to environmental stresses. **The Plant Cell**, Rockville, v. 7, p. 1099-1111, 1995.

BOLANOS, J.; EDMEADES, G. O. Eight cycles of selection for drought tolerance in lowland tropical maize: II. Responses in reproductive behavior. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 31, n. 3, p. 253-268, 1993.

BRAY, E. A. Molecular responses to water deficit. **Plant Physiology**, Bethesda, v. 103, p. 1035-1040, 1993.

CABRERA-BOSQUET, F. L.; CROSSA, J.; VON ZITZEWITZ, J.; SERRET, M. D.; ARAUS, J. L. High-throughput phenotyping and genomic selection: the frontiers of crop breeding converge. **Journal of Integrative Plant Biology**, v. 54, n. 5, p. 312-320, 2012.

CAMARGO, L. E. A. Análise genética da resistência e da patogenicidade. In: BERGAMIN FILHO, A.; KIMATI, H.; AMORIN, L. (Ed.). **Manual de fitopatologia**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1995. v. 1, p. 470-492.

CHAPMAN, S. C.; EDMEADES, G. O. Selection improves drought tolerance in tropical maize populations. II. Direct and correlated responses among secondary traits. **Crop Science**, Madison, v. 39, p. 1315-1324, 1999.

CLARK, R. M. Genome-wide association studies coming of age in rice. **Nature Genetics**, New York, v. 42, p. 926-927, 2010.

COLLARD, B. C. Y.; MACKILL, D. J. Marker-assisted selection: an approach for precision plant breeding in the twenty-first century. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B, Biological Sciences**, London, v. 363, p. 557- 572, 2008.

CROWE, J. H.; CROWE, L. M.; LESLIE, S. B.; FISK, E. Mechanisms of stabilization of dry biomolecules in anhydrobiotic organisms. In: CLOSE, T. J.; BRAY, E. A. (Ed.). **Plant responses to cellular dehydration during environmental stress**. Riverside: American Society of Plant Physiologists, 1993. p. 11-20.

EDAE, E. A.; BYRNE, P. F.; MANMATHAN, H.; HALEY, S. D.; MORAGUES, M.; LOPES, M. S.; REYNOLDS, M. P. Association mapping and nucleotide sequence variation in five drought tolerance candidate genes in spring wheat. **The Plant Genome**, v. 6, p. 1-13, 2013.

EDMEADES, G. O.; BOLAÑOS, J.; CHAPMAN, S. C.; LAFITTE, H. R.; BÄNZIGER, M. Selection improves drought tolerance in tropical maize populations: I. Gains in biomass, grain yield, harvest index. **Crop Science**, Madison, v. 39, p. 1306- 1315, 1999.

ELSHIRE, R. J.; GLAUBITZ, J. C.; SUND, Q.; POLAND, J. A.; KAWAMOTO, K.; BUCKLER, E. S.; MITCHELL, S. E. A robust, simple genotyping-by-sequencing (GBS) approach for high diversity species. **PLoS ONE**, San Francisco, v. 6, n. 5, e19379, p. 1-9, 2011.

FAO. **Statistical Yearbook 2013**: world food and agriculture. Rome, 2013. 389 p.

FARRE, G.; RAMESSAR, K.; TWYMAN, R. M.; CAPELL, T.; CHRISTOU, P. The humanitarian impact of plant biotechnology: recent breakthroughs vs bottlenecks for adoption. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 13, p. 219-225, 2010.

FEDOROFF, N. V.; BATTISTI, D. S.; BEACHY, R. N.; COOPER, P. J. M.; FISCHHOFF, D. A.; HODGES, C. N.; KNAUF, V. C.; LOBELL, D.; MAZUR, B. J.; MOLLEN, D.; REYNOLDS, M. P.; RONALD, P. C.; ROSEGRANT, M. W.; SANCHEZ, P. A.; VONSHAK, A.; ZHU, J.-K. Radically rethinking agriculture for the 21st century. **Science**, Washington, v. 327, p. 833-834, 2010.

FOWLER, S.; THOMASHOW, M. F. Arabidopsis transcriptome profiling indicates that multiple regulatory pathways are activated during cold acclimation in addition to the CBF cold response pathway. **Plant Cell**, Rockville, v. 14, n. 8, p. 1675-1690, 2002.

FRITSCHKE-NETO, R.; BORÉM, A. **Plant breeding for abiotic stress tolerance**. Heidelberg: Springer-Verlag, 2012. 172 p.

GHINI, R.; HAMADA, E. (Ed.) **Mudanças climáticas: impactos sobre doenças de plantas no Brasil**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. 331 p.

GHINI, R.; HAMADA, E.; BETTIOL, W. (Ed.). **Impactos das mudanças climáticas sobre doenças de importantes culturas no Brasil**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2011. 356 p.

GODDIJN, O. J.; VERWOERD, T. C.; VOOGD, E.; KRUTWAGEN, R. W.; GRAAF, P. T. de; DUN, K. van; POELS, J.; PONSTEIN, A. S.; DAMM, B.; PEN, J. Inhibition of trehalase activity enhances trehalose accumulation in transgenic plants. **Plant Physiology**, Minneapolis, v. 113, p. 181-190, 1997.

HAMADA, E.; GHINI, R.; MARENGO, J. A.; THOMAZ, M. C. Projeções de mudanças climáticas para o Brasil no final do Século 21. In: GHINI, R.; HAMADA, E.; BETTIOL, W. (Ed.). **Impactos das mudanças climáticas sobre doenças de importantes culturas no Brasil**. Jaguariuna: Embrapa Meio Ambiente, 2011. p. 41-74.

HARE, P. D.; CRESS, W. A. Metabolic implications of stress-induced proline accumulation in plants. **Plant Growth Regulation**, Dordrecht, v. 21, p. 79-102, 1997.

HEFFNER, E. L.; SORRELLS, M. E.; JANNINK, J. L. Genomic selection for crop improvement. **Crop Science**, Madison, v. 49, p. 1-12, 2009.

HESLOT, N.; YANG, H. P.; SORRELLS, M. E.; JANNINK, J. L. Genomic selection in plant breeding: a comparison of models. **Crop Science**, Madison, v. 52, p. 146-160, 2012.

HOSPITAL, F. Marker-assisted backcross breeding: a case study in genotype building theory. In: KANG, M. S. (Ed.). **Quantitative genetics, genomics and plant breeding**. New York: CAB, 2002. p. 135-141.

HU, H.; DAI, M.; YAO, J.; XIAO, B.; LI, X.; ZHANG, Q.; XIONG, L. Overexpressing a NAM, ATAF, and CUC (NAC) transcription factor enhances drought resistance and salt tolerance in rice. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, Washington, v. 103, 12987-12992, 2006.

INGRAM J.; BARTELS, D. The molecular basis of dehydration tolerance in plants. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 47, p. 377-403, 1996.

JANNINK, J. L.; LORENZ, A. J.; IWATA, H. Genomic selection in plant breeding: from theory to practice. **Briefings in Functional Genomics**, v. 9, n. 2, p. 166-177, 2010.

KASUGA, M.; MIURA, S.; SHINOZAKI, K.; YAMAGUCHI-SCHINOZAKI, K. A combination of the Arabidopsis DREB1A gene and stress-inducible rd29A promoter improved drought- and low-temperature stress tolerance in tobacco by gene transfer. **Plant and Cell Physiology**, Kyoto, v. 45, p. 3, p. 346-350, 2004.

KAVI KISHOR, P. B.; HONG, Z.; MIAO, C. H.; HU, C. A. A.; VERMA, D. P. S. Over-expression of d-pyrroline-5-carboxylate synthetase increases proline production and confers osmotolerance in transgenic plants. **Plant Physiology**, Bethesda, v. 25, p. 1387-1394, 1995.

KHAN, M. A.; IQBAL, M.; AKRAM, M.; AHMAD, M.; HASSAN, M. W.; JAMIL, M. Recent advances in molecular tool development for drought tolerance breeding in cereal crops: a review. **Zemdirbyste-Agriculture**, v. 100, n. 3, p. 325-334, 2013.

LIU, Q.; KASUGA, M.; SAKUMA, Y.; ABE, H.; MIURA, S.; YAMAGUCHI-SHINOZAKI, K.; SHINOZAKI, K. Two transcription factors, DREB1 and DREB2, with an EREBP/AP2 DNA binding domain separate two cellular signal transduction pathways in drought- and low-temperature-responsive gene expression, respectively, in Arabidopsis. **Plant Cell**, Rockville, v. 10, n. 8, p. 1391-1406, 1998.

LU, Y.; ZHANG, S.; SHAH, T.; XIE, C.; HAO, Z.; LI, X.; FARKHARI, M.; RIBAUT, J. M.; CAO, M.; RONG, T.; XU, Y. Joint linkage-linkage disequilibrium mapping is a powerful approach to detecting quantitative trait loci underlying drought tolerance in maize. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, Washington, v. 107, p. 19585-19590, 2010.

MATHEWS, K. L.; MALOSETTI, M.; CHAPMAN, S.; MCINTYRE, L.; REYNOLDS, M.; SHORTER, R.; VAN EEUWIJK, F. Multi-environment QTL mixed models for drought stress adaptation in wheat. **Theoretical and Applied Genetics**, Berlin, v. 117, p. 1077-1091, 2008.

MAUREL, C.; REIZER, J.; SCHROEDER, J. I.; CHRISPEELS, M. J. The vacuolar membrane protein - TIP creates water specific channels in *Xenopus oocytes*. **EMBO Journal**, Oxford, v. 12, p. 2241-2247, 1993.

MCKERSIE, B. D.; BOWLEY, S. R.; HARJANTO, E.; LEPRINCE, O. Water-deficit tolerance and field performance of transgenic alfalfa overexpressing superoxide dismutase. **Plant Physiology**, Bethesda, v. 111, n. 4, p. 1177-1181, 1996.

METZKER, M. L. Sequencing technologies: the next generation. **Nature Reviews Genetics**, London, v. 11, p. 31-46, 2010.

MEUWISSEN, T. H. E.; HAYES, B. J.; GODDARD, M. E. Prediction of total genetic value using genome-wide dense marker maps. **Genetics**, Austin, v. 157, p. 1819-1829, 2001.

MIR, R. R.; ZAMAN-ALLAH, M.; SREENIVASULU, N.; TRETOWAN, R.; VARSHNEY, R. K. Integrated genomics, physiology and breeding approaches for improving drought tolerance in crops. **Theoretical and Applied Genetics**, New York, v. 125, p. 625-645, 2012.

MONNEVEUX, P.; RIBAUT, J. M. (Ed.). **Drought phenotyping in crops: from theory to practice**. Texcoco: CGIAR, 2011. 475 p.

MORRIS, G. P.; RAMU, P.; DESHPANDE, S. P.; HASH, C. T.; SHAH, T.; UPADHYAYA, H. D.; RIERA-LIZARAZU, O.; BROWN, P. J.; ACHARYA, C. B.; MITCHELL, S.; HARRIMAN, J.; GLAUBITZ, J. C.; BUCKLER, E.; KRESOVICH, S. Population genomic and genome-wide association studies of agroclimatic traits in sorghum. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, Washington, v. 110, p. 453-458, 2013.

MULLER, J.; BOLLER, T.; WIEMKEN, A. Trehalose and trehalase in plants: recent developments. **Plant Science**, Limerick, v. 112, n. 1, p. 1-9, 1995.

MYLES, S.; PEIFFER, J.; BROWN, P. J.; ERSOZ, E. S.; ZHANG, Z.; COSTICH, D. E.; BUCKLER, E. S. Association mapping: critical considerations shift from genotyping to experimental design. **The Plant Cell**, Rockville, v. 21, p. 2194-2202, 2009.

OKOGBENIN, E.; SETTER T. L.; FERGUSON, M.; MUTEGI, R.; CEBALLOS, H.; OLASANMI, B.; FREGENE, M. Phenotypic approaches to drought in cassava: review. **Frontiers in Physiology**, v. 4, n. 93, p. 1-15, 2013.

OLIVEIRA, E.; SANTOS, J. C.; MAGALHÃES, P. C.; CRUZ, I. Maize bushy stunt phytoplasma transmission is affected by spiroplasma acquisition and environmental conditions. **Bulletin of Insectology**, Bologna, v. 60, n. 2, p. 229-230, 2007.

