

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**PROJEÇÃO DE CENÁRIOS ATUAIS E FUTUROS DE
PRODUTIVIDADE DE CANA-DE-AÇÚCAR EM AMBIENTE DE
CERRADO**

BALBINO ANTONIO EVANGELISTA

CAMPINAS
FEVEREIRO DE 2011

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**PROJEÇÃO DE CENÁRIOS ATUAIS E FUTUROS DE
PRODUTIVIDADE DE CANA-DE-AÇÚCAR EM AMBIENTE DE
CERRADO**

Tese de Doutorado submetida à banca examinadora para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola, na área de concentração Planejamento e Desenvolvimento Rural Sustentável.

BALBINO ANTONIO EVANGELISTA

Orientador: Prof. Dr. Jurandir Zullo Júnior

Co-Orientador: Dr. Fábio Ricardo Marin

CAMPINAS
FEVEREIRO DE 2011

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE -
UNICAMP

Ev14p Evangelista, Balbino Antonio
Projeção de cenários atuais e futuros de produtividade
de cana-de-açúcar em ambiente de Cerrado / Balbino
Antonio Evangelista. --Campinas, SP: [s.n.], 2011.

Orientadores: Jurandir Zullo Júnior, Fábio Ricardo
Marin.

Tese de Doutorado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Cana-de-açúcar. 2. Geoprocessamento. 3.
Metereologia agrícola. 4. Zoneamento. 5. Mudanças
climáticas. I. Zullo Júnior, Jurandir. II. Marin, Fábio
Ricardo. III. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Agrícola. IV. Título.

Título em Inglês: Projecting current and future scenarios of sugarcane
productivity in the Cerrado's environment

Palavras-chave em Inglês: Sugarcane, Geotechnology, Agricultural
meteorology, Zoning, Climate change

Área de concentração: Planejamento e Desenvolvimento Rural Sustentável

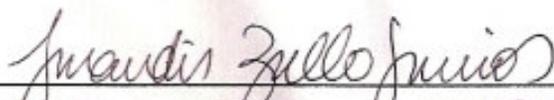
Titulação: Doutor em Engenharia Agrícola

Banca examinadora: José Renato Bouças Farias, Giampaolo Queiroz
Pellegrino, Maria Angela Fagnani

Data da defesa: 18/02/2011

Programa de Pós Graduação: Engenharia Agrícola

Este exemplar corresponde à redação final da **Tese de Doutorado** defendida por **Balbino Antonio Evangelista**, aprovada pela Comissão Julgadora em 18 de fevereiro de 2011, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.



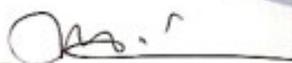
**Prof. Dr. Jurandir Zullo Junior – Presidente e Orientador
Feagri/Unicamp**



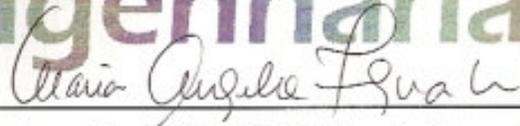
**Dr. José Renato Bouças Farias - Membro Titular
Embrapa/CNPSO**



**Dr. Giampaolo Queiroz Pellegrino - Membro Titular
Embrapa/CNPTIA**



**Prof. Dr. Mara de Andrade Marinho - Membro Titular
Feagri/Unicamp**



**Prof. Dr. Maria Angela Fagnani - Membro Titular
Feagri/Unicamp**

Este trabalho é dedicado:

Aos meus pais:

*Lásaro Antonio Evangelista
Aparecida de Lima Evangelista*

Às minhas filhas:

Camila e Milena

Aos meus irmãos:

*Jaci, José Santana, Maria Eunice, João (in memoriam), Jamir, Francisca, Iolanda,
Lázaro Filho, Maria Inêz e Sandra Maria.*

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, o Prof. Dr. Jurandir Zullo Júnior, pelo crédito, orientação, ensinamentos e paciência.

Ao meu co-orientador, Dr. Fábio Marin, pelo apoio, orientação, ensinamentos, contribuições e paciência.

À Faculdade de Engenharia Agrícola, FEAGRI, pela estrutura e aperfeiçoamento profissional. À coordenação de pós-graduação: Ana Paula Montagner, Marta Vechi e Alexandre D'Ávila, pela atenção.

Aos funcionários, colegas e amigos do CEPAGRI - Prof. Hilton Silveira, Ana Ávila, Edilene Carneiro, Gustavo Coral, Claudir e Joaquim, pelo apoio e suporte operacional.

Aos colegas do Laboratório de Modelagem Agroambiental da Embrapa Informática Agropecuária, em especial ao Murilo, à Dorothee, à Vivian e à Lisa, pela colaboração na organização das bases de dados e aplicação dos modelos utilizados no estudo.

Ao Dr. Eduardo Delgado Assad e Profa. Dra. Leonor Lopes Assad, pelos incentivos, oportunidades oferecidas, pelos ensinamentos, confiança, amizade e apoio em todos os momentos.

Ao Dr. Ariovaldo Luchiari Júnior, pela primeira oportunidade oferecida, primeiros incentivos e ensinamentos, pela confiança e amizade.

À Thaise Sussane, Waldenilza Vital e Daniele Kloppel Rosa, pela amizade e companheirismo, e especialmente, pela valiosa contribuição na editoração do trabalho.

Ao colega Juaci Vitoria Malaquias, Estatístico e Analista da Embrapa Cerrados, pela valiosa contribuição.

Aos amigos e parceiros de todos os momentos, Heleno, Fernando Macena, Edson Sano, Lúcio Feitosa, Nathália Hott e Elaine Cristina, pelo apoio e incentivo incondicionais.

A todos os colegas e amigos de pós-graduação, em especial a Michele Cotta, pelo bom convívio, incentivo, ajuda e pela oportunidade do aprendizado em conjunto.

E às demais pessoas que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

Muito obrigado a todos!

“...Elementos, acordem e vamos agir, o dever nos espera...”

Lásaro A. Evangelista

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	xi
LISTA DE TABELAS.....	xix
RESUMO.....	xxii
ABSTRACT	xxiii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 <i>Hipótese.....</i>	4
1.2 <i>Objetivo Geral.....</i>	5
1.3 <i>Objetivos Específicos</i>	5
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.2 <i>Modelagem agrometeorológica em cana-de-açúcar</i>	9
2.3 <i>Aspectos morfológicos da cana-de-açúcar</i>	12
2.4 <i>Aspectos ecofisiológicos da cana-de-açúcar</i>	13
2.4.1 <i>Duração do ciclo, das fases fenológicas e épocas de plantio da cana-de-açúcar.....</i>	17
2.4.2 <i>Sistema radicular da cana-de-açúcar</i>	18
2.4.3 <i>Fatores ambientais e a cana-de-açúcar.....</i>	19
2.4.3.1 <i>Efeito da temperatura e luminosidade</i>	20
2.4.3.2 <i>Necessidades hídricas da cana-de-açúcar.....</i>	20
2.4.3.3 <i>Solos</i>	23
2.4.3.4 <i>Caracterização físico-hídrica dos solos do Cerrado</i>	25
2.5 <i>Impacto das mudanças climáticas globais na produção de cana-de-açúcar</i>	27
2.6 <i>Geoprocessamento e métodos de estimação espacial.....</i>	29
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	30
3.1 <i>Delimitação e caracterização da área estudo.....</i>	30
3.1.1 <i>Caracterização climática de Goiás e Distrito Federal.....</i>	31
3.1.2. <i>Caracterização geomorfológica do Estado de Goiás e Distrito Federal.....</i>	34
3.1.3. <i>Caracterização dos solos do Estado de Goiás e Distrito Federal.....</i>	34

3.1.4	<i>Caracterização da cobertura vegetal natural do Estado de Goiás e Distrito Federal.....</i>	39
3.2	<i>Coleta de dados, avaliação e sistematização.....</i>	39
3.2.1	<i>Dados meteorológicos.....</i>	40
3.2.2	<i>Estatísticas de produção de cana-de-açúcar no Estado de Goiás e Distrito Federal.....</i>	43
3.2.3	<i>Zoneamento agroecológico e de riscos climáticos da cana-de-açúcar.....</i>	43
3.3	<i>Aplicação do modelo DSSAT/CANEGRO para estimativa da produção da cana-de-açúcar em Goiás e Distrito Federal.....</i>	44
3.3.1	<i>Parâmetros de entrada: dados climáticos.....</i>	47
3.3.2	<i>Parâmetros de entrada: dados de caracterização físico-hídrica dos solos.....</i>	48
3.3.3	<i>Capacidade de armazenamento de água dos solos.....</i>	50
3.3.4	<i>Características fisiológicas e fenológicas da cana-de-açúcar.....</i>	51
3.3.5	<i>Funcionamento do modelo DSSAT/CANEGRO.....</i>	52
3.4	<i>Análise comparativa da produtividade de cana-de-açúcar estimada pelo modelo DSSAT/CANEGRO com a medida em Usinas e as obtidas pelo IBGE.....</i>	54
3.5	<i>Aplicação do modelo SARRA/SARRAZON para estimativa do balanço hídrico da cultura da cana-de-açúcar em Goiás e Distrito Federal.....</i>	54
3.5.1	<i>Parâmetros de entrada do modelo SARRA/SARRAZON.....</i>	56
3.5.1.1	<i>Precipitação pluviométrica e evapotranspiração de referência.....</i>	56
3.5.1.2	<i>Reserva útil de água na zona radicular (RUR).....</i>	56
3.5.1.3	<i>Duração do ciclo e das fases fenológicas da cana-de-açúcar.....</i>	57
3.5.1.4	<i>Coefficientes de cultura (Kc) da cana-de-açúcar.....</i>	57
3.5.1.5	<i>Evapotranspiração de referência (ETp).....</i>	58
3.6	<i>Análise espacial da produtividade média e dos índices de satisfação das necessidades hídricas da cana-de-açúcar.....</i>	61
3.7	<i>Ajuste de modelo para estimativa da produtividade da cana-de-açúcar a partir dos índices de satisfação das necessidades de água (ISNA).....</i>	63
3.7.1	<i>Aplicação do modelo agrometeorológico PrISNA para estimativa da produtividade média de cana-de-açúcar na região de Cerrado.....</i>	65
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	67

4.1	<i>Análise da precipitação pluviométrica no Estado de Goiás e Distrito Federal</i>	67
4.2	<i>Análise da temperatura média em Goiás e Distrito Federal.</i>	69
4.3	<i>Análise da radiação solar global em Goiás e Distrito Federal</i>	70
4.4	<i>Produtividade da cana-de-açúcar estimada pelo modelo DSSAT/CANEGRO</i>	71
4.4.1	<i>Análise dos resultados</i>	71
4.5	<i>Distribuição espacial da produtividade da cana-de-açúcar, variedade RB72454, estimada pelo DSSAT/CANEGRO</i>	76
4.5.1.	<i>Distribuição espacial da produtividade da cana-de-açúcar, variedade RB72454, estimada pelo DSSAT/CANEGRO e classificada por tipo de solo</i>	82
4.6	<i>Impacto das projeções de mudanças climáticas globais (MCG) na produtividade da cana-de-açúcar em ambientes de cerrado</i>	86
4.6.1	<i>Estatísticas descritivas das estimativas do impacto das projeções de mudanças climáticas globais na produtividade da cana-de-açúcar cultivada em ambientes de cerrado, válidas para o cenário A2 de 2040</i>	88
4.6.2.	<i>Análise espacial das estimativas do impacto das projeções mudanças climáticas globais na produtividade da cana-de-açúcar, variedade RB72454, cultivada em ambientes de cerrado, válida para o cenário A2 de 2040</i>	94
4.6.3	<i>Análise espacial das estimativas do impacto das projeções das mudanças climáticas globais na produtividade da cana-de-açúcar, por tipo de solo, da variedade RB72454 cultivada em ambientes de cerrado, válida para o cenário A2 de 2040</i>	102
4.7	<i>Distribuição espacial da produtividade de cana-de-açúcar em Goiás e Distrito Federal, segundo IBGE (2010)</i>	107
4.8	<i>Análise comparativa da produtividade de cana-de-açúcar estimada pelo modelo DSSAT/CANEGRO e medida em usinas</i>	113
4.9	<i>Zoneamento de riscos climáticos da cultura da cana-de-açúcar em ambientes de cerrado, estimado pelo SARRA/SARRAZON</i>	115
4.9.1	<i>Zoneamento de riscos climáticos, por tipo de solo, da cultura da cana-de-açúcar em ambientes de cerrado, estimado pelo SARRA/SARRAZON</i>	121
4.10	<i>Ajuste de modelo agrometeorológico PRISNA para estimativa da produtividade da cana-de-açúcar em ambientes de Cerrado</i>	125

<i>4.11 Exemplo de aplicação do modelo agrometeorológico PrISNA para estimativa da produtividade média de cana-de-açúcar na região de Cerrados.....</i>	<i>130</i>
5. CONCLUSÕES.....	134
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	136
APÊNDICES	156

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fases fenológicas da cana-de-açúcar de ciclo de 12 meses (A) e de 18 meses. (B). ..	17
Figura 2. Produtividade da cana-de-açúcar em colmos, em função da lâmina total de água, para variedades RB72454 (rendimento agrícola). Fonte: SALASSIER, 2008.	21
Figura 3.1. Localização geográfica da área de estudo.	30
Figura 3.2. Precipitação pluviométrica média anual no Estado de Goiás e Distrito Federal, obtida por krigeagem ordinária. Fonte: EVANGELISTA (2004).	32
Figura 3.3. Temperatura média anual (em °C) do Estado de Goiás e Distrito Federal estimada por modelo de regressão múltipla, ajustado por SILVA et al. (2008).	33
Figura 3.4. Hipsometria do Estado de Goiás e Distrito Federal, com exagero e alteração de azimute para visualização em 3D, contendo a compartimentação geomorfológica adaptada de Campos et al. (2002).	35
Figura 3.5. Solos do Estado de Goiás e Distrito Federal, na escala de 1:250.000. Fonte: EMBRAPA (2009), obtido originalmente da base RadamBrasi (1983).	36
Figura 3.6. Agrupamento de solos do Estado de Goiás e Distrito Federal, segundo a quantidade de água disponível para plantas.	38
Figura 3.7. Cobertura de vegetação natural do Estado de Goiás e Distrito Federal. Fonte: SANO et al. (2009).	40
Figura 3.8 Distribuição espacial das estações meteorológicas utilizadas no trabalho.	41
Figura 3.9. Fluxograma ilustrativo das etapas e processos utilizados para elaboração do zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar no Brasil. Fonte: EMBRAPA (2009).	44
Figura 3.10. Zoneamento agroecológico e de risco climático da cana-de-açúcar no Estado de Goiás e no Distrito Federal. Fonte: Adaptado de EMBRAPA (2009).	45
Figura 3.11. Fluxograma da metodologia de estimativa da produtividade da cana-de-açúcar em ambiente de Cerrado, com aplicação do modelo DSSAT/CANEGRO.	46
Figura 3.12. Módulo e funções componentes do modelo DSSAT/CANEGRO.	47

Figura 3.13. Fluxograma da metodologia de estimativa do balanço hídrico e estudo de risco climático da cultura da cana-de-açúcar em ambiente de Cerrado, com aplicação do SARRA/SARRAZON.....	55
Figura 3.14. Distribuição temporal do Coeficiente de Cultura (Kc) em função da precipitação pluviométrica. Fontes: Kc adaptados de BARBIERI (1981) e estação meteorológica de Brasília - DF	58
Figura 3.15. Fluxograma da metodologia da validação das estimativas de produtividade do DSSAT/CANEGRO (A), do ajuste do modelo de estimativa da produtividade da cana-de-açúcar a partir dos ISNAs obtidos do SARRA/SARRAZON (B) e aplicação do modelo PrISNA (C).....	64
Figura 4.1. Precipitação pluviométrica média anual do Estado de Goiás e Distrito Federal, estimada por krigeagem ordinária.	68
Figura 4.2. Temperatura média anual do Estado de Goiás e Distrito Federal, obtido por krigeagem ordinária.....	70
Figura 4.3. Radiação solar global diária média anual do Estado de Goiás e Distrito Federal, obtida por krigeagem ordinária.	72
Figura 4.4. Estatísticas descritivas da produtividade da cana-de-açúcar, variedade RB72454, estimada pelo DSSAT/CANEGRO, para plantios em outubro, num Latossolo Vermelho (A), num Neossolo Quartzarênico (B) e num Latossolo Vermelho-Amarelo (C), do Estado de Goiás e Distrito Federal.	73
Figura 4.5. Estatísticas descritivas da produtividade da cana-de-açúcar, variedade RB72454, estimada pelo DSSAT/CANEGRO para plantios em novembro num Latossolo Vermelho (A), num Neossolo Quartzarênico (B) e num Latossolo Vermelho-Amarelo (C), do Estado de Goiás e Distrito Federal.	74
Figura 4.6. Estatísticas descritivas da produtividade da cana-de-açúcar, variedade RB72454, estimada pelo DSSAT/CANEGRO para plantios em dezembro num Latossolo Vermelho (A), num Neossolo Quartzarênico (B) e num Latossolo Vermelho-Amarelo (C), do Estado de Goiás e Distrito Federal.	75

Figura 4.7. Estatísticas descritivas da produtividade da cana-de-açúcar, variedade RB72454, estimada pelo DSSAT/CANEGRO para plantios em janeiro num Latossolo Vermelho (A), num Neossolo Quartzarênico (B) e num Latossolo Vermelho-Amarelo (C), do Estado de Goiás e Distrito Federal.	75
Figura 4.8. Produtividade média de cana-de-açúcar em Goiás e Distrito Federal, estimada pelo DSSAT/CANEGRO para plantio em outubro num solo tipo 3(A), tipo 2 (B) e tipo 1 (C).	80
Figura 4.9. Produtividade média de cana-de-açúcar em Goiás e Distrito Federal, estimada pelo DSSAT/CANEGRO para plantio em novembro num solo tipo 3(A), tipo 2 (B) e tipo 1 (C). ..	80
Figura 4.10. Produtividade média de cana-de-açúcar em Goiás e Distrito Federal, estimada pelo DSSAT/CANEGRO para plantio em dezembro num solo tipo 3(A), tipo 2 (B) e tipo 1 (C).	81
Figura 4.11. Produtividade média de cana-de-açúcar em Goiás e Distrito Federal, estimada pelo DSSAT/CANEGRO para plantio em janeiro num solo tipo 3(A), tipo 2 (B) e tipo 1 (C).	81
Figura 4.12. Produtividade média de cana-de-açúcar em Goiás e Distrito Federal, estimada pelo DSSAT/CANEGRO para plantio em outubro num solo tipo 3(A), tipo 2 (B) e tipo 1 (C).	83
Figura 4.13. Produtividade média de cana-de-açúcar em Goiás e Distrito Federal, estimada pelo DSSAT/CANEGRO para plantio em novembro num solo tipo 3(A), tipo 2 (B) e tipo 1 (C). ..	83
Figura 4.14. Produtividade média de cana-de-açúcar em Goiás e Distrito Federal, estimada pelo DSSAT/CANEGRO para plantio em dezembro num solo tipo 3(A), tipo 2 (B) e tipo 1 (C).	84
Figura 4.15. Produtividade média de cana-de-açúcar em Goiás e Distrito Federal, estimada pelo DSSAT/CANEGRO para plantio em janeiro num solo tipo 3(A), tipo 2 (B) e tipo 1 (C).	84
Figura 4.16. A distribuição espacial do aumento das temperaturas máxima (A) e mínima (B) no Estado de Goiás e Distrito Federal, projetadas pelo sistema Precip para o ano de 2040, considerando o cenário A2 de mudanças climáticas.	86
Figura 4.17. Estatísticas descritivas da produtividade da cana-de-açúcar, variedade RB72454, em Goiás e Distrito Federal, estimada pelo DSSAT/CANEGRO para plantio em outubro num Latossolo Vermelho (A), Neossolo Quartzarênico (B) e Latossolo Vermelho-Amarelo (C), válido para o ano de 2040 (cenário A2 de MCG).	89

Figura 4.18. Estatísticas descritivas da diferença de produtividade da cana-de-açúcar, variedade RB72454, em Goiás e Distrito Federal, estimada pelo DSSAT/CANEGRO, entre 2010 e 2040 (cenário A2 de MCG), para plantio em outubro num Latossolo Vermelho (A), Neossolo Quartzarênico (B) e Latossolo Vermelho-Amarelo (C).	89
Figura 4.19. Estatísticas descritivas da produtividade da cana-de-açúcar, variedade RB72454, em Goiás e Distrito Federal, estimada pelo DSSAT/CANEGRO para plantio em novembro num Latossolo Vermelho (A), Neossolo Quartzarênico (B) e Latossolo Vermelho-Amarelo (C), válido para o ano de 2040 (cenário A2 de MCG).....	90
Figura 4.20. Estatísticas descritivas da diferença de produtividade da cana-de-açúcar, variedade RB72454, em Goiás e Distrito Federal, estimada pelo DSSAT/CANEGRO, entre 2010 e 2040 (cenário A2 de MCG), para plantio em novembro num Latossolo Vermelho (A), Neossolo Quartzarênico (B) e Latossolo Vermelho-Amarelo (C).	90
Figura 4.21. Estatísticas descritivas da produtividade da cana-de-açúcar, variedade RB72454, em Goiás e Distrito Federal, estimada pelo DSSAT/CANEGRO para plantio em dezembro num Latossolo Vermelho (A), Neossolo Quartzarênico (B) e Latossolo Vermelho-Amarelo (C), válido para o ano de 2040 (cenário A2 de MCG).....	91
Figura 4.22. Estatísticas descritivas da diferença de produtividade da cana-de-açúcar, variedade RB72454, em Goiás e Distrito Federal, estimada pelo DSSAT/CANEGRO, entre 2010 e 2040 (cenário A2 de MCG), para plantio em dezembro num Latossolo Vermelho (A), Neossolo Quartzarênico (B) e Latossolo Vermelho-Amarelo (C).	91
Figura 4.23. Estatísticas descritivas da produtividade da cana-de-açúcar, variedade RB72454, em Goiás e Distrito Federal, estimada pelo DSSAT/CANEGRO para plantio em janeiro num Latossolo Vermelho (A), Neossolo Quartzarênico (B) e Latossolo Vermelho-Amarelo (C), válido para o ano de 2040 (cenário A2 de MCG).....	92
Figura 4.24. Estatísticas descritivas da diferença de produtividade da cana-de-açúcar, variedade RB72454, em Goiás e Distrito Federal, estimada pelo DSSAT/CANEGRO, entre 2010 e 2040 (cenário A2 de MCG), para plantio em janeiro num Latossolo Vermelho (A), Neossolo Quartzarênico (B) e Latossolo Vermelho-Amarelo (C).	92

Figura 4.25. Produtividade média de cana-de-açúcar, variedade RB72454, em Goiás e Distrito Federal para plantio em outubro de 2040 num solo tipo 3 (A), tipo 2 (B) e tipo 3 (C), estimada pelo DSSAT/CANEGRO a partir de projeções do sistema Precis para o cenário A2 de mudanças climáticas globais.	97
Figura 4.26. Impacto das mudanças climáticas globais na produtividade média de cana-de-açúcar, variedade RB72454, em Goiás e Distrito Federal para plantio em outubro num solo tipo 3 (A), tipo 2 (B) e tipo 3 (C), estimado pelo DSSAT/CANEGRO a partir de projeções do sistema Precis para o cenário A2 de 2040.	97
Figura 4.27. Produtividade média de cana-de-açúcar, variedade RB72454, em Goiás e Distrito Federal para plantio em novembro de 2040 num solo tipo 3 (A), tipo 2 (B) e tipo 3 (C), estimada pelo DSSAT/CANEGRO a partir de projeções do sistema Precis para o cenário A2 de mudanças climáticas globais.	98
Figura 4.28. Impacto das mudanças climáticas globais na produtividade média de cana-de-açúcar, variedade RB72454, em Goiás e Distrito Federal para plantio em novembro num solo tipo 3 (A), tipo 2 (B) e tipo 3 (C), estimado pelo DSSAT/CANEGRO a partir de projeções do sistema Precis para o cenário A2 de 2040.	98
Figura 4.29. Produtividade média de cana-de-açúcar, variedade RB72454, em Goiás e Distrito Federal para plantio em dezembro de 2040 num solo tipo 3 (A), tipo 2 (B) e tipo 3 (C), estimada pelo DSSAT/CANEGRO a partir de projeções do sistema Precis para o cenário A2 de mudanças climáticas globais.	99
Figura 4.30. Impacto das mudanças climáticas globais na produtividade média de cana-de-açúcar, variedade RB72454, em Goiás e Distrito Federal para plantio em dezembro num solo tipo 3 (A), tipo 2 (B) e tipo 3 (C), estimado pelo DSSAT/CANEGRO a partir de projeções do sistema Precis para o cenário A2 de 2040.	99
Figura 4.31. Produtividade média de cana-de-açúcar, variedade RB72454, em Goiás e Distrito Federal para plantio em janeiro de 2040 num solo tipo 3 (A), tipo 2 (B) e tipo 3 (C), estimada pelo DSSAT/CANEGRO a partir de projeções do sistema Precis para o cenário A2 de mudanças climáticas globais.	100

Figura 4.32. Impacto das mudanças climáticas globais na produtividade média de cana-de-açúcar, variedade RB72454, em Goiás e Distrito Federal para plantio em janeiro num solo tipo 3 (A), tipo 2 (B) e tipo 3 (C), estimado pelo DSSAT/CANEGRO a partir de projeções do sistema Precis para o cenário A2 de 2040.	100
Figura 4.33. Produtividade média de cana-de-açúcar, variedade RB72454, em Goiás e Distrito Federal, para plantio em outubro de 2040 num solo tipo 3 (A), tipo 2 (B) e tipo 3 (C), estimada pelo DSSAT/CANEGRO a partir de projeções do sistema Precis para o cenário A2 de mudanças climáticas globais.	104
Figura 4.34. Produtividade média de cana-de-açúcar, variedade RB72454, em Goiás e Distrito Federal, para plantio em novembro de 2040 num solo tipo 3 (A), tipo 2 (B) e tipo 3 (C), estimada pelo DSSAT/CANEGRO a partir de projeções do sistema Precis para o cenário A2 de mudanças climáticas globais.	104
Figura 4.35. Produtividade média de cana-de-açúcar, variedade RB72454, em Goiás e Distrito Federal, para plantio em dezembro de 2040 num solo tipo 3 (A), tipo 2 (B) e tipo 3 (C), estimada pelo DSSAT/CANEGRO a partir de projeções do sistema Precis para o cenário A2 de mudanças climáticas globais.	105
Figura 4.36. Produtividade média de cana-de-açúcar, variedade RB72454, em Goiás e Distrito Federal, para plantio em janeiro de 2040 num solo tipo 3 (A), tipo 2 (B) e tipo 3 (C), estimada pelo DSSAT/CANEGRO a partir de projeções do sistema Precis para o cenário A2 de mudanças climáticas globais.	105
Figura 4.37. Distribuição espacial do rendimento médio da produção de cana-de-açúcar em Goiás e Distrito Federal. Fonte: IBGE (2010).....	108
Figura 4.38. Distribuição espacial dos rendimentos máximo (A) e mínimo(B) da produção de cana-de-açúcar em Goiás e Distrito Federal. Fonte: IBGE (2010).	108
Figura 4.39. Localização geográfica das Usinas de cana-de-açúcar em Goiás. Fonte: CONAB (2010)	109
Figura 4.40. Produtividade média de cana-de-açúcar no município de Goianésia referente às safras 1989/90 a 2007/2008, estimada do DSSAT/CANEGRO, para um Latossolo Vermelho (LVd), um Neossolo Quartzarênico, um Latossolo Vermelho-Amarelo, e do IBGE (2010)..	111

Figura 4.41. Produtividade média de cana-de-açúcar no município de Goianésia referente às safras 1989/90 a 2007/2008, registrada pelo IBGE (2010) e estimada pelo DSSAT/CANEGRO num Latossolo Vermelho-Amarelo (A), e análise de regressão linear entre o rendimento médio registrado pelo IBGE (2010) e a produtividade média estimada pelo DSSAT/CANEGRO, nas safras 1997/98 a 2005/06.....	111
Figura 4.42. Produtividade média de cana-de-açúcar no município de Rio Verde, referente às safras 1989/90 a 2007/2008, registrada pelo IBGE (2010) e estimada do DSSAT/CANEGRO num Latossolo Vermelho-Amarelo (A), e análise de regressão linear entre o rendimento médio registrado pelo IBGE (2010) e a produtividade média estimada pelo DSSAT/CANEGRO, nas safras 1995/96 a 2007/08.....	112
Figura 4.43. Produtividade média de cana-de-açúcar no município de Santa Helena de Goiás, referente às safras 1990/91 a 2007/2008, registrada pelo IBGE (2010) e estimada pelo DSSAT/CANEGRO num Latossolo Vermelho-Amarelo (A), e análise de regressão linear entre o rendimento médio registrado pelo IBGE (2010) e a produtividade média estimada pelo DSSAT/CANEGRO, nas safras 1994/95 a 1997/98(B).....	112
Figura 4.44 - Rendimento médio em t/ha da cana-de-açúcar, variedade RB72454, obtido pela Usina Goiasa, em Goiatuba – GO, e estimada pelo modelo DSSAT/CANEGRO para diferentes tipos de solos.	114
Figura 4.45. Rendimento médio em t/ha da cana-de-açúcar, variedade RB72454, obtido pela Usina Anicuns, em Anicuns - GO, e estimado pelo modelo DSSAT/CANEGRO para diferentes tipos de solo.....	115
Figura 4.46. Risco climático da cana-de-açúcar, variedade RB72454, no Estado de Goiás e Distrito Federal para plantio em outubro num solo tipo 3 (A), tipo 2 (B) e tipo 1 (C).	118
Figura 4.47. Risco climático da cana-de-açúcar, variedade RB72454, no Estado de Goiás e Distrito Federal para plantio em novembro num solo tipo 3 (A), tipo 2 (B) e tipo 1 (C).	118
Figura 4.48. Risco climático da cana-de-açúcar, variedade RB72454, no Estado de Goiás e Distrito Federal para plantio em dezembro num solo tipo 3 (A), tipo 2 (B) e tipo 1 (C).....	119
Figura 4.49. Risco climático da cana-de-açúcar, variedade RB72454, no Estado de Goiás e no Distrito Federal para plantio em janeiro num solo tipo 3 (A), tipo 2 (B) e tipo 1 (C).....	119

Figura 4.50. Zoneamento de risco climático da cultura da cana-de-açúcar em Goiás e Distrito Federal. Fonte: MAPA (2010).....	121
Figura 4.51. Risco climático da cana-de-açúcar, variedade RB72454, no Estado de Goiás e Distrito Federal para plantio em outubro num solo tipo 3 (A), tipo 2 (B) e tipo 1 (C).	123
Figura 4.52. Risco climático da cana-de-açúcar, variedade RB72454, no Estado de Goiás e Distrito Federal para plantio em novembro num solo tipo 3 (A), tipo 2 (B) e tipo 1 (C).	123
Figura 4.53. Risco climático da cana-de-açúcar, variedade RB72454, no Estado de Goiás e Distrito Federal para plantio em dezembro num solo tipo 3 (A), tipo 2 (B) e tipo 1 (C).....	124
Figura 4.54. Risco climático da cana-de-açúcar, variedade RB72454, no Estado de Goiás e no Distrito Federal para plantio em janeiro num solo tipo 3 (A), tipo 2 (B) e tipo 1 (C).....	124
Figura 4.55. Estatística descritiva dos erros de estimativa (resíduos) e teste de validação.....	129
Figura 4.56. Distribuição espacial da produtividade estimada da cana-de-açúcar, variedade RB72454, plantada no mês de outubro num Latossolo Vermelho da região de Cerrado.....	130
Figura 4.57. Distribuição espacial da produtividade estimada da cana-de-açúcar, variedade RB72454, plantada no mês de outubro num Neossolo Quartzarênico da região de Cerrado...	131
Figura 4.58. Distribuição espacial da produtividade estimada da cana-de-açúcar, variedade RB72454, plantada no mês de outubro num Latossolo Vermelho-Amarelo da região de Cerrado	132

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Extensão das classes de solos do Estado de Goiás e do Distrito Federal.	37
Tabela 3.2. Áreas dos solos mapeados no Estado de Goiás e no Distrito Federal, em escala 1:250.000, estimada por meio de um sistema de informações geográficas.....	39
Tabela 3.3. Identificação das estações meteorológicas e série de dados utilizados no trabalho.	42
Tabela 3.4a. Características físico-hídricas dos solos utilizados no trabalho.....	50
Tabela 3.4b. Características físico-hídricas dos solos utilizados no trabalho.	50
Tabela 3.5. Indicadores estatísticos de comparação entre dados medidos e estimados pelo modelo DSSAT/CANEGRO para a variedade RB72454 cultivada sem irrigação.	52
Tabela 3.6. Duração média do ciclo e das fases fenológicas da cultura da cana-de-açúcar.....	57
Tabela 3.7. Coeficiente de cultura (Kc) para a cana-de-açúcar, obtidos de Barbieri (1981) e interpolados para períodos decendiais.....	57
Tabela 3.8. Critérios de cruzamento das classes de riscos climáticos para a cana-de-açúcar	62
Tabela 4.1. Área, em hectare e percentual, das classes de produção da cana-de-açúcar, variedade RB72454, estimada pelo DSSAT/CANEGRO para o Estado de Goiás e Distrito Federal	78
Tabela 4.2. Área das classes de produção da cana-de-açúcar, por tipo de solo, da variedade RB72454, estimada pelo DSSAT/CANEGRO para o Estado de Goiás e o Distrito Federal.....	85
Tabela 4.3. Aumento da temperatura do ar (em °C) projetado pelo sistema PreciS para o ano de 2040, para os cenários A2 e B2 de mudanças climáticas globais.....	87
Tabela 4.4. Área das classes de produção da cana-de-açúcar, variedade RB72454, estimada pelo DSSAT/CANEGRO para o Goiás e Distrito Federal, a partir de temperaturas estimadas para o cenário A2 de 2040, pelo sistema PreciS.	96
Tabela 4.5. Área das classes de diferença de produção da cana-de-açúcar, variedade RB72454, entre o cenário atual e o A2 de 2040, estimada pelo CANEGRO/DSSAT para o Goiás e Distrito Federal, com temperaturas estimadas para o cenário A2 de 2040 pelo sistema PreciS.....	101

Tabela 4.6. Área das classes de produtividade da cana-de-açúcar, variedade RB72454, estimada pelo DSSAT/CANEGRO para o Goiás e Distrito Federal, a partir de temperaturas estimadas para o cenário A2 de 2040, pelo sistema PreciS.	106
Tabela 4.7. Produtividade de cana-de-açúcar, obtida da variedade RB72454 em três ambientes de produção da Usina Goiasa, em Goiatuba - GO.....	113
Tabela 4.8. Estimativa de áreas, em hectares, relativa às classes de riscos do zoneamento de risco climático da cultura da cana-de-açúcar, variedade RB 72454, cultivada em Goiás e Distrito Federal.	117
Tabela 4.9. Estimativa das áreas das classes de risco do zoneamento de risco climático da cultura da cana-de-açúcar, variedade RB 72454, cultivada em Goiás e Distrito Federal.	125
Tabela 4.10. Índice de satisfação das necessidades de água e produtividade da cana-de-açúcar: valores médios referentes ao período 1979 - 2008, estimados pelo SARRA e DSSAT/CANEGRO.	126
Tabela 4.11. Coeficientes de ajuste do modelo agroclimatológico PrISNA.	127
Tabela 4.12. Resumo do ajuste estatístico do modelo agroclimatológico PrISNA.....	127
Tabela 4.13. Teste de significância do modelo (ANOVA).	127
Tabela 4.14. Coeficientes de correlação e covariância do modelo ajustado. Variável dependente: PrISNA.	128
Tabela 7.1a. Estatísticas descritivas das produtividades de cana-de-açúcar estimadas para plantios nos meses de outubro e novembro num Latossolo Vermelho distrófico - LVd do Estado de Goiás e Distrito Federal.	156
Tabela 7.1b. Estatísticas descritivas das produtividades de cana-de-açúcar estimadas para plantios nos meses de dezembro e janeiro num Latossolo Vermelho distrófico - LVd do Estado de Goiás e Distrito Federal.	157
Tabela 7.2a. Estatísticas descritivas das produtividades de cana-de-açúcar estimadas para plantios nos meses de outubro e novembro num Neossolo Quartzarênico do Estado de Goiás e Distrito Federal.	158

Tabela 7.2b. Estatísticas descritivas das produtividades de cana-de-açúcar estimadas para plantios nos meses de dezembro e janeiro num Neossolo Quartzarênico do Estado de Goiás e Distrito Federal.	159
Tabela 7.3a. Estatísticas descritivas das produtividades de cana-de-açúcar estimadas para plantios nos meses de outubro e novembro num Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico do Estado de Goiás e Distrito Federal.	160
Tabela 7.3b. Estatísticas descritivas das produtividades de cana-de-açúcar estimadas para plantios nos meses de dezembro e janeiro num Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico do Estado de Goiás e Distrito Federal.	161
Tabela 7.4.1. Produtividade média (t/ha) de cana-de-açúcar estimada pelo modelo DSSAT/CANEGRO para um Latossolo Vermelho - LVd.	162
Tabela 7.4.2. Produtividade média (t/ha) de cana-de-açúcar estimada pelo modelo DSSAT/CANEGRO para um Neossolo Quartzarênico - NQ.	163
Tabela 7.4. Produtividade média (t/ha) de cana-de-açúcar estimada pelo modelo DSSAT/CANEGRO para um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico - LVAd.	164

RESUMO

No Brasil, a produção de cana-de-açúcar voltou a se destacar a partir do ano 2000 como opção economicamente viável para a produção de bioenergia em larga escala, devido às demandas da sociedade pela redução nas emissões dos gases de efeito estufa e por produção de energia renovável e barata. O país pode ocupar e manter-se na posição de liderança estratégica, sendo, para isso, necessário ampliar o conhecimento nas diversas áreas envolvidas na produção do etanol. Talvez um dos setores mais carentes de estudos seja o setor agrícola, especialmente no que concerne à maximização do potencial produtivo das terras sem comprometimento ambiental. Por outro lado, as previsões de mudanças climáticas globais, indicando a alteração do regime pluviométrico e a elevação das temperaturas, podem alterar a geografia da produção agrícola brasileira. Como alternativa a este desafio, apresentam-se os modelos agroclimatológicos, desenvolvidos para interpretar resultados experimentais, promover a agricultura e apoiar o agronegócio de forma operacional. Uma das hipóteses do trabalho é que a aplicação de modelos agroclimáticos e de geoprocessamento permite expressar em escala espacial regional, em condições atuais e em cenários de mudanças climáticas globais, a produtividade e o risco climático relativos à produção da cana-de-açúcar em ambientes do bioma Cerrado. Para isso, foram utilizados dois modelos: (i) DSSAT/CANEGRO, modelo baseado em processos para estimar crescimento e produtividade; (ii) SARRA/SARRAZON, modelo empírico largamente utilizado para estimar oferta hídrica e risco climático. Ainda, a partir do modelo DSSAT/CANEGRO, construir um modelo simples para estimar produtividade a partir dos índices hídricos, obtidos pela SARRA/SARRAZON (PrISNA). Aos modelos foram incorporados dados e informações de solo, planta e clima e, como resultado, foram simulados rendimento e índices de oferta hídrica para 39 localidades que dispunham de postos meteorológicos. Os resultados foram georreferenciados e espacializados em sistemas de informações geográficas e apresentados na forma de mapas. Com base em análise espacial, foi possível delimitar áreas homogêneas em função de rendimento, risco, e melhores épocas de plantio da cana-de-açúcar em ambientes de Cerrado. Observou-se que os maiores rendimento e os menores riscos climáticos ocorreram em plantios nos meses de outubro e novembro. Também, a partir dos resultados de simulação dos dois modelos, foi possível ajustar e propor um modelo simples, de regressão múltipla, que permite estimar a produtividade da cana-de-açúcar, em escala regional, a partir de dados de índices de satisfação das necessidades hídricas da cultura, utilizando uma quantidade reduzida de variáveis agroclimatológicas. Com isso, pretende-se aprimorar as técnicas de zoneamento agrícola de riscos climáticos nas áreas de Cerrado que apresentam potencial de expansão da cana-de-açúcar, visando à implantação de sistemas produtivos com rendimento elevado e risco climático baixo.

Palavras-chave: *Saccharum officinarum*, Modelagem Agrometeorológica, Zoneamento Agrícola e Geoprocessamento.

