



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE – UFCG
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS – CTRN
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS – UACA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**RISCO CLIMÁTICO DO CULTIVO DA CANA-DE-AÇÚCAR NA REGIÃO
NORDESTE DO BRASIL**

SONALY DUARTE DE OLIVEIRA

**CAMPINA GRANDE – PB
MARÇO / 2011**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**RISCO CLIMÁTICO DO CULTIVO DA CANA-DE-AÇÚCAR NA REGIÃO
NORDESTE DO BRASIL**

SONALY DUARTE DE OLIVEIRA

ORIENTADORES:

Prof. Dr. VICENTE DE PAULO RODRIGUES DA SILVA

Prof. Dr. CARLOS ANTÔNIO COSTA DOS SANTOS

**CAMPINA GRANDE – PB
MARÇO / 2011**

SONALY DUARTE DE OLIVEIRA

**RISCO CLIMÁTICO DO CULTIVO DA CANA-DE-AÇÚCAR NA REGIÃO
NORDESTE DO BRASIL**

Dissertação apresentada a Curso de Mestrado em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande em cumprimento às exigências para obtenção do título de Mestre em Meteorologia.

Área de concentração: Agrometeorologia e Micrometeorologia
Subárea: Climatologia Agrícola

**CAMPINA GRANDE-PB
MARÇO/2011**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

- O48r Oliveira, Sonaly Duarte de.
Risco climático do cultivo da cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil / Sonaly Duarte de Oliveira. — Campina Grande, 2011.
97 f.: il. color.
- Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.
Referências.
Orientadores: Prof. Dr. Vicente de Paulo Rodrigues da Silva, Prof. Dr. Carlos Antônio Costa dos Santos.
1. Mudanças Climáticas. 2. Zoneamento Agrícola. 3. Evapotranspiração. 4. Precipitação Pluvial. I. Título.
- CDU – 551.583(043)

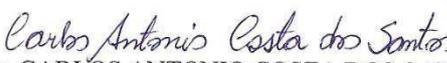
SONALY DUARTE DE OLIVEIRA

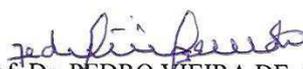
RISCO CLIMÁTICO DO CULTIVO DA CANA-DE-AÇÚCAR NA REGIÃO
NORDESTE DO BRASIL

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 04/03/2011

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. VICENTE DE PAULO RODRIGUES DA SILVA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande


Prof. Dr. CARLOS ANTONIO COSTA DOS SANTOS
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande


Prof. Dr. PEDRO VIEIRA DE AZEVEDO
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande


Prof. Dr. INAJÁ FRANCISCO DE SOUSA
Departamento Engenharia Agrônoma
Universidade Federal de Sergipe

“Bom mesmo é ir a luta com determinação, abraçar a vida com paixão, perder com classe e vencer com ousadia, pois o triunfo pertence a quem se atreve...”

Charles Chaplin

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a razão da minha existência: meu filho Gleison Duarte. A minha fortaleza: minha mãe Mirian Duarte e ao meu amado marido Edgar de Sousa, pela força, estímulo e compreensão, oferecidos por eles, a cada momento desta caminhada.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela força, pela vida e proteção.

A minha mãe querida, marido e filho amados, pela confiança depositada.

Ao meu orientador Prof. Dr. Vicente de Paulo Rodrigues da Silva, não só por toda orientação neste trabalho, mas principalmente por sua amizade e confiança.

Aos professores que fazem parte da Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas, que fazem deste, um curso belíssimo, e não menos importante.

Aos funcionários da Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas, em especial a Divanete, que sempre me deu forças e me incentivou nos estudos.

À Universidade Federal de Campina Grande, pela excepcional estrutura de ensino e pesquisa.

Aos membros da banca examinadora, pela colaboração na melhoria e engrandecimento desse trabalho.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pelo suporte financeiro.

Ao meu amigo e irmãozinho: Madson Tavares Silva, por todo seu auxílio e disposição nas horas em que precisei.

A todos os meus colegas de turma: Ana Cláudia, Ana Nery, Ana Paula, Edicarlos Francineide, Francisco, Jonathan, Madson, Maytê, Nilzele, Pollyanna, Richele, Roberto, Rony, Samira, e em especial: Ana Cláudia, Ana Nery, Ana Paula, Francineide, Francisco, Edicarlos e Jonathan, pelos bons momentos.

Aos amigos Thesco e Jhon, por não me fazer desistir.

A Ana Paula, por toda ajuda, nos momentos que precisei.

A todos que direta ou indiretamente acompanharam e compartilharam comigo a felicidade de mais uma etapa vencida.

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Mapa do Brasil com a localização da região de estudo.	40
Figura 2. Espacialização das estações meteorológicas utilizadas no estudo.	42
Figura 3. Risco climático do cultivo da cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil, no segundo decêndio dos meses de janeiro (A), fevereiro (B), março (C), abril (D), maio (E), junho (F), julho (G), agosto (H), setembro (I), outubro (J), novembro (K) e dezembro (L) na região Nordeste do Brasil, para as condições climáticas atuais.	47
Figura 4. Risco climático do cultivo da cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil no segundo decêndio de janeiro, com redução de 10% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (A), aumento de 1,5°C (B), aumento de 3°C (C) e aumento de 5 °C (D); com redução de 25% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (E), aumento de 1,5°C (F), aumento de 3°C (G) e aumento de 5 °C (H) e com redução de 40% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (I), aumento de 1,5°C (J), aumento de 3°C (K) e aumento de 5 °C (L).	48
Figura 5. Risco climático do cultivo da cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil no segundo decêndio de janeiro, com acréscimo de 10% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (A), aumento de 1,5°C (B), aumento de 3°C (C) e aumento de 5 °C (D); com acréscimo de 25% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (E), aumento de 1,5°C (F), aumento de 3°C (G) e aumento de 5 °C (H) e com acréscimo de 40% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (I), aumento de 1,5°C (J), aumento de 3°C (K) e aumento de 5 °C (L).	49
Figura 6. Risco climático do cultivo da cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil no segundo decêndio de fevereiro, com redução de 10% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (A), aumento de 1,5°C (B), aumento de 3°C (C) e aumento de 5 °C (D); com redução de 25% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (E), aumento de 1,5°C (F), aumento de 3°C (G) e aumento de 5 °C (H) e com redução de 40% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (I), aumento de 1,5°C (J), aumento de 3°C (K) e aumento de 5 °C (L).	51
Figura 7. Risco climático do cultivo da cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil no segundo decêndio de fevereiro, com acréscimo de 10% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (A), aumento de 1,5°C (B), aumento de 3°C (C) e aumento de 5 °C (D); com acréscimo de 25% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (E), aumento de 1,5°C (F), aumento de 3°C (G) e aumento de 5 °C (H) e com acréscimo de 40% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (I), aumento de 1,5°C (J), aumento de 3°C (K) e aumento de 5 °C (L).	52

- Figura 8. Risco climático do cultivo da cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil no segundo decêndio de março, com redução de 10% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (A), aumento de 1,5°C (B), aumento de 3°C (C) e aumento de 5 °C (D); com redução de 25% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (E), aumento de 1,5°C (F), aumento de 3°C (G) e aumento de 5 °C (H) e com redução de 40% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (I), aumento de 1,5°C (J), aumento de 3°C (K) e aumento de 5 °C (L). 53
- Figura 9. Risco climático do cultivo da cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil no segundo decêndio de março, com acréscimo de 10% na precipitação pluvial sem aumento na temperatura do ar (A), aumento de 1,5°C (B), aumento de 3°C (C) e aumento de 5 °C (D); com acréscimo de 25% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (E), aumento de 1,5°C (F), aumento de 3°C (G) e aumento de 5 °C (H) e com acréscimo de 40% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (I), aumento de 1,5°C (J), aumento de 3°C (K) e aumento de 5 °C (L). 54
- Figura 10. Risco climático do cultivo da cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil no segundo decêndio de abril, com redução de 10% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (A), aumento de 1,5°C (B), aumento de 3°C (C) e aumento de 5 °C (D); com redução de 25% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (E), aumento de 1,5°C (F), aumento de 3°C (G) e aumento de 5 °C (H) e com redução de 40% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (I), aumento de 1,5°C (J), aumento de 3°C (K) e aumento de 5 °C (L). 56
- Figura 11. Risco climático do cultivo da cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil no segundo decêndio de abril, com acréscimo de 10% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (A), aumento de 1,5°C (B), aumento de 3°C (C) e aumento de 5 °C (D); com acréscimo de 25% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (E), aumento de 1,5°C (F), aumento de 3°C (G) e aumento de 5 °C (H) e com acréscimo de 40% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (I), aumento de 1,5°C (J), aumento de 3°C (K) e aumento de 5 °C (L). 57
- Figura 12. Risco climático do cultivo da cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil no segundo decêndio de maio, com redução de 10% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (A), aumento de 1,5°C (B), aumento de 3°C (C) e aumento de 5 °C (D); com redução de 25% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (E), aumento de 1,5°C (F), aumento de 3°C (G) e aumento de 5 °C (H) e com redução de 40% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (I), aumento de 1,5°C (J), aumento de 3°C (K) e aumento de 5 °C (L). 58
- Figura 13. Risco climático do cultivo da cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil no segundo decêndio de maio, com acréscimo de 10% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (A), aumento de 1,5°C (B), aumento de 3°C (C) e aumento de 5 °C (D); com acréscimo de 25% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (E), aumento de 59

1,5°C (F), aumento de 3°C (G) e aumento de 5 °C (H) e com acréscimo de 40% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (I), aumento de 1,5°C (J), aumento de 3°C (K) e aumento de 5 °C (L).

- Figura 14. Risco climático do cultivo da cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil no segundo decêndio de junho, com redução de 10% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (A), aumento de 1,5°C (B), aumento de 3°C (C) e aumento de 5 °C (D); com redução de 25% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (E), aumento de 1,5°C (F), aumento de 3°C (G) e aumento de 5 °C (H) e com redução de 40% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (I), aumento de 1,5°C (J), aumento de 3°C (K) e aumento de 5 °C (L). 60
- Figura 15. Risco climático do cultivo da cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil no segundo decêndio de junho, com acréscimo de 10% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (A), aumento de 1,5°C (B), aumento de 3°C (C) e aumento de 5 °C (D); com acréscimo de 25% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (E), aumento de 1,5°C (F), aumento de 3°C (G) e aumento de 5 °C (H) e com acréscimo de 40% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (I), aumento de 1,5°C (J), aumento de 3°C (K) e aumento de 5 °C (L). 61
- Figura 16. Risco climático do cultivo da cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil no segundo decêndio de julho, com redução de 10% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (A), aumento de 1,5°C (B), aumento de 3°C (C) e aumento de 5 °C (D); com redução de 25% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (E), aumento de 1,5°C (F), aumento de 3°C (G) e aumento de 5 °C (H) e com redução de 40% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (I), aumento de 1,5°C (J), aumento de 3°C (K) e aumento de 5 °C (L). 62
- Figura 17. Risco climático do cultivo da cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil no segundo decêndio de julho, com acréscimo de 10% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (A), aumento de 1,5°C (B), aumento de 3°C (C) e aumento de 5 °C (D); com acréscimo de 25% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (E), aumento de 1,5°C (F), aumento de 3°C (G) e aumento de 5 °C (H) e com acréscimo de 40% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (I), aumento de 1,5°C (J), aumento de 3°C (K) e aumento de 5 °C (L). 63
- Figura 18. Risco climático do cultivo da cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil no segundo decêndio de agosto, com redução de 10% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (A), aumento de 1,5°C (B), aumento de 3°C (C) e aumento de 5 °C (D); com redução de 25% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (E), aumento de 1,5°C (F), aumento de 3°C (G) e aumento de 5 °C (H) e com redução de 40% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (I), aumento de 1,5°C (J), aumento de 3°C (K) e aumento de 5 °C (L). 64
- Figura 19. Risco climático do cultivo da cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil 65

no segundo decêndio de agosto, com acréscimo de 10% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (A), aumento de 1,5°C (B), aumento de 3°C (C) e aumento de 5 °C (D); com acréscimo de 25% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (E), aumento de 1,5°C (F), aumento de 3°C (G) e aumento de 5 °C (H) e com acréscimo de 40% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (I), aumento de 1,5°C (J), aumento de 3°C (K) e aumento de 5 °C (L).

- Figura 20. Risco climático do cultivo da cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil no segundo decêndio de setembro, com redução de 10% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (A), aumento de 1,5°C (B), aumento de 3°C (C) e aumento de 5 °C (D); com redução de 25% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (E), aumento de 1,5°C (F), aumento de 3°C (G) e aumento de 5 °C (H) e com redução de 40% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (I), aumento de 1,5°C (J), aumento de 3°C (K) e aumento de 5 °C (L). 66
- Figura 21. Risco climático do cultivo da cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil no segundo decêndio de setembro, com acréscimo de 10% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (A), aumento de 1,5°C (B), aumento de 3°C (C) e aumento de 5 °C (D); com acréscimo de 25% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (E), aumento de 1,5°C (F), aumento de 3°C (G) e aumento de 5 °C (H) e com acréscimo de 40% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (I), aumento de 1,5°C (J), aumento de 3°C (K) e aumento de 5 °C (L). 67
- Figura 22. Risco climático do cultivo da cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil no segundo decêndio de outubro, com redução de 10% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (A), aumento de 1,5°C (B), aumento de 3°C (C) e aumento de 5 °C (D); com redução de 25% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (E), aumento de 1,5°C (F), aumento de 3°C (G) e aumento de 5 °C (H) e com redução de 40% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (I), aumento de 1,5°C (J), aumento de 3°C (K) e aumento de 5 °C (L). 68
- Figura 23. Risco climático do cultivo da cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil no segundo decêndio de outubro, com acréscimo de 10% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (A), aumento de 1,5°C (B), aumento de 3°C (C) e aumento de 5 °C (D); com acréscimo de 25% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (E), aumento de 1,5°C (F), aumento de 3°C (G) e aumento de 5 °C (H) e com acréscimo de 40% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (I), aumento de 1,5°C (J), aumento de 3°C (K) e aumento de 5 °C (L). 69
- Figura 24. Risco climático do cultivo da cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil no segundo decêndio de novembro, com redução de 10% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (A), aumento de 1,5°C (B), aumento de 3°C (C) e aumento de 5 °C (D); com redução de 25% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (E), aumento de 1,5°C (F), aumento de 3°C (G) e aumento de 5 °C (H) e com redução de 69

40% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (I), aumento de 1,5°C (J), aumento de 3°C (K) e aumento de 5 °C (L).

- Figura 25. Risco climático do cultivo da cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil 71
no segundo decêndio de novembro, com acréscimo de 10% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (A), aumento de 1,5°C (B), aumento de 3°C (C) e aumento de 5 °C (D); com acréscimo de 25% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (E), aumento de 1,5°C (F), aumento de 3°C (G) e aumento de 5 °C (H) e com acréscimo de 40% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (I), aumento de 1,5°C (J), aumento de 3°C (K) e aumento de 5 °C (L).
- Figura 26. Risco climático do cultivo da cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil 72
no segundo decêndio de dezembro, com redução de 10% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (A), aumento de 1,5°C (B), aumento de 3°C (C) e aumento de 5 °C (D); com redução de 25% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (E), aumento de 1,5°C (F), aumento de 3°C (G) e aumento de 5 °C (H) e com redução de 40% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (I), aumento de 1,5°C (J), aumento de 3°C (K) e aumento de 5 °C (L).
- Figura 27. Risco climático do cultivo da cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil 73
no segundo decêndio de dezembro, com acréscimo de 10% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (A), aumento de 1,5°C (B), aumento de 3°C (C) e aumento de 5 °C (D); com acréscimo de 25% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (E), aumento de 1,5°C (F), aumento de 3°C (G) e aumento de 5 °C (H) e com acréscimo de 40% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (I), aumento de 1,5°C (J), aumento de 3°C (K) e aumento de 5 °C (L).

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Área agrícola (%) da cana-de-açúcar cultivada na região Nordeste do Brasil, com alto risco (AR), médio risco (MR) e baixo risco climático (BR) para as condições climáticas atuais (CCA).	74
Tabela 2.	Área agrícola (%) da cana-de-açúcar cultivada na região Nordeste do Brasil com alto risco (AR), médio risco (MR) e baixo risco climático (BR) com redução de 10% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar e aumentos de 1,5, 3 e 5°C.	76
Tabela 3.	Área agrícola (%) da cana-de-açúcar cultivada na região Nordeste do Brasil com alto risco (AR), médio risco (MR) e baixo risco climático (BR) com aumento de 10% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar e aumentos de 1,5, 3 e 5°C.	78
Tabela 4.	Área agrícola (%) da cana-de-açúcar cultivada na região Nordeste do Brasil com alto risco (AR), médio risco (MR) e baixo risco climático (BR) com redução de 25% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar e aumentos de 1,5, 3 e 5°C.	79
Tabela 5.	Área agrícola (%) da cana-de-açúcar cultivada na região Nordeste do Brasil com alto risco (AR), médio risco (MR) e baixo risco climático (BR) com aumento de 25% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar e aumentos de 1,5, 3 e 5°C.	81
Tabela 6.	Área agrícola (%) da cana-de-açúcar cultivada na região Nordeste do Brasil com alto risco (AR), médio risco (MR) e baixo risco climático (BR) com redução de 40% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar e aumentos de 1,5, 3 e 5°C.	83
Tabela 7.	Área agrícola (%) da cana-de-açúcar cultivada na região Nordeste do Brasil com alto risco (AR), médio risco (MR) e baixo risco climático (BR) com aumento de 40% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar e aumentos de 1,5, 3 e 5°C.	84

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

BRASDHC	- Brasil - Diagnóstico Hídrico das Culturas
CTC	- Centro de Tecnologia da Copersucar
ENOS	- El Niño Oscilação Sul
EPE	- Empresa de Pesquisa Energética
E _{tm}	- Evapotranspiração máxima
E _{T_p}	- Evapotranspiração potencial
E _{tr}	- Evapotranspiração real
FAO	- Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação
IBGE	- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPCC	- Intergovernmental Panel on Climate Change
ISNA	- Índice de Satisfação da Necessidade de Água para a Cultura
K _c	- Coeficiente de cultivo
MAPA	- Ministério da Agricultura, Pecuária, e Abastecimento
OMM	- Organização Meteorológica Mundial
PROAGRO	- Programa de Garantia da Atividade Agropecuária
SARRA	- Sistema de Análise Regional do Risco Agroclimático
SIG	- Sistema de Informação Geográfica
SUDENE	- Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste
UACA	- Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
UNEP	- United Nations Environment Programme
ZCIT	- Zona de Convergência Intertropical

RISCO CLIMÁTICO DA CANA-DE-AÇÚCAR CULTIVADA NA REGIÃO NORDESTE DO BRASIL

RESUMO

Este estudo avalia, com base nos relatórios do IPCC (2001), os impactos das alterações climáticas sobre o zoneamento agrícola de risco climático da cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) cultivada na região Nordeste do Brasil. O modelo de balanço hídrico, combinado com técnicas de geoprocessamento (SIG), foi utilizado para identificar as áreas da região de estudo onde a cultura sofrerá restrições de rendimento devido às mudanças climáticas. Os dados utilizados no estudo foram às séries históricas de precipitação pluvial com no mínimo 30 anos de dados diários, coeficientes de cultura, evapotranspiração potencial e a duração do ciclo da cultura. Adotou-se como critério de corte para o Índice de Satisfação das Necessidades de Água para a cultura (ISNA), definido como a relação entre a evapotranspiração real e a evapotranspiração máxima (ET_r/ET_m), o valor 0,65. Os cenários utilizados nas simulações sem aumento na temperatura do ar e com aumento de 1,5, 3 e 5°C estão associados as alterações na precipitação de ± 10 , ± 25 e $\pm 40\%$. Os resultados obtidos exibem que as mudanças climáticas reduzem consideravelmente as áreas agricultáveis favoráveis ao cultivo com a cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil, afetando assim, significativamente a disponibilidade das áreas de produção da cultura. Os resultados ainda indicam que existe uma diferença relevante entre os cenários sem aumento na temperatura, os três cenários de aquecimento e as condições climáticas atuais em termos dos efeitos projetados da variação de temperatura sobre as áreas cultivadas com a cana-de-açúcar na região de estudo.

Palavras-chave: Mudanças climáticas, zoneamento agrícola, evapotranspiração, precipitação pluvial.

CLIMATE RISK OF SUGAR CANE GROWN IN THE NORTHEAST REGION OF BRAZIL

ABSTRACT

This study evaluated the impacts of climate change on agricultural zoning of climatic risk crop of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) grown in northeastern Brazil based on IPCC (2001) reports. The water balance model combined with Geographic Information System techniques was used to identify regional areas where the sugarcane crop will suffer yield reduction due to climate changes. Model input variables were: rainfall, crop coefficients, potential evapotranspiration and duration of the crop cycle. A limit value of 0.5 was adopted for the water requirement satisfaction index (WRSI), being the ratio of actual to maximum evapotranspiration. The scenarios used in simulations without an increase in air temperature and an increase of 1.5, 3 and 5 °C are associated with changes in precipitation ± 10 , ± 25 and $\pm 40\%$. The results show that climate change will significantly reduce agricultural areas favorable for the cultivation with sugar cane in Northeast Brazil, affecting significantly the availability of the areas of crop production. The results also indicate that there is a difference between the scenarios no increase in temperature, the three warming scenarios and current weather conditions in terms of the projected effects of temperature variation on the areas cultivated with sugar cane in the region of study.

Keywords: Climate change, agricultural zoning, evapotranspiration, rainfall.

SUMÁRIO

	Pág
1. Introdução	19
2. Revisão bibliográfica.	23
2.1. Mudanças climáticas	25
2.2. Mudanças climáticas e agricultura.....	27
2.3. Modelagem agrometeorológica.....	28
2.4. Zoneamento agrícola.....	30
2.5. Solos.....	32
2.5.1. Solos apropriados para o cultivo da cana-de-açúcar.....	33
2.6. Clima.....	34
2.6.1. Climas apropriados para o cultivo da cana-de-açúcar.....	35
2.7. Vegetação.....	35
2.8. Características da cultura.....	36
2.8.1. Importância econômica.....	36
2.9. Balanço hídrico.....	38
3. Material e métodos	39
3.1. Área de estudo.....	39
3.1.1. Localização geográfica.....	39
3.1.2. Modelos computacionais.....	40
3.2. Risco climático.....	41
3.2.1. Dados meteorológicos.....	41
3.2.2. Condição para cálculo do risco climático.....	41
3.2.2.1. Controle de qualidade dos dados.....	42
4. Resultados e Discussão	46
5. Conclusões	86
6. Referências bibliográficas	87

1. INTRODUÇÃO

O efeito estufa é um fenômeno natural que ocorre na atmosfera e que possibilita a ocorrência de vida no planeta. Os principais gases formadores do efeito estufa distribuídos na atmosfera são o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4), o óxido nitroso (N_2O), o ozônio (O_3) e o vapor d'água (H_2O). Dentre esses gases, o CO_2 é o que tem maior contribuição através da atividade humana (Freund, 2005), uma vez que o volume de suas emissões para a atmosfera representa algo em torno de 55% do total das emissões de gases de efeito estufa. Apesar do benefício que este fenômeno propicia, atualmente ele tem sido visto como algo negativo. Pois o aumento nas emissões dos gases de efeito estufa, em decorrência da ação antrópica, tem intensificado o fenômeno que, aumentado, pode trazer consequências negativas para o homem. Por esse motivo, as mudanças climáticas e o aquecimento global começam a ser amplamente estudado por vários pesquisadores (Silva, 2004; Silva et al., 2010).

O cultivo da cana-de-açúcar no Brasil, além de outras culturas, pode sofrer drásticas reduções em face do aquecimento global. As mudanças climáticas no planeta envolvem fatores internos e externos ao sistema terra-atmosfera que podem afetar a produtividade das culturas em todas as partes do mundo (Campos et al., 2010). O fator interno inclui as variações no sistema solar e os efeitos astronômicos sobre a órbita da terra, enquanto o externo influencia a variabilidade natural do clima.

A partir do século XVIII, com a Revolução Industrial, a utilização de combustíveis fósseis, como o carvão mineral e os derivados do petróleo, tem se tornado mais intensa. Com o uso crescente desses elementos, a atmosfera começou a alterar sua composição, aumentando

a quantidade de gases poluentes, sendo o principal deles o CO₂. O aumento excessivo desses gases forma uma espécie de barreira à radiação infravermelha próxima à superfície da Terra.

Uma das formas de manejo da concentração atmosférica de CO₂ é a redução da utilização de combustíveis fósseis, responsáveis por aproximadamente 75% das emissões e considerados o “coração” do desenvolvimento econômico (Silva et al., 2010). Porém, esse é um processo que demanda mudanças radicais na economia, e políticas ambientais neste sentido têm encontrado muita resistência. Outra alternativa é o seqüestro de carbono, ou seja, a captura e estocagem do CO₂ presente na atmosfera (Campos et al., 2010). Os ecossistemas terrestres são essencialmente filtros biológicos naturais de CO₂, estimando-se que retirem cerca de 2 bilhões de toneladas de carbono da atmosfera por ano. Por responder à magnitude das reduções necessárias para a estabilização da atmosfera, o seqüestro de carbono tornou-se uma ferramenta essencial para o manejo do CO₂ proveniente do uso de combustíveis fósseis. Neste sentido, o etanol se destaca por ser uma alternativa viável aos combustíveis fósseis, além de fonte renovável de energia (Silva, 2010). O Brasil possui grande potencial para a produção de etanol proveniente da cana-de-açúcar, pois possui extensas áreas agricultáveis, clima favorável e conhecimento tecnológico sobre o processo produtivo. Os Estados Unidos e o Brasil são os maiores produtores mundiais de etanol e respondem, juntos, por 70% da oferta global, observando o total utilizado como combustível, o Brasil, pioneiro na produção de álcool em grande escala com a criação do Proálcool na década de 70, foi responsável por 44% desse total, enquanto os Estados Unidos, que lideram a produção mundial, produziram aproximadamente 47% do total global. Outros produtores que se destacam são: China, União Européia e Índia (www.biodiesel.gov.br_2010). O Brasil, atualmente, é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar (Fernandes, 2009).

A cultura da cana-de-açúcar teve sua expansão no Nordeste Brasileiro (NEB) no período de 1970 a 1975, com recursos do programa do álcool (Proálcool), principalmente nos tabuleiros costeiros, por se tratar de uma região mais favorecida por chuvas em determinados períodos do ano; entretanto a má distribuição e redução dos volumes de chuvas tem sido uma constante na região nos últimos anos, trazendo prejuízos à cultura com a mortalidade de soqueiras, forçando uma renovação precoce do canavial (Farias et al., 2008). Na colheita da cana-de-açúcar com a queima, todo o carbono constituinte da planta é liberado para a atmosfera na forma de CO₂. Na colheita sem a queima, parte do carbono é liberado para a atmosfera e parte é incorporado ao solo, enquanto a palha, que permanece sobre a superfície, vai se decompondo, convertendo-se em matéria-orgânica (húmus) que, por sua vez, é fundamental para uma boa estrutura física e química do solo (Silva, 2003).

O estudo das relações entre o clima e a produção agrícola é um dos principais campos da agrometeorologia e tem por finalidade explicar as influências dos efeitos climáticos em nosso meio, fornecendo subsídios ao planejamento rural. Os modelos agrometeorológicos e a interpretação de dados climáticos relacionados com o crescimento, desenvolvimento e produtividade das culturas fornecem informações que permitem ao setor agrícola tomar importantes decisões, tais como: melhor planejamento do uso do solo, adaptação de culturas, monitoramento e previsão de safras, controle de pragas e doenças, estratégias de pesquisa e planejamento rural (Lazinski, 1993). Segundo Coral (2004), a pressuposição dos modelos agrometeorológicos é que os elementos climáticos, associados às características do local exercem certo controle na produtividade agrícola, interferindo com sua eficiência produtiva, tentando demonstrar que a produção final é função da produtividade potencial da cultura e sua interação com os elementos meteorológicos. Portanto, um bom modelo agrometeorológico, além de considerar o tempo como fator limitante de produção agrícola, analisa a sua relação com a fase fenológica em que a cultura se encontra, levando em conta, portanto, a sua suscetibilidade a determinados eventos climáticos e sua capacidade de onerar a produtividade naquele instante (Coral, 2004). As pesquisas que visam quantificar a resposta da cultura às condições ambientais parecem como parte importante nesse universo, uma vez que contribuem sensivelmente para o desenvolvimento de melhoramento genético, bem como para decisões operacionais e estratégicas (Costa & Costa, 1989).

A metodologia utilizada nessa pesquisa para definir futuros cenários de mudanças climáticas permite que se conheça em detalhes a geografia agrícola na região Nordeste do Brasil e a distribuição da cultura de cana-de-açúcar em função da disponibilidade climática da região. Uma área, em um determinado período, é considerada de baixo risco climático quando a probabilidade máxima de ocorrência de seca ou excesso de chuvas é de 20% (Silva et al., 2009b). Para definir esses riscos são considerados, além dos dados meteorológicos de chuva e temperatura do ar, índices específicos desenvolvidos para apontar a sensibilidade das culturas a eventos extremos que possam ocorrer em fases críticas da vida da planta (Silva, 2010). Ainda são consideradas a capacidade de retenção de água no solo, a profundidade das raízes das plantas cultivadas, a duração do seu ciclo, a quantidade de chuva e a variação desse conjunto de dados no período (Silva et al., 2009b). Dessa maneira, a pesquisa em questão, torna-se viável para que se busque uma minimização dos riscos climáticos mais frequentes que as culturas poderão sofrer durante o período do plantio até sua colheita. Nesse contexto, a presente dissertação de mestrado apresenta os seguintes objetivos:

a) **Geral:** Avaliar os riscos climáticos relacionados com o cultivo da cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil, de acordo com os cenários de aquecimento global propostos pelo IPCC.

b) **Específicos:** (i) Analisar os riscos climáticos para o cultivo da cana-de-açúcar mediante os cenários sem aumento na temperatura e com aumentos de 1,5; 3 e 5°C associados com alterações de acréscimo e decréscimo na precipitação pluvial; (ii) Estimar as melhores épocas de cultivo da cana-de-açúcar na região do Nordeste brasileiro, diante das condições atuais e de variação climática; (iii) Avaliar a possível retração das áreas cultivadas com cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil, mediante os cenários de mudanças climáticas analisados.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A Organização Meteorológica Mundial (OMM) e a UNEP (United Nations Environment Programme), reconhecendo a problemática das mudanças climáticas globais, criaram, em 1988, o IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Segundo o IPCC, no século XX, houve um aumento de 0,65°C na média da temperatura global, sendo mais pronunciado na década de 90. Durante esse período, a precipitação pluvial teve um incremento de 0,2 a 0,3% na região tropical, compreendida entre 10° de latitude Norte e 10° de latitude Sul. As causas dessa variação podem ser de ordem natural, causada pelo homem (antropogênica) ou a soma das duas (IPCC, 2001).

O IPCC (2001), por meio de modelos matemáticos baseados em dados registrados nos oceanos, biosfera e atmosfera, indicou um aumento entre 1,4 e 5,8°C da temperatura global até o final do século XXI (IPCC, 2001a e 2001b). As magnitudes dessas previsões são ainda incertas, pois pouco se sabe sobre os processos de trocas de calor, de carbono e de radiação solar entre os diversos ecossistemas. Segundo Kalnay & Cai (2003), a temperatura poderá subir em até 0,088°C por década, chegando próximo da situação mais otimista indicada no relatório do IPCC. Recentemente, um grupo de cientistas ingleses e americanos ratificou as informações divulgadas pelo IPCC de que a elevação da temperatura do ar ocorrida no final do século XX foi realmente anômala e que o homem teve um papel relevante nesse processo (Silva, 2010).

Para a América Latina está previsto um aumento de 2 a 6 °C na temperatura da superfície terrestre e aumento da frequência e intensidade de eventos extremos, tais como:

ondas de calor/frio, secas, enchentes e, principalmente, furacões e tempestades tropicais (Silva et al., 2010). No setor econômico, a pesca, a agricultura e o turismo tendem a ser os mais afetados devido aos desastres naturais. O decréscimo da quantidade de água potável e o aumento de doenças como dengue e malária são algumas das consequências previstas sobre a população humana dessa região.

No Brasil, especificamente, espera-se elevação de aproximadamente 4°C na temperatura da superfície terrestre; aumento de 10 a 15% na precipitação durante o outono e a redução desta durante o verão e intensificação de eventos com El Niño e La Niña na Região Sul do país (IPCC, 2001). Como resultado do reconhecimento de que o aquecimento global é um problema do presente e não apenas do futuro, foi realizada a Convenção das Nações Unidas Sobre Mudanças Climáticas (United Nations Framework Convention on Climate Change), quando o Protocolo de Kyoto foi elaborado com o objetivo de criar condições para alcançar a estabilização das concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera num nível que não interfira perigosamente no sistema climático, estabelecendo metas e prazos até 2012, para que as emissões desses gases causados pelas atividades humanas sejam reduzidas em 5,0%, na média, com relação aos níveis verificados no ano de 1990.

Sete milhões de toneladas de carbono deixaram de ser jogadas na atmosfera, graças ao uso do etanol, seja na forma de álcool hidratado, ou os 25 % de anidros adicionados à gasolina. Esse número faz parte de um balanço energético desenvolvido pelo Centro de Tecnologia da Copersucar (CTC). O balanço refere-se à safra brasileira de cana-de-açúcar nos anos de 2002-2003, e é resultado de um complexo estudo, que leva em conta a análise de todo o ciclo de vida do álcool, da produção agrícola, das emissões veiculares, para quantificar os benefícios ambientais do combustível renovável, sempre em comparação ao uso do petróleo (Machado, 2009).

A atividade que exige maior dependência das condições do tempo e do clima é a agricultura. As condições atmosféricas afetam todas as etapas das atividades agrícolas, que vão desde o preparo do solo para a semeadura até a colheita e, em muitos casos, transpondo as barreiras da unidade produtora, afetando o transporte, preparo e armazenamento dos produtos (Coral, 2004). Segundo Curry (1952), o grande regulador da vida econômica é o clima. Poucas indústrias ou atividades estão livres de sua influência, mas a atividade mais diretamente afetada é a agricultura. As consequências de situações meteorológicas adversas levam constantemente à graves impactos sociais, acarretando prejuízos econômicos significativos que podem ser difíceis de serem quantificados. O tempo afeta qualquer região e

mesmo nas mais preparadas, com maior disponibilidade de mecanismos tecnológicos é capaz de sofrer enormes danos econômicos.