OLIVEIRA, E.; SOUZA, S. M.; LANDAU, E. C. Transmission of maize bushy stunt phytoplasma by *Dalbulus maidis* leafhopper. **Bulletin of Insectology**, Bologna, v. 64, S153-S154, 2011. Suplemento.

PALIWAL, R.; RÖDER, M. S.; KUMAR, U.; SRIVASTAVA, J. P.; JOSHI, A. K. QTL mapping of terminal heat tolerance in hexaploid wheat (*T. aestivum* L.). **Theoretical and Applied Genetics**, New York, v. 125, p. 561-575, 2012.

PATTERSON, D. T.; WESTBROCK, J. K.; JOYCE, R. J. V.; LINGREN, P. D.; ROGASIK, J. Weeds, insects, and diseases. **Climate Change**, v. 43, p. 711-727, 1999.

PUGLIESE, M.; GULINO, M. L.; GARIBALDI, A. Increasing carbon dioxide and temperature effect on powdery and downy mildew of grapevine under controlled environment. **Acta Phytopathologica Sinica**, v. 43, p. 162, 2013. Suplemento. Edição dos Abstracts do 10º International Congress of Plant Pathology, Beijing, 2013.

RAI, A. C.; SINGH, M.; SHAH, K. Engineering drought tolerant tomato plants over-expressing BcZAT12 gene encoding a C2H2 zinc finger transcription factor. **Phytochemistry**, New York, v. 85, p. 44-50, 2013.

REIMER, R.; STICH, B.; MELCHINGER, A. E.; SCHRAG, T. A.; SØRENSEN, A. P.; STAMP, P.; HUND, A. Root response to temperature extremes: association mapping of temperate maize (*Zea mays* L.). **Maydica**, Bergamo, v. 58, p. 156-168, 2013.

RESENDE, M. D. V. **Matemática e estatística na análise de experimentos e no melhoramento genético**. Colombo: Embrapa Florestas, 2007. 362 p.

RIBAUT, J. M. ; VICENTE, M. C. de ; DELANNAY, X. Molecular breeding in developing countries: challenges and perspectives. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 13, n. 2, p. 213-218, 2010.

RIBAUT, J. M.; RAGOT, M. Marker-assisted selection to improve drought adaptation in maize: the backcross approach, perspectives, limitations, and alternatives. **Journal of Experimental Botany**, London, v. 58, p. 351-360, 2007.

SABADIN, P. K.; MALOSETTI, M.; BOER, M. P.; TARDIN, F. D.; SANTOS, F. G.; GUIMARÃES, C. T.; GOMIDE, R. L.; ANDRADE, C. L. T.; ALBUQUERQUE, P. E. P.; CANIATO, F. F.; MOLLINARI, M.; MARGARIDO, G. R. A.; OLIVEIRA, B. F.; SCHAFFERT, R. E.; GARCIA, A. A. F.; VAN

EEUWIJK, F. A.; MAGALHAES, J. V. Studying the genetic basis of drought tolerance in sorghum by managed stress trials and adjustments for phenological and plant height differences. **Theoretical and Applied Genetics**, Berlin, v. 124, p. 1389-1402, 2012.

SADE, N.; GEBRETSADIK, M.; SELIGMANN, R.; SCHWARTZ, A.; WALLACH, R.; MOSHELION, M. The role of tobacco Aquaporin1 in improving water use efficiency, hydraulic conductivity, and yield production under salt stress. **Plant Physiology**, Minneapolis, v. 152, p. 245-254, 2010.

SAIJO, Y.; HATA, S.; KYOZUKA, J.; SHIMAMOTO, K.; IZUI, K. Over-expression of a single Ca²⁺-dependent protein kinase confers both cold and salt/drought tolerance on rice plants. **Plant Journal**, Oxford, v. 23, p. 319-327, 2000.

SEKI, M.; NARUSAKA, M.; ABE, H.; KASUGA, M.; YAMAGUCHI-SHINOZAKI, K.; CARNINCI, P.; HAYASHIZAKI, Y.; SHINOZAKI, K. Monitoring the expression pattern of 1300 Arabidopsis genes under drought and cold stresses by using a full-length cDNA Microarray. **Plant Cell**, Rockville, v. 13, p. 61-72, 2001.

SHEN, B.; JENSEN, R. G.; BOHNERT, H. J. Mannitol protects against oxidation by hydroxyl radicals. **Plant Physiology**, Minneapolis, v. 115, p. 527-532, 1997.

SHINOZAKI, K.; YAMAGUCHI-SHINOZAKI, K. Molecular responses to drought and cold stress. **Current Opinion in Biotechnology**, London, v. 7, p. 161-167, 1996.

SPARKS, A. H.; DUKU, C.; AUNARIO, J.; NOEL, M.; ZWART, S. J. Spatial modeling of rice yield losses due to bacterial leaf blight and leaf blast in a changing climate. **Acta Phytopathologica Sinica**, v. 43, p. 161, 2013. Suplemento. Edição dos Abstracts do 10^o International Congress of Plant Pathology, Beijing, 2013.

STEELE, K. A.; VIRK, D. S.; KUMAR, R.; PRASAD, S. C.; WITCOMBE, J. R. Field evaluation of upland rice lines selected for QTLs controlling root traits. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 101, p. 180-186, 2006.

THOMASHOW, M. F. Plant cold acclimation: freezing tolerance genes and regulatory mechanisms. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 50, p. 571-599, 1999.

- TTTONE, P.; GULLINO, M. L.; GARIBALDI, A. Effect of global changes on the powdery mildew-grapevine pathosystem: study under controlled environment. **Rivista di Patologia Vegetale**, Padova, v. 90, p. 107, 2008. Suplemento. Edição dos Abstracts do 9º International Congress of Plant Pathology, Torino, 2008.
- TURRAL, H.; BURKE, J.; FAURÈS, J. M. **Climate change, water and food security**: FAO water reports. Rome: FAO, 2011. 174 p.
- VANDERPLANK, J. E. **Disease resistance in plants**. 2. ed. Orlando: Academic Press, 1984. 194 p.
- VARSHNEY, R. K.; GRANER, A.; SORRELLS, M. E. Genomics-assisted breeding for crop improvement. **Trends Plant Science**, Oxford, v. 10, p. 621-630, 2005.
- VARSHNEY, R. K.; BANSAL, K. C.; AGGARWAL, P. K.; DATTA, S. K.; CRAUFURD, P. Q. Agricultural biotechnology for crop improvement in a variable climate: hope or hype? **Trends in Plant Science**, Oxford, v. 16, n. 7, p. 363-371, 2011.
- WAHID, A.; GELANI, S.; ASHRAF, M.; FOOLAD, M. R. Heat tolerance in plants: An overview. **Environmental and Experimental Botany**, Elmsford, v. 61, p. 199-223, 2007.
- XIAO, B.; HUANG, Y.; TANG, N.; XIONG, L. Over-expression of a LEA gene in rice improves drought resistance under the field conditions. **Theoretical and Applied Genetics**, New York, v. 115, p. 35-46, 2007.
- XU, Y.; CROUCH, J. H. Marker-assisted selection in plant breeding: from publications to practice. **Crop Science**, Madison, v. 48, p. 391-407, 2008.
- XUE, Y.; WARBURTON, M. L.; SAWKINS, M.; ZHANG, X.; SETTER, T.; XU, Y.; GRUDLOYMA, P.; GETHI, J.; RIBAUT, J. M.; WANCHEN, L.; ZHANG, X.; ZHENG, Y.; YAN, J. Genome-wide association analysis for nine agronomic traits in maize under well-watered and water-stressed conditions. **Theoretical and Applied Genetics**, New York, v. 126, p. 2587-2596, 2013.
- YAMADA, S.; KATSUHARA, M.; KELLY, W.; MICHALOWSKI, C. B.; BOHNERT, H. A family of transcripts encoding water channels proteins: Tissue-specific expression in the common ice plant. **Plant Cell**, Rockville, v. 7, p. 1107-1112, 1995.

YAMAGUCHI-SHINOZAKI, K.; SHINOZAKI, K. A novel cis-acting element in an Arabidopsis gene is involved in responsiveness to drought, low-temperature, or high-salt stress. **Plant Cell**, Rockville, v. 6, n. 2, p. 251-264, 1994.

YE, C.; ARGAYOSO, M. A.; REDOÑA, E. D.; SIERRA, S. N.; LAZA, M. A.; DILLA, C. J.; MO, Y.; THOMSON, M. J.; CHIN, J.; DELAVIÑA, C. B.; DIAZ, G. Q.; HERNANDEZ, J. E. Mapping QTL for heat tolerance at flowering stage in rice using SNP markers. **Plant Breeding**, Berlin, v. 131, p. 33-41, 2012.

YUE, B.; XUE, W.; XIONG, L.; YU, X.; LUO, L.; CUI K.; JIN, D.; XING Y.; ZHANG, Q. Genetic basis of drought resistance at reproductive stage in rice: separation of drought tolerance from drought avoidance. **Genetics**, Austin, v. 172, p. 1213-1228, 2005.

ZHOU, Y. L.; PIETERSE, C. M. L.; VAN WEES, S. C. M. Effect of different atmospheric CO₂ levels on resistance of Arabidopsis against *Pseudomonas syringae*. **Acta Phytopathologica Sinica**, v. 43, p. 161, 2013. Suplemento. Edição dos Abstracts do 10º International Congress of Plant Pathology, Beijing, 2013.

ZHU, B. C.; SU, J.; CHAN, M. C.; VERMA, D. P. S.; FAN, Y. L.; WU, R. Overexpression of a d-pyrroline-5-carboxylate synthetase gene and analysis of tolerance to water-stress and salt-stress in transgenic rice. **Plant Science**, Limerick, v. 139, p. 41-48, 1998.

ZHU, J.; HASEGAWA, P. M.; BRESSAN, R. A. Molecular aspects of osmotic stress in plants. **Critical Review in Plant Science**, Boca Raton, v. 16, p. 253-277, 1997.

ZIYOMO, C.; BERNARDO, R. Drought tolerance in maize: indirect selection through secondary traits versus genomewide selection. **Crop Science**, Madison, v. 53, p. 1269- 1275, 2013.

Avaliação das Emissões Atmosféricas de Gases de Efeito Estufa na Agropecuária

Arminda M. de Carvalho
Thais Rodrigues Coser
Kleber Worsley de Souza
Bruno Rodrigues Alves
Willian R. D. de Oliveira
Maria Lucrécia Gerosa Ramos
Alexsandra Duarte de Oliveira

1. Introdução

No Brasil, o setor agropecuário contribui com aproximadamente 22% das emissões antrópicas de gases de efeito estufa (GEE's), entretanto, se forem somadas as emissões provenientes das mudanças no uso da terra, incluindo o desmatamento, esse percentual sobe para cerca de 80% (BRASIL, 2009). De acordo com esse cenário, o Brasil passa a ser o quinto maior emissor de GEE's e o desenvolvimento de mecanismos de mitigação torna-se um desafio para o mesmo. O dióxido de carbono (CO_2), óxido nitroso (N_2O) e metano (CH_4) são importantes GEE's. O CO_2 emitido pelos solos representa perdas de carbono da matéria orgânica e de resíduos vegetais aportados, sendo condicionados pelo clima e pelo manejo do solo. O N_2O também é produzido por microrganismos do solo influenciados, principalmente, pelo teor de nitrogênio, manejo da matéria orgânica, umidade do solo e condições climáticas. Para incrementar os estoques de carbono e de nitrogênio no solo é necessária alta produção de biomassa e acúmulo de resíduos vegetais na superfície do solo. O estoque de carbono no solo está diretamente relacionado com o aumento de nitrogênio, proveniente de sistemas com rotação de culturas e plantas de cobertura, principalmente com leguminosas, representando importante prática de mitigação das emissões de GEE's. A fertilização nitrogenada e a decomposição de resíduos vegetais contribuem para as emissões de N_2O e CO_2 , à medida que se incrementam a disponibilidade de N no solo e a atividade de microrganismos e de raízes (CARVALHO et al., 2006; DE KLEIN et al., 2006; HUTH et al., 2010).