ABSTRACT

Since the beginning of the year 2000, sugarcane in Brazil became again an economically viable option to produce bioenergy in large scale to attend two strong demands from society: reduction of emission of greenhouse gases and production of renewable energy at low costs. It is estimated that, in 2012-2013, there will be market for about 685 million of tons of sugarcane. The country is able to take strategic leadership in the world's sugarcane production. In this case, it is necessary to stretch the knowledge in several fields related to ethanol production. The agricultural sector, especially the one concerning the optimization of production without environmental damage, is one of the fields that have high demand for more research. On the other hand, it seems that the geography of agricultural production in Brazil will change as result of global climate changes that indicate alterations in current precipitation and temperature regimes. This study presents an agroclimatological model that was developed to interpret experiment results, to promote agriculture and to support agribusiness operationally. The goal is to apply agroclimatological models and geographic information system tools to forecast potential productivity and climatic risks of sugarcane production in the Cerrado biome, under regional scale, current conditions and scenery of global climate change. We selected two models: (i) DSSAT/CANEGRO, which is based on processes to estimate crop growing and productivity; and (ii) SARRA/SARRAZON, an empirical approach widely used to estimate water availability and climate risk. Another goal was to develop, based on DSSAT/CANEGRO, a simple model to estimate productivity from water indices obtained from SARRA/SARRAZON. The input parameters were soil, plant and climate data. We estimated yield and indices of water availability from 39 sites having meteorological data. The results were georeferenced and interpolated in geographical information systems and presented as maps. It was possible to classify Cerrado in terms of yield, risk and best planting dates. Results of simulation of two models also allowed to derive a simpler and more adjusted multiple regression equation that provide estimation of sugarcane productivity, on a regional scale, from indices of satisfaction of water necessity, using a reduced amount of agroclimatic variables. Ultimately, we intended to improve the techniques of agricultural zoning of climatic risks in the Cerrado's landscapes having potential for sugarcane expansion, aiming the introduction of production systems with high income and low climatic risk.

Keywords: *Saccharum officinarum*, agrometeorological modeling, agricultural zoning, geographic information system

1. INTRODUÇÃO

Entre as safras 2005/2006 a 2009/2010, a produção brasileira de cana-de-açúcar aumentou 40%, alcançando 604,5 milhões de toneladas na safra 2009/2010, em uma área plantada de cerca de 7,4 milhões de hectares (CONAB, 2010). Segundo o primeiro levantamento da safra em curso (2010/11), realizado pela CONAB nos meses de março e abril de 2010, estimou-se uma produção de 663,3 toneladas, numa área plantada de 8,1 milhões de hectares e produtividade média de 82,1 t/ha. Em relação à safra anterior, estas estimativas representam um incremento de 9,9%, 9,2% e 0,6% nos índices de produção, área plantada e produtividade, respectivamente.

Na safra de 2009/2010, cerca de 69,4% da produção nacional foi colhida na região sudeste do Brasil. O estado de São Paulo, produtor principal, contribuiu com 60% da produção brasileira de cana-de-açúcar, empregando técnicas modernas no seu sistema produtivo. Nesse Estado, a cultura alcança níveis mais elevados de produtividade, com 87,8 t/ha, comparado aos 81,6 t/ha da média nacional.

Os estados brasileiros que apresentam de consideráveis proporções à quase totalidade de suas áreas dentro dos limites do Bioma Cerrado, caso de Goiás, Minas Gerais, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Bahia, Tocantins, Maranhão e Piauí, contribuem com, aproximadamente, 22,1% da produção nacional. Embora o Cerrado apresente restrição hídrica para o cultivo da cana (EMBRAPA, 2008), as lavouras cultivadas em condições de alta tecnologia podem alcançar produtividades elevadas. Segundo a CONAB (2010), além de São Paulo, as maiores áreas de expansão para a safra 2010/2011 ocorreram no Mato Grosso do Sul, Goiás e Minas Gerais, sendo que a Bahia, Maranhão e Tocantins também apresentaram percentuais elevados de aumento de área com cana de 19%, 16% e 1960%, respectivamente.

A produção de cana-de-açúcar voltou a se destacar a partir do início do ano 2000 como opção economicamente viável para a produção de bioenergia em larga escala, respondendo a três demandas da sociedade: produção de energia renovável e barata, redução das emissões de gases de efeito estufa e aumento da demanda interna por etanol devido aumento da frota nacional de veículos bicompostíveis e/ou “flex”. Segundo CARVALHO (2006), em 2012-2013, haverá mercado para cerca de 685 milhões de toneladas de cana, sendo 60% para o mercado interno, o que exigirá a criação de 77 novas unidades de processamento industrial no Centro-Sul do Brasil, com investimentos de US\$ 14,6 bilhões. Tais projeções indicam que o

Brasil pode ocupar uma posição estratégica no mercado de energia mundial, tanto para a exportação de etanol e biodiesel, como de tecnologias e equipamentos industriais para o setor agroenergético.

No médio e longo prazo, no entanto, para ocupar e manter-se nesta posição de liderança estratégica, é necessário ampliar o conhecimento nas diversas áreas envolvidas na produção do etanol, sendo que, possivelmente, um dos mais carentes de estudos seja o setor agrícola, especialmente no que concerne à maximização do potencial produtivo das terras sem comprometimento ambiental. E os modelos agrícolas podem contribuir nessa maximização.

Neste contexto, destaca-se a modelagem matemática. Os modelos agrícolas são construídos para interpretar resultados experimentais, promover a agricultura e apoiar o agronegócio de forma operacional (BOOTE, et al. (1996). A modelagem transforma as situações da realidade em funções matemáticas e cria representações simplificadas de um sistema complexo (BOOTE et al., 1987). Segundo MONTEITH (1996), modelo agrícola é um esquema quantitativo para estimar crescimento, desenvolvimento e o rendimento da cultura em função de variáveis ambientais e características genéticas.

Pelo número de variáveis utilizadas, de funções aplicadas e sistemas compostos, os modelos podem ser considerados empíricos ou mecanísticos. Os empíricos, podem ser físicos ou estatísticos, e são comumente chamados de modelos simples. Os modelos mecanísticos são desenvolvidos pela abordagem das leis gerais e por métodos experimentais, normalmente incorporam maior quantidade de variáveis e são compostos por subsistemas interrelacionados. Se considerar as variáveis como não aleatórias, são classificados como determinísticos, e se as variáveis são aleatórias, são estocásticos (BOOTE et al., 1987).

Os modelos permitem gerar cenários a partir da combinação dos diversos fatores que resultam na produção das culturas. Segundo COSTA (1997), os estudos de modelagem com variáveis ambientais e desenvolvimento de culturas datam de mais de 250 anos, iniciando com RÉANIER, em 1735, com graus-dia e desenvolvimento da planta.

Posteriormente, avançaram-se as pesquisas neste tema e surgiram vários outros modelos que correlacionam os processos que envolvem o sistema solo-planta-atmosfera, como, por exemplo, DE JONG (1984), com o modelo de movimento de água no perfil do solo.

Segundo DOOREMBOS e KASSAM (1979), em função da pouca disponibilidade de dados e de informações para uso agrícola na época, a FAO (Food and Agriculture

Organization of the United Nations) propôs utilizar um número mínimo de componentes para estudar o efeito da água na planta e adotar o Método da Zona Agroecológica, baseado em DE WIT (1965). Por este método, a produtividade potencial de uma cultura pode ser estimada com base na análise de sua interação com a radiação solar, admitindo-se a não ocorrência de limitações hídricas e de nutrientes, e por eventos fitossanitários. Neste sentido, SINCLAIR e SELIGMAN (1996) chamam a atenção para a necessidade de validação das condições ambientais de cada região.

Nesse sentido, AFFHOLDER et al. (1997) relacionaram o rendimento da cultura do milho com o clima, em ambientes de Cerrado. EGLI E BRUENING (1992) e FARIAS et al. (2001) seguem a mesma linha de estudos com soja. SILVA (2004) ajustou o modelo STICS às condições de Cerrado e aplicou em estudos de efeito da palhada da soja, milho e milheto à dinâmica da água em plantio direto, e estudo de risco climático com milho, milheto e soja em sistemas de cultivo convencional e de plantio direto.

Com o crescimento da importância econômica e social da cana-de-açúcar, cresce também a demanda por pesquisa em modelagem para aplicação no agronegócio. GLOVER (1972) modelou processo de respiração das plantas e o incorporou ao CERES-MAIZE (JONES e KINIRY, 1986), que dispõe das funções de fotossíntese. INMAN-BAMBER e THOPSON (1989) simularam a interação da água, fertilizante, idade da planta e clima na produção de matéria seca. SINGELS e BEZUIDENHOUT (1989) desenvolveram o IRRICANE, que depois evoluiu para o CANESIM (SINGELS e DONALDSON, 1998), para simular a produtividade e área foliar, semelhante ao CANEGRO (INMAN-BAMBER (1993). Surgiram também os modelos APSIM e QCANE (O'LEARY, 2000, citados por CABRAL (2001)

No Brasil, os primeiros modelos agrometeorológicos com cana-de-açúcar surgiram a partir da década de 70. PEREIRA e MACHADO (1986) e PEREIRA (1987) desenvolveram modelos com fotossíntese, respiração e crescimento. BARBIERI (1993) desenvolveu modelo fisiológico para estimar produtividade de cana em São Paulo e CABRAL (2001) fez observação do sistema solo-planta-atmosfera com modelagem para o estado de São Paulo.

Por outro lado, segundo PEREIRA e MACHADO (1986), os modelos agrometeorológicos já existentes podem ser associados a outros ou modificados para aproximá-los à realidade e atender à baixa quantidade de dados e informações disponíveis, ou

seja, diferentes modelos simplificados podem ser construídos a partir de um mesmo modelo complexo. Ainda, segundo este autor, as diferenças entre eles irão depender dos diferentes objetivos de sua aplicação.

A variabilidade climática não prevista sempre esteve entre as causas principais de risco à atividade agrícola (CUNHA e ASSAD, 2001), e a elevada taxa de sinistralidade na agricultura brasileira ocorre, na maioria dos casos, devido a causas de natureza climática, com índices de perdas de 16,27%, nas safras de verão, e de 21,64%, nas safras de inverno, apresentados por GÖEPFERT et al. (1993).

No Brasil, modelos agroclimatológicos desenvolvidos para interpretar resultados experimentais, promover a agricultura e apoiar o agronegócio de forma operacional são uma realidade. Por meio da integração de modelos de simulação de crescimento e de desenvolvimento de culturas, de base de dados de clima e de solo, de técnicas de análise de decisão e de ferramentas de geoprocessamento (CÂMARA e MEDEIROS, 1998) foi possível criar o programa de zoneamento agrícola de riscos climáticos do Brasil (CUNHA e ASSAD, 2001; e ROSSETTI, 2001), e utilizá-lo como instrumento de gestão do seguro rural e de indução ao uso de tecnologia agrícola.

Além de possibilitar a caracterização adequada dos fatores que influenciam na produção agrícola, os modelos agroclimatológicos e os sistemas de informações geográficas são úteis como ferramentas aplicadas para a projeção de cenários futuros, avaliando-se, por exemplo, o impacto de mudanças climáticas semelhantes àquelas traçadas pelo IPCC (2007).

Pode-se, também, melhorar o sistema atual de zoneamento agrícola, associando a ele novos elementos para a seleção das áreas de menor risco, numa abordagem ampla, considerando aspectos socioeconômicos e de solo, além do clima, para a expansão da cana-de-açúcar no Brasil. Este tipo de abordagem é importante considerando, especialmente, o ritmo acelerado de aquisição de terras para o cultivo e de construção de usinas nas regiões com potencial para expansão como, por exemplo, na região de cerrados do país.

1.1 Hipótese

É possível expressar com eficiência estatística, em escala espacial regional, a produtividade e o risco climático do cultivo da cana-de-açúcar em ambientes do bioma

Cerrado, em condições atuais e de projeções de mudanças climáticas globais, com a aplicação de modelos agrometeorológicos associados a sistemas de informações geográficas.

1.2 *Objetivo Geral*

Estimar e avaliar a produtividade, os riscos climáticos e o impacto das projeções de mudanças climáticas globais na produção de cana-de-açúcar em ambientes do bioma Cerrado.

1.3 *Objetivos Específicos*

- Estimar a produtividade da cana-de-açúcar em ambientes de Cerrado, utilizando o modelo DSSAT/CANEGRO, de simulação de crescimento da cana-de-açúcar;
- Estimar índices que expressem a demanda e oferta hídricas da cana-de-açúcar em ambientes de Cerrado, utilizando o modelo SARRA/SARRAZON, de análise regional dos riscos agroclimáticos;
- Ajustar e propor um modelo matemático para estimar a produtividade da cana-de-açúcar em ambientes de Cerrado, a partir de índices agrometeorológicos obtidos do SARRA/SARRAZON, modelo de balanço hídrico da cultura;
- Avaliar o impacto das mudanças climáticas sobre a produtividade e riscos climáticos da cana-de-açúcar em ambientes de Cerrado, utilizando modelos agrometeorológicos;
- Utilizar técnicas estatísticas e geoestatísticas para análise dos dados obtidos, quantificando a importância relativa do clima e do solo na produtividade e nos riscos climáticos da cana-de-açúcar, expressando seus resultados na forma de mapas;
- Propor aprimoramentos aos estudos de Zoneamento Agroecológico da Cana-de-açúcar do Brasil, nas áreas de expansão do bioma cerrado, delimitando as regiões e identificando os períodos com condições melhores de implantação de sistemas produtivos economicamente viáveis e de baixos riscos climáticos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 *Histórico*

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) é originária da Nova Guiné e teve, com as invasões árabes, sua propagação para o norte da África, sul da Europa e toda margem do Mar Mediterrâneo. Ao mesmo tempo, os chineses a levaram para Java e Filipinas. Porém, foi na América que a cana-de-açúcar encontrou condições excelentes para seu desenvolvimento. Inicialmente, as lavouras estenderam-se por Cuba e outras ilhas, sendo levada por navegantes às Américas Central e do Sul (FAUCONIER e BASSEREAU, 1970; SZMRECSÁNYI, 1979; MOZAMBANI et al., 2006). Trazida ao Brasil em 1532 por Martim Afonso de Sousa, a cana-de-açúcar passou a ter importância significativa para o País (SZMRECSÁNYI, 1979).

Durante longo período que transcorreu desde logo após o descobrimento do Brasil, a produção açucareira no país foi predominantemente nordestina. No período Imperial, o país dependeu basicamente do cultivo da cana e exportação do açúcar proveniente de engenhos na Bahia e Pernambuco. Contudo, foi em São Paulo que ocorreu a construção dos primeiros engenhos em solo brasileiro, no atual município de São Vicente. Durante longo tempo, tal produção não assumiu importância econômica, sendo somente no século XVIII que as atividades de produção de açúcar em São Paulo tiveram destaque, concentrando-se no denominado “quadrilátero do açúcar”, onde o centro era o atual município de Piracicaba (RAMOS, 1999).

A consolidação dos mercados nacional e internacional fez com que a produção canavieira fosse, aos poucos, concentrando-se estrategicamente no Estado de São Paulo, por ser o principal mercado consumidor do país, por apresentar baixo preço das terras, devido à inversão do capital gerado com o café, pelas vantagens de infra-estruturas e pelos incentivos financeiros. Com isso, antigos cafeicultores e novos investidores instalaram, neste Estado, usinas de processamento de cana-de-açúcar (PIACENTE e PIACENTE, 2008). Inúmeros engenhos concentraram-se nas regiões de Campinas, Itu, Moji Guaçu, Piracicaba e ao norte do Estado, nas vizinhanças de Ribeirão Preto. Na virada do século XIX, com terras menos adequadas ao café, Piracicaba, cuja região possuía três dos maiores engenhos centrais do Estado e usinas de porte, tornou-se o maior centro produtor de açúcar de São Paulo. A partir da década de 1910, impulsionados pelo crescimento da economia paulista, os engenhos de

aguardente transformaram-se em usinas de açúcar, dando origem aos grupos produtores mais tradicionais do Estado na atualidade (SZMRECSÁNYI, 1979; MOZAMBANI et al., 2006).

Atualmente, o setor canavieiro do Brasil ocupa lugar de destaque na fabricação e exportação de açúcar, na produção de álcool e na co-geração de energia a partir do bagaço da cana. É o maior produtor e exportador de açúcar do mundo, onde detêm 40% do comércio internacional (ORTOLAN, 2006). Juntos, o açúcar e o álcool ocupam a quarta posição na pauta das exportações do agronegócio brasileiro, atrás, somente, do complexo soja, carnes e produtos florestais (SACHS e MARTINS, 2007).

Na safra 2005/2006, o Brasil contava com cerca de 72 mil fornecedores de cana-de-açúcar e 325 unidades industriais sucroalcooleiras em operação, com cerca de 251 destas localizadas na região centro-sul, e as restantes na região norte-nordeste (SMA, 2007). O levantamento do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), em 2008, apontava 370 unidades produtoras de açúcar e/ou álcool cadastradas no Brasil. Segundo estimativas da CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento) divulgadas no dia 11 de novembro de 2007, a produção nacional de cana-de-açúcar na safra 2007/2008, destinada ao setor sucroalcooleiro e a outros fins, foi de 549,91 milhões de toneladas, superior à safra anterior em 15,8%. Desse total, a indústria sucroalcooleira esmagaria 86,39% e o restante seria destinado à fabricação de cachaça, à alimentação animal, a sementes e a outros fins. O Estado de São Paulo seria responsável por 58,55% da cana destinada à indústria, seguido pelo Paraná (8,47%), Minas Gerais (7,67%), Alagoas (5,63%) e Goiás (4,43%). A área de cana ocupada na safra 2007/2008 foi de 6,96 milhões de hectares, superior em 13,0% à da safra anterior. Desse total, 82,4% estão na região Centro-Sul e os 17,6% restantes, na região Norte/Nordeste.

De acordo com o governo do Estado de São Paulo, a área plantada com cana-de-açúcar no Estado em 2008 foi 4,2 milhões de hectares, com 177 usinas cadastradas no Departamento da Cana-de-açúcar e Agroenergia do MAPA. A cana-de-açúcar, no ano de 2006, representou 44,9% do valor da produção agrícola estadual, seguida pela carne bovina com 11,5%, e a laranja para indústria com 6,5% (TSUNECHIRO et al., 2007 citados por SACHS; MARTINS, 2007).

Segundo SACHS e MARTINS (2007), entre 1995 e 2006, houve um aumento de 57,1% de áreas destinadas ao plantio de cana-de-açúcar no Estado do São Paulo, sendo que, em 1995, as seis maiores áreas plantadas se concentravam nos EDRs (Escritórios de

Desenvolvimento Regional) de Ribeirão Preto (12,2%), Jaú (8,7), Orlandia (8,6%), Araraquara (7,3%), Piracicaba (6,9%) e Jaboticabal (6,1%). Já em 2006, as áreas maiores foram registradas em Orlandia (8,9%), Barretos (8,5%), Ribeirão Preto (7,7%), Jaú (6,1%), Araraquara (5,1%), Assis (4,9%), Jaboticabal (4,8%) e Catanduva (4,8%). As maiores taxas anuais de crescimento da produção foram verificadas nos EDRs de Presidente Prudente, Dracena, São José do Rio Preto, Tupã e Andradina, áreas onde antes eram exploradas por outras atividades agropecuárias e expandiu sua produção de cana-de-açúcar, dada a crescente demanda do mercado.

De 2005 a 2009, a produção brasileira de cana-de-açúcar aumentou 40%, alcançando 604,5 milhões de toneladas na safra 2009/2010, em uma área plantada de cerca de 7,4 milhões de hectares (CONAB, 2010). Segundo o primeiro levantamento da safra 2010/11, realizado pela CONAB nos meses de março e abril de 2010, estimou-se uma produção 663,3 toneladas, numa área plantada de 8,1 milhões de hectares e produtividade média de 82,1 t/ha. Essas estimativas representam um incremento de 9,9%, 9,2% e 0,6% nos índices de produção, área plantada e produtividade, respectivamente.

Na safra 2009/2010, cerca de 69,4% da produção nacional foi colhida na região Sudeste do Brasil, sendo que o Estado de São Paulo, principal produtor, contribuiu com 60% da produção brasileira de cana-de-açúcar, empregando técnicas modernas no seu sistema produtivo, e onde a cultura alcança níveis elevados de produtividade, com 87,8 t/ha, comparado aos 81,6 t/ha da média nacional.

Segundo o IBGE (2010), em 2009 o Brasil produziu 671,4 milhões de toneladas, 61,7% superior em relação a 2004. Neste mesmo período, a região Centro-Oeste alcançou um aumento de 123%, com 84,5 milhões de toneladas produzidas. Desta região, o estado de Goiás foi quem registrou o maior aumento percentual de produção (206,9%) e produziu 42,9 milhões de toneladas de cana. Em agosto de 2010, o IBGE estimou os seguintes percentuais de aumento da produção de cana-de-açúcar: 1,2% para o Brasil, 11,2% para a região Centro-Oeste, 2,6% para o Goiás e 32,2% para o estado do Mato Grosso do Sul.

Os estados brasileiros que apresentam de consideráveis à quase totalidade de suas áreas dentro dos limites da região do bioma Cerrado, como Goiás, Minas Gerais, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Bahia, Tocantins, Maranhão e Piauí, contribuem com, aproximadamente, 22,1% da produção nacional. Embora o Cerrado apresente restrição hídrica para o cultivo da

cana, as lavouras cultivadas com emprego de alta tecnologia podem alcançar produtividades elevadas. Segundo a CONAB (2010), além de São Paulo, as maiores áreas de expansão para a safra 2010/2011 ocorrem no Mato Grosso do Sul, Goiás e Minas Gerais, sendo que a Bahia, Maranhão e Tocantins também apresentam percentuais elevados de aumento de área com cana: 19%, 16% e 1960%, respectivamente.

2.2 *Modelagem agrometeorológica em cana-de-açúcar*

A modelagem agrometeorológica permite gerar conhecimento e criar ferramentas eficazes para suporte à tomada de decisões operacionais e estratégicas na produção agrícola. Através de funções matemáticas estatísticas e probabilísticas, são construídos modelos que permitem simular o desenvolvimento e produção das culturas, a partir da integração e análise do comportamento dos componentes edafoclimáticos (solo-clima-planta), responsáveis pela produção das culturas. Segundo O'LEARY, (2000), quando aplicado especialmente na cana-de-açúcar, modelos de simulação podem incorporar aspectos agronômicos, fisiológicos, bioquímicos e de manejo de pragas.

Na década de 70, os modelos baseados em processos ecofisiológicos, e relacionados com as condições meteorológicas, passaram a ser utilizados com maior frequência na pesquisa agropecuária brasileira. Um desses modelos, o denominado de “Método das Zonas Agroecológicas”, é recomendado pela FAO como ferramenta de estudo em escala geográfica, buscando comparar regiões quanto aos seus aspectos climáticos e à variabilidade interanual do clima numa mesma região (DOOREMBOS e KASSAM, 1979).

O SARRA (Système d'Analyse Regionale des Risques Agroclimatiques), desenvolvido por BARON et al. (1996), é considerado um modelo empírico, simples, e assim como o modelo FAO, simula o desenvolvimento da planta em função do consumo de água e disponibilidades hídricas do solo. Também permite estimar o rendimento da cultura, conforme apresentado na Equação 1.

$$\frac{Y_r}{Y_m} = k * \frac{ET_r}{ET_m} \dots\dots\dots (1)$$

onde:

Y_r/Y_m expressa a relação entre os rendimentos real e máximo;

E_{Tr}/E_{Tm} expressa a relação entre as evapotranspirações real e máxima da cultura;

k representa o índice de penalização.

O SARRA incorpora funções relativas ao sistema solo-clima-planta por regressão matemática, mas requer um número reduzido de variáveis de entrada, quando comparado ao modelo mecanístico (complexo), o que permite a sua aplicação numa escala regional.

A abordagem empregada nos modelos “Método das Zonas Agroecológicas” e SARRA tem sido largamente utilizada em pesquisa e aplicação operacional pela agrometeorologia brasileira, apresentando bom desempenho quando comparado com modelos mais complexos ou com experimentos de campo (MARIN et al., 2000; ROLIM et al., 2001).

Outros modelos, classificados como mecanísticos, formulam e simulam os processos e sistemas ecofisiológicos responsáveis pela formação da produção da cultura. O DSSAT (“Decision Support System for Agrotechnology Transfer”) é uma plataforma que agrega um conjunto de modelos que se enquadram nessa categoria, e é bastante aplicado para este fim. O DSSAT é um instrumento poderoso de simulação numérica de previsões de crescimento de estimativa de produtividades das culturas, tomando por base dados climáticos, teores de nutrientes e balanço de água no solo (SILVA e BERGAMASCO, 2001). A versão 3.5 possui 16 módulos de culturas que contemplam gramíneas, leguminosas e raízes e tubérculos, entre outros.

O modelo DSSAT/CANEGRO, descrito por INMAN-BAMBER (1993), foi baseado no modelo CERES-MAIZE (JONES e KINIRT, 1986) e desenvolvido na África do Sul para simular a fisiologia, dinâmica de populações e relações hídricas da cana-de-açúcar, e Incluído no sistema DSSAT.

Entres os modelos mais difundidos para aplicações estudos com cana-de-acucar, podem ser citados os modelos APSIM – Sugarcane (KEATING et al., 1999), QCANE (LIU e KINGSTON, 1995) e AUSCANE (JONES et al., 1989), desenvolvidos na Austrália, o MOSICAS (Martine, 2003), desenvolvido pelo CIRAD (França) e CASUPRO (VILLEGAS et al., 2005), desenvolvido pelos norte-americanos.

No Brasil, a aplicação de modelos na estimativa de produção de cana-de-açúcar ainda é pouco utilizada. DIAS (1997) verificou que as características químicas, físicas e hídricas do horizonte subsuperficial apresentaram significativas correlações com a produtividade agrícola

da cultura, e que o regime hídrico mostrou-se potencialmente importante na avaliação do potencial agrícola dos solos da região Noroeste de São Paulo. TERAMOTO (2003) avaliou o modelo “Método das Zonas Agroecológicas” na estimativa de produção de cana-de-açúcar, baseado nos solos e clima, recomendando como ferramenta útil e adequada para estimar produtividade potencial da cultura.

A parametrização dos modelos do DSSAT para as diferentes condições de produção do Brasil é uma atividade de grande relevância científica, na medida em que torna possível estimar o potencial produtivo em escala local, situação em que modelos como o “Método das Zonas Agroecológicas” e o SARRA não apresentam bom desempenho. Recentemente, o DSSAT/CANEGRO foi parametrizado por MARIN et al. (2010), e suas estimativas avaliadas para duas variedades cultivadas em São Paulo e também na região de Cerrados, utilizando dados de cinco experimentos conduzidos no sul do Brasil.

O DSSAT/CANEGRO estima e acumula a biomassa total (ΔTOT , em t/ha/dia) a partir da eficiência de conversão da radiação fotossinteticamente ativa ($PARCE$, em g/MJ). A quantidade de biomassa acumulada (TOT , em t/ha) depende da quantidade de radiação interceptada ($IPAR$, em MJ/ha), da altura da planta, e do nível de estresse hídrico da planta ($SWDF1$), conforme descrito por RITCHIE et al. (1986). Assim, SINGELS e BEZUIDENHOUT (2002) desenvolveram a Equação 2.

$$\Delta TOT = (1 - g) * (PARCE * 10^{-6} * IPAR - mTOT) * SWDF1 \dots\dots\dots (2)$$

em que:

g e m são coeficientes de respiração de crescimento (0,242 t/t) e respiração de manutenção (0,004 t/t), respectivamente.

A eficiência da conversão da radiação (PAR) e a respiração de manutenção são dependentes da temperatura, de acordo com a Equação 3, segundo SINGELS et al. (2005).

$$PARCE = PARCE_{max} * (1 - \exp(-0,08(T_{Med} - T_{base}))) \dots\dots\dots (3)$$

em que:

$PARCE_{max}$ é a eficiência máxima teórica de conversão da PAR para biomassa na temperatura ideal, e T_{base} é a temperatura base para a fotossíntese.

A fração do aumento da biomassa consumida para manutenção da respiração (R_m) é estimada por uma função exponencial da temperatura e foi derivada de resultados apresentados por LIU e BULL (2001), sendo descrita pela Equação 4.

$$R_m = Re_{spQ10} * ((T_{med} - 10,0)/10,0) * Re_{spcon} . \dots\dots\dots (4)$$

em que:

Re_{spQ10} é a fração de aumento da taxa de respiração a cada 10°C de elevação da temperatura.

A temperatura base para a fotossíntese, a taxa de respiração, os índices de acúmulo de matéria seca total e de particionamento entre as partes da planta são específicos e calibrados para cada cultivar.

Uma função não-linear define o particionamento diário dos fotoassimilados totais entre as raízes e a parte aérea da planta. Na fase inicial do desenvolvimento da planta, a maior fração é particionada para as raízes, mas decresce rapidamente à medida que a planta se desenvolve, quando, na fase de maturação da cana-de-açúcar, o máximo da fração de partição é reservado para a parte aérea.

A parcela ou fração da biomassa seca da parte aérea, revertida para a formação do colmo, é simulada por meio de uma fração constante da partição diária ($SKPF$) quando, a partir da emergência, a soma térmica (em graus-dia) excede determinado valor (TT_{SKP} em °C/dia). Neste cálculo, descrito pela Equação 5, considera-se a temperatura base de 10°C, não ocorrendo particionamento quando a soma térmica diária for menor que este valor.

$$\Delta SK = \Delta ADM \times SKPF \dots\dots\dots (5)$$

Demais informações sobre o funcionamento da versão 4.5 do modelo DSSAT/CANEGRO podem ser obtidas em SINGELS et al., (2008).

2.3 - Aspectos morfológicos da cana-de-açúcar

A parte aérea da cana-de-açúcar desenvolve-se de forma agrupada, em touceiras, sendo formada por colmos, folhas, inflorescências e frutos. A parte subterrânea é formada por raízes e rizomas. O colmo, responsável pela sustentação das folhas e panículas, é normalmente de porte ereto, apresenta nós e entrenós distintos e caracterizados. Os internódios ou entrenós

apresentam formas variadas: cilíndricas, de carretel, conoidal, obconoidal, tumescente ou de barril. Neles se concentra a sacarose, produto essencial a ser extraído. O nó, nódio ou região nodal é a parte da cana onde se fixam as folhas, onde se localiza a gema, o anel de crescimento e a zona radicular da planta. As folhas estão ligadas ao colmo através dos nós, em duas fileiras, de forma opostas e alternadas. Podem ser eretas e rígidas, ou flácidas e arqueadas, com ou sem manchas cloróticas, sardas e pêlos. Apresentam comprimento, largura e cores variadas, dependendo da variedade e do ambiente de produção. A inflorescência, bandeira ou fecha, é uma panícula aberta, formada por um eixo principal de onde ramificam as espiguetas que, por sua vez, comportam as flores hermafroditas (MOZAMBANI et al., 2006; CASAGRANDE, 1991).

As características das variedades determinam a eficiência fotossintética, definem o número, a altura e o diâmetro dos colmos, o comprimento, largura das folhas e a arquitetura da parte aérea. Estes caracteres também são influenciados pelo clima, manejo e práticas culturais (CASAGRANDE, 1991).

2.4 Aspectos ecofisiológicos da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é considerada uma planta altamente eficiente na conversão de energia solar (radiante) em energia química (carboidratos). Isto se deve ao seu metabolismo fotossintético C4. No processo de fotossíntese, a planta utiliza energia solar para oxidar a água, assimilar o dióxido de carbono (CO₂), liberar oxigênio e, assim, produzir grandes compostos de carboidratos, sobretudo açúcares. Os pigmentos verdes (clorofila), presentes nos cloroplastos localizados nas células do mesófilo, são especializados na absorção de luz e responsáveis por este processo (TAIZ e ZEIGER, 2004).

TAIZ e ZEIGER (2004) relatam que existem diferenças anatômicas das folhas entre plantas que possuem o ciclo C4 de carbono (chamadas plantas C4) e aquelas com ciclo fotossintético de Calvin (plantas C3). As plantas C3 possuem um tipo específico de células contendo cloroplastos, o mesófilo, enquanto uma folha C4 possui dois tipos distintos de células que contêm cloroplastos (mesófilo e bainha vascular). Essas diferenças anatômicas resultam em processos fotossintéticos diferenciados.

No ciclo C₃ (Ciclo de Calvin), o CO₂ atmosférico é combinado com a água, proporcionando sua incorporação a compostos orgânicos. Este processo é sintetizado em três fases conforme TAIZ e ZEIGER (2004):

- I - Carboxilação do aceptor de CO₂, ribulose-1,5-biofosfato, formando duas moléculas de 3-fosfoglicerato;
- II - Redução do 3-fosfoglicerato, formando gliceraldeído-3-fosfato, um carboidrato; e
- III - Regeneração do aceptor de CO₂, ribulose-1,5-biofosfato, a partir do gliceraldeído-3-fosfato.

Esses autores afirmam que é necessário um suprimento de energia, fornecida pelo ATP (Adenosina tri-fosfato) e NADPH (redução de NADP⁺, nicotinamida adenina dinucleótido fosfato, em NADPH), a fim de manter o ciclo em funcionamento, fixando CO₂. Para sintetizar o equivalente a uma molécula de hexose, seis moléculas de CO₂ são fixadas ao custo de 18 ATP's e 12 NADPH's. Ou seja, o ciclo consome duas moléculas de NADPH e três de ATP para cada uma de CO₂ fixado em carboidratos. Assim, é possível calcular a eficiência fotossintética se for conhecido o consumo de energia utilizado e o requerimento quântico mínimo (moles de quanta absorvidos para cada mole de CO₂ fixado). Neste caso, a eficiência é de 90%.

No ciclo C₄, este processo é sintetizado em quatro fases:

- I - Fixação do CO₂ pela fosfoenolpiruvato (PEP) carboxilase nas células do mesófilo, para formar um ácido C₄ malato e/ou aspartato;
- II - Transporte do ácido C₄ para a bainha vascular;
- III - Descarboxilação dos ácidos C₄ dentro da bainha vascular gerando CO₂, que é então reduzido a carboidrato via ciclo C₃ (Calvin); e
- IV - Transporte do ácido C₃ (piruvato ou alanina), formado na etapa de descarboxilação, de volta a célula do mesofilo e regeneração do aceptor de CO₂ fosfoenolopiruvato.

Neste ciclo, o cálculo da energia mostra que o processo de concentração do CO₂ consome dois equivalentes de ATP (alta energia) por molécula de CO₂ transportada. Assim, a exigência de energia para a fixação de CO₂ pelos ciclos C₄ e C₃ combinados é de cinco ATP e mais dois NAPH por CO₂ fixado.

Isto evidencia que, em decorrência desta demanda energética maior, as plantas C₄, fotossintetizando sob condições que inibem a fotorrespiração (alto CO₂ e baixo O₂), requerem

um número maior de quanta de luz por CO₂ do que as plantas C3. Significa que, em uma atmosfera normal, o requerimento de energia das plantas C3 é alterado por fatores que afetam o balanço entre a fotossíntese e a fotorrespiração, tal como a temperatura. Por outro lado, em função dos mecanismos construídos para evitar a fotorrespiração, o requerimento de energia das plantas C4 permanece constante sob condições ambientais diferentes.

Assim, a alta atividade da PEP carboxilase permite às plantas C4 reduzir a abertura dos estômatos e, com isso, conservar água, enquanto fixa CO₂ em velocidade igual ou maior que as plantas C3. Também, a supressão da fotorrespiração, resultante da concentração de CO₂ nas células da bainha vascular, permite às plantas C4 fotossintetizar mais eficientemente em altas temperaturas do que as plantas C3. Deduz-se, então, o porquê da abundância de plantas C4 em ambientes mais secos e quentes.

Entretanto, esta alta atividade fotossintética está não só exclusivamente correlacionada com a produtividade elevada da cana-de-açúcar. Sua grande capacidade para a produção de matéria seca reside na alta taxa de fotossíntese por unidade de superfície de terreno, que é influenciada pelo Índice de Área Foliar (IAF). Além disso, o longo ciclo de crescimento da planta resulta em produções elevadas de matéria seca.

A cultura apresenta quatro estádios fenológicos diferentes, conforme MACHADO (1982):

- Estádio 1 - Brotação e emergência dos brotos ou colmos primários (estabelecimento). A brotação inicia-se após 7 a 10 dias do plantio e dura 30 a 35 dias, em média;
- Estádio 2 - Perfilhamento e estabelecimento da cultura: vai da emergência dos brotos ao final do perfilhamento. Fase em que a população de perfilhos associada ao início do acúmulo de sacarose nos colmos determina a produtividade futura da cultura. Esta fase inicia-se ao redor dos 40 dias após o plantio (DAP) e pode até 120 dias;
- Estádio 3 - Grande crescimento: fase que vai do final do perfilhamento até antes da intensa atividade de acúmulo de sacarose. Esta fase inicia-se por volta dos 120 DAP e dura 270 dias, normalmente;
- Estádio 4 – Maturação: fase caracterizada pela concentração intensa de sacarose nos colmos, e é quando a qualidade da matéria-prima (colmos industrializáveis) é determinada. Inicia-se 270 DAP e pode durar até três meses;

Quanto à maturação, as variedades de cana-de-açúcar na região Centro-Sul são divididas em quatro grupos, ou seja, o período dentro da safra em que atingem o teor máximo de sacarose nos colmos (NUNES JR, 1987):

- Grupo 1 - De maturação precoce: atingem o teor máximo de sacarose de abril a maio;
- Grupo 2 - De maturação semiprecoce: atingem o teor máximo de sacarose do final de maio ao início de julho;
- Grupo 3 - De maturação média: atingem o teor máximo de sacarose do final de julho ao início de outubro; e
- Grupo 4 - De maturação tardia: atingem o teor máximo de sacarose de outubro a novembro.

Segundo CASAGRANDE e VASCONCELOS (2008), a cana apresenta alta taxa de crescimento e uso da água, sendo duas a três vezes maior que uma planta C3 e, mesmo em situação de estresse hídrico, consegue fazer fotossíntese com eficiência. Os autores também citam, como eficiência no uso da água, o consumo de 69 a 168 litros para produzir um kg de cana, enquanto as C3 podem consumir até 1.000 litros para produzir a mesma quantidade de massa. Ainda, que as plantas C4 atingem fotossíntese máxima com 3 a 4,5 % da massa seca da folha na forma de Nitrogênio, enquanto as de metabolismo C3 necessitam de 6,5 a 7,5%.

MACHADO et al. (1982) apresentaram uma função de acúmulo de massa seca da parte aérea da cana-de-açúcar, conforme descrito pela Equação (6).

$$MS(gm^{-1}) = \frac{5389,5}{1 + \exp(5,6609 - 0,01874t_i)} \dots\dots\dots (6)$$

em que:

MS é a massa seca total e *t* é o número de dias após o plantio.

MIOCQUE (1999) observou que o máximo de crescimento da cana-planta ocorreu nos meses de dezembro e janeiro, num Latossolo Vermelho distrófico do município de Matão (SP). SOARES et al. (2004) observaram curvas de crescimento diferentes quando compararam plantios de várias cultivares em sistemas sequeiro e irrigado, e também entre cana-planta e cana-soca, com maiores diferenças ocorrendo entre outubro e fevereiro, fase de pleno desenvolvimento vegetativo, e que a diferença reduz no início da estação chuvosa em sistemas de sequeiro.

2.4.1 Duração do ciclo, das fases fenológicas e épocas de plantio da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar pode apresentar dois ciclos, determinados em função do sistema de cultivo e da época de plantio: de 12 meses (cana de ano) ou de 18 meses (cana de ano e meio). A cana oriunda da muda, e que receberá o primeiro corte em 12 meses (precoce) ou 18 meses (tardia), é denominada de cana-planta, conforme apresentado na Figura 1. Após o corte da cana-planta, ocorre a rebrota e inicia-se um novo ciclo, denominado de cana-soca, com duração média de 12 meses. Agora, com ciclos sucessivos de corte/brotação, que perdurarão em função do manejo e da viabilidade econômica (SEGATO, et al., 2006), podendo ser colhida cinco ou mais vezes. Porém, a cada ciclo, devem ser feitos investimentos significativos em insumos e tratos culturais para manter a produtividade em níveis economicamente viáveis (UNICA, 2004).

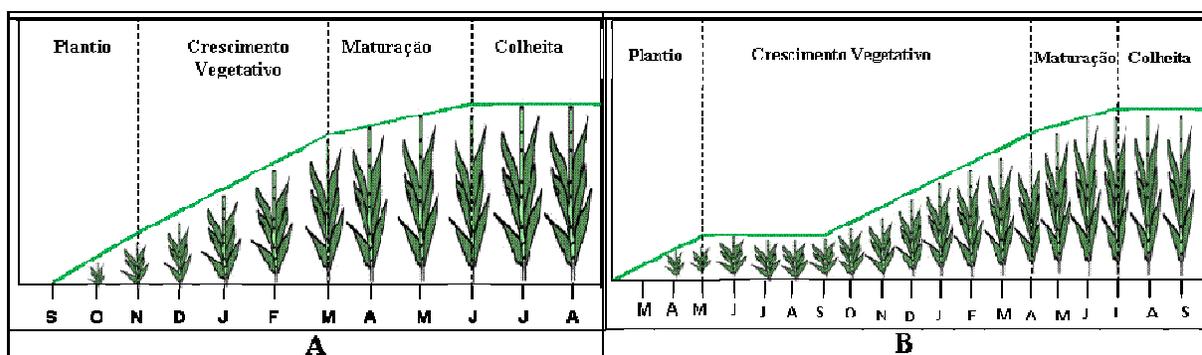


Figura 1. Fases fenológicas da cana-de-açúcar de ciclo de 12 meses (A) e de 18 meses (B).

No Brasil, o plantio da cana-de-açúcar pode ocorrer em dois períodos distintos, variáveis entre as regiões, pelas suas características climáticas, especialmente pela climatologia das chuvas. Nos Estados de São Paulo e Goiás, o primeiro período de plantio ocorre entre os meses de setembro e outubro, enquanto em Pernambuco, ocorre entre os meses de julho a setembro. Estes períodos coincidem com o início da estação chuvosa e quente e a cultura apresenta um ciclo com duração média de 12 meses (cana de ano).