2.1. Mudanças climáticas

As regiões tradicionalmente canavieiras, como as regiões dos Tabuleiros Costeiros e Zona da Mata do Nordeste do Brasil, não dispõem mais de área para expansão, tornando-se imprescindível o manejo adequado dessa cultura visando o aumento de sua produtividade. (Almeida et al., 2008). Isso implica em conhecer os padrões de crescimento de cada variedade da cultura, fazendo com que as fases de máximo desenvolvimento coincidam com os períodos de maior disponibilidade hídrica e radiação solar, permitindo que ela expresse todo seu potencial genético (Keating et al., 1999; Stone et al., 1999). A cana-de-açúcar é a principal matéria-prima para a fabricação do açúcar e álcool (etanol). Essa cultura é cultivada, principalmente, em clima tropical onde se alternam as estações secas e úmidas. A precipitação pluvial média anual superior a 1.000 mm, sendo bem distribuída, é suficiente para a obtenção de altas produções de cana-de-açúcar. O manejo hídrico dessa cultura deve ser realizado com eficiência, ou seja, com suprimentos hídricos adequados durante o desenvolvimento vegetativo, principalmente nas fases de perfilhamento e alongamento dos colmos, e alguma restrição no período de maturação, para forçar o repouso fisiológico e o enriquecimento em sacarose (Inman-Bamber et al., 2002). No Brasil, poucos estudos sobre a fisiologia da cana-de-açúcar têm sido conduzidos com a finalidade de se verificar a resposta dessa cultura às mudanças climáticas. A maioria dessas informações é obtida por meio de trabalhos realizados em outros países.

O clima é o fator que oferece os maiores desafios para o correto manejo das culturas. Para que haja crescimento e desenvolvimento das plantas, é necessário que os aspectos do clima, tais como temperatura do ar média (diurna e noturna), precipitação pluvial e radiação solar estejam de acordo com as exigências da cultura (Fancelli & Dourado-Neto, 2000). Segundo Wutke et al. (2000), a produção agrícola está diretamente ligada ao clima; podendo, desde a época do plantio até a colheita, ser substancialmente afetada pelas condições ambientais reinantes. O manejo racional do solo e da água através de técnicas convencionais é imprescindível para a sustentabilidade, de forma a manter esses recursos com qualidade e quantidade suficientes para obter níveis satisfatórios de produtividade.

Para Vianelo & Alves (1991), apesar dos grandes avanços técnicos alcançados pelo homem, o bem-estar econômico e social continua dependendo do clima, sendo bastante

provável que essa dependência continue no futuro. A variabilidade do clima afeta, especialmente, e de maneira significativa, a produção de alimentos. Essa dependência assume maior importância devido à evidência do constante crescimento da população mundial. A dependência do homem ao clima não se manifesta tão somente na produção de alimentos, mas também com respeito a outros fenômenos, tais como inundações, secas ou temperaturas extremas, que afligem gravemente as comunidades urbanas, prejudicam a agricultura, a indústria e o comércio, ameaçando, inclusive, o desenvolvimento econômico e social.

Com o aquecimento global, a evaporação aumenta e a disponibilidade hídrica diminui com a retirada de água armazenada do solo, gerando déficit hídrico. O problema se agrava porque o clima mais quente e seco poderá levar grande parte da população sertaneja migrar para os grandes centros urbanos, aumentando, assim, os problemas sócio-econômicos e as desigualdades sociais das favelas e periferias das pequenas, médias e grandes cidades do país. Os cenários climáticos traçados pelo IPCC (2001), em face ao aquecimento global, tais como as secas, inundações, tempestades, doenças, extinção de espécies, aumento do nível do mar, são preocupantes para a agricultura, a biodiversidade e os recursos hídricos do planeta. Tal cenário é ainda mais crítico para os países pobres, justamente os menores emissores de gases do efeito estufa, fundamentalmente devido às suas posições geográficas (Campos, 2010).

Os cientistas do IPCC foram enfáticos em seu quarto relatório divulgado em 2007 - o aquecimento global é inequívoco e há mais de 90% de certeza científica de que as mudanças climáticas são intensificadas pelas atividades humanas. Para se ter uma ideia da evolução dos estudos sobre o tema, no terceiro relatório do IPCC, de 2001, o grau de certeza científica da atribuição do aquecimento do planeta ao aumento de emissões antrópicas de gases de efeito estufa foi estimado em 66%. A concentração desses gases na atmosfera tem aumentado significativamente com o aparecimento das civilizações, notadamente em meados do século XIX quando teve início a revolução industrial (Cerri & Cerri, 2006).

A utilização dos recursos naturais tais como carvão, petróleo e áreas florestadas, fez com que a quantidade de gases principalmente o CO₂ aumentasse exponencialmente até os dias de hoje. Esse aumento contínuo de gases trouxe como consequência a maior interação com a radiação infravermelha emitida pela Terra e, conseqüentemente, o aumento da temperatura do ar atmosférico. Esse aumento é o que se denomina de aquecimento global, que tem reflexos nas mudanças climáticas. Em média, para a Terra como um todo, a energia solar que chega é equilibrada pela radiação terrestre que é emitida. Qualquer fator que venha a alterar esse processo ou mesmo a redistribuição da energia dentro da atmosfera e na relação

atmosfera-terra-oceano pode afetar o clima. Portanto, as mudanças no balanço radiativo da Terra tenderão a alterar as temperaturas atmosféricas e oceânicas e os correspondentes padrões de circulação e tempo, bem como o ciclo hidrológico, por exemplo, alterações na distribuição das nuvens e mudança nos regimes de precipitação e evaporação (Cerri & Cerri 2006).

2.2. Mudanças climáticas e agricultura

A agricultura é uma atividade altamente dependente de fatores climáticos, como temperatura, pluviosidade, umidade do solo e radiação solar. Segundo Ayoade (2006), a mudança climática pode afetar a produção agrícola de várias formas: pela mudança em fatores climáticos, incluindo a frequência e a severidade de eventos extremos, pelo aumento da produção devido ao efeito fertilizador de carbono por meio de maiores concentrações de CO₂ atmosférico, pela alteração da intensidade de colheita devido a uma mudança no número de graus-dia de crescimento, ou então modificando a ocorrência e a severidade de pragas e doenças, entre outros efeitos.

A vulnerabilidade ou a baixa capacidade dos países em desenvolvimento de se defender dos impactos das mudanças climáticas é um fator que merece destaque, pois torna-se cada vez mais agravante quando se trata dos seus impactos sobre a agricultura desses países que são, de maneira geral, fortemente dependentes da atividade agrícola, seja ela de subsistência ou base da economia nacional (Pellegrino et al., 2007). Para que se possa combater ou se adaptar a esses impactos, um passo importante é buscar conhecê-los, definindo-se cenários agrícolas futuros a partir de cenários futuros das mudanças climáticas. Ainda segundo Pellegrino et al. (2007), considerando o cenário de aumento das temperaturas, pode-se admitir que nas regiões climaticamente limítrofes àquelas de delimitação de cultivo adequado de plantas agrícolas a anomalia positiva que venha a ocorrer será desfavorável ao desenvolvimento vegetal. Quanto maior a anomalia, menos apta se tornará a região, até o limite máximo de tolerância biológica ao calor. Por outro lado, outras culturas mais resistentes a altas temperaturas, provavelmente, serão beneficiadas, até o seu limite próprio de tolerância ao estresse térmico. No caso de baixas temperaturas, regiões que atualmente sejam limitantes ao desenvolvimento de culturas suscetíveis a geadas, com o aumento do nível térmico devido ao aquecimento global passarão a exibir condições favoráveis ao desenvolvimento da planta. Um caso típico seria o da cultura cafeeira que poderá ser deslocada futuramente do Sudeste para o Sul do país (Pinto et al., 2004).

No Brasil, poucos estudos foram feitos sobre o reflexo das mudanças climáticas e seus impactos na agricultura. Assad & Luchiari Jr. (1989) avaliaram as possíveis alterações de produtividade para as culturas de soja e milho em função de cenários de aumento e de redução de temperatura. Siqueira et al., (1994 e 2000) apresentaram, para alguns pontos do Brasil, os efeitos das mudanças globais na produção de trigo, milho e soja. Uma primeira tentativa de identificar o impacto das mudanças do clima na produção regional foi feita por Pinto et al., (1989 e 2001). Nesses estudos eles simularam os efeitos das elevações das temperaturas e das chuvas no zoneamento do café para os Estados de São Paulo e Goiás. Esses autores observaram uma drástica redução nas áreas com aptidão agroclimática, condenando a produção de café nestas regiões.

A produção de cana-de-açúcar contribui com o meio ambiente e com a sustentabilidade em cadeias produtivas. Sua utilização sistemática pode promover o progresso técnico e induzir o advento de mudanças positivas no impacto ecológico e nas condições de trabalho. Além do mais, a cana-de-açúcar sequestra CO₂ da atmosfera diminuindo o efeito do aquecimento global (Orlando Filho, 2007). A produtividade média brasileira de cana-de-açúcar tem apresentado significativa elevação de 50% nos últimos 20 anos, de 44 para 67 toneladas de cana por hectare; entretanto, muito ainda pode ser melhorado em relação ao setor sucroalcooleiro. O Estado de São Paulo, o maior produtor brasileiro, apresenta produtividade média de 78 toneladas de cana por hectare, e possui diversas unidades produtoras que ultrapassaram a marca de 90 a 95 toneladas de cana por hectare (Macedo, 2008).

Nas últimas décadas o Brasil dobrou sua área de cana plantada, basicamente em função da produção do álcool carburante; essa expansão ocorreu principalmente em regiões de solo fértil e climas favoráveis (Takeshi, 2008). Estima-se que no Brasil são plantados 4,5 milhões de hectares de cana, em menos de 1% das terras agricultáveis. Esse plantio ajuda muito na produção de matéria-prima, produzindo assim energia natural, renovável e limpa. Conclui-se, portanto, que o Brasil é o maior produtor de cana, com capacidade de dobrar seu potencial, visando a máxima produção e o lucro, pois de toda a cana-de-açúcar produzida no Brasil, 55% vira álcool e 45% vira açúcar (Figueiredo, 2009).

2.3. Modelagem agrometeorológica

A modelagem agrometeorológica tem um papel importante no fornecimento de subsídio aos pesquisadores da área agrônômica e agricultores em geral, para que seja possível a interpretação das relações solo-planta-atmosfera e a sua utilização em uma agricultura

sustentável e racional. O estudo do efeito das condições do tempo e do clima na agricultura é o problema básico da agrometeorologia. Assim, para estabelecer essa relação é fundamental o conhecimento dos elementos meteorológicos primários, tais como o vento, radiação solar, temperatura e umidade do ar. As combinações específicas desses elementos, associadas aos outros fatores locais, determinam o crescimento, desenvolvimento e produtividade dos organismos vivos (Lima, 1995).

As vantagens da utilização de modelos agrometeorológicos, segundo Pessoa et al., (1997), estão associadas ao baixo custo, velocidade de obtenção dos resultados, completa informação, criação e proposição de cenários ideais. Quanto às limitações, podem ser citados aspectos referentes à validação dos modelos e simuladores, dificuldade de decisão (quando o problema possui mais de uma solução), confiabilidade e exatidão do modelo empregado, variabilidade espacial e temporal dos dados. Na agricultura, os modelos têm sido usados na simulação do crescimento da planta e na previsão da produtividade. A relação funcional entre crescimento e desenvolvimento relativo, em termos de graus-dia, e entre fenologia e variação temporal do índice foliar, tem sido comumente utilizada com essa finalidade. Usualmente, os modelos de simulação de produtividade potencial das culturas utilizam atributos da planta relacionados à produção de fitomassa seca, tais como área foliar, crescimento e fenologia (Yin, 1996).

A precipitação pluvial e a temperatura do ar, por intermédio do zoneamento de risco climático, possibilitam identificar as áreas com viabilidades econômicas de uma região. Em modelagem agrometeorológica, em geral, são utilizados valores do coeficiente de cultivo não-ajustados apresentados pela FAO (Doorenbos & Pruitt, 1977). Entretanto, apesar desses valores serem baseados em pesquisas desenvolvidas em diferentes regiões do mundo, sabe-se que eles variam de acordo com as condições edafoclimáticas, assim como de acordo com a cultivar ou variedade da cultura durante os seus estádios de desenvolvimento. O conhecimento dos valores precisos do K_c é particularmente importante para a determinação das necessidades hídricas das culturas, tanto em termos de manejo da água de irrigação, como também no planejamento de sistemas hidroagrícolas, assumindo, atualmente, grande importância em modelagem agrometeorológica. Nesse particular, muitas pesquisas já foram realizadas visando à determinação mais precisa do consumo hídrico de diferentes culturas no Brasil (Silva et al., 2009; Campos et al., 2010; Silva et al., 2010).

No estudo das mudanças climáticas, os modelos de simulação do sistema solo-planta-atmosfera se constituem numa ferramenta adequada para a análise da grande variabilidade ambiental, pois permitem determinar os riscos envolvidos na produção agrícola

em função dos principais componentes de produção. Eles possibilitam a repetição de diferentes condições de manejo em vários anos e locais, usando-se dados climáticos históricos ou sintéticos (Harrison et al., 1989). Os seus resultados, representados em forma de funções de probabilidade, ao invés de simples médias, permitem mensurar a variabilidade do desempenho das diferentes técnicas adotadas, possibilitando a definição de estratégias mais adequadas para a obtenção de produtividades máximas e estáveis, com menor custo de produção e impacto ambiental. A interpretação e a aplicação da informação podem ser facilitadas pela representação espacial dos resultados das simulações em mapas com escala regional. Assim, o uso de modelos pode proporcionar valiosa contribuição, a um baixo custo, para o entendimento dos processos condicionantes da produtividade e para melhorar as recomendações de práticas de manejo de solo e culturas em diferentes áreas.

A modelagem agrometeorológica permite, antecipadamente, o conhecimento quantitativo da influência das condições climáticas sobre o desenvolvimento e a produção de culturas agrícolas. A maior abrangência e confiabilidade de utilização dos modelos de estimativa de produtividade podem ser obtida mediante teste dos modelos para determinada região. Centenas de modelos já foram desenvolvidos para o manejo de diferentes tipos de aquíferos e condições específicas encontradas no campo. No entanto, vale salientar que a principal limitação quanto ao uso de modelos é a coerência de dados de entrada necessários, os quais não se encontram frequentemente disponíveis, assim como resultados de ensaios para as suas calibração e validação (Gonçalves, 2002).

2.4. Zoneamento agrícola

Na região Nordeste do Brasil, especialmente na parte semiárida, a água é o fator mais limitante à obtenção de elevadas produtividades agrícolas. A extrema variabilidade das condições climáticas faz com que, em alguns anos, o suprimento de água às plantas seja suficiente para atingir altas produtividades, enquanto que em outros anos, ela pode levar à perda total das colheitas (Azevedo et al., 2003). As culturas de subsistência são normalmente estabelecidas em várzeas, com semeadura após as primeiras chuvas; muitas vezes, as plantas morrem por falta de água devido à distribuição irregular de chuva e à ausência de água armazenada no perfil do solo. Aplicações insuficientes ou em excesso de água resultam em perdas e prejuízos consideráveis às plantas e ao solo, diminuindo, dessa forma, a eficiência do uso de irrigação (Silva et al., 2001).

O estudo de culturas resistentes às condições edafoclimáticas reinantes na maior parte do semiárido brasileiro é de grande importância, visto que a possibilidade de sucesso na colheita dos pequenos e grandes agricultores torna-se maior à medida que os riscos climáticos são minimizados. Assim, o desenvolvimento do zoneamento agrícola se constitui numa ferramenta importante para minimizar os riscos mais frequentes que a cultura poderá sofrer no período de plantio até a sua colheita. Para a região semiárida do Nordeste do Brasil, devido a grande variabilidade espacial e temporal na sua pluviometria, a conciliação dos períodos chuvosos e as melhores épocas de plantio são fatores determinantes para o sucesso da exploração agrícola de qualquer cultura. Mesmo assim, a irregularidade do período chuvoso nessa região, restringe a escolha de qualquer cultura a ser implantada.

O Brasil é um país muito rico nas produções agrícolas, mas determinadas regiões sofrem adversidades climáticas que podem afetar direta ou indiretamente a sua produção, como consequências das secas, granizo, geadas, vendaval, chuvas em excesso, dentre outras intempéries naturais. Dentre as adversidades climáticas existentes no Brasil, a seca é hoje a que causa maior impacto. As deficiências hídricas, associadas aos períodos de longa estiagem durante a estação chuvosa, constituem uma das principais causas das quebras de safras de grãos no país, principalmente nos estados situados nas regiões Centro Sul e Nordeste.

Para que haja uma redução dos riscos climáticos para a agricultura e, conseqüente, diminuição das perdas para os agricultores, tornou imprescindível identificar, quantificar e mapear as áreas mais favoráveis ao plantio das culturas, levando-se em conta a oferta climática e, mais especificamente, a distribuição pluviométrica. Diante dessas adversidades climáticas e da interferência negativa que elas causam na produção agrícola e na economia do país, instituições de pesquisas passaram, a partir da década de 70, a desenvolver no Brasil mecanismos que permitissem indicar, com maior margem de segurança, o local e a data mais apropriada para plantar determinada cultura, nas mais diversas regiões brasileiras, como também a cultivar mais adequada para cada região (www.mda.gov.br_2010). Dentre os principais mecanismos criados, podem ser citados o zoneamento de aptidão agrícola, o zoneamento agroclimático, o zoneamento agrícola e o zoneamento agrícola de risco climático.

Segundo o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), o zoneamento agrícola identifica, para cada município, a melhor época de plantio das culturas, por meio de análise de séries climáticas históricas de no mínimo 15 anos do ciclo das cultivares e tipo de solo, tendo como objetivo minimizar os riscos de ocorrência de adversidades climáticas coincidentes com as fases mais sensíveis das culturas. O programa de zoneamento agrícola do MAPA, que teve início no Brasil em 1996, tem-se constituído num

instrumento de apoio à política agrícola do Governo Federal na área de crédito e seguridade rural, bem como num instrumento de indução ao uso de tecnologia e de suporte para a tomada de decisão no Programa de Garantia da Atividade Agropecuária (PROAGRO), além de servir de referencial para as empresas privadas que atuam na área securitária no Brasil (Cunha & Assad, 2001).

O zoneamento agrícola de riscos climáticos é atualizado todos os anos com colheitas novas, cultivares, dados de clima e métodos de interpolação, melhorando a metodologia ano após ano. As novas tecnologias, como sistemas de informações geográficas (SIG), sensoriamento remoto e modelo de simulação de crescimento, desenvolvimento e produtividade de culturas, vêm sendo desenvolvidas nas últimas décadas, abrindo novos caminhos para a pesquisa de planejamento e manejo de práticas agrícolas. O uso de modelos de culturas para simulação em computadores possibilita uma economia de tempo, trabalho e quantidade de recursos para o planejamento e tomada de decisões de manejo no setor agrícola. Além disso, a utilização de modelos de culturas, associados às técnicas de geoprocessamento, facilita a identificação de locais e épocas mais recomendadas para o desenvolvimento das culturas, tornando-se uma importante ferramenta para o zoneamento agrícola e difusão de informações (Figueiredo Júnior, 2004).

2.5. Solos

Os solos do NEB podem ser agrupados em duas sub-regiões bem distintas e estreitamente relacionadas com o clima. Uma delas corresponde a maior parte do Piauí e Maranhão e a costa do Rio Grande do Norte até o sul da Bahia. Essa região é caracterizada por um clima úmido e vegetação com predominância de floresta. Os solos dessa sub-região são relativamente profundos e com altos teores de ferro e alumínio. A outra sub-região corresponde ao polígono das secas. Os solos dessa sub-região são ricos em elementos minerais, rasos e com restrições ao seu uso pela seca e excesso de sais. No relevo mais declive predominam os solos rasos, enquanto no relevo intermediário predominam os solos medianamente rasos que apresentam, com frequência, grande quantidade de pedras e cascalhos na sua superfície nos, aluviais e os que racham (Silva et al., 2010).

Nas baixadas são encontrados os solos salinos, aluviais e os que racham. Os solos das regiões áridas e semiáridas, pelos altos teores de sais solúveis que contem nos horizontes superficiais, são salinos e alcalinos ou sódicos (halomórficos) devido às altas taxas de evapotranspiração e à baixa pluviosidade. Em relação ao crescimento das plantas, os solos

halomórficos podem ser classificados em: a) salinos; b) salinos-sódicos e c) sódicos. Os solos salinos são solos que apresentam condutividade do extrato de saturação maior que 4,0 mhos/cm a 25°C, porcentagem de saturação de sódio menor que 15 e o pH é geralmente menor que 8,5 (Gonçalves, 1982).

2.5.1. Solos apropriados para o cultivo da cana-de-açúcar

Tendo a cana-de-açúcar um sistema radicular profundo, um ciclo vegetativo econômico de quatro anos e meio ou mais e uma intensa mecanização que se processa durante esse longo tempo de permanência da cultura no terreno, o preparo do solo deve ser profundo e esmerado (Beauclair & Scarpari, 2006). Convém salientar que as unidades sucroalcooleiras não seguem uma linha uniforme de preparo do solo, tendo cada uma seu sistema próprio, que ocorre em função do tipo de solo predominante e da disponibilidade de máquinas e implementos. De acordo com a Cooperativa Central dos Produtores de açúcar e álcool do Estado de São Paulo, no preparo do solo, tem-se de considerar duas situações distintas: (i) a cana vai ser implantada pela primeira vez e (ii) o terreno já se encontra ocupado com cana.

No primeiro caso, faz-se uma aração profunda, com bastante antecedência do plantio, visando à destruição, incorporação e decomposição dos restos culturais existentes, seguida de gradagem, com o objetivo de completar a primeira operação. Em solos argilosos é normal a existência de uma camada impermeável, a qual pode ser detectada através de trincheiras abertas no perfil do solo, ou pelo penetrômetro.

Constatada a compactação do solo, seu rompimento se faz através de subsolagem, que só é aconselhada quando a camada adensada se localizar a uma profundidade entre 20 e 50 cm da superfície e com solo seco (Machado, 2008). Nas vésperas do plantio, faz-se nova gradagem, visando ao acabamento do preparo do terreno e a eliminação de ervas daninhas. Na segunda situação, onde a cultura da cana já se encontra instalada, o primeiro passo é a destruição da soqueira, que deve ser realizada logo após a colheita. Essa operação pode ser feita por meio de aração rasa (15-20 cm) nas linhas de cana, seguidas de gradagem ou através de gradagem pesada, enxada rotativa ou uso de herbicida. Se confirmada a compactação do solo, a subsolagem torna-se necessária. Nas vésperas do plantio procede-se a uma aração profunda (25-30 cm), por meio de arado ou grade pesada. Seguem-se as gradagens necessárias, visando manter o terreno destorroado e apto ao plantio (Bernardo et al., 2009).

2.6. Clima

De acordo com a classificação de Köppen & Geiger (1928), o clima do Nordeste Brasileiro é Bshw (quente e semi-árido, com chuvas de verão) e Bshw' (quente semi-árido com chuvas de verão/outono). Segundo Fernandes (2003) há uma influência da massa equatorial continental, da massa equatorial atlântica e da massa tropical atlântica nessa região. O NEB é reconhecido em todo o mundo em virtude da grande variabilidade espaço-temporal do seu regime pluviométrico que tem, como consequência, secas severas e chuvas em excesso, em diferentes áreas da região (Silva et al., 2006). Os períodos de duração das secas e enchentes dependem do período de atuação, duração e intensidade e cobertura de eventos de grande escala, como o El Niño/Oscilação do Sul (ENOS) e do Dipolo do Atlântico, os anticiclones subtropicais do Atlântico, a zona de convergência intertropical (ZCIT) e a oscilação de 30 – 60 dias. O NEB apresenta temperaturas elevadas cuja média anual varia de 20 a 28°C. Nas áreas situadas acima de 200m e no litoral oriental as temperaturas variam de 24 a 26°C. As médias anuais inferiores a 20°C encontram-se nas áreas mais elevadas da chapada Diamantina e da Borborema. O índice de precipitação anual no NEB varia de 300 a 2000 mm, enquanto que o período principal de chuvas tem início em fevereiro e termina em maio, sendo a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), o principal sistema meteorológico provocador de chuva nesse período (Silva, 2004). Na escala sinótica destacam-se os sistemas frontais austrais ou zonas de convergência deles remanescentes, como os vórtices ciclônicos da alta troposfera e os distúrbios de leste. Também atuam no Nordeste fenômenos de mesoescala, tais como sistemas oriundos da ZCIT (complexos convectivos de mesoescala e linhas de instabilidade formados na costa norte do Nordeste) e circulações ocasionadas por contraste térmico entre superfícies sólidas e líquidas (Silva, 1996).

Segundo Kousky (1979) são identificados três regimes de precipitação no NEB. No primeiro regime, que compreende os Estados do Ceará, oeste do Rio Grande do Norte, interior da Paraíba e Pernambuco, as chuvas ocorrem durante o outono por meio do deslocamento mais ao sul da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), da convergência de umidade e da convecção local (Molion, 2002). O segundo regime atua na região do litoral leste do NE, que compreende todo o litoral desde o Rio Grande do Norte até o Estado da Bahia. Nessa região, as precipitações ocorrem por meio da influência ocasionada pelas massas de ar tropical ou ainda por meio dos distúrbios ondulatórios de leste que atingem o litoral nordestino com maior intensidade. O terceiro regime influencia a parte sul do NEB compreendida pela Bahia, norte de Minas Gerais, noroeste do Espírito Santo e partes do Maranhão, Piauí e Pernambuco.

A maior precipitação da região ocorre na época do verão pela atuação de sistemas frontais, convecção local e vórtices ciclônicos. Deste modo, pode-se caracterizar que o clima do NEB é bastante influenciado pela atuação concomitante de vários sistemas meteorológicos, tais como aqueles já citados e a dinâmica de interações na região tropical.

2.6.1. Climas apropriados para o cultivo da cana-de-açúcar

O clima ideal para o cultivo da cana é aquele que apresenta duas estações distintas: uma quente e outra úmida, para proporcionar a germinação, o perfilhamento (formação de brotos) e o desenvolvimento vegetativo, seguida de outra fria e seca, para promover a maturação e o acúmulo de sacarose nos colmos (BNDES, 2008). A cana-de-açúcar não apresenta boa produtividade em climas como os das regiões equatoriais úmidas; por isso faz pouco sentido imaginar que a Amazônia se preste a cultivos comerciais extensivos dessa planta (www.demec.ufmg.br). De acordo com Alfonsi et al.,(1987) essa planta sofre as influências das condições climáticas no curso do ano. Devido às necessidades de altas taxas de sacarose, a planta precisa encontrar condições de temperatura e umidade adequadas que permitam um desenvolvimento suficiente durante as fases vegetativas, seguidas de um período com restrição hídrica ou térmica para forçar o repouso vegetativo e, conseqüentemente, o enriquecimento em sacarose na época do corte.

A cana-de-açúcar é considerada essencialmente como uma planta tropical, sendo um cultivo de longa duração e, portanto, convive com todas as estações, chuvosa, inverno e verão durante seu ciclo de vida. Os principais componentes climáticos que controlam o crescimento, a produção e qualidade da cana são temperatura, luz e umidade disponível (Vitti, 2002). A planta vive melhor em áreas ensolaradas quentes e tropicais. A melhor temperatura para a cana é de 30 a 34°C. abaixo de 20°C e acima de 35°C o crescimento dela é muito lento, enquanto que acima de 38°C é nulo (Oliveira, 2008).

2.7. Vegetação

Da área total do NEB, 960.461 km² (62%) têm sido considerados como sendo semiárida, tomando como limite a isoieta de 800 mm (Mello Netto et al., 1992). Recentemente, Souza et al., (1994), com base na isoieta modal de 800 mm ano⁻¹, e em critérios de natureza geo-ambiental, afirmaram que o semiárido ocupa 788.064 km², onde a

precipitação média anual varia de 400 a 800 mm e que, além da vegetação caducifólia espinhosa (caatinga), ocorrem outros tipos de vegetação.

Na parte semiárida, principalmente em baixas altitudes, a vegetação caducifólia espinhosa (caatinga) é a vegetação xerófila dominante, apresentando variações fisionômicas e florísticas (Andrade-Lima 1981; Rizzini 1997). Nas maiores altitudes, especialmente em chapadas sedimentares, Andrade-Lima (1978) registra uma vegetação xerófila arbustiva não espinhosa denominada carrasco. Para Fernandes (1996), a caatinga e o carrasco são os tipos vegetacionais característicos do semiárido, ajustados às condições naturais, enquanto que manchas de matas úmidas ou secas e as variações de cerrado estariam vinculadas a fatores abióticos atuais e associados a flutuações climáticas ocorridas no quaternário.

Em uma revisão detalhada dos autores que trataram dos padrões da caatinga, Oliveira et al., (1997) observam que é possível identificar um tipo de caatinga particular, no que se refere à flora e à fisionomia, que ocorre principalmente em áreas de bacias sedimentares, com solos arenosos e profundos - caatingas de areia. Rodal (1984) constatou que a flora das caatingas de areia, típica das áreas sedimentares, ocorre ainda em áreas do cristalino com recobrimento pedimentar. Segundo Andrade-Lima (1981), Rodal (1984; 1992), Emperaire (1989; 1991) e Rodal et al. (1999), as caatingas de areia representam um dos tipos de caatinga menos estudados no Nordeste, em contraposição às caatingas do cristalino, que apresentam flora e fisionomias mais conhecidas.

No Estado do Piauí, o carrasco, o cerrado e a caatinga se interpenetram em diversos pontos de contato, tornando-se difícil estabelecer limites razoáveis entre tais tipos vegetacionais (Fernandes, 1982). Por outro lado, Emperaire (1989) mencionou que são nessas áreas de transição que os fatores climáticos, geomorfológicos e edáficos tomam maior importância, determinando a distribuição das espécies ali representadas. Um exemplo da influência desses fatores na vegetação pode ser observado no sudeste do Piauí, onde ocorrem formações caducifólias espinhosas (caatinga) em áreas sedimentares e em terrenos cristalinos.

2.8. Características da cultura

2.8.1. Importância econômica

A planta de cana-de-açúcar é uma gramínea perene, pertence ao gênero *Saccharum*, própria de climas tropicais e subtropicais, possivelmente originária do sudeste da Ásia, talvez

das regiões de Assam e Bengala (Silva, 2003). Há várias espécies do gênero *Saccharum* (*S. officinarum*, *S. spontaneum*, *S. robustum*, etc.), entretanto as variedades em uso são praticamente todas híbridas, sendo denominadas *Saccharum* spp, nas quais procura-se aliar à rusticidade de algumas espécies, como a *S. spontaneum*, às boas qualidades das variedades nobres de *S. officinarum* (Passos et al., 1973).

O setor sucroalcooleiro é de grande relevância no contexto sócio-econômico do país, visto que a cultura da cana-de-açúcar é uma das mais importantes espécies agrícolas exploradas no Brasil. Cerca de R\$ 12,7 bilhões por ano é movimentado pelo mercado sucroalcooleiro, com faturamentos diretos e indiretos que corresponde a 2,3% do PIB brasileiro. Com a valorização das fontes alternativas de energia, o álcool começou a chamar a atenção dos investidores do mercado de ações. A produção de cana-de-açúcar no Brasil em 2006 cresceu 8,1%, em relação ao ano de 2007, alcançando 457.245.516 ton (IBGE, 2007). A crescente demanda por álcool nos mercados interno e externo influenciou o preço do produto, com um crescimento de R\$ 3,8 bilhões no valor da produção, que atingiu quase R\$ 17 bilhões em 2006. Ainda, segundo o IBGE (2007), a área plantada com cana-de-açúcar também vem crescendo nos últimos anos, ultrapassando 6,0 milhões de hectares em 2006. Os principais produtos gerados por essa cultura são o açúcar, com aproximadamente 30,04 milhões de toneladas, e o álcool, com 21,30 bilhões de litros (Oliveira et al., 2007).

O Brasil é um dos maiores produtores de cana-de-açúcar no mundo, com 8,36 milhões de hectares de área cultivada e uma produção de 5,58 milhões toneladas de colmos, 26,6 milhões de metros cúbicos de álcool e 30,0 milhões de toneladas de açúcar (EPE, 2008). O balanço energético nacional elaborado pela EPE também destaca que o rendimento médio nacional de cana-de-açúcar é de 76,61 toneladas de colmos por hectare. O bagaço da cana-de-açúcar é utilizado como fonte térmica para a produção de álcool (inclusive para a geração de energia elétrica) e de alimentos (na produção de açúcar). A produção agrícola de cana-de-açúcar tem desempenho importante na matriz energética brasileira (EPE, 2008), pois gera cerca de 1,2 milhões de postos de emprego em toda a cadeia produtiva, ou seja, 600 vezes mais do que aqueles gerados pelo setor do petróleo (ICIDCA, 1986). Os dados do IBGE (2007) demonstram que os maiores produtores brasileiros de cana-de-açúcar são os seguintes estados da Federação: Mato Grosso (96,5 ton ha⁻¹), Goiás (73,4 ton ha⁻¹), São Paulo (72,9 ton ha⁻¹), Paraná (73,4 ton ha⁻¹), Minas Gerais (56,9 ton ha⁻¹), Alagoas (55,7 ton ha⁻¹), Pernambuco (43,3 ton ha⁻¹) e Paraíba (41,2 ton ha⁻¹).

2.9. Balanço hídrico

O balanço de água no solo é a contabilização da água do solo, resultante da aplicação do princípio de conservação de massa num volume de solo vegetado. A variação de armazenamento de água no volume considerado (ΔARM), por intervalo de tempo, representa o balanço entre o que entrou e o que saiu de água do sistema. Ele permite observar a dinâmica da água no solo a partir do armazenamento, deficiência e excedentes hídricos (Thornthwaite, 1946; Thornthwaite, 1948; Camargo & Camargo, 2000). O balanço hídrico é o método mais eficiente para quantificar o potencial hídrico de uma região, pois considera a interação entre o fatores edáfico e climático. O fator edáfico interfere no armazenamento de água no solo e o climático, por sua vez, é representado pela precipitação e evapotranspiração (Moster et al., 2003). Esse método é uma ferramenta utilizada em diversas áreas do conhecimento tais como a agrícola (Pereira et al., 1997; Cintra et al., 2000), florestal (Moster et al., 2003) e hidrológica (Tucci, 1997). Uma das formas de se contabilizar o balanço de água no solo é por meio do método proposto por Thornthwaite e Mather (1955), denominado de Balanço Hídrico Climatológico (BHC), no qual a partir dos dados de Precipitação (P), de Evapotranspiração (ETP) e da Capacidade de Água Disponível (CAD), chega-se aos valores de disponibilidade de água no solo (Variação de Armazenamento = ΔARM), de evapotranspiração real (ETR), de deficiência hídrica (DEF) e de excedente hídrico ($\text{EXC} = \text{DP}$).