O levantamento das emissões de GEE's na pecuária brasileira realizado por Bustamante et al. (2012) entre os períodos de 2003 a 2008, destacou, principalmente, as seguintes fontes emissoras de GEE's: 1) desmatamento resultando em estabelecimento de pastagens e posterior queima da vegetação derrubada; 2) queima do pasto e; 3) fermentação entérica bovina. As emissões totais associadas à pecuária no Cerrado variaram entre 229 e 231 Mt CO₂eq, e no resto do país, de 84 a 87 Mt CO₂eq. Os autores também observaram que o conjunto completo das emissões provenientes da pecuária é responsável por aproximadamente metade de todas as emissões brasileiras (estimada em cerca de 1,055 Mt de CO₂eq em 2005). Portanto, o potencial de redução das emissões de gases de efeito estufa proporcionados pela pecuária brasileira pode ser alto, e se bem conhecido, constitui uma oportunidade para a mitigação das emissões no Brasil.

A emissão de metano representa perda de carbono e de energia pelo animal (HOLTER; YOUNG, 1992), assim, a redução na emissão desse gás, além de trazer benefícios ao meio ambiente, proporciona maior produtividade pelo animal. Dentre as alternativas para a mitigação de gases de efeito estufa pela pecuária destacam-se a melhoria da qualidade da dieta pela utilização de forragens de melhor valor nutritivo e manejo adequado da pastagem (DERAMUS et al., 2003; LASSEY, 2007). A criação de bovinos em pastagens bem manejadas e produtivas implica na melhoria do desempenho produtivo e dos coeficientes técnicos, como a taxa de natalidade, redução da idade ao abate e redução da mortalidade. Esses parâmetros também podem reduzir proporcionalmente as emissões de metano por ruminantes. De acordo com Barioni et al. (2007), o aumento da taxa de natalidade de 55% para 68%, a redução na idade de abate de 36 para 28 meses e a redução na mortalidade até 1 ano de 7% para 4,5%, permitiria que em 2025, a produção de carne no Brasil aumentasse em 25,4% e as emissões de metano em relação ao equivalente carcaça produzido fossem reduzidas em 18%. Em resumo, toda ação que melhore a eficiência do sistema de produção reduz proporcionalmente a emissão de metano, uma vez que mais produto (carne, leite, lã, etc.) será produzido em relação aos recursos utilizados.

O investimento na recuperação de pastagens degradadas seria outra estratégia mitigadora de impacto (IPCC, 2006). Pastagens (nativas e cultivadas) representam a segunda maior fonte potencial global de seqüestro de carbono (C), com capacidade de drenar da atmosfera 1,7 bilhão de toneladas por ano, ficando atrás somente das florestas, cuja capacidade estimada chega a 2 bilhões de toneladas de C por ano (FAO, 2006). O uso de práticas de manejo adequadas em pastagens, sobretudo de reposição da fertilidade do solo, possibilita o acúmulo de C no solo a uma taxa de 0,3 t C ha⁻¹

ano⁻¹ (IPCC, 2000), o que corresponde aproximadamente à mitigação de 1,1 t CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹. Esse valor, bastante conservador, seria suficiente para anular cerca de 80% da emissão anual de metano de um bovino de corte adulto, estimada em 57 kg (IPCC, 1996), que equivale a 1,42 t CO₂ (57 kg de CH₄ ano⁻¹ x potencial de aquecimento global do gás (PAG=25) correspondendo a 1,42 t CO₂eq).

A inclusão do componente arbóreo em pastagens aumentaria significativamente esse efeito mitigador de carbono atmosférico, com potencial para anular ou mesmo deixar o balanço de carbono positivo nesses sistemas (captações de carbono equivalente maiores do que as emissões). Dessa forma, a associação de pastagens bem manejadas com o componente arbóreo, por meio da integração lavoura-pecuária-floresta (iLPF), seria uma estratégia mitigadora de grande impacto para os sistemas de produção agropecuários.

Aproximadamente, metade do bioma Cerrado foi incorporada ao processo produtivo por meio do desmatamento, sendo que as pastagens, as culturas graníferas (milho, soja, feijão) e mais recentemente, a cultura de cana-de-açúcar ocupam a maior parte dessas áreas atualmente (SANO et al., 2008). A temática sobre mudanças climáticas globais e o papel dos gases de efeito estufa (GEE's) tomaram maiores proporções na década de 1990 e início da década de 2000, quando foram quantificados aumentos expressivos nas concentrações na atmosfera do gás carbônico (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O), resultantes da atividade antrópica (LAL, 2004).

O setor agrícola brasileiro contribui com aproximadamente 22% das emissões antrópicas de GEE's e, considerando que as mudanças no uso e manejo do solo podem causar alterações no ciclo do carbono, o papel da agropecuária pode ser ainda maior (CERRI et al., 2006). Os gases emitidos pelos solos representam perdas na matéria orgânica e nos fertilizantes aportados, sendo as emissões condicionadas pelo clima e pelo manejo do solo e das culturas (CARVALHO et al., 2009). No caso das pastagens, estima-se que entre 70 e 80% da área apresenta baixa produtividade, contribuindo para a diminuição dos aportes de carbono no solo e, conseqüentemente, para a diminuição da produtividade animal, acarretando em menores taxas de desfrute e em maiores perdas de metano por unidade de carne produzida (VILELA et al., 2011).

Uma das estratégias para mitigar as emissões é a intensificação ecológica dos sistemas agrícolas e pecuários. Conceitualmente, considera-se que os sistemas integrados são sistemas de produção ecologicamente Intensivos e de alto valor ambiental (LEMAIRE et al., 2014). A intensificação ecológica significa conceber uma agricultura produtiva, econômica em insumos externos e menos nociva ao meio

ambiente. Neste modelo, busca-se criar condições para que os mecanismos naturais dos ecossistemas sejam intensificados, em vez de subsidiar diretamente a produção com insumos. Isso significa, eliminar ou reduzir as operações de preparo do solo e dessa forma otimizar o funcionamento do mesmo; usar plantas de cobertura e assim favorecer o desenvolvimento de minhocas e fixar o carbono no solo; praticar o pousio melhorado para maximizar o período de fotossíntese, a produção de biomassa e a fixação biológica do nitrogênio. Assim, ao atender alguns destes preceitos, os sistemas agropecuários integrados, baseados no plantio direto, na rotação de culturas, no uso de plantas de cobertura em suas diferentes modalidades de integração (lavoura-pecuária, lavoura-floresta e pecuária-floresta), podem representar importante estratégia de mitigação das emissões de GEE's.

O sistema plantio direto (SPD) com rotação de culturas e uso de plantas de cobertura tem sido considerado como uma alternativa promissora em detrimento aos sistemas agrícolas convencionais, contudo, os resultados encontrados na literatura sobre o papel do SPD no sequestro de carbono são ainda controversos. Para que este sistema seja sustentável, é fundamental um bom manejo do solo, associado às práticas conservacionistas de caráter mecânico, edáfico e vegetativo, dentre as quais, a rotação de culturas e o uso de plantas de cobertura são extremamente importantes. E, mesmo conhecendo-se os inúmeros benefícios da sucessão de culturas com uso de plantas de cobertura, essas práticas são pouco utilizadas em SPD no Cerrado devido à limitação de oferta hídrica, já que nesse bioma é comum um período de 5 a 6 meses sem a ocorrência de chuvas. Além disso, existe uma enorme dificuldade em sincronizar o cultivo das plantas de cobertura com as épocas de semeadura e os sistemas de manejo (rotação, sucessão, consórcio) das culturas comerciais. Uma das estratégias para a melhoria na qualidade do plantio direto é a integração com pastagens que tem potencial para uso como cobertura de solo (VILELA et al., 2011). Considerando que a área total cultivada com soja e milho no Brasil é de aproximadamente 37 milhões de hectares, e dos quais 70% já utilizam o sistema plantio direto, fica claro que há um enorme potencial para a melhoria desse sistema.

As mudanças de uso e de práticas de manejo do solo, visando o aumento do estoque de carbono no solo, representam uma estratégia importante para a redução da concentração de CO₂ atmosférico. Existe ainda uma lacuna sobre os resultados da pesquisa sobre a efetividade desses sistemas de manejo na retirada do CO₂ da atmosfera e por quanto tempo ele é mantido no ecossistema. Os sistemas de manejo do solo devem ter como objetivo, além da produção primária de qualidade, o aumento dos teores de matéria orgânica do solo. O plantio direto, aliado a práticas

como a rotação de culturas e pastagens é apontado como a forma de manejo do solo mais adequada para conciliar produtividade com sustentabilidade (SALTON, 2005).

Os estoques atuais de carbono orgânico do solo (COS) e nitrogênio (N) são definidos pelos estoques originais e pelos diferentes usos e manejos do solo, os quais afetam os fluxos entre os compartimentos do C no solo, na vegetação, na água e na atmosfera (LAL, 2002). Na sua condição natural, os solos apresentam grande variabilidade espacial e temporal de seus atributos. A complexidade desta situação é aumentada pelas mudanças de uso do solo e práticas de manejos na atividade agrícola. O estoque de COS na camada superficial (0-30 cm) é de aproximadamente 800 Pg (1 Pg = 10¹⁵ g), quantidade considerada similar àquela presente na atmosfera (CERRI et al., 2006). Entretanto, as mudanças no uso e manejo do solo podem propiciar alterações no estoque de COS e, como consequência, aumentar as emissões dos gases de efeito estufa para a atmosfera (CARVALHO et al., 2009).

O uso de plantas leguminosas com capacidade de fixar nitrogênio do ar atmosférico e de outras espécies vegetais com altos aportes de N podem promover reduções nas quantidades de fertilizantes nitrogenados aplicados e contribuir para a mitigação das emissões de GEE's, como por exemplo o CO₂ e o N₂O. Por outro lado, poderá também favorecer as emissões de N₂O, já que o nitrogênio estocado ou acumulado pelo uso de leguminosas, dependendo das condições bióticas e abióticas do solo, retornará para a atmosfera na forma de N₂O (ROCHETTE; JANZEN, 2005; HUTH et al., 2010). Mas, como uma prática alternativa e complementar ao fornecimento de nitrogênio por meio de fertilizantes, o uso destas plantas deverá ser favorável à mitigação de N₂O (CARVALHO, 2005).

Para melhor predição dos efeitos das mudanças no uso da terra sobre a dinâmica do carbono do solo e emissões de GEE's, tem sido recomendado a formulação de políticas ambientais, agrícolas, sociais e econômicas, e o uso de métodos analíticos, e de simuladores computacionais. Estes simuladores otimizam o entendimento da dinâmica do C do solo e são úteis no planejamento do uso da terra, na quantificação dos efeitos das mudanças ambientais, e no desenvolvimento de estratégias que auxiliem na mitigação dos efeitos negativos dessas mudanças (LEITE et al., 2004).

2. Produção de N₂O e NO do solo e co-variáveis

Os óxidos de nitrogênio são produtos das reações de nitrificação e desnitrificação (Figura 1). A nitrificação produz relativamente mais NO do que N₂O,

e a desnitrificação é o processo dominante na produção de N_2O (DAVIDSON et al., 1993). A nitrificação é favorecida pela presença de NH_4^+ , por condições adequadas de aeração do solo e pela maior ciclagem de nitrogênio no sistema (DAVIDSON et al., 2000). O pH do solo também é uma variável importante, pois as taxas de nitrificação aumentam com a diminuição da acidez do solo, ou seja, com aumento do pH. Bactérias nitrificadoras como *Nitrosomonas* e *Nitrosospira* são os principais gêneros que oxidam NH_4^+ a NO_2^- , e as bactérias do gênero *Nitrobacter*, são responsáveis pela segunda etapa do processo, que tem como produto o NO_3^- . Esses organismos são favorecidos por condições de pH superiores a 5,0 o que é comum em áreas agrícolas, normalmente sob aplicação de calcário. Solos bem drenados favorecem a nitrificação por ser um processo aeróbico, porém a umidade e temperatura são fatores importantes para otimizá-lo (PAUL; CLARK, 1996).