O segundo período de plantio ocorre entre os meses de janeiro a março, em São Paulo e Goiás. Quando plantada neste período, a cana apresenta ciclo variável de 14 a 21 meses (cana-de-ano-e-meio), conforme o mês de plantio e a época de maturação da variedade. No ciclo de ano e meio, a cana passa por um repouso fisiológico (no inverno), sendo cortada no inverno do ano seguinte, aproximadamente.

A colheita da cana-de-açúcar de ano e de ano e meio, nos Estados de Goiás e São Paulo, ocorre entre os meses de abril e novembro, enquanto, em Pernambuco, ocorrem, normalmente, entre os meses de setembro e dezembro.

2.4.2 Sistema radicular da cana-de-açúcar

Para subsidiar o balanço hídrico da cultura, caracterizar o sistema radicular da cana é de importância fundamental, principalmente quanto à profundidade e distribuição das raízes ao longo do perfil dos solos, pois permite estimar o volume de água a ser explorada pelas plantas.

A cana-de-açúcar possui um sistema radicular diferenciado em relação à exploração das camadas mais profundas do solo quando comparado com o sistema radicular de outras culturas. Por ser uma cultura semiperene e com ciclo de cinco a sete anos, seu sistema radicular se desenvolve em maior profundidade e assim, passa a ter uma relação estreita com o pH, saturação por bases, porcentagem de alumínio e teores de cálcio nas camadas mais profundas do solo (STAUT, 2006).

O sistema radicular da cana-de-açúcar é do tipo fasciculado, bem desenvolvido e distribuído ao longo do perfil do solo. Nos primeiros 30 a 40cm, encontram-se as raízes superficiais ou fibrosas e extremamente absorventes (RIPOLI et al., 2007). As raízes de fixação podem superar os 50cm no perfil, e também absorvem água e nutrientes, mas com eficiência menor. As raízes-cordão podem atingir até cinco metros de profundidade e são importantes para absorção de água mais profunda. Ressalta-se que 60% das raízes concentram-se nos primeiros 40cm de profundidade.

Em DALRI (2006), tem-se que as raízes da cana são fasciculadas (em cabeleira), sendo que 60% delas concentram-se nos primeiros 20-30cm do perfil do solo, e 85% nos primeiros 50cm, com poucas variações entre as cultivares. Segundo BALL-COELHO et al. (1992), citado por SEGATO et al. (2006), 62% da matéria seca total das raízes localizam-se nos primeiros 50cm do solo, com 38 a 48% das raízes vivas nos 30cm superficiais.

CASAGRANDE (1991), analisando a distribuição das raízes ao longo do perfil dos solos, identificou que a quantidade máxima de raízes aparentemente vivas ocorreu de dezembro a março, na faixa de 0-20cm; de julho a outubro, entre 20 e 40cm; e de maio a outubro, nos 40 a 60cm de profundidade. Concluiu que, durante as estiagens, as primeiras raízes a morrerem são as superficiais, e que são também as primeiras a se renovarem, quando

do retorno da chuva. KORNDÖRFER et al. (1989) encontrou cerca de 90% das raízes distribuídos na camada de 0 a 40cm do perfil dos solos.

2.4.3 Fatores ambientais e a cana-de-açúcar

Inúmeros são os trabalhos que correlacionam a produtividade das culturas às condições climatológicas. Isso também se verifica em relação à cana-de-açúcar. Nesse caso, não só a produtividade, mas também a qualidade tecnológica da matéria-prima é fortemente influenciada pela variabilidade climática. A produtividade é função da produção de biomassa que, por sua vez, varia de forma diretamente proporcional aos índices de precipitação pluviométrica (SANTOS, 1981; CECÍLIO, et al, 2003).

No tocante à importância da qualidade da cana para a eficiência industrial, RIPOLI e RIPOLI (2004) destacam alguns fatores “extrínsecos” que merecem ser considerados, tais como chuva, temperatura, umidade relativa do ar, qualidade de terra (tipo de solo), que conferem boa produtividade. Eles afirmam que a chuva e a alta umidade do ar elevam o tempo de queima/corte, aumentam a aderência de terra no colmo e promovem a contaminação bacteriana da cana colhida. Estes autores também afirmam que os solos argilosos aderem mais à cana que os solos arenosos e que esta aderência à cana colhida altera a cor e a pureza do açúcar e reduz o rendimento da destilaria. Ainda, segundo eles, em regiões com temperaturas mínimas elevadas durante a safra, ocorre elevação da atividade microbiana, causando a deterioração da cana.

Segundo RIPOLI et al. (2007) ambiente de produção é o conjunto das interações dos atributos dos solos com as condições climáticas locais. Os diferentes ambientes são determinados pelas condições físico-hídricas, morfológicas, químicas e mineralógicas dos solos, associadas com as variáveis do clima como precipitação pluviométrica, temperatura, radiação solar, evaporação e ventos; e pelo manejo adequado da camada arável (preparo, correção, adubação e controle de pragas e ervas daninhas).

PRADO (2005) considerou a água disponível, seguida das condições químicas dos solos, como sendo os determinantes principais do ambiente de produção da cana-de-açúcar. CASAGRANDE (1991), além da disponibilidade hídrica, acrescenta temperatura e intensidade de luz.

2.4.3.1 Efeito da temperatura e luminosidade

Considerando a característica C4 da cana-de-açúcar, o comprimento do dia é um elemento climático de grande importância, o que permite a ela um aproveitamento maior da energia luminosa no processo da fotossíntese, e consequente acúmulo de matéria seca, os fotoassimilados. O comprimento do colmo aumenta com o comprimento do dia, em geral, com valor ideal de 10 a 14 horas (BARBIERI et al., 1981; citado por CASAGRANDE, 1991).

A cana-de-açúcar apresenta potencial máximo de produção quando, em sua fase vegetativa, a temperatura encontra-se entre 22°C e 30°C. O crescimento em temperaturas inferiores a 20°C é muito reduzido e paralisado aos 10°C. Para germinação, o ótimo está em 32°C (BARBIERI et al., 1979). Segundo FAUCONIER e BASSEREAU (1975), citado por ALFONSI et al. (1987), abaixo de 25°C, e superior a 35°C, o crescimento é lento; sendo máximo entre 30 e 34°C. BACCHI e SOUZA (1978), citado por ALFONSI et al. (1984), apontam os limites de crescimento entre 19°C e 18°C para condições não-irrigadas e irrigadas, respectivamente.

Segundo SEGATO et al. (2006), para ter uma colheita rentável, a cana precisa de um período quente e úmido para brotar, emergir e perfilhar; e outro, relativamente seco e/ou frio, para acumular sacarose. Assim, requer temperaturas altas (30°C) na fase inicial; entre 25 e 30°C na fase de crescimento vegetativo; e média mensal, no mês mais frio, abaixo de 21°C.

2.4.3.2 Necessidades hídricas da cana-de-açúcar

Dentro dos ambientes de produção da cana, a água é o principal elemento climático, responsável pela variabilidade de produtividade da cultura. Quando limitante, reduz significativamente a produtividade até mesmo em solos mais férteis (eutróficos). Do contrário, viabiliza o cultivo até em solos distróficos, ácidos, mesoálicos e álicos (PRADO, 2005).

A cana-de-açúcar absorve grandes quantidades de água para suprir suas necessidades fisiológicas. Em uma dada fase de seu desenvolvimento (estádio fenológico), 70% do seu peso pode ser representado pela água. Dentro de sua família botânica (gramíneas/poácea), a cana a cana é a espécie que apresenta a maior capacidade de absorção de água pela folhas, com aproveitamento do orvalho e da chuva interceptada pelas folhas (SEGATO et al., 2007).

A quantidade de água exigida pela cultura varia, em função do comprimento do ciclo, de 1500 mm a 2500 mm durante o período de crescimento. Porém, para completar o ciclo vegetativo, a cana requer um período de déficit hídrico ou térmico a fim de acumular sacarose em seus colmos (RUDORFF e BATISTA, 1988; JOAQUIM, 1998). A relação ente o consumo de água e a produtividade obtida da variedade RB72454 está ilustrada na Figura 2. Observa-se produtividades aproximadas de 155 t/ha para consumo entre 1500 e 1600 mm de lâmina total de água.

Segundo THOMPSON (1976), citado por SEGATO et al. (2006), para a cana-de-açúcar, o primeiro estágio é o mais sensível à deficiência hídrica. ROSENFELD (1989) especifica que o período mais crítico para a cana plantada em outubro (no Centro-Sul) vai do quarto ao oitavo mês de idade, e que a maior redução na produção é provocada por secas durante o verão, com a cana na idade de quatro a oito meses.

O estresse hídrico resulta da combinação dos fatores do solo, da planta e da atmosfera, que, juntos, controlam a taxa de absorção e perda de água pela cana. Assim, a estimativa da evapotranspiração é um meio importante para a previsão da produção agrícola.

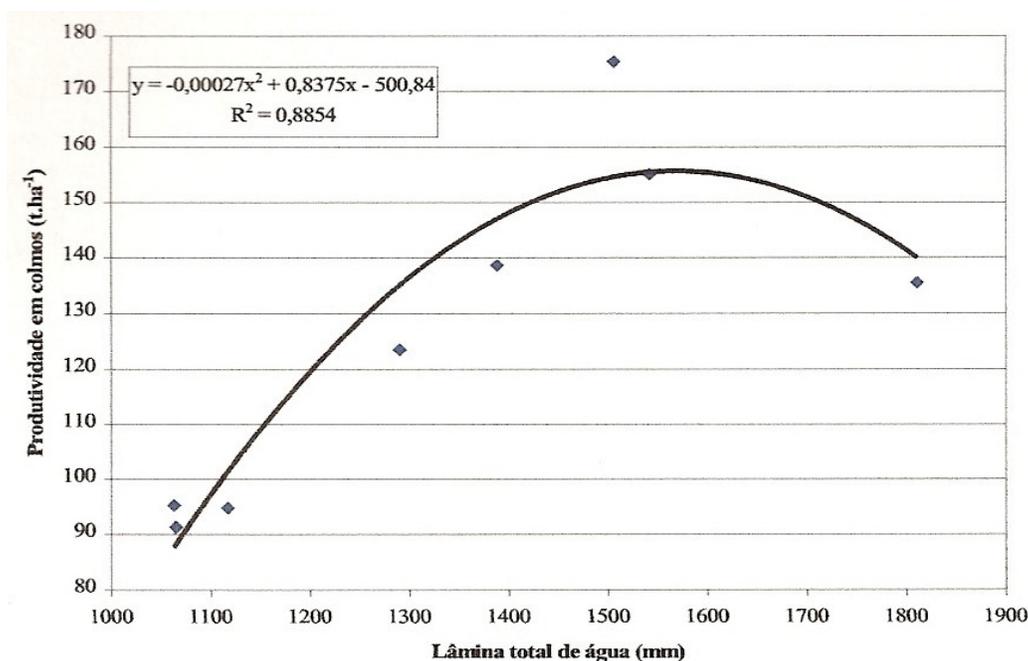


Figura 2. Produtividade da cana-de-açúcar em colmos, em função da lâmina total de água, para variedades RB72454 (rendimento agrícola). Fonte: SALASSIER, 2008.

A evapotranspiração da cultura (ETc) pode ser obtida com métodos de estimativa baseados em variáveis climáticas. Normalmente, faz-se a estimativa da evapotranspiração de referência (ETo) que, multiplicada pelo coeficiente de cultura específico para cada fase de cultivo (Kc), resulta na evapotranspiração da cultura, como mostra a Equação 7.

$$ETc = ETo * Kc \dots\dots\dots (7)$$

em que:

ETc é a evapotranspiração da cultura;

ETo é a evapotranspiração de referência; e

Kc é o coeficiente de cultura.

Quanto à ETc, CASAGRANDE (1991) cita que BARBIERI et al. (1981), utilizando um evapotranspirógrafo, encontrou valores entre 0,5 a 6,03 mm/dia da emergência à fase de pico (novembro), decaindo para 2,8 mm/dia no início da maturação. Relata, ainda, que obteve os valores máximos, mínimos e médios, determinados em campo, de 4,5, 0,5 e 2,5 mm/dia. SCARDUA (1985) encontrou os valores máximos, mínimos e médios de 4,4, 2,2 e 3,2 mm/dia, medidos em cana-planta. Para SALASSIER (2008), a demanda evapotranspirométrica apresenta variação temporal e espacial, e tem variado de 2,0 a 6,0 mm/dia.

Em Alagoas, LIRA et al. (2007) estimaram a ETc em cana planta entre 1180 mm e 1950 mm no ciclo, utilizando nos cálculos, Kc “Dual” e “Único”, respectivamente. SANTOS et al. (2007) verificaram que a cana-de-açúcar não teve seu ciclo e necessidades hídricas atendidas em regiões que apresentavam média de chuva anual inferior a 1500 mm, não atendendo a sua demanda na estação de crescimento.

Devido ao início das chuvas, aumento da intensidade luminosa e, também, da temperatura, a fase de maior desenvolvimento da cultura acontece de outubro a abril, com pico de crescimento por volta de dezembro a abril. Considerando-se esse grande período de desenvolvimento, pode-se constatar que, para cana-de-ano e cana-soca, a fase de maior desenvolvimento ocorre na primeira metade do grande período (outubro a janeiro). Já para cana-de-ano-e-meio, isto acontece de janeiro a abril (CASAGRANDE, 1991).

A queda na produtividade da cana-de-açúcar, com o passar dos cortes, é também atribuída à superficialidade progressiva do sistema radicular, ou seja, na medida em que o

sistema radicular encontra-se, a cada corte, menos profundo, acarreta em volume menor de solo explorado e quantidade menor de água extraída (ARGENTON, 2006).

Sobre as relações térmicas e hídricas, CAMARGO et al. (1977) definiu as áreas aptas ao cultivo da cana-de-açúcar como sendo aquelas que apresentam temperatura média anual (T_a) superior a 20°C e deficiência hídrica anual (D_a) inferior a 200 mm. No trabalho de WALDHEIM et al. (2006), considerou-se $T_a > 21^\circ\text{C}$, $D_a < 140$ mm e precipitação média anual (PP_a) ≥ 1200 mm. CECÍLIO et al. (2003) considerou $D_a < 200$ mm e $T_a > 22^\circ\text{C}$.

2.4.3.3 Solos

A cana-de-açúcar é cultivada nos tipos de solos mais variados que estão sob influência de climas diferentes. Isto resulta em vários tipos de ambientes para a produção desta cultura. O solo é apenas um dos componentes de um conjunto de fatores de produção, destacando-se pelo seu papel importante de fornecer suporte físico às plantas, água e nutrientes. Portanto, o conhecimento dos fatores edáficos é importante para estimar o potencial da produção agrícola (LEPSCH, 1987 e DIAS, 1997, citados por MAULE et al. 2001).

A cultura da cana não é muito exigente em solos, contudo, apresenta desenvolvimento melhor naqueles que apresentam boa aeração e boa drenagem (COPERSUCAR, 1988; RUDORFF e BATISTA, 1988). Na prática, em cada tipo de solo, a produção pode reagir de maneira bastante diferenciada nos períodos de carência hídrica, principalmente na rebrota das socas. Como exemplo, em solos mais argilosos, de boa capacidade de retenção hídrica e de porosidade adequada para uma boa movimentação de água no perfil - drenagem e ascensão capilar -, observa-se um dano menor, em condição de estiagem pronunciada (UNICAMP, 1983).

PRADO et al. (2008), estudando a produtividade da cana em Latossolos ácricos sob diferentes condições de disponibilidade hídrica, verificaram que a deficiência hídrica mais acentuada é responsável por produtividades menores. Ainda, os Argissolos com horizonte A menos espessos disponibilizam água por mais tempo para a cana-de-açúcar. Os Nitossolos apresentam valores de disponibilidade menores que estes, porém, maiores que os Latossolos. Os Neossolos Quartzarênicos e Argissolos com horizonte A mais espessos são os que retêm uma quantidade menor de água. Ainda, segundo este autor, independentemente da textura, a

produtividade decresce dos solos eutróficos para os álicos. Verificou que as produtividades variaram de 110 a 91 t/ha em Nitossolo Vermelho eutrófico, e entre 72 e 64t/ha, em Neossolo Quartzarênico .

Muito embora a cana-de-açúcar seja cultivada nos tipos de solos mais diversos, os solos ideais devem ser profundos, bem estruturados, pesados, férteis e com boa capacidade de retenção. Porém, por ser uma planta rústica, ela se desenvolve satisfatoriamente em solos arenosos e menos férteis (AMARAL et al., 2001). Os solos rasos com camadas superficiais impermeáveis ou mal drenados não são aconselhados. Os solos encharcados não possuem aeração suficiente às plantas, dificultando o desenvolvimento do sistema radicular e a assimilação dos nutrientes. Quando excessivamente úmidos, chegam a ocasionar a morte das plantas (UDOP, 2007).

Em São Paulo, as áreas de cultivo de cana ocorrem normalmente nos Latossolos Vermelho e Latossolos Vermelho-Amarelo e, nos últimos anos, com a expansão da cultura na região oeste do Estado, o Argissolo Vermelho-Amarelo tem ganhado importância. Esses solos encontram-se predominantemente em relevo plano a ondulado, são geralmente profundos a muito profundos e normalmente aptos ao cultivo da cana-de-açúcar (OLIVEIRA, 1999).

Os Neossolos Litólicos têm, como característica principal, a reduzida profundidade efetiva, limitando seu uso com agricultura, principalmente, com baixa capacidade de retenção de umidade. O mesmo ocorre para os Gleissolos e Planossolos que, além da pouca profundidade, apresentam drenagem deficiente, sendo seu aproveitamento racional viabilizado por meio de obras de drenagem, inviáveis quando se analisam as grandes extensões que são cultivadas com cana-de-açúcar (KOFFLER e DONZELI, 1987).

Quanto à textura dos solos, a cana-de-açúcar tem se mostrado bastante adaptável, sendo cultivada em solos arenosos até muito argilosos. Segundo dados da COOPERSUCAR (1997), a média de produtividade de quatro cortes obtida em experimento realizado em 13 usinas, seis safras, 17 variedades e 47 tipos de solo, decresce de solos argilosos para solos arenosos. No primeiro, a média de produtividade em solos eutróficos foi de 90 t/ha, enquanto no segundo, de textura arenosa, foi de 70 t/ha.

PRADO et al. (2008) afirma que dados de pesquisa mostram, para uma mesma classe de solo, que a produtividade decresce dos solos eutróficos, os mais férteis, para os álicos (alta saturação por alumínio). Considerando-se somente o Latossolo Vermelho, a produtividade

tende a ser função da fertilidade, sendo os eutróficos mais produtivos (94 t/ha) do que os distróficos (90 t/ha) ou os álicos (87 t/ha). Os solos eutróficos apresentam saturação por bases superior a 50% em profundidade, permitindo às raízes explorar volume de solo maior e com isso, dispor de maior reserva de água. Como consequência, a planta suporta veranicos maiores e absorve mais nutrientes.

Quando os solos de textura arenosa são melhorados quanto à fertilidade do perfil do solo, observa-se que podem atingir produtividades semelhantes à dos argilosos, principalmente quando a textura for arenosa na superfície, e média ou argilosa na sub-superfície (Argissolos) (STAUT, 2006).

A declividade dos solos também é importante na delimitação dos ambientes de produção da cultura da cana-de-açúcar, embora esta seja caracterizada por apresentar relativamente pouca perda de solo por erosão, comparada com culturas como soja, algodão e milho, onde o processo erosivo é a maior causa de degradação das terras (GONÇALVES, 2006).

2.4.3.4 Caracterização físico-hídrica dos solos do Cerrado

Aproximadamente, 85% dos solos do bioma Cerrado são representados pelos Latossolos (45,7%), pelos Neossolos Quartzarênicos (15,2%), pelos Podzólicos (15,1) e pelos Plintossolos (9,0). Dos demais, 7,3% são Litossolos (CAMARGO et al., 1987). De uma maneira geral, baixa densidade, alta permeabilidade, boa aeração e baixa resistência à penetração são as características físico-hídricas desses solos. Mas, com o cultivo e o manejo não adequados, ocorre aumento da densidade e, como consequência, menor permeabilidade e riscos à erosão. Para a planta, observa-se maior resistência à penetração das raízes, com menor perfil de solo para exploração da água. (LUCHIARI Jr. et al., 1985).

Segundo WOLF (1975) e LOPES (1983), citado por ADÁMOLI et al. (1985), a areia e a argila são os componentes principais desses solos. A argila varia de 15 a 80%, enquanto de 10 e 20% são compostos pela fração silte. Ainda, cerca de 2/3 da água disponível está retida na faixa entre 0,1 a 1,0 bar de tensão.

Nem toda a água retida nos solos pode ser utilizada pelas plantas, em função da tensão em que são retidas. Esta relação solo-planta, para a determinação da capacidade de

água disponível para as plantas, pode ser definida através da curva de retenção de água, que deve ser estimada para cada classe de solo, pelos métodos determinados.

SILVA et al. (2003) visando a caracterização físico-hídrica e hidráulica de solos do bioma Cerrados submetidos a diferentes sistemas de preparo, avaliaram as principais propriedades físico-hídricas de solos (densidade, retenção de água e condutividade hidráulica) em sistema plantio direto sob condições de sequeiro e irrigado, e convencional. Os autores observaram tendência de maior capacidade de armazenamento de água nos solos em todos os ambientes cultivados, em relação à mata natural.

RUIZ et al. (2003) analisaram a possibilidade de estimar a capacidade de campo (CC) em Latossolos e Neossolos Quartzarênicos por meio da determinação umidade equivalente (EU), e definiram a Equação 8.

$$CC = 0,081 + 0,888*EU \dots\dots\dots (8)$$

em que:

CC é a capacidade de campo, em kg/kg; e

EU é a umidade equivalente, em kg/kg.

SILVA et al. (2006) considerando arbitrária a determinação do número de pontos para determinação da curva de retenção de água de solos do Cerrado, recomendou oito pontos de tensão, com valores de 1, 3, 6, 10, 35, 84, 611 e 1,515 kPa.

A partir de levantamento de baixa intensidade, BOSCHI et al. (2007) e LOPES-ASSAD et al. (2007) consideram a estimativa da capacidade de água disponível e definiram critérios para a reclassificação de solos e propuseram intervalos de classes de valores de CAD para aplicação em estudos de zoneamento agrícola do Brasil.

REATTO et al. (2007), analisando as propriedades hidráulicas do horizonte diagnóstico de Latossolos do Cerrados (Bw), especialmente a distribuição do tamanho das partículas e composição mineralógica, observaram que o volume total de poros (V_p) explicou uma proporção da variância da água retida, que diminuiu com o potencial de água. Em síntese, as propriedades de retenção de água e condutividade hidráulica variam, principalmente, de acordo com os teores de argila e desenvolvimento de grandes poros, sem qualquer ligação estreita com a mineralogia da fração argila.

Em modelagem agroclimática, a capacidade de retenção de água dos solos é estimada a partir de funções de pedotransferências. Vários estudos têm mostrado que os solos tropicais,

fortemente intemperizados, possuem propriedades de retenção de água diferentes dos solos de regiões de clima temperado, devido a diferenças na mineralogia e textura (silte). Assim, as funções de pedotransferência (FPT), derivadas dos dados da região de solos de clima temperado (FPT temperado), apresentam limitações quando aplicada aos solos tropicais (TOMASELLA et al., 2000). Este autor ajustou novas FPT aplicando técnicas de regressão múltipla para obter os coeficientes que relacionam os parâmetros de van Genuchten para os dados básicos de solos, obtendo desempenho melhor.

Utilizando curvas de retenção de água da região nordeste do Brasil, BARROS (2010) afirma que o desempenho de estimativas do teor de água do solo é melhor para a FPT desenvolvida com teores granulométricos, matéria orgânica e densidade do solo, do que utilizando apenas teores granulométricos. O autor também postula uma FPT geral, independente da classe de solo, pois geralmente apresentam resultados aproximados. Ainda, que em simulações de rendimento agrícola, a FPT apresentam baixa capacidade preditiva, mas não difere muito em relação aos demais métodos usados.

LOPES-ASSAD et al. (2001) ajustaram modelo, aplicável em escala regional, para estimar, por meio de funções de pedotransferência (FPTs), os limites superior (-10 kPa) e inferior (-1.500 kPa) de água disponível, a partir do conteúdo de areia total, que, segundo eles, constitui um dado de fácil determinação e disponível nos levantamentos de solos.

2.5 *Impacto das mudanças climáticas globais na produção de cana-de-açúcar*

Atualmente, a maior frequência de ocorrência dos fenômenos naturais extremos, com prejuízos sociais e econômicos, fez com que a sociedade, especialmente o governo, despertasse atenção maior para o tema das mudanças climática globais.

O último relatório do IPCC (2007) apresenta projeções de elevação das temperaturas entre 1,8°C e 4,0°C, em média e na escala global, nos próximos 100 anos. No Brasil, as projeções de aumento alcançariam valores entre 4°C e 8°C, na Amazônia e no Pantanal. As projeções dos modelos sobre anomalias nas chuvas ainda são incertas, sendo que para a região Centro-Oeste, algumas apontam para maior frequência de ocorrência de fenômenos extremos, como chuvas intensas e concentradas nos meses de dezembro a fevereiro (MARENGO, 2007).

Existem, atualmente, vários modelos apresentado projeções em diferentes resoluções espaço-temporais. O sistema Precip, baseado no sistema do Centro Hadley de modelagem do

clima regional, apresenta estimativas de alta resolução espacial (aproximadamente 50km) sobre mudança climática para diversas regiões (PRECIS, 2001). É composto por um modelo geral, executado em escalas horizontais de 300 km, e um modelo regional, para resoluções ampliadas de até 50 km, aumentando a precisão da representação da superfície (ALVES e MARENGO, 2009).

Sobre o efeito dessas mudanças na agricultura brasileira, os estudos são limitados. Segundo ASSAD et al. (2008), o aumento da temperatura causará a elevação da perda de água por evapotranspiração e maior consumo de água pelas plantas. Porém, o efeito na produção de cana-de-açúcar poderá ser benéfico, mesmo na região Centro-Oeste, que apresenta fortes restrições hídricas em boa parte do ano.

Utilizando modelo de simulação de crescimento e produção de cana-de-açúcar, MARIN et al. (2007, 2009) observaram tendência de elevação da produtividade média em São Paulo, com crescimento de até 6% em comparação com os padrões atuais. Enquanto EVANGELISTA et al. (2009), simulando a produtividade em três localidades de Goiás, observaram tendência de elevação da produtividade média em até 4%. Porém, em ambientes com maiores restrições hídricas, obteve redução de até 6%. Por outro lado, analisando possíveis alterações de temperatura, precipitação, insolação e concentração de CO₂ na atmosfera na região de Piracicaba, SP, GOUVÊA et al. (2009) encontraram índices bem superiores. Segundo os autores, o aumento da temperatura acarretará no aumento da produtividade potencial em cerca de 15% em relação à condição atual em 2020, de 33% em 2050 e de 47% em 2080; a produtividade real aumentará cerca de 12% em relação à condição atual em 2020, de 32% em 2050 e de 47% em 2080; e as alterações na radiação solar e na chuva terão menores impactos na produtividade.

Essas incertezas implicam na necessidade de estudos detalhados com modelagem, visando a avaliação consistente do impacto das mudanças climáticas sobre a agricultura, especialmente sobre a cana-de-açúcar, pela sua importância econômica e social para o Brasil.

O modelo DSSAT/CANEGRO também permite alterações de alguns parâmetros ambientais, especialmente das variáveis climáticas, o que possibilita estimar e simular o impacto de mudanças futuras dessas variáveis na produção das culturas.

2.6 Geoprocessamento e métodos de estimação espacial

Na produção agrícola, os sistemas de informações geográficas (SIG) podem ser uma ferramenta de grande utilidade para avaliações da variação espacial dos elementos e fatores ambientais que diferenciam as regiões produtoras (CÂMARA e MEDEIROS, 1998).

Normalmente, através dos SIGs, são utilizados métodos de interpolação clássicos como a média móvel ponderada, que tem como característica gerar superfícies de continuidade espacial sem considerar a dependência ou a correlação entre os dados amostrados, nem possibilitam o acesso aos erros relativos aos valores estimados. Isto resulta na ocorrência de mudanças bruscas de classes de valores e de áreas localizadas, circulares e concêntricas, que, certamente, não representam com fidelidade a distribuição espacial de um fenômeno natural, como a chuva. O uso desta informação pode trazer alguns inconvenientes (GOOVAERTS, 1997).

Estimadores matemáticos avançados, baseados na geoestatística, têm sido incorporados aos SIG para aplicações diversas e se apresentam como ferramentas importantes para a elaboração de trabalhos com menores índices de erros espaciais. Tais estimadores permitem, por exemplo, a geração de mapas de propagação de erros e mapas de risco ou incerteza a partir da aplicação de operadores de frequência e de probabilidades aos resíduos, obtidos pela diferença entre os valores medidos e os estimados (GOOVAERTS, 1997; ISSAKS e SRIVASTAVA, 1989). São importantes na análise da propagação de incertezas e, conseqüentemente, na construção de cenários, quando transformados em medidas de risco. Essas últimas, utilizadas quando esses modelos objetivam o planejamento de uma intervenção ambiental em que as tomadas de decisões podem ser orientadas pelo risco estimado (FUCKS, 1998).

Os diferentes métodos disponíveis em SIG objetivam mapear a variação de um fenômeno em uma determinada região. Entretanto, nem todos os modelos de estimativas propostos respondem a questões básicas relacionadas à forma, tamanho e orientação do domínio a ser considerado na interpolação, nem tampouco, fornecem informações a respeito da incerteza associada aos valores estimados (BURROUGH e MCDONNEL, 1998).

3. MATERIAL E MÉTODOS

Dentre os diversos modelos de simulação disponíveis para estimar o crescimento e a produtividade das culturas agrícolas através das interações entre as características do solo, do clima, e da fisiologia e manejo das plantas, existem os classificados como empíricos e simples e os mecânicos e complexos. Normalmente, os modelos classificados como complexos incorporam um número maior de funções e processos e permitem estimativas mais precisas dos indicadores de produção (MARIN et al., 2000; ROLIM et al., 2001 e INMAN-BAMBER, 1993). Para isso, demandam uma quantidade maior de variáveis de entrada, em relação aos modelos simples, não disponíveis normalmente em todas as localidades de interesse. A seguir, está descrita a metodologia de aplicação de modelos agrometeorológicos na produção de cana-de-açúcar em ambientes de Cerrado, adotada neste trabalho.

3.1 *Delimitação e caracterização da área estudo*

O Estado de Goiás e o Distrito Federal estão localizados na região Centro-Oeste do Brasil, área central dos Cerrados, entre os paralelos 13 e 19 graus sul, e os meridianos 46 e 53 graus oeste. Possuem, juntos, uma área aproximada de 348.679,9km², conforme ilustrado na Figura 3.1.

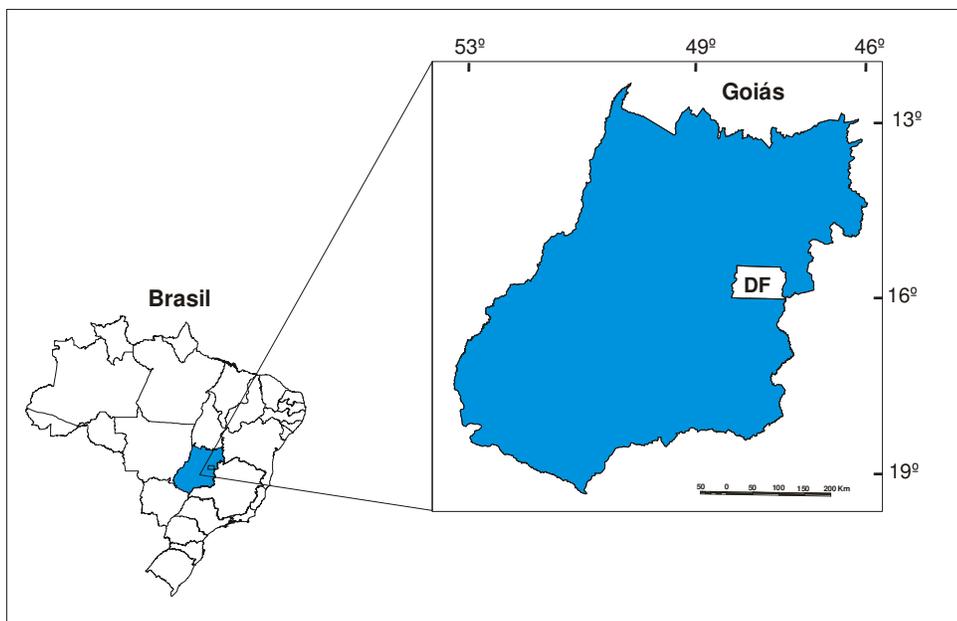


Figura 3.1. *Localização geográfica da área de estudo.*

A escolha da área deveu-se ao fato do Estado de Goiás e o Distrito Federal ocuparem a área central do Bioma Cerrado, apresentando, ainda, grandes extensões de áreas com potencial elevado de expansão da cultura de cana-de-açúcar, e por apresentar ambientes de produção diversos, devido às variações e limitações hídricas e variabilidades de solos.

3.1.1 Caracterização climática de Goiás e do Distrito Federal

A dinâmica atmosférica da América do Sul determina, nesta região, um padrão climático do tipo Tropical Chuvoso de Savana (AW) e, em determinadas localidades, o tipo Temperado Chuvoso e Quente (CW), seguindo a classificação de KÖPPEN (MONTEIRO, 1968). NIMER (1972) classifica o clima desta região como tropical quente e sub-úmido (Cw).

O clima do Distrito Federal e de Goiás apresenta dois períodos sazonais característicos e distintos: um período quente e chuvoso, que se estende desde outubro até março, quando as temperaturas são elevadas e concentra mais de 80% da precipitação acumulada do ano; e outro, seco e frio, que vai de abril a setembro, com temperaturas amenas e pluviosidade reduzida (inferior a 50 mm/mês), causando impactos nas atividades produtivas, limitando a agricultura e a geração de energia elétrica, entre outras. A distribuição espacial dos totais anuais médios da precipitação pluviométrica pode ser observada na Figura 3.2, obtido a partir de 214 postos pluviométricos.

Para elaboração do mapa de temperatura média anual, apresentado na Figura 3.3, aplicou-se o modelo de regressão linear múltipla, ajustado por SILVA, et al. (2008), descrito na Equação 9.

$$T = \beta_0 + \beta_1 \times lat + \beta_2 \times alt \dots\dots\dots (9)$$

em que:

T é a temperatura média anual;

lat são os valores das latitudes em graus decimais (positivo);

alt são os valores das altitudes em metros;

β_0 , β_1 e β_2 são os coeficientes de ajuste da equação, estimados em 29,035, -0,139 e -0,005, respectivamente.

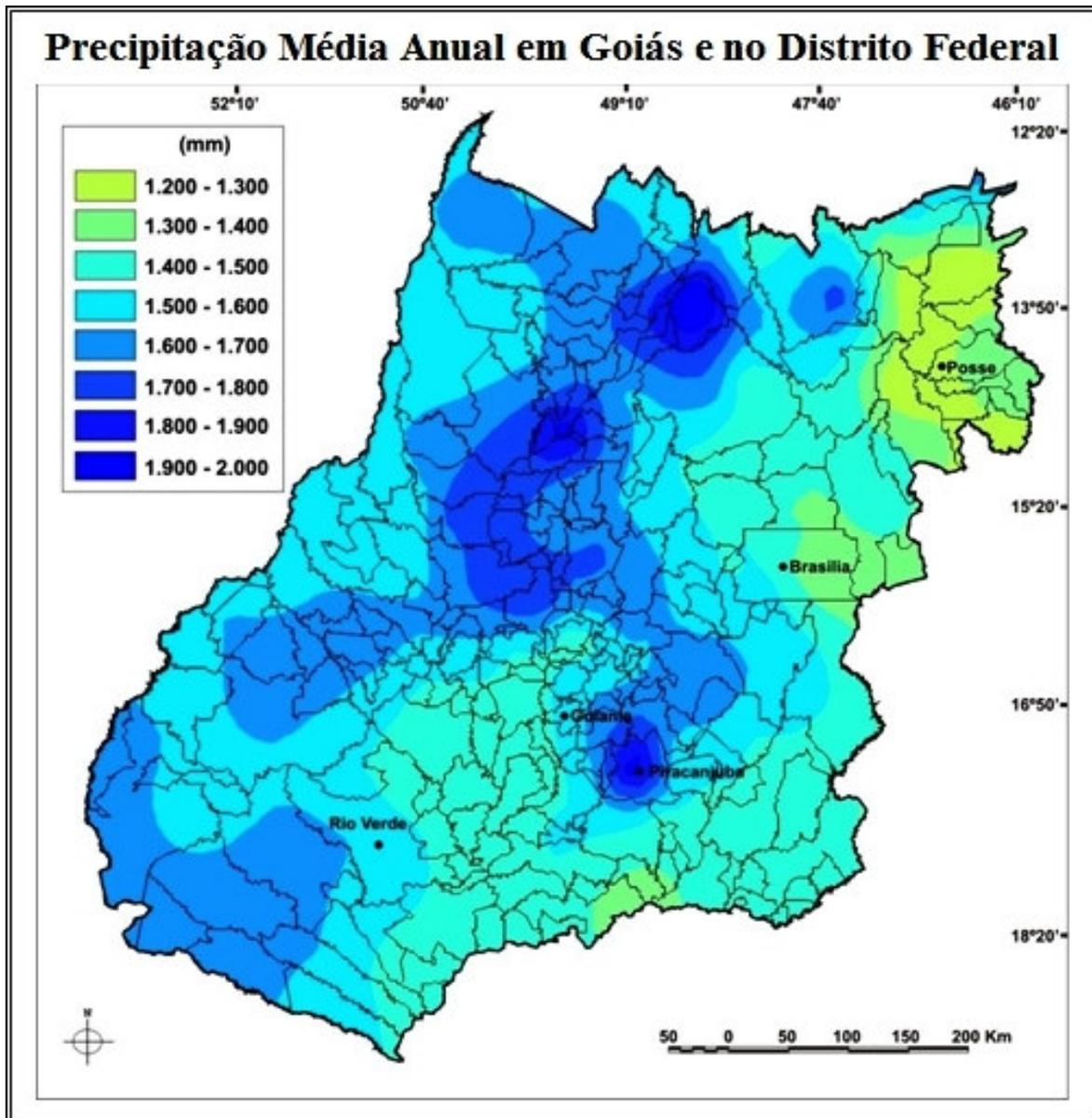


Figura 3.2. Precipitação pluviométrica média anual no Estado de Goiás e Distrito Federal, obtida por krigagem ordinária. Fonte: EVANGELISTA (2004).

O processo cartográfico para espacialização da temperatura média anual foi baseado na aplicação de funções de Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico (LEGAL), disponível no sistema geográfico de informações (SGI) SPRING/INPE (CÂMARA, et al., 1987). Ao SGI, foram incorporados dados altimétricos obtidos do arquivo GTOPO30 disponibilizado pelo United States Geological Survey (USGS), e de latitude, ambos na forma de grade regular com resolução espacial de 90 metros.

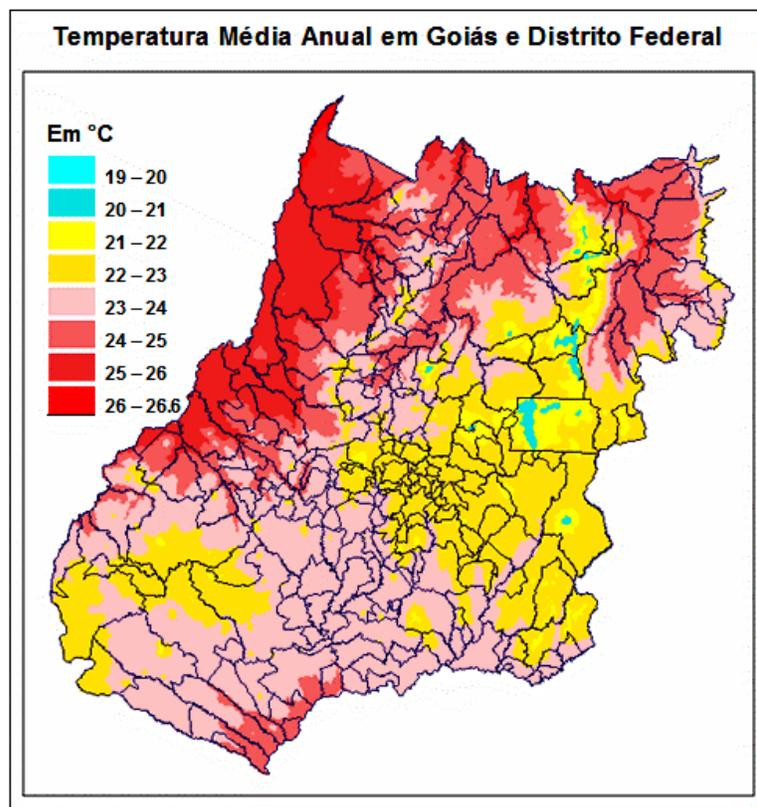


Figura 3.3. Temperatura média anual (em °C) do Estado de Goiás e Distrito Federal estimada por modelo de regressão múltipla, ajustado por SILVA et al. (2008).