O BHC foi desenvolvido inicialmente com o objetivo de se caracterizar o clima de uma região, de modo a ser empregado na classificação climática desenvolvida por Thornthwaite na década de 40. Posteriormente, esse método começou a ser empregado para fins agrônômicos dada a grande interrelação da agricultura com as condições climáticas. O balanço hídrico pode ser realizado para diversos períodos de tempo, variando de horas a anos, sendo as escalas diária e anual as mais utilizadas. A escolha de uma ou outra escala temporal depende especialmente da finalidade e da contabilidade hídrica. Estudos geológicos e climáticos utilizam com frequência as escalas anual e mensal, respectivamente. O monitoramento de água no solo para fins de irrigação, considera normalmente períodos de 1 a 10 dias, dependendo das condições climáticas e capacidade de armazenamento de água da região.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Área de estudo

3.1.1. Localização geográfica

O risco climático do cultivo da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum L.*) foi realizada para toda a região Nordeste do Brasil, com os objetivos mencionados anteriormente. A área do NEB é de aproximadamente 1.558 196 km², equivalente a 18% do território nacional e é a região que possui a maior costa litorânea. A região possui os estados com a maior e a menor costa litorânea, respectivamente Bahia, com 932 km e Piauí, com 60 km de litoral. Ela está situado entre os paralelos de 01° 02' 30" de latitude norte e 18° 20' 07" de latitude sul e entre os meridianos de 34° 47' 30" e 48° 45' 24" a oeste do meridiano de Greenwich. Limita-se a norte e a leste com o oceano Atlântico, ao sul com os estados de Minas Gerais e Espírito Santo e a oeste com os estados do Pará, Tocantins e Goiás. A Figura 1 exibe a posição geográfica da área de estudo.

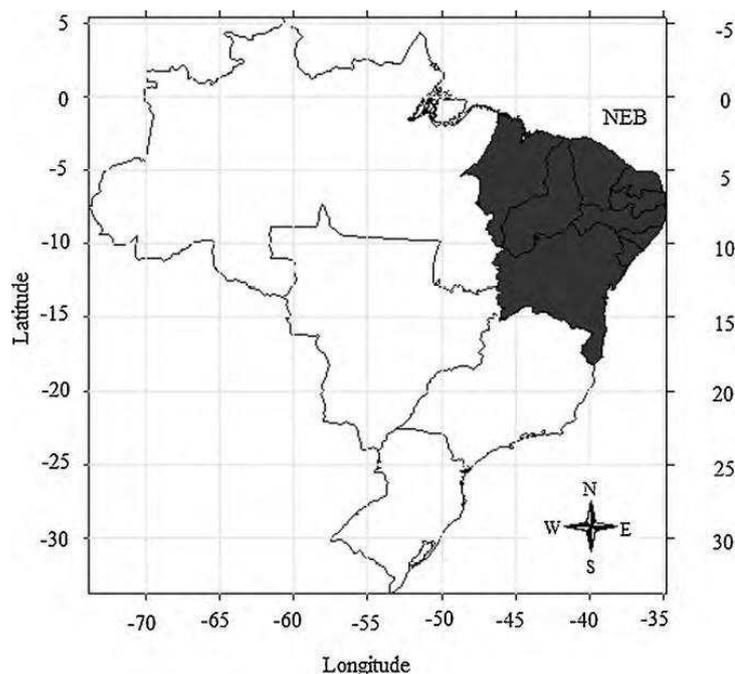


Figura 1. Mapa do Brasil com a localização da região de estudo

3.1.2. Modelos computacionais

O Modelo SARRA – Br (Sistema de Análise Regional do Risco Agroclimático – Brasil) foi baseado no SARRA proposto por Forest & Clopes (1994) e possui um módulo para simulação do balanço hídrico diário denominado BRASDHC (Brasil – Diagnóstico Hídrico das Culturas). O BRASDHC é derivado do modelo BIP ou BIPODE desenvolvido por Forest (1984), testado por Assad (1986) e modificado por Fréteaud et al., (1987), Vaksman (1990) e Affholder (1995). Esse modelo apresenta como resultados os dados diários de evapotranspiração real e evapotranspiração sem restrição de água no solo, profundidade da frente de umedecimento do solo, armazenamento e a percolação (Affholder et al., 1997). Sarma et al., (1980) desenvolveram um programa que calcula a evapotranspiração diária como resíduo da equação do balanço hídrico. Esse modelo foi utilizado neste estudo para avaliar os riscos climáticos da cana-de-açúcar cultivada em sistema de sequeiro no NEB.

Nesta pesquisa foram utilizados três softwares computacionais:

- i. Estima-T - Estima a temperatura do ar (Cavalcanti et al., 2006);
- ii. Sevap - Estima a evapotranspiração potencial por diversos métodos (Silva et al., 2005);
- iii. SARRA - Calcula do balanço hídrico e determina o ISNA (Baron et al., 1996).

3.2. Risco climático

3.2.1. Dados meteorológicos

Foram utilizados dados diários de precipitação de 650 postos pluviométricos fornecidos pela Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas (UACA), oriundos do Banco de Dados Hidroclimatológicos da Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste – SUDENE para todos estados da região Nordeste. As séries históricas de precipitação pluvial possuem no mínimo 30 anos de dados diários.

3.2.2. Condição para cálculo do risco climático

O cálculo do risco climático foi realizado por intermédio de um modelo de balanço hídrico da cultura, realizado em duas etapas. Na primeira delas, foi determinado o balanço hídrico, utilizando-se os cenários de mudanças climáticas globais para os aumentos de temperatura de 1,5, 3,0 e 5,0°C. Essas variações de temperatura do ar foram associadas às ocorrências dos fenômenos El Niño e La Niña, com alterações de acréscimo e decréscimo de 10, 25 e 40% na precipitação. Na aplicação do modelo não foi considerada qualquer evolução tecnológica, tanto no manejo das culturas quanto no seu melhoramento genético, e qualquer adaptação fisiológica das plantas às novas condições. A distribuição dos postos pluviométricos utilizados no presente estudo é apresentada na Figura 2.

Os cenários agrícolas foram simulados utilizando o Sistema de Análise Regional dos Riscos Agroclimáticos, com base no software SARRA (Baron et al., 1996). Tal modelo estima componentes do balanço hídrico de uma superfície vegetada em solo estratificado, utilizando dados diários de precipitação pluvial e evapotranspiração potencial, além de coeficientes de cultivo (K_c), que descrevem o crescimento de culturas e características de solo. Nesse modelo, a infiltração e redistribuição de água no solo são governadas pela equação de Darcy-Buckingham e a evapotranspiração real é dada em função da evapotranspiração máxima e da umidade do solo. Na segunda etapa, foram empregados os valores de ISNA (Índice de Satisfação da Necessidade de Água para a cultura) estimados para o período fenológico compreendido entre o perfilhamento e alongamento dos colmos (período mais crítico ao déficit hídrico), com frequência mínima de 80% nos anos utilizados em cada posto pluviométrico. Cada valor de ISNA, observado durante essa fase, foi associado à localização geográfica da respectiva estação para posterior espacialização e,

consequentemente, foi computado o valor das áreas de acordo com os critérios de risco climático associados ao cultivo da cana-de-açúcar.

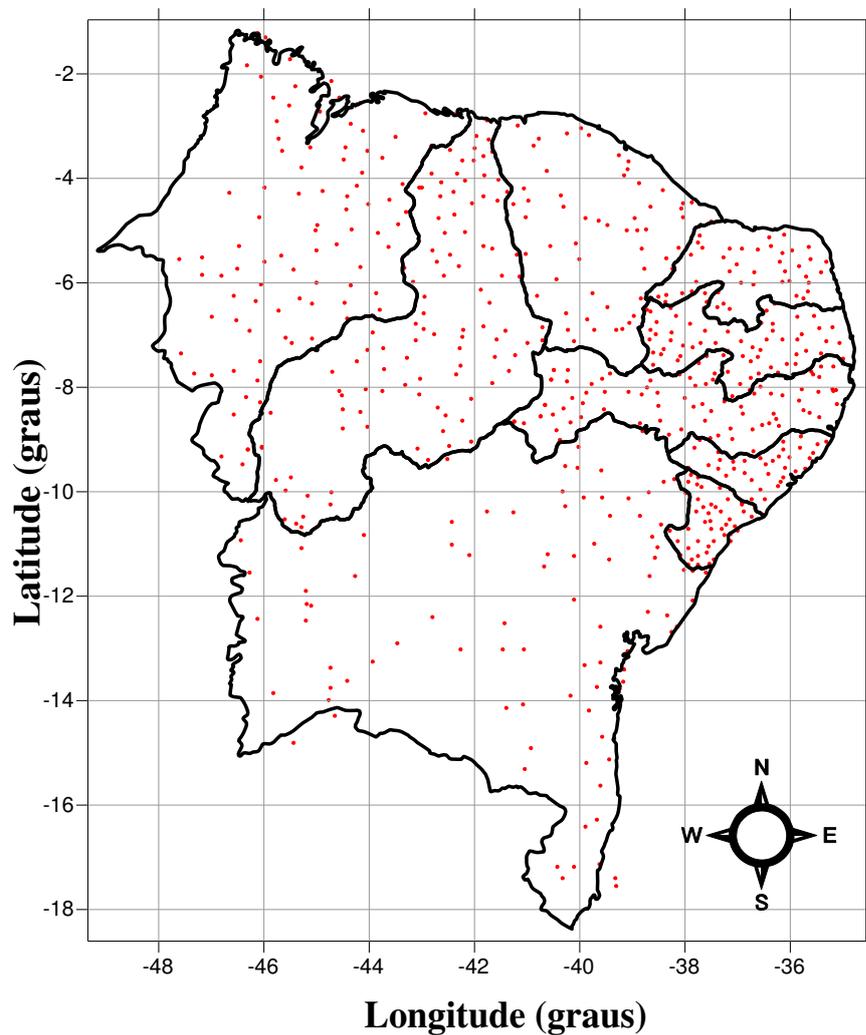


Figura 2. Espacialização dos postos pluviométricos utilizados no estudo.

3.2.2.1. Controle de qualidade dos dados

O controle de qualidade dos dados é um pré-requisito para o cálculo do Índice de Satisfação da Necessidade de Água para a cultura (ISNA) por meio do software SARRA. O controle de qualidade atende aos seguintes procedimentos: (i) substitui todos os valores faltosos para formatos internos reconhecidos pelo SARRA (isto é, declara-os como não disponíveis); (ii) substitui todos os valores da matriz de dados que sejam considerados não aceitáveis.

Variáveis de entrada do modelo

Precipitação pluvial diária (P) – Obtidos conforme descritos na subseção 3.4.1.

Evapotranspiração real (ET_r) - O modelo estima a evapotranspiração real (ET_r) por uma equação de terceiro grau, proposta por Eagleman (1971), que descreve a evolução da ET_r, em função da evapotranspiração máxima - ET_m e da umidade do solo - HR, sendo expressa como segue:

$$ET_r = A + B \cdot HR - C \cdot HR^2 + D \cdot HR^3 \quad (1)$$

em que A = 0,732-0,05 ET_m; B = 4,97 ET_m-0,66 ET_m²; C = 8,57 ET_m-1,56 ET_m²; D = 4,35 ET_m-0,88 ET_m² e HR = umidade do solo.

Evapotranspiração máxima (ET_m) - Os valores da ET_m foram estimados pela equação (Doorenbos & Kassam, 1979):

$$ET_m = P + I \pm Qz - CAD \quad (2)$$

em que ET_m é a evapotranspiração máxima da cultura (mm dia⁻¹); P a precipitação pluvial (mm dia⁻¹); I a irrigação (mm); Qz a infiltração e redistribuição de água no solo (mm), e CAD a variação da armazenagem da água no solo na camada estudada para o intervalo de tempo considerado no balanço. Para a condição de sequeiro, a irrigação (I) será sempre zero.

Infiltração e redistribuição de água no solo - Esses valores foram calculados pela equação de Darcy-Buckingham, escrita de forma simplificada por Reichardt (1985) como segue:

$$Qz = -K(\theta) \frac{\Delta\Psi}{\Delta Z} \quad (3)$$

em que K(θ) é a condutividade hidráulica em função do valor da umidade do solo (mm dia⁻¹) e ΔΨ/ΔZ o gradiente do potencial total da água no solo (cm cm⁻¹).

Evapotranspiração potencial (ET_p) - A ET_p foi estimada pelo método de Thornthwaite & Mather (1955) e calculada para cada dez dias do ano, gerando 36 dados de evapotranspiração potencial, pela seguinte equação:

$$ET_p = 0,533C_j \left(\frac{10\overline{T}_a}{I} \right)^{a_i} \quad (4)$$

em que ET_p é a evapotranspiração potencial (mm dia^{-1}); C_j é o fator de correção, que varia em função do número de dias do mês considerado; a_i é a função cúbica do índice anual de calor e I é o índice de calor obtido pela soma dos 12 índices mensais (i).

Coefficientes decendiais do cultivo (K_c) - Esse coeficiente corresponde à relação entre a evapotranspiração máxima (ET_m) e a evapotranspiração potencial (ET_p). Os K_c s foram determinados por médias decendiais para cada fase da cultura e gerados pela interpolação dos dados para as fases fenológicas definidas por Doorenbos & Kassam (1979). Para a fase fenológica desta cultura o K_c variou de 0,45 a 1,10.

Capacidade de Água Disponível (CAD) - Foi estabelecida uma classe média de CAD, denominada de Tipo 1 - média capacidade de armazenamento de água ($CAD = 50 \text{ mm}$) associado ao solo do tipo Latossolos Vermelho-Amarelo e Vermelho-Escuro (com menos de 35% de argila), predominante na região de estudo.

Variáveis de saída do modelo

Índice de Satisfação da Necessidade de Água para a cultura (ISNA) - Definido como a razão entre a evapotranspiração real e a evapotranspiração máxima (ET_r/ET_m) ao longo do ciclo da cultura, para um determinado ano, numa certa data e num tipo de solo. Como o ciclo da cultura foi dividido em quatro fases fenológicas, e a fase de pleno desenvolvimento vegetativo é o período mais determinante da produtividade final, estima-se o valor de ISNA nessa fase.

$$ISNA = ET_r / ET_m$$

A partir desse cálculo, estabelece-se a função de frequência do ISNA e seleciona-se a data onde o valor calculado é maior ou igual ao critério de risco adotado ($ISNA \geq 0,65$), em 80% dos casos. Para a caracterização do risco climático obtido ao longo dos períodos de simulações, foram estabelecidas três classe de ISNA conforme (Amaral & Silva, 2007):

1. $ISNA \geq 0,65$ - a cultura da cana-de-açúcar de sequeiro está exposta a um baixo risco climático.
2. $0,55 \leq ISNA < 0,65$ - a cana-de-açúcar de sequeiro está exposta a médio risco climático.

3. **ISNA < 0,55** - a cultura da cana-de-açúcar de sequeiro está exposta a um alto risco climático.

Para a espacialização dos resultados, foram adotados os seguintes procedimentos: digitação de arquivo de pontos (em formato ASCII) organizados em três colunas, com latitude, longitude e valores de relação ISNA, com 80% de frequência de ocorrência; transformação das coordenadas geográficas em coordenadas de projeção cartográfica (no caso, projeção policônica); leitura do arquivo de pontos; organização das amostras; e geração de uma grade regular (grade retangular, regularmente espaçada de pontos, em que o valor da cota de cada ponto é estimado a partir da interpolação de um número de vizinhos mais próximos). Por se tratar de uma análise bidimensional, na qual as variações de ISNA são espacializadas em função do tempo, desconsiderando-se os efeitos orográficos, o interpolador escolhido será aquele que mais se aproxima de um resultado linear.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A distribuição espacial do Índice de Satisfação da Necessidade de Água (ISNA) foi utilizada para a avaliação do risco climático do cultivo da cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil (NEB) através de cenários climáticos com alterações de acréscimos e decréscimos na precipitação pluvial sem aumento e com aumentos na temperatura do ar. É importante observar que esta análise não leva em consideração o rendimento da cultura em cada cenário climático, contudo, avalia os impactos das mudanças climáticas na área favorável ao cultivo da cana-de-açúcar no NEB. Essas distribuições do ISNA, para os cenários sem aumento e com aumento na temperatura (1,5; 3 e 5°C) associados ao aumento e diminuição da precipitação pluvial (10, 25 e 40% da média anual) são apresentados nas Figuras 4 a 27. As análises apresentadas a seguir estão focadas para o segundo decêndio de cada mês do ano, haja vista que a cultura da cana-de-açúcar é de ciclo longo e a sua aptidão climática depende da região, em face das condições edafoclimáticas.

O risco climático da cana-de-açúcar cultivada no segundo decêndio de todos os meses do ano nas condições climáticas atuais de temperatura e precipitação é apresentado na Figura 3. Observa-se uma faixa no litoral do NEB com baixo risco climático, mesclada com alguns núcleos de médio risco nos meses de janeiro a março, sendo que no mês de janeiro essa faixa se estende desde a costa do Estado do Rio Grande do Norte até o sul da Bahia, com um núcleo de médio risco climático localizado ao Norte do Estado do Maranhão (Figura 3A). No mês de março aparece apenas uma pequena faixa com médio risco climático (Figura 3C), bem menor do que aquela do mês de fevereiro (Figura 3B). Entretanto, nos meses de abril

(Figura 3D) e maio (Figura 3E) praticamente todo o NEB apresenta alto risco climático, exceto para uma pequena faixa com médio risco climático na costa do Estado da Bahia. A partir do mês de junho (Figura 3F) começam aparecer áreas com médio risco climático ao cultivo da cana-de-açúcar na costa oeste da região, que se expande para riscos climáticos médio e baixo nos meses julho e agosto, atingindo, inclusive, a parte norte do NEB nesse último mês (Figura 3H). Essa extensa área com baixo e médio risco climático localizada no mês de agosto começa a decrescer nos meses subsequentes, atingindo a menor porção no mês de dezembro localizada ao norte do Estado do Maranhão (Figura 3L).

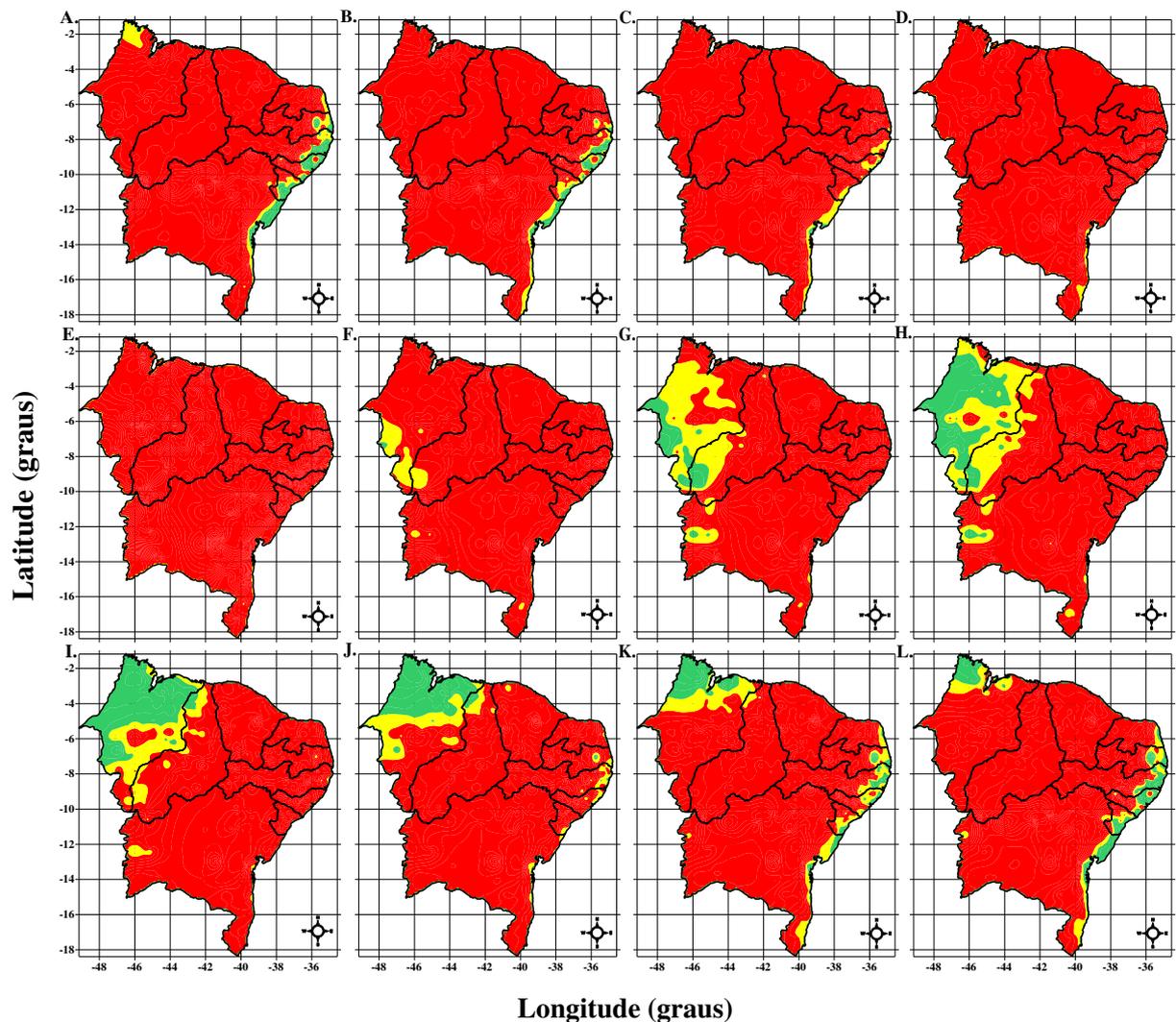


Figura 3. Risco climático do cultivo da cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil, no segundo decêndio dos meses de janeiro (A), fevereiro (B), março (C), abril (D), maio (E), junho (F), julho (G), agosto (H), setembro (I), outubro (J), novembro (K) e dezembro (L) na região Nordeste do Brasil, para as condições climáticas atuais.

Esse decréscimo com esses riscos climáticos são acompanhados com aumento das

áreas favoráveis ao cultivo da cana-de-açúcar a partir do mês de outubro (Figura 3J) na costa leste do NEB, até atingir a maior porção no mês de dezembro. Resultados semelhantes foram obtidos por Silva et al. (2010), quando analisaram os impactos do aquecimento global sobre a cultura do feijão na região Nordeste do Brasil. A Figura 4 exibe o risco climático da cultura da cana-de-açúcar cultivada no segundo decêndio de janeiro na região Nordeste do Brasil, com reduções na precipitação de 10, 25 e 40% combinadas com os cenários de temperatura do ar (sem aumento e aumentos de 1,5; 3 e 5°C).

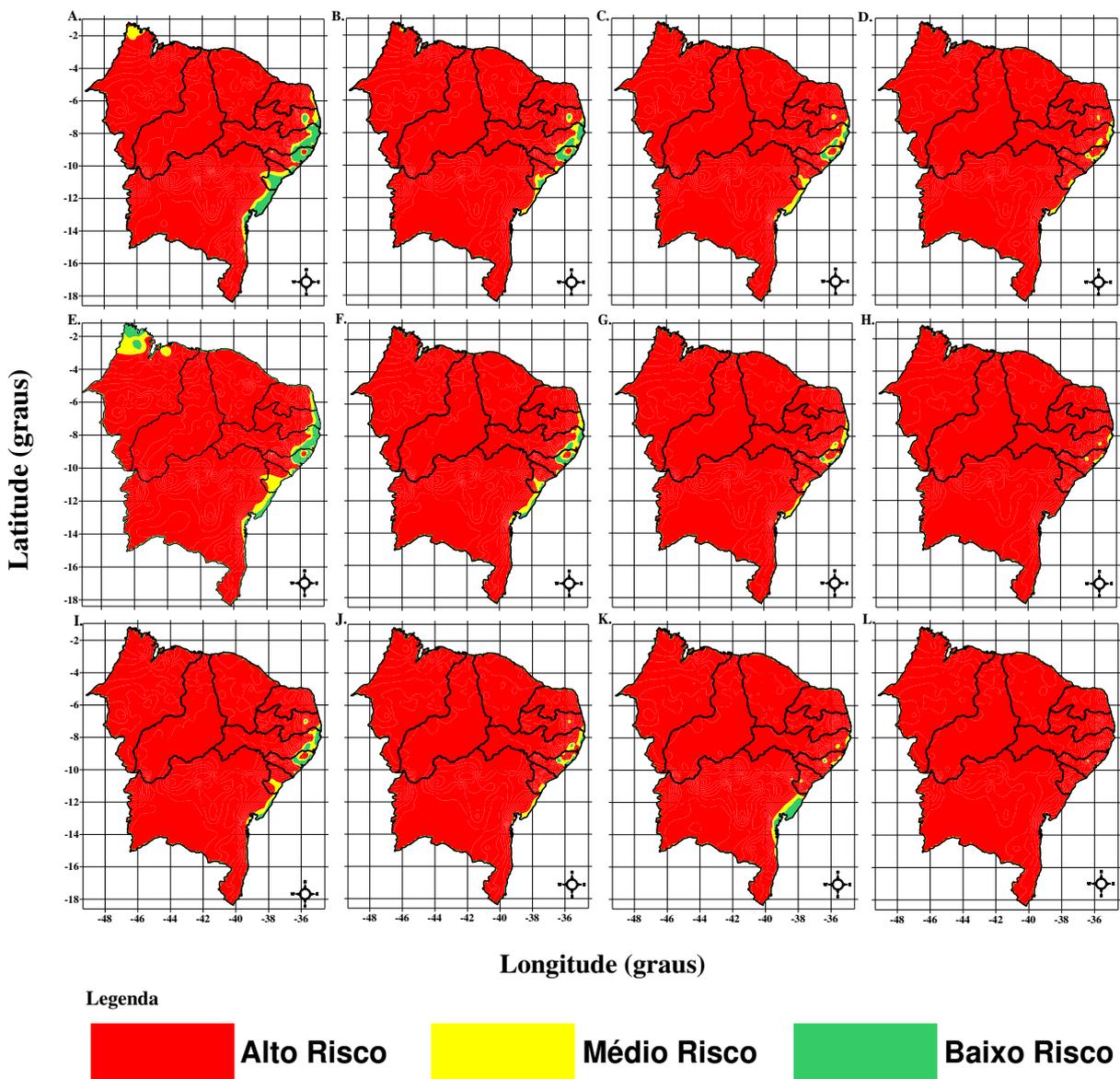


Figura 4. Risco climático do cultivo da cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil, no segundo decêndio de janeiro, com redução de 10% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (A), aumento de 1,5°C (B), aumento de 3°C (C) e aumento de 5 °C (D); com redução de 25% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (E), aumento de 1,5°C (F), aumento de 3°C (G) e aumento de 5 °C (H) e com redução de 40% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (I), aumento de 1,5°C (J), aumento de 3°C (K) e aumento de 5 °C (L).

Nestas condições, as áreas com riscos climáticos classificados como baixo e médio

durante os meses de janeiro a março foram semelhantes àsquelas para condições climáticas atuais, conforme exibidos na Figura 3. Entretanto, nos meses seguintes se observa que uma redução de apenas 10% na precipitação provoca reduções drásticas das áreas favoráveis ao cultivo da cana-de-açúcar, especialmente com redução de 40% na precipitação combinada com o aumento de 5°C na temperatura do ar (Figura 4L). Já os cenários com os acréscimos na precipitação pluvial, e ainda, persistindo os aumentos na temperatura do ar mostraram que as áreas agricultáveis apresentaram considerável diferença em relação ao segundo semestre, quando comparados aos cenários das condições de clima atual (Figura 3).

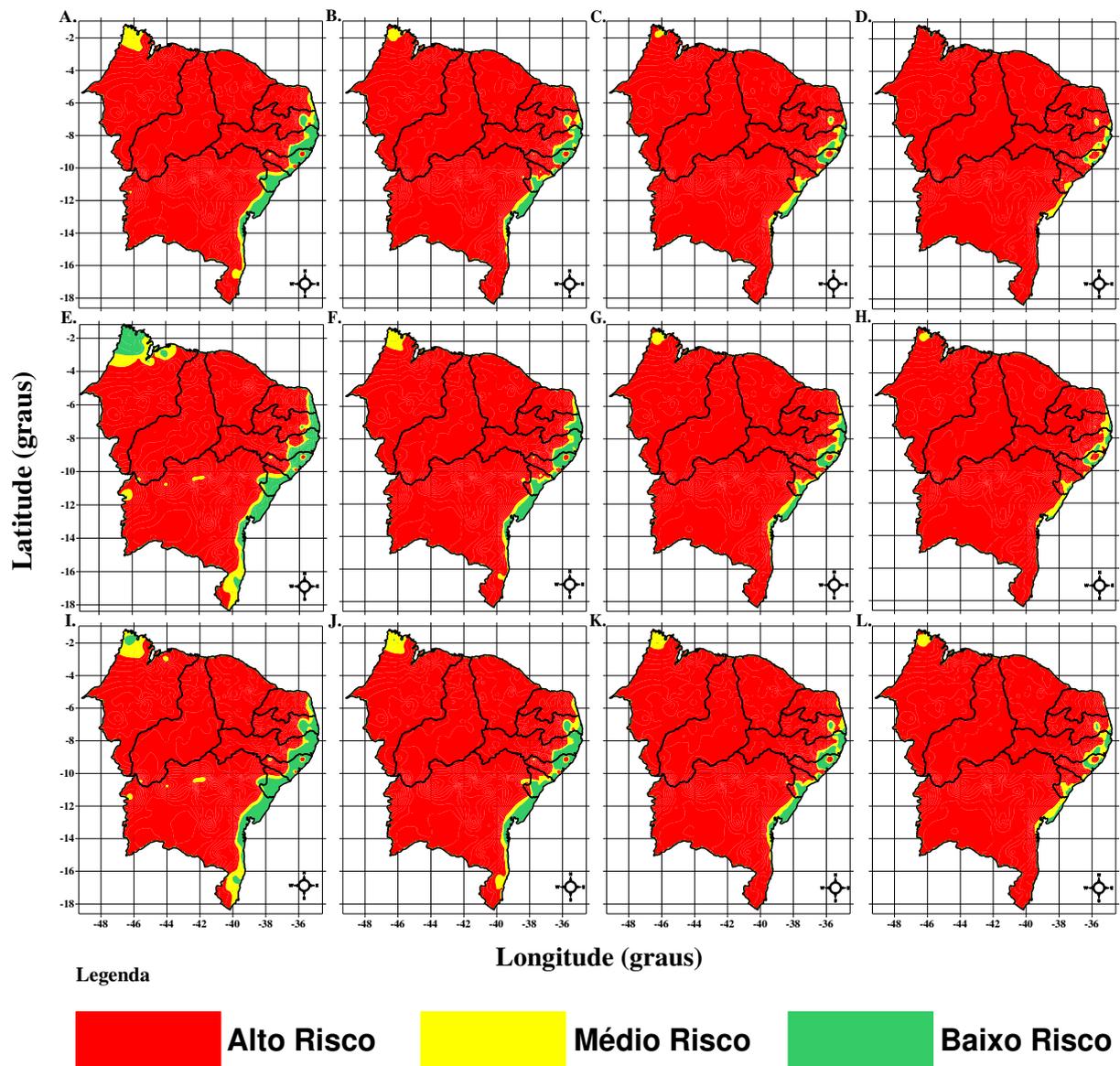


Figura 5. Risco climático do cultivo da cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil, no segundo decêndio de janeiro, com acréscimo de 10% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (A), aumento de 1,5°C (B), aumento de 3°C (C) e aumento de 5 °C (D); com acréscimo de 25% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (E), aumento de 1,5°C (F), aumento de 3°C (G) e aumento de 5 °C (H) e com acréscimo de 40% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (I), aumento de 1,5°C (J), aumento de 3°C (K) e aumento de 5 °C (L).

Esse fato se dá devido à temperatura do ar ser um elemento meteorológico que afeta o crescimento da planta, pois quando a temperatura ultrapassa 20°C, há um aumento na taxa de crescimento da cultura, sendo que a faixa de 25°C a 33°C é a mais favorável ao desenvolvimento vegetativo (Bachi & Souza, 1978).

Com o aumento da precipitação, toda a região Nordeste do Brasil apresenta riscos climáticos baixo e médio no litoral da região, especialmente no mês de janeiro (Figura 5A), os quais, também, são observado no norte do Estado do Maranhão. O núcleo nessa região do estado praticamente desaparece no cenário de aumento de 5°C (Figura 5L). De maneira geral, em ambos os casos (redução e aumento na precipitação pluvial combinados com os aumentos de temperatura do ar), ocorre diminuição das áreas favoráveis ao cultivo da cana-de-açúcar e, conseqüentemente, um acréscimo das áreas com alto risco climático; alterando, também, as regiões com médio risco climático. Por outro lado, quando há alteração apenas na precipitação, deixando a temperatura do ar inalterada, constata-se um aumento das áreas com baixo e médio riscos climáticos, principalmente, quando o acréscimo é apenas da precipitação pluvial. Por outro lado, quando ocorre a redução apenas na precipitação, verifica-se que o processo do aumento das áreas com alto risco climático se torna mais acelerado, em função, obviamente, do maior déficit hídrico.

Constata-se, ainda, que nos cenários de redução na precipitação pluvial sem aumento na temperatura do ar, a faixa que se estende desde litoral do Estado da Paraíba até o do litoral do Estado da Bahia apresenta áreas favoráveis ao cultivo da cana-de-açúcar; contudo, essas áreas vão diminuindo à medida que ocorre o aumento na temperatura do ar, principalmente com a redução de 40% na precipitação pluvial a aumento na temperatura do ar de 5°C, chegando a atingir 100% de áreas inaptas ao cultivo da cana-de-açúcar (Figura 4L). Os cenários tendem a ficar menos pessimistas quando se trata do acréscimo na precipitação pluvial, combinados com o aumento na temperatura, pois as áreas com baixo risco climático aumentam e, assim, começa a surgir áreas aptas ao cultivo da cultura no norte do Estado do Maranhão (Figura 5). Estes cenários de acréscimo na precipitação pluvial quase não diferem daqueles do mês de janeiro para os cenários das condições climáticas atuais (CCA) (Figura 3A), mesmo com os cenários de aumento na temperatura do ar. O risco climático da cultura da cana-de-açúcar cultivada no segundo decêndio de fevereiro no NEB, com reduções na precipitação de 10, 25 e 40% combinadas com os cenários de temperatura do ar (sem aumento e aumentos de 1,5; 3 e 5°C) é apresentado na Figura 6. Observa-se uma estreita faixa com baixo e médio riscos climáticos para a cana-de-açúcar que se estende o litoral sul do Estado da Paraíba até o sul do litoral do Estado da Bahia no cenário sem aumento de temperatura.