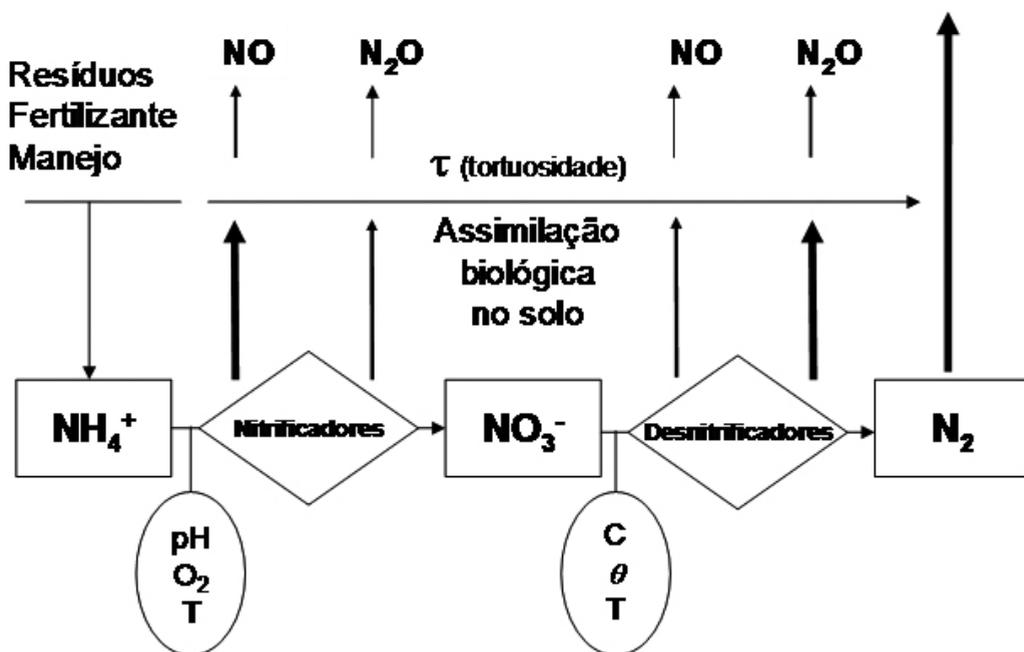


Figura 1. Modelo conceitual sobre a produção de N_2O no solo e variáveis relacionadas

Fonte: Davidson et al. (2000).

O nitrato (NO_3^-) pode se acumular no solo quando produzido além da demanda de microrganismos e plantas, potencializando as reações de desnitrificação (Matson et al., 1999). A umidade do solo, ou o seu grau de saturação, é fundamental nesse processo, tal como foi demonstrado por Linn e Doran (1984). O processo

de desnitrificação depende da difusão do O_2 da atmosfera para o interior do solo, e sempre que a difusão é restringida e o O_2 existente é consumido, formam-se os microsítios anaeróbicos no solo. Dessa forma, a proporção dos gases que escapa durante o processo de desnitrificação também vai depender do caminho que terão que percorrer até chegar à superfície, ou da tortuosidade do solo. Nas condições em que o solo está altamente saturado com água, próximo a 80% do volume de poros, e a tortuosidade é elevada, diminuem as chances de fluxos de NO do solo, sendo N_2O e N_2 as formas predominantes emitidas para a atmosfera. Essa situação se inverte claramente quando a saturação dos poros com água é baixa, normalmente inferior a 50% (DAVIDSON et al., 1993; DOBBIE et al., 1999). A temperatura também é uma variável essencial nas emissões de N_2O do solo. Para muitos processos biológicos, observam-se valores de Q_{10} (fator de aumento da velocidade de uma reação em função de um aumento de 10 °C na temperatura) da ordem de 2 a 3, sendo esta faixa mais larga para a produção de N_2O no solo (DOBBIE et al., 1999; SKIBA; SMITH, 2000), indicando que pequenas variações de temperatura do solo têm grandes efeitos nas emissões desse gás.

Quando a disponibilidade de NO_3^- e NO_2^- no solo é alta, o carbono orgânico é o fator limitante às reações de desnitrificação (DRURY et al., 1991; MCKENNEY et al., 1995). Um estudo realizado em condições controladas, com Latossolo distrófico da região de Piracicaba, SP, que não recebia resíduos vegetais, mostrou que quando o solo foi umedecido até aproximadamente 50% da saturação dos poros com água e fertilizado com N, somente apresentou altos fluxos de N_2O após tratamento com solução de açúcar (FLORES et al., 2007). Esses resultados indicam que havia limitação de fonte redutora no solo, que é fundamental para o processo de desnitrificação.

3. Emissões Atmosféricas de Gases de Efeito Estufa em Sistemas de Produção

3.1. Sistemas agropecuários

No Brasil, a quantificação das emissões de N_2O de solos agrícolas é recente, e tem sido realizada em grandes culturas, como a de cana-de-açúcar (CARMO et al. 2013; PAREDES et al., 2013), soja e milho (CARVALHO et al., 2014), além de outros estudos focados em pastagens (SORDI et al., 2013) e capim-elefante para produção de energia (MORAIS et al., 2013). Em geral, o objetivo destes estudos é a avaliação de insumos como fertilizantes e resíduos, com vistas a melhorar os fatores de emissão direta de N_2O para serem usados no país (ALVES et al., 2012). O fator de emissão de N_2O permite estimar a quantidade de N_2O emitida de determinada fonte de N, sendo expresso em $kg\ N-N_2O\ kg^{-1}\ N$ da fonte, ou mesmo em termos percentuais.

Os fatores de emissão estão associados ao uso da diretriz metodológica do Painel Internacional de Mudanças Climáticas (IPCC) para as estimativas de emissão de N_2O de solos agrícolas para fins de inventário (IPCC, 1996, 2006).

Desde 2004, a cultura da soja vem sendo plantada em área superior a 20 milhões de hectares, dos quais 80% se encontram na região Sul e Centro Oeste do país. Na maioria das áreas, a cultura não recebe fertilização nitrogenada, e a contribuição da fixação biológica de nitrogênio (FBN) para a planta se encontra entre 70 e 80% (ALVES et al., 2003). Por outro lado, leguminosas para adubação verde são pouco cultivadas na grande área de produção de grãos, embora sejam recomendadas para as rotações de culturas pelo seu potencial de adição de N derivado da FBN ao sistema, processo fundamental para o seqüestro de C no solo (SISTI et al., 2004).

Na 1ª. Comunicação Nacional sobre emissões de N_2O pela agricultura brasileira, a FBN representou 26,4 Gg, ou 5% das emissões deste gás de solos agrícolas. Essas estimativas foram baseadas na metodologia proposta pelo IPCC (1997), que considerava que 1,25% do N derivado do processo de FBN era emitido como N_2O . Porém, pela falta de evidência de que o N_2O fosse produzido pela FBN, esta não é mais considerada uma fonte direta de N_2O para a agricultura (IPCC, 2006).

Independente do local de estudo, os fluxos de N_2O não mostraram relação com a FBN associada à cultura, reforçando a conclusão do IPCC (2006) de desconsiderar este processo biológico como fonte direta de N_2O . As maiores taxas de FBN ocorrem no período próximo da floração até a formação de vagens (ALVES et al., 2002), e durante estes estádios de desenvolvimento da planta, deveriam ocorrer altos fluxos de N_2O com valores próximos a $100 \text{ mg N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, o que não foi observado nos estudos desenvolvidos por Jantalia et al. (2008). Os resultados encontrados mostram que os maiores fluxos de N_2O ocorrem no início e final de ciclo da cultura da soja, e estes estão associados à decomposição de resíduos vegetais, especialmente na fase final, quando ocorre a senescência de folhas e nódulos.

A cultura do milho é a segunda mais plantada no país, ocupando uma área de aproximadamente 12 milhões de hectares, considerando-se a primeira e a segunda safra (safrinha). A aplicação de fertilizante nitrogenado é fundamental para a garantia de altas produtividades, sendo a ureia a fonte de N mais utilizada no país. Essas aplicações de fertilizantes nitrogenados provocam aumentos significativos nas emissões de N_2O do solo (IPCC, 2006).

A fertilização do arroz resultou em grandes fluxos de N_2O com a adição de 60 kg N ha^{-1} de ureia em cobertura (Figura 2) a qual coincidiu com ocorrência de fortes chuvas (COSTA et al., 2007). No entanto, este efeito da fertilização ficou restrito aos primeiros cinco dias após a sua aplicação. Com a integração dos fluxos de N_2O para

o período de 133 dias, 354 g N-N₂O ha⁻¹ foram produzidos no tratamento fertilizado com ureia, enquanto 235 g N-N₂O ha⁻¹, no tratamento controle, não fertilizado. Dessa forma, 119 g N-N₂O ha⁻¹ foram produzidos pela adição de 90 kg N ha⁻¹ na forma de ureia na cultura do arroz, o que representaria um fator de emissão para o fertilizante, nas condições estudadas, de 0,13%. Resultado semelhante foi encontrado por Metay et al. (2007) na mesma localidade e para a mesma cultura, mostrando que a produção de NO também foi elevada, confirmando a condição mais favorável à nitrificação nos Latossolos de regiões mais quentes (tropicais).

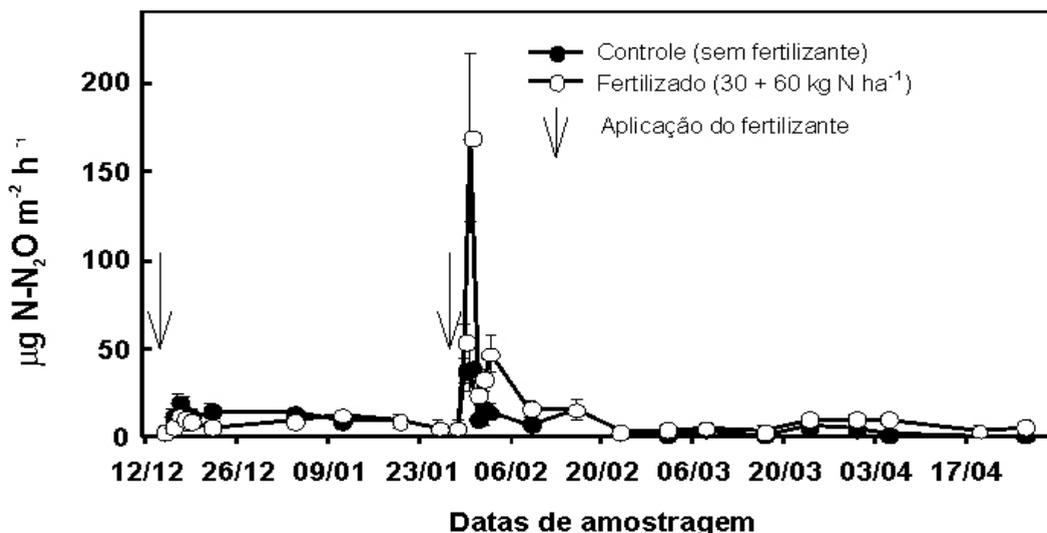


Figura 2. Fluxos de N₂O na cultura do arroz de terras altas sob plantio direto em Latossolo de Santo Antônio de Goiás, GO.

Fonte: Costa et al. (2007).

A decomposição de resíduos vegetais é um dos processos considerados pelo IPCC (2006) como responsáveis pelas emissões diretas de N₂O do solo. Nesse caso, o uso de leguminosas para a adubação verde ou cobertura de solo, que introduz altas quantidades de N no solo, pode significar maiores emissões de N₂O. Um único estudo sobre emissões de gases de nitrogênio feito com leguminosas para cobertura do solo, em plantio direto ou com incorporação dos resíduos vegetais, foi conduzido em Planaltina, sob Latossolo cultivado com milho, na região dos Cerrados. A presença dos resíduos das leguminosas, não foi suficiente para produzir altos fluxos de N₂O. Porém, foram obtidos fluxos elevados de NO (Tabela 1), sugerindo que nas condições de clima e solo do experimento, a nitrificação era o processo responsável pela produção de óxidos de nitrogênio (CARVALHO, 2005).

Tabela 1. Emissões anuais de NO em Latossolo Vermelho Amarelo argiloso cultivado com milho em sistema plantio direto e com incorporação dos resíduos de duas leguminosas e vegetação espontânea.

Plantas de cobertura	Sistema de preparo do solo	Emissão NO (g N ha ⁻¹)*
Mucuna-cinza	Plantio direto	80
Crotalária juncea	Plantio direto	60
Vegetação espontânea	Plantio direto	60
Mucuna-cinza	Incorporação	60
Crotalária juncea	Incorporação	70
Vegetação espontânea	Incorporação	40

Fonte: adaptado de Carvalho (2005).