As menores temperaturas médias anuais, de 19 a 23°C, predominam na faixa centro-leste do Estado, incluindo o Distrito Federal, e no extremo sudoeste. As maiores temperaturas ocorrem no extremo norte e no noroeste de Goiás, com temperaturas entre 24 a 26,6°C. Nas demais áreas (centro, sudoeste e extremo sul) ocorrem temperaturas entre 23 e 24°C.

A radiação solar é outro componente climático de importância fundamental para o crescimento e produção das culturas agrícolas. Nos modelos agrometeorológicos, esta variável é incorporada e modelada para simular os processos de fotossíntese e balanço hídrico das culturas. No processo de fotossíntese, a planta utiliza a energia solar para oxidar a água, assimilar o dióxido de carbono (CO₂), liberar oxigênio e, assim, produzir grandes compostos de carboidratos (biomassa), sobretudo, açúcares. Daí, a importância da análise espaço-temporal da incidência da energia solar no contexto desse estudo.

A radiação solar global média anual foi obtida a partir dos dados diários medidos, ou estimados por meio da insolação (horas de brilho solar), para as 39 estações meteorológicas utilizadas no trabalho e apresentadas na Tabela 3.3.

3.1.2. Caracterização geomorfológica do Estado de Goiás e do Distrito Federal

As feições do relevo podem não ser o único determinante do clima e, especialmente, na regionalização da precipitação pluviométrica, mas, quando analisadas conjuntamente com os demais parâmetros atmosféricos, podem auxiliar no seu entendimento e contribuir para a sua caracterização espaço-temporal. Ou seja, juntos definem a geografia do clima e da pluviometria da região. Neste sentido, destacam-se as características dos compartimentos geomorfológicos principais da região de Goiás e do Distrito Federal.

O Estado de Goiás e o Distrito Federal apresentam variações altimétricas médias aproximadas de 200 a 1400 m, conforme apresentado na Figura 3.4. O compartimento Morfológico Noroeste (I) apresenta altimetria entre 200 e 500 m, grandes áreas de relevo aplainado a colinoso suave ondulado e direção preferencial sudoeste-nordeste.

A região centro-norte/noroeste (II) apresenta altimetrias de 200 a 1400 m, com grande diversidade de formas de relevo que ocorrem desde a escala local até a regional, e seguem uma tendência de direção orientada no sentido sudoeste-nordeste. Neste compartimento morfológico, está inserida a Depressão Interplanáltica do Rio Paranã.

No compartimento morfológico sudeste (III) está inserido o Planalto Central Brasileiro, com média altimétrica de 1000 m, e a Depressão Interplanáltica do Rio Paraíba ao sul, com altitudes médias de 500 m. Esta conformação resulta em grandes desníveis em forma de degraus estruturais escalonados.

Por último, o compartimento morfológico sudoeste (IV), constituído por grandes áreas de chapadões de topografias aplainadas em altitudes de 500 a 1000 m. Esta é a região de Goiás onde se encontram as grandes áreas produtoras de grãos, principalmente de soja e milho, onde avança a cana-de-açúcar, com destaque para os municípios de Rio Verde e Montividiu.

3.1.3. Caracterização dos solos do Estado de Goiás e do Distrito Federal

O mapa de solos foi obtido do Zoneamento Agroecológico da Cana-de-açúcar no Brasil para a Produção de Etanol e Açúcar: Seleção de Terras Potenciais para a Expansão do seu Cultivo (EMBRAPA, 2009). A base original pertence ao RadamBrasil, sendo que para o referido ZEE Cana, foram feitos ajustes de campo para trazer a escala do Radam para

1:250.000. Ressalta-se que RadamBrasil foi executado na escala de 1:250.000 e publicada em 1:1.000.000.

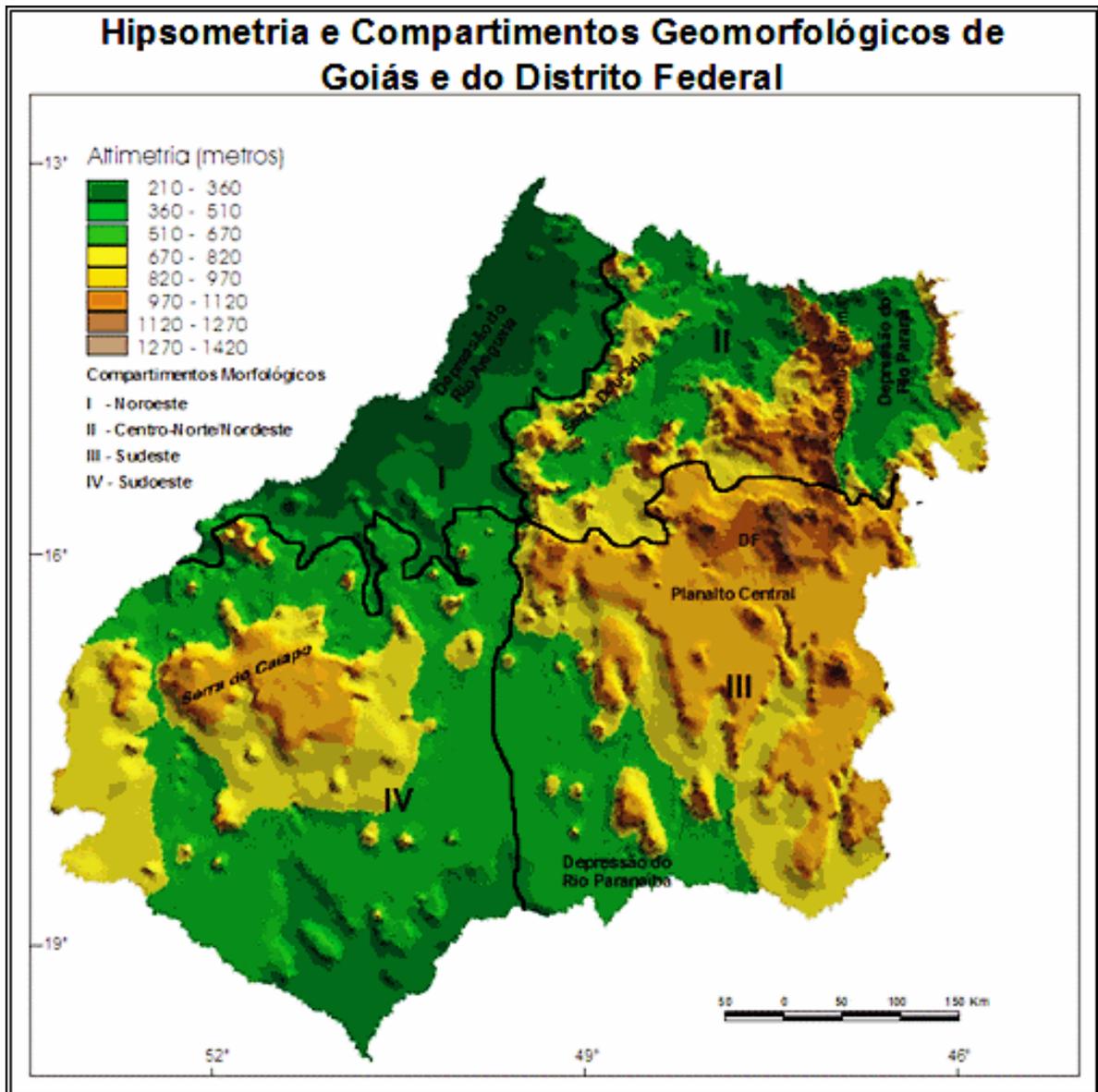


Figura 3.4. Hipsometria do Estado de Goiás e Distrito Federal, com exagero e alteração de azimuth para visualização em 3D, contendo a compartimentação geomorfológica adaptada de Campos et al. (2002).

Na Figura 3.5, está apresentada a distribuição espacial dos grandes grupos de solos do Estado de Goiás e do Distrito Federal. Observa-se predomínio de ocorrência dos Latossolos, com 53,2% da área, especialmente nas regiões centro e sul do Estado. Em seguida, os

Cambissolos ocupam 19% e os Argissolos com 11% da superfície da região. Demais observações podem ser obtidas na Tabela 3.1.

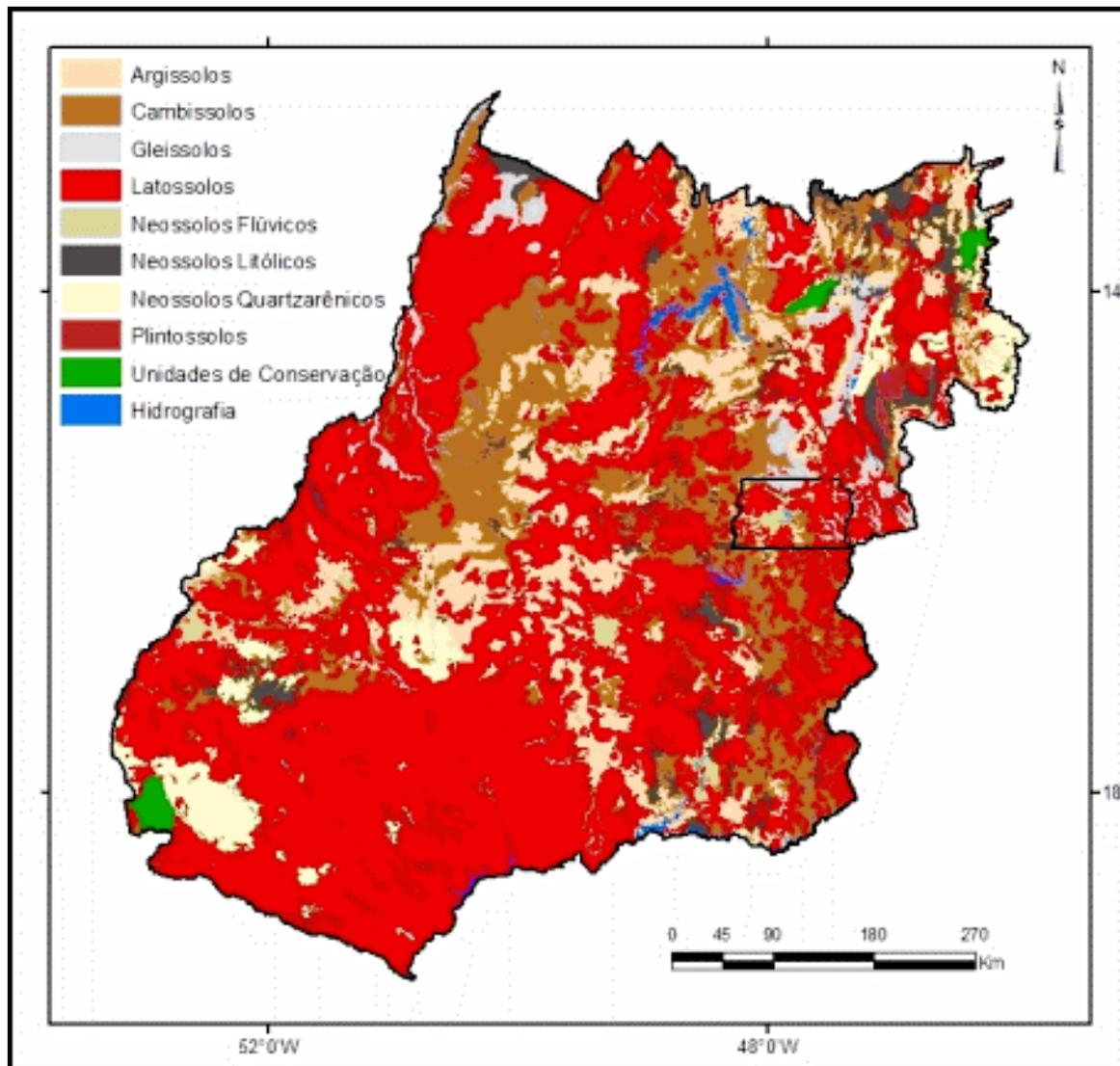


Figura 3.5. Solos do Estado de Goiás e Distrito Federal, na escala de 1:250.000. Fonte: EMBRAPA (2009), obtido originalmente da base RadamBrasi (1983).

Tabela 3.1. Extensão das classes de solos do Estado de Goiás e do Distrito Federal.

CLASSE_SOLOS	ÁREA	
	(ha)	(%)
Latossolos	18.479.386	53,2
Cambissolos	6.530.849	18,8
Argissolos	3.971.800	11,4
Neossolos Litólicos	2.352.105	6,8
Neossolos Quartzarênicos	1.387.860	4,0
Gleissolos	961.415	2,8
Neossolos Flúvicos	523.786	1,5
Plintossolos	142.433	0,4

Fonte: Levantamento de solos da EMBRAPA (2008), escala 1:250.000.

O mapa de solos do Estado de Goiás e do Distrito Federal, apresentado na Figura 3.5 foi reclassificado por estudantes de Engenharia Agrônoma da Universidade de Federal de São Carlos (SP)¹ a partir de levantamento de baixa intensidade, considerando a capacidade de água disponível de cada classe de solo. Adotou-se a metodologia descrita por LOPES-ASSAD et al. (2007), e Instrução Normativa número 2 Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (BRASIL, 2009), com objetivo de caracterizar a ocupação dos solos em função do comportamento físico-hídrico, ou seja, da capacidade de armazenar e disponibilizar água para as culturas. Os resultados estão ilustrados na Figura 3.6 e as estimativas de áreas estão apresentadas na Tabela 3.2. Observa-se que 55,6% dos solos de Goiás e do Distrito Federal apresentam alta capacidade de retenção de água, seguido dos solos com capacidade média, ocupando 36,4% da superfície da região. Apenas 4,3% dos solos apresentam baixa capacidade de retenção de água e 2,1% não são indicados para exploração com agricultura.

Seguindo a metodologia de LOPES-ASSAD et al. (2007), foram adotados os critérios seguintes para agrupamento dos solos:

- a) Solos Tipo 0: capacidade muito baixa de retenção de água ($CAD < 0,4$ mm/cm de solo);
- b) Solos Tipo 1: capacidade baixa de retenção de água ($0,4$ mm/cm $< CAD < 0,7$ mm/cm de solo);
- c) Solos Tipo 2: capacidade média de retenção de água ($0,7$ mm/cm $< CAD < 1$ mm/cm de solo); e

¹ Eduardo de Moraes Pavão e Ricardo Fernandes Luna

d) Solos Tipo 3: capacidade alta de retenção de água ($CAD > 1 \text{ mm/cm}$ de solo).

De maneira geral, observa-se na Figura 3.6 que os solos, em função de suas capacidade de retenção de água, apresentam-se espacialmente agrupados, com predominância dos solos Tipo 3, na metade centro-sul, e dos solos Tipo 2, na metade centro-norte de Goiás e no Distrito Federal.

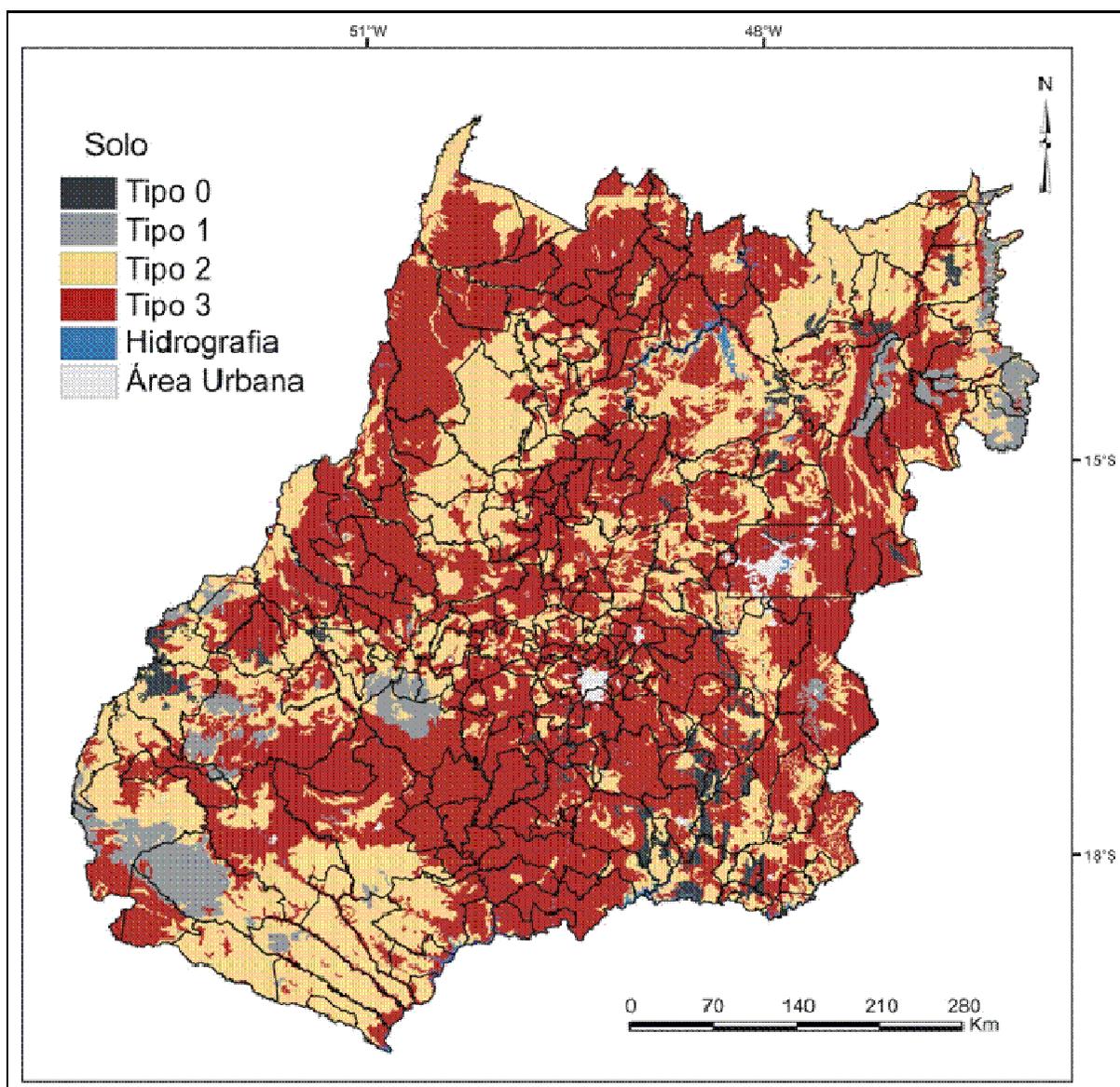


Figura 3.6. Agrupamento de solos do Estado de Goiás e Distrito Federal, segundo a quantidade de água disponível para plantas.

Tabela 3.2. Áreas dos solos mapeados no Estado de Goiás e no Distrito Federal, em escala 1:250.000, estimada por meio de um sistema de informações geográficas.

SOLO_TIPO	ÁREA	
	(ha)	(%)
Tipo 0: Inaptos para agricultura	712.644	2,1
Tipo 1: Baixa Capacidade de Retenção de Água	1.485.248	4,3
Tipo 2: Média Capacidade de Retenção de Água	12.630.138	36,4
Tipo 3: Alta Capacidade de Retenção de Água	19.281.769	55,6

3.1.4 Caracterização da cobertura vegetal natural do Estado de Goiás e do Distrito Federal

EITEIN (1993) descreveram a cobertura natural de cerrado como vegetação de plantas lenhosas de aparência característica, com troncos e galhos de árvores e de arbustos de caule grosso, com 2cm ou mais de diâmetro na base, torcidos, na maior parte, isto é, com dobras numerosas, resultando em aparência tortuosa.

Até recentemente, toda a vegetação do Estado de Goiás, incluindo o Distrito Federal, era caracterizada como cerrado, no sentido lato. Mas estudo de SANO et al. (2009), apresentado na Figura 3.7, classifica uma faixa localizada no extremo sul do Estado, na divisa com Minas Gerais, como remanescente de Mata Atlântica, com 3% da cobertura do Estado. Demais 97% da superfície é coberta por vegetação de cerrado, sendo que 44% deste total permanece coberta pela vegetação nativa.

3.2 Coleta de dados, avaliação e sistematização

Tendo em vista a existência de numerosos trabalhos técnico-científicos, contendo dados e informações relevantes para estudos em agroclimatologia, eles foram consultados para levantamento de parâmetros edáficos, climáticos e socioeconômicos, essenciais para caracterizar e delimitar as áreas de ocupação da cana-de-açúcar baseadas no conceito de ambientes e eficiência de produção.

As informações levantadas sobre solos, clima e a cultura da cana-de-açúcar foram analisadas e organizadas na forma de gráficos, tabelas e, quando possível, georreferenciadas e apresentadas na forma de mapas.

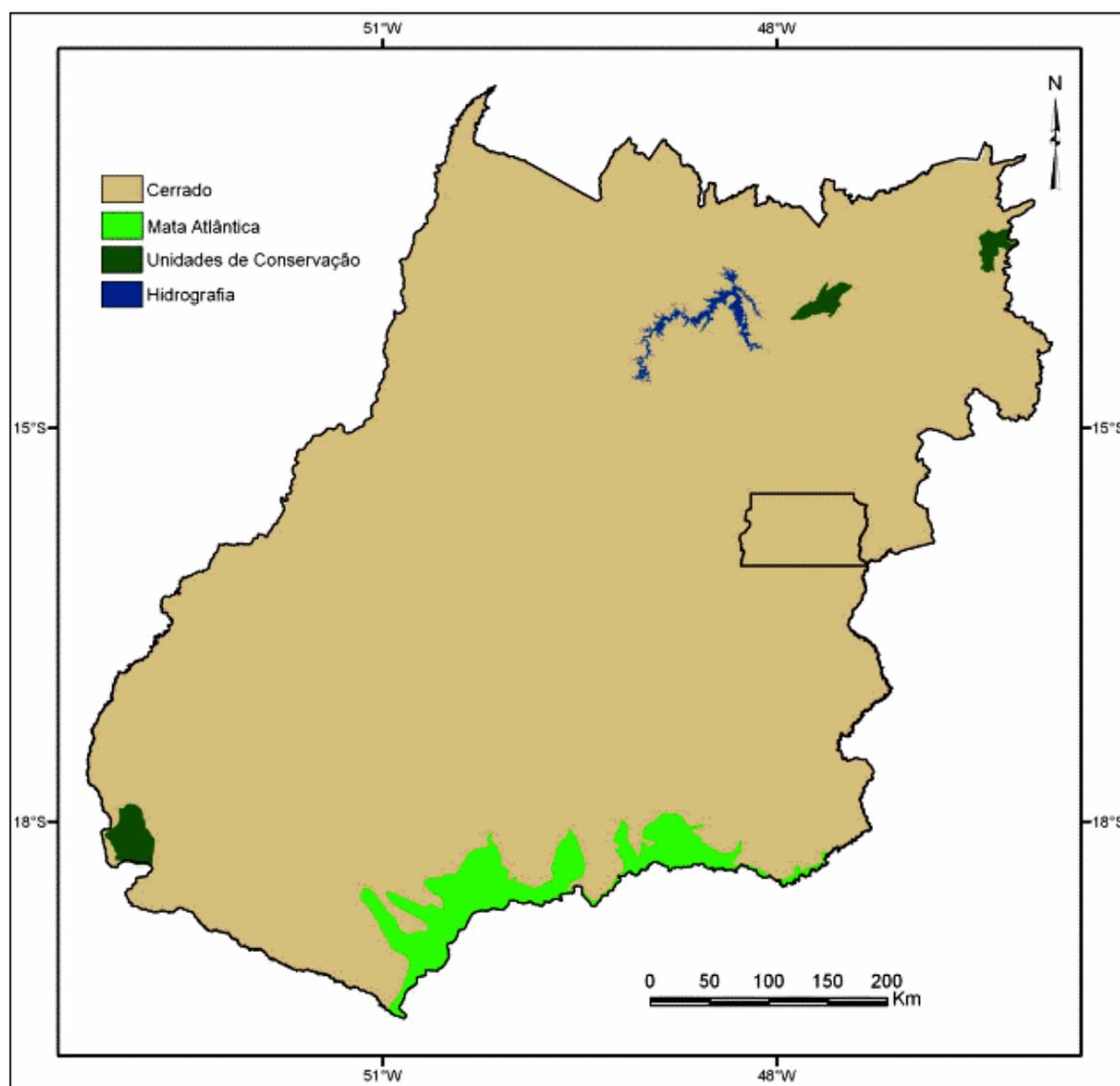


Figura 3.7. Cobertura de vegetação natural do Estado de Goiás e Distrito Federal. Fonte: SANO et al. (2009)

3.2.1 Dados meteorológicos

Os dados diários de precipitação pluviométrica, temperatura do ar, radiação solar e insolação foram obtidos junto ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), Empresa

Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) e do Sistema de Monitoramento Agrometeorológico Agritempo. Foram utilizados, também, dados diários de precipitação pluviométrica da Agência Nacional de Águas (ANA) e da Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB). A identificação das estações meteorológicas está apresentada na Tabela 3.3, e a sua distribuição espacial pode ser observadas na Figura 3.8.

No caso de inexistência de dados de radiação solar em determinado posto meteorológico, esta foi estimada com base na temperatura, aplicando o método HARGREAVES-SAMANI descritos por SAMANI (2000) e BRISTOW e CAMPBELL (1982), que têm se mostrado eficientes para as condições brasileiras (CONCEIÇÃO e MARIN, 2007).

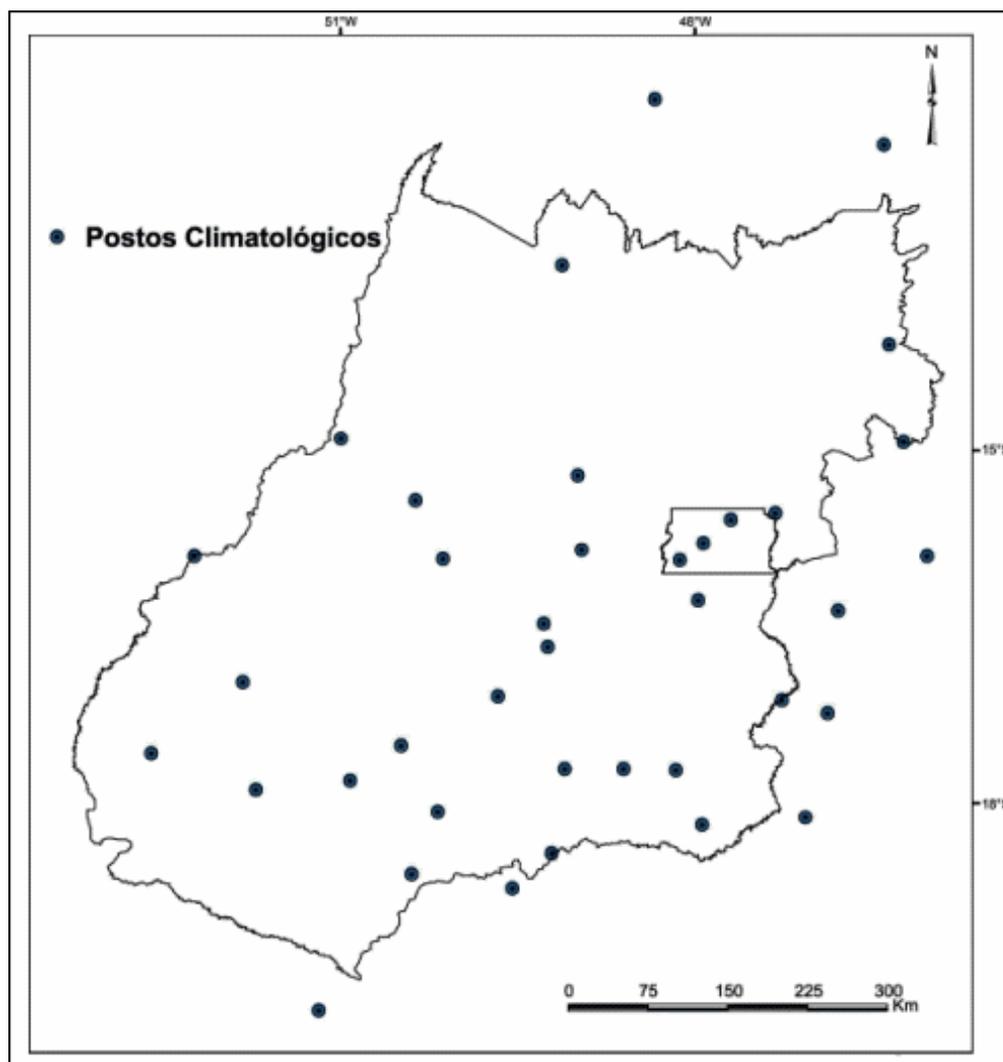


Figura 3.8 *Distribuição espacial das estações meteorológicas utilizadas no trabalho.*

Tabela 3.3. Identificação das estações meteorológicas e série de dados utilizados no trabalho.

Nº	Estação	UF	Latitude Sul (Graus)	Longitude Oeste (Graus)	Altitude (m)	Ano Início	Ano Fim	Número de Anos
01	Aragarças	GO	-15,90	-52,23	345	1979	2008	30
02	Arinos	MG	-15,90	-46,05	519	1979	2008	30
03	Aruanã	GO	-14,90	-51,00	578	1979	2008	30
04	Bom Jesus de Goiás	GO	-18,07	-50,18	429	1979	2008	30
05	Brasília	DF	-15,78	-47,93	1160	1979	2008	30
06	Caiapônia	GO	-16,97	-51,82	737	1979	2008	30
07	Caldas Novas	GO	-17,71	-48,61	701	1979	2008	30
08	Capinópolis	MG	-18,72	-49,55	621	1979	2008	30
09	Catalão	GO	-18,18	-47,95	840	1979	2008	30
10	Catalão	GO	-18,12	-47,07	754	1979	2008	30
11	Cristalina	GO	-17,12	-47,27	826	1979	2008	30
12	Embrapa Arroz e Feijão	GO	-16,47	-49,28	823	1983	2008	26
13	Embrapa Cerrados	DF	-15,59	-47,71	1000	1979	2008	30
14	Embrapa Hortaliças	DF	-15,93	-48,13	998	1979	2008	30
15	Faina	GO	-15,43	-50,37	332	1979	2008	30
16	Formosa	GO	-15,53	-47,33	935	1979	2008	30
17	Formoso	MG	-14,93	-46,25	840	1979	2008	30
18	Goianésia	GO	-15,22	-49,00	651	1984	2008	24
19	Goiânia	GO	-16,67	-49,25	741	1979	2008	30
20	Goiás	GO	-15,92	-50,13	512	1979	2008	30
21	Ipameri	GO	-17,72	-48,17	773	1979	2008	30
22	Itumbiara	GO	-18,42	-49,22	449	1979	2008	16
23	Jataí	GO	-17,88	-51,72	663	1979	2008	30
24	Luziânia	GO	-16,27	-47,98	958	1979	2008	30
25	Mineiros	GO	-17,57	-52,60	706	1979	2008	30
26	Morrinhos	GO	-17,70	-49,11	735	1979	2008	30
27	Nova Xavantina	MT	-14,70	-52,35	308	1979	2008	30
28	Paracatu	MG	-17,23	-46,88	712	1979	2008	30
29	Paranaíba	MS	-19,75	-51,18	331	1979	2008	30
30	Paraúna	GO	-17,51	-50,49	544	1979	2008	30
31	Peixe	TO	-12,02	-48,35	242	1979	2008	30
32	Pirenópolis	GO	-15,85	-48,97	740	1979	2008	30
33	Porangatu	GO	-13,43	-49,13	396	1979	2008	30
34	Posse	GO	-14,10	-46,37	826	1979	2008	30
35	Quirinópolis	GO	-18,60	-50,40	544	1979	2008	30
36	Rio Verde	GO	-17,80	-50,92	775	1979	2008	30
37	Taguatinga	TO	-12,40	-46,42	604	1979	2008	30
38	Unai	MG	-16,37	-46,55	460	1979	2008	30
39	Varjão	GO	-17,09	-49,67	718	1979	2008	30

3.2.2 Estatísticas de produção de cana-de-açúcar no Estado de Goiás e no Distrito Federal

Para subsidiar os estudos na análise comparativa entre os dados medidos e os estimados pelos modelos agrometeorológicos, foram obtidos dados de produção de cana-de-açúcar do Estado de Goiás disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), através do Sistema de Recuperação Automática SIDRA (IBGE, 2010).

Também, como o mesmo objetivo, foram obtidos os dados e informações de produtividade e de caracterização dos ambientes de produção específicos para a variedade RB72454 juntos às usinas de Anicuns e Goiasa, instaladas nos municípios goianos de Anicuns e Goiatuba, na área de estudo.

3.2.3 Zoneamento agroecológico e de riscos climáticos da cana-de-açúcar

Foi incorporado ao trabalho, o Zoneamento Agroecológico da Cana de Açúcar para a produção de etanol e açúcar (EMBRAPA, 2008) elaborado por consórcio de pesquisa coordenado pela Embrapa, em parceria com o MAPA, Cepagri/Unicamp, Conab e IBGE, entre outros. Foi incorporado, também, para análise comparativa, o zoneamento agrícola de riscos climáticos para o Estado de Goiás e o Distrito Federal, com base na metodologia desenvolvida por meio de pesquisa coordenada pela Embrapa Informática Agropecuária e operacionalizada pelo MAPA.

Visando obtenção de níveis de produtividade acima de 60 t/ha, foram consideradas e delimitadas como regiões de aptidão plena, sem restrição térmica, as áreas com temperatura média anual acima de 20°C. As regiões com temperatura média anual entre 18°C e 20°C foram consideradas como áreas de aptidão intermediária. Ainda, foram consideradas áreas de exclusão aquelas com temperatura média anual inferior a 18°C. (EMBRAPA, 2009).

Segundo EMBRAPA (2008), os critérios considerados para a Região Centro-Sul, para delimitação das zonas com baixo risco climático para cultivo em regime de sequeiro, visando assegurar produtividade de 60 a 80 t/ha, foram os seguintes:

- a) Pelo menos, 120 dias com baixa deficiência hídrica entre os meses de setembro e março;
- b) Deficiência hídrica anual máxima de 200 a 300 mm. A deficiência hídrica foi estabelecida para cada Estado em função da produtividade e eficiência produtiva;
- c) Pelo menos, 90 dias sem excedente hídrico, viabilizando a maturação e colheita.

A Figura 3.9 ilustra as etapas, parâmetros e critérios utilizados para elaboração dos zoneamentos agroecológico e de risco climático.

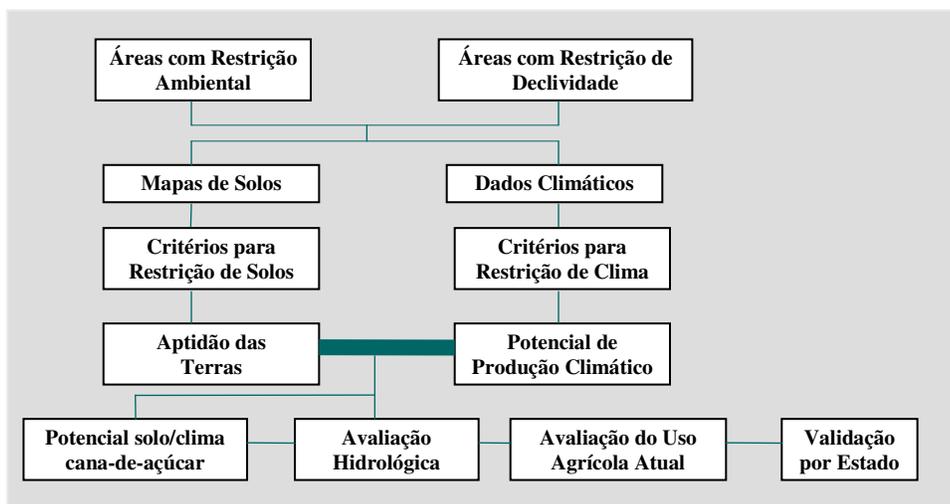


Figura 3.9. Fluxograma ilustrativo das etapas e processos utilizados para elaboração do zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar no Brasil. Fonte: EMBRAPA (2009).

O resultado do zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar em de Goiás e do Distrito Federal, está apresentado na Figura 3.10.

3.3 Aplicação do modelo DSSAT/CANEGRO para estimativa da produção da cana-de-açúcar em Goiás e Distrito Federal.

Para estimativa da produtividade da cana-de-açúcar no Estado de Goiás e no Distrito Federal, foi utilizado o modelo DSSAT/CANEGRO. O fluxograma da metodologia utilizada está apresentado na Figura 3.11.

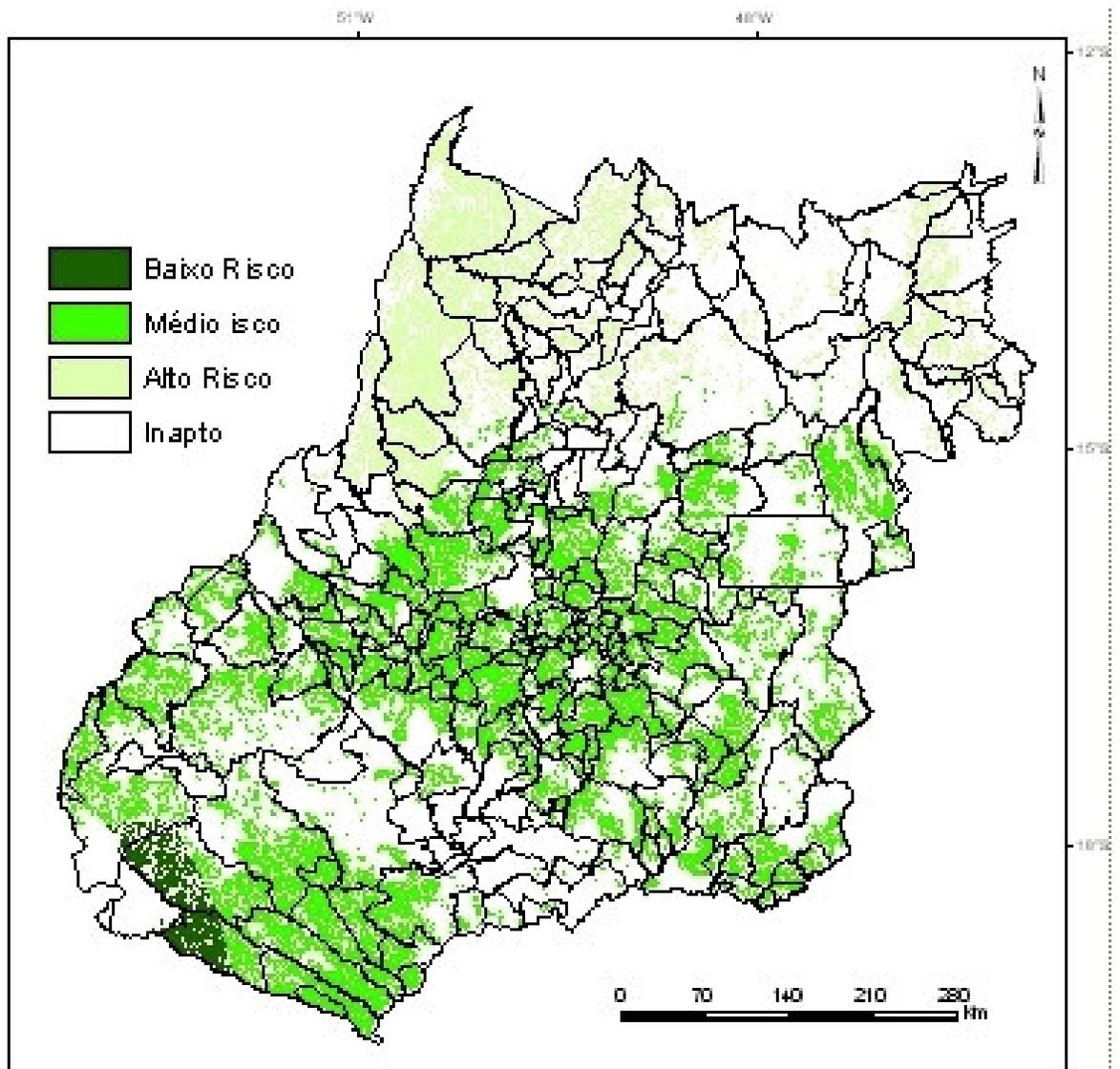
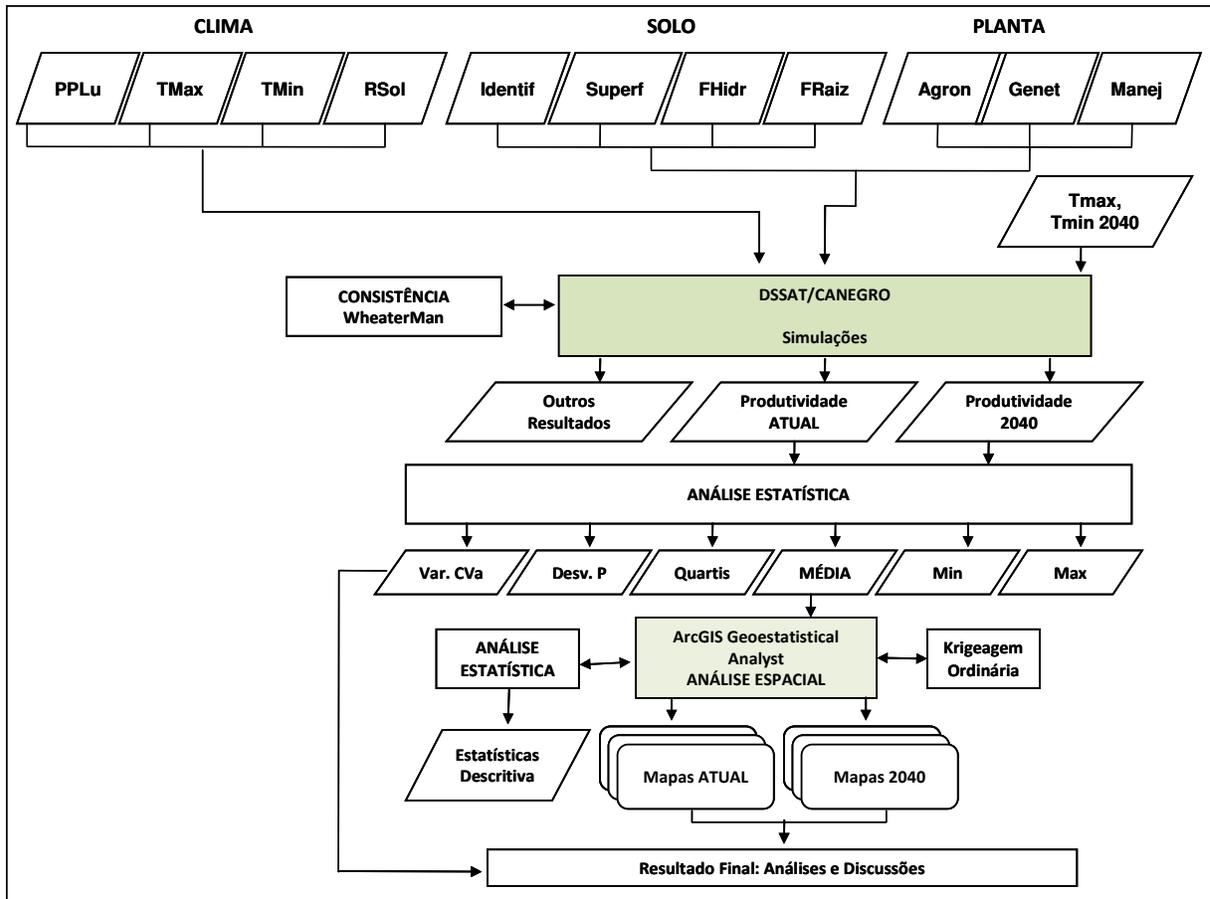


Figura 3.10. Zoneamento agroecológico e de risco climático da cana-de-açúcar no Estado de Goiás e no Distrito Federal. Fonte: Adaptado de EMBRAPA (2009).