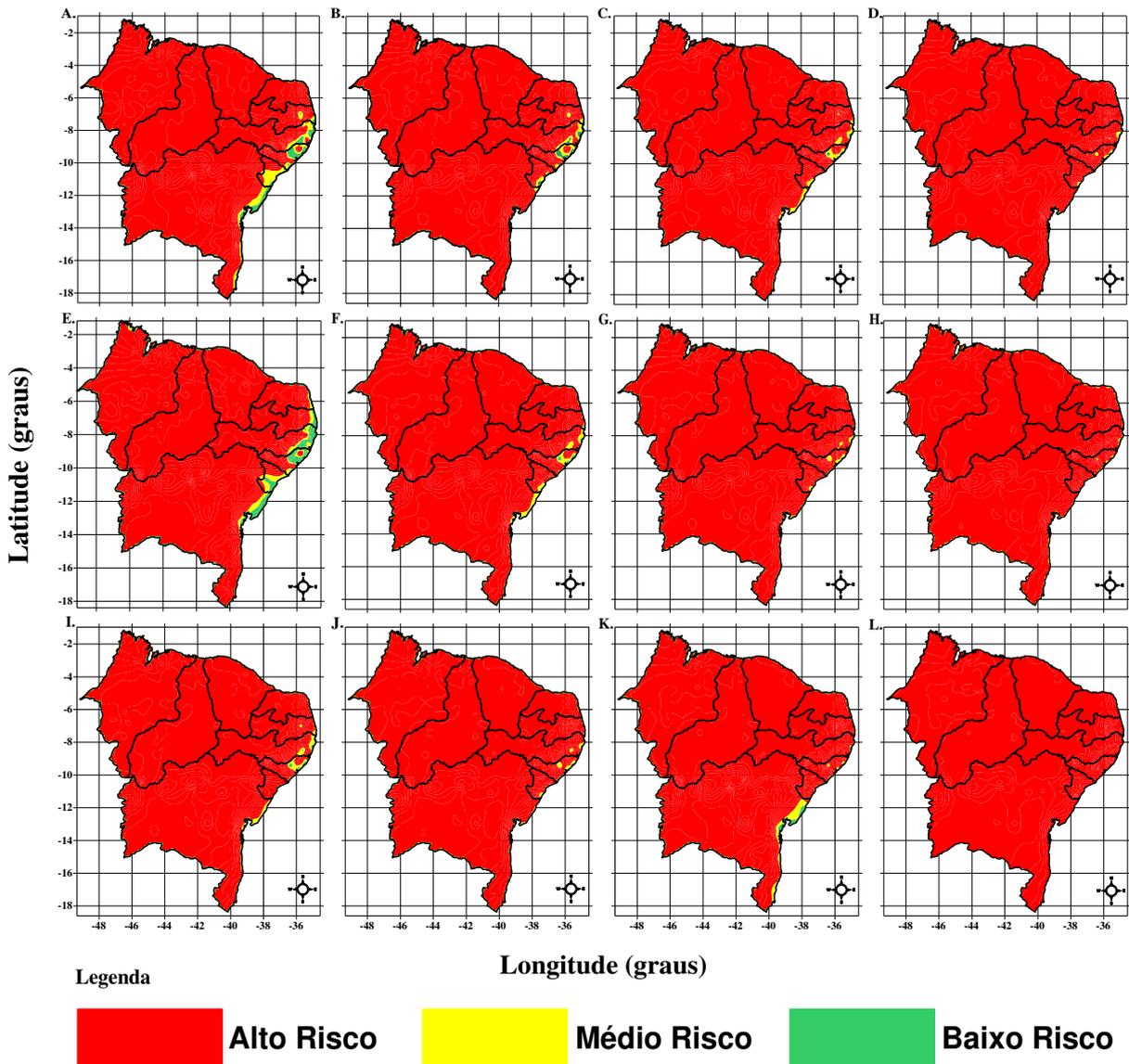


Figura 6. Risco climático do cultivo da cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil, no segundo decêndio de fevereiro, com redução de 10% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (A), aumento de 1,5°C (B), aumento de 3°C (C) e aumento de 5 °C (D); com redução de 25% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (E), aumento de 1,5°C (F), aumento de 3°C (G) e aumento de 5 °C (H) e com redução de 40% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (I), aumento de 1,5°C (J), aumento de 3°C (K) e aumento de 5 °C (L).

Para o segundo mês de simulação, com os cenários de redução de 10, 25 e 40% na precipitação e sem aumento na temperatura do ar, os resultados obtidos não diferem muito das CCA. Diferenças consideráveis somente são apresentadas quando estes cenários são associados ao aumento na temperatura, sendo os de 3 e 5°C os mais agravantes, deixando o NEB praticamente sem nenhuma área favorável ao cultivo da cana-de-açúcar. Porém, percebe-se nos cenários de acréscimo na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura que as áreas com baixo e médio riscos climáticos têm uma leve progressão, quando

comparadas às CCA (Figura 3B), permanecendo com essa tendência mesmo com o aumento na temperatura de 1,5°C. Entretanto, quando essa análise é realizada com os acréscimos de precipitação (Figura 7), percebe-se, mesmo com os aumentos de temperatura do ar, que todo o litoral leste do NEB apresenta riscos climáticos baixo e médio que diminuem à medida que aumenta a temperatura do ar, atingindo a menor área com condições de cultivo da cana-de-açúcar, como esperado, com o aumento de 5°C (Figura 7L).

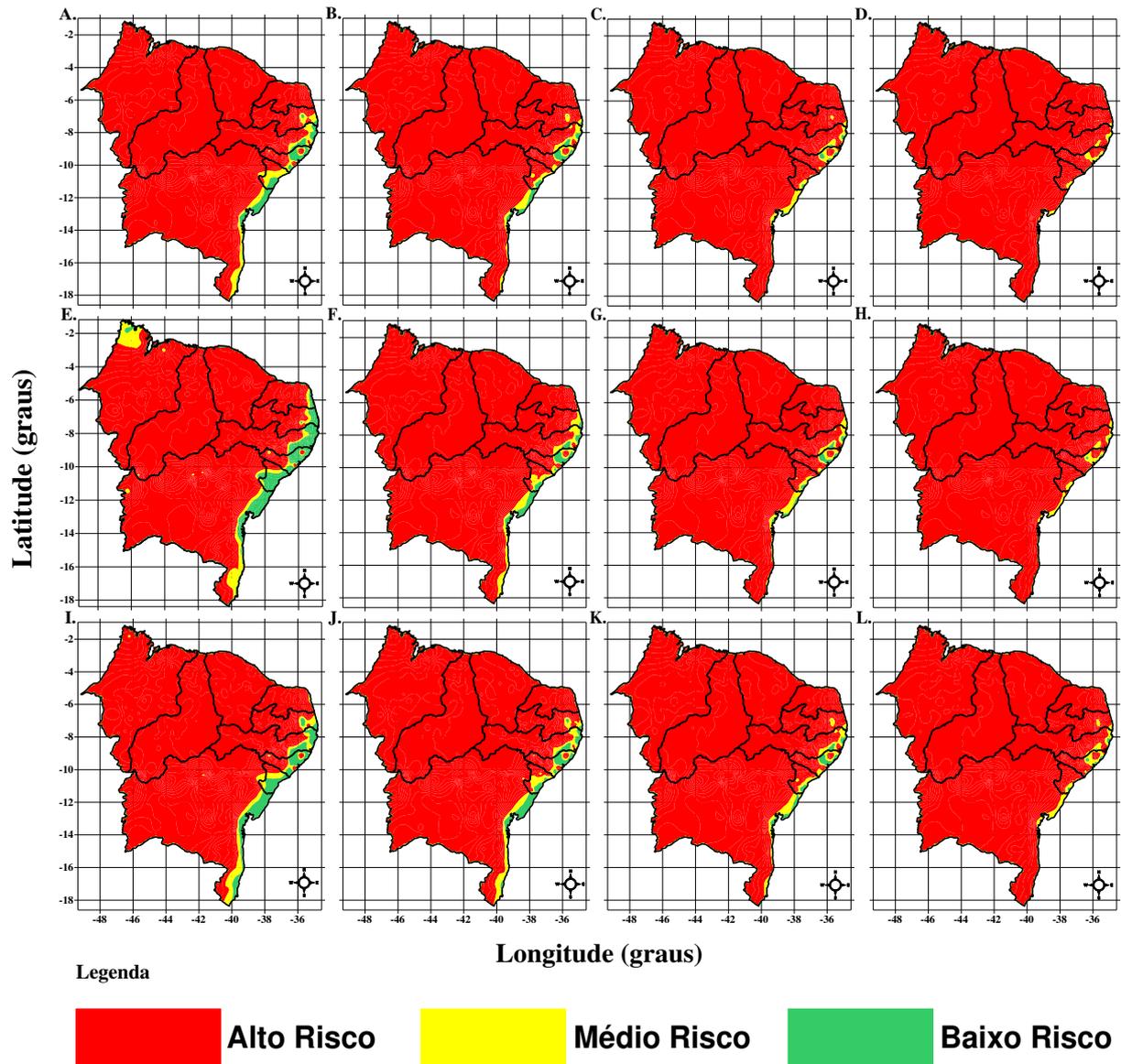


Figura 7. Risco climático do cultivo da cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil, no segundo decêndio de fevereiro, com acréscimo de 10% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (A), aumento de 1,5°C (B), aumento de 3°C (C) e aumento de 5 °C (D); com acréscimo de 25% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (E), aumento de 1,5°C (F), aumento de 3°C (G) e aumento de 5 °C (H) e com acréscimo de 40% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (I), aumento de 1,5°C (J), aumento de 3°C (K) e aumento de 5 °C (L).

A Figura 8 exibe os riscos climáticos da cana-de-açúcar cultivada no segundo decêndio de março na região Nordeste do Brasil com reduções na precipitação combinadas

com os cenários de aumentos de temperatura do ar. Constatase, que nessas condições climáticas, praticamente todo o NEB se torna inapto ao cultivo da cana-de-açúcar em qualquer época do ano, exceto para os casos de redução na precipitação de 10% combinada com o cenário sem aumento da temperatura (Figura 8A) e com o aumento de 1,5°C, bem como com a redução na precipitação de 25% combinada com os cenários sem aumento de temperatura ((Figura 8E) e com aumento de 1,5°C (Figura 8F).

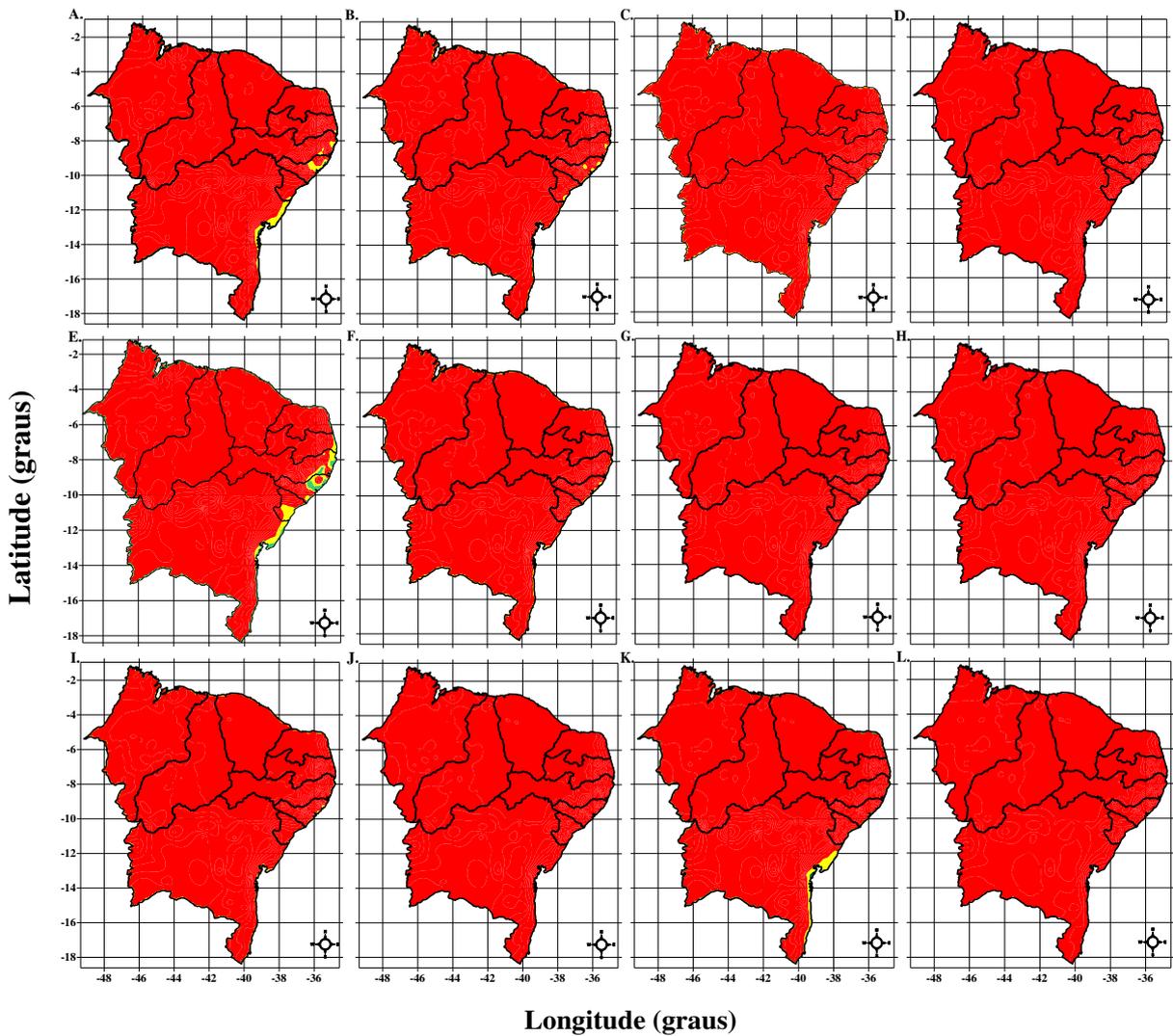


Figura 8. Risco climático do cultivo da cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil, no segundo decêndio de março, com redução de 10% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (A), aumento de 1,5°C (B), aumento de 3°C (C) e aumento de 5 °C (D); com redução de 25% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (E), aumento de 1,5°C (F), aumento de 3°C (G) e aumento de 5 °C (H) e com redução de 40% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (I), aumento de 1,5°C (J), aumento de 3°C (K) e aumento de 5 °C (L).

Mesmo com os acréscimos de precipitação associados aos efeitos do fenômeno La

Niña classificados como fraco, moderado na precipitação no NEB, todo a região apresenta condições pouco apropriadas ao cultivo da cana-de-açúcar (Figura 9), com exceção de uma faixa na costa leste no cenário sem aumento de temperatura (Figuras 9A, E e I), que apresentam riscos climáticos baixo e médio. Também, porém em menor proporção, o cenário climático de aumento de temperatura de 1,5°C apresenta risco climático moderado nessas mesma áreas da região.

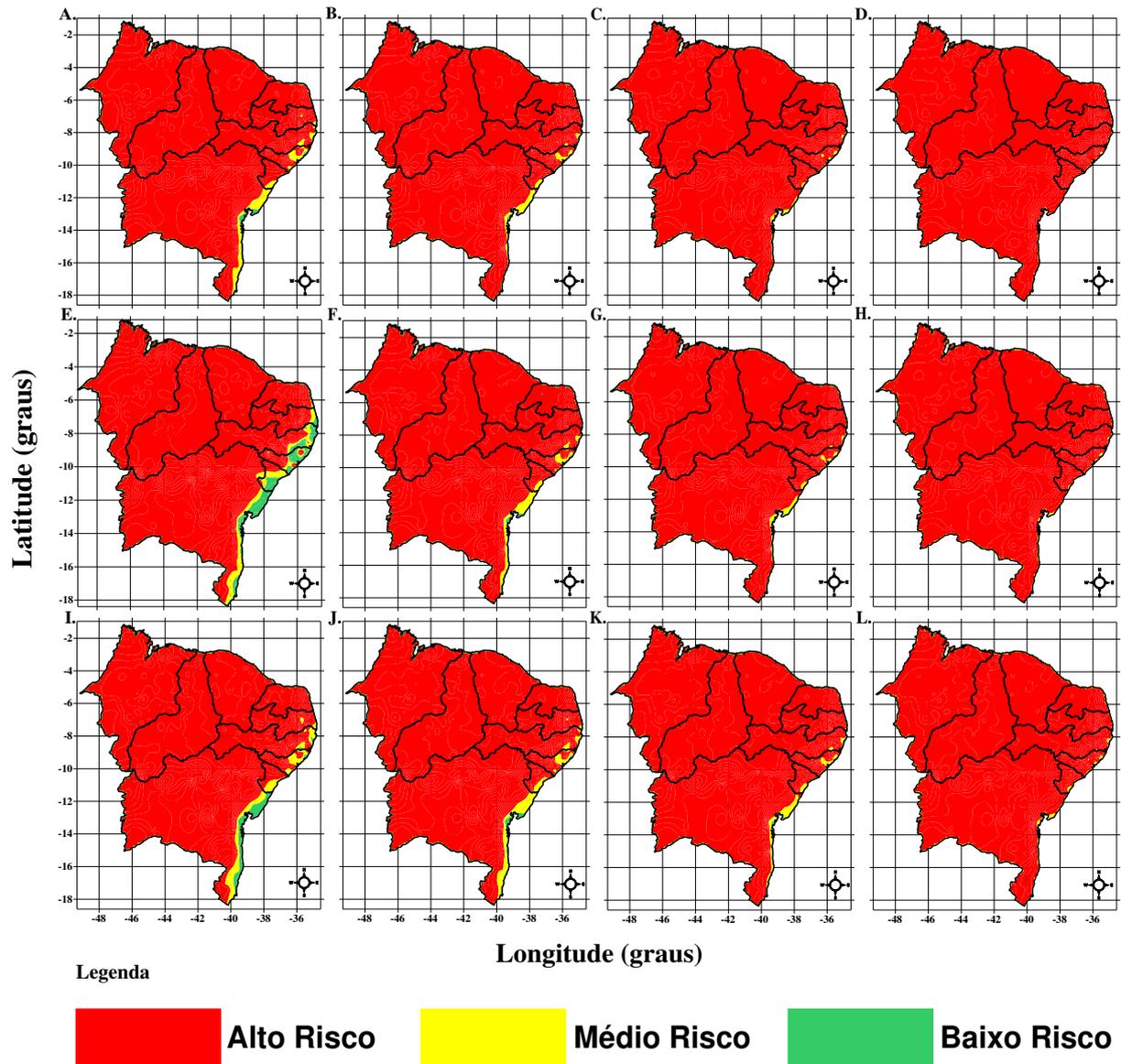


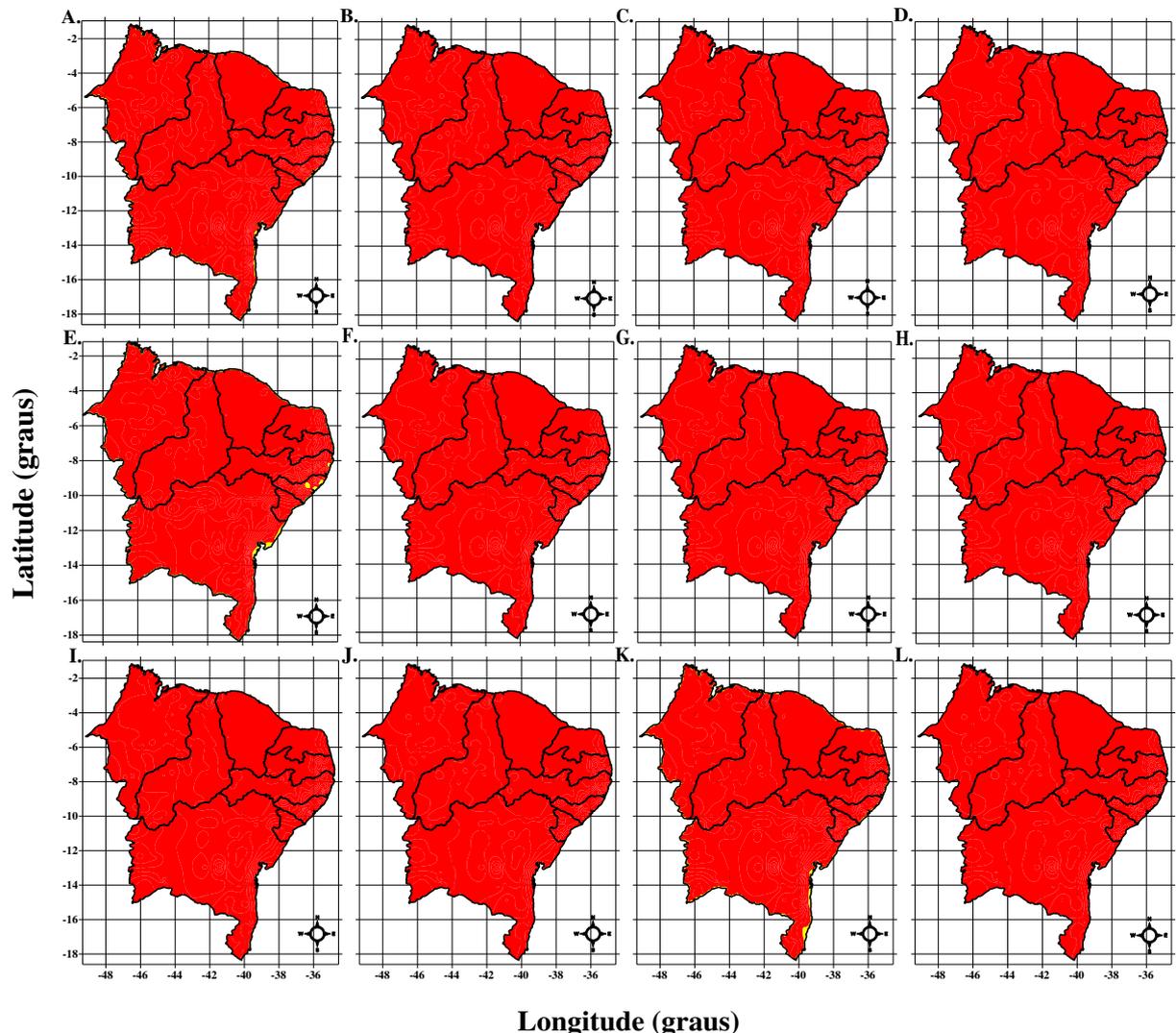
Figura 9. Risco climático do cultivo da cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil no segundo decêndio de março, com acréscimo de 10% na precipitação pluvial sem aumento na temperatura do ar (A), aumento de 1,5°C (B), aumento de 3°C (C) e aumento de 5 °C (D); com acréscimo de 25% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (E), aumento de 1,5°C (F), aumento de 3°C (G) e aumento de 5 °C (H) e com acréscimo de 40% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (I), aumento de 1,5°C (J), aumento de 3°C (K) e aumento de 5 °C (L).

Por outro lado, independentemente da intensidade do fenômeno La Niña, os aumentos de temperatura de 3 e 5°C produzem efeitos devastadores na região Nordeste do Brasil para a

cultura da cana-de-açúcar quando cultivada no segundo decêndio de março. Para os cenários de redução na precipitação pluvial e, ainda, permanecendo os aumentos na temperatura, nota-se claramente, que a cultura analisada é mais ainda sensível à variabilidade da precipitação, que afeta significativamente a disponibilidade de água no solo, do que a mudança de temperatura do ar. Isso é justificado pelo fato que todas essas áreas do NEB permanecem com um alto risco climático no cenário de redução de 40% na precipitação e aumento de 5°C, bem como pela taxa de redução das áreas com baixo e médio riscos climáticos que é diretamente proporcional ao decréscimo na precipitação, ou seja, diante da redução da oferta hídrica, a época de cultivo da cana-de-açúcar se torna ainda menor, fazendo com que a atividade agrícola tenha um maior risco associado ao clima. Além disso, essa constatação também pode ser justificada em face da menor oferta hídrica nas áreas favoráveis ao cultivo da cana-de-açúcar associada ao aumento na temperatura do ar que provoca uma redução ainda maior na área agricultável com a cultura da cana-de-açúcar. Esses efeitos são, também, evidentes no prolongamento do período de seca durante as épocas chuvosas, fazendo com que o déficit hídrico seja superior àqueles verificados nas condições climáticas atuais. Assim, a cultura da cana-de-açúcar tende a ter maiores dificuldades em se adaptar em climas onde a oferta hídrica é menor, em face de sua alta taxa de exigências hídricas.

A Figura 10 exibe os riscos climáticos do cultivo da cana-de-açúcar cultivada no segundo decêndio de abril no NEB sob efeitos do fenômeno El Niño combinados com os cenários de aquecimento global. Constata-se que nesse, mês na região de estudo, o cultivo da cana-de-açúcar é totalmente inviável, haja vista que 100% da região Nordeste do Brasil apresenta alto risco climático para todos os cenários de temperatura e de redução na precipitação pluvial, mesmo no cenário mais otimista, isto é, de redução de 10% na precipitação e sem aumento na temperatura do ar. Por outro lado, os aumentos de precipitação, que são associados ao fenômeno La Niña classificados como fraco (10%), moderado (25%) e forte (40), combinados com os cenários de aquecimento global também produzem alto risco climático em todo NEB (Figura 11). Percebem-se nesse cenário apenas pequenas faixas com médio risco climático localizadas na costa do Estado da Bahia no cenário sem aumento de precipitação combinado com os acréscimos na precipitação de 10% (Figura 11A), de 25% (Figura 11E) e de 40% (Figura 11I). Efetivamente, essas áreas começam a exibir uma pequena mudança quando associados aos cenários de acréscimo na precipitação pluvial, conquistando uma pequena área com baixo e médio riscos climáticos ao sul da Bahia. Entretanto, essas áreas se mantêm inalteradas para os aumentos na temperatura de 3 e 5°C. Resultados similares foram obtidos por Silva (2010) quando analisou os efeitos do

aquecimento global no cultivo de algodão herbáceo na região Nordeste do Brasil.



Legenda

Alto Risco **Médio Risco** **Baixo Risco**

Figura 10. Risco climático do cultivo da cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil, no segundo decêndio de abril, com redução de 10% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (A), aumento de 1,5°C (B), aumento de 3°C (C) e aumento de 5 °C (D); com redução de 25% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (E), aumento de 1,5°C (F), aumento de 3°C (G) e aumento de 5 °C (H) e com redução de 40% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (I), aumento de 1,5°C (J), aumento de 3°C (K) e aumento de 5 °C (L).

O aquecimento global associado com anomalias de precipitação pluvial pode trazer graves consequências para a economia da região, em face da inaptidão de diversas culturas em produzir de forma economicamente viável sob níveis elevados de temperatura. Nesse sentido, Silva et al. (2010), quando analisaram os efeitos das mudanças climáticas sobre a cultura de feijão plantada na região Nordeste do Brasil, recomendaram que variedades mais resistentes dessa cultura deveriam ser desenvolvidas com vistas ao aquecimento global.

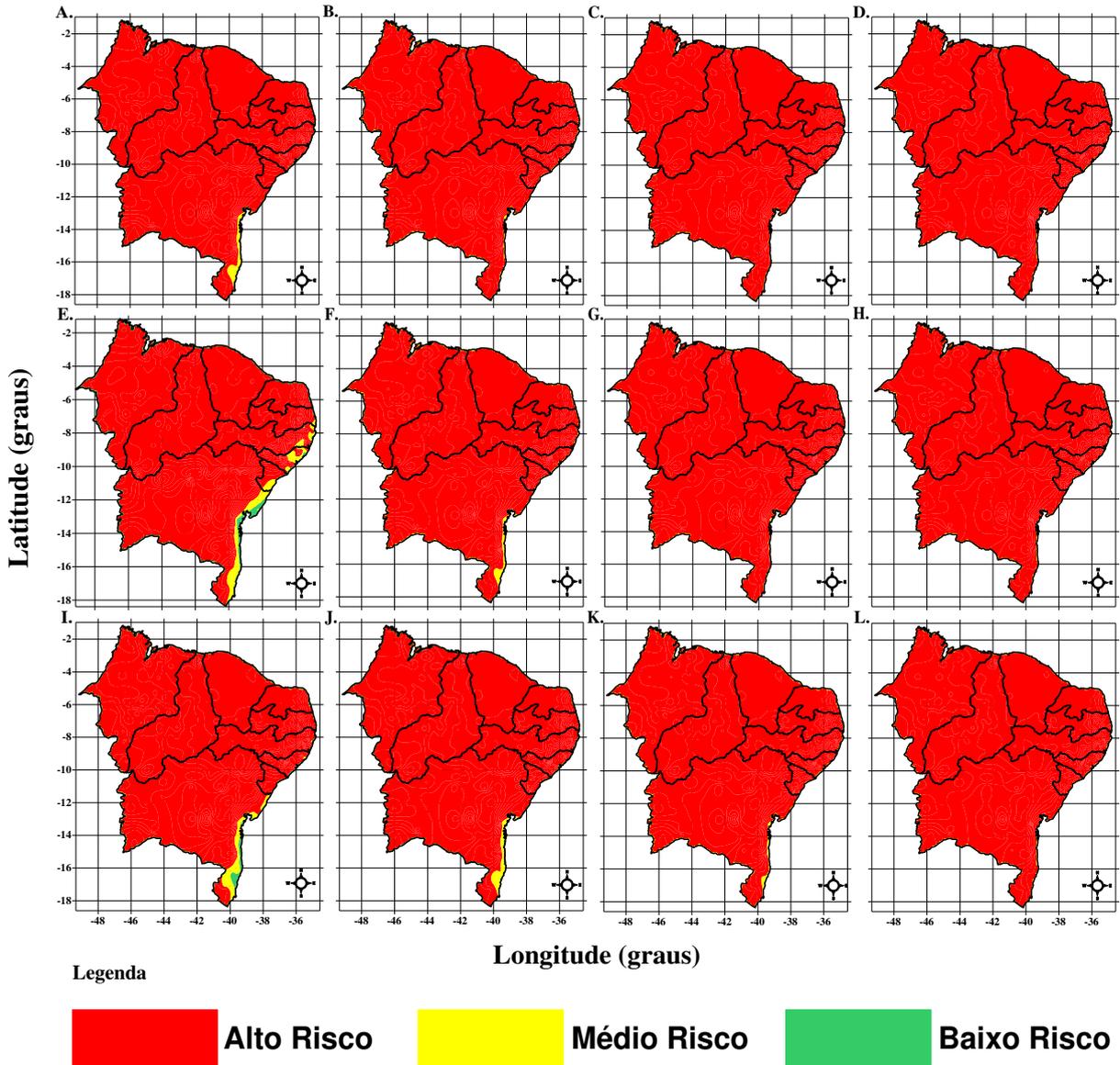


Figura 11. Risco climático do cultivo da cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil, no segundo decêndio de abril, com acréscimo de 10% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (A), aumento de 1,5°C (B), aumento de 3°C (C) e aumento de 5 °C (D); com acréscimo de 25% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (E), aumento de 1,5°C (F), aumento de 3°C (G) e aumento de 5 °C (H) e com acréscimo de 40% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (I), aumento de 1,5°C (J), aumento de 3°C (K) e aumento de 5 °C (L).

Os riscos climáticos da cultura da cana-de-açúcar cultivada no segundo decêndio de maio na região Nordeste do Brasil, com reduções na precipitação combinadas com as anomalias de temperatura do ar são exibidos na Figura 12. Nessas condições climáticas, absolutamente toda a região de estudo se torna inapta ao cultivo da cana-de-açúcar quando cultivada nesse decêndio. Entretanto, com acréscimo de precipitação e se mantendo as anomalias de temperatura do ar, a região se torna também praticamente inapta ao cultivo da cana, com exceção de pequenos núcleos com médio risco climático localizados no sudeste do

Estado da Bahia (Figura 13). Tais núcleos somente aparecem nos cenários de La Niña e sem aumento na temperatura do ar.

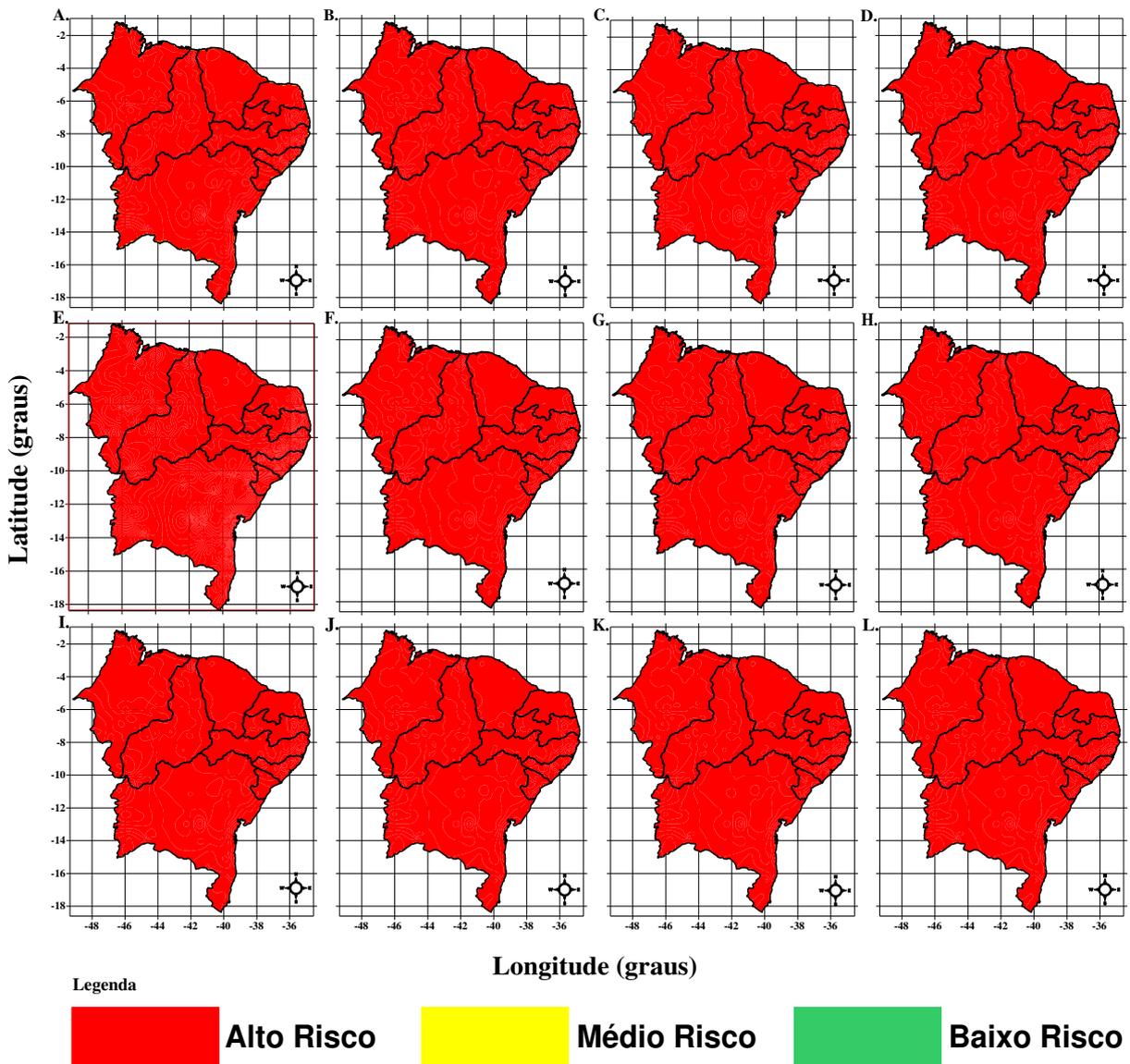


Figura 12. Risco climático do cultivo da cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil, no segundo decêndio de maio, com redução de 10% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (A), aumento de 1,5°C (B), aumento de 3°C (C) e aumento de 5 °C (D); com redução de 25% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (E), aumento de 1,5°C (F), aumento de 3°C (G) e aumento de 5 °C (H) e com redução de 40% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (I), aumento de 1,5°C (J), aumento de 3°C (K) e aumento de 5 °C (L).