Os fatores de emissão encontrados para algumas culturas fertilizadas, sob diferentes manejos e tipos de solos, variaram de 0,03 a 0,40%, com um valor médio de 0,16% (referência bibliográfica = IPCC, 2006). Esses números foram estimados considerando-se que todo o N adicionado permaneceu no local, ou seja, assumindo-se que não existem perdas. Como essas perdas sempre ocorrem, pode-se dizer que os fatores de emissão estão subestimados. De acordo com o IPCC (2006), a volatilização de amônia e a lixiviação de nitrato são vias de perda que devem ser consideradas nos cálculos de emissões de N₂O. A primeira deverá ser estimada em 10% do N aplicado, e a última, em 30%. O cálculo dos fatores de emissão foi feito pela razão das emissões de N₂O dos fertilizantes e o total de N aplicado, entretanto, seria importante utilizar no denominador somente a quantidade de N que permaneceu no sistema, descontando-se as perdas. Essa é a maior limitação para a correta estimativa dos fatores de emissão em solos brasileiros. Não existem dados na literatura sobre perdas de N por lixiviação de nitrato, e são poucas as informações sobre volatilização de amônia de fertilizantes, tornando muito difícil e incerto o estabelecimento de um valor médio global para se estimar quanto do N do fertilizante aplicado está sujeito a perdas por esses processos. Lara-Cabezas et al. (1997) mediram perdas da ordem de 70% do N na forma de ureia aplicada em cobertura sob plantio direto, enquanto Hungria et al. (2006) mediram perdas da ordem de 15 a 25% do N adicionado como ureia. Esses poucos dados sugerem maiores perdas de N por volatilização de amônia em sistema plantio direto quando a ureia é aplicada na superfície, mas quando o fertilizante é enterrado, as perdas por volatilização de amônia são mínimas (LARA-CABEZAS et al., 1997). Em um estudo com fertilizante marcado com o isótopo ¹⁵N, Alves et al. (2006) mostraram que em Latossolo Vermelho de Cerrado, a aplicação de sulfato de amônio nas culturas do milho e algodão resultou em perdas totais de N do fertilizante da ordem de 30%, porém, essa fonte é pouco representativa para os sistemas de produção de grãos do país. Além disso,

as perdas por volatilização de amônia do sulfato de amônio são bem menores do que as observadas para uréia (LARA-CABEZAS et al., 1997). A falta de informação sobre essas perdas faz com que os valores recomendados pelo IPCC (2006) sejam os melhores a serem utilizados. Assim, considerando-se que somente 60% do N aplicado ficam no sistema (IPCC, 2006), o fator de emissão médio, anteriormente estimado em 0,16%, medido seria de 0,26, próximo do limite inferior do intervalo de incerteza proposto pelo IPCC para esse parâmetro (0,3 a 3%). Porém, quatro vezes menor do que o valor médio de 1% usado em inventários. Por outro lado, considerando-se somente os dados obtidos em Latossolos, que representam a maioria das situações avaliadas, o fator de emissão direta médio, corrigido para perdas de N, seria de 0,17, seis vezes menor que o proposto pelo IPCC (2006).

É importante mencionar que o N perdido pode se depositar em outro local, e após transformação no solo, ainda contribuir para emissões de N₂O, devendo ser contabilizado como emissão indireta (IPCC, 2006).

A modernização da agropecuária no Cerrado resultou em aumento de produtividade, gerado por aplicações de altas doses de fertilizantes e a expansão para novas áreas, incrementando o desmatamento que, a longo prazo, pode potencializar os agroecossistemas como fontes de GEEs. Para minimizar os impactos negativos, a região vem adotando novas tecnologias, como o Sistema Plantio Direto, a Integração Lavoura-Pecuária e Lavoura-Pecuária-Floresta, permitindo que os produtores possam incrementar a produtividade juntamente com a qualidade do ambiente. Assim, esses sistemas integrados geram um ambiente diversificado, criando melhores condições para a microbiota do solo e contribuem para a mitigação dos gases de efeito estufa (BAGGS; PHILLIPOT, 2010).

O solo com pastagem implantada sob o sistema de integração lavoura-pecuária (ILP) na Embrapa Cerrados apresentou os maiores fluxos em relação à área de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), com a maioria dos picos mostrando valores acima de 10 $\mu\text{g N m}^{-2} \text{h}^{-1}$ e atingindo até 40 $\mu\text{g N m}^{-2} \text{h}^{-1}$. Essas emissões mais intensas podem ser explicadas devido à maior produção de biomassa vegetal na área de ILP, onde não ocorreu o sombreamento das árvores de *Eucalyptus urograndis*. Com maior produção de biomassa, a deposição de material vegetal sobre o solo se torna mais intensa, aumentando, assim, o aporte de resíduos em processo de decomposição, conseqüentemente, a disponibilidade de N para a microbiota do solo (BAGGS et al., 2000). O fluxo de 40 $\mu\text{g N m}^{-2} \text{h}^{-1}$ medido no mês de novembro no Sistema ILP, provavelmente, deve-se ao acúmulo de chuva que ocorreu depois de um longo período de estresse hídrico. Os picos de emissão no Sistema ILP correspondem aos maiores teores de N na forma de nitrato no solo, indicando que ocorreu nitrificação de N na forma orgânica. As emissões de óxido nitroso no Cerrado Nativo são, em

sua maioria, aproximadamente zero, e em alguns casos, possuem valores negativos (Figura 3).

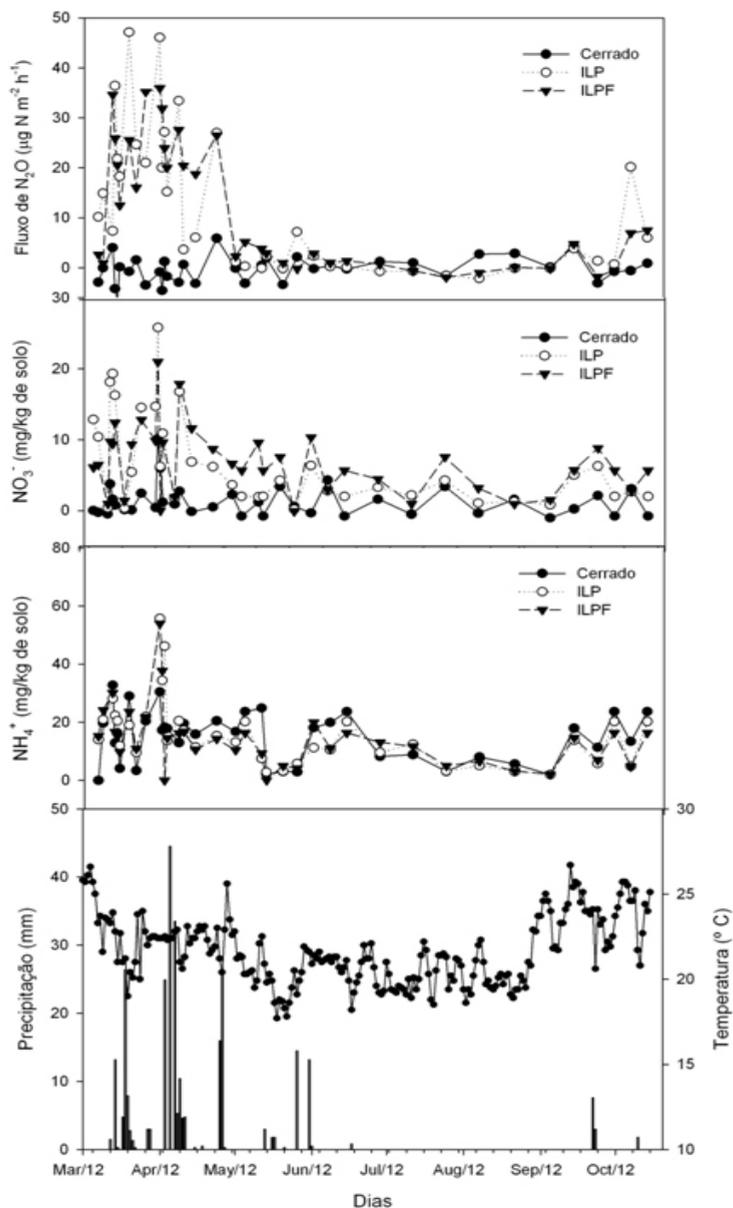


Figura 3. Emissão de N₂O, teores de NO₃⁻ e NH₄⁺ na camada de 0-5 cm do solo e precipitação pluviométrica, no período de março a outubro de 2012.²

² Trabalho de autoria de Arminda M. Carvalho, Embrapa Cerrados (dados não publicados).

Em sistemas de consórcio de milho e forrageiras no Cerrado e sob Latossolo os fluxos de N_2O imediatamente e até cinco dias após a aplicação de nitrogênio em cobertura (dia 11/01/2012) tenderam a aumentar em estudo desenvolvido por Coser et al. (2013). Neste mesmo estudo, e para o mesmo período, os maiores e menores fluxos de N_2O observados foram nos tratamentos de milho consorciado com *P. maximum* cv. Aruana ($57 \mu g m^{-2} h^{-1}$) aos cinco dias após a aplicação de N, e o milho exclusivo ($5 \mu g m^{-2} h^{-1}$) um dia após a aplicação de N, respectivamente. O milho consorciado com *P. maximum* apresentou durante os seis dias após a primeira cobertura de N os maiores fluxos de N_2O , seguido do tratamento de milho em consórcio com *Brachiaria humidicola*. Segundo os autores do trabalho, esses resultados indicam que, provavelmente, as gramíneas forrageiras acumularam (imobilizaram) nitrogênio, e este, foi então disponibilizado (mineralizado) após sua dessecação e adição de fertilizante nitrogenado ao solo, o qual promoveu redução na razão C/N do solo, resultando em maior emissão de N_2O (CARVALHO et al., 2010). O carbono presente nessas gramíneas forrageiras deve ser de menor recalcitrância, ou seja, associado a compostos menos lignificados (CARVALHO et al., 2011; CARVALHO et al., 2012). Além disso, estudos mostram que a capacidade de desnitrificação do solo aumenta com o incremento de carbono mais lábil no solo (DRURY et al., 1991). Para estes mesmos sistemas de manejo, Coser et al. (2012) observaram que o carbono orgânico particulado (quando analisado pelo método Mebius) foi superior nos tratamentos com milho consorciado em relação ao milho exclusivo.

3.2. Sistemas de produção de hortaliças

A produção de hortaliças normalmente requer aplicação de doses elevadas de N na forma de fertilizantes sintéticos ou adubos orgânicos de origem animal e vegetal, além de serem comuns os sistemas de produção que recebem irrigação (ANDRADE JUNIOR et al., 2011). Assim, a maior disponibilidade de N no solo e também de fontes de carbono lábeis, juntamente com o efeito da água, que reduz temporariamente a aeração do solo, são indicativos de que as emissões de N_2O em sistemas de produção de hortaliças podem ser de grande relevância.

As emissões de N_2O de solos cultivados com hortaliças estão relacionadas às práticas utilizadas nos sistemas de produção. Compostos orgânicos, esterco e adubos verdes correspondem a importantes insumos comumente usados para fornecimento de N para as plantas, além dos fertilizantes sintéticos. As diferentes combinações entre esses insumos e com outras práticas para manejo do solo e da água representam grande desafio para se trabalhar com fatores de emissão de N_2O para as diferentes espécies utilizadas nos sistemas de produção, ou mesmo para simples caracterização do impacto desses sistemas nas emissões de N_2O .

Algumas informações existentes sobre as emissões de N_2O em sistemas de produção de hortaliças foram obtidas em Seropédica, no Rio de Janeiro, em sistema orgânico de produção (JANTALIA et al., 2005). O monitoramento de fluxos de N_2O foi feito em diferentes áreas da fazenda de produção, compreendendo áreas de pastagem de capim colômbio (não havia animais na área), de sistema consorciado de banana e leguminosas, de sistema consorciado de cafeeiro com leguminosas, e de produção de hortaliças com o uso de esterco e adubação verde com mucuna cinza (*Mucuna pruriens*). As emissões de N_2O do solo foram acompanhadas por um período relativamente curto, porém foi possível observar que a ocorrência de chuvas elevou os fluxos de N_2O do solo, sendo o efeito mais pronunciado na seguinte ordem: canteiro de hortaliça > cafeeiro > bananeiras > pastagem. O efeito da chuva na saturação dos poros do solo com água foi mais pronunciado na área do cafeeiro, seguido da área com canteiro de hortaliças, não sendo muito diferentes entre as duas últimas áreas. Com exceção da área de pastagem, as demais apresentavam concentrações mais elevadas de NO_3^- no solo. Outras variáveis, como a textura, o pH do solo e razão C:N foram avaliadas nessas áreas para que fosse possível a aplicação de um modelo de avaliação ambiental (XAVIER, 1992) na mesma fazenda, mas em outra área de canteiros usada para produção de hortaliças. A área foi georreferenciada (Figura 4A) e um mapa com o potencial de produção de N_2O foi gerado (Figura 4B).