Identif= identificação, Superfície= superfície, FDidr= físico hídrico, FRaiz = fator de raiz, Agron= agrônomo, Genet= genética, Manej = manejo.

Figura 3.11. Fluxograma da metodologia de estimativa da produtividade da cana-de-açúcar em ambiente de Cerrado, com aplicação do modelo DSSAT/CANEGRO.

O modelo DSSAT/CANEGRO simula a fisiologia, dinâmica de populações e relações hídricas na planta, com três opções para o cálculo da evapotranspiração de referência. Como dados e informações de entrada, o modelo requer dados climáticos como precipitação pluviométrica, temperatura do ar, radiação solar ou insolação, velocidade do vento e Umidade relativa do ar, dados e informações de solos como classe, família, cor, albedo, evaporação, drenagem, escoamento superficial, mineralização, fotossíntese, pH, fósforo e potássio, além de dados de latitude, longitude e altitude. Demais informações podem ser obtidas em INMAN-BANBER (1993).

A Figura 3.12 apresenta os processos e parâmetros que compõem o modelo DSSAT/CANEGRO. Observa-se que os balanços de carbono, energia e água e nitrogênio estão apresentados por três módulos separados. As trocas importantes entre esses três balanços

ocorrem na relação água da raiz/solo (A) e na relação dossel/atmosfera (B). O estresse hídrico ocorre quando a quantidade de água requerida para equilibrar o balanço de energia excede a quantidade que as raízes podem absorver. O dossel é envolvido em todos os três balanços. Ressalta-se que os módulos de simulação do balanço de carbono e de nitrogênio não estão ativos na versão 3.5 do software DSSAT/CANEGRO, utilizada nesse trabalho.

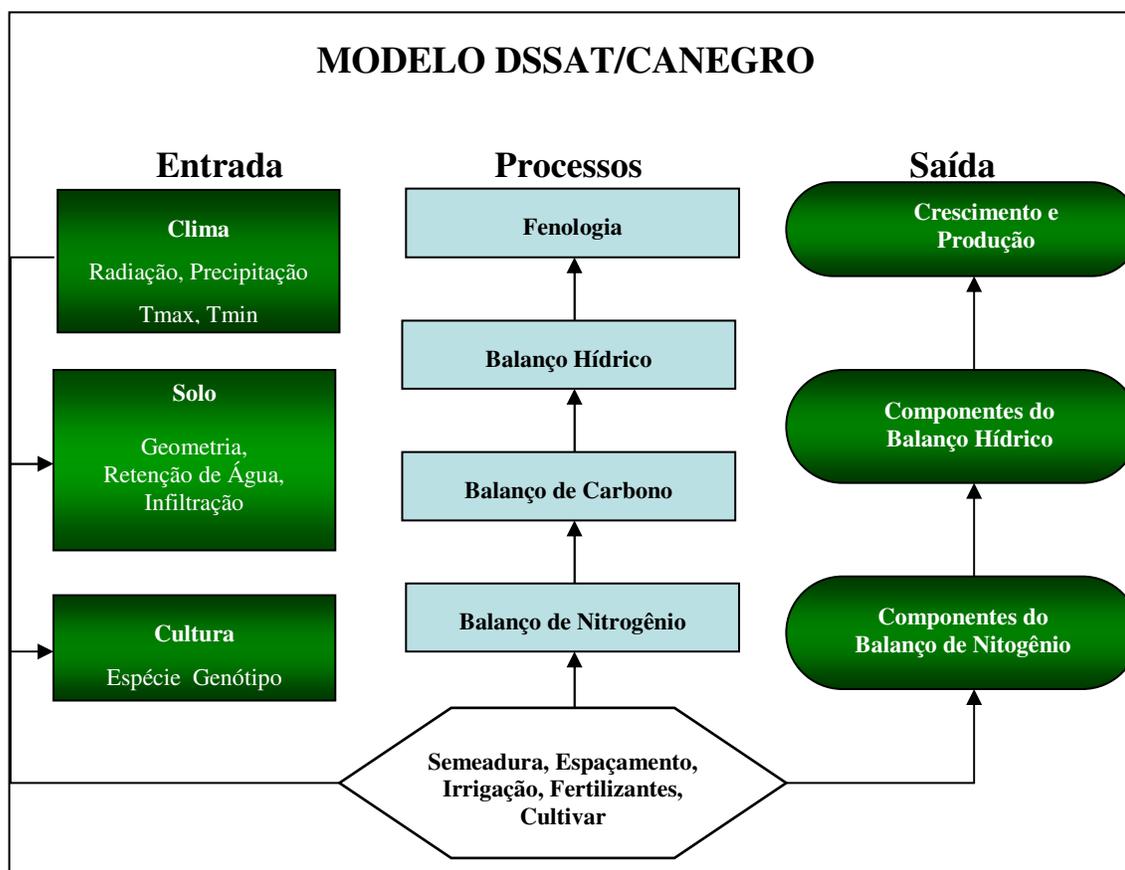


Figura 3.12. Módulo e funções componentes do modelo DSSAT/CANEGRO.

3.3.1 Parâmetros de entrada: dados climáticos

Ao modelo DASSAT/CANEGRO, foram incorporados dados diários de precipitação pluviométrica, temperaturas máximas e mínimas e insolação ou radiação solar, obtidos de 39 estações meteorológicas operadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). Optou-se por aquelas que apresentassem séries históricas com 30 anos (1979 a 2008) e que estivessem localizadas no

limite interno do Estado de Goiás e do Distrito Federal e, também, aquelas localizadas nas adjacências, nos Estados de MG, MT, MS e TO, visando continuidade espacial entre as unidades da Federação quando da etapa de espacialização das informações disponíveis. A Tabela 3.3 contém a identificação e a localização espacial das estações meteorológicas utilizadas.

Os procedimentos da análise de consistência para identificação de dados possivelmente incorretos (“outliers”), preenchimento de falhas e geração de dados para complementação de séries históricas foram realizados utilizando-se o software WeatherMan, utilitário componente do sistema DSSAT. O WeatherMan é uma ferramenta de importação, análise e exportação de formatos distintos de dados climáticos para uso em modelagem de simulação de crescimento e produção de culturas, entre outras aplicações. Como gerador de dados diários e mensais, o aplicativo apresenta métodos e funções estatísticas e probabilísticas robustos, como cadeias de Markov de segunda ordem, para determinação de dias secos e chuvosos, distribuição Gamma, processos estocásticos multivariados, médias, variâncias e desvio padrão. A probabilidade de ocorrência de chuvas está condicionada ao dia anterior, e as estimativas de radiação solar e temperaturas máximas e mínimas também estão condicionadas às ocorrências de dias secos ou chuvosos. Informações detalhadas sobre o WeatherMan podem ser obtidas em PICKERING et al. (1994) e SENTELHAS et al. (2001).

3.3.2 Parâmetros de entrada: dados de caracterização físico-hídrica dos solos

O DSSAT/CANEGRO apresenta um módulo de entrada de dados e informações físico-hídricas e químicas de solos bem como equações de pedotransferência. As variáveis seguintes são requeridas pelo módulo, para cada unidade de mapeamento:

- a) Classificação e localização espacial;
- b) Parâmetros de superfície: cor, drenagem, declividade, potencial de escoamento superficial e fator de fertilidade;
- c) Características físico-hídricas e hidráulicas: teores de argila e silte (%), capacidade de campo, ponto de murchamento permanente, densidade aparente, saturação, condutividade hidráulica;
- d) Características químicas: Carbono orgânico, PH em água, CTC e N total (%).

e) Fator de crescimento e distribuição radicular ao longo do perfil do solo.

Inicialmente, pretendia-se caracterizar e incorporar ao modelo DSSAT/CANEGRO todas as classes dos grandes grupos de solos definidos no levantamento de solos de Goiás, elaborado na escala de 1:250.000 (EMBRAPA, 2008). No entanto, nem todos os perfis de solos descritos dispunham dos dados e informações requeridas pelo modelo, especialmente teores de umidade na capacidade de campo e no ponto de murchamento permanente, e dados de densidade aparente, essenciais para a estimativa da água disponível (CAD) e estabelecimento, com confiabilidade, do balanço hídrico dos solos. Esses parâmetros podem ser estimados pelo DSSAT/CANEGRO, mas utilizando equações de pedotransferências determinadas e ajustadas para os solos de clima temperado, que se comportam de forma diferente dos solos tropicais.

Devido à indisponibilidade de todas as informações requeridas pelo modelo DSSAT/CANEGRO, que permitisse a caracterização e uso do mapa de solos de Goiás na escala 1:250.000, optou-se por trabalhar com alguns solos que pudessem representar os cenários de baixa, média e alta capacidade de retenção de água deles, mesmo critério do uso dos solos adotado para operacionalização do zoneamento agrícola de riscos climáticos do Brasil (MAPA, 2010). A classificação de solos segundo as características físico-hídricas foram descritas por LOPES-ASSAD (2007).

O cenário de baixa capacidade armazenamento de água é representado pelo Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, A moderado, relevo plano a suave ondulado, fase Cerrado sentido restrito (LVAd), em um ambiente de vegetação natural e está localizado no município de Cabeceiras de Goiás. As características físico-hídricas e hidráulicas desse solo estão apresentadas na Tabela 3.4a e foram obtidas de SILVA et al. (2003).

O cenário dos solos que apresentam média capacidade de retenção de água é representado por um Neossolo Quartzarênico distrófico, A fraco, relevo suave-ondulado, fase Cerrado Ralo (RQ). O terceiro e último cenário, que caracteriza os solos com alta capacidade de armazenamento de água, está representado pelo Latossolo Vermelho distrófico, A moderado, textura argilosa, relevo plano a suave-ondulado, fase Cerrado Típico (LVd). Esses solos estão localizados nos campos experimentais da Embrapa Cerrados (DF) e suas características físico-hídricas e hidráulicas estão apresentadas na Tabela 3.4b, tendo sido obtidas de SILVA et al. (2006)

Tabela 3.4a. Características físico-hídricas dos solos utilizados no trabalho.

Solos	Argila	Silte	Densidade	Condut_Hid	θ_s (SAT)	CC	PMP	AD	RUR
	%	%	g/cm ³	cm/h	cm ³ /cm ³			mm/cmSolo	mmH ₂ O
LVAd (10-15)	57	18	1,045	18,52	0,5329	0,350	0,272	0,8	39
LVAd (20-25)			1,078	18,52	0,5221	0,363	0,290	0,7	36
LVAd (40-50)			0,998	18,52	0,5486	0,358	0,267	0,9	46
Média	57	18	1,040	18,52	0,5345	0,357	0,276	0,8	40

θ_s (SAT)= Saturação, CC=Capacidade de Campo, PMP= Ponto de Murcha Permanente, AD= Água Disponível e RUR= Reserva Útil Radicular.

Tabela 3.4b. Características físico-hídricas dos solos utilizados no trabalho.

Solos	Argila	Silte	Densidade	Condut_Hid	θ_s (SAT)	CC	PMP	AD	RUR
	%	%	g/cm ³	cm/h	cm ³ /cm ³			mm/cmSolo	mmH ₂ O
RQ	11,2	0,4	1,296	34,733	0,462	0,226	0,127	1,0	49
LVd	52,4	12,5	1,207	24,229	0,480	0,389	0,237	1,5	76

θ_s (SAT)= Saturação, CC=Capacidade de Campo, PMP= Ponto de Murcha Permanente, AD= Água Disponível e RUR= Reserva Útil Radicular.

3.3.3 Capacidade de armazenamento de água dos solos

Uma das evoluções dos modelos aplicados aos estudos agroclimatológicos, especialmente em zoneamentos agrícolas, reside na incorporação de variáveis associadas à fenologia e fisiologia das plantas. Incorporar dados e informações de duração média dos seus ciclos e fases fenológicas, de demanda hídrica, expressa pelos coeficientes da cultura, de velocidade de crescimento e profundidade efetiva do seu sistema radicular, por exemplo, permitiram evoluir do balanço hídrico dos solos para os estudos recentes baseados no balanço hídrico específico de cada cultura. As metodologias de zoneamento agrícola de riscos climáticos descritas por ASSAD et al. (2001, 2008), CUNHA et al. (2001), FARIAS et al. (2001) e SANS et al. (2001), implementadas pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, como instrumento de apoio à política de crédito e seguridade agrícola do Governo Federal, foram desenvolvidas a partir dessa nova geração de modelos.

Para simulação do balanço hídrico da cultura da cana-de-açúcar, estimou-se a capacidade de retenção de água na zona radicular (RUR), conforme descrito pela Equação 10, adotando-se uma profundidade média das raízes de 50cm, conforme RIPOLI et al. (2007), DALRI (2006), CASAGRANDE (1991) e SEGATO et al. (2006). A capacidade de água

disponível (CAD) foi obtida a partir das curvas características de retenção de água dos solos apresentadas na Tabelas 3.4a e 3.4b.

$$RUR = 50*AD \dots\dots\dots (10)$$

Assim:

$$RUR = 40 \text{ mm para LVAd}$$

$$RUR = 49 \text{ mm para RQ}$$

$$RUR = 76 \text{ mm para LVd}$$

3.3.4 Características fisiológicas e fenológicas da cana-de-açúcar

Vários trabalhos têm apresentado resultados que atestam o bom desempenho do modelo DSSAT/CANEGRO na estimativa da produtividade de variedades de cana já calibradas e adaptadas às diferentes condições ambientais do mundo (SINGELS et al, 2008). No entanto, as variedades brasileiras calibradas ainda são poucas, indicando uma demanda forte por estas informações, quando consideradas as inúmeras variedades cultivadas e a grande diversidade ambiental das zonas produtoras e regiões de expansão no Brasil.

As simulações, neste trabalho, foram realizadas para a variedade RB72454, introduzida no modelo DSSAT/CANEGRO e calibrada por MARIN et al. (2009) e MARIN et al. (2010), utilizando dados biométricos coletados por SUGUITANI (2006). Embora tenha sido calibrada para as condições de Piracicaba (SP) e para um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, esta variedade é largamente cultivada no Estado de Goiás, nos diversos tipos de solos existentes. Como características principais, esta cultivar apresenta alto potencial de produtividade, podendo alcançar 190 t/ha no primeiro corte e média de 170 t/ha até o quarto corte. Apresenta exigência média em ambientes de produção, ou seja, adaptabilidade ampla e estabilidade alta. O período de setembro a novembro é recomendado como a melhor época de colheita. Atinge seu ponto máximo de maturação (pol) em torno de 16% (HOFFMANN et al., 2008), na região central do Brasil, normalmente, no mês de outubro.

As variáveis de produção e os indicadores estatísticos de validação estão apresentados na Tabela 3.5. Demais discussões referentes ao ajuste do algoritmo relativo ao acúmulo de fotoassimilados (fotossíntese), especialmente o impacto da radiação solar e temperatura nos índices de produção, podem ser encontrados em MARIN et al. (2009).

Tabela 3.5. Indicadores estatísticos de comparação entre dados medidos e estimados pelo modelo DSSAT/CANEGRO para a variedade RB72454 cultivada sem irrigação.

Variável	Média			Desvio Padrão		R ²	EMA	Índice D
	Obs.	Est.	Razão	Obs.	Est.			
IAF	3,667	2,697	0,789	1,062	0,367	0,408	1,125	0,523
Massa Seca Colmos (t/ha)	21,375	18,912	0,921	12,978	10,502	0,951	4,095	0,966
Massa Seca Aérea (t/ha)	33,375	34,331	1,159	20,595	16,636	0,979	4,314	0,983
Perfilho (nº/m ²)	6,302	9,968	1,693	1,304	0,085	0,841	3,665	0,317
Altura (m)	1,403	1,054	0,865	1,000	0,646	0,985	0,381	0,910

EMA= Erro Médio Absoluto.

Fonte: MARIN et al. (2009)

3.3.5 Funcionamento do modelo DSSAT/CANEGRO

As variáveis relativas aos elementos climáticos, às características físico-hídricas dos solos e, também, à fisiologia e fenologia da cana-de-açúcar foram incorporadas ao modelo DSSAT/CANEGRO para realização das simulações de produtividade. Foram obtidos diversos indicadores como variáveis ou parâmetros de saída. Alguns índices resultantes do balanço hídrico, especialmente aqueles que penalizam a produção de fotoassimilados por estresse hídrico, são importantes para a interpretação dos resultados. A variável principal de análise adotada foi a produção de colmos, em t/ha, expressa pela fração resultante da partição da matéria seca total.

O Modelo DSSAT/CANEGRO foi parametrizado para simular o rendimento da cana-de-açúcar, variedade RB72454, para um cultivo de cana-planta com 12 meses de duração média do ciclo. No processo de simulação de crescimento e rendimento da cultura, o modelo requer datas específicas de plantio e colheita, Assim estabeleceu-se como data representativa de cada mês, plantios em 5 de outubro, 5 de novembro, 5 de dezembro e 5 de janeiro, para cada ano do período de 1979-2008. As épocas de plantio foram definidas em função de consultas realizadas junto a algumas usinas localizadas no Estado de Goiás sobre o calendário de épocas de plantio praticado normalmente. Segundo os responsáveis técnicos de Usinas e instituições de pesquisa consultada, os plantios das variedades de cana-de-açúcar de ciclo precoce (12 meses) concentram-se no início da estação chuvosa, estendendo-se até o mês de janeiro de cada ano.

Conforme sistema de produção de cana-de-açúcar e características fisiológicas da variedade RB72454, simulou-se um canavial com 15 gemas por metro linear, espaçamento de

1,4m entre linhas e sem limitações nutricionais ou fitossanitárias, na tentativa de produzir cenários que representassem canaviais de alta produtividade.

No contexto das mudanças climáticas globais, para gerar séries futuras de temperatura, as séries atuais foram incrementadas com base nas projeções de aumento geradas pelo sistema Precis e considerando-se as projeções feitas por MARENGO (2007) para o ano de 2040 e para dois cenários de emissões de gases de efeito estufa (GEE): um “otimista” (B2), onde ocorreria redução das emissões de GEE, e outro pessimista (A2), admitindo a manutenção das atuais taxas elevadas de emissão dos GEE (JONES et al., 2003). Neste estudo não foram consideradas as projeções de mudanças na precipitação pluviométrica, uma vez que, segundo MARENGO (2007), as incertezas apresentadas pelos modelos ainda são elevadas.

Ainda, as simulações foram realizadas para três tipos de solos, com características físico-hídricas distintas, conforme apresentado nas Tabelas 3.4a e 3.4b, quando se pretendeu que cada solo representasse um grupo de solos com baixa, média e alta capacidade de retenção de água.

Neste trabalho, o Latossolo Vermelho (LVd), em função de suas características físico-hídricas, foi adotado para representar os solos de textura argilosa e demais características físico-hídricas que lhes conferem alta capacidade de água disponível (AD). É sabido que os Neossolos Quartzarênicos normalmente apresentam baixa capacidade de água disponível (AD). No entanto, o perfil do Neossolo Quartzarênico (NQ) utilizado neste trabalho, embora apresentando textura arenosa, apresenta teores de argila e demais características físico-hídricas que lhe confere uma capacidade de água disponível que permite representar os demais solos de média capacidade de água disponível. E, para representar os solos de baixa capacidade de água disponível para as plantas, foram incorporados ao modelo os parâmetros físico-hídricos do Latossolo Vermelho-Amarelo (LVAd).

De cada uma das 24 simulações realizadas pelo DSSAT/CANEGRO, alternando-se as quatro épocas de plantio, os três tipos de solos e, também, os incrementos das temperaturas médias para os cenários A2 e B2 de mudanças climáticas, foram obtidos 30 valores de produtividade como parâmetro de saída, estimados para cada ano-safra e cada posto meteorológico.

3.4 Análise comparativa da produtividade de cana-de-açúcar estimada pelo modelo DSSAT/CANEGRO com a medida em Usinas e as obtidas pelo IBGE

Esta etapa do trabalho teve como objetivo realizar análises comparativas entre os índices de produtividade estimados pelo DSSAT/CANEGRO e os levantamentos de rendimento médio realizados pelo IBGE e as produtividades obtidas pelas Usinas nos seus diversos ambientes de produção (Figura 3.15A).

Foram obtidos junto ao IBGE (2010), o rendimento médio da cana-de-açúcar referente ao período de 1990 a 2008 dos municípios do Estado de Goiás e do Distrito Federal. Dos 246 municípios de Goiás, somente 213 apresentaram registros de rendimento. Dos rendimentos anuais, foram extraídos os valores máximos e mínimos, organizados em classes de produtividade. Os índices foram georreferenciados pela localização geográfica da sede municipal e, com aplicação de um SIG, foram espacializados e apresentados na forma de um mapa.

Foram feitas análises comparativas entre as produtividades registradas pelo DSSAT/CANEGRO e as registradas pelo IBGE nos municípios de Goianésia, Rio Verde e Santa Helena de Goiás. Estes municípios foram selecionados por possuírem usinas de cana-de-açúcar instaladas, grandes áreas com produções com alta tecnologia e posto climatológico que permitiu utilizar o modelo de simulação.

Também foram obtidas e analisadas as produtividades da cana-de-açúcar, da variedade RB72454, registradas pelas Usinas Goiasa e Anicuns, localizadas nos municípios de Goiatuba e Anicuns, respectivamente. Não foram disponibilizados dados das demais usinas instaladas no Estado.

3.5 Aplicação do modelo SARRA/SARRAZON para estimativa do balanço hídrico da cultura da cana-de-açúcar em Goiás e Distrito Federal

Nesta etapa, o objetivo foi simular o balanço hídrico da cana-de-açúcar para gerar o zoneamento de riscos climáticos e, ainda, analisar a correlação entre a produtividade estimada pelo modelo DSSAT/CANEGRO e o ISNA obtido pelo modelo SARRA (Figura 3.13).

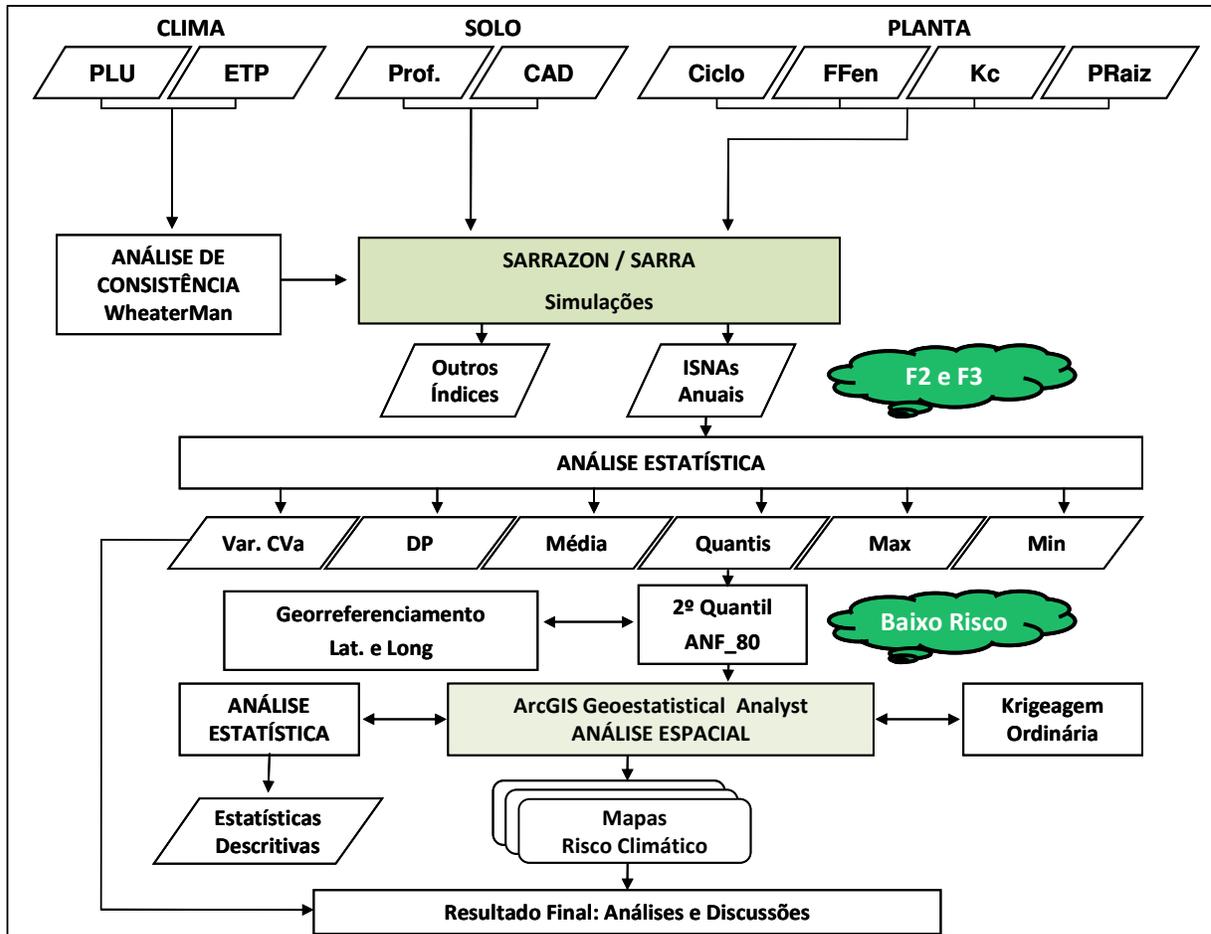


Figura 3.13. Fluxograma da metodologia de estimativa do balanço hídrico e estudo de risco climático da cultura da cana-de-açúcar em ambiente de Cerrado, com aplicação do SARRA/SARRAZON.

O SARRA (Système d'Analyse Regionale des Risques Agroclimatiques), desenvolvido por BARON, et al. (1996) é um modelo utilizado para a simulação do balanço hídrico das culturas agrícolas. Também incorpora funções relativas ao sistema solo-clima-planta, requer poucas variáveis de entrada, o que permite a sua aplicação numa escala regional, menos detalhada, mas permite atender as demandas dos setores do agronegócio.

Considerando que a produção potencial da cultura é função de suas características genéticas e de sua adaptação ao ambiente, quando o cultivo é praticado com aplicação das técnicas modernas e sem ocorrências de pragas ou doenças, a produção final pode ser penalizada pela oferta hídrica. Como parâmetros de saída, o modelo SARRA gera o índice de satisfação das necessidades hídricas (ISNA) da cultura, calculado através da relação entre a

evapotranspiração real (ETR) e a evapotranspiração máxima da cultura (ETM), e pode ser utilizado indiretamente para estimar a produtividade potencial da cultura. Este índice foi aplicado por ASSAD et al. (2001, 2008), CUNHA et al. (2001), FARIAS et al. (2001) e SANS et al. (2001), na metodologia do zoneamento agrícola de riscos climáticos, adotado pelo MAPA para definir calendários de plantio como condição para liberação de custeio agrícola atrelado ao seguro rural.

Para calcular o balanço hídrico da cultura da cana-de-açúcar, utilizando o modelo SARRA, foram incorporados: i) Dados climáticos, como precipitação e evapotranspiração potencial; ii) Dados físico-hídricos dos solos, como profundidade, água disponível (AD) e reserva útil na zona radicular (RUR), e iii) Dados de fisiologia da cultura, como coeficiente de cultura (Kc), duração média do ciclo e das fases fenológicas e profundidade efetiva do sistema radicular.

3.5.1 Parâmetros de entrada do modelo SARRA/SARRAZON

3.5.1.1 Precipitação pluviométrica e evapotranspiração de referência

Foram incorporados ao modelo dados de precipitação pluviométrica e evapotranspiração de referência obtidos a partir de observações das 39 estações meteorológicas apresentadas na Tabela 3.3. As análises de consistência, preenchimento de falhas e ampliação de série foram realizadas através da aplicação do software WeatherMan componente do DSSAT/CANEGRO, assim como descrito no item 3.3.1 acima.

3.5.1.2 Reserva útil de água na zona radicular (RUR)

A reserva útil de água dos solos foi estimada em função da profundidade efetiva do sistema radicular da cana-de-açúcar e da capacidade de água disponível (AD) obtida a partir de parâmetros das curvas características de retenção de água dos solos apresentadas na Tabelas 3.4a e 3.4b.

Também para este modelo, adotaram-se as reservas úteis na zona radicular de 40 mm para o Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), de 49 mm para o Neossolo Quartzarênico (NQ) e de 76 mm para o Latossolo Vermelho distrófico (LVd).

3.5.1.3 Duração do ciclo e das fases fenológicas da cana-de-açúcar

Simulou-se o plantio de uma cana planta de ciclo precoce, com duração média de 360 dias e duração média das fases fenológicas estabelecidas por BARBIERI (1981) e apresentadas na Tabela 3.6.

Tabela 3.6. Duração média do ciclo e das fases fenológicas da cultura da cana-de-açúcar.

Ciclo	Fase I	Fase II	Fase III	Fase IV	Total (dias)
	Emergência	Perfilhamento	Desenvolvimento Vegetativo	Maturação	
Cana Planta	40	70	190	60	360

Fonte: Adaptado de BARBIERI (1981)

3.5.1.4 Coeficientes de cultura (Kc) da cana-de-açúcar

Os dados do coeficiente de cultura (Kc), que expressa a demanda de água pelas plantas em cada fase de desenvolvimento, foram obtidos de BARBIERI (1981) e extrapolados para períodos decendiais, conforme apresentado na Tabela 3.7. Observa-se que a distribuição temporal dos Kc segue a sazonalidade das chuvas, onde os valores maiores, que expressam as demandas maiores de água pelas plantas, foram coincidentes com a ocorrência da estação chuvosa em Goiás (Figura 3.14), e os valores menores de Kc durante a estação seca.

Tabela 3.7. Coeficiente de cultura (Kc) para a cana-de-açúcar, obtidos de Barbieri (1981) e interpolados para períodos decendiais.

Mês / Decêndio	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Dec1	1,50	1,50	1,20	0,60	0,25	0,10	0,10	0,20	0,30	0,45	0,80	1,00
Dec2	1,50	1,50	1,00	0,50	0,20	0,10	0,10	0,20	0,35	0,60	0,90	1,50
Dec3	1,50	1,40	0,80	0,30	0,20	0,10	0,10	0,30	0,40	0,70	0,90	1,50

Fonte: BARBIERI (1981)

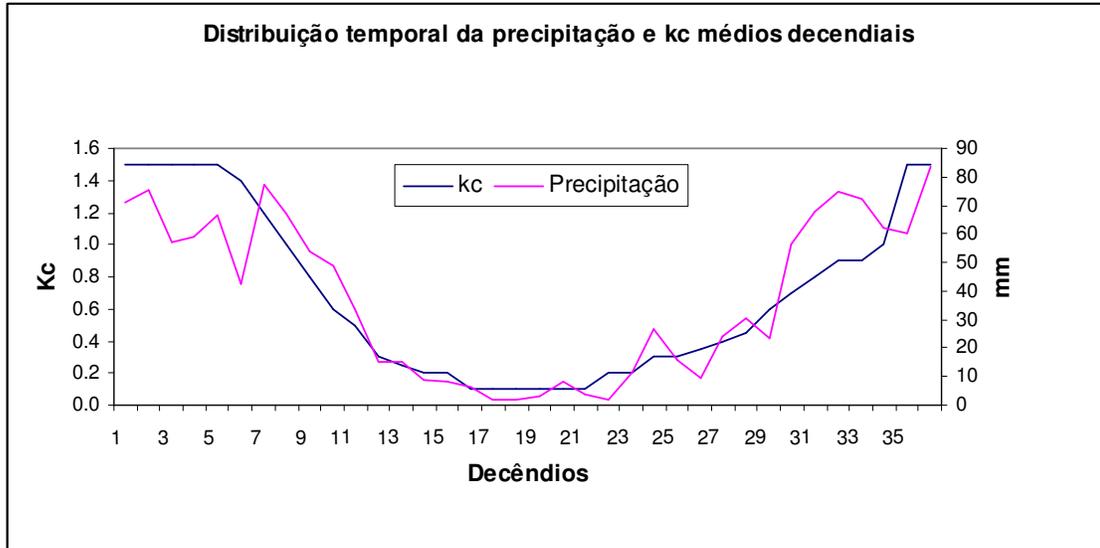


Figura 3.14. Distribuição temporal do Coeficiente de Cultura (Kc) em função da precipitação pluviométrica. Fontes: Kc adaptados de BARBIERI (1981) e estação meteorológica de Brasília - DF.

3.5.1.5 Evapotranspiração de referência (ETp)

Para o cálculo da evapotranspiração de referência, foi aplicado o método de THORNTHWAITE (1948), considerando a temperatura efetiva, conforme modificação de CAMARGO et al (1999). Métodos empíricos como o de THORNTHWAITE (1948), descrito na Equação 11, mostram bom desempenho quando utilizados em escala decendial ou mensal (SEDIYAMA, 1996) e são importantes para regiões onde há dificuldade de obtenção de dados meteorológicos. Entretanto, este método, fornece estimativas inconsistentes quando aplicadas em regiões sob condições climáticas extremas de umidade, ambientes áridos e semi-áridos, como o Sertão do Nordeste brasileiro, ou super-úmidas, como ocorre em boa parte da região Norte do Brasil. Na primeira condição climática, por não considerar a adição da energia advectiva regional (PRUITT, 1964; ROSENBERG et al., 1983; MALEK, 1987), ocorre subestimativa nos valores de ETp e, sob condição de alta umidade, por não considerar o efeito do baixo déficit de saturação da atmosfera na redução do poder evaporante do ar (CAMARGO e PICINI, 1995).

$$ETp = 16 * \left(10 \frac{T_{ef_i}}{I}\right)^a * \frac{N}{12} * \frac{ND}{30} \dots\dots\dots (11)$$

em que:

ETp é a evapotranspiração de referência em mm.dia^{-1} ;

Tef_i é a temperatura efetiva do mês i ($i=1,2,\dots,12$), dada pela Equação 13;

N é o fotoperíodo médio mensal em horas;

ND é o número de dias do mês;

a é um parâmetro empírico obtido por:

$$a = 6,75 * 10^{-7} * I^3 - 7,71 * 10^{-5} * I^2 + 1,792 * 10^{-2} * I + 0,49239$$

em que:

I é o índice calorífico anual, definido como a soma dos índices mensais, segundo a Equação 12.

$$I = \sum_{i=1}^{12} (0,2 * T_i)^{1,514} \dots\dots\dots (12)$$

Conceitualmente, uma forma para melhorar o desempenho do método de THORNTHWAITE (1948), utilizando a base de dados original, é incorporar a amplitude térmica do ar no cômputo do método (ROSENBERG, et al., 1983; MALEK, 1987). Diante disso, CAMARGO et al. (1999) propuseram a substituição da temperatura média pela temperatura efetiva, descrita pela Equação 13, na estimativa com o método de THORNTHWAITE (1948), obtendo resultados expressivos para as regiões do Brasil.

$$Tef = 0,36 * (3 * T_{\max} - T_{\min}) \dots\dots\dots (13)$$

em que:

T_{\max} é a temperatura máxima mensal do ar ($^{\circ}\text{C}$); e

T_{\min} é a temperatura mínima mensal do ar ($^{\circ}\text{C}$).

Estas informações foram incorporadas ao modelo para a realização das simulações necessárias para identificação dos períodos favoráveis e com baixos riscos para o plantio da cana. Foi realizado o balanço hídrico da cultura da cana-de-açúcar simulando plantios nos solos LVAd, RQ e LVd, como sendo representativos dos grupos de solos com baixa, média e alta capacidade de retenção de água, no dia 05 de cada mês, de setembro a janeiro, e para cada ano entre 1979 a 2008. Dentre os diversos parâmetros de saída do balanço disponibilizados

pelo modelo SARRA, obteve-se a razão entre a evapotranspiração real (ETr) e a evapotranspiração máxima (ETm) para expressar o atendimento ou não das necessidades hídricas da cultura da cana-de-açúcar em cada uma de suas fases fenológicas e cada época de plantio.

Assim, o índice de satisfação das necessidades de água (ISNA) da cana-de-açúcar foi definido pela Equação 14.

$$ISNA = ETr/ETm \dots\dots\dots (14)$$

em que:

ETr é a evapotranspiração real, obtida por modelo empírico e

ETm é a evapotranspiração máxima da cultura.

em que:

$$ETm = Kc \times ETp \dots\dots\dots (15)$$

$$ETr = ETm \times f(HR;ETp) \dots\dots\dots (16)$$

$$ETr^*(HR;ETp) = a + b.HR + c.HR^2 + d.HR^3 \text{ (EAGLEMAN, 1977)} \dots\dots\dots (17)$$

em que:

$$a = 0,55 + 0,732 / ETp$$

$$b = 4,97 - 0,6ETp$$

$$c = -8,57 + 1,56ETp$$

$$d = 4,35 - 0,88 ETp$$

sendo que:

HR é a taxa ou fração da reserva útil radicular – RUR.

As evapotranspirações potenciais médias mensais estimadas foram extrapoladas para valores médios decendiais para serem incorporados ao modelo SARRA/SARRAZON.

Para cada simulação de época de plantio realizada, foram obtidos os valores médios anuais de ISNA referentes a cada uma das quatro fases fenológicas da cultura da cana-de-açúcar, para cada estação meteorológica.

A etapa seguinte consistiu da análise exploratória do conjunto de dados obtidos do modelo, com aplicação de procedimentos de estatística descritiva, tais como análise de frequência para obtenção dos índices medianos, dos quartis inferior e superior, valores máximos, mínimos e médios desvios padrão, variâncias, coeficientes de variação, curtose e assimetria.

Para caracterização dos riscos climáticos, aos ISNA estimados para as fases II (estabelecimento/perfilhamento) e III (desenvolvimento vegetativo) da cultura, foram aplicadas as funções frequenciais para obtenção dos índices da frequência mínima de 80% de ocorrência. Assim, a definição do maior ou menor risco climático para o cultura foi associada à ocorrência ou não de déficit hídrico nessas fases, consideradas como as mais críticas com relação à necessidade de água. O déficit hídrico nessas fases impede um bom desenvolvimento vegetativo da cultura, resultando na queda de produção.

Para isso, estabeleceram-se três classes de riscos, de acordo com o ISNA obtido para as fases II e III:

- a) $ISNA \geq 0,68$: baixo risco;
- b) $0,68 > ISNA > 0,50$: médio risco; e
- c) $ISNA \leq 0,50$: alto risco.

3.6 Análise espacial da produtividade média e dos índices de satisfação das necessidades hídricas da cana-de-açúcar

Esta etapa consistiu da sistematização e georreferenciamento dos dados de produtividade média obtidos pelo modelo DSSAT/CANEGRO e dos índices de satisfação das necessidades de água (ISNA) obtidos pelo modelo SARRA, para análise espaço-temporal da resposta da cana-de-açúcar às condições ambientais. Também, para delimitar as zonas com potencialidades produtivas maiores, com baixos riscos de ocorrência de estresses hídricos e indicativos das melhores épocas de plantio.