A preocupação dos efeitos do aquecimento global tem motivado várias pesquisas sobre esse tema para diferentes culturas no Brasil, tais como para o trigo, soja e milho (Streck e Alberto, 2006); cultura do café (Ghini et al., 2008); arroz vermelho (Lago et al., 2008); culturas perenes (Gondim et al., 2008) e tubérculos de batata (Fagundes et al., 2010).

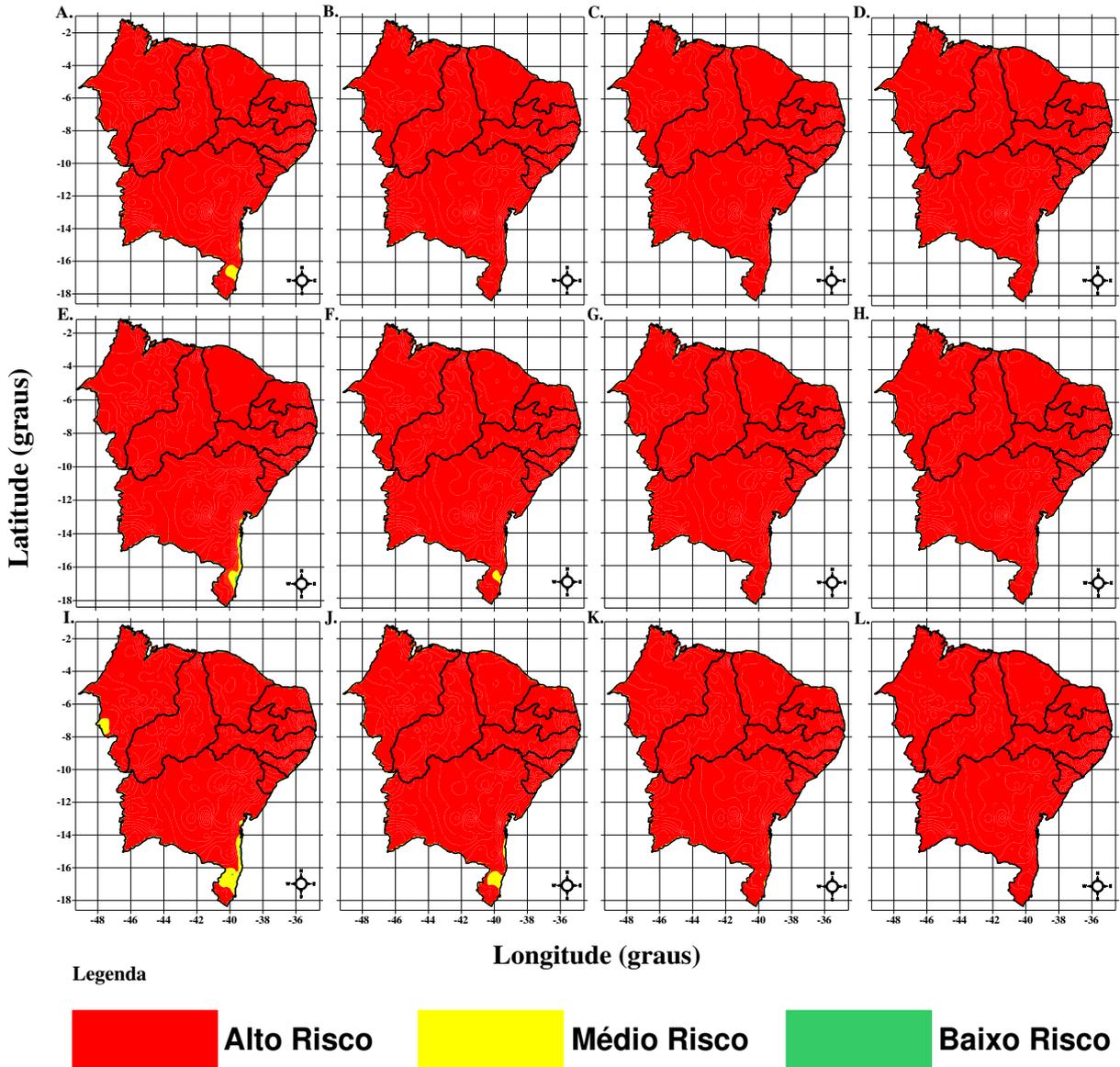


Figura 13. Risco climático do cultivo da cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil no segundo decêndio de maio, com acréscimo de 10% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (A), aumento de 1,5°C (B), aumento de 3°C (C) e aumento de 5 °C (D); com acréscimo de 25% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (E), aumento de 1,5°C (F), aumento de 3°C (G) e aumento de 5 °C (H) e com acréscimo de 40% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (I), aumento de 1,5°C (J), aumento de 3°C (K) e aumento de 5 °C (L).

A Figura 14 exibe os riscos climáticos da cultura da cana-de-açúcar cultivada no segundo decêndio de junho na região Nordeste do Brasil, com reduções na precipitação combinadas com as anomalias de temperatura do ar. Observa-se que nessas condições climáticas começam a aparecer pequenos núcleos isolados com médio risco climático, porém apenas para o cenário sem aumento na temperatura combinado com as anomalias positivas de precipitação. Tais núcleos são localizados na costa oeste do NEB, apenas no cenário de redução de 10% da precipitação, que diminuem à medida que aumenta a temperatura do ar.

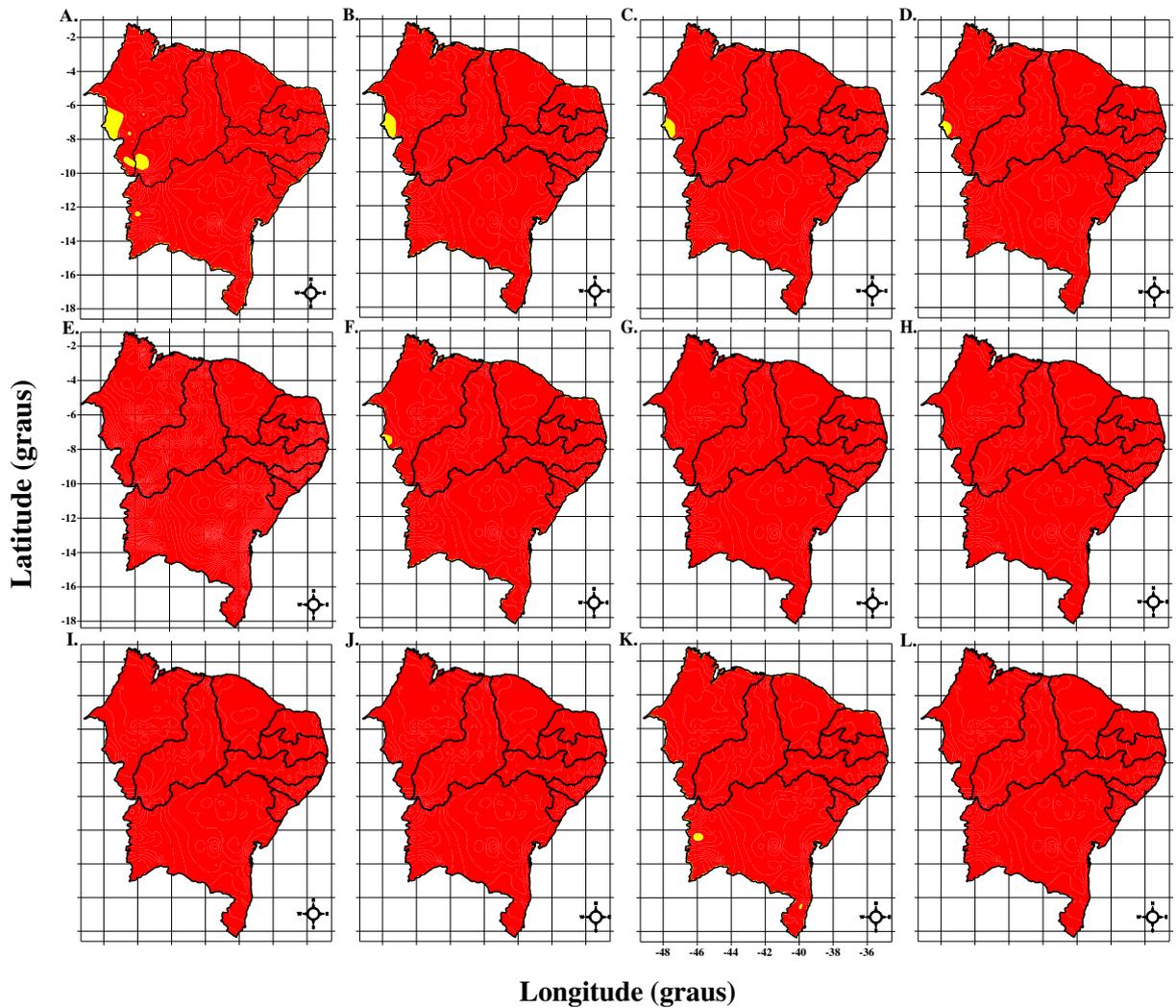


Figura 14. Risco climático do cultivo da cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil, no segundo decêndio de junho, com redução de 10% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (A), aumento de 1,5°C (B), aumento de 3°C (C) e aumento de 5 °C (D); com redução de 25% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (E), aumento de 1,5°C (F), aumento de 3°C (G) e aumento de 5 °C (H) e com redução de 40% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (I), aumento de 1,5°C (J), aumento de 3°C (K) e aumento de 5 °C (L).

Por outro lado, quando os cenários de aquecimento global são combinados com o aumento de precipitação (Figura 15), constata-se que começam a aparecer áreas com baixo risco climático, justamente nas áreas que tinham médio risco no cenário de redução de chuvas, isto é, na costa oeste do NEB, ao sul dos Estados de Maranhão e Piauí. Evidentemente, essas áreas são maiores nos cenários sem aumento de temperatura e diminuem em função do aumento da anomalia de temperatura do ar.

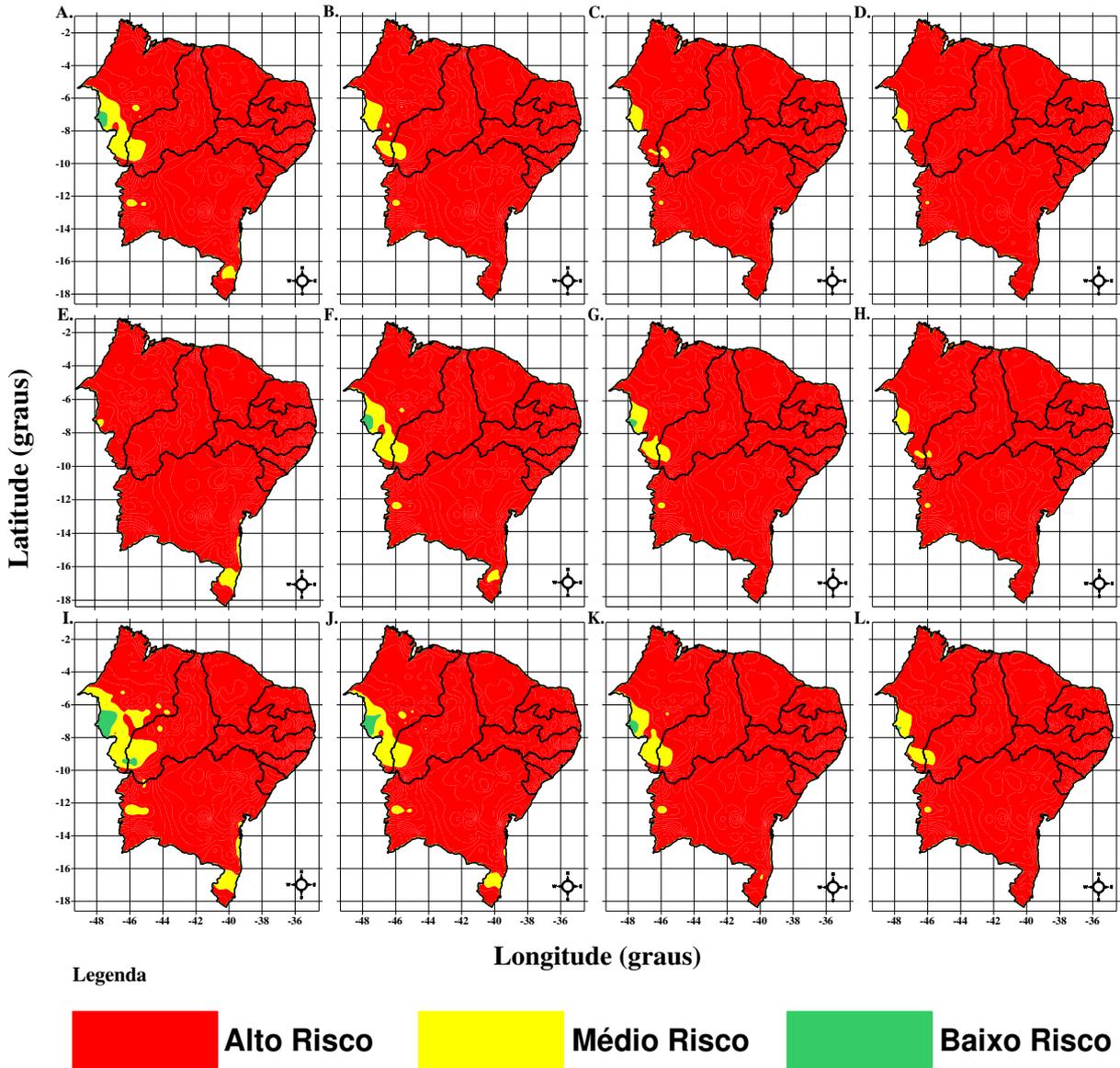


Figura 15. Risco climático do cultivo da cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil, no segundo decêndio de junho, com acréscimo de 10% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (A), aumento de 1,5°C (B), aumento de 3°C (C) e aumento de 5 °C (D); com acréscimo de 25% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (E), aumento de 1,5°C (F), aumento de 3°C (G) e aumento de 5 °C (H) e com acréscimo de 40% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (I), aumento de 1,5°C (J), aumento de 3°C (K) e aumento de 5 °C (L).

Neste sexto período simulado - o segundo decêndio do mês de junho - percebe-se claramente com os cenários de redução da precipitação pluvial combinado com o aumento da temperatura do ar, que não há nenhuma área com baixo risco climático, apenas uma pequena área com médio risco climático no setor oeste do NEB que diminui em função da intensidade do fenômeno El Niño. Os períodos mais apropriados para o cultivo da cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil começam a aparecer a partir do mês de julho, ou seja, com áreas classificadas como de baixo e médio riscos climáticos mesmo quando são estabelecidos os cenários de anomalias positivas de precipitação pluvial (incrementos de 10, 25 e 40%)

combinados com os aumentos de temperatura (1,5, 3 e 5°C). Isso pode ser verificado a partir das análises das Figuras 16 e 17.

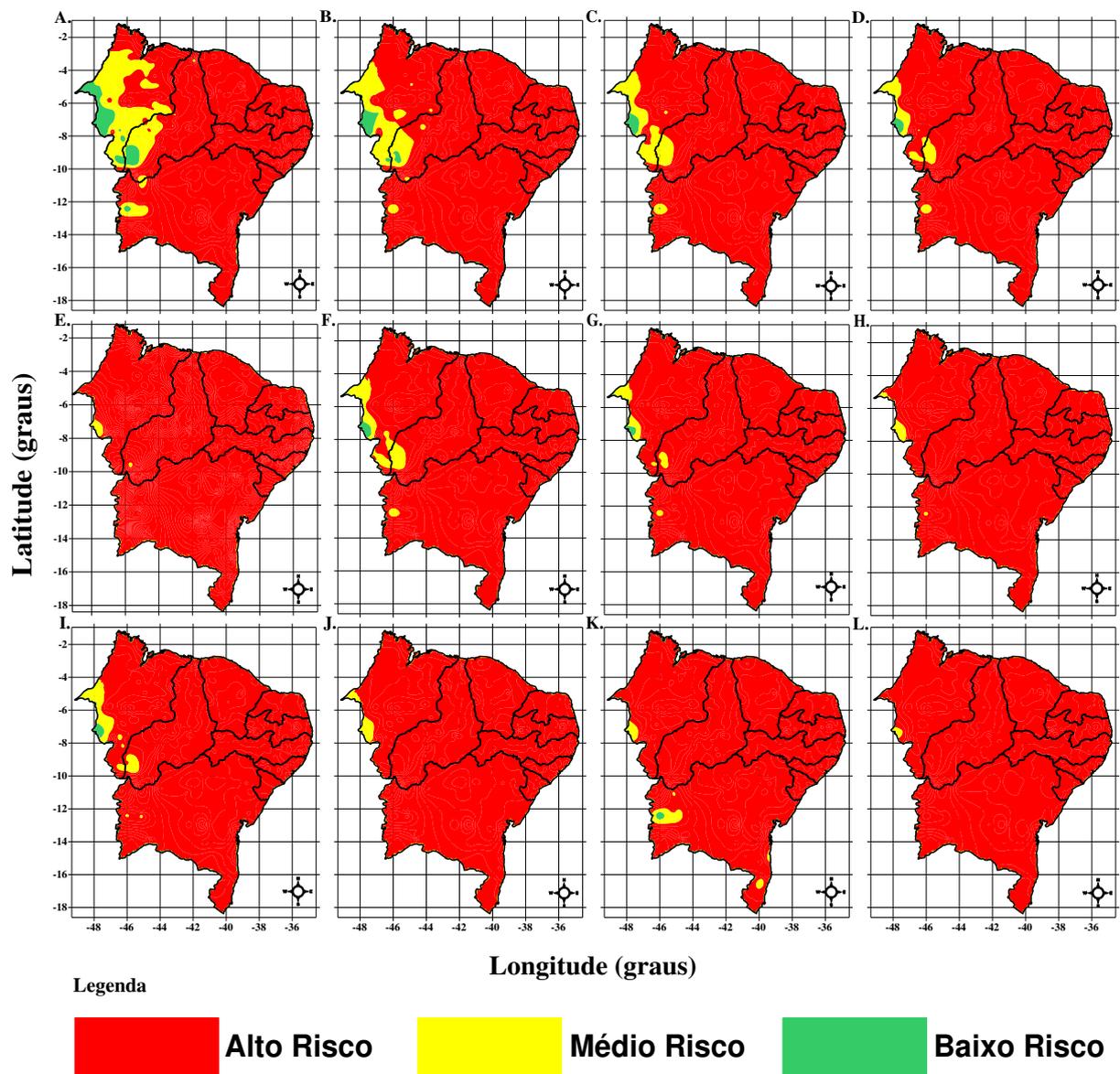


Figura 16. Risco climático do cultivo da cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil, no segundo decêndio de julho, com redução de 10% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (A), aumento de 1,5°C (B), aumento de 3°C (C) e aumento de 5 °C (D); com redução de 25% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (E), aumento de 1,5°C (F), aumento de 3°C (G) e aumento de 5 °C (H) e com redução de 40% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (I), aumento de 1,5°C (J), aumento de 3°C (K) e aumento de 5 °C (L).

Mesmo com o decréscimo na precipitação de 10%, que é associado aos efeitos do fenômeno El Niño classificado como fraco, a parte oeste do NEB apresenta uma significativa área com médio e baixo riscos climáticos, que diminuem com o aumento da temperatura do ar. Essa área, evidentemente, é bem maior na presença do fenômeno La Niña na região em face do aumento da precipitação. Nessas condições climáticas, mesmo com o aumento da

temperatura do ar de até mesmo 5° C, pode-se perceber áreas apropriadas ao cultivo da cana-de-açúcar no segundo decêndio de julho na região de estudo.

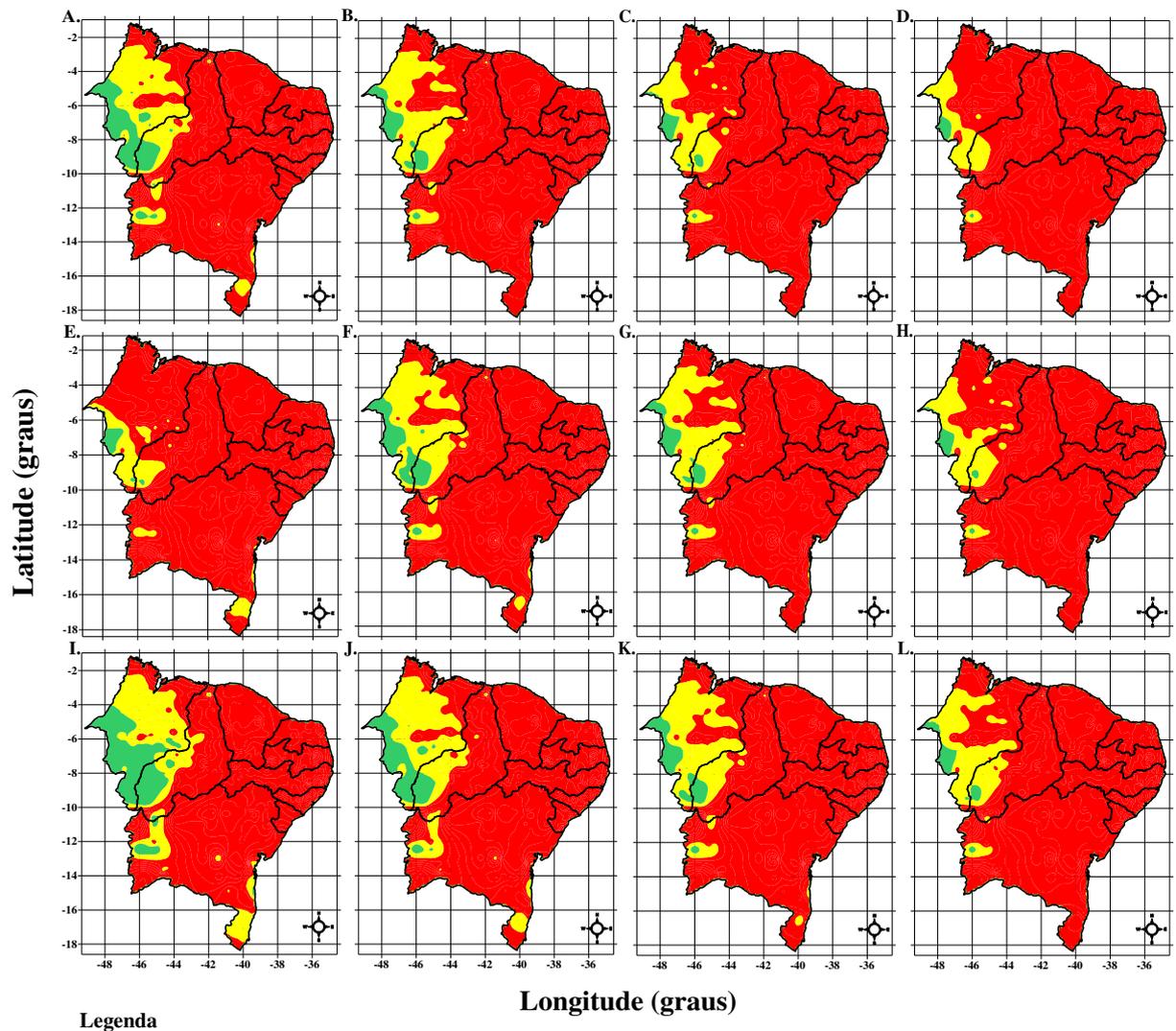


Figura 17. Risco climático do cultivo da cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil, no segundo decêndio de julho, com acréscimo de 10% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (A), aumento de 1,5°C (B), aumento de 3°C (C) e aumento de 5 °C (D); com acréscimo de 25% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (E), aumento de 1,5°C (F), aumento de 3°C (G) e aumento de 5 °C (H) e com acréscimo de 40% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (I), aumento de 1,5°C (J), aumento de 3°C (K) e aumento de 5 °C (L).

As distribuições espaciais dos riscos climáticos da cana-de-açúcar cultivada na região Nordeste do Brasil no segundo decêndio de agosto mediante os cenários de aquecimento global combinados com as anomalias negativas e positivas na precipitação são apresentadas nas Figuras 18 e 19, respectivamente.

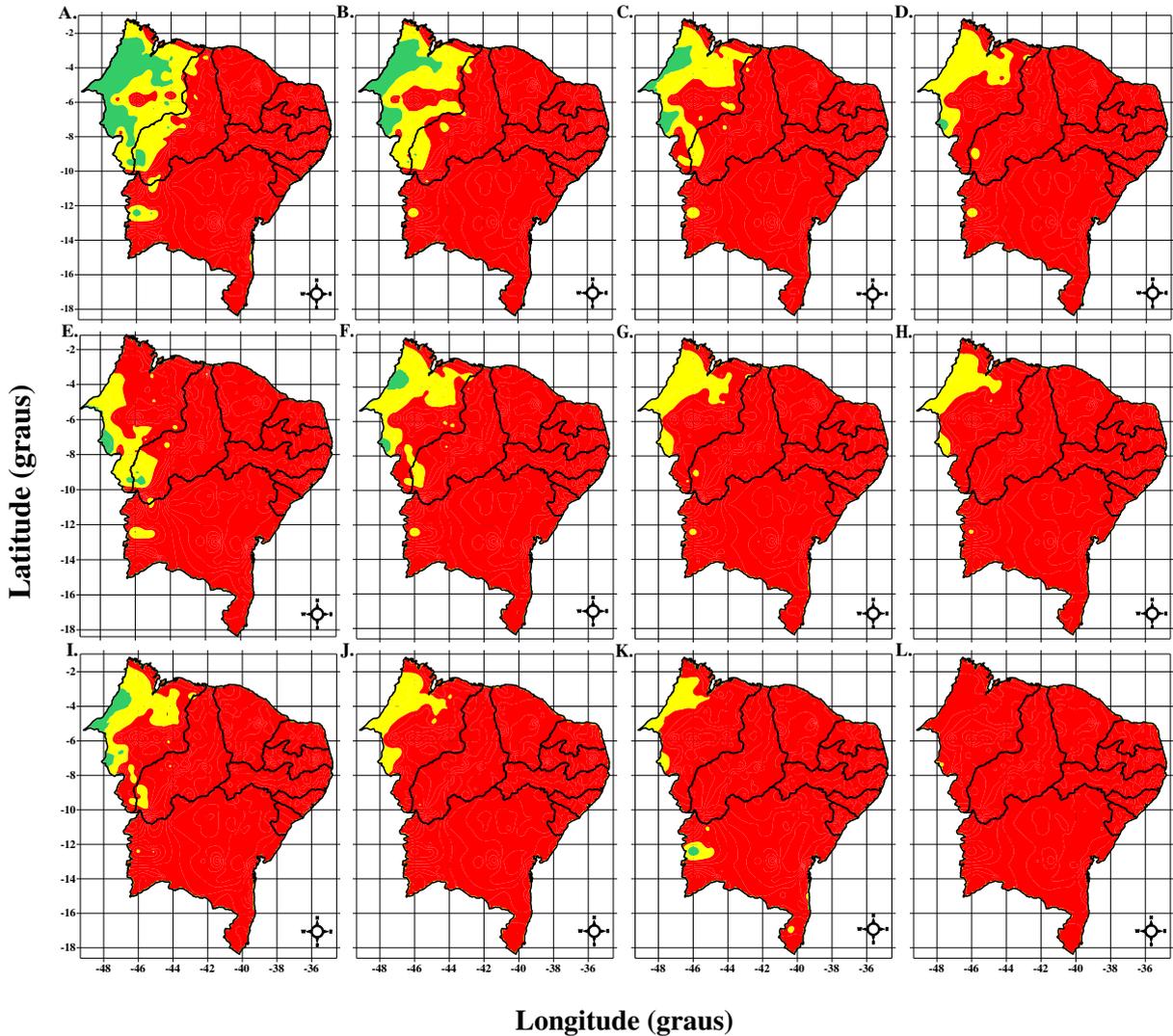


Figura 18. Risco climático do cultivo da cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil, no segundo decêndio de agosto, com redução de 10% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (A), aumento de 1,5°C (B), aumento de 3°C (C) e aumento de 5 °C (D); com redução de 25% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (E), aumento de 1,5°C (F), aumento de 3°C (G) e aumento de 5 °C (H) e com redução de 40% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (I), aumento de 1,5°C (J), aumento de 3°C (K) e aumento de 5 °C (L).

Nesse cenário, as áreas com médio e baixo riscos climáticos da cana-de-açúcar cultivada no segundo decêndio de agosto crescem em relação ao decêndio anterior com anomalias negativas de precipitação (Figura 18). Entretanto, no cenário de redução de 40% na precipitação pluvial e aumento de 5 °C na temperatura do ar toda a região de estudo apresenta totalmente inapta ao cultivo da cana-de-açúcar. Por outro lado, os cenários de aquecimento global combinados com as anomalias positivas da precipitação geram grande área na região Nordeste do Brasil com potencialidade para o cultivo da cana-de-açúcar no norte e oeste da

região em todos os cenários climáticos analisados neste estudo. As condições são mais favoráveis ao cultivo da cana-de-açúcar no cenário sem aumento de temperatura do ar, que decrescem com o aumento da temperatura do ar. O fato curioso é que as áreas com baixo e médios riscos climáticos no cenário sem aumento na temperatura, mas com incrementos positivos na precipitação de 10, 25 e 40%, são semelhantes, além de localizadas nas mesmas áreas do NEB.

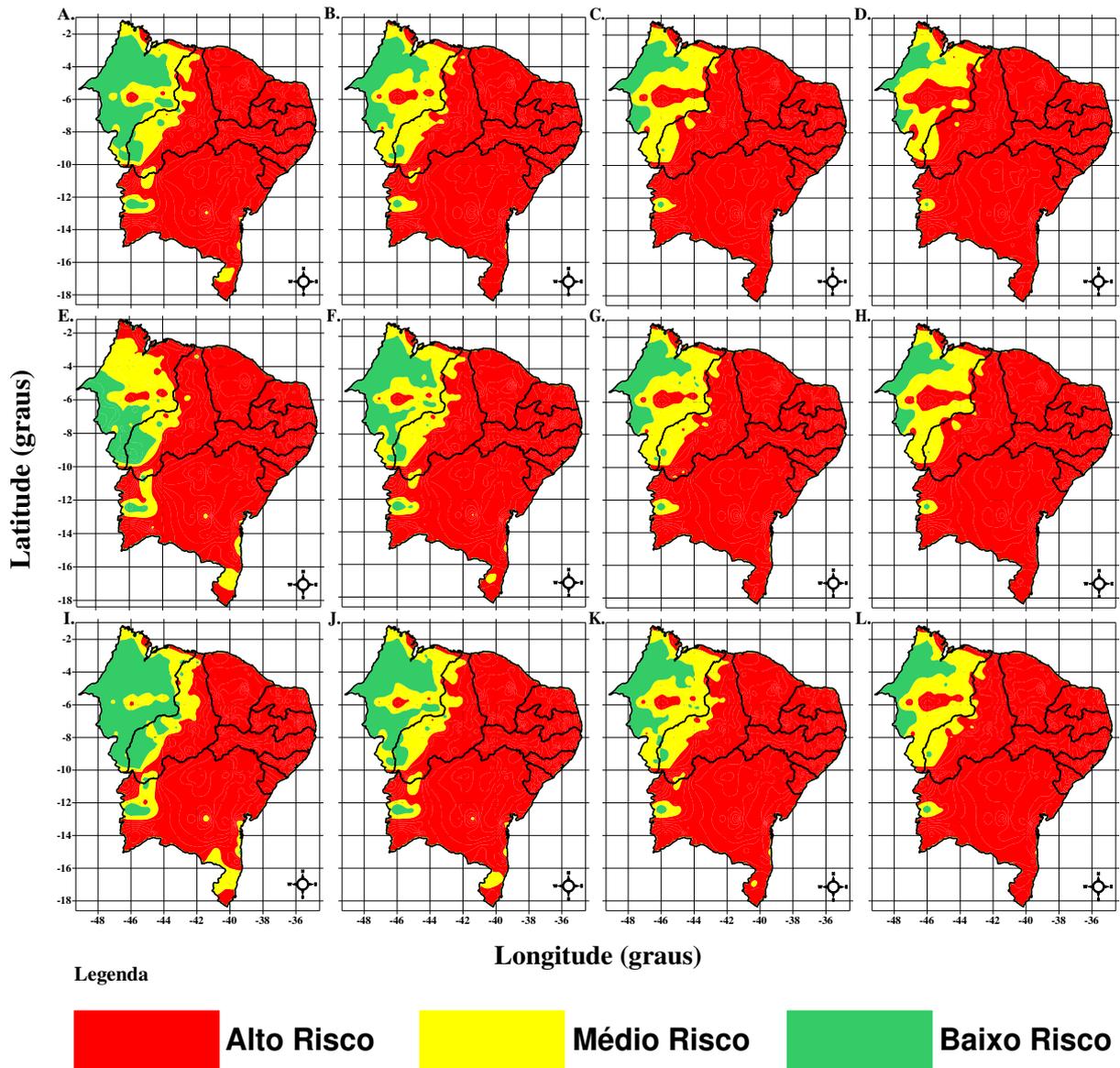


Figura 19. Risco climático do cultivo da cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil, no segundo decêndio de agosto, com acréscimo de 10% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (A), aumento de 1,5°C (B), aumento de 3°C (C) e aumento de 5 °C (D); com acréscimo de 25% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (E), aumento de 1,5°C (F), aumento de 3°C (G) e aumento de 5 °C (H) e com acréscimo de 40% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (I), aumento de 1,5°C (J), aumento de 3°C (K) e aumento de 5 °C (L).