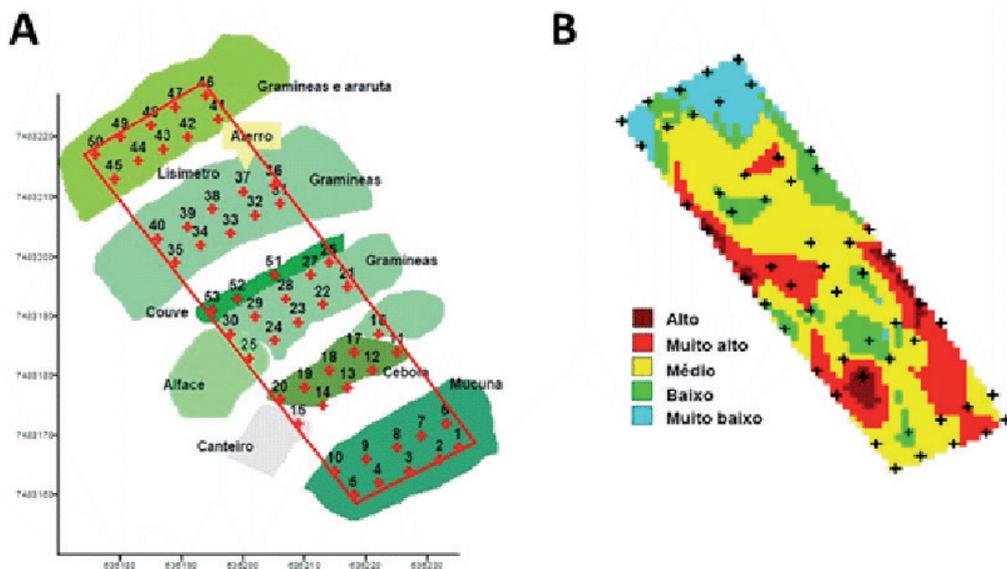


Figura 4. Pontos de amostragem de variáveis de solo relacionadas às emissões de N_2O do solo (A), e mapa com diferentes expectativas de emissão de N_2O em função das condições do solo sob diferentes usos para produção de hortaliças.

Fonte: adaptado de Jantalia et al. (2005).

As áreas com tons mais escuros (Figura 4B) apresentavam os mais altos potenciais de produção de N_2O , associados aos canteiros onde, na ocasião, havia cultivo de hortaliças. Os canteiros em pousio, onde proliferavam gramíneas, apresentaram os menores potenciais de emissão de N_2O . As condições de solo que favoreciam a maior saturação do espaço poroso do solo com água foram determinantes para as estimativas de potencial de emissão de N_2O feitas por Jantalia et al. (2005), mas o fato de haver intensa utilização de esterco e da adubação verde nos canteiros cultivados foi determinante para o resultado encontrado. Como mencionado, a limitação de oxigênio associada à disponibilidade de N do solo e de fontes lábeis de C são fundamentais para a produção de N_2O (SMITH et al., 2003).

Existe ainda muita discussão sobre a indução de produção de N_2O do solo pelas fontes de N aplicadas para fertilizar as lavouras. Alves et al. (2012) compilaram diversos resultados relacionados ao uso de fertilizantes nitrogenados, especialmente ureia, e concluíram que resultariam em fator de emissão médio de 0,0031 kg N- N_2O kg⁻¹ de N aplicado ao solo, aproximadamente um terço do que é considerado como um valor médio global pelo IPCC (2006). Esta estimativa apresentou elevada incerteza associada à influência das variáveis climáticas, edáficas e do manejo de cada local, onde as medições foram realizadas.

Em sistemas de produção de hortaliças, os fertilizantes sintéticos, material vegetal usado como adubo verde e esterco são fontes de N_2O , e o fato de não se conhecerem bem como se comportam em relação à produção deste gás no solo, faz com sejam considerados semelhantes, o que significa que as emissões induzidas por cada um são estimadas com um único fator de emissão (IPCC, 2006). Tendo em vista a grande diferença na disponibilidade de N do solo após o uso dessas diferentes fontes de N (SILVA; MENEZES, 2007), é muito importante que se realizem estudos para melhor avaliar seus efeitos na produção de N_2O .

Santos (2013) quantificou os fluxos de N_2O de diferentes fontes de N usadas em sistema de produção de beterraba seguido de plantio de alface. A ureia foi a fonte sintética de N, aplicada no plantio na dose de 30 kg N ha⁻¹, e em cobertura na dose de 60 kg N ha⁻¹. Avaliaram-se também a adubação verde com mucuna (209 kg N ha⁻¹) associada a uma adubação de cobertura com 100 kg N ha⁻¹ de torta de mamona, adubação com composto orgânico (150 kg N ha⁻¹) aplicado no plantio com complementação em cobertura com 100 kg N ha⁻¹ de torta de mamona, e a aplicação de esterco de curral no plantio (380 kg N ha⁻¹) juntamente com uma cobertura com 100 kg N ha⁻¹ de cama de frango. O manejo das fontes de N foi feito tal como observado por produtores da região, e por isso as doses de N não foram as mesmas. Durante o ciclo entre o plantio e a adubação de cobertura, embora a dose de N aplicada como esterco tenha sido a maior, os maiores fluxos diários de N_2O foram

observados após a adubação verde e após a adição de composto (Figura 5A). A área tratada com esterco praticamente não emitiu N_2O se comparada ao controle, onde não havia aplicação de N. Por outro lado, na fase posterior a adubação de cobertura (Figura 5B), a aplicação de torta de mamona resultou em forte emissão de N_2O , bem superior à observada com a aplicação de cama de frango ou de ureia; em termos relativos à dose de N aplicada, a torta de mamona produziu duas a três vezes mais N_2O do que a ureia. Diferenças na disponibilidade de N de cada material utilizado pode ser a explicação para os resultados, assim como a ocorrência de chuvas e irrigação. Essas diferenças na disponibilização de N também explicam as emissões de N_2O durante o ciclo da alface (Figura 5C), assim como os efeitos residuais para a produção da planta.

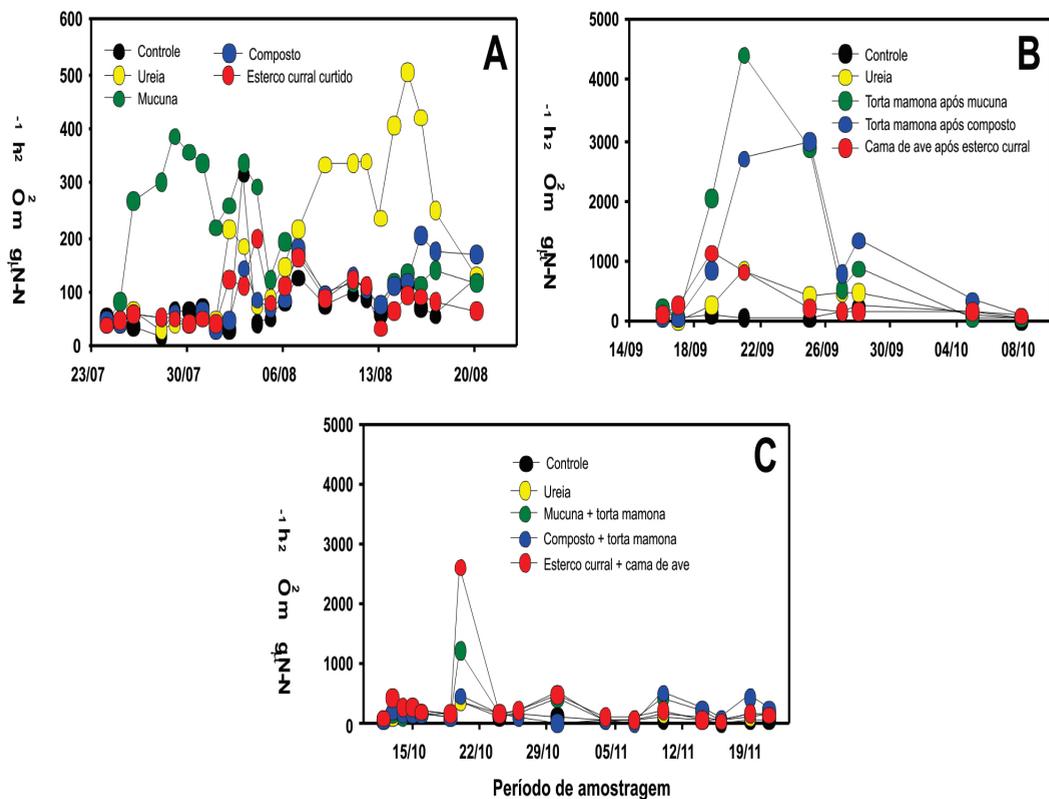


Figura 5. Fluxos médios diários de N_2O nas áreas manejadas com diferentes fontes de N para produção de beterraba na fase de crescimento inicial (A) e após a adubação de cobertura aplicada superficialmente na área (B), e durante o crescimento de alface (C) quando não foi feita qualquer adição de N.²

² Trabalho de autoria de Bruno J. R. Alves, Embrapa Agrobiologia (dados não publicados).

A produtividade da beterraba não foi significativamente alterada pela fonte de N, embora ganhos próximos de 15 Mg ha⁻¹ em relação à produtividade da área controle, que não recebeu adição de N, tenham sido registrados (Tabela 2). Considerando-se as quantidades de N₂O líquidas (descontadas das emissões da área controle, que não recebeu adição de N), emitidas nos sistemas de produção avaliados, a adubação verde acompanhada da aplicação de torta de mamona implicaria na menor emissão de N₂O por ganho de massa de produto (produção de beterraba da área fertilizada subtraída da produção da área não fertilizada), seguida do tratamento, onde somente se aplicou ureia.

Nas áreas com a aplicação de esterco e cama de frango, a produção de beterraba foi inferior ao controle, e por isso a emissão de N₂O registrada trouxe impacto negativo sem qualquer retorno em termos de produto. Durante o ciclo da alfaca, as emissões continuaram em menor magnitude, e quando relacionadas aos ganhos de produção com a adubação, o uso de composto ou adubação verde associado à torta de mamona resultou nas menores emissões por tonelada de alfaca produzida (Tabela 2). No caso da ureia, não houve efeito residual, sendo a produção de alfaca inferior ao obtido sem fertilização nitrogenada.

Tabela 2. Emissões de N₂O do solo induzidas pelo uso de diferentes fontes de N comumente utilizadas na sucessão beterraba-alfaca, ganhos de produtividade de cada espécie decorrentes da adição de N, e emissão de N₂O em relação ao ganho de produtividade³.

Fontes de N (plantio/cobertura)	Beterraba			Alfaca		
	Emissões de N ₂ O (kg N ha ⁻¹) ^a	Ganho de produto Mg ha ⁻¹	Emissão relativa (kg N ₂ O Mg ⁻¹) ^b	Emissões de N ₂ O (kg N ha ⁻¹)	Ganho de produto Mg ha ⁻¹	Emissão relativa (kg N ₂ O Mg ⁻¹)
Ureia/ureia	2,40	4,00	0,60	0,75	-1,72	-
Mucuna/torta de mamona	3,09	15,52	0,20	1,40	7,17	0,19
Esterco curral/cama de aviário	3,27	-6,80	-	2,35	4,17	0,56
Composto/torta de mamona	6,33	2,88	2,20	0,76	6,26	0,12

^aEmissão líquida, descontada da quantificada na área controle, sem adição de N.

^b Emissão de N₂O por ganho de produto em função da fonte de N.

³ Trabalho de autoria de Bruno J. R. Alves, Embrapa Agrobiologia (dados não publicados).