Para georreferenciamento, interpolação dos índices hídricos e de produtividade para representação espacial, foram utilizados os softwares ArcMap, da ESRI, versão 8.3, módulo Geostatistical Analyst (JOHNSTON, et al., 2001) e o SPRING, versão 5.1.6 (CÂMARA et al., 1996), do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. Com isso, os resultados finais são apresentados na forma de mapas, indicando as áreas com restrição térmica e, nas áreas consideradas termicamente aptas, são indicados os riscos climáticos para produção de cana-de-açúcar, adotando-se o limite máximo de 20% de risco de perda de produtividade.

Dos métodos e técnicas geoestatísticas, a krigagem ordinária, testada por ASSAD et al. (2003) e EVANGELISTA (2004), com índices de satisfação das necessidades de água (ISNA) e precipitação pluviométrica, respectivamente, apresentou-se como eficiente.

Para espacialização dos resultados, foram adotados os seguintes procedimentos: edição e organizados dos arquivos de simulação em três colunas, com latitude, longitude e valores de produtividade média e ISNA; importação para o ambiente SIG; ajustes de semivariograma, teste de validação cruzadas para análises dos erros de estimativas (teste de hipótese de erro zero e variância mínima) e interpolação por krigagem ordinária. As imagens obtidas do processo de interpolação e apresentadas na forma de grade foram fatiadas (classificadas) para que os valores de produtividade e ISNA pudessem ser visualizados na forma de faixas ou classes.

Por fim, foram gerados os mapas para caracterizar a produtividade média e os riscos climáticos, considerando-se as variáveis: ciclo da variedade, período de plantio e classe ou tipo de solo. O mapa final do zoneamento de riscos climáticos relativos à cada simulação de plantio, resultou do cruzamento dos mapas de ISNAS das Fases II e III, e obedeceram aos critérios apresentados na Tabela 3.8.

Tabela 3.8. Critérios de cruzamento das classes de riscos climáticos para a cana-de-açúcar

ClasseRisco_Fase II	Operador Condicional	ClasseRisco_Fase III	Resultado
Baixo risco	&&	Baixo risco	Baixo risco
Baixo risco	&&	Médio risco	Médio risco
Baixo risco	&&	Alto risco	Alto risco
Médio risco	&&	Baixo risco	Médio risco
Médio risco	&&	Médio risco	Médio risco
Médio risco	&&	Alto risco	Alto risco
Alto risco	&&	Baixo risco	Alto risco
Alto risco	&&	Médio risco	Alto risco
Alto risco	&&	Alto risco	Alto risco

De cada mapa final, contendo as delimitações das áreas das classes de produtividade e de riscos climáticos, considerando-se as variáveis: ciclo, período de plantio e classe ou tipo de solo, foram calculados as áreas de cada classe para posterior análise.

3.7 Ajuste de modelo para estimativa da produtividade da cana-de-açúcar a partir dos índices de satisfação das necessidades de água (ISNA)

Nesta etapa do trabalho, pretendeu-se ajustar um modelo matemático capaz de estimar a produtividade potencial da cana-de-açúcar a partir dos índices de satisfação das necessidades de água (ISNA) da cultura da cana-de-açúcar, expressos pela relação ETr/ETm, estimada para cada fase fenológica da cultura e para cada tipo de solo avaliado no trabalho, conforme ilustrado na Figura 3.15B.

Para ajustar o modelo, adotou-se os índices de satisfação das necessidades de água e a produtividade da cana-de-açúcar. Como variável independente o ISNA, determinado pelas simulações de plantio no primeiro decêndio de outubro no Latossolo Vermelho (LV), Neossolo Quartzarênico (NQ) e o Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e, como variável dependente, as produtividades estimadas pelo DSSAT/CANEGRO para o mesmo período e solos, para 38 localidades de estações meteorológicas apresentados na Tabela 4.6. As etapas do trabalho estão descritas no fluxograma ilustrado na Figura 3.15.

A partir da análise de regressão linear múltipla, foram obtidos índices de correlação entre os valores de produtividade, estimados pelo modelo DSSAT/CANEGRO, e os índices de satisfação das necessidades de água (ETr/ETm), obtidos para cada fase fenológica da cultura da cana-de-açúcar, variedade RB72454.

Adotou-se o modelo modificado proposto por JENSEN (1968), posteriormente modificado por MEYER et al. (1992) e CAMARGO (1992), o qual considera que a produtividade pode ser relacionada às condições hídricas das diferentes fases fenológicas da cultura, por meio de um modelo multiplicativo, definido pela Equação 18.

$$Pr ISNA = \beta_0 \cdot Solo^{\beta_s} \prod_{i=1}^n F_i^{\beta_i} \dots\dots\dots (18)$$

em que:

Pr ISNA é a produtividade estimada pelo ISNA;

β_0 é o coeficiente exponencial da equação;

β_s é o coeficiente exponencial da variável solo;

F_i representa as fases fenológicas da cultura (subperíodos); e

β_i é o coeficiente de sensibilidade para cada fase i, (i = 1, 2, 3 e 4).

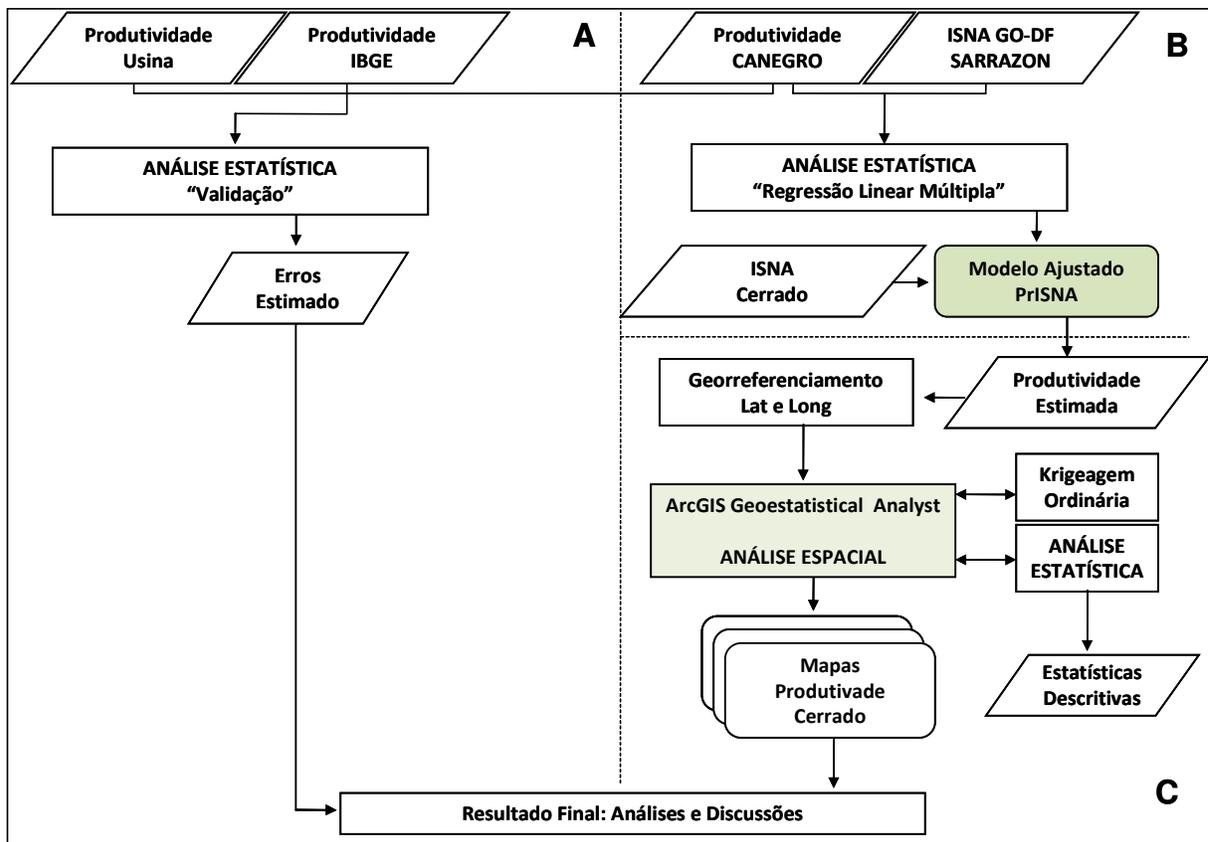


Figura 3.15. Fluxograma da metodologia da validação das estimativas de produtividade do DSSAT/CANEGRO (A), do ajuste do modelo de estimativa da produtividade da cana-de-açúcar a partir dos ISNAs obtidos do SARRA/SARRAZON (B) e aplicação do modelo PrISNA (C).

Para determinar o coeficiente de sensibilidade de cada fase fenológica, utilizou-se o método de regressão linear múltipla. Vale salientar que a variável “solo” foi incorporada ao estudo com a finalidade de melhorar a precisão do modelo, uma vez que as funções ajustadas separadamente para cada tipo de solo apresentaram índices de correlação baixos. As especificações da variável solo (LVA, NQ e LV) foram transformadas e identificadas no modelo como 1, 2 e 3, respectivamente. Para linearizar os dados, aplicou-se o logaritmo neperiano (Ln), na Equação 18, obtendo-se então a Equação 19.

$$Ln(\text{PrISNA}) = Ln(\beta_0) + \beta_1 * Ln(F_1) + \beta_2 * Ln(F_2) + \beta_3 * Ln(F_3) + \beta_4 * Ln(F_4) + \beta_5 * Ln(\text{Solo}) \dots (19)$$

em que:

$Ln(\text{PrISNA})$ é o logaritmo neperiano da produtividade;

$Ln(\beta_0)$ é o logaritmo neperiano do coeficiente linear da equação;

$Ln(F_1)$ é o logaritmo neperiano da primeira fase;

$Ln(F_2)$ é o logaritmo neperiano da segunda fase;

$Ln(F_3)$ é o logaritmo neperiano da terceira fase;

$Ln(F_4)$ é o logaritmo neperiano da quarta fase;

(β_1) é o coeficiente angular da primeira fase;

(β_2) é o coeficiente angular da segunda fase;

(β_3) é o coeficiente angular da terceira fase;

(β_4) é o coeficiente angular da quarta fase;

(β_5) é o coeficiente angular da variável solo; e

Os β_i são os coeficientes angulares gerados pela regressão linear múltipla.

Para verificar a adequabilidade do modelo estimado, foram efetuados diagnósticos para a verificação de multicolinearidade, autocorrelação residual, normalidade e homocedasticidade (variância constante de erros) (MATOS, 1995). Todas as análises estatísticas foram realizadas no software estatístico SPSS, versão 15.0.

3.7.1 Aplicação do modelo agrometeorológico PrISNA para estimativa da produtividade média de cana-de-açúcar na região de Cerrado

Conforme fluxograma ilustrado na Figura 3.15C, utilizou-se o SARRA/SARRAZON para simular o plantio da cana-de-açúcar no mês de outubro nos três ambientes de solos considerado (LV, NQ e LVA), em 1363 postos pluviométricos da região de Cerrado e áreas vizinhas. Os dados de chuva e de evapotranspiração potencial foram obtidos da base do sistema Agritempo. Demais procedimentos e critérios foram os mesmo descritos na seção 3.5.

Das simulações, foram obtidos os índices de satisfação das necessidades de água (ISNA) médios referentes às quatro fases fenológicas da cultura. Em seguida, esses índices foram incorporados ao modelo PrISNA para ser obtido, como parâmetro de saída, a produtividade média.

Os valores de produtividade obtidos para cada localidade de posto pluviométrico foram georreferenciados por meio da latitude e da longitude para, em seguida, serem incorporadas ao SIG e convertidos em mapas. Os procedimentos de análise espacial foram os mesmos descritos na seção 3.6.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados os resultados da caracterização do ambiente de produção agrícola do Estado de Goiás e Distrito Federal, com ênfase especial nas principais variáveis climáticas e condicionantes do potencial produtivo da cultura da cana-de-açúcar. A análise espaço-temporal da pluviometria, da temperatura e da radiação solar global, bem como de suas interações com os parâmetros físico-hídricos dos solos, e fenologia e fisiologia da cultura, foram fundamentais na tentativa de compreender melhor os resultados de produção e índices hídricos obtidos por simulação, através da aplicação dos modelos agrometeorológicos DSSAT/CANEGRO e o SARRA/SARRAZON.

4.1 *Análise da precipitação pluviométrica no Estado de Goiás e no Distrito Federal*

A Figura 4.1 apresenta a distribuição espacial da precipitação pluviométrica média anual obtida a partir dos valores observados para as 38 estações meteorológicas utilizadas no estudo. O mapa foi obtido por krigeagem ordinária, seguindo metodologia utilizada por EVANGELISTA (2004), uma vez que o conjunto de dados apresentou distribuição normal, e tem o objetivo de auxiliar na compreensão quando da análise espacial da produtividade e dos índices hídricos obtidos pelos modelos DSSAT/CANEGRO e SARRA, respectivamente.

Segundo GOOVAERST (1997), também observado por EVANGELISTA (2004), uma das características do interpolador por krigeagem ordinária é minimizar o efeito de uma única estação, quando esta é utilizada para estimativa de áreas de sua vizinhança e sob sua influência. A krigeagem ordinária contabiliza uma média local e flutuante, limitando o domínio da estacionariedade ao local da vizinhança $W(\mathbf{u})$, segundo a Equação 20.

$$m(\mathbf{u}) = \text{constante, mas desconhecida } \forall \in W(\mathbf{u}) \dots\dots\dots (20)$$

As demais variáveis do estimador são obtidas do semivariograma, instrumento estatístico de suporte às técnicas de krigeagem, um diagrama onde são modeladas as variografias ou dependência espacial, e impressas as variâncias médias de um conjunto de pares de amostras em função de uma distância determinada.

No mapa de chuva média anual de Goiás, ilustrado na Figura 4.1, apresentam-se os índices pluviométricos variando de 1200 a 1600 mm, distribuídos em cinco classes com diferenças de 50 mm cada uma. As precipitações menores ocorrem no extremo nordeste do Estado, na divisa com a Bahia, com classe de chuva de 1199 a 1400 mm. As demais classes de chuva aumentam gradativamente na forma de faixas longitudinais distribuídas no sentido leste-oeste, onde a faixa de índices maiores, entre 1550 e 1600 mm, localiza-se no extremo oeste de Goiás.

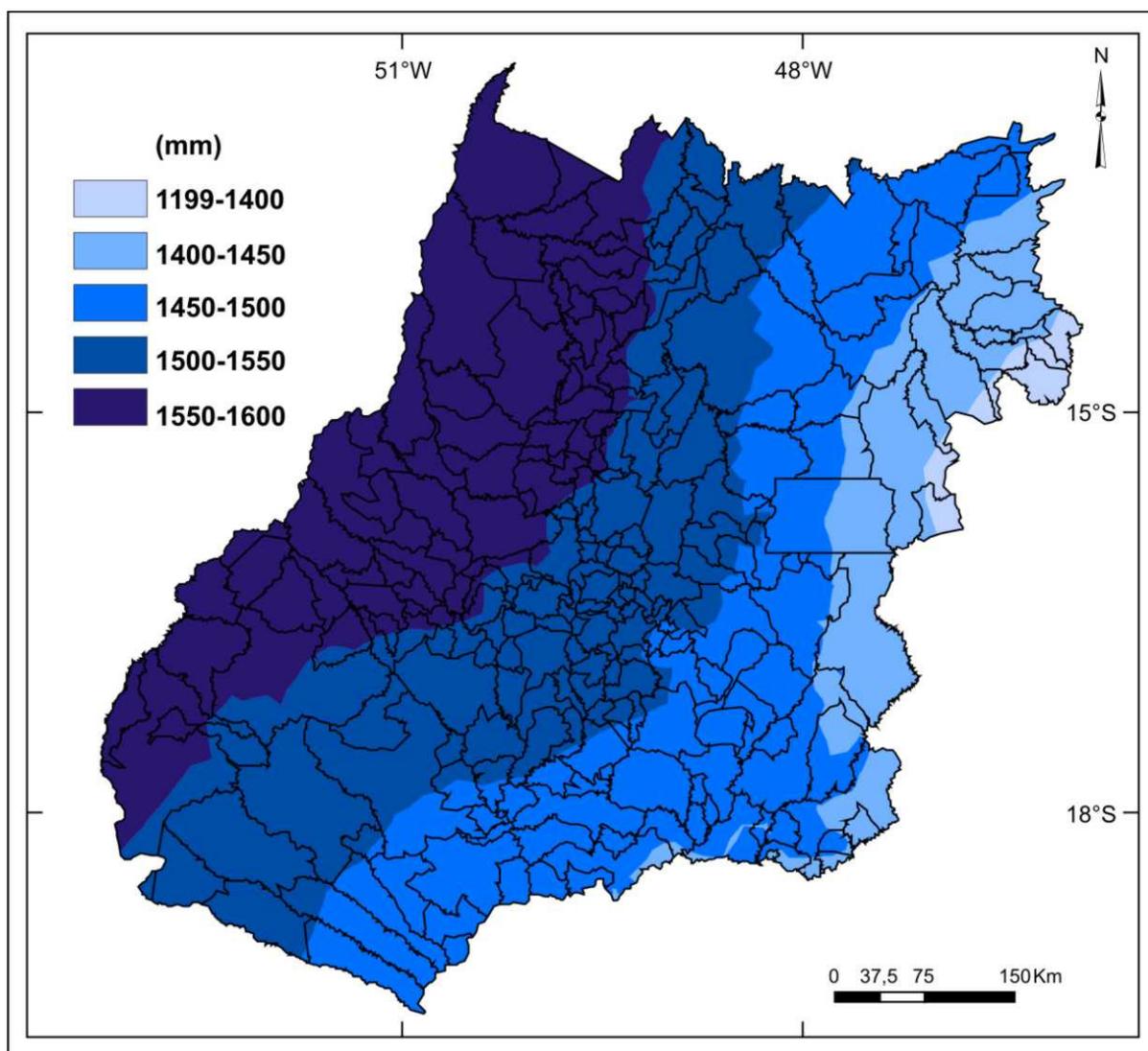


Figura 4.1. Precipitação pluviométrica média anual do Estado de Goiás e Distrito Federal, estimada por krigeagem ordinária.

Quando comparado com a geografia da chuva apresentada por EVANGELISTA (2004), obtida de 242 postos pluviométricos, observa-se aumento das chuvas no sentido leste-oeste. Naquele trabalho, observaram-se três zonas localizadas na região central do Estado com precipitações de 1700 até 2000 mm anuais, enquanto aqui, os maiores valores de chuva observados foram de 1550 a 1600 mm na faixa longitudinal no extremo oeste do Estado. Essa diferença pode ter se dado em função do número diferente de postos (242 e 39) e de séries pluviométricas (30 anos e 15 a 30 anos) utilizados nos dois estudos.

4.2 *Análise da temperatura média em Goiás e Distrito Federal*

O mapa de temperatura média anual, apresentado na Figura 4.2, foi obtido das temperaturas diárias registradas nas 38 estações meteorológicas utilizadas neste trabalho. A temperatura média anual estimada dos postos foram georreferenciadas por latitude e longitude para serem incorporadas ao sistema de informações geográficas, módulo ArcGIS Geostatistical Analyst, da ESRI (ArcGIS 8). As estatísticas descritivas obtidas da análise exploratória do conjunto de dados apresentaram índices de distribuição normal e variância estatisticamente baixa, condições que também justificaram a aplicação da técnica e do interpolador de krigeagem ordinária na espacialização e geração do mapa de temperatura. Ressalta-se que foram atendidas as condições impostas pela krigeagem, ou seja, variância mínima e média do erro igual a zero.

No mapa de temperatura (Figura 4.2) observam-se valores de 20 a 26°C, distribuídos em faixas ou classes de um grau centígrado, onde as temperaturas menores ocorrem numa pequena região ao sudeste do Estado e as maiores ocorrem em três pequenas regiões localizadas no centro, oeste e extremo nordeste, respectivamente. Embora as variações térmicas não se apresentem em faixas regulares e orientadas, como acontece com a chuva, pode-se observar as maiores temperaturas ocorrendo nas regiões localizadas na metade norte de Goiás.

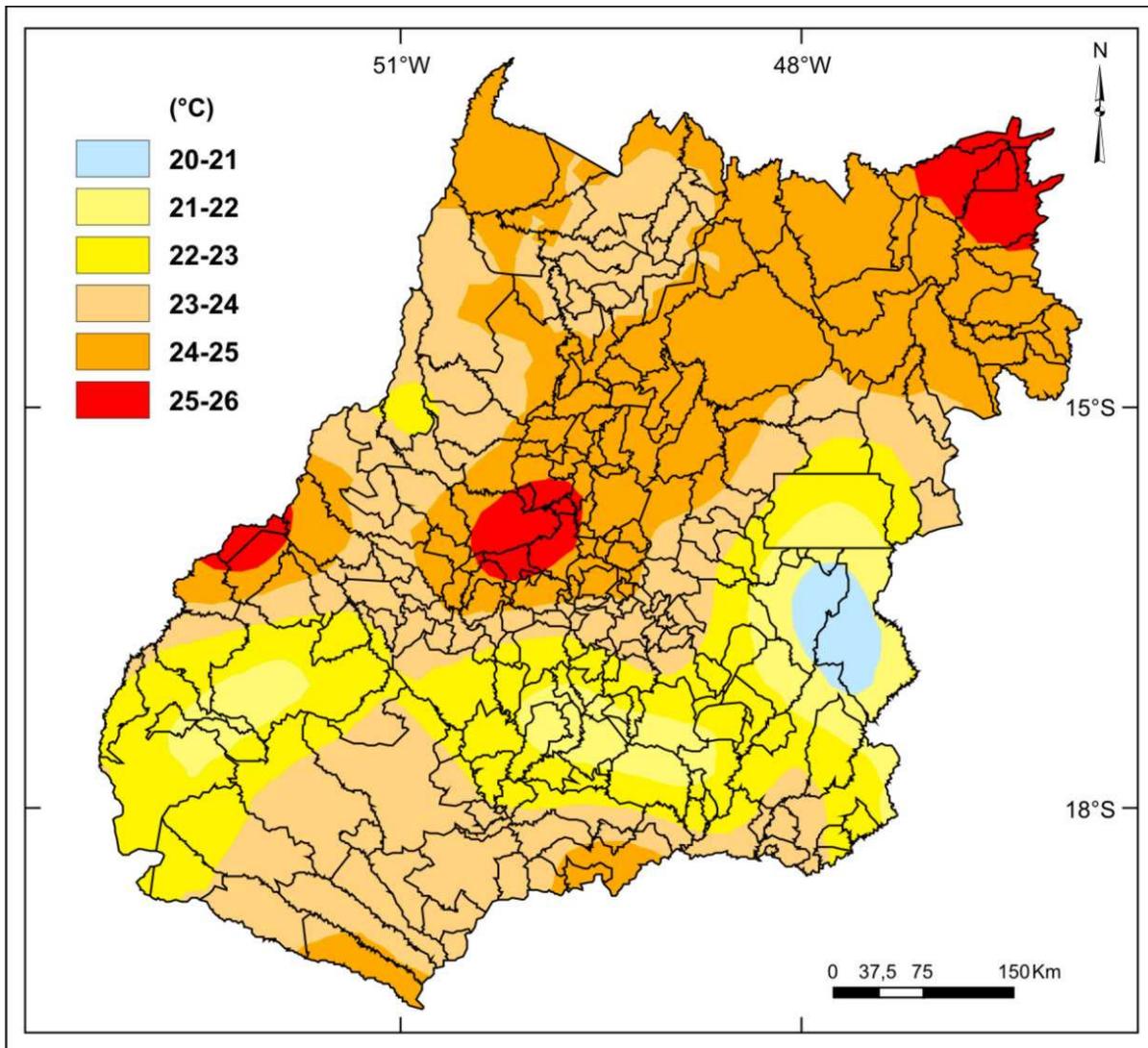


Figura 4.2. Temperatura média anual do Estado de Goiás e Distrito Federal, obtido por krigagem ordinária.

4.3 Análise da radiação solar global em Goiás e Distrito Federal

Da radiação solar global diária média anual, apresentada na Figura 4.3, estimada a partir dos registros das estações meteorológicas, obtiveram-se 207 e 227 MJ/m²/dia como valores mínimo e máximo. No entanto, devido à característica do interpolador de krigagem ordinária, que não considera o valor e o peso de cada amostra individualmente, mas um valor médio, móvel e flutuante, os valores extremos (máximo e mínimo) são, normalmente, atenuados, não apresentados nos mapas.

Observa-se, na Figura 4.3, que, de maneira geral, a radiação solar aumenta do sentido nordeste para sudoeste, na forma de faixas transversais regulares, exceto por duas grandes áreas localizadas no extremo sudoeste e oeste do Estado, respectivamente. Esta lógica espacial não era esperada, uma vez que a incidência dos raios solares na superfície terrestre se dá de forma inclinada (oblíqua) e tem sua intensidade variável em função do cosseno do ângulo zenital (zênite local e a posição do sol), sendo que este varia conforme a latitude local. Isso ocorre devido ao eixo da terra ser inclinado em relação ao equador solar (OMETTO, 1981). A não disposição das classes de radiação em faixas com maior tendência no sentido norte-sul pode estar associada ao número reduzido e à distribuição espacial irregular das estações meteorológicas utilizadas no trabalho.

Fazendo uma analogia entre o ordenamento espacial da energia solar e a característica C4 da cana-de-açúcar, de grande eficiência na conversão energética, admitindo-se a hipótese da energia solar ser o fator determinante do processo fotossintético, e de não ocorrer saturação da energia fotossinteticamente ativa, esperar-se-ia que as maiores produtividades ocorressem na metade oeste do Estado.

4.4 Produtividade da cana-de-açúcar estimada pelo modelo DSSAT/CANEGRO

4.4.1 Análise dos resultados

Nesta seção, e também nos anexos 7.1a a 7.3b e também 7.4.1 a 7.4.3, são apresentadas as estatísticas descritivas obtidas da análise exploratória do conjunto de dados de produtividade de cana-de-açúcar estimados pelo modelo DSSAT/CANEGRO para cada localidade representada pelos postos meteorológicos, considerando plantios a cada dia 05 dos meses de outubro a janeiro de 1979 a 2008, em três tipos diferentes de solos. Foram estimados produtividades também para o ano de 2040, referentes aos cenários A2 e B2 de projeções de mudanças climáticas globais. Para realização das análises estatísticas a seguir, utilizou-se o módulo ArcGIS Geostatistical Analyst, da ESRI, do ArcMAP versão 8.0.

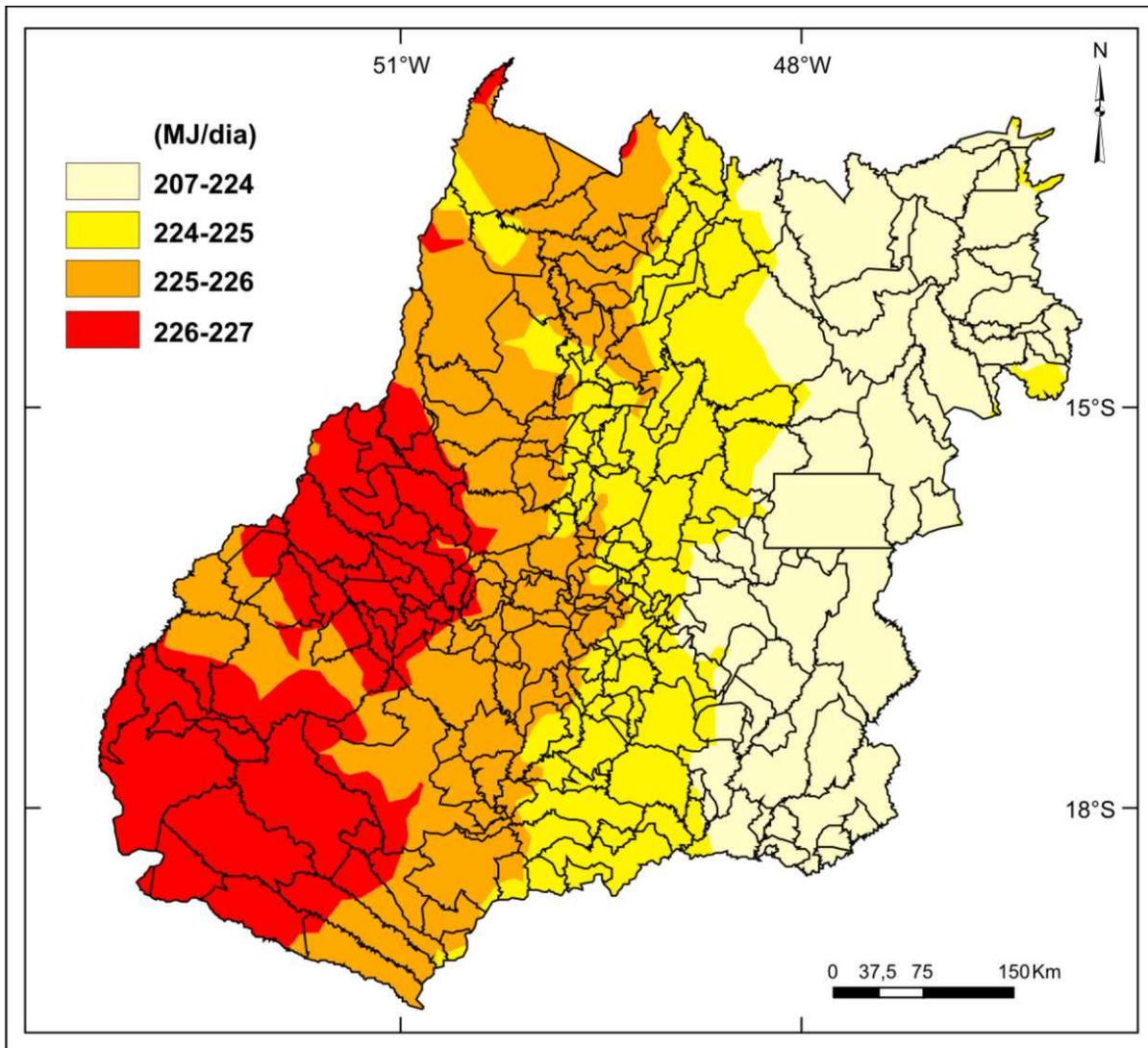


Figura 4.3. Radiação solar global diária média anual do Estado de Goiás e Distrito Federal, obtida por krigeagem ordinária.

Das estatísticas descritivas, estão apresentados e analisados os histogramas, projetados os valores médios e medianos, dos quartis inferior (25%) e superior (75%), valores máximos e mínimos, desvio padrão e coeficientes de assimetria e curtose.

Nas Figuras 4.4 a 4.7, estão apresentadas as estatísticas descritivas das produtividades referentes aos plantios efetuados nos meses de outubro a janeiro em ambiente de Latossolo Vermelho distrófico, de Neossolo Quartzarênico e de Latossolo Vermelho-Amarelo. Vale ressaltar que esses solos representam os ambientes ou cenários de alta, média e baixa capacidade de retenção e disponibilidade de água para a cultura da cana, com reserva útil na zona radicular estimada em 40, 49 e 76 mm, respectivamente.

As estatísticas das produtividades obtidas para as simulações de plantio realizadas no mês de outubro (dia 05) nos três tipos de solos estão apresentadas na Figura 4.4. Observa-se que, de maneira geral, a distribuição das classes de frequência e os valores similares de média e mediana apresentam indícios de comportamento normal, com maior evidência e simetria para os índices do Latossolo Vermelho (Figura 4.4A). O índice máximo de produtividade foi de 154 t/ha, observado no LV, enquanto o mínimo foi de 55 t/ha, apresentado no LVA.

As produtividades médias de 136, 128 e 78 t/ha, bem como as diferenças entre os valores máximos e mínimos, de 39, 45 e de 39 t/ha, estimadas para o LV (Figura 4.4A), NQ (Figura 4.4B) e LVA (Figura 4.4C), respectivamente, indicam relação forte entre a disponibilidade hídrica e a produtividade estimada. Enquanto o LVA, com reserva útil de 40 mm na zona radicular, apresentou média de 78,2 t/ha, o LV, com reserva útil de 76 mm na zona radicular (90% superior), apresentou média de 136,4 t/ha, 74% superior.

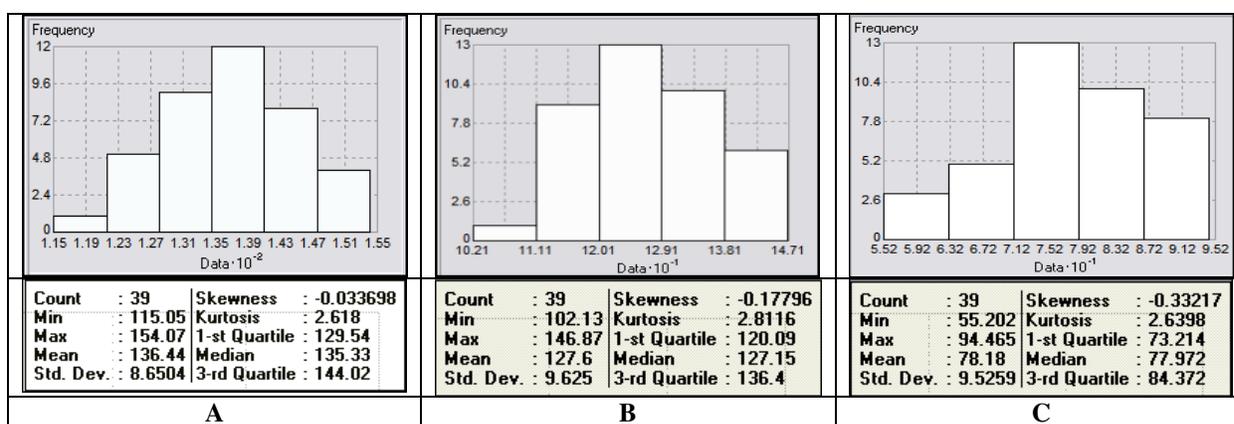


Figura 4.4. Estatísticas descritivas da produtividade da cana-de-açúcar, variedade RB72454, estimada pelo DSSAT/CANEGRO, para plantios em outubro, num Latossolo Vermelho (A), num Neossolo Quartzarênico (B) e num Latossolo Vermelho-Amarelo (C), do Estado de Goiás e Distrito Federal.

As estatísticas descritivas das produtividades obtidas para as simulações de plantio realizadas para o mês de novembro (dia 05) e representativas dos cenários de alta, média e baixa retenção de água, estão apresentadas na Figura 4.5 A, B e C, respectivamente. Embora não tão característicos como os valores apresentados para o mês de outubro, as distribuições de frequência e os valores médios e medianos também apresentam evidências de distribuição normal, também com assimetrias negativas, mas mais acentuadas em relação ao mês anterior.

O LV (Figura 4.5A) apresentou produtividade de 126 t/ha, 88% superior à apresentada pelo LVA (Figura 4.5C), com 67 t/ha, enquanto o NQ (Figura 4.5B) apresentou produtividade média de 114 t/ha. Neste mês, observou-se valor mínimo de 49,3 t/ha no LVA e máximo de 140,9 t/ha no LV, com diferenças entre os valores máximos e mínimos em cada solo, variando de 30 a 33 t/ha. Embora as produtividades estimadas para plantios no mês de novembro tenham apresentado índices inferiores ao mês anterior, estes ainda são elevados e refletem o aproveitamento pela cultura de, praticamente, todo o período chuvoso.

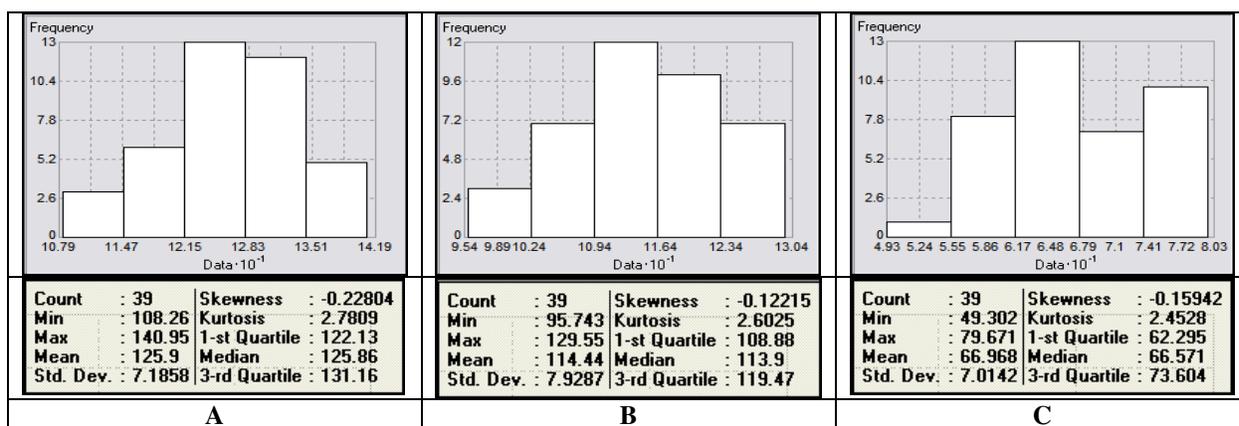


Figura 4.5. Estatísticas descritivas da produtividade da cana-de-açúcar, variedade RB72454, estimada pelo DSSAT/CANEGRO para plantios em novembro num Latossolo Vermelho (A), num Neossolo Quartzarênico (B) e num Latossolo Vermelho-Amarelo (C), do Estado de Goiás e Distrito Federal.

Na Figura 4.6, estão apresentadas as estatísticas de produtividade estimadas para os solos LV (4.5A), NQ (4.5B) e LVA (4.5C), para plantios em dezembro. Também se observam, pelo histograma, distribuição normal, com assimetria negativa mais acentuada no LV (-0.4), valores variando de 43 a 140 t/ha e médias de rendimento de 58, 109 e 122 t/ha observados nos cenários de baixa, média e alta reserva de água dos solos, respectivamente (Figuras 4.5 C, B e A). A diferença entre os valores máximos e mínimos foi de 30, 41 e 38 t/ha para a mesma sequência de solos/cenários.

Quando comparado ao mês de novembro, observa-se pouca diferença nas produtividades, com redução de 3,4, 5,4 e 8,6 t/ha no LV, NQ e LVA, respectivamente.

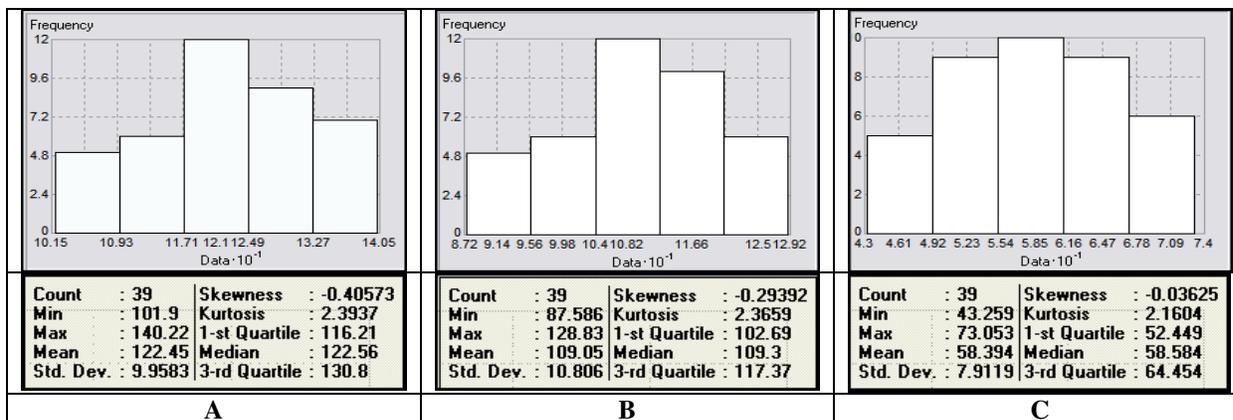


Figura 4.6. Estatísticas descritivas da produtividade da cana-de-açúcar, variedade RB72454, estimada pelo DSSAT/CANEGRO para plantios em dezembro num Latossolo Vermelho (A), num Neossolo Quartzarênico (B) e num Latossolo Vermelho-Amarelo (C), do Estado de Goiás e Distrito Federal.

As estatísticas de produtividade obtidas das simulações para plantios no mês de janeiro estão apresentadas nas Figuras 4.7 A, B e C. De maneira geral, elas apresentam valores aproximados aos apresentados no mês de dezembro, com diferenças em torno de 1,0 t/ha. Os incrementos de produtividade continuaram respondendo à capacidade de armazenamento de água dos solos, na zona radicular da cultura, com médias de 59 t/ha (LVA), 110 t/ha (NQ) e de 123 t/ha (LV), e diferenças de 26, 40 e 38 t/ha nos respectivos solos.