Esse resultado sugere que o aumento na precipitação pluvial nessa região não é o fator preponderante para aumento das áreas agricultáveis com a cana-de-açúcar.

A Figura 20 exibe as distribuições espaciais dos riscos climáticos da cana-de-açúcar cultivada na região Nordeste do Brasil no segundo decêndio de setembro mediante os cenários de aquecimento global combinados com as anomalias negativas de precipitação pluvial. Nesse cenário climático se observa que as áreas favoráveis ao cultivo da cana-de-açúcar no NEB se deslocam mais para o norte da região; porém ocupando ainda grande parte da costa oeste apenas no cenário sem aumento de temperatura do ar.

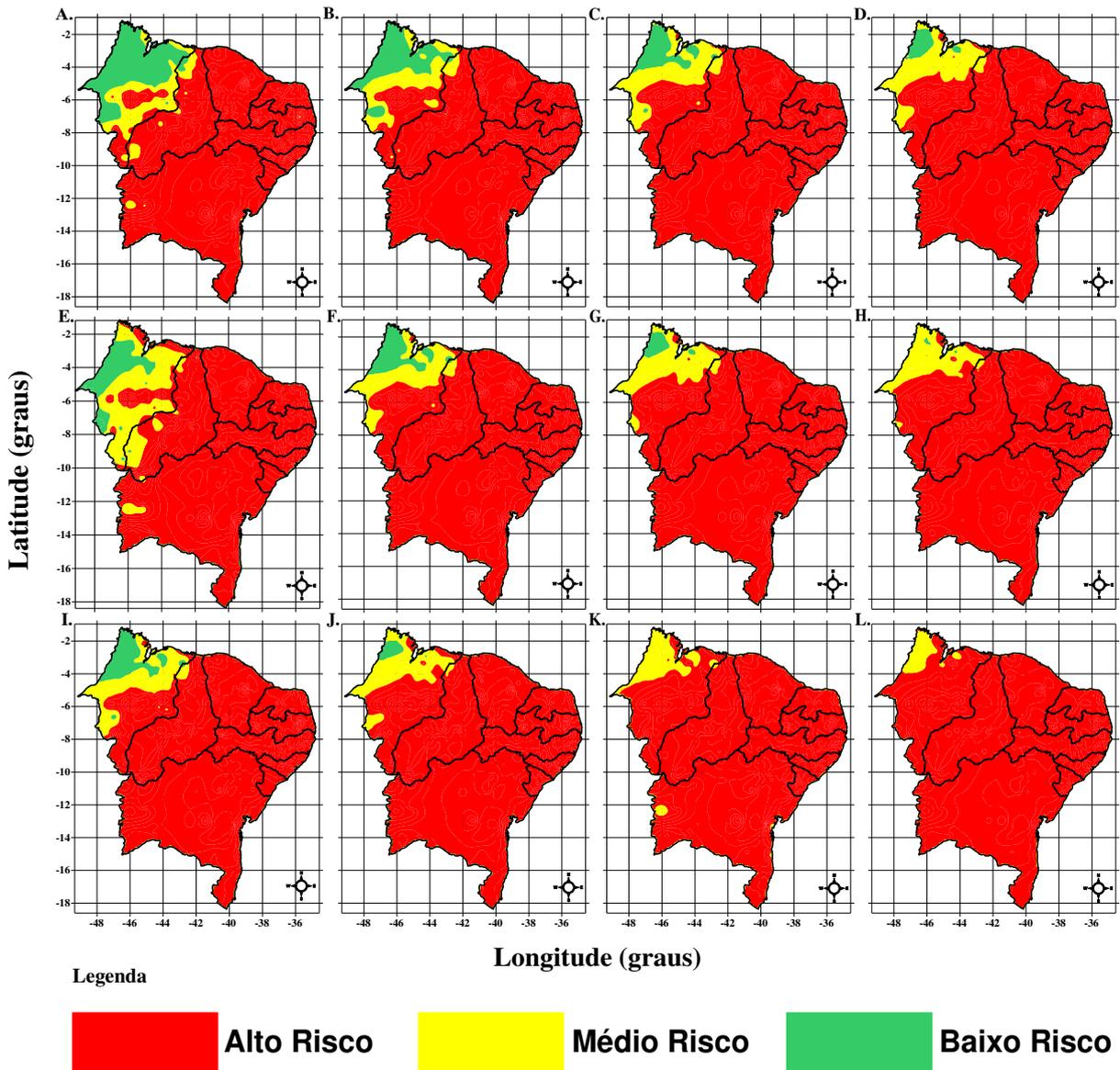


Figura 20. Risco climático do cultivo da cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil, no segundo decêndio de setembro, com redução de 10% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (A), aumento de 1,5°C (B), aumento de 3°C (C) e aumento de 5 °C (D); com redução de 25% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (E), aumento de 1,5°C (F), aumento de 3°C (G) e aumento de 5 °C (H) e com redução de 40% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (I), aumento de 1,5°C (J), aumento de 3°C (K) e aumento de 5 °C (L).

Entretanto, nos cenários mais pessimistas, ou seja, com reduções drásticas na precipitação e aumentos elevados na temperatura do ar (Figuras 20K e L), essas áreas favoráveis ao cultivo da cana-de-açúcar se transformam em pequenos núcleos localizados ao noroeste do Estado do Maranhão com médio risco climático. As distribuições espaciais dos riscos climáticos da cana-de-açúcar cultivada no NEB nesse decêndio com as anomalias positivas de precipitação pluvial são exibidas na Figura 21. Em todos os cenários climáticos se observa uma grande área localizada no noroeste da região com baixo e médio riscos climáticos.

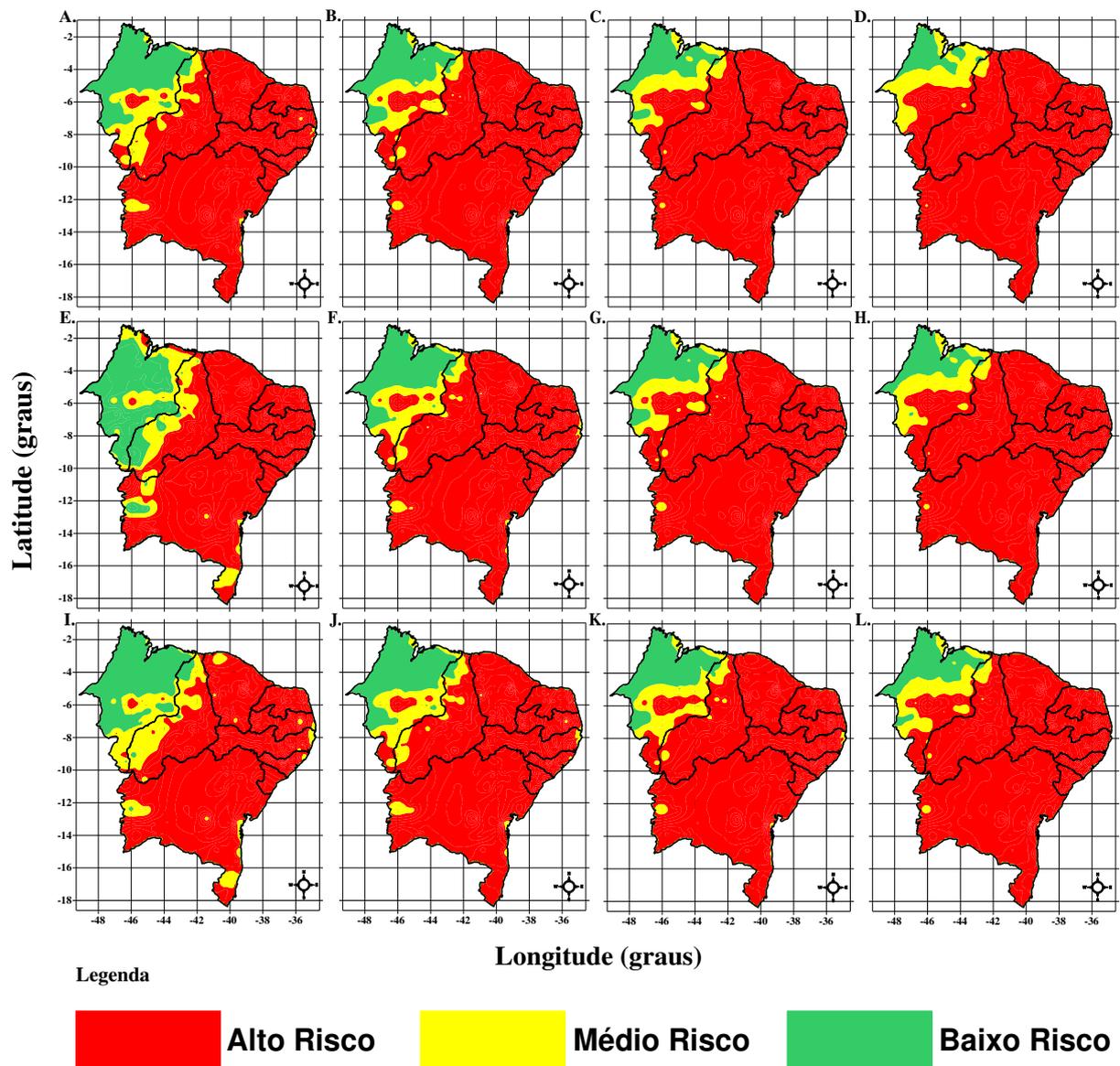


Figura 21. Risco climático do cultivo da cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil, no segundo decêndio de setembro, com acréscimo de 10% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (A), aumento de 1,5°C (B), aumento de 3°C (C) e aumento de 5 °C (D); com acréscimo de 25% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (E), aumento de 1,5°C (F), aumento de 3°C (G) e aumento de 5 °C (H) e com acréscimo de 40% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (I), aumento de 1,5°C (J), aumento de 3°C (K) e aumento de 5 °C (L).

Muito embora haja uma redução na área apta ao cultivo da cana-de-açúcar, mesmo nos cenários mais pessimistas encontram-se nesse decêndio áreas com baixo e médio riscos climáticos, como pode se observar na Figura 21L.

A Figura 22 exhibe as distribuições espaciais dos riscos climáticos da cana-de-açúcar cultivada na região Nordeste do Brasil no segundo decêndio de outubro mediante os cenários de aquecimento global combinados com as anomalias negativas de precipitação pluvial. Percebe-se claramente que houve uma redução em relação às áreas aptas ao cultivo na cana-de-açúcar na região nesse decêndio com relação ao segundo decêndio de setembro, também com redução de precipitação.

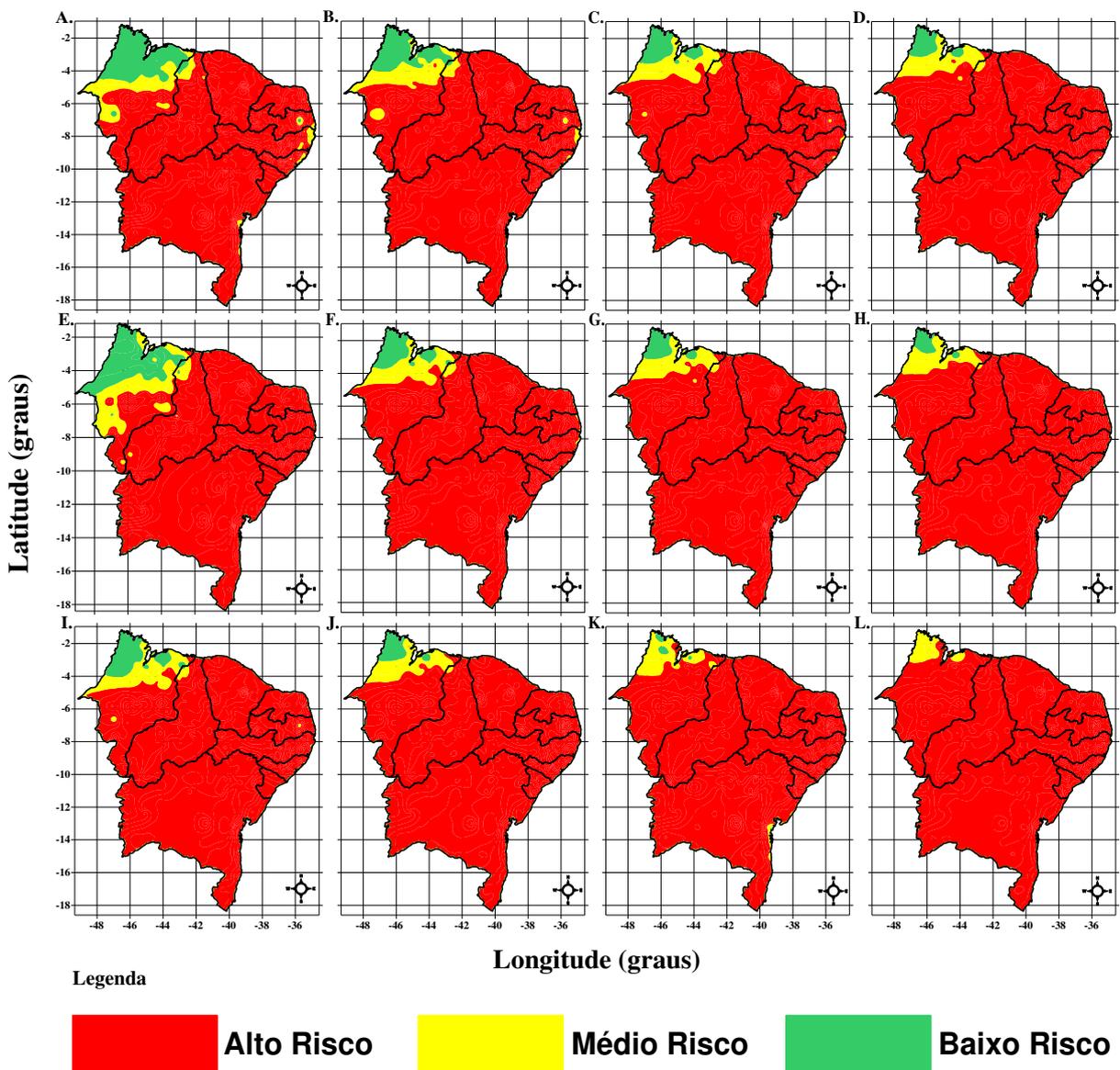


Figura 22. Risco climático do cultivo da cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil, no segundo decêndio de outubro, com redução de 10% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (A), aumento de 1,5°C (B), aumento de 3°C (C) e aumento de 5 °C (D); com redução de 25% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (E), aumento de 1,5°C (F), aumento de 3°C (G) e aumento de 5 °C (H) e com redução de 40% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (I), aumento de 1,5°C (J), aumento de 3°C (K) e aumento de 5 °C (L).

Constata-se, ainda, que as áreas aptas localizadas na parte oeste da região desaparecem no segundo decêndio de outubro para dar lugar às áreas com alto risco climático. Situação semelhante, porém em menor proporção, ocorre com relação ao cultivo da cana-de-açúcar nesse decêndio com anomalias positivas de precipitação (Figura 23). A diferença nesse decêndio, entretanto, está no fato que ainda persiste áreas aptas na parte oeste da região apenas no cenário sem aumento de temperatura, bem como começam a aparecer áreas aptas ao cultivo da cana-de-açúcar no litoral do NEB, principalmente nos cenários otimistas de precipitação.

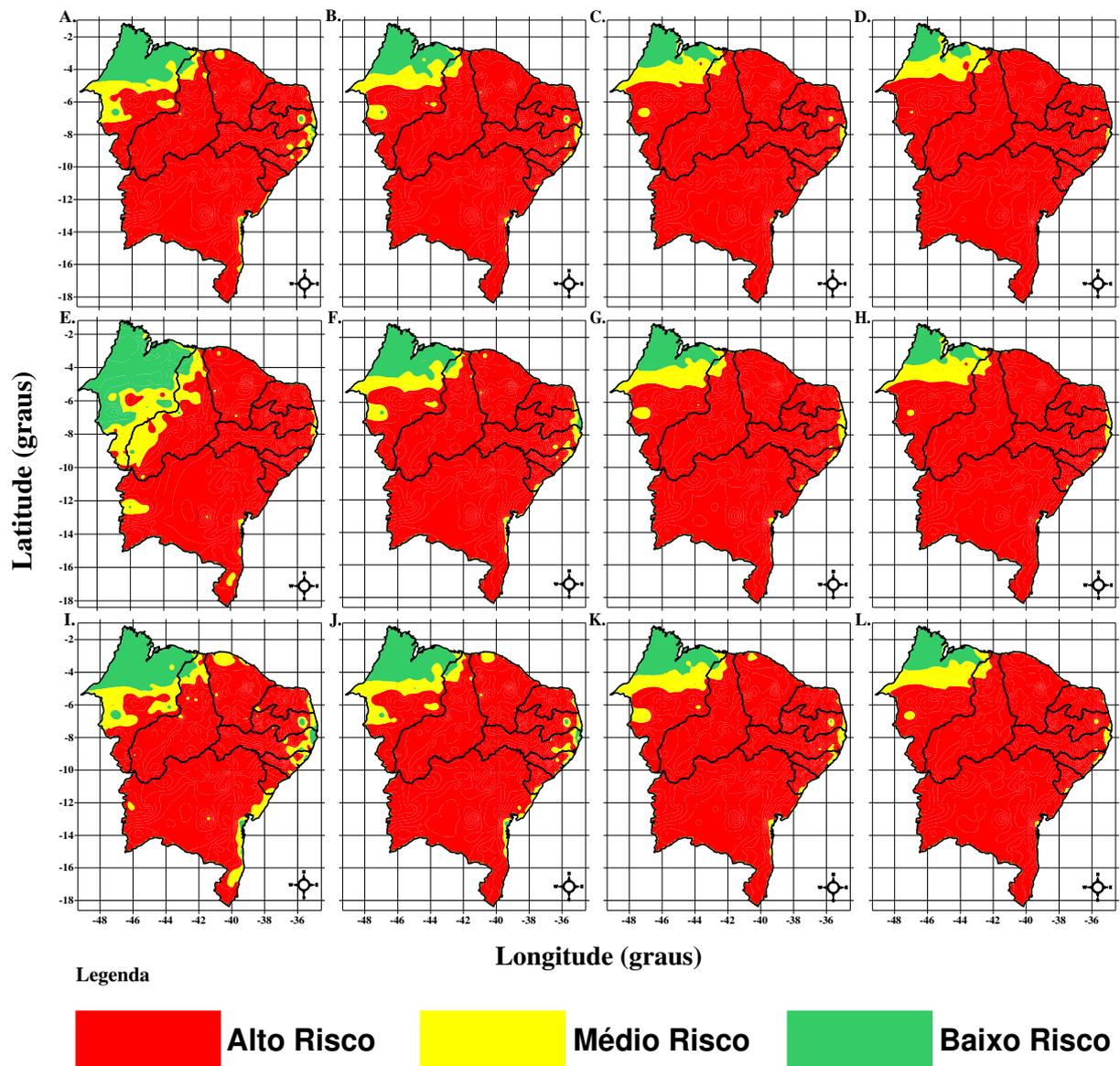


Figura 23. Risco climático do cultivo da cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil, no segundo decêndio de outubro, com acréscimo de 10% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (A), aumento de 1,5°C (B), aumento de 3°C (C) e aumento de 5 °C (D); com acréscimo de 25% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (E), aumento de 1,5°C (F), aumento de 3°C (G) e aumento de 5 °C (H) e com acréscimo de 40% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (I), aumento de 1,5°C (J), aumento de 3°C (K) e aumento de 5 °C (L).

A Figura 24 exibe a distribuição espacial dos riscos climáticos da cana-de-açúcar cultivada na região Nordeste do Brasil no segundo decêndio de novembro mediante os cenários de aquecimento global combinados com as anomalias negativas de precipitação pluvial. Observa-se que nesse cenário as áreas aptas localizadas ao norte da região são ainda mais reduzidas nesse decêndio e que, mesmo com reduções de precipitação, começam a aparecer áreas no litoral da região aptas ao cultivo da cana-de-açúcar. Entretanto, no cenário mais pessimista, ou seja, com redução de 40% na precipitação e aumento de 5°C (Figura 24L), apenas o extremo norte do Estado do Maranhão apresenta risco climático médio.

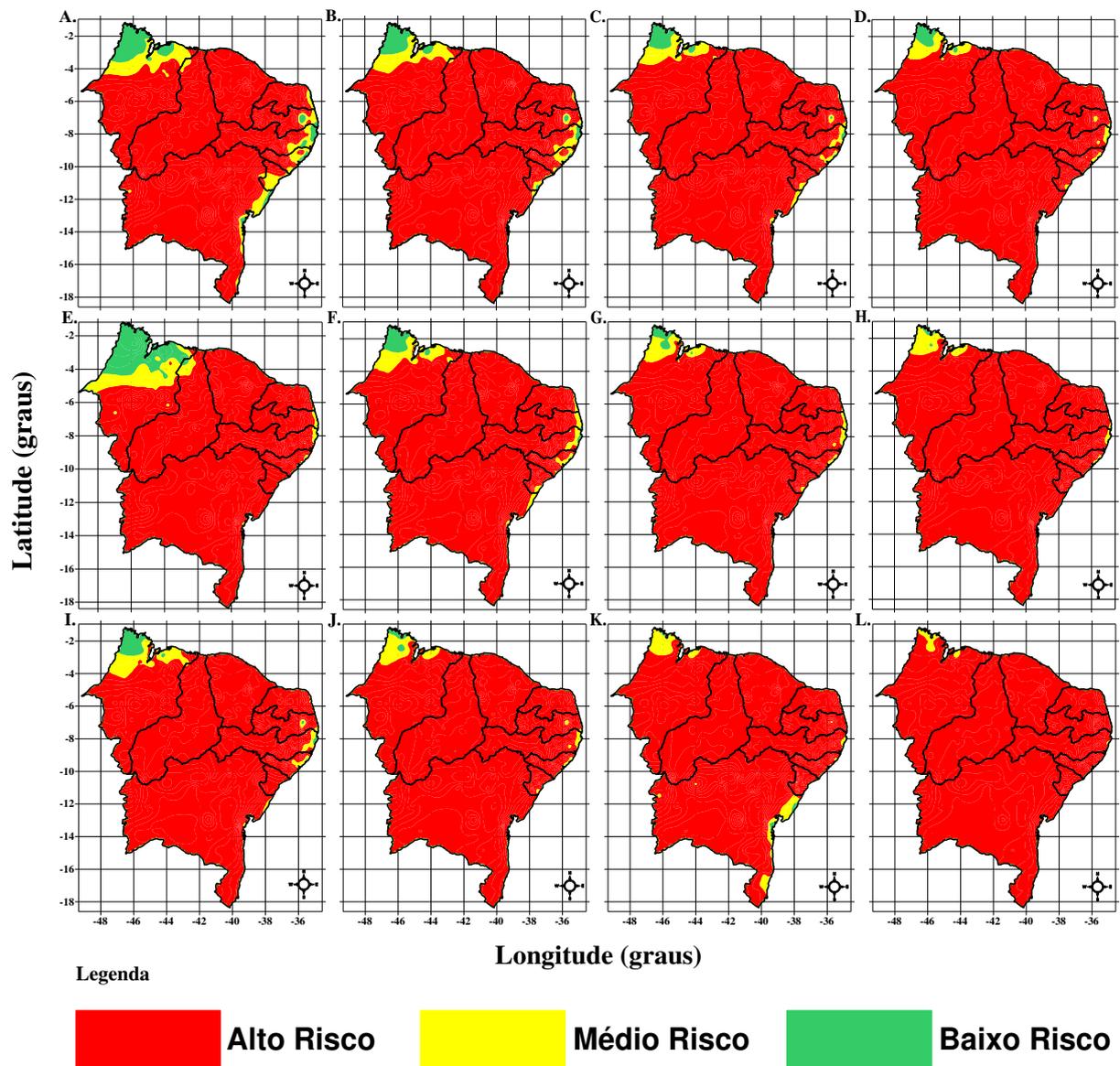


Figura 24. Risco climático do cultivo da cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil, no segundo decêndio de novembro, com redução de 10% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (A), aumento de 1,5°C (B), aumento de 3°C (C) e aumento de 5 °C (D); com redução de 25% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (E), aumento de 1,5°C (F), aumento de 3°C (G) e aumento de 5 °C (H) e com redução de 40% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (I), aumento de 1,5°C (J), aumento de 3°C (K) e aumento de 5 °C (L).

De forma evidente, no cenário de aumento de precipitação combinados com as anomalias positivas de temperatura do ar (Figura 25) começa a se estabelecer áreas agricultáveis para a cultura da cana-de-açúcar no segundo decêndio de novembro no litoral do NEB. Isso está associado a incidências de vórtices ciclônicos nessa época do ano na região. Nesse decêndio todos os cenários apresentam baixo e médio riscos climáticos no litoral da região, bem como ao norte do Estado do Maranhão. Evidentemente, os cenários mais otimistas, ou seja, sem aumento de temperatura com aumento de precipitação, as partes norte e oeste do NEB apresentam condições climáticas aptas ao cultivo da cana-de-açúcar.

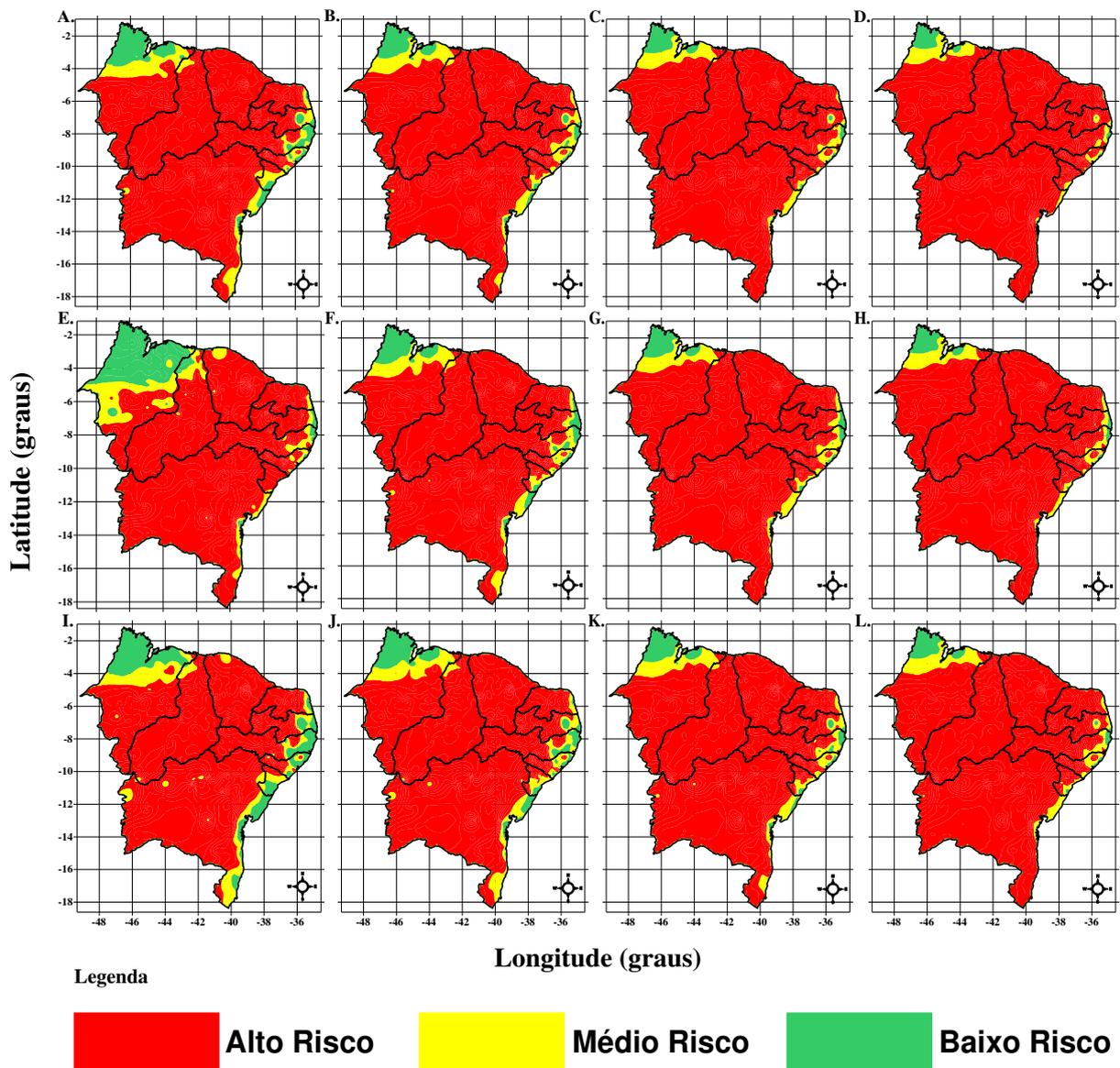


Figura 25. Risco climático do cultivo da cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil, no segundo decêndio de novembro, com acréscimo de 10% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (A), aumento de 1,5°C (B), aumento de 3°C (C) e aumento de 5 °C (D); com acréscimo de 25% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (E), aumento de 1,5°C (F), aumento de 3°C (G) e aumento de 5 °C (H) e com acréscimo de 40% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (I), aumento de 1,5°C (J), aumento de 3°C (K) e aumento de 5 °C (L).

As distribuições espaciais dos riscos climáticos da cana-de-açúcar cultivada na região Nordeste do Brasil no segundo decêndio de dezembro mediante os cenários de aquecimento global combinados com as anomalias negativas e positivas na precipitação pluvial são apresentadas nas Figuras 26 e 27, respectivamente. Constata-se que as áreas aptas ao cultivo da cana-de-açúcar no extremo norte do NEB são reduzidas em relação ao decêndio anterior, enquanto aquelas localizadas no litoral praticamente não variaram, exceto no cenário em que ocorre uma redução de 40% na precipitação e um aumento de 5°C na temperatura do ar.

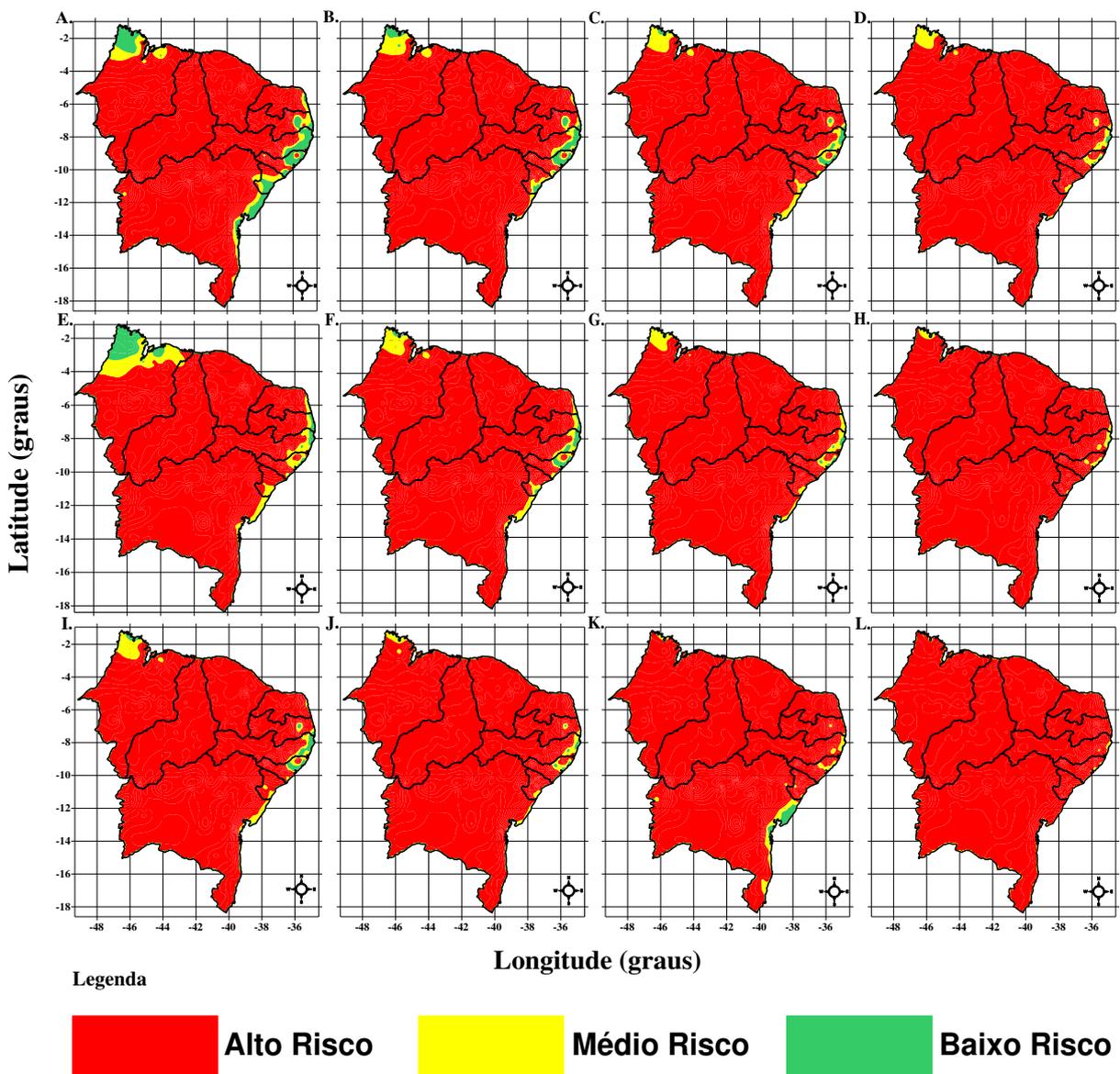


Figura 26. Risco climático do cultivo da cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil, no segundo decêndio de dezembro, com redução de 10% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (A), aumento de 1,5°C (B), aumento de 3°C (C) e aumento de 5 °C (D); com redução de 25% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (E), aumento de 1,5°C (F), aumento de 3°C (G) e aumento de 5 °C (H) e com redução de 40% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (I), aumento de 1,5°C (J), aumento de 3°C (K) e aumento de 5 °C (L).