A utilização de doses elevadas de fontes orgânicas de N é comum na produção de hortaliças, principalmente pelas incertezas associadas à disponibilidade do nutriente para a planta. Os resultados obtidos por Santos (2013) mostram que, no sistema de produção de beterraba e alface, as doses aplicadas devem ter superado em muito a necessidade da cultura, ou não houve sincronia entre a disponibilidade de N e a demanda das plantas, haja vista ganhos pequenos de produtividade da beterraba, e existência de efeito residual para a cultura da alface. Em função disso, emissões de N_2O elevadas poderiam ser evitadas.

A adubação verde com leguminosa é uma estratégia utilizada pelos produtores para fornecimento de N para as culturas, e também para proteção do solo, controle de invasoras e de pragas e doenças (SOUZA et al. 2012) e quando combinada com a torta de mamona em cobertura, foi uma das opções mais eficientes para a produção de beterraba e alface com menores emissões de N_2O , quando o produto é considerado (SANTOS, 2013). No entanto, a avaliação das emissões de N_2O com a adubação verde deve considerar o ciclo da leguminosa desde o seu plantio até a incorporação. Durante o crescimento da leguminosa maiores emissões de N_2O do solo são observadas quando comparada a uma área em pousio ou cultivada com uma espécie anual não-fixadora de N_2 (Figura 6). Isso é explicado pelas maiores concentrações de N mineral no solo sob a leguminosa que tem parte de sua demanda de N atendida pela fixação biológica de N_2 (MORAIS, 2011). Essa maior acumulação de N mineral no solo, observada quando se cultivam leguminosas, foi descrita por

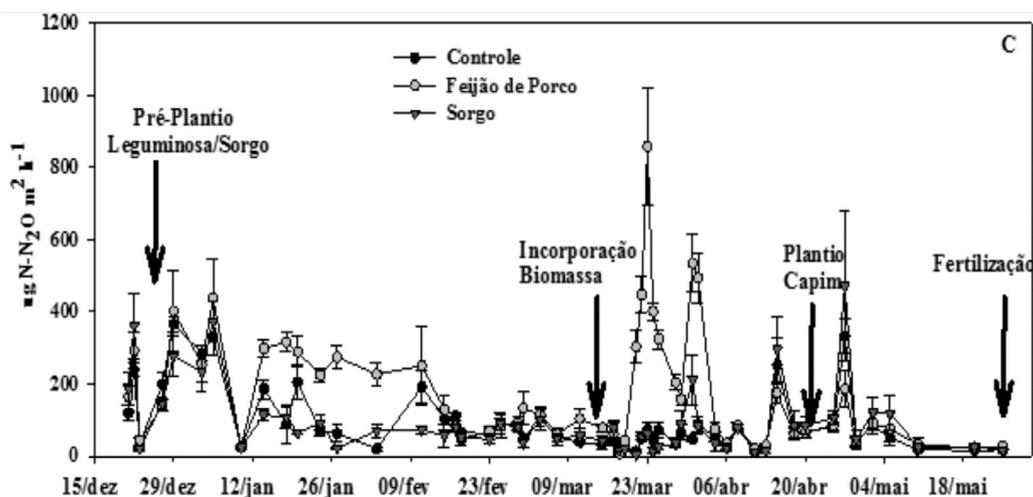


Figura 6. Emissões de N_2O derivadas do cultivo e da incorporação da biomassa de feijão de porco e sorgo, como adubos verdes para a cultura do capim-elefante. As setas representam as datas dos manejos realizados.

Chalk (1998). Assim, é possível que os benefícios obtidos com o uso de mucuna e torta de mamona, mencionados anteriormente para o sistema de produção de beterraba e alface, possam estar superestimados. A avaliação completa do ciclo do adubo verde e das culturas que se beneficiarão do N fornecido com a mineralização dos resíduos deve ser considerada em futuros estudos. No trabalho de Morais (2011), a grande quantidade de N acumulada pelo adubo verde promoveu altas emissões de N_2O sem que fossem muito grandes os efeitos na produção do capim-elefante, plantado após a leguminosa.

A adubação orgânica na produção de hortaliças precisa ser aprimorada de forma a evitar grandes excedentes de N e maior eficiência de uso pelas plantas do N aplicado. Os sistemas mais intensivos podem ser vantajosos para melhor aproveitar excedentes inevitáveis em função do potencial de suprimento de N em curto prazo.

4. Necessidades de pesquisa

No Brasil, há poucas estimativas baseadas em medições de campo quanto às emissões agrícolas de óxidos de nitrogênio (N_2O e NO). O entendimento da dinâmica entre práticas de cultivo (fórmula do fertilizante, sistema de preparo, irrigação, entre outros) e fluxos de óxidos de nitrogênio (incluindo a frequência de altos fluxos) também são fundamentais para a proposição de estratégias de mitigação de emissões de gases.

O uso de leguminosas que fixam N_2 , como espécies vegetais para adubação verde e cobertura de solo (por exemplo, mucunas e crotalárias) em sistemas agrícolas podem representar a incorporação de até 230 kg N ha^{-1} (CARVALHO et al., 1995) e diminuir o uso de fertilizantes, que têm alto impacto na produção de gases de efeito estufa (no processo de síntese e uso na agricultura). É importante avaliar a magnitude de produção de gases de efeito estufa pelo uso de leguminosas para adubação verde ou cobertura do solo. Associado a esses fatores, estudos sobre a qualidade de resíduos, ou sua composição química quanto aos teores de lignina, celulose e outros compostos fenólicos, devem ser relacionados ao potencial de emissões de gases dos diferentes materiais vegetais.

Não existem informações sobre emissões de gases de efeito estufa para florestas plantadas no Brasil, e também para outras culturas em expansão, como as de potencial para programas agroenergéticos, incluindo-se a cana-de-açúcar, e principalmente, hortaliças. Entretanto, a continuidade com os monitoramentos em áreas agrícolas, incluindo sistemas de produção de hortaliças, assim como sistemas naturais, é fundamental para melhorar a base de informação sobre os gases de efeito estufa, possibilitando dar maior suporte para fins de pesquisas e subsidiar os inventários.

Além de variáveis comumente medidas nos estudos de gases de efeito estufa, deve-se atentar para a necessidade de monitoramento de outras variáveis, como potencial de mineralização e de nitrificação no solo, atividades de enzimas ligadas ao ciclo do C e N etc, e caracterização dos sistemas mais utilizados, de forma a se obter parâmetros essenciais para calibração e validação de modelos matemáticos mais robustos.

5. Referências

ALVES, B. J. R. ; ZOTARELLI, L. ; BODDEY, R. M. ; URQUIAGA, S. Soybean benefit to a subsequent wheat crop in a cropping system under zero tillage. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NUCLEAR TECHNIQUE IN INTEGRATED PLANT NUTRIENT, WATER AND SOIL MANAGEMENT, 2000, Vienna. **Proceedings**. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2002. p. 87-93.

ALVES, B. J. R.; BODDEY, R. M.; URQUIAGA, S. The success of BNF in soybean in Brazil. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 252, p. 1-9, 2003.

ALVES, B. J. R.; CARVALHO, A. M.; JANTALIA, C. P.; MADARI, B.; URQUIAGA, S.; SANTOS, J. C. F. dos ; SANTOS, H. P. dos ; CARVALHO, C. J. R. Emissões de óxido nitroso e óxido nítrico do solo em sistemas agrícolas. In: LIMA, M. A.; BODDEY, R. M.; ALVES, B. J. R.; MACHADO, P. L. O. de A.; URQUIAGA, S. (Eds). **Estoque de carbono e emissões de gases de efeito estufa na agropecuária brasileira**. Brasília, DF: Embrapa, 2012. p. 159-191.

ALVES, B. J. R.; ZOTARELLI, L.; FERNANDES, F. M.; HECKLER, J. C.; MACEDO, R. A. T. de; BODDEY, R. M.; JANTALIA, C. P.; URQUIAGA, S. Fixação biológica de nitrogênio e fertilizantes nitrogenados no balanço de nitrogênio em soja, milho e algodão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 41, n. 3, p. 449-456, mar. 2006.

ANDRADE JÚNIOR, A. S.; BORGES, A. L.; ARAÚJO, A. R. **Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças**. Brasília, DF: Embrapa, 2011. 774 p.

BAGGS, E.M., REES R.M., SMITH K.A., VINTEN J.A.. Nitrous legume oxide emission from soils after incorporating crop residues. **Soil Use Management**, vol. 16, p. 82–87, 2000.

BAGGS E., M.; PHILIPPOT, L. Microbial Terrestrial Pathways to Nitrous Oxide. In: SMITH, K. (Ed.). **Nitrous Oxide and Climate Change**. Earthscan, London, p. 4-36, 2010.

BARIONI, L. G.; LIMA, M. A. de; ZEN, S.; GUIMARÃES JÚNIOR, R.; FERREIRA, A. C. A baseline projection of methane emissions by the Brazilian beef sector: preliminary results. In: GREENHOUSE GASES AND ANIMAL AGRICULTURE CONFERENCE, 2007, Christchurch, New Zealand. **Proceedings**. Christchurch: [s.n.], 2007. p. 32-33.

BRASIL, Ministério da Ciência e Tecnologia. **Inventário brasileiro das emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa**: informações gerais e valores preliminares. 2009. Disponível em: <http://ecen.com/eee75/eee75p/inventario_emissoes_brasil.pdf>. Acesso em: 12 abr. 2010.

BUSTAMANTE, M. M. C.; NOBRE, C. A.; SMERALDI, R.; AGUIAR, A. P. D.; BARIONI, L. G.; FERREIRA, L. G.; LONGO, K.; MAY, P.; PINTO, A. S.; OMETTO, J. P. H. B. Estimating greenhouse gas emissions from cattle raising in Brazil. **Climatic Change**, Dordrecht, v. 115, n. 3/4, p. 559-577, May 2012.

CARMO, J. B.; FILOSO, S.; ZOTELLI, L. C.; DE SOUSA-NETO, E. R.; PITOMBO, L. M.; DUARTE-NETO, P. J.; VARGAS, V. P.; ANDRADE, C. A.; GAVA, G. J. C.; ROSSETTO, R.; CANTARELLA, H.; NETO, A. E.; MARTINELLI, L. A. Infield greenhouse gas emissions from sugarcane soils in Brazil: effects from synthetic and organic fertilizer application and crop trash accumulation. **Global Change Biology Bioenergy**, v. 5, n. 3, p. 267-280, May 2013.

CARVALHO, A. M. de; BUSTAMANTE, M. M. C., KOZOVITS, A. R.; MIRANDA, L. N.de; VIVALDI, L. J.; Sousa, D. M. Emissões de NO e N₂O associadas à aplicação de uréia sob plantio direto e convencional. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 41, p. 679-685, 2006.

CARVALHO, A. M. de; FAGERIA, N. K.; KINJO, T.; PEREIRA, I. P. de. Resposta do feijoeiro à aplicação de fósforo em solos dos Cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 19, p. 61-67, 1995.

CARVALHO, A. M. de. **Uso de plantas condicionadoras com incorporação e sem incorporação no solo: composição química e decomposição dos**

resíduos vegetais; disponibilidade de fósforo e emissão de gases. 2005. 199 f. Dissertação (Doutorado) – Universidade de Brasília, Brasília, DF.

CARVALHO, A. M. de; BUSTAMANTE, M. M. C. ; ALCÂNTARA, F. A.; RESCK, I. S.; LEMOS, S. S. Characterization by solid-state CPMAS ¹³C NMR spectroscopy of decomposing plant residues in conventional and no-tillage systems in Central Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 101, p. 100-107, 2009.

CARVALHO, J. L. N.; RAUCCI, G. S.; FRAZÃO, L. A.; CERRI, C. E. P.; BERNOUX, M.; CERRI, C. C. Crop-pasture rotation: A strategy to reduce soil greenhouse gas emissions in the Brazilian Cerrado. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 183, p. 167-175, 2014.

CERRI, C. C.; BERNOUX, M.; CERRI, C. E. P.; LAL, R. Challenges and opportunities of soil carbon sequestration in Latin America. In: LAL, R.; CERRI, C. C.; BERNOUX, M.; ÉTCHEVERS, J.; CERRI, C. E. P. Carbon sequestration in soils of Latin America. New York, Haworth, p.41-47, 2006.