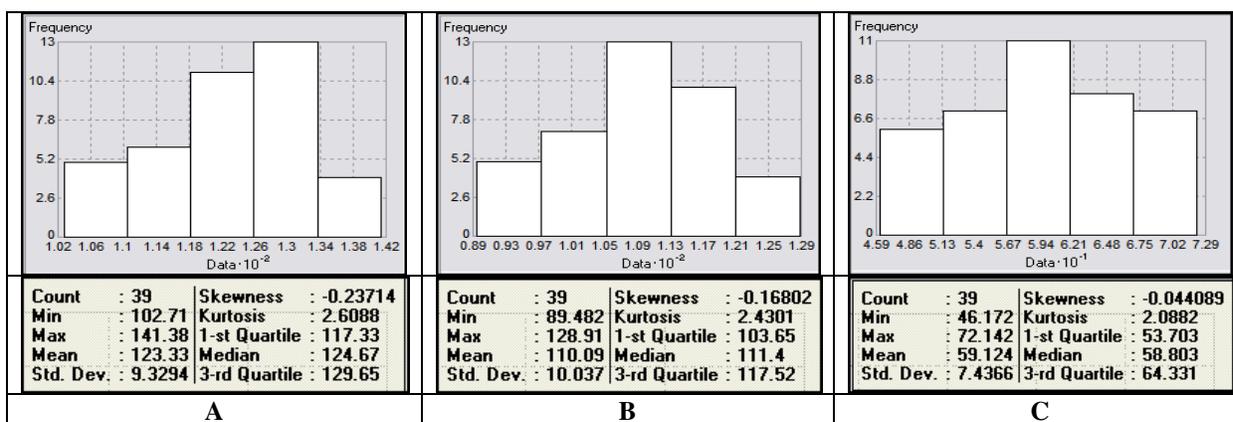


Figura 4.7. Estatísticas descritivas da produtividade da cana-de-açúcar, variedade RB72454, estimada pelo DSSAT/CANEGRO para plantios em janeiro num Latossolo Vermelho (A), num Neossolo Quartzarênico (B) e num Latossolo Vermelho-Amarelo (C), do Estado de Goiás e Distrito Federal.

Quando analisado o conjunto das estatísticas descritivas do comportamento dos dados de produtividade simulados para os três ambientes de solos e para os meses de outubro a janeiro, podem ser feitas as observações seguintes:

1. As estimativas de produtividade apresentaram indicativos de comportamento normal, com distribuições de frequência geralmente simétricas, desvios padrões variando de 7,0 a 10,8, indicando respostas do modelo em relação à oferta hídrica, tanto no tempo quanto no espaço.

2. Observou-se que, dos três cenários simulados, à medida que os solos apresentam maior capacidade de água disponível e, conseqüentemente, maior reserva útil na zona radicular da cultura, as produtividades obtidas são maiores. Assim, o Latossolo Vermelho (LVd), representativo dos melhores cenários de disponibilidade hídrica, foi o que apresentou os maiores índices de produtividade, em todos os meses de plantio. Isto evidencia a dependência da cultura em relação ao regime hídrico local e às diferentes características físico-hídricas dos solos, com reflexo na capacidade de armazenar água e disponibilizá-la para as plantas.

3. Dos resultados das simulações de plantio realizadas para os três tipos de solos e nos quatro meses, as produtividades maiores foram obtidas para os plantios efetuados no mês de outubro. Este resultado é justificado considerando que este mês corresponde ao início da estação chuvosa na região dos Cerrados, e que, em função do ciclo anual da cana-de-açúcar, esses plantios permitem o aproveitamento das chuvas ocorridas em todo o seu ciclo de desenvolvimento vegetativo e acúmulo de matéria seca. Ainda, o final da estação chuvosa e conseqüente início do período de fortes restrições hídricas coincidem com a época de temperaturas baixas na região de Cerrados. Esses fatores são essenciais para o processo de maturação fisiológica e conversão de sacarose pela cultura.

4.5 Distribuição espacial da produtividade da cana-de-açúcar, variedade RB72454, estimada pelo DSSAT/CANEGRO.

Como apresentado e discutido na seção 4.4, os dados de produtividade média anual, estimados para o período 1979-2008, foram georreferenciados e incorporados ao módulo ArcGIS Geostatistical Analyst, da ESRI, do ArcMAP versão 8.0, para serem apresentados na forma de mapas, após aplicação da técnica de krigeagem ordinária. O objetivo foi

compreender a geografia das potencialidades produtivas da cana-de-açúcar na região dos Cerrados, considerando as suas variabilidades ambientais de solo e clima, especialmente do impacto da chuva e temperatura na produção da cultura, no tempo e no espaço.

Os mapas de produtividade média da cana-de-açúcar no Estado de Goiás e no Distrito Federal, obtidos a partir de simulações pelo modelo DSSAT/CANEGRO, estão apresentados nas Figuras 4.8 a 4.11. Os valores foram reclassificados (“fatiados”) em classes de 5 t/ha. As estimativas de áreas referentes às classes de produtividade estão apresentadas na Tabela 4.1. Cabe ressaltar que os valores máximos e mínimos podem ser atenuados pelo interpolador de krigeagem ordinária, que não considera o peso de cada amostra individualmente, mas, sim, um valor médio, móvel e flutuante, e nem sempre apresentados nos mapas.

A Figura 4.8 apresenta áreas de produtividades potenciais estimadas para plantio no mês de outubro. Plantios neste mês permitem o aproveitamento de, praticamente, toda a oferta hídrica anual, justificando os maiores rendimentos estimados. Observa-se que os incrementos de produtividade seguem a mesma lógica espacial da distribuição anual das chuvas na região, ou seja, no sentido leste-oeste, e em todos os cenários de solos analisados.

Em ambientes similares ao LVA (Figura 4.8 C), toda a região apresenta, praticamente, potencial produtivo de 75 a 85 t/ha. Em ambientes similares ao NQ (Figura 4.8 B), a metade leste da região apresenta produtividades de 120 a 130 t/ha, enquanto a metade oeste apresenta os potenciais maiores, de 130 a 140 t/ha.

Em ambientes de solos com as capacidades maiores de retenção de água (CAD), representado pelo LVd (Figura 4.8 A), o terço leste apresenta classes de 130 a 135 t/ha, o terço central tem potencial de 135 a 140 t/ha e o terço oeste com 140 a 145 t/ha.

Para plantios realizados no mês de novembro, conforme ilustrado na Figura 4.9, observa-se variabilidade espacial menor entre as classes de produtividade. No ambiente LV (A), dois terços (centro-leste) do Estado, aproximadamente, apresentaram produtividade de 125 a 130 t/ha, enquanto uma faixa no extremo-leste apresentou 115 a 120 t/ha, e uma área localizada nas proximidades da região de Rio Verde, com 130 a 135 t/ha.

Tabela 4.1. Área, em hectare e percentual, das classes de produção da cana-de-açúcar, variedade RB72454, estimada pelo DSSAT/CANEGRO para o Estado de Goiás e Distrito Federal.

Plantio	Solo	Prod_Classe	Área		
			ha	%	
Outubro	LVd	130-135	6.516	19	
		135-140	10.455	30	
		140-145	15.664	45	
		145-150	2.076	6	
	NQ	120-125	8.308	24	
		125-130	13.698	39	
		130-135	12.225	35	
		135-140	479	1	
	LVAd	70-75	3.792	11	
		75-80	13.496	39	
		80-85	15.897	46	
		85-90	1.525	4	
	Novembro	LVd	115-120	76	0
			120-125	8.420	24
125-130			22.550	65	
130-135			3.665	11	
NQ		105-110	912	3	
		110-115	10.849	31	
		115-120	22.643	65	
LVAd		120-125	306	1	
		60-65	4.071	12	
		65-70	22.637	65	
70-75	8.003	23			
Dezembro	LVd	110-115	174	1	
		115-120	5.376	15	
		120-125	20.325	59	
		125-130	8.808	25	
		130-135	29	0	
	NQ	100-105	2.661	8	
		105-110	9.331	27	
		110-115	21.483	62	
	LVAd	115-120	1.235	4	
		50-55	229	1	
55-60		20.374	59		
60-65	14.108	41			
Janeiro	LVd	115-120	3.529	10	
		120-125	18.939	55	
		125-130	11.479	33	
		130-135	764	2	
	NQ	105-110	11.199	32	
		110-115	22.346	64	
		115-120	1.166	3	
	LVAd	55-60	16.362	47	
60-65		18.349	53		

Assim como observado na seção 4.4, através da análise das estatísticas descritivas, o comportamento espacial da produtividade média referente aos meses de dezembro e janeiro (Figuras 4.10 e 4.11) apresentam similaridade visual. Nos cenários de baixa retenção de água (Figuras 4.10 C e 4.11C), observa-se que a metade leste da região apresentou classes de produtividade de 55 a 60 t/ha, a metade oeste do estado apresentou produtividades de 60 a 65 t/ha. No solo de CAD média (Figuras 4.10 B e 4.11 B), observou-se que, praticamente, os dois terços a oeste apresentaram produtividades de 110 a 115 t/ha, reduzindo para 100 a 110 t/ha nas demais áreas. O ordenamento espacial das produtividades estimadas para o solo de CAD maior referente a esses dois meses (Figuras 4.10 A e 4.11 A), também se apresentaram maior na faixa central, transversal (nordeste-sudoeste), com produtividade de 120 a 125 t/ha, uma faixa menor com 115 a 120 t/ha a sudeste, e outras duas faixas, uma central e outra à noroeste, com estimativas de 125 a 130 t/ha.

Em resumo, pode se afirmar que o ordenamento espacial das classes de produtividade estimadas pelo modelo DSSAT/CANEGRO apresentou-se, de maneira geral, em forma de faixas regulares e visualmente similares às classes de chuva média anual, ilustradas na Figura 4.1. As regiões com maiores índices de precipitação pluviométrica apresentam as maiores produtividades potenciais.

Pode-se, então, afirmar que a precipitação é um dos elementos principais determinantes do ordenamento espacial da produção de cana-de-açúcar no Cerrado.

Ainda, a tendência de aumento da produtividade no sentido leste oeste apresenta forte similaridade com o aumento da radiação solar global. Contudo, apesar da eficiência elevada da cana-de-açúcar na assimilação de energia solar, pode-se afirmar que toda a área de estudo não apresenta limitações para o suprimento da demanda fotossintética da cana-de-açúcar.

Observando a metodologia do zoneamento ecológico-econômico da cana-de-açúcar (EMBRAPA, 2009) e de riscos climáticos (MAPA, 2010), a temperatura média anual do Estado de Goiás, de 22 a 26°C (Figura 4.11), não apresenta restrições ao cultivo da cultura.

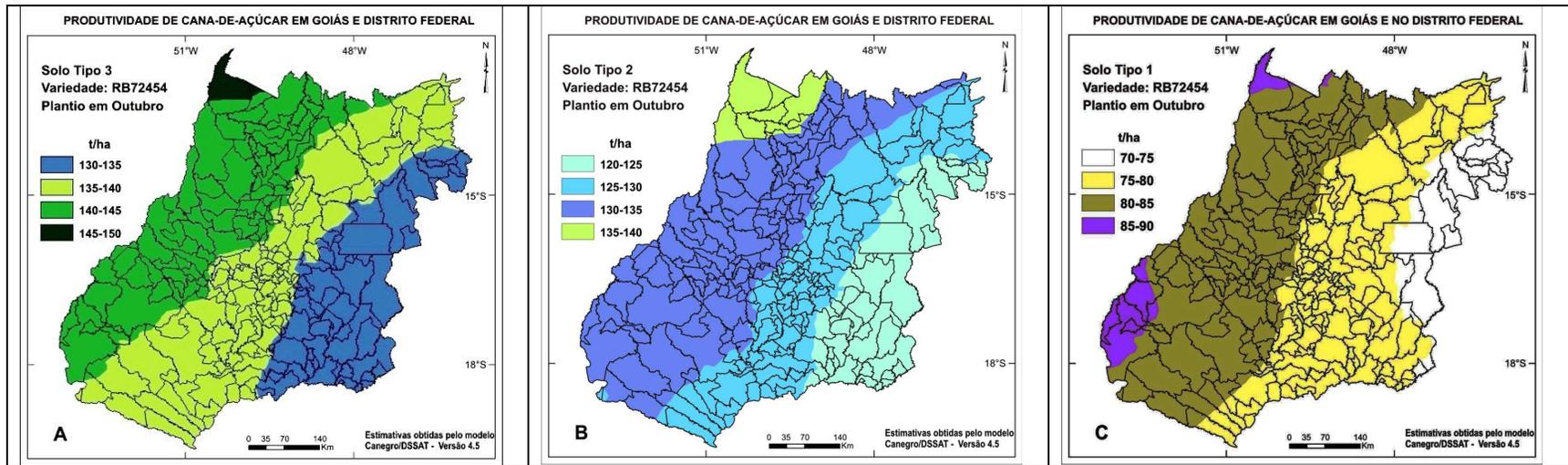


Figura 4.8. Produtividade média de cana-de-açúcar em Goiás e Distrito Federal, estimada pelo DSSAT/CANEGRO para plantio em outubro num solo tipo 3(A), tipo 2 (B) e tipo 1 (C).

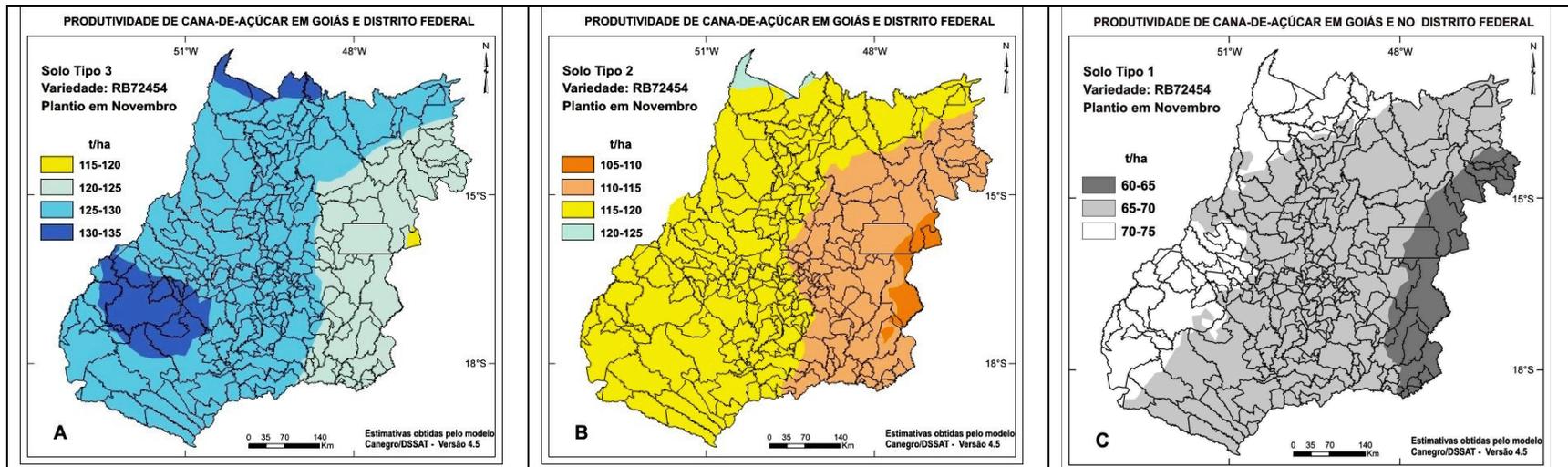


Figura 4.9. Produtividade média de cana-de-açúcar em Goiás e Distrito Federal, estimada pelo DSSAT/CANEGRO para plantio em novembro num solo tipo 3(A), tipo 2 (B) e tipo 1 (C).

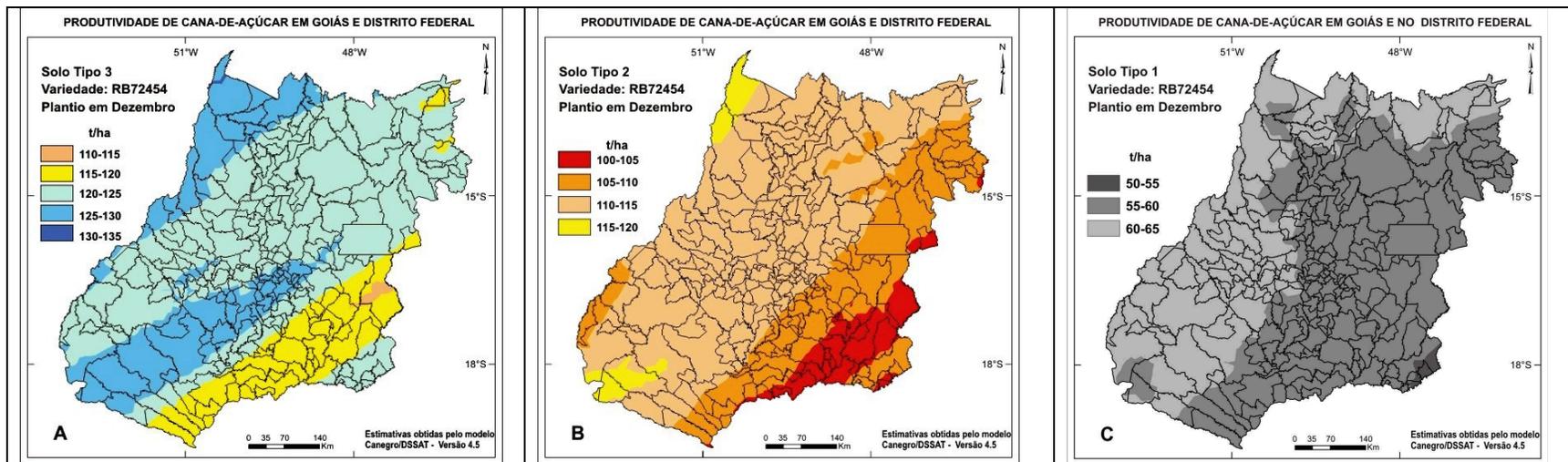


Figura 4.10. Produtividade média de cana-de-açúcar em Goiás e Distrito Federal, estimada pelo DSSAT/CANEGRO para plantio em dezembro num solo tipo 3(A), tipo 2 (B) e tipo 1 (C).

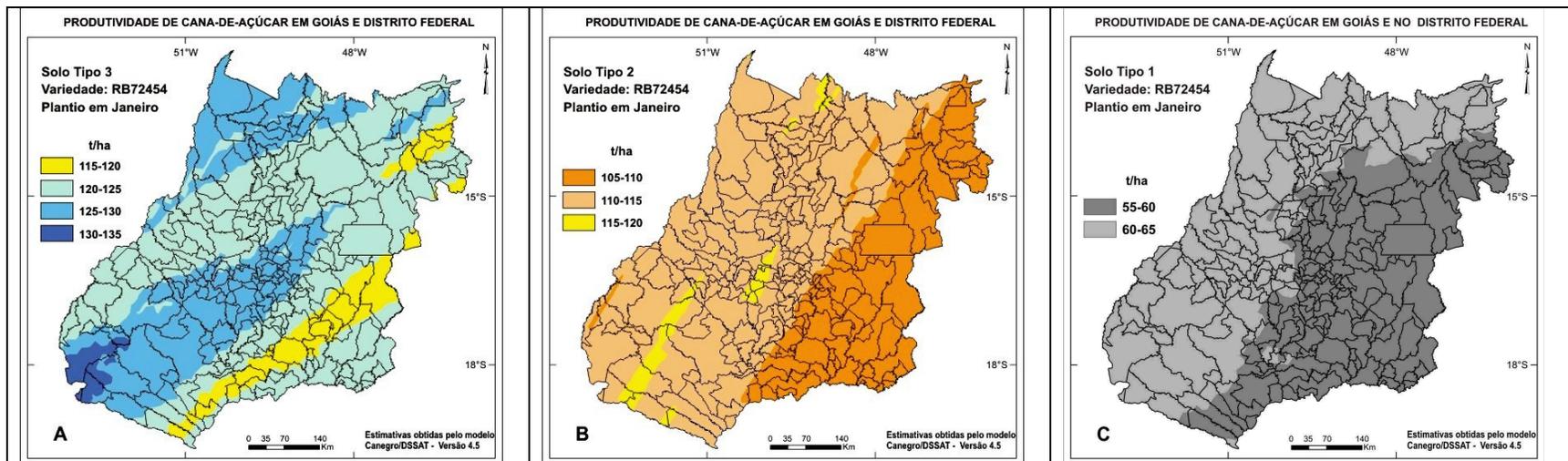


Figura 4.11. Produtividade média de cana-de-açúcar em Goiás e Distrito Federal, estimada pelo DSSAT/CANEGRO para plantio em janeiro num solo tipo 3(A), tipo 2 (B) e tipo 1 (C).

4.5.1 Distribuição espacial da produtividade da cana-de-açúcar, variedade RB72454, estimada pelo DSSAT/CANEGRO e classificada por tipo de solo

As figuras 4.12 a 4.15 apresentam as estimativas de produtividade de cana-de-açúcar, variedade RB72454, estimadas pelo DSSAT/CANEGRO para os solos LVd, NQ e LVAd. Os índices foram espacializados e combinados por cruzamento com o mapa de tipos de solos apresentado através da Figura 3.6 da seção anterior. Os cálculos das áreas por classe de produtividade referente a cada mapa estão apresentados na Tabela 4.2.

Os solos tipo 3 apresentam aproximadamente 56% dos solos do Estado de Goiás e Distrito Federal. Para plantios nesses solos no mês de outubro, ilustrado na Figura 4.12A, destacam-se duas classes de produtividades, sendo que uma, com 20,1% das áreas desses solos produz na faixa de 135-140 t/ha, e a segunda, com 19,8% da área, na classe de 140-145 t/ha. Para os plantios em novembro (Figura 4.13A), observa-se predomínio das produtividades na faixa de 125-130 t/ha e representam 36,5% da área ocupada por esses solos. Para os plantios em dezembro (Figura 4.14A), observaram-se predomínio da classe de produtividade de 120-125 t/ha, e representa 29,6% das áreas ocupadas por estes solos. Enquanto em janeiro, Figura 4.15A, em 28,9% das áreas a classe de produtividade apresentada foi de 120-125 t/ha.

Nos solos tipo 2, que representam 36,4% da área dos solos da região, no mês de outubro 17,2% apresentaram produtividades na faixa de 130-135 t/ha (Figura 4.12B); em novembro, 24,6% com 115-120 t/ha (Figura 4.13B); em dezembro, com 24,5% com 110-115 t/ha (Figura 4.14B); e, e em janeiro, 25,6 também na classe de 110-115 t/ha (Figura 4.15B).

Nos solos tipo 1, que representam apenas 4,3% dos solos de GO e DF, destaca-se em outubro, 2,5% da área desses solos com produtividades na faixa de 80-85 t/ha (Figura 4.12C); em novembro, destacam-se 1,0% na faixa de 65-70 t/ha (Figura 4.13C); em dezembro, 2,3% com 60-65 t/ha (Figura 4.14C); e em janeiro, 3% da área com produtividades também na faixa de 60-65 t/ha (Figura 4.15C).

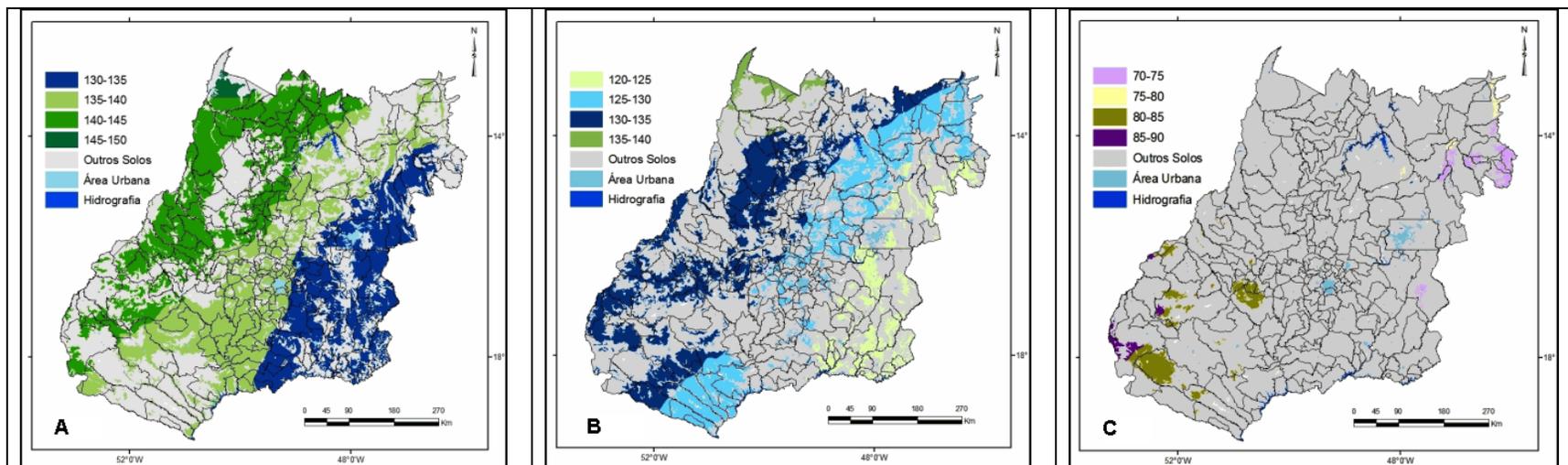


Figura 4.12. Produtividade média de cana-de-açúcar em Goiás e Distrito Federal, estimada pelo DSSAT/CANEGRO para plantio em outubro num solo tipo 3(A), tipo 2 (B) e tipo 1 (C).

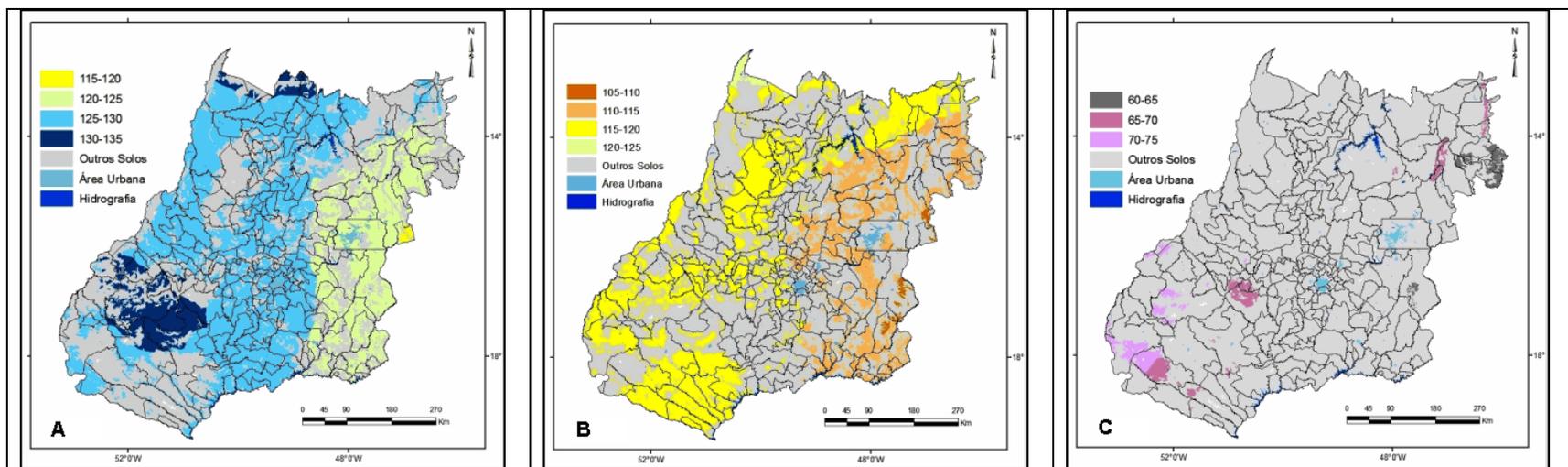


Figura 4.13. Produtividade média de cana-de-açúcar em Goiás e Distrito Federal, estimada pelo DSSAT/CANEGRO para plantio em novembro num solo tipo 3(A), tipo 2 (B) e tipo 1 (C).

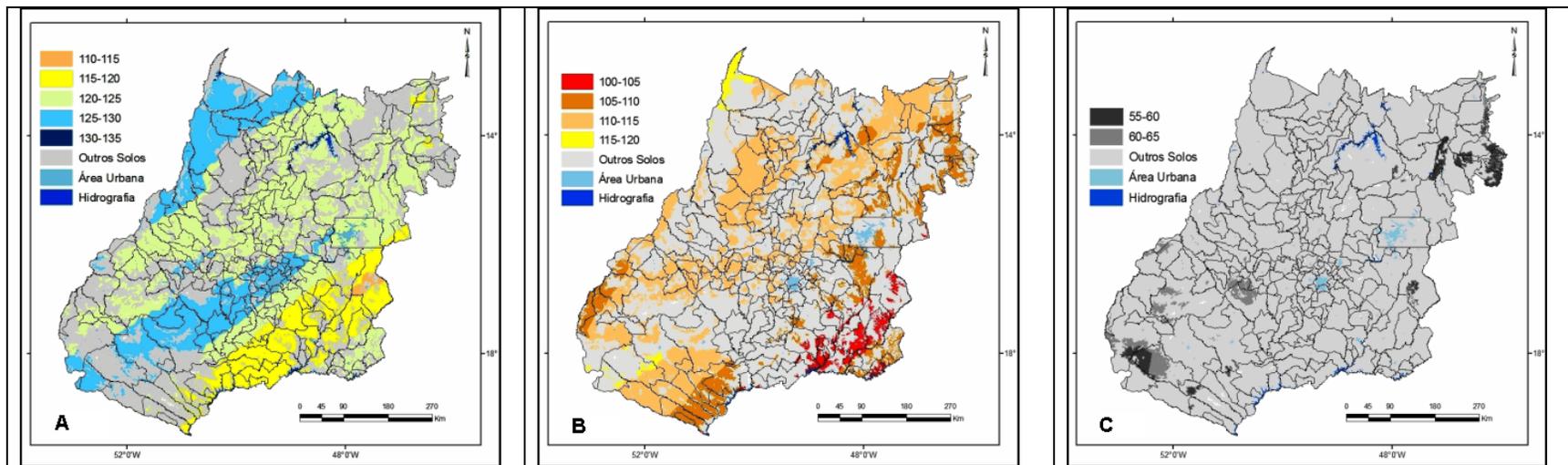


Figura 4.14. Produtividade média de cana-de-açúcar em Goiás e Distrito Federal, estimada pelo DSSAT/CANEGRO para plantio em dezembro num solo tipo 3(A), tipo 2 (B) e tipo 1 (C).

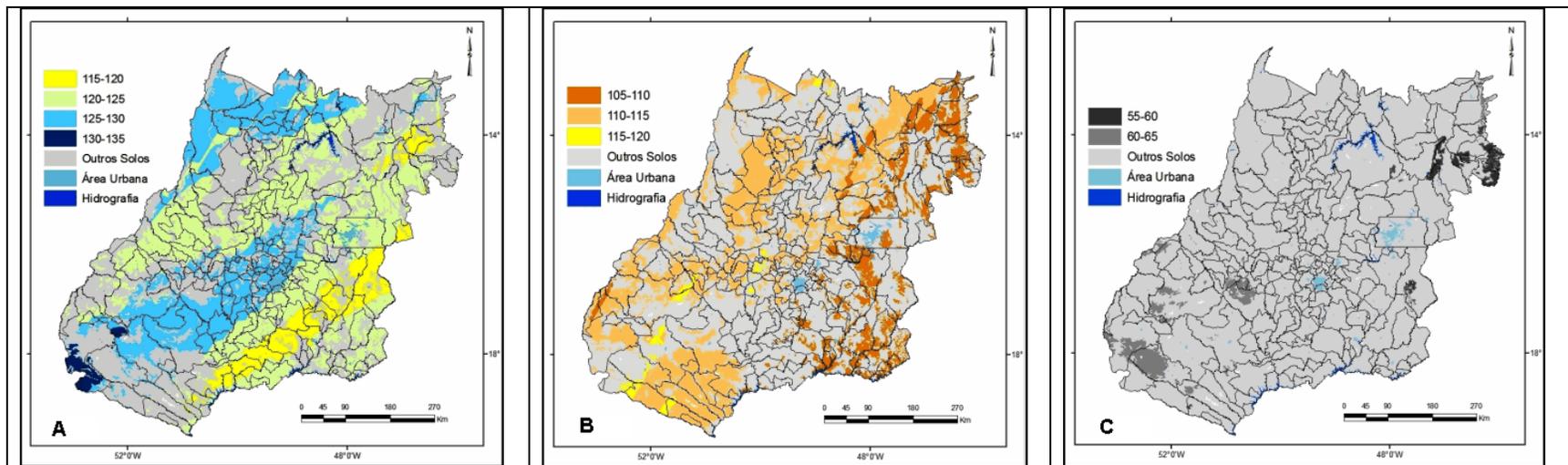


Figura 4.15. Produtividade média de cana-de-açúcar em Goiás e Distrito Federal, estimada pelo DSSAT/CANEGRO para plantio em janeiro num solo tipo 3(A), tipo 2 (B) e tipo 1 (C).

Tabela 4.2. Área das classes de produção da cana-de-açúcar, por tipo de solo, da variedade RB72454, estimada pelo DSSAT/CANEGRO para o Estado de Goiás e o Distrito Federal.

Plantio_Mês	Solo_Tipo	Prod_Classe	Área_Classe	
			ha	%
Outubro	3	130-135	5.176.256,3	14,9
		135-140	6.978.962,5	20,1
		140-145	6.869.562,5	19,8
		145-150	196.693,8	0,6
	2	120-125	1.797.831,3	5,2
		125-130	4.282.468,8	12,3
		130-135	5.967.050,0	17,2
		135-140	518.337,5	1,5
	1	70-75	393.512,5	1,1
		75-80	84.812,5	0,2
		80-85	858.462,5	2,5
		85-90	143.843,8	0,4
Novembro	3	115-120	54.462,5	0,2
		120-125	4.533.806,3	13,1
		125-130	12.681.418,8	36,5
		130-135	1.951.787,5	5,6
	2	105-110	152.531,3	0,4
		110-115	3.670.837,5	10,6
		115-120	8.536.737,5	24,6
		120-125	205.693,8	0,6
	1	60-65	286.318,8	0,8
		65-70	608.218,8	1,8
70-75		586.093,8	1,7	
Dezembro	3	110-115	111.037,5	0,3
		115-120	3.255.712,5	9,4
		120-125	10.264.368,8	29,6
		125-130	5.579.018,8	16,1
		130-135	11.337,5	0,0
	2	100-105	698.212,5	2,0
		105-110	3.057.950,0	8,8
		110-115	8.494.268,8	24,5
		115-120	315.256,3	0,9
	1	50-55	0,0	0,0
55-60		675.375,0	1,9	
60-65		805.256,3	2,3	
Janeiro	3	115-120	2.170.687,5	6,3
		120-125	10.013.937,5	28,9
		125-130	6.701.712,5	19,3
		130-135	335.137,5	1,0
	2	105-110	3.292.993,8	9,5
		110-115	8.894.512,5	25,6
		115-120	378.181,3	1,1
	1	55-60	423.712,5	1,2
60-65		1.056.918,8	3,0	

4.6 Impacto das projeções de mudanças climáticas globais (MCG) na produtividade da cana-de-açúcar em ambientes de cerrado

Nesta seção, são apresentados e discutidos os resultados do impacto dos possíveis cenários futuros das mudanças climáticas globais sobre a produção da cana-de-açúcar em ambientes de Cerrado. Os dados de produtividade foram simulados pelo modelo DSSAT/CANEGRO com a incorporação das temperaturas máximas e mínimas estimadas a partir das projeções de aumento das respectivas temperaturas fornecidas pelo sistema Preci para 2040. A distribuição espacial das projeções de aumento das temperaturas máximas e mínimas obtidas do sistema Preci para o cenário A2 de 2040 para o Estado de Goiás e o Distrito Federal está ilustrada na Figura 4.16, e foram obtidos da espacialização por krigagem ordinária dos dados estimados para cada estação meteorológica, conforme apresentado na Tabela 4.3.

Observam-se através da Figura 4.16A, as projeções de elevação da temperatura máxima entre 1,1 e 1,7°C, onde os maiores valores são observados no extremo norte do Estado e os menores ocorreram no extremo sul. Observa-se também distribuição espacial similar também para as projeções de aumento da temperatura mínima (Figura 4.16B), onde os índices aumentam no sentido sul-norte de Goiás.

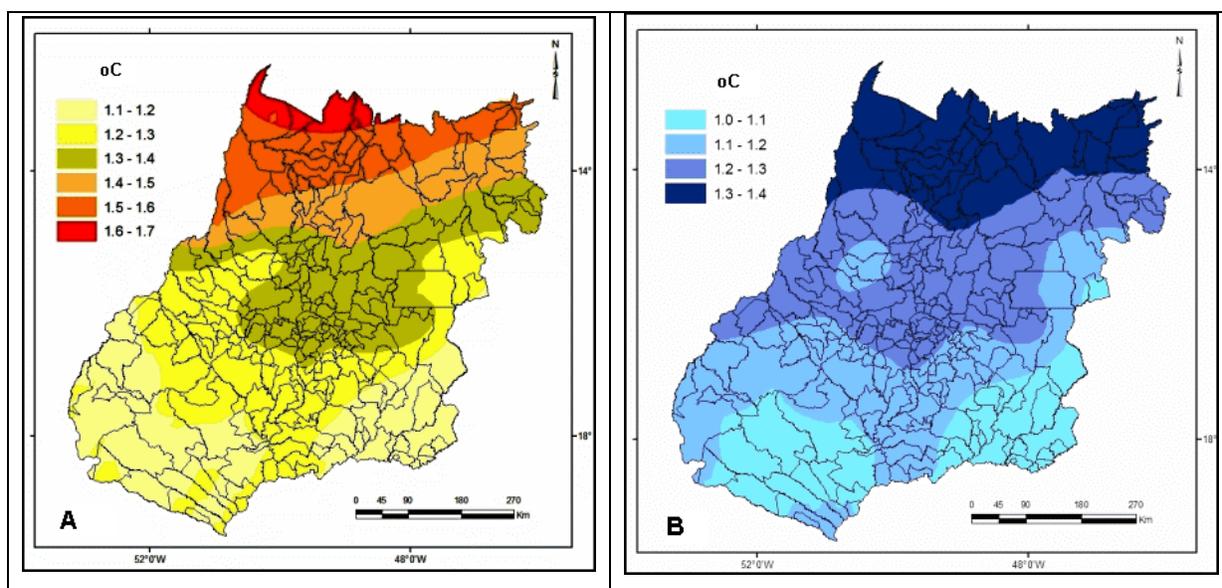


Figura 4.16. A distribuição espacial do aumento das temperaturas máxima (A) e mínima (B) no Estado de Goiás e Distrito Federal, projetadas pelo sistema Preci para o ano de 2040, considerando o cenário A2 de mudanças climáticas globais.

Tabela 4.3. Aumento da temperatura do ar (em °C) projetado pelo sistema Precip para o ano de 2040, para os cenários A2 e B2 de mudanças climáticas globais.

N°	Estação	Localização geográfica			Cenário B2		Cenário A2	
		Lat	Long	Alt (m)	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin
1	Aragarças	-15,90	-52,23	345	1,1	1,0	1,2	1,3
2	Arinos	-15,90	-46,05	519	1,0	0,9	1,2	1,1
3	Brasília	-15,78	-47,93	1160	1,2	1,1	1,3	1,2
4	Capinópolis	-18,72	-49,55	621	1,1	1,0	1,2	1,1
5	Catalão	-18,18	-47,95	840	1,1	1,0	1,1	1,0
6	Embrapa Hortaliças	-15,93	-48,13	998	1,2	1,1	1,3	1,2
7	Embrapa Cerrados	-15,59	-47,71	1000	1,2	1,0	1,3	1,2
8	Embrapa Arroz e Feijão	-16,47	-49,28	823	1,2	1,1	1,3	1,2
9	Formosa	-15,53	-47,33	935	1,1	1,0	1,2	1,1
10	Formoso	-14,93	-46,25	840	1,1	1,0	1,3	1,2
11	Goiânia	-16,67	-49,25	741	1,2	1,1	1,3	1,2
12	Aruanã	-14,90	-51,00	578	1,2	1,1	1,5	1,3
13	Bom Jesus de Goiás	-18,07	-50,18	429	1,0	0,9	1,2	1,1
14	Catalão	-18,12	-47,07	754	1,0	0,9	1,1	1,0
15	Cristalina	-17,12	-47,27	826	1,1	1,0	1,1	1,0
16	Caldas Novas	-17,71	-48,61	701	1,1	1,0	1,1	1,0
17	Caiapônia	-16,97	-51,82	737	1,0	0,9	1,2	1,1
18	Faina	-15,43	-50,37	332	1,3	1,1	1,2	1,1
19	Goiás	-15,92	-50,13	512	1,2	1,1	1,4	1,3
20	Luziânia	-16,27	-47,98	958	1,1	1,0	1,4	1,3
21	Morrinhos	-17,70	-49,11	735	1,1	1,0	1,2	1,1
22	Mineiros	-17,57	-52,60	706	1,0	0,9	1,2	1,1
23	Paraúna	-17,51	-50,49	544	1,0	0,9	1,2	1,1
24	Porangatu	-13,43	-49,13	396	1,3	1,1	1,6	1,4
25	Quirinópolis	-18,60	-50,40	418	1,0	0,9	1,2	1,1
26	Varjão	-17,09	-49,67	718	1,1	1,0	1,3	1,2
27	Goianésia	-15,22	-49,00	651	1,3	1,2	1,4	1,3
28	Ipameri	-17,72	-48,17	773	1,1	1,0	1,1	1,0
29	Itumbiara	-18,42	-49,22	449	1,1	1,0	1,2	1,1
30	Jataí	-17,88	-51,72	663	1,0	0,9	1,2	1,1
31	Nova Xavantina	-14,70	-52,35	308	1,1	1,0	1,4	1,3
32	Paracatu	-17,23	-46,88	712	1,0	0,9	1,1	1,0
33	Paranaíba	-19,75	-51,18	331	1,0	0,9	1,2	1,1
34	Peixe	-12,02	-48,35	242	1,4	1,2	1,7	1,4
35	Pirenópolis	-15,85	-48,97	740	1,3	1,1	1,3	1,2
36	Posse	-14,10	-46,37	826	1,3	1,1	1,4	1,3
37	Rio Verde	-17,80	-50,92	775	1,0	0,9	1,2	1,1
38	Taguatinga	-12,40	-46,42	604	1,5	1,2	1,6	1,4
39	Unai	-16,36	-46,80	692	1,0	0,9	1,1	1,0

Os dados de temperatura foram incorporados ao modelo DSSAT/CANEGRO para estimativa da produtividade da cana-de-açúcar, sendo que não foram observadas diferenças estatisticamente e economicamente consideráveis, inferiores a 1,0 t/ha entre os cenários A2 e B2. Assim, são apresentados e discutidos somente os resultados dos impactos causados pela elevação da temperatura no cenário A2, mais pessimista, de maior acréscimo das temperaturas e efeitos adversos. No entanto, admite-se que esses resultados também podem ser considerados para o cenário B2.