Similarmente, no cenário de acréscimo de precipitação no segundo decêndio de dezembro (Figura 27), as áreas ao norte do NEB com baixo e médio riscos climáticos são reduzidas, enquanto aquelas localizadas no litoral da região aumentam significativamente. Nas condições climáticas sem aumento de temperatura, durante o mês de dezembro, todo o litoral do NEB, desde a costa leste do Estado do Rio Grande do Norte até o extremo sul do Estado da Bahia apresenta condições aptas ao cultivo da cana-de-açúcar. Evidentemente, essas áreas diminuem em função do aumento da temperatura do ar, atingindo a menor área no cenário de aumento de 5° C na temperatura do ar.

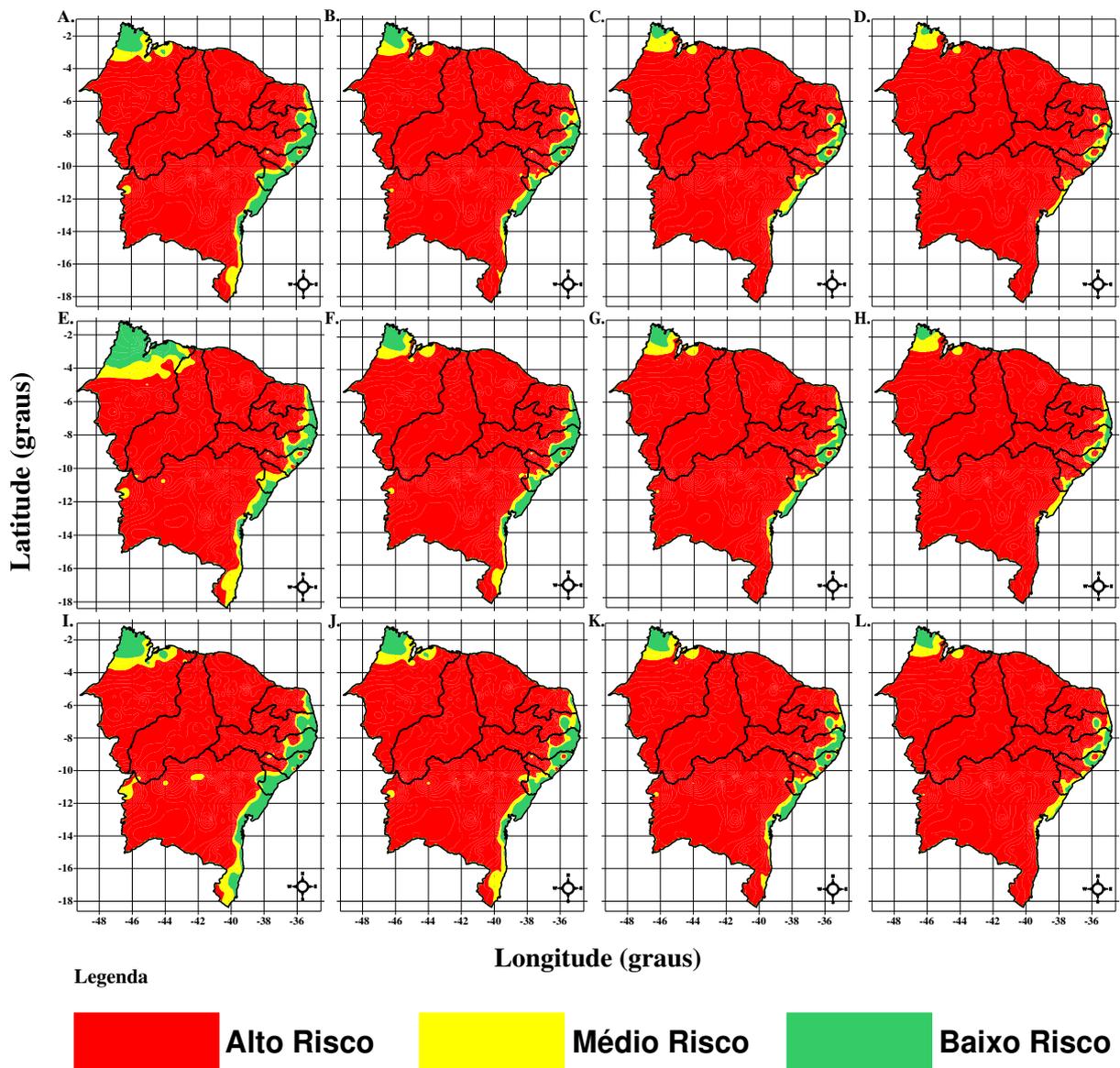


Figura 27. Risco climático do cultivo da cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil, no segundo decêndio de dezembro, com acréscimo de 10% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (A), aumento de 1,5°C (B), aumento de 3°C (C) e aumento de 5 °C (D); com acréscimo de 25% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (E), aumento de 1,5°C (F), aumento de 3°C (G) e aumento de 5 °C (H) e com acréscimo de 40% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar (I), aumento de 1,5°C (J), aumento de 3°C (K) e aumento de 5 °C (L).

Dessa forma, os cenários de aumentos da temperatura do ar associados aos decréscimos das precipitações (ocorrência do fenômeno El Niño) poderão provocar uma redução significativa na área agricultável da cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil, quando comparadas com as áreas anteriormente adequadas ao plantio dessa cultura. Quanto maior a anomalia negativa de chuva, menos apta se tornará a região, até o limite máximo da tolerância biológica ao calor ou à seca provocada pelo aumento térmico. Resultados semelhantes foram obtidos por Silva (2010) quando analisou o impacto do aquecimento global associado com as ocorrências dos fenômenos El Niño e La Niña na cultura do algodão herbáceo cultivado no NEB.

A Tabela 1 exibe a área agrícola da cana-de-açúcar cultivada na região Nordeste do Brasil com alto risco (AR), médio risco (MR) e baixo risco climático (BR) para o cultivo da cana-de-açúcar cultivada na região Nordeste do Brasil para as condições climáticas atuais (CCA). Observa-se que as áreas com baixo e médio riscos climáticos são inferiores quando comparadas àquelas com alto risco climático para cultivo da cana-de-açúcar no NEB. A maior área apta ao cultivo da cana-de-açúcar é nos decêndios de agosto (com médio risco climático de 14,71% e baixo risco de 11,73%) setembro (com médio risco climático de 10,60% e baixo risco de 11,19%). Por outro lado, o segundo decêndio de julho apresenta uma área bastante elevada com médio risco climático, de 206.781,33 km², que corresponde a 13,52% da área total do NEB.

Tabela 1. Área agrícola (%) da cana-de-açúcar cultivada na região Nordeste do Brasil com alto risco (AR), médio risco (MR) e baixo risco climático (BR) nas condições climáticas atuais (CCA).

Períodos de semeadura	AR	MR	BR
Janeiro	94,05	2,79	3,16
Fevereiro	95,61	2,53	1,86
Março	97,55	2,07	0,38
Abril	99,21	0,78	0,01
Maio	99,85	0,15	0,00
Junho	96,74	3,22	0,05
Julho	82,72	13,52	3,76
Agosto	73,55	14,71	11,73
Setembro	78,21	10,60	11,19
Outubro	86,25	5,72	8,03
Novembro	87,87	7,98	4,15
Dezembro	90,90	4,46	4,64

Entretanto, as áreas com baixo risco climático nesse decêndio são relativamente menores, com 3,76% da área do NEB. O segundo decêndio de maio apresenta a menor área

apta ao cultivo da cana-de-açúcar, com baixo e médio riscos climáticos de 0 e 0,15%, respectivamente. Evidentemente, a menor área com baixo risco climático está associada a maior área desfavorável para o cultivo da cana-de-açúcar na região. Analisando os impactos das mudanças climáticas sobre a cultura do algodão herbáceo no NEB, Silva (2010) observou que as modificações climáticas provocadas pelo aumento da temperatura do ar e redução da precipitação, em relação às condições climáticas atuais, provocam acréscimos significantes da proporção de áreas agrícolas com alto risco climático para o algodoeiro.

A Tabela 2 apresenta a variação percentual das áreas agrícolas da cana-de-açúcar cultivada na região Nordeste do Brasil com alto risco (AR), médio risco (MR) e baixo risco climático (BR) com redução de 10% na precipitação pluvial, sem aumento na temperatura do ar e aumentos de 1,5, 3 e 5°C. Nessas condições, verifica-se que as alterações nas mudanças climáticas podem ser ainda mais desastrosas para a distribuição das áreas com baixo risco climático ao longo do período do cultivo da cana-de-açúcar na região do NEB. No cenário de redução da precipitação pluvial sem aumento na temperatura, em todos os meses as áreas com médio e baixo risco climático apresentaram-se superiores aos demais cenários com aumentos na temperatura, sendo o mês de agosto o mais apreciável com área apta ao cultivo da cana-de-açúcar de 115.027,57 km² correspondente a 7,5% da área do NEB, e aproximadamente 250.000 km² de área com médio risco climático que equivale a 16,3% da área total do NEB, sendo essa ainda maior que o cenário para as condições climáticas atuais que possui 225.058,93 km² que corresponde a 14,71% da área total da região de estudo (Tabela 1), seguido dos meses de julho (com médio risco climático de 11,9% e baixo risco de 2,5%) e setembro (com médio risco climático de 10% e baixo risco de 9,2%). Contudo, os segundos decêndios dos meses de abril, maio e junho não possuem nenhuma área com baixo risco climático, apenas os meses de abril e junho exibem pequenas áreas com médio risco climático de 0,4 e 2%, respectivamente; o mês de maio para esse cenário é o mais crítico apresentando 100% de área inapta ao cultivo da cana-de-açúcar, correspondendo a 1.558,196 km².

Para os cenários de aumento na temperatura do ar de 1,5°C, os segundos decêndios dos meses de abril e maio exibem 100% de áreas com alto risco climático ao cultivo da cana-de-açúcar. Entretanto, a maior área com médio risco climático ocorre no mês de agosto com 242.207,14 km² equivalente a 15,8% da área total do NEB. Diante dessa condição de menor oferta hídrica, para o mesmo cenário de aumento de 1,5°C, as áreas com baixo risco climático sofre uma variação de 0 a 5,7% da área total, tendo o mês de setembro a maior área apta com 86.849,41 km². Aumentando a temperatura do ar para 3°C as áreas com baixo risco climático tem uma variação de 0 a 2,5%, com o mês de outubro exibindo uma área apta de 37.483,12

km²; para esse mesmo cenário, o segundo decêndio do mês de agosto tem as áreas com médio risco climático reduzida para 182.905,52 km².

Tabela 2. Área agrícola (%) da cana-de-açúcar cultivada na região Nordeste do Brasil com alto risco (AR), médio risco (MR) e baixo risco climático (BR) com redução de 10% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar e aumentos de 1,5, 3 e 5°C.

Períodos de semeadura	AR	MR	BR	AR	MR	BR	AR	MR	BR	AR	MR	BR
	Sem Aumento			Aumento de 1.5 °C			Aumento de 3°C			Aumento de 5°C		
Janeiro	94,8	2,6	2,5	97,7	1,3	1,0	97,9	1,7	0,4	99,3	0,7	0,1
Fevereiro	96,6	2,3	1,1	98,7	1,0	0,2	99,0	1,0	0,1	99,8	0,2	0,0
Março	98,4	1,4	0,2	99,9	0,1	0,0	99,9	0,1	0,0	100,0	0,0	0,0
Abril	99,6	0,4	0,0	100,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0
Mai	100,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0
Junho	98,0	2,0	0,0	99,6	0,4	0,0	99,8	0,2	0,0	99,9	0,1	0,0
Julho	85,7	11,9	2,5	93,8	5,6	0,6	95,6	4,1	0,3	97,6	2,3	0,1
Agosto	76,1	16,3	7,5	82,5	15,8	1,7	87,7	12,0	0,3	93,1	6,9	0,1
Setembro	80,8	10,0	9,2	86,8	7,5	5,7	89,5	8,1	2,4	91,4	7,7	0,9
Outubro	87,8	5,0	7,1	90,4	5,6	4,0	92,5	5,0	2,5	94,1	4,2	1,7
Novembro	89,6	7,1	3,3	94,0	4,1	1,9	95,9	3,0	1,2	97,0	2,1	0,9
Dezembro	92,2	4,1	3,7	95,8	2,7	1,5	96,5	2,9	0,6	98,1	1,8	0,1

Nos cenários com um aumento na temperatura de 5°C, para o mesmo período simulado, as áreas com médio risco climático reduz ainda mais, apresentando 105.374,18 km², e o mês de setembro passa a apresentar a maior área com médio risco com 7,7%, que correspondendo a 117.655,2 km² da área total do NEB. Nesse mesmo cenário, verifica-se claramente uma enorme redução de áreas com baixo risco climático, enquanto o segundo decêndio do mês de outubro é o menos pessimista com 1,7% da área do NEB, e os meses de março a maio se tornam ainda como áreas mais decrescentes, como consequência dos cenários de aumento na temperatura do ar. Segundo estudos realizados por Silva (2010), quanto maior a anomalia, menos apta se tornará a região, até o limite máximo de tolerância biológica ao calor ou à seca provocada pelo aumento térmico.

De um modo geral, o cenário de redução na precipitação sem aumento da temperatura, é o que apresenta os melhores resultados para as áreas favoráveis ao cultivo da cana-de-açúcar quando comparado aos obtidos na Tabela 1 (condições climáticas atuais), enquanto os demais cenários com aumento na temperatura afetam de forma mais acentuada as áreas agricultáveis, tendo em vista a menor oferta hídrica provocada, por exemplo, pelo fenômeno El Niño.

Analisando os resultados obtidos na Tabela 3, que exhibe a variação percentual das áreas agrícolas da cana-de-açúcar cultivada na região Nordeste do Brasil com alto risco (AR), médio risco (MR) e baixo risco climático (BR) com um aumento de 10% na precipitação

pluvial e sem aumento na temperatura do ar e aumentos de 1,5, 3 e 5°C, observa-se que para os cenários sem aumento na temperatura as áreas com baixo e médio riscos climáticos apresentam uma manutenção ou crescimento das áreas quando comparados aos resultados obtidos nas CCA. Os meses de agosto e setembro são os que apresentam os melhores resultados, exibindo no segundo decêndio do mês de agosto um acréscimo das áreas com baixo risco climático de 11,73% para 14,7%, que corresponde a um aumento de 179.482,73 km² para 224.621,80 km², respectivamente; enquanto o mês de setembro apresenta uma área com baixo risco de 12,5% que equivale a 191.627,76 km² contra 10,6% das CCA. Para esse mesmo período, a área equivalente a 171.099,80 km². Para as áreas com médio risco climático a diferença entre os cenários sem aumento na temperatura e as CCA para o mês de agosto é de 0,7% e para o mês de setembro é de 0,9%, o que resulta praticamente na manutenção dessas áreas. Apesar de uma maior oferta hídrica, o segundo decêndio dos meses de abril e maio anula as áreas consideradas favoráveis ao cultivo da cana-de-açúcar, apresentando apenas uma pequena área com médio risco de 1,4 e 0,6%, respectivamente. Evidentemente, o mês de maio é o que apresenta a maior área inapta ao cultivo com 1.520.003,82 km², equivalente a 99,4% de toda a área do NEB.

Analisando o cenário com aumento na temperatura do ar de 1,5°C, verifica-se que para o período simulado no mês de agosto as áreas com médio risco climático ganha um pouco mais de espaço em relação ao cenário sem aumento na temperatura, aumentando o seu percentual para 17,3%. O segundo decêndio do mês de setembro, persistindo o aumento na temperatura de 1,5°C, apresenta a maior área apta ao cultivo da cana-de-açúcar com 8% da área do NEB correspondendo a 122.019,51 km². Por outro lado, mesmo diante de um acréscimo na precipitação pluvial, as áreas com alto risco climático para o mês de maio, afeta todo o NEB. Com um aumento na temperatura do ar de 3°C o mês de maio possui o mesmo comportamento. Entretanto, para os quatro períodos simulados, do mês de março ao mês de junho, as áreas com baixo risco climático continuam nulas, porém as áreas com médio risco apresentam uma pequena variação de 0,1 a 1% da área total da região Nordeste do Brasil. No entanto, o segundo decêndio do mês de agosto apresenta a maior área favorável ao cultivo da cana-de-açúcar (com médio risco climático de 16,6% e baixo risco de 2,1%). As áreas com médio risco climático para esse mesmo período sofrem uma pequena redução quando comparado ao cenário de aumento na temperatura de 5°C de 16,6% para 14,3%, representando uma diferença de 2,3% que equivale a 35.246,13 km². Esse aumento na temperatura, apesar da maior oferta hídrica, exibe efeitos negativos das mudanças climáticas sobre as áreas consideradas aptas ao cultivo da cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil, apresentando

um intervalo de meses maior (fevereiro a junho) com 0% da área total do NEB. Analisando os impactos das alterações climáticas sobre a área de cultivo e produtividade de milho e feijão no Nordeste do Brasil usando modelagem agrometeorológica, Campos (2010) observou que o aumento na temperatura do ar pode afetar significativamente a disponibilidade de área agricultável das cultivares de feijão e milho no Nordeste do Brasil.

Tabela 3. Área agrícola (%) da cana-de-açúcar cultivada na região Nordeste do Brasil com alto risco (AR), médio risco (MR) e baixo risco climático (BR) com aumento de 10% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar e aumentos de 1,5, 3 e 5°C.

Períodos de semeadura	AR	MR	BR	AR	MR	BR	AR	MR	BR	AR	MR	BR
	Sem Aumento			Aumento de 1.5 °C			Aumento de 3°C			Aumento de 5°C		
Janeiro	92,7	3,5	3,8	95,1	2,4	2,5	96,7	2,0	1,2	98,3	1,5	0,2
Fevereiro	94,7	3,1	2,1	96,6	2,4	1,0	98,1	1,7	0,2	99,4	0,6	0,0
Março	96,8	2,6	0,5	98,4	1,4	0,1	99,5	0,5	0,0	99,9	0,1	0,0
Abril	98,5	1,4	0,0	99,6	0,4	0,0	99,9	0,1	0,0	100,0	0,0	0,0
Mai	99,4	0,6	0,0	100,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0
Junho	95,7	4,2	0,1	97,7	2,3	0,0	99,0	1,0	0,0	99,5	0,5	0,0
Julho	79,9	15,1	5,1	85,6	12,0	2,4	92,1	7,0	0,9	94,9	4,6	0,4
Agosto	71,4	14,0	14,7	76,9	17,3	5,8	81,2	16,6	2,1	85,2	14,3	0,5
Setembro	76,0	11,5	12,5	82,3	9,7	8,0	86,5	7,9	5,6	88,9	8,1	3,0
Outubro	84,2	7,1	8,6	88,6	5,6	5,8	90,3	5,8	3,8	92,0	5,4	2,6
Novembro	85,8	9,0	5,2	90,3	6,6	3,1	93,4	4,7	2,0	95,7	3,0	1,3
Dezembro	89,2	5,3	5,5	92,4	4,1	3,5	94,6	3,8	1,6	96,7	2,8	0,5

A Tabela 4 apresenta o percentual da área agrícola da cana-de-açúcar cultivada na região Nordeste do Brasil com alto risco, médio risco e baixo risco climático para os cenários com uma redução de 25% na precipitação pluvial sem aumento na temperatura do ar e aumentos de 1,5, 3 e 5°C. Para os cenários sem aumento na temperatura, o segundo decêndio do mês de agosto continua sendo o mais favorável para o cultivo da cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil, exibindo áreas com baixo risco climático de 2,3% e médio risco de 16,2%. Contudo, o período simulado para o mês de setembro apresenta a maior área apta ao cultivo da cultura com 98.306,95 km², que equivale a 6,4% da área total do NEB. Entretanto, verifica-se uma redução significativa nas áreas de baixo e médio risco climático e, conseqüentemente, um aumento nas áreas de alto risco, para os meses compreendidos entre março e junho exibindo áreas aptas com 0% e uma variação de 0,1 a 0,6% das áreas com médio risco climático. O segundo decêndio do mês de maio permanece sendo o mais crítico apresentando 100% de áreas inaptas ao cultivo da cana-de-açúcar no NEB. Analisando o cenário de aumento na temperatura de 1,5°C, o período de março a junho continua apresentando áreas com baixo risco climático nulo; no entanto, as áreas inaptas ao cultivo da

cultura chegam a 100% durante o período simulado nos meses de abril a junho. As áreas agricultáveis favoráveis ao cultivo compreendem os meses de agosto (com médio risco climático de 9,6% e baixo risco de 0,1%), setembro (com médio risco climático de 7,5% e baixo risco de 2,3%) e outubro (com médio risco climático de 5,1% e baixo risco de 2,5%).

Tabela 4. Área agrícola (%) da cana-de-açúcar cultivada na região Nordeste do Brasil com alto risco (AR), médio risco (MR) e baixo risco climático (BR) com redução de 25% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar e aumentos de 1,5, 3 e 5°C.

Períodos de semeadura	AR	MR	BR	AR	MR	BR	AR	MR	BR	AR	MR	BR
	Sem Aumento			Aumento de 1.5 °C			Aumento de 3°C			Aumento de 5°C		
Janeiro	96,7	1,6	1,7	97,7	1,7	0,7	98,8	1,0	0,1	99,8	0,2	0,0
Fevereiro	98,0	1,5	0,5	98,8	1,1	0,1	99,7	0,3	0,0	99,9	0,1	0,0
Março	99,4	0,6	0,0	99,8	0,1	0,0	100,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0
Abril	99,9	0,1	0,0	100,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0
Mai	100,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0
Junho	99,7	0,3	0,0	100,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0
Julho	93,5	5,9	0,6	96,8	3,0	0,1	98,9	1,1	0,0	99,5	0,5	0,0
Agosto	81,5	16,2	2,3	90,3	9,6	0,1	94,6	5,4	0,0	97,2	2,8	0,0
Setembro	85,9	7,6	6,4	90,2	7,5	2,3	92,3	7,0	0,7	94,1	5,8	0,0
Outubro	89,9	4,7	5,5	92,4	5,1	2,5	94,5	3,9	1,7	95,9	3,1	1,0
Novembro	92,9	4,8	2,3	95,9	2,9	1,2	97,2	2,1	0,7	98,1	1,7	0,2
Dezembro	94,6	3,3	2,1	96,2	3,1	0,7	97,9	2,0	0,1	99,3	0,6	0,0

Considerando a permanência dos cenários de aumento na temperatura do ar, agora de 3°C, as reduções nas áreas com baixo e médio riscos climáticos ao cultivo da cana-de-açúcar são bastante significativas. Portanto, os segundos decêndios dos meses compreendidos entre fevereiro e agosto não apresentam áreas com baixo risco, sendo o período compreendido entre março e junho os mais sensíveis à variabilidade da precipitação, que afeta significativamente a disponibilidade das áreas agrícolas favoráveis ao cultivo da cana-de-açúcar, exibindo assim, 100% de áreas inaptas em todo o NEB.

A redução das áreas agricultáveis é bem mais evidenciada com o aumento na temperatura de 5°C, principalmente nas áreas com baixo risco climático que cede espaço para o aumento das áreas com alto risco, apresentando 83,3% de todo o período simulado, 0% de áreas aptas em todo o NEB. Assad et. al., (2005), em simulações para a cultura da soja no Brasil em solos arenosos, evidenciaram que para acréscimos extremos de temperatura de 5,8°C ocorre uma redução média de 50% da área total do país em condições de baixo risco climático para semeadura no período compreendido entre outubro e dezembro. Campos (2010) verificou que diante dos cenários de aumento na temperatura do ar simulados acontece

um aumento das áreas agrícolas com alto e médio riscos climáticos e, conseqüentemente, uma redução nas áreas com baixo risco para todos os períodos simulados. Esses resultados indicaram que a atividade agrícola na região do NEB é bastante dependente da variação da temperatura do ar.

A Tabela 5 sumariza a variação percentual das áreas agrícolas da cana-de-açúcar cultivada na região Nordeste do Brasil com alto risco, médio risco e baixo risco climático com um aumento de 25% na precipitação pluvial, sem aumento na temperatura do ar e aumentos de 1,5, 3 e 5°C. Quando o impacto da mudança climática oferece uma maior oferta hídrica, os cenários são um pouco mais animadores, visto que, para o cenário sem aumento na temperatura, nenhum dos períodos simulados apresenta áreas totalmente inaptas ao cultivo da cana-de-açúcar no NEB. O segundo decêndio do mês de maio é o que exibe a maior área com alto risco climático, com 98,5% que equivalente a 1.506.893,57 km². Entretanto, as áreas agrícolas com baixo e médio riscos climático, consideradas como potencialmente favoráveis, apresentam um crescimento considerável na região em estudo, enquanto o período compreendido entre os meses de julho (com médio risco climático de 17% e baixo risco de 7,7%), agosto (com médio risco climático de 14,7% e baixo risco de 17,3%), setembro (com médio risco climático de 12,7% e baixo risco de 14,1%), outubro (com médio risco climático de 9% e baixo risco de 9,5%) e novembro (com médio risco climático de 9,6% e baixo risco de 6,6%) são os mais otimistas, visto que as áreas agrícolas com baixo risco climático apresenta a maior área para esse cenário de 264.307,76 km² (segundo decêndio do mês de agosto), sendo ainda maior que a área com médio risco que exibe uma área de 224.100,64 km² para o mesmo período. Por outro lado, diante do cenário de aumento na temperatura de 1,5°C é possível observar que as áreas com aptidões agrícolas são sensivelmente reduzidas. Contudo o mês de agosto apresenta um acréscimo das áreas com médio risco climático em relação ao cenário anterior de 1,2%, representando um aumento de 224.100,64 km² para 243.173,26 km². No entanto, os segundos decêndios dos meses de abril e maio exibem uma área apta de 0%.

Investigando o cenário de aumento na temperatura de 3°C, as áreas agrícolas com baixo risco climático apresentam um período de três meses (abril a junho) com 0% de áreas aptas ao cultivo da cana-de-açúcar, enquanto o segundo decêndio do mês de maio é considerado o mais sensível para todos os cenários estudados, pois as áreas com alto risco climático nesse período facilmente chega a 100%. Entretanto, mesmo persistindo os aumentos na temperatura do ar, o período simulado para o mês de agosto continua apresentando um crescimento das áreas com médio risco climático, exibindo para esse cenário 17,4% que corresponde a 265.975,19 km². Aumentando a temperatura do ar de 5°C provoca

nesse mesmo período uma pequena redução de 0,7%, apresentando assim, uma área com médio risco de 255.038,03 km². Devido ao aumento na temperatura, as áreas com baixo risco são severamente reduzidas quando comparadas aos cenários sem aumento na temperatura, apresentando quatro períodos (março a junho) com 0% de áreas aptas, evidentemente, os períodos das áreas desfavoráveis crescem em relação ao cenário anterior de 1 para 2 meses com 100% de áreas inaptas. Analisando o impacto do aquecimento global sobre o cultivo de feijão caupi no Nordeste do Brasil, Silva et al. (2010) afirmam que o aumento na temperatura do ar afeta a disponibilidade de áreas agrícolas favoráveis e em particular a produtividade do feijão caupi no Nordeste do Brasil.

Tabela 5. Área agrícola (%) da cana-de-açúcar cultivada na região Nordeste do Brasil com alto risco (AR), médio risco (MR) e baixo risco climático (BR) com aumento de 25% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar e aumentos de 1,5, 3 e 5°C.

Períodos de semeadura	AR	MR	BR	AR	MR	BR	AR	MR	BR	AR	MR	BR
	Sem Aumento			Aumento de 1.5 °C			Aumento de 3°C			Aumento de 5°C		
Janeiro	90,9	4,6	4,5	94,0	2,7	3,3	95,7	2,5	1,7	97,5	2,1	0,4
Fevereiro	93,5	3,6	2,9	95,6	2,8	1,6	97,3	2,2	0,5	99,0	1,0	0,1
Março	95,6	3,4	1,1	97,6	2,1	0,3	98,9	1,0	0,1	99,8	0,2	0,0
Abril	97,6	2,1	0,3	99,0	0,9	0,0	99,7	0,3	0,0	100,0	0,0	0,0
Mai	98,5	1,5	0,0	99,7	0,3	0,0	100,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0
Junho	93,2	6,3	0,5	96,3	3,6	0,1	97,8	2,2	0,0	98,9	1,1	0,0
Julho	75,3	17,0	7,7	81,8	14,3	3,8	86,8	11,2	2,0	92,4	6,8	0,7
Agosto	68,1	14,7	17,3	73,9	15,9	10,2	78,3	17,4	4,3	81,6	16,7	1,7
Setembro	73,2	12,7	14,1	79,4	11,0	9,6	84,0	9,1	6,9	86,9	8,3	4,8
Outubro	81,5	9,0	9,5	87,3	5,8	6,9	89,2	6,2	4,6	90,9	5,7	3,4
Novembro	83,8	9,6	6,6	88,1	8,0	3,9	91,6	5,8	2,6	94,3	3,9	1,8
Dezembro	87,7	5,8	6,5	90,7	4,6	4,6	93,4	3,9	2,7	95,6	3,5	0,9

De acordo com os resultados obtidos na Tabela 6, que exhibe o percentual das áreas agrícolas da cana-de-açúcar cultivada na região Nordeste do Brasil com alto risco, médio risco e baixo risco climático com redução de 40% na precipitação pluvial, sem aumento na temperatura do ar e aumentos de 1,5, 3 e 5°C. Nesses cenários de precipitação pluvial associado aos aumentos na temperatura média do ar, a oferta hídrica é reduzida drasticamente, fazendo com que os riscos climáticos aumentem significativamente. Dessa maneira, as áreas agrícolas consideradas como potencialmente favoráveis ao cultivo da cana-de-açúcar sofrem um processo de redução bastante acentuado em todos os períodos simulados neste cenário. Mesmo sem aumento na temperatura, devido ao grande estresse hídrico, os segundos decêndios dos meses de abril a junho apresentam áreas com 100% de inaptidão agrícola ao cultivo da cana-de-açúcar. Apenas os meses de agosto e setembro exibem uma área com

médio risco climático considerável com 8,7 e 7,6% da área total do NEB. Considerando os aumentos na temperatura, os cenários associados ao decréscimo na precipitação pluvial tendem a aumentar as áreas com alto risco climático proporcionalmente; com o aumento na temperatura de 1,5°C as áreas agricultáveis com baixo risco climático são severamente reduzidas, com 58,3% dos períodos simulados apresentando 0% de áreas aptas. As áreas consideradas desfavoráveis também apresentam um crescimento, com quatro períodos exibindo 100% de áreas inaptas ao cultivo da cana-de-açúcar. Por outro lado, o mês de setembro ainda apresenta 6,3% das áreas com médio risco climático representando 95.844,72 km² de toda a área do NEB.

Analisando os resultados obtidos sob o cenário de aumento na temperatura de 3°C, verifica-se que apesar de não apresentar nenhum período com áreas totalmente inaptas, exibe as áreas agrícolas favoráveis com uma pequena variação de 0 a 0,9% para as áreas com baixo risco climático e de 0,1 a 4,2% para as áreas com médio risco. A deficiência hídrica afeta a produtividade da cana, que quando não satisfatória, pode acarretar em um baixo desenvolvimento das raízes e baixo perfilhamento, resultando, portanto num baixo aproveitamento da água e nutrientes disponíveis (Rojas & Barbieri, 1999). A precipitação pluvial, nas regiões brasileiras que produzem cana-de-açúcar é muito variável e má distribuída, sendo esse o principal fator limitante da produtividade e, conseqüentemente, dos rendimentos agroindustriais dessa cultura (Lima et al., 2010). Para o crescimento e desenvolvimento potencial da cana ser atingido, ela necessita de 1500 mm a 2500 mm anuais (Doorembos & Kassan, 1979). Na zona canavieira de Alagoas chove em média 1.937 mm por ano. Porém, 72% dessa chuva (1397 mm) ocorre durante a estação chuvosa que vai de abril a agosto e nos outros seis meses (de setembro a março) chove apenas 28% (540 mm). Isso indica uma alta probabilidade de ocorrência de deficiência hídrica e certamente reduções de produtividade e renovações precoces dos canaviais (SINDAÇÚCAR – AL-2010). Dessa forma, algumas áreas se tornarão desfavoráveis em função do aumento no grau de risco climático associado ao cultivo da cana-de-açúcar na região.

Para o cenário de aumento na temperatura de 5°C a época de cultivo da cana-de-açúcar é severamente reduzida, fazendo com que a atividade agrícola tenha um maior risco associado ao clima. Nesse cenário, 66,6% dos períodos estudados apresentam áreas com alto risco climático com 100% de inaptidão agrícola ao cultivo da cana-de-açúcar. E, ao longo de todo ano simulado não existe nenhuma área apta ao cultivo. Segundo Silva (2010), o rendimento agrícola é reduzido em função da degradação do solo, disponibilidade de água durante o período de crescimento das culturas e pelo aumento da temperatura do ar. Estudos,

realizados por Silva et al. (2010) sobre o impacto do aquecimento global sobre o cultivo de feijão caupi no Nordeste do Brasil concluíram que sob um cenário de aquecimento do clima os riscos dessas culturas irão aumentar, resultando em uma drástica redução dos rendimentos agrícolas, bem como uma redução das áreas agronomicamente favoráveis.

Tabela 6. Área agrícola (%) da cana-de-açúcar cultivada na região Nordeste do Brasil com alto risco (AR), médio risco (MR) e baixo risco climático (BR) com redução de 40% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar e aumentos de 1,5, 3 e 5°C.