CHALK, P. M. Dynamics of biologically fixed N in legume-cereal rotations: a review. **Australian Journal of Agricultural Research**, Victoria, v, 49, n. 3, p. 303-316, Jan. 1998.

COSER, T. R.; CARVALHO, A. M.; RAMOS, M. L. G.; FIGUEIREDO, C. C.; CAVALCANTE, E.; PINHEIRO, L. A. Emissão de N₂O de um Latossolo sob sistemas de consórcio milho e gramíneas forrageiras no Cerrado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 34., 2013, Florianópolis. **Ciência do solo: para quê e para quem: anais.** Florianópolis: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013. v. 4.

COSER, T. R.; FIGUEIREDO, C. C.; RAMOS, M. L. G.; JANNUZZI, H.; MARCHÃO, R. L. Recuperação de carbono obtida por três métodos em frações da matéria orgânica de Latossolo, sob consórcio milho-forrageiras, no Cerrado. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 28, n. 1, p. 91- 97, 2012.

COSTA, A. R.; MADARI, B. E.; MACHADO, P. L. O. A.; JANTALIA, C. P.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M.; ALVES, B. J. R. Emissão de óxido nitroso derivado da cultura de arroz de terras altas sob plantio direto em um Latossolo dos Cerrados de Goiás, GO. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 31., 2007, Gramado. **Conquistas e desafios da ciência do solo brasileira: anais.** Gramado: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. CD-ROM.

DAVIDSON, E. A.; KELLER, M.; ERICKSON, H. E.; VERCHOT, L. V.; VELDKAMP, E. Testing a conceptual model of soil emissions of nitrous and nitric oxides. **BioScience**, Washington, v. 50, p. 667- 680, 2000.

DAVIDSON, E. A.; MATSON, P. M.; VITOUSEK, R.; RILEY, R.; DUNKIN, K.; GARCÍA-MÉNDEZ, G.; MAASS, J. M. Processes regulating soil emissions of NO and N₂O in a seasonally dry tropical forest. **Ecology**, v. 74, n. 1, p.130-139, Jan. 1993.

DE KLEIN, C.; NOVOA, R. S. A.; OGLE, S.; SMITH, K. A.; ROCHETTE, B. G.; MOSIER, A.; RYPDAL, K.; WALSH, M.; WILLIAMS, S. A. N₂O Emissions From Managed Soils, and CO₂ Emissions from Lime and Urea Application. In: EGGLESTON, H. S.; BUENDIA, L.; MIWA K.; NGARA, T.; TANABE, K. (Ed.). **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Hayama: Institute for Global Environmental Strategies, 2006. v. 4. Agriculture, Forestry and Other Land Use. Disponível em: <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>>. Acesso em: 03 mar. 2015.

DERAMUS, H. A.; CLEMENT, T. C.; GIAMPOLA, D. D.; DICKISON, P. C. Methane emissions of beef cattle on forrages: efficiency of grazing management systems. **Journal of Environment Quality**, v. 32, n. 1, p. 269-277, Jan./Feb. 2003.

DOBBIE, K. E.; MCTAGGART, I. P.; SMITH, K. A. Nitrous oxide emission from intensive agricultural systems: variations between crops and seasons, key driving variables, and mean emission factors. **Journal of Geophysical Research**, v. 104, n. D21, p. 26891-26899, 1999.

DRURY, C. F.; McKENNEY, D. J.; FINDLAY, W. I. Relationships between denitrification, microbial biomass and indigenous soil properties. **Soil Biology & Biochemistry**, Elmsford, v. 23, p. 751-755, 1991.

FAO. **Livestock's long shadow**: environmental issues and options. Roma, 2006. 391 p. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/010/a0701e/a0701e00.HTM>>. Acesso em: 12 out. 2009.

FLORES, R. A.; COLLIER, L. S.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M.; ALVES, B. J. R. Impacto de algumas variáveis do sistema solo-planta na produção de N₂O do solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 31., 2007,

Gramado. **Conquistas e desafios da ciência do solo brasileira**: anais. Gramado: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. CD-ROM.

HOLTER, J. B.; YOUNG, A. J. Methane production in dry and lactating dairy cows. **Journal of Dairy Science**, Champaign, n. 75, p. 2165-2175, 1992.

HUNGRIA, M.; FRANCHINI, J. C.; CAMPO, R. J.; CRISPINO, C. C.; MORAES, J. Z.; SIBALDELLI, R. N. R.; MENDES, I. C.; ARIHARA, J. Nitrogen nutrition of soybean in Brazil: contributions of biological N₂ fixation and N fertilizer to grain yield. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, v. 46, p. 927-939, 2006.

HUTH, N. I.; THORBURN, P. J.; RADFORD, B. J.; THORNTON, C. M. Impacts of fertilizers and legumes on N₂O and CO₂ emissions from soils in subtropical agricultural systems: A simulation study. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 136, p. 351–357, 2010.

IPCC. **Revised IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories**: reference manual. Cambridge: University Press, 1996. 297 p. Disponível em: <<http://www1.ipcc.ch/ipccreports/>>. Acesso em: 05 fev. 2010.

IPCC. **Guidelines for national greenhouse gas inventories**: reference manual. Reference manual. 1997.

IPCC. **Guidelines for national greenhouse gas inventories**. Greenhouse gas inventory reference manual. 2006. v. 4. Agriculture forestry and other land use. Disponível em: <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>> Acesso em: 04 mar. 2015.

IPCC. Land use, land-use change, and forestry special report. 2000, Cambridge, UK. Disponível em: http://www.ipcc.ch/ipccreports/sres/land_use/index.php?idp=0>. Acesso em 03 mar. 2015.

JANTÁLIA, C. P.; ARAÚJO, E. S.; FERREIRA, R. G.; SILVA, L. L. G. G.; ABOIM, M. C. R.; ARAÚJO, D. A. DE; PINHEIRO, E. M.; MIRANDA, E. M.; ABOUD, A. C. S.; COSTA, J. R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M.; ALVES, B. J. R. **Emissões de óxido nitroso em um sistema de produção sob manejo orgânico**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2005. 24 p. (Embrapa Agrobiologia. Documentos, 189).

JANTALIA, C. P.; SANTOS, H. P. dos; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M.; ALVES, B. J. R. Fluxes of nitrous oxide from soil under different crop rotations and tillage systems in the South of Brazil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 82, n. 2, Oct. p. 161-173, 2008.

LAL, R. Soil carbon dynamics in cropland and rangeland. **Environmental Pollution**, Barking, v. 116, p. 353-362, 2002.

LAL, R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. **Geoderma**, Amsterdam, v. 123, p. 1-22, 2004.

LARA CABEZAS, W. A. R.; KORNDORFER, G. H.; MOTTA, S. A. Volatilização de amônia na cultura do milho: II Avaliação de fontes sólidas e fluídas em sistema de plantio direto e convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 21, n. 3, p. 489-496, 1997.

LASSEY, K. R. Livestock methane emission: From the individual grazing animal through national inventories to the global methane cycle. **Agricultural and Forest Meteorology**, n. 142, p. 120-132, 2007.

LEITE, L. F. C.; MENDONÇA, E. S.; MACHADO, P. L. O. A. Simulating trends in soil organic carbon of an Acrisol under no-tillage and disc-plough systems using the Century model. **Geoderma**, Amsterdam, v. 120, p. 283-295, 2004.

LEMAIRE, G.; FRANZLUEBBERS, A.; CARVALHO, P. C. F.; DEDIEU, B. Integrated crop–livestock systems: Strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 190, n. 1, June 2014.

LINN, D. W.; DORAN, J. W. Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and non-tilled soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 48, p. 1267-1272, 1984.

MATSON, P. A.; McDOWELL, W. H.; TOWNSEND, A. R.; VITOUSEK, P. M. The globalization of N deposition: ecosystem consequences in tropical environments. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 46, p. 67-83, 1999.

MCKENNEY, D. J.; WANG, S. W.; DRURY, C. F.; FINDLAY, W. I. Denitrification, immobilization and mineralization in nitrate limited and non-limited residue amended soil. **Soil Science Society of America Journal**, v. 59, p. 118-124, 1995.

METAY, A.; OLIVER, R.; SCOPEL, E.; DOUZET, J-M.; MOREIRA, J. A. A.; MARAUX, F.; FEIGL, B. J.; FELLER, C. N₂O and CH₄ emissions from soils under conventional and no-till management practices in Goiânia (Cerrados, Brazil). **Geoderma**, Amsterdam, v. 141, p. 78-88, 2007.

MORAIS, R. F. **Fixação biológica de nitrogênio e emissão de gases de efeito estufa na produção de capim-elefante para bioenergia**. 2011, 109 p. (Tese de Doutorado). Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica.

MORAIS, R. F.; BODDEY, R. M.; URQUIAGA, S.; JANTALIA, C. P.; ALVES, B. J. R. Ammonia volatilization and nitrous oxide emissions during soil preparation and N fertilization of elephant grass (*Pennisetum purpureum* Schum.). **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 64, p. 80-88, 2013.

PEREDES, D. da S.; LESSA, A. C. R.; SANT'ANNA, S. A. C.; BODDEY, R. M.; URQUIAGA, S.; ALVES, B. J. R. Nitrous oxide emission and ammonia volatilization induced by vinasse and N fertilizer application in a sugarcane crop at Rio de Janeiro, Brazil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 98, n. 1, p. 41-55, Jan. 2013.

PAUL, E. A.; CLARK, F. E. **Soil Microbiology and biochemistry**. San Diego: Academic Press, 1996. 340 p.

ROCHETTE, P.; JANZEN, H. H. Towards a revised coefficient for estimating N₂O emissions from legumes. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, 73, p. 171-179, 2005.

SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; FABRICIO, A. C.; MACEDO, M.C.M.; BROCH, D.L.; BOENI, M.; CONCEIÇÃO, P. C. **Matéria orgânica do solo na interação lavoura-pecuária em Mato Grosso do Sul**. Dourados, Embrapa Agropecuária Oeste, 2005. 58p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 29).

SANO, E. E.; ROSA, R.; BRITO, J. L. S.; FERREIRA, L. G. Mapeamento semidetalhado do uso da terra do Bioma Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 43, p. 654-663, 2008.

SANTOS, S. S. **Emissões de NH₃ e N₂O de composto orgânico e outras fontes de N aplicadas em sistema de produção de beterraba e alface.** 2013, 72 f. (Dissertação). Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica.

SILVA, T. O. D. A.; MENEZES, R. S. C. Adubação orgânica da batata com esterco e, ou, Crotalaria juncea: II - disponibilidade de N, P e K no solo ao longo do ciclo de cultivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, p. 51-61, 2007.

SISTI, C. P. J.; SANTOS, H. P. dos; KOHHANN, R.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 76, p. 39-58, 2004.

SKIBA, U.; SMITH, K. A. The control of nitrous oxide emissions from agricultural and natural soils. **Chemosphere - Global Change Science**, v. 2, p. 379-386, 2000.

SMITH, K. A.; BALL, T.; CONEN, F.; DOBBIE, K. E.; MASSHEDER, J.; REY, A. Exchange of greenhouse gases between soil and atmosphere: interactions of soil physical factors and biological processes. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 54, p. 779-791, 2003.

SORDI, A.; DIECKOW, J.; BAYER, C.; ALBUQUERQUE, M. A.; PIVA, J. T.; ZANATTA, J. A.; TOMAZI, M.; ROSA, C. M.; MORAES, A. Nitrous oxide emission factors for urine and dung patches in a subtropical Brazilian pastureland. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 190, n. 1, p. 94-103, June 2013.

SOUZA, C. M.; PIRES, F. R.; PARTELLI, F. L.; ASSIS, R. L. de. **Adubação verde e rotação de culturas.** Viçosa, MG: UFV, 2012. 108 p.

VILELA, L.; MARTHA JUNIOR, G. B.; MACEDO, M. C. M.; MARCHÃO, R. L.; GUIMARÃES JÚNIOR, R.; KARINA PULROLNIK, K.; MACIEL, G. A. Sistemas de integração lavoura-pecuária na região do Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 46, n. 10, p. 1.127-1.138, 2011.

XAVIER DA SILVA, J. Geoprocessamento e análise ambiental. **Revista Brasileira de Geografia**, Rio de Janeiro, v. 54, p. 47-61, 1992.

Embrapa

Hortaliças



Ministério da
Agricultura, Pecuária
e Abastecimento