Períodos de semeadura	AR	MR	BR	AR	MR	BR	AR	MR	BR	AR	MR	BR
	Sem Aumento			Aumento de 1.5 °C			Aumento de 3°C			Aumento de 5°C		
Janeiro	98,0	1,3	0,7	98,8	1,0	0,1	98,0	1,1	0,9	100,0	0,0	0,0
Fevereiro	99,0	0,9	0,1	99,6	0,3	0,0	98,3	1,4	0,4	100,0	0,0	0,0
Março	99,8	0,2	0,0	100,0	0,0	0,0	98,6	1,2	0,1	100,0	0,0	0,0
Abril	100,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	99,4	0,6	0,0	100,0	0,0	0,0
Mai	100,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	99,9	0,1	0,0	100,0	0,0	0,0
Junho	100,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	99,7	0,3	0,0	100,0	0,0	0,0
Julho	98,1	1,9	0,1	99,6	0,4	0,0	98,5	1,3	0,2	100,0	0,0	0,0
Agosto	91,2	8,7	0,0	96,6	3,4	0,0	98,5	1,3	0,2	100,0	0,0	0,0
Setembro	89,8	7,6	2,7	93,5	6,3	0,2	95,8	4,2	0,0	98,7	1,3	0,0
Outubro	92,0	5,3	2,7	94,8	3,8	1,4	96,7	2,9	0,5	98,2	1,8	0,0
Novembro	95,7	2,9	1,3	97,6	2,1	0,3	96,3	3,4	0,3	99,3	0,7	0,0
Dezembro	96,6	2,6	0,8	98,5	1,4	0,1	97,3	1,9	0,8	99,9	0,1	0,0

A Tabela 7 apresenta a variação percentual das áreas agrícolas da cana-de-açúcar cultivada na região Nordeste do Brasil com alto risco, médio risco e baixo risco climático com um aumento de 40% na precipitação pluvial sem aumento na temperatura do ar e aumentos de 1,5, 3 e 5°C. Nos cenários de aumento na precipitação, mesmo com o acréscimo na temperatura do ar, verificam-se condições menos pessimistas, em função, evidentemente, de uma maior oferta hídrica. O cenário sem aumento na temperatura possibilita o aumento das áreas com baixo e médio riscos climáticos, principalmente, para o aumento de 40% na precipitação, enquanto os segundos decêndios dos meses de julho (com médio risco climático de 17,8% e baixo risco de 9,5%), agosto (com médio risco climático de 15% e baixo risco de 19,3%), setembro (com médio risco climático de 14,6% e baixo risco de 15,4%) e outubro (com médio risco climático de 11,7% e baixo risco de 10,2%) exibem um ótimo crescimento das áreas consideradas potencialmente favoráveis ao cultivo da cana-de-açúcar em relação aos cenários anteriores, expondo a maior área apta no mês de agosto com 295.732,58 km². As áreas com alto risco climático, conseqüentemente, sofreram uma diminuição considerável, apresentando a maior área inapta de 97,6% para o segundo decêndio do mês de maio que equivale a 1.493.499,86 km² da área total do NEB. Para o cenário de aumento na temperatura

de 1,5°C, apenas o mês de maio exibe áreas com baixo risco climático nula e um pequeno percentual de áreas com médio risco de 0,8%. Esse período, como já foi dito anteriormente, é o mais sensível ao cultivo da cultura na região Nordeste do Brasil. O período compreendido entre os meses de julho e setembro apresenta praticamente uma manutenção das áreas com médio risco climático, tendo uma variação de 12,2 a 17,2%. O período simulado para o mês de agosto, novamente apresenta-se como o mês mais favorável ao cultivo da cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil com uma área apta de 206.811,55 km².

Tabela 7. Área agrícola (%) da cana-de-açúcar cultivada na região Nordeste do Brasil com alto risco (AR), médio risco (MR) e baixo risco climático (BR) com aumento de 40% na precipitação pluvial e sem aumento na temperatura do ar e aumentos de 1,5, 3 e 5°C.

Períodos de semeadura	AR	MR	BR	AR	MR	BR	AR	MR	BR	AR	MR	BR
	Sem Aumento			Aumento de 1.5 °C			Aumento de 3°C			Aumento de 5°C		
Janeiro	89,4	5,0	5,6	92,4	3,6	4,0	94,9	2,8	2,3	96,7	2,4	0,9
Fevereiro	92,3	4,0	3,8	94,5	3,2	2,4	96,5	2,6	0,9	98,3	1,5	0,1
Março	94,6	3,5	1,9	96,2	3,3	0,6	98,3	1,6	0,1	99,6	0,4	0,0
Abril	96,8	2,5	0,7	98,3	1,7	0,1	99,4	0,6	0,0	99,9	0,1	0,0
Maiο	97,6	2,3	0,1	99,2	0,8	0,0	99,9	0,1	0,0	100,0	0,0	0,0
Junho	90,6	8,4	1,0	94,8	4,9	0,2	96,6	3,3	0,1	98,2	1,8	0,0
Julho	72,7	17,8	9,5	77,9	17,2	5,0	83,2	13,7	3,1	88,7	10,0	1,3
Agosto	65,6	15,0	19,3	71,1	15,4	13,5	75,6	17,6	6,8	79,1	17,6	3,2
Setembro	70,0	14,6	15,4	77,1	12,2	10,7	81,5	10,7	7,9	85,2	9,0	5,9
Outubro	78,1	11,7	10,2	85,6	6,6	7,8	88,4	6,4	5,2	89,9	6,1	4,0
Novembro	81,9	9,8	8,3	86,2	8,8	5,0	90,0	6,8	3,2	92,8	4,9	2,3
Dezembro	86,0	5,9	8,1	88,8	5,7	5,5	92,2	4,3	3,5	94,5	3,8	1,7

Analisando o cenário de aumento na temperatura de 3°C as áreas com alto risco climático surgem com mais significância, anulando as áreas aptas no período de abril e maio; contudo, as áreas com médio risco garantem um pequeno percentual que varia de 0,6 e 0,1%. Por outro lado, o mês de agosto exibe um crescimento das áreas com médio risco em relação ao cenário anterior de 15,4 % para 17,6% representando um aumento de 33.161,03 km². Estudos realizados por Silva (2010) sobre os impactos das mudanças climáticas sobre a cultura do algodão herbáceo no NEB constatam que os aumentos abruptos na temperatura também podem acarretar a diminuição de áreas de médio e baixo riscos climáticos, pois essa variável ambiental interfere no crescimento e no desenvolvimento das culturas por afetar significativamente a fenologia, a expansão foliar, a alongação dos internós, a produção de biomassa e a partição de assimilados em diferentes partes da planta. Todavia, o cenário com aumento na temperatura de 5°C evidencia essa diminuição. As áreas com baixo risco climático nula ocorrem em quatro períodos simulados (março a junho), diminuindo também

sensivelmente as áreas com médio risco, apenas o mês de agosto mantém o mesmo percentual. Para esse cenário com um forte aumento na precipitação, podendo ser comparado ao fenômeno La Niña com alta intensidade, percebe-se um único período, o mês de maio, apresentando áreas com alto risco climático com 100% de área inapta ao cultivo da cana-de-açúcar em toda a região do NEB. Silva et al. (2010) afirmam que os impactos das alterações climáticas são altamente variáveis no espaço e no tempo devido à variabilidade na temperatura do ar, precipitação, solo e vegetação de toda a região.

Para a região semiárida do Brasil e devido à grande irregularidade do seu regime pluviométrico, a conciliação dos períodos chuvosos e as melhores épocas de plantio são fatores determinantes para o sucesso da exploração agrícola de uma cultura (Campos et al., 2010). A irregularidade do período chuvoso na região Nordeste do Brasil restringe a escolha de qualquer cultura a ser implantada, principalmente na maior parte do semiárido, justamente onde o déficit hídrico é ainda maior (Silva et al., 2005).

5. CONCLUSÕES

Esta pesquisa apresenta os resultados obtidos das análises do ISNA na avaliação dos riscos climáticos do cultivo da cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil, com base na combinação de incrementos de temperatura do ar e anomalias positivas e negativas na precipitação pluvial. Assim, os resultados deste trabalho produziram as seguintes conclusões:

1. As alterações climáticas provocadas pelo aumento na temperatura do ar e redução na precipitação pluvial provocam diminuições relevantes da proporção de áreas agrícolas com baixo risco climático para a cultura da cana-de-açúcar cultivada na região Nordeste do Brasil. Entretanto, as reduções na precipitação pluvial sem aumento na temperatura produzem um aumento significativo nas áreas com baixo e médio riscos climáticos quando comparadas com aquelas submetidas aos incrementos de temperatura;

2. Diante das condições de ocorrência de decréscimos das precipitações combinado com o aumento de 5 °C, as áreas com alto risco climático representam 100% da área total do NEB praticamente durante todos os meses do ano;

3. O período simulado mais sensível ao cultivo da cana-de-açúcar compreende os meses de março a maio; enquanto os meses de julho a setembro é o período mais apropriado para o cultivo da cana-de-açúcar em sistema de sequeiro na região Nordeste do Brasil;

4. O aquecimento global associado com anomalias de precipitação pluvial pode trazer graves consequências para a economia da região, em face da inaptidão dessa cultura em produzir de forma economicamente viável sob níveis elevados de temperatura do ar.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Affholder, F. Effect of organic matter input on the water balance and yield of millet under tropical dryland condition. *Field Crops Research*, v.41, p.109-121, 1995.
- Affholder, F.; Rodrigues, G. C; Assad, E. D. Modelo agroclimático para avaliação do comportamento do milho na região dos cerrados. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. v.32, n. 10, 1997.
- Alfonsi, R. R.; Pedro Junior, M. J.; Brunini, O.; Barbieri, V. Condições climáticas para a cana-de-açúcar. *Cana-de-açúcar – cultivo e utilização*. Fundação Cargill, v.1, p.42-54, 1987.
- Almeida, A. C. S.; Souza, J. L.; Teodoro, I. Barbosa, G. V. S.; Filho, G. M.; Júnior, R. A. F. Desenvolvimento vegetativo e produção de variedades de cana-de-açúcar em relação à disponibilidade hídrica e unidades térmicas. *Ciência Agrotecnica*, v. 32, n. 5, p.1441-1448. Lavras - MG, 2008.
- Amaral, J. A. B.; Silva, M. T. Zoneamento Agrícola do Algodão Herbáceo no Nordeste Brasileiro Safra 2007/2008 - Estado do Ceará. Embrapa-CNPA, Campina Grande, 8p. 2007 (Comunicado Técnico 321).
- Andrade-Lima, D. 1978. Vegetação. Pp. 131-135. In: Lins, R.C. (ed.) *Bacia do Parnaíba: Aspectos fisiográficos*. Instituto Joaquim Nabuco de Pesquisas Sociais, Recife (Série Estudos e Pesquisas, 9).
- Andrade-Lima, D. The caatingas dominium. *Revista Brasileira de Botânica*, 4, p.149-153, 1981.

- Assad, E. D. Simulation de l'irrigation et du drainage pour les cultures pluviales de riz et de maïs en sols de bas-fonds à Brasília. *Memoires et Travaux de IRAT*, n.13, p.10, 1986.
- Assad, E. D.; Luchiari Jr. A future scenario and agricultural strategies against climatic changes: the case of tropical savannas. In: *Mudanças Climáticas e Estratégias Futuras*. USP. Outubro de 1989. São Paulo, SP.
- Assad, E. D.; Pinto, H. S.; Zullo Junior, J.; Fonseca, M. Impacto das mudanças climáticas no zoneamento de riscos climáticos para a cultura da soja no Brasil. In: *XIV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 2005, Campinas. Agrometeorologia, Agroclimatologia e Agronegócio*. Campinas: SBAGRO, 2005.
- Ayoade, J. O. *Introdução a climatologia para os trópicos*. 11^o ed. Rio de Janeiro: Bertrand, Brasil, 2006.
- Azevedo, P. V.; Silva, B. B.; Silva, V. P. R. Water requirements of irrigated mango orchards in Northeast Brazil. *Agricultural Water Management*, v.58, n.1, p.241-254, 2003.
- Bachi, O. O. S.; Souza, J. A. G. C. Minimum threshold temperature for sugar cane growth. In: *International Society of Sugar Cane Technologists, 1978, São Paulo, SP. Proceedings*. São Paulo, 1978. v.2, p.1733-1741.
- Baron, C.; Clopes, A.; Perez, P.; Muller, B., Maraux, F. *Manuels d'utilisation de: SARRAMET 45 p SARRABIL 35 p et SARRAZON 29 p*. CIRAD, Montpellier, France, 1996.
- Beauclair, E. G. F.; Scarpari, M. S. Noções Fitotécnicas. In: Ripoli, T.C.C.; Ripoli, M. L. C.; Casagrandi, D. V.; IDE, B. Y. (Org.). *Plantio de cana-de-açúcar: estado da arte*. Livroceres, 2006. v.1, p.80-91.
- Bernardo, A. C. F.; Nunes, L. H.; Eulálio, R. V. *Cultura da Cana-de-açúcar*. Universidade Estadual de Maringá. Engenharia Agrícola. Cidade Gaúcha. Dezembro/2009.
- Bioetanol de cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável / organização BNDES e CGEE*. – Rio de Janeiro : BNDES, 2008. 316 p.
- Camargo, A. P.; Camargo, M. B. P. Uma revisão analítica sobre evapotranspiração potencial. *Revista Bragantia*, v.2, n.59, p.125-137, 2000.
- Campos, J. H. B. C. *Impactos das alterações climáticas sobre a área de Cultivo e produtividade de milho e feijão no nordeste do Brasil usando modelagem agrometeorológica*. Tese de Doutorado. Campina Grande – PB. Universidade Federal de Campina Grande – UFCG. 2010.

- Campos, J. H. B. C.; Silva, M. T.; Silva, V. P. R. Impacto do aquecimento global no cultivo do feijão-caupi, no Estado da Paraíba. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, p.396-404, 2010.
- Cavalcanti, E. P.; Silva, V. P. R.; Sousa, F. A. S. Programa computacional para a estimativa da temperatura do ar para a região Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.10, n.1, p.140-147, 2006.
- Cerri, C. C.; Cerri, C. E. P. *Agricultura e aquecimento global*. 2006.
- Cintra, F. L. D.; Libardi, P. L.; Saad, A. M. Balanço hídrico no solo para porta enxertos de citros em ecossistema de Tabuleiro Costeiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, PB, v.4, n.1, p.23-28, 2000.
- Cooperativa Central dos Produtores de açúcar e Álcool do Estado de São Paulo; Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"; Fundação Instituto Agrônômico do Paraná; Junho, J. A. C. Normas técnicas para produção de mudas selecionadas de cana-de-açúcar Landell, M. G. A. *Cultura da cana-de-açúcar - tecnologia para o pequeno produtor* Raij, B. et al. *Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo*.
- Coral, G. Utilização de modelo agrometeorológico na estimativa de produtividade da cultura da soja, nos estados de GO, MT, PR, RS e SP – Campinas- SP: [s.n.], 2004.
- Costa, L. C.; Costa, M. H. Um modelo para se determinar a produtividade da cultura da soja. In: *Congresso Brasileiro de Agrometeorologia 6*. Maceió, AL. Anais. Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, p.391-399, 1989.
- Cunha, R. G.; Assad, E. D. Uma visão geral sobre zoneamento agrícola no Brasil. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Passo Fundo, (n. Especial: Zoneamento Agrícola), v.9, n.3, p.377-385, 2001.
- Curry, L. Climate and Economic Life: a new approach with examples from the United States. *The Geographical Review*, vol 42(3), p.368-383, New York (July), 1952.
- Doorenbos, J.; Kassan, A. H. Yield response to water. *FAO Irrigation and Drainage Paper N° 33*, FAO, Rome, p.193, 1979.
- Doorenbos, J.; Pruitt, W. Guidelines for predicting crop water requirements. Rome: FAO Irrigation and drainage paper, 24, p.144, 1977.
- Eagleman, A. M. An experimentally derived model for actual evapotranspiration. *Agricultural Meteorology*, Amsterdam, v.8, n.4/5, p.385-409, 1971.
- Empereire, L. *Végétation et gestion des ressources naturelles dans la caatinga du sud-est du Piauí (Brésil)*. Doctorat d'Etat ès Sciences Naturelles. Université Pierre et Marie Curie, Paris, 1989.

- Emperaire, L. Vegetação e flora. Plano de Manejo: Parque Nacional Serrada Capivara. IBAMA, Brasília-DF, p.61-206, 1991.
- EPE (2008): EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço Energético Nacional 2008: Ano base 2007 – Rio de Janeiro: EPE, 2008. 244p.
- Etanol Combustível Breve histórico A cana-de-açúcar. Disponível em: www.demec.ufmg.br/disciplinas/eng032-BL/aula_06.pdf. Acesso em: 22 de Junho de 2010.
- Fagundes, J. D.; Streck, N. A.; Bisognin, D. A.; Schwantes, A. P.; Alberto, C. M. Produtividade simulada de tubérculos de batata em cenários de mudanças climáticas. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.45, n.4, p.351-360, 2010.
- Fancelli, A. L.; Dourado-Neto, D. Produção de milho. Guaíba: Agropecuária, p.360, 2000.
- Farias. C. H. A.; Fernandes, P. D.; Azevedo, H. M.; Neto, J. D. Índices de crescimento da cana-de-açúcar irrigada e de sequeiro no Estado da Paraíba. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. v.12, n.4, p.356-362, 2008.
- Fernandes, A. A vegetação do Piauí. In: 32 a Congresso Nacional de Botânica. Anais... Sociedade Botânica do Brasil, Teresina-PI, p.313-318, 1982.
- Fernandes, A. Fitogeografia do semi-árido. In: 4 a Reunião Especial da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência. Anais...Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência,Feira de Santana-BA, p.215-219, 1996.
- Fernandes, A. Conexões florísticas do Brasil. Fortaleza: Banco do Nordeste, 2003. 135p.
- Fernandes, J. L. Monitoramento da cultura de cana-de-açúcar no estado de São Paulo por meio de imagens spot vegetation e dados meteorológicos / Jeferson Lobato Fernandes. -- Campinas, SP: [s.n.], 2009.
- Figueiredo Júnior, L. G. M. Modelo para estimação da produtividade de grãos de milho no Estado de São Paulo, Tese de Doutorado. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 68p, 2004.
- Forest, F. Simulation du bilan hydrique des cultures pluviales. Présentation et utilisation du logiciel BIP. Montpellier: IRAT-CIRAD, 1984.
- Forest, F.; Clopes, A. Contribution à l’explication de la variabilité du rendement d’une culture de maïs plus ou moins intensifiée à l’aide d’un modèle de bilan hydrique amélioré. In: Reyniers, F. N.; Netoyo, L. (Eds). Bilna hydrique agricole et sécheresse em Afrique tropicale: Vers un egestion des flux hydriques par les systèmes de culture? Paris: J. Libbey, p.3-15, 1994.

- Fréteau, J. P.; Poss, R.E.; Saragoni, H. Adjustment d'un modèle de bilan hydrique à des mesures tension-neutroniques in situ sous culture de maïs. *Agronomie Tropicale*, Montpellier, v. 42, n.2, p. 94-103, 1987.
- Freund, P. (Coord). Introduction. *In: IPCC Special Report on carbon dioxide capture and storage, In Press*, 2005.
- Figueiredo, R. Produção de Cana-de-açúcar. publicado 25/06/2009 em: <http://www.webartigos.com>.
- Ghini, R.; Hamada, E.; Pedro Júnior, M. J.; Marengo, J. A.; Gonçalves, R. R. V. Risk analysis of climate change on coffee nematodes and leaf miner in Brazil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.43, n.2, p.187-194, 2008.
- Gondim, R. S.; Castro, M. A. H.; Evangelista, S. R. M.; Teixeira, A. S. Fuck Júnior, S. C. F. Mudanças climáticas e impactos na necessidade hídrica das culturas perenes na Bacia do Jaguaribe, no Estado do Ceará. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.43, n.12, p.1657-1664, 2008.
- Gonçalves, A. N. Fatores Limitantes para o crescimento e desenvolvimento de árvores em regiões áridas e semiáridas do Nordeste Brasileiro. IPEF. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, Piracicaba, v.3, n.10, p.99-105, 1982.
- Gonçalves, M. C.; Martins, J. C.; Gonçalves, A. R. Avaliação dos parâmetros de transporte de solutos no solo. *Revista das Ciências Agrárias*, v.25, n.3/4, p.227-239, 2002.
- Harrison, S. R.; Thornton, P. K.; Dent, J. B. The role of simulation experiments. *Agrotechnology Transfer*, v.9, n.8, p.10-11, 1989.
- IBGE (2007). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – Produção Agrícola 2007: culturas perenes. Disponível na web site: www.ibge.gov.br. Acesso em 17/06/2009.
- ICIDCA. The industry of the derivatives of the sugar cane. Havana: Scientific Technical Editorial; 1986.
- Inman-Bamber, N. G.; Muchow, R. C.; Robertson, M. J. Dry partitioning of sugarcane in Australia and South Africa. *Field Crops Research*, Amsterdam, v.76, p.71-84, 2002.
- Intergovernmental Panel Climate Change. IPCC (2001) Working Group II: Impacts, Adaptations and Vulnerability. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch>>. Acesso em: julho 2010.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC (2001a). Working Group I. Third Assessment Report. Summary for Policymakers. WMO, 17p. http://www.metoffice.gov.uk/sec5/CR_div/ipcc/wg1/WG1-SPM.pdf. Julho 2001.

- Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC (2001b) Climate Change 2001: Impacts, adaptation and vulnerability. Working Group II. TAR: Summary for Policymakers. http://www.metogov.uk/sec5/CR_div/ipcc/wg1/WG1-SPM.pdf. Julho 2010.
- Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC (2007) Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Summary for Policy Makers Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. <http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/wg1-report.html>. Julho 2010.
- Kalnay, E.; Cai, M. Impact of urbanization and land-use change on climate. *Nature*, v.423, p.528-531, 2003.
- Keating, B. A.; Robertson, M. J.; Muchow, R. C.; Huth, N. I. Modelling sugarcane production systems I: development and performance of the sugarcane module. *Field Crops Research*, Amsterdam, v.48, p. 27-36, 1999.
- Köppen, W.; Geiger, R. *Klimate der Erde*. Gotha: Verlag Justus Perthes, 1928.
- Kousky, V. E; Frontal influences on Northeast Brazil. *Monthly Weather Review*. 107, 1140-1153.1979.
- Lago, I.; Streck, N. A.; Alberto, C. M.; Oliveira, F. B.; Paula, G. M. Impact of increasing mean air temperature on the development of rice and red rice. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.43, n.11, p.1441-1448, 2008.
- Lazinski, L. R. Variabilidade da utilização do modelo Soygro para a região de Londrina, R. Dissertação de Mestrado, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba/SP, 1993.
- Lima, M. G. Calibração e validação do modelo cereas-maize em condições tropicais do Brasil. Piracicaba: ESALQ. Tese de Doutorado. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 119p, 1995.
- Lima, R. A. S.; Santos, M. A. L. dos; Sarmiento, P. L. V. S.; Rocha, A. E. Q.; Brito, K S.; Silva, M. da; Filho, G. M.; Lyra, G. B.; Souza, J. L.; Teodoro I. Evapotranspiração e Produtividade da Cultura da cana-de-açúcar Irrigada. *CBMET 2010*. Belém – PA.
- Macedo, N. Variedades da cana-de-açúcar, 2008. Com Ciência. Disponível em: <<http://www.comciencia.br/comciencia/?section=23hjd=258>>. Acesso em: 26 jun 2010.
- Machado, R. Sistemas orgânicos de produção para a soca da cultura da cana-de-açúcar (*saccharum spp*), consorciado com milho (*zea mays*), feijão (*phaseolus vulgaris*) e mandioca (*manihot esculenta*). Dissertação de Mestrado. São Carlos. UFSCar, 2008. 83f.

- Machado, L. A.; Habib, M. Perspectivas e impactos da cultura de cana-de-açúcar no Brasil. 2009. Artigo em Hypertexto. Disponível em: <http://www.infobibos.com/Artigos/2009_2/Cana/index.htm>. Acesso em: 29/6/2010.
- Mello-Neto, A. V.; Lins, R. C. & Coutinho, S. F. 1992. Áreas de exceção úmidas e subúmidas do semi-árido do Nordeste do Brasil: estudo especial. Pp. 1-12. In: Impactos de variações climáticas e desenvolvimento sustentável em regiões semi-áridas. Fundação Joaquim Nabuco/ICID, Recife.
- Molion, L. C. B.; Bernardo, S. O. Uma revisão da dinâmica das chuvas no nordeste brasileiro. Revista Brasileira de Meteorologia, Rio de Janeiro (RJ), v. 17, n. 1, p. 1-10, 2002.
- Moster, C.; Lima, W. P.; Zakia, M. J. B.; Câmara, C. D. Determinação do ano hidrológico visando a quantificação do balanço hídrico em microbacias experimentais. Circular Técnica IPEF (Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais). N.197, 2003.
- Oliveira, M. E. A.; Sampaio, E. V. S. B.; Castro, A. A. J. F.; Rodalli, M. J. N. Flora e fitossociologia de uma área de transição caatinga de areia-carrasco em Padre Marcos-PI. Naturalia, 22: p.131-150, 1997.
- Oliveira, E. P.; Sobrinho, J. B. S.; Negreiros, J. C.; Amazonas, L.; Almeida, M. B. A.; Silveira, P. S.; Andrade, R. A.; Piffer, T. R. O.; Teixeira, W. S. Acompanhamento da safra brasileira cana-de-açúcar safra 2007/2008, segundo levantamento, agosto/2007 - Companhia Nacional de Abastecimento. Brasília: Conab, 2007. 12p.
- Oliveira, E. C. A. Dinâmica de nutrientes na cana-de-açúcar em sistema irrigado de produção, Dissertação de Mestrado em Agronomia – Ciência do Solo – Universidade Federal Rural de Pernambuco. Departamento de Agronomia. 2008. 73 f. il.
- Orlando Filho, J. A produção da cana, 2007. Disponível em: <http://www.palazo.pro/cana/archives/net>>. Acesso em: 26 jun 2010.
- Passos, S. M. G.; Canechio Filho, V.; José, A. Principais culturas. Instituto Campineiro de Ensino Agrícola. Campinas, v. 1, p. 305-351, 1973.
- Pellegrino, G. Q.; Assad E. D.; Marin F. R. Mudanças Climáticas Globais e a Agricultura no Brasil, Revista Multiciência, Campinas – SP; Edição nº 8, Mudanças Climáticas, Maio 2007.
- Pereira, A. R.; Vila Nova, N. A.; Sedyama, G. C. Evapotranspiração. Piracicaba: ESALQ, 1997. 183p.
- Perspectivas e tendências os biocombustíveis no Brasil e no mundo. Disponível em: <http://www.biodiesel.gov.br/>. Acesso em: 10 fev 2011.

- Pessoa, M. C.; Luchiari Junior, A.; Fernandes, E. N.; Lima, M. A. Principais modelos matemáticos e simuladores utilizados para a análise de impactos ambientais das atividades agrícolas. Jaguariúna: Embrapa-CNPMA, 1997. 83p. (Embrapa-CNPMA. Documentos, 8).
- Pinto, H. S.; Zullo Jr.; Zullo, S. A. Oscilações Pluviométricas Temporais no E. S. Paulo. Anais do VI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, Maceió-Al. Soc. Bras. Agrometeorologia, p.29-33, 1989.
- Pinto, H. S.; Assad, E. D.; Zullo Jr.; J.; Brunini, O.; Evangelista, B. A. Impacto do Aumento da Temperatura no Zoneamento Climático do Café nos Estados de São Paulo e Goiás. Avaliação dos cenários do IPCC. XII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, Fortaleza-CE, p. 605-606, 2001.
- Pinto, H. S.; Assad, E. D.; Zullo Jr. O aquecimento global e a agricultura. Artigo Técnico. Saneas / agosto, p.34-37, 2004.
- Protocolo de Kyoto. Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. Editado e traduzido pelo Ministério da Ciência e Tecnologia com o apoio do Ministério das Relações Exteriores da República Federativa do Brasil. 1997. Disponível em <http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/4006.html>.
- Reichardt, K. Processo de transferência no sistema solo-planta-atmosfera. 4. ed. Campinas: Fundação Cargill, 466p, 1985.
- Rizzini, C. T. Tratado de fitogeografia do Brasil. 2a. ed., Rio de Janeiro: Âmbito Cultural Edições Ltda, 1997.
- Rodal, M. J. N. Fitoecologia de uma área do médio vale do Moxotó, Pernambuco. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife-PE, 1984.
- Rodal, M. J. N. Fitossociologia da vegetação arbustivo-arbórea em quatro áreas de caatinga em Pernambuco. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 1992.
- Rodal, M. J. N.; Nascimento, L.M.; Melo, A. L. Composição florística de um trecho de vegetação arbustiva caducifólia no município de Ibimirim, PE, Brasil. Acta Botanica Brasilica 13(1), p.15-28, 1999.
- Rojas, J. S. D.; Barbieri V. Modelo agrometeorológico de estimativa da produtividade da cana-de-açúcar. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v.7, n.1, p.67-73, 1999.
- Sarma, P. B. S.; Rao, N. H.; Rao, K. V. P. Calculation of water balance in the crop root zone by computer. Journal of Hydrology, n.45, p. 123-131, 1980.

- Silva, S. T. A. Influência do El Niño – Oscilação Sul na distribuição espacial da precipitação no Estado da Paraíba. Dissertação de Mestrado. UFPB. CCT., Campina Grande, 1996, 63p.
- Silva, V. P. R.; Azevedo, P. V.; Silva, B. B.; Bassoi, L. H.; Texeira, A. H. C.; Soares, J. M. E.; Silva, J. A. M. Estimativa da evapotranspiração da mangueira com base no balanço hídrico do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.5, n.3, p.456-462, 2001.
- Silva, A. R. Aprimoramento de um espalhador de colmos inteiros de cana-de-açúcar por solos oscilantes com diferencial de velocidades. Dissertação de Mestrado Unicamp. Faculdade de Engenharia Agrícola. Campinas, 2003.
- Silva, V. P. R. On climate variability in Northeast of Brazil. *Journal of Arid Environments*, v.58, n.4, p.575-596, 2004.
- Silva, V. P. R.; Belo Filho, Adelgício F.; Silva, B. B.; Campos, J. H. B. C. Desenvolvimento de um sistema de estimativa da evapotranspiração de referência. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.9, n.4, p.547-553, 2005.
- Silva, V. P. R.; Sousa, F. A. S.; Cavalcanti, E. P.; Souza, E. P.; Silva, B. B. Teleconnections between sea-surface temperature anomalies and air temperature in northeast Brazil. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v.68, p.781-792, 2006.
- Silva, V. P. R.; Campos, J. H. B. C.; Azevedo, P. V. Water-use efficiency and evapotranspiration of mango orchard grown in northeastern region of Brazil. *Scientia Horticulturae*, v. 102, p. 467-472, 2009.
- Silva, V. P. R.; Campos, J. H. B. C.; Azevedo, P. V. Water-use efficiency and evapotranspiration of mango orchard grown in northeastern region of Brazil. *Scientia Horticulturae*, v.102, p. 467-472, 2009b.
- Silva, M. T. Impacto das mudanças climáticas no cultivo do algodão herbáceo em sistema de sequeiro no Nordeste do Brasil. Dissertação de Mestrado. Campina Grande - PB: Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, 2010.
- Silva, V. P. R.; Campos, J. H. B. C.; Silva, M. T.; Azevedo, P. V. Impact of global warming on cowpea bean cultivation in northeastern Brazil. *Agricultural Water Management*, 97, p.1760-1768, 2010.
- SINDAÇÚCAR – Sindicato da Indústria do Açúcar e do Álcool no Estado de Alagoas 2009. Boletim da safra 2008/2009 <http://sindicucar-al.com.br/www/precipit.htm> Acesso em 26/01/2011.

- Siqueira, O. J. F.; Farias, J. R. B.; Sans, L. M. A. Potential effects of global climate change for brazilian agriculture and adaptative strategies for wheat, maize and soybean. *Revista Brasileira de Agroclimatologia*, Santa Maria, v.2, p.115-129, 1994.
- Siqueira, O. J. W.; Steinmetz, S.; Ferreira, M. F.; Costa, A. C.; Wozniak, M. A. Mudanças climáticas projetadas através dos modelos GISS e reflexos na produção agrícola brasileira. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v.8, n.2, p.311-320, 2000.
- Souza, M. J. N.; Martins, M. L. R.; Soares, Z. M. L.; Freitas-Filho, M. R.; Almeida, M. A. G.; Pinheiro, F. S. A.; Sampaio, M. A. B.; Carvalho, G. M. B. S.; Soares, A. M. L.; Gomes, E. C. B.; Silva, R. A. 1994. Redimensionamento da região semi-árida do Nordeste do Brasil. Pp. 1-25. In: Conferência Nacional e Seminário Latino-Americano da Desertificação. Fundação Esquel do Brasil, Fortaleza.
- Stone, P. J.; Sorensen, I. B.; Jamieson, P. D. Effect of soil temperature on phenology, canopy development, biomass and yield of maize in a cool-temperature climate. *Field Crops Research*, Amsterdam, v.48, p.169-178, 1999.
- Streck, N. A.; Alberto, C. M. Estudo numérico do impacto da mudança climática sobre o rendimento de trigo, soja e milho. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.41, n.9, p.1351-1359, 2006.
- SUDENE. Dados pluviométricos mensais do Nordeste: Paraíba. Recife, 1990. p.239.
- Takeshi, H. Cana-de-açúcar no estado de São Paulo, 2008. Disponível em: <http://www.takeshi.inf.br>>. Acesso em: 26 jun 2010.
- Thornthwaite, C. W. The moisture factor in climate. *Transactions of the American Geographical Union*, Washington, D.C., v.27, p.41-48, 1946.
- Thornthwaite, C. W. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical review*, New York, v.38, n.1, p.55-94, 1948.
- Thornthwaite, C. W.; Mather, J.R. The water balance. Drexel Institute of Technology – Laboratory of Climatology, Publications in Climatology, Centerton, N.J. v.8, n.1, p.104, 1955.
- Tucci, C. E. M. Hidrologia: Ciência e Aplicação. 2 ed. Porto Alegre: UFRGS (Universidade Federal do Rio Grande do Sula) – Editora da Universidade, 1997.
- Vianelo, R. L.; Alves, A. R. Meteorologia Básica e Aplicações. Viçosa, UFV, Imprensa Universitária 1991.
- Vaksmann, M. Le modèle BIPODE: Logiciel. Bamako: IRAT, 1990.
- Vitti, G. C.; Mazza J. A. Planejamento, estratégias de manejo e nutrição da cultura de cana-de-açúcar. Encarte do informações agrônômicas Nº 97 – Março/2002.

Wutke, E. B.; Arruda, F. B.; Fancelli, A. L.; Pereira, J. C.; Sakai, E.; Fujiwara, M.; Ambrosano, G. M. B. Propriedades do solo e sistema radicular do feijoeiro irrigado em rotação de culturas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.24, n.3, 2000.

Yin, X. Quantifying the effects of temperature and photoperiod on phenological development to flowering in rice, Thesis (Ph.D.) - Wageningen Agricultural University, Wageningen, 1996. 173p.

Zoneamento Agrícola, disponível em:
www.mda.gov.br/portal/saf/.../view/.../cartilha_de_zoneamento_agricola.doc. Acesso em 29 de maio de 2010.