4.6.1. Estatísticas descritivas das estimativas do impacto das projeções de mudanças climáticas globais na produtividade da cana-de-açúcar cultivada em ambientes de cerrado, válidas para o cenário A2 de 2040

As Figuras 4.17 a 4.24 apresentam as estatísticas descritivas do conjunto de 30 índices de produtividades anuais (1979 a 2008) estimadas para as 39 localidades e três tipos de solos estudados, para plantios nos meses de outubro a janeiro.

Se forem confirmadas as projeções de aumento da temperatura, e preservadas as condições atuais de oferta hídrica na região de Cerrados, os resultados do modelo de simulação de crescimento e produtividade indicam incremento da produtividade de até 7,3 t/ha em certas localidades, bem como de redução de até 1,6 t/ha em outras, em determinadas condições de solo e período simulados. Alguns resultados podem ser destacados:

As estatísticas de produtividade para plantios efetuados no mês de outubro estão apresentadas nas Figuras 4.17 e 4.18. Observam-se valores médios de 79 t/ha para os LVA (Figura 4.17C), 132 t/ha nos NQ (Figura 4.17B) e de 140 t/ha nos LV (Figura 4.17A). Em comparação com as produtividades atuais, observam-se ganhos médios de 1,1, 4,3 e 3,4 t/ha nos respectivos solos (Figuras 4.18C, B e A). Embora os valores sejam relativamente pequenos, pouco significativos e possam representar pequeno impacto econômico, eles indicam tendência de aumento das produtividades.

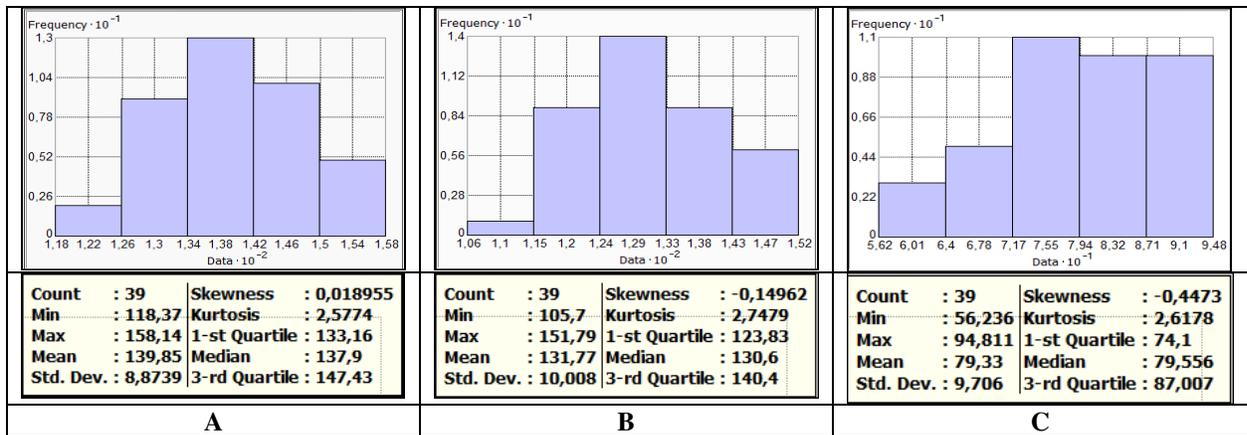


Figura 4.17. Estatísticas descritivas da produtividade da cana-de-açúcar, variedade RB72454, em Goiás e Distrito Federal, estimada pelo DSSAT/CANEGRO para plantio em outubro num Latossolo Vermelho (A), Neossolo Quartzarênico (B) e Latossolo Vermelho-Amarelo (C), válido para o ano de 2040 (cenário A2 de MCG).

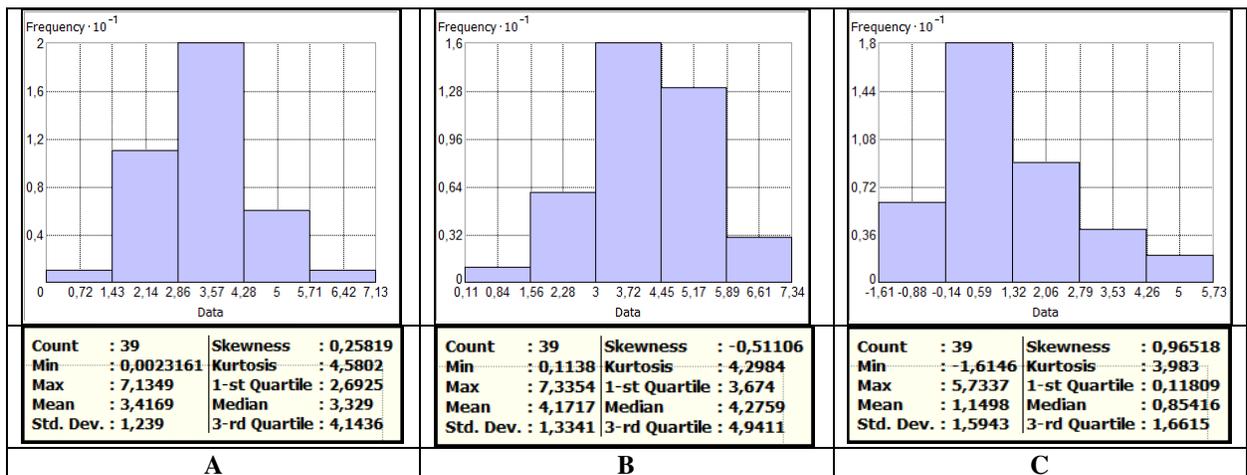


Figura 4.18. Estatísticas descritivas da diferença de produtividade da cana-de-açúcar, variedade RB72454, em Goiás e Distrito Federal, estimada pelo DSSAT/CANEGRO, entre 2010 e 2040 (cenário A2 de MCG), para plantio em outubro num Latossolo Vermelho (A), Neossolo Quartzarênico (B) e Latossolo Vermelho-Amarelo (C).

As Figuras 4.19 e 4.20 apresentam as estatísticas da produção simulada para plantio em novembro no cenário A2, bem como a diferença quando comparada à produtividade atual. Obtiveram-se valores médios de 69, 118 e 129 t/ha nos LVA (C), NQ (B) e LV (A), respectivamente. Na mesma ordem (Figuras 4.20C, B e A), observou-se que o impacto médio na produção foi um ganho de aproximadamente 2,0, 3,9 e 3,12 t/ha. Podem ser considerados pouco significativos economicamente, mas apontam para aumento e não redução das produtividades.

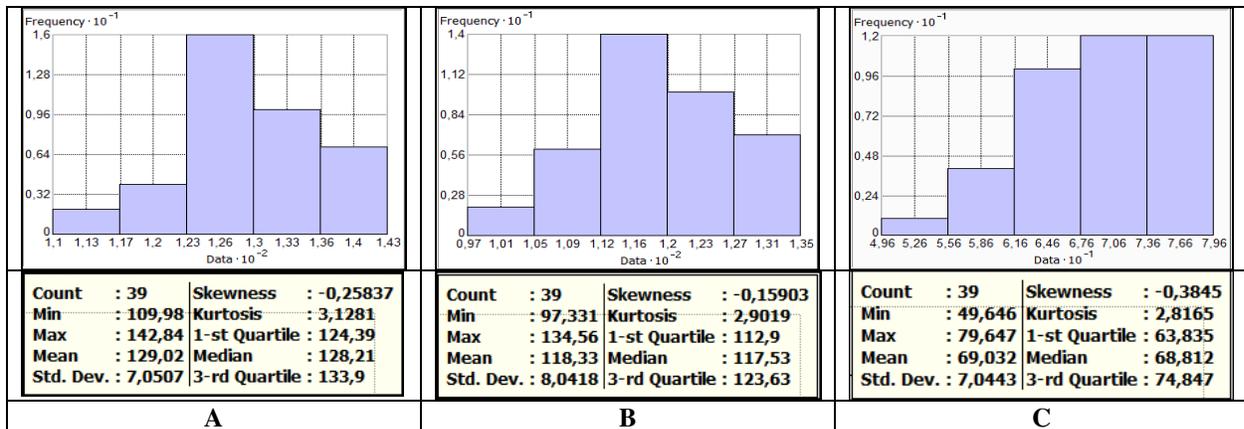


Figura 4.19. Estatísticas descritivas da produtividade da cana-de-açúcar, variedade RB72454, em Goiás e Distrito Federal, estimada pelo DSSAT/CANEGRO para plantio em novembro num Latossolo Vermelho (A), Neossolo Quartzarênico (B) e Latossolo Vermelho-Amarelo (C), válido para o ano de 2040 (cenário A2 de MCG).

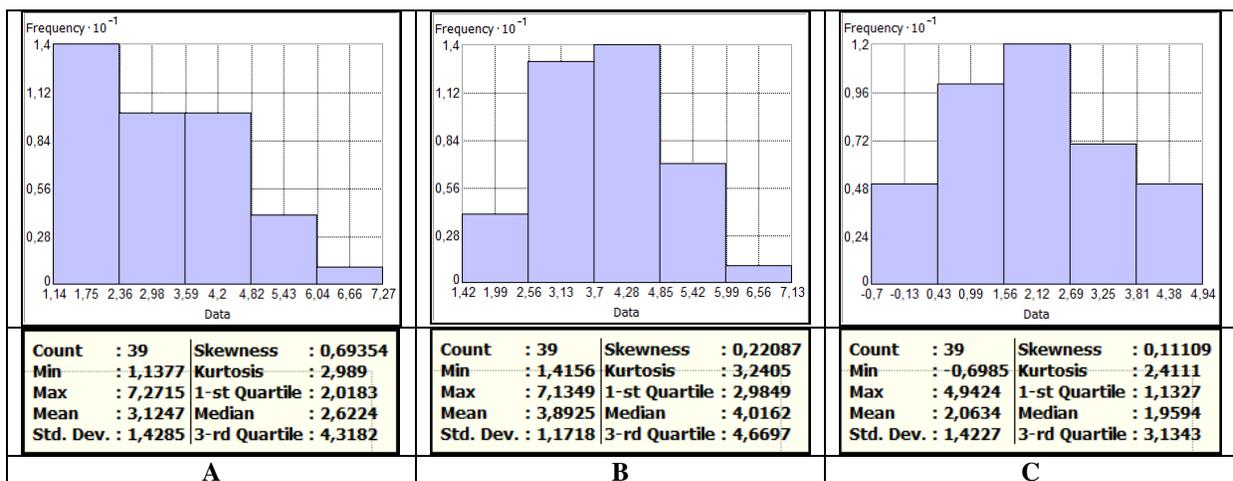


Figura 4.20. Estatísticas descritivas da diferença de produtividade da cana-de-açúcar, variedade RB72454, em Goiás e Distrito Federal, estimada pelo DSSAT/CANEGRO, entre 2010 e 2040 (cenário A2 de MCG), para plantio em novembro num Latossolo Vermelho (A), Neossolo Quartzarênico (B) e Latossolo Vermelho-Amarelo (C).

Para as simulações de plantios no mês de dezembro, observaram-se produtividades médias de 125 t/ha nos LV (Figura 4.21A), de 112 t/ha nos NQ (Figura 4.21B) e redução para 61 t/ha nos LVA (Figura 4.21C), com diferenças positivas, em relação ao cenário atual, de 2,4, 3,1 e 2,6 t/ha (Figura 4.22A, B e C). Esses valores apresentaram pouca diferença em relação ao mês de novembro.

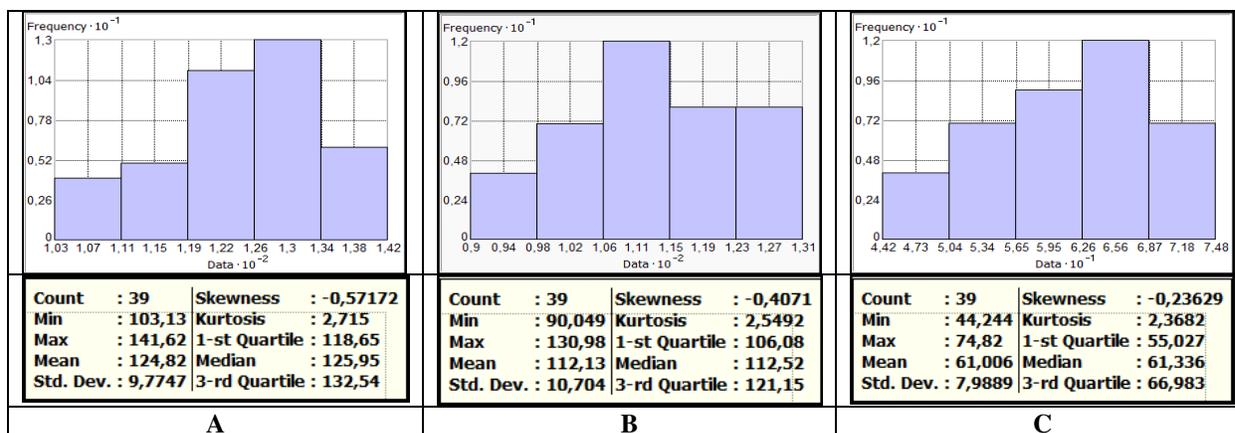


Figura 4.21. Estatísticas descritivas da produtividade da cana-de-açúcar, variedade RB72454, em Goiás e Distrito Federal, estimada pelo DSSAT/CANEGRO para plantio em dezembro num Latossolo Vermelho (A), Neossolo Quartzarênico (B) e Latossolo Vermelho-Amarelo (C), válido para o ano de 2040 (cenário A2 de MCG).

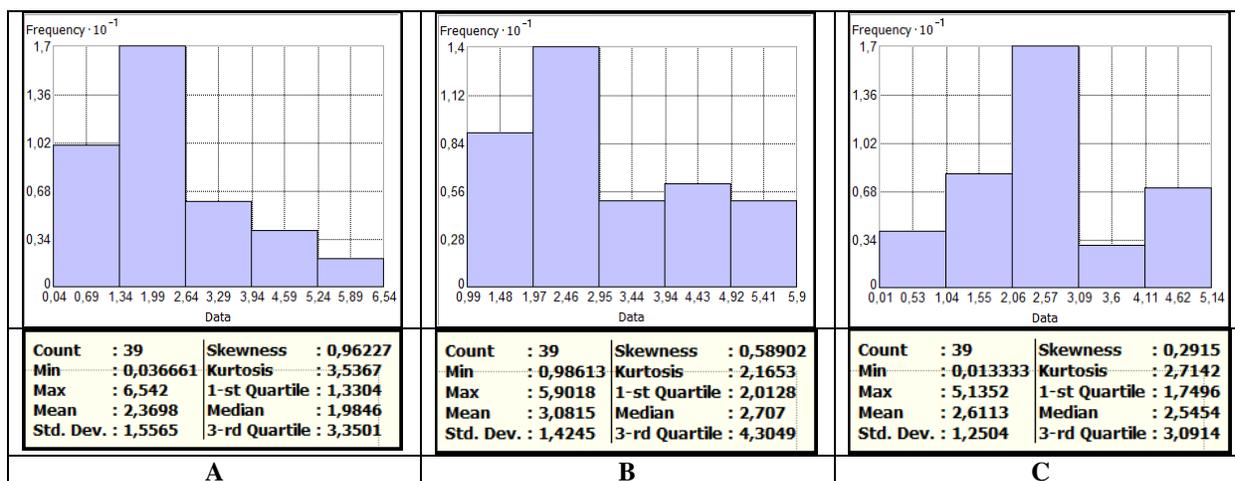


Figura 4.22. Estatísticas descritivas da diferença de produtividade da cana-de-açúcar, variedade RB72454, em Goiás e Distrito Federal, estimada pelo DSSAT/CANEGRO, entre 2010 e 2040 (cenário A2 de MCG), para plantio em dezembro num Latossolo Vermelho (A), Neossolo Quartzarênico (B) e Latossolo Vermelho-Amarelo (C).

Conforme apresentado na Figura 4.23, o impacto das elevações das temperaturas sobre a produção de cana-de-açúcar com plantios em janeiro apresentou produtividades médias de 125, 113 e 61 t/ha para os solos LV (A), NQ (B) e LVA (C), respectivamente, representando ganhos médios de 2,1, 3,0 e 2,4 t/ha (Figuras 4.24A, 4.24B e 4.24C). Também podem ser considerados pouco significativos estatisticamente, mas indicam tendência de aumento da produtividade.

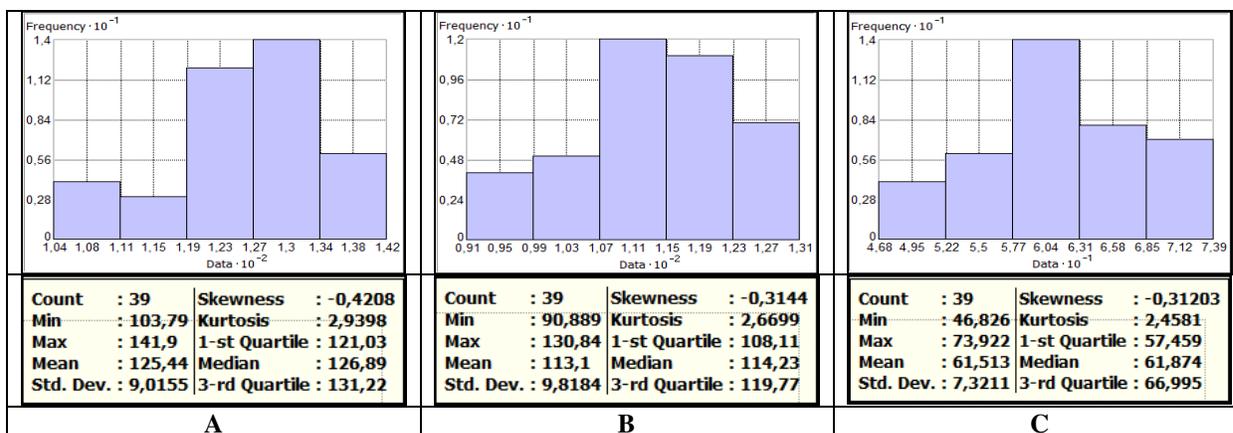


Figura 4.23. Estatísticas descritivas da produtividade da cana-de-açúcar, variedade RB72454, em Goiás e Distrito Federal, estimada pelo DSSAT/CANEGRO para plantio em janeiro num Latossolo Vermelho (A), Neossolo Quartzarênico (B) e Latossolo Vermelho-Amarelo (C), válido para o ano de 2040 (cenário A2 de MCG).

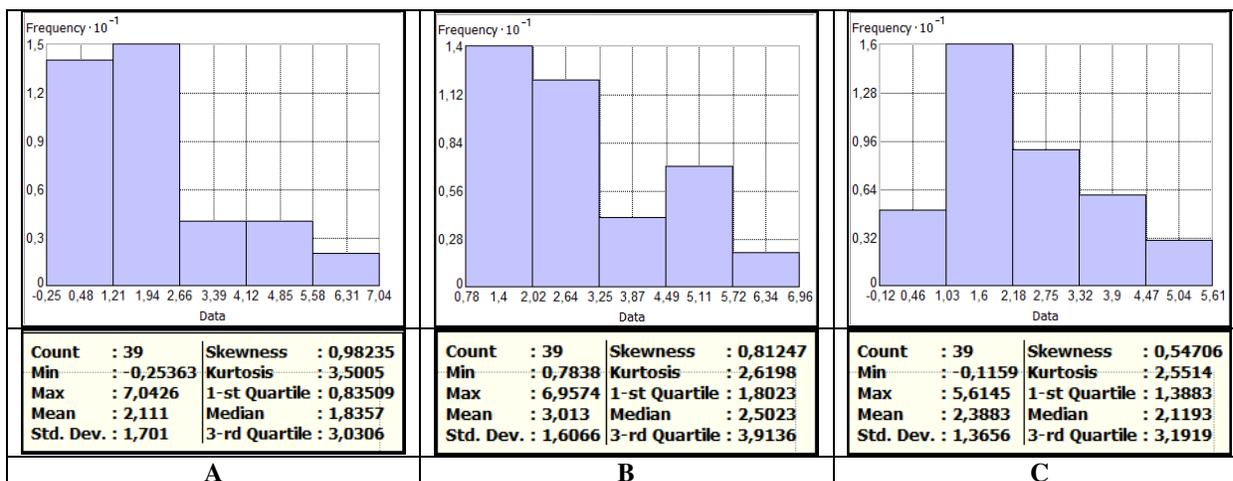


Figura 4.24. Estatísticas descritivas da diferença de produtividade da cana-de-açúcar, variedade RB72454, em Goiás e Distrito Federal, estimada pelo DSSAT/CANEGRO, entre 2010 e 2040 (cenário A2 de MCG), para plantio em janeiro num Latossolo Vermelho (A), Neossolo Quartzarênico (B) e Latossolo Vermelho-Amarelo (C).

Em resumo, alguns resultados obtidos podem ser destacados:

I - O impacto médio foi de 1,1, 2,0, 2,6 e 2,4 t/ha, nas simulações realizadas para plantios em Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), nos meses de outubro a janeiro, respectivamente. Os índices projetados podem ser considerados pouco significativos e há indícios de que, em ambientes de restrições hídricas fortes, independentemente da época de plantio, a elevação da temperatura nos níveis simulados praticamente não reflete na produtividade da cana-de-açúcar

nos Cerrados. Ressalta-se que estudos conduzidos por ASSAD et al. (2008) sobre o impacto das mudanças climáticas na produção agrícola brasileira, apontam para perdas significativas e redução de áreas de cultivo com baixos riscos nas culturas anuais na região central do Brasil, com impactos fortes na produção de grãos, especialmente, nas áreas de cerrados nordestino. As culturas de algodão, feijão, soja e milho serão afetadas, mas com maior impacto sobre a soja.

II - O impacto médio nas produtividades simuladas para plantios em Neossolo Quartzarênico, representando solos com CAD média, foi de 4,2, 3,9, 3,1 e 3,0 t/ha nos meses de outubro a janeiro, respectivamente. Embora ainda pequenos, os índices apresentam evidência da resposta da temperatura ao aumento da reserva hídrica dos solos.

III - Das simulações realizadas para plantio num Latossolo Vermelho, representando os solos com AD mais elevada, foi observado aumento na produtividade média de 3,4, 3,1, 2,4 e 2,1 t/ha, para os meses de outubro a janeiro, respectivamente. Embora as produtividades estimadas para esse solo tenham sido maiores que no NQ, os ganhos em produtividade também foram pequenos e, ainda, menores que os LVA. Provavelmente, porque nestas condições a cana atingiu o máximo do potencial produtivo, reduzindo os ganhos.

IV - Em condições de mudanças climáticas globais, o mês de outubro continuou tendo os maiores índices de produtividade, refletindo o aproveitamento melhor das chuvas pela cultura da cana-de-açúcar e, também, por sua condição C4, de maior eficiência no aproveitamento da energia para síntese de fotoassimilados.

V - A partir da análise da distribuição das classes frequenciais conclui-se que, de maneira geral, as distribuições das produtividades estimadas apresentaram comportamento normal, com simetria maior no mês de outubro. As assimetrias maiores ocorreram nas estatísticas dos resíduos ou diferenças entre o cenário atual e o A2.

VI - O impacto da temperatura sobre a produtividade potencial observado aqui, apresentou índices aproximados aos encontrados por MARIN et al. (2009) e EVANGELISTA et al. (2009), mas, inferiores aos obtidos por GOUVÊA et al.(2009).

4.6.2 Análise espacial das estimativas do impacto das projeções mudanças climáticas globais na produtividade da cana-de-açúcar, variedade RB72454, cultivada em ambientes de cerrado, válida para o cenário A2 de 2040

As Figuras 4.25 a 4.32 ilustram os mapas da distribuição espacial da produção da cana-de-açúcar em Goiás e Distrito Federal, bem como da diferença de produtividade entre os cenários atual e A2 de 2040, obtidas pelo modelo DSSAT/CANEGRO, parametrizado com temperaturas estimadas pelo sistema Precip de previsão de mudanças climáticas globais, para o cenário A2 de 2040. As estimativas de área, em hectares e percentual, de cada classe de produtividade, em A2 de 2040, estão apresentadas na Tabela 4.4, e da diferença entre o cenário atual e o A2 de 2040 (impacto), estão na Tabela 4.5.

Em outubro, o LV (Figura 4.25A) apresentou predominância de duas grandes áreas: uma a leste, com classes de 135 a 140 t/ha; e outra a oeste, com 140 a 143 t/ha. No NQ (Figura 4.25B), observam-se três faixas regulares e transversais, com 125 a 130 t/ha, a leste; 130 a 135 t/ha, no centro, e 135 a 140 t/ha, a oeste. No LVA (Figura 4.25C), predominaram duas áreas diferentes: uma no centro-leste, com 75 a 80 t/ha e outra no sudoeste-noroeste, com 80 a 85 t/ha.

Observa-se, nas Figuras 4.26 A, B e C, que o ordenamento espacial das diferenças entre a produção atual e do cenário A2/2040 não apresentou o mesmo padrão que as produções totais de A2/2040. No LV, ocorreu o predomínio do incremento da produtividade entre 3 e 4 t/ha. No NQ, destacaram-se duas grandes áreas: uma a leste, com 4 a 5 t/ha, e outra a oeste, com 3 a 4 t/ha. No LVA, observaram-se, pelo menos, quatro áreas com classes diferentes de produtividade, crescente no sentido noroeste-sudeste, de -1.6 a 0 t/ha, no extremo noroeste, até 2 a 3 t/ha no extremo sudeste. Predominou impacto de 0 a 1 t/ha no centro de Goiás.

Para plantios em novembro (Figuras 4.27), observou-se o predomínio de duas áreas regulares e ordenadas, nos três tipos de solos, com classes de produtividade crescentes no sentido longitudinal. No LV (A), classes de 125 a 130 t/ha, na metade leste do Estado, e de 130 a 135 t/ha na metade oeste. No NQ (B), classe de 115 a 120 t/ha na porção leste e de 120 a 125 t/ha na metade oeste da região. No LVA (C), predomina 65 a 70 t/ha na metade leste e de 70 a 75 t/ha na metade oeste. A distribuição espacial da diferença entre os dois cenários apresenta-se similar no LV e no NQ (Figuras 4.28 A e B), com predomínio das duas classes, 3

a 4 t/ha e 4 a 7 t/ha; enquanto no LVA, (C), predomina a classe de 0 a 1 t/ha na porção norte do Estado, e 2 a 3 e 3 a 5 t/ha na metade sul.

Os mapas de produtividade e da diferença em relação a A2/2040 para plantio em dezembro estão apresentados nas Figuras 4.29 e 4.30, respectivamente. Os LV (A) e NQ (B) apresentam índices crescentes no sentido sudeste-noroeste, com predomínio das classes 120-125 t/ha e 110-115 t/ha, respectivamente. No LVA (C), observa-se grande predomínio de área com produção de 60-65 t/ha. Em relação aos mapas das diferenças (Figura 4.30), os três solos apresentam similaridade espacial, com predomínio de ganhos de produtividade de 0-2 t/ha no LV (A), 2-3 t/ha no NQ (B) e no LVA (C), com ganhos maiores em áreas localizadas no centro-sul da região.

Na Figura 4.31, que ilustra os mapas referentes ao plantio em janeiro, observa-se, também, o predomínio de apenas duas classes de produção, com produtividades maiores na porção oeste do Estado: 125-130 t/ha no LV (A), 115-120 t/ha no NQ (B), e 60-65 t/ha no LVA (C). Nesse mês, ocorreram incrementos em relação ao cenário A2 de 2040, e ordenamento espacial bastante diferenciado. No LV (Figura 4.32 A), observaram-se incrementos menores nos rendimentos e, até, perdas de produtividade na porção noroeste. No NQ (B), predomina áreas na porção oeste com ganho de 2 a 3 t/ha, enquanto no LVA, áreas com ganhos de 2 a 3 t/ha que ocorrem de leste a oeste do Estado de Goiás e Distrito Federal.

Tabela 4.4. Área das classes de produção da cana-de-açúcar, variedade RB72454, estimada pelo DSSAT/CANEGRO para o Goiás e Distrito Federal, a partir de temperaturas estimadas para o cenário A2 de 2040, pelo sistema Precis.

Plantio	Solo	Classe Produtividade	Área	
			ha	%
Outubro	LVd	130-135	667,1	1,9
		135-140	10.257,50	29,6
		140-145	20.014,50	57,7
		145-150	3.771,60	10,9
	NQ	125-130	7.448,20	21,5
		130-135	12.825,50	36,9
		135-140	13.463,40	38,8
	LVAd	140-145	973,6	2,8
		70-75	1.422,20	4,1
		75-80	14.804,20	42,7
		80-85	17.332,70	49,9
		85-90	1.151,60	3,3
Novembro	LVd	120-125	886,8	2,6
		125-130	12.909,70	37,2
		130-135	20.876,60	60,1
		135-140	37,6	0,1
	NQ	110-115	2.825,20	8,1
		115-120	12.580,20	36,2
		120-125	19.172,60	55,2
		125-130	132,8	0,4
	LVAd	60-65	330,2	1
		65-70	14.335,40	41,3
		70-75	20.045,10	57,7
	Dezembro	LVd	115-120	3.303,30
120-125			13.545,00	39
125-130			14.271,80	41,1
130-135			3.590,60	10,3
NQ		105-110	6.054,40	17,4
		110-115	18.610,00	53,6
		115-120	9.881,20	28,5
		120-125	165,2	0,5
LVAd		55-60	6.930,60	20
		60-65	24.800,60	71,4
		65-70	2.979,60	8,6
Janeiro		LVd	120-125	10.668,25
	125-130		23.228,62	66,92
	130-135		813,85	2,34
	NQ	105-110	2.131,44	6,14
		110-115	13.708,50	39,49
		115-120	18.870,79	54,37
	LVAd	55-60	38.178,58	11
		60-65	306.701,30	88,36
		65-70	2.227,34	0,64

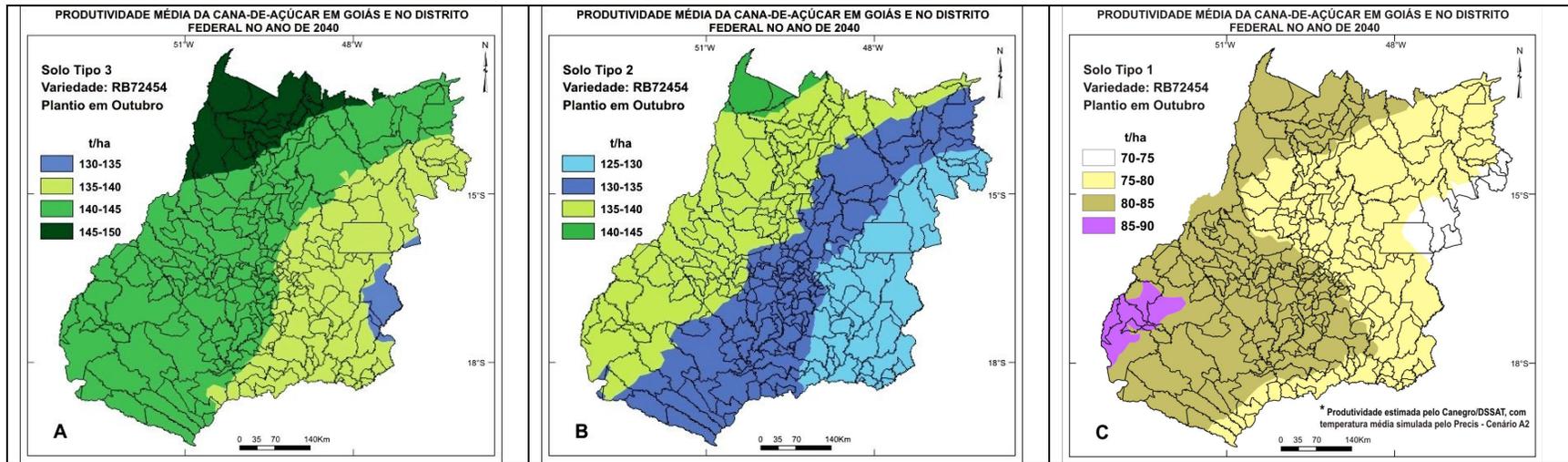


Figura 4.25. Produtividade média de cana-de-açúcar, variedade RB72454, em Goiás e Distrito Federal para plantio em outubro de 2040 num solo tipo 3 (A), tipo 2 (B) e tipo 3 (C), estimada pelo DSSAT/CANEGRO a partir de projeções do sistema Precis para o cenário A2 de mudanças climáticas globais.

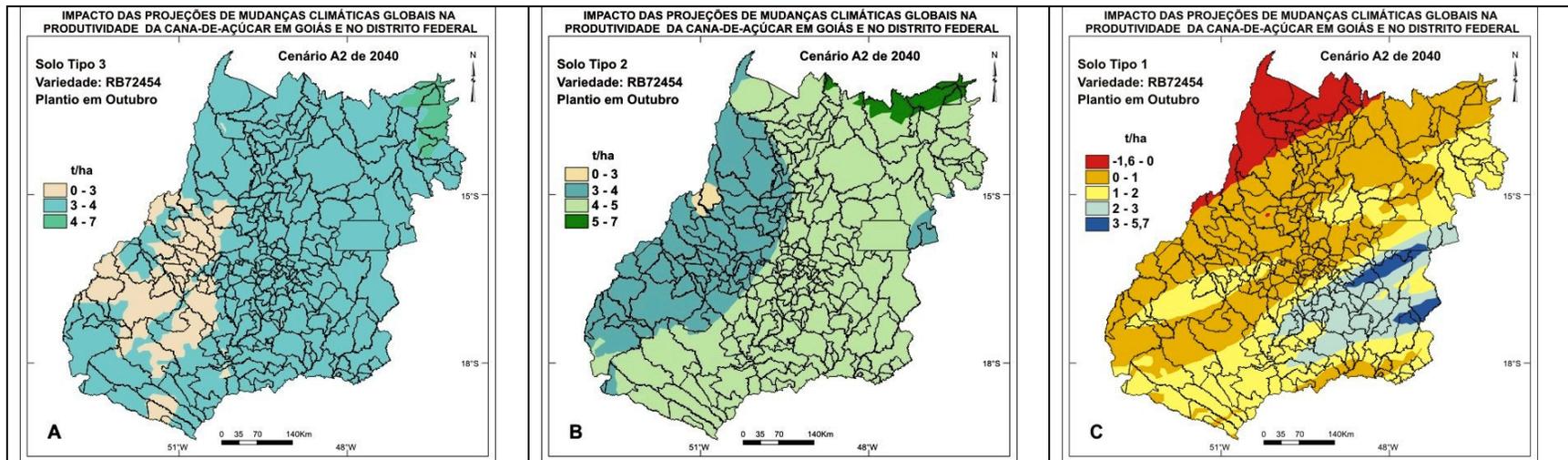


Figura 4.26. Impacto das mudanças climáticas globais na produtividade média de cana-de-açúcar, variedade RB72454, em Goiás e Distrito Federal para plantio em outubro num solo tipo 3 (A), tipo 2 (B) e tipo 3 (C), estimado pelo DSSAT/CANEGRO a partir de projeções do sistema Precis para o cenário A2 de 2040.

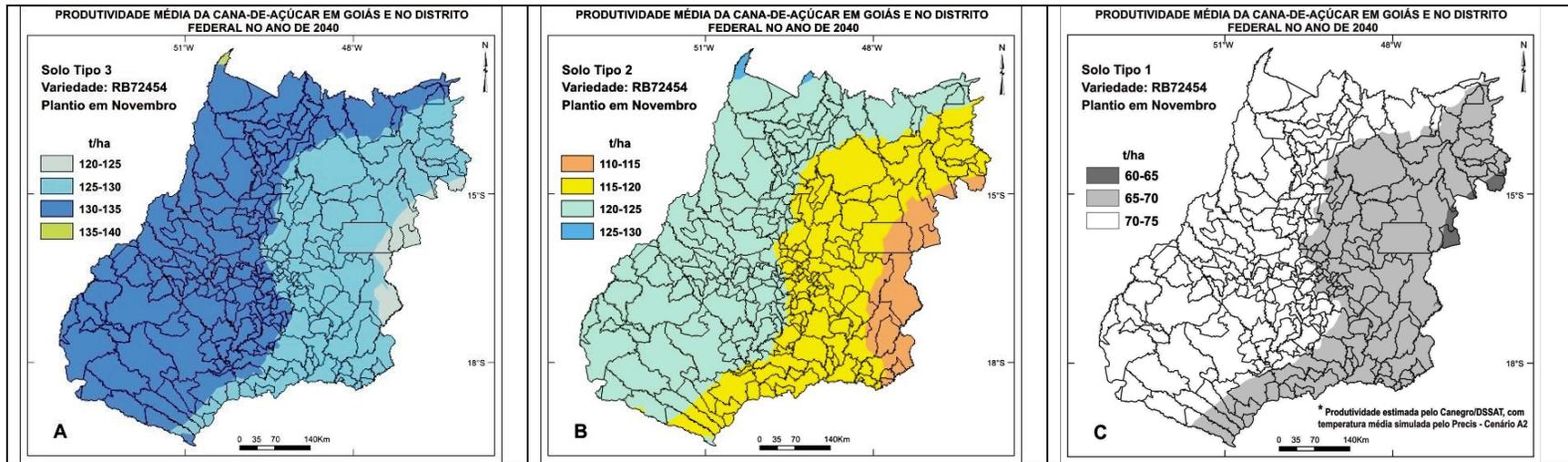


Figura 4.27. Produtividade média de cana-de-açúcar, variedade RB72454, em Goiás e Distrito Federal para plantio em novembro de 2040 num solo tipo 3 (A), tipo 2 (B) e tipo 3 (C), estimada pelo DSSAT/CANEGRO a partir de projeções do sistema Precis para o cenário A2 de mudanças climáticas globais.

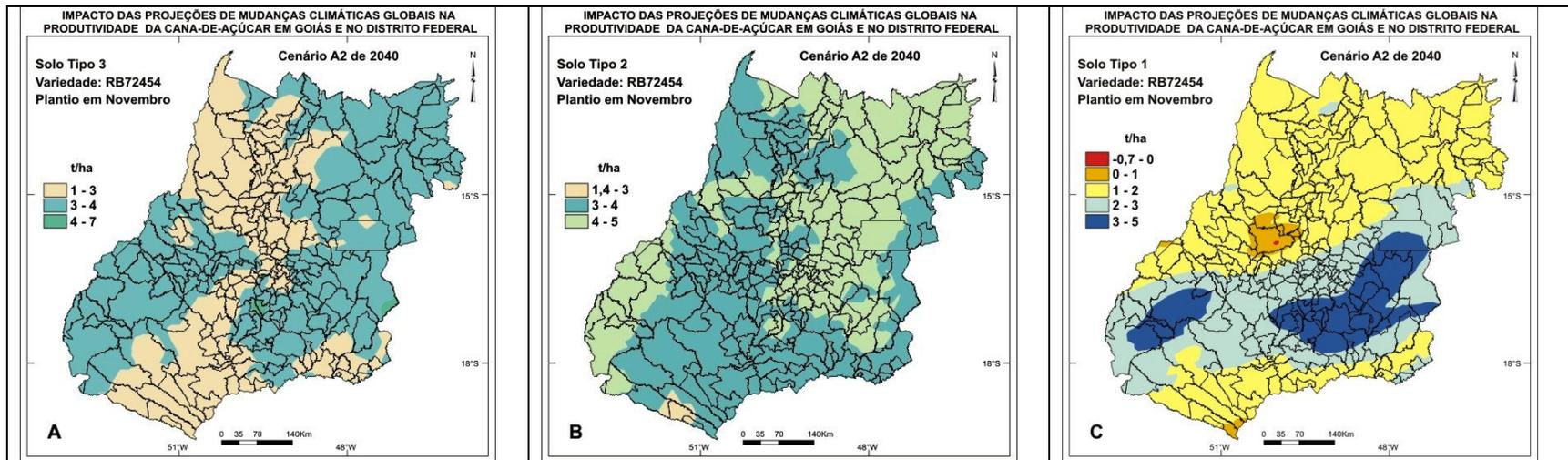


Figura 4.28. Impacto das mudanças climáticas globais na produtividade média de cana-de-açúcar, variedade RB72454, em Goiás e Distrito Federal para plantio em novembro num solo tipo 3 (A), tipo 2 (B) e tipo 3 (C), estimado pelo DSSAT/CANEGRO a partir de projeções do sistema Precis para o cenário A2 de 2040.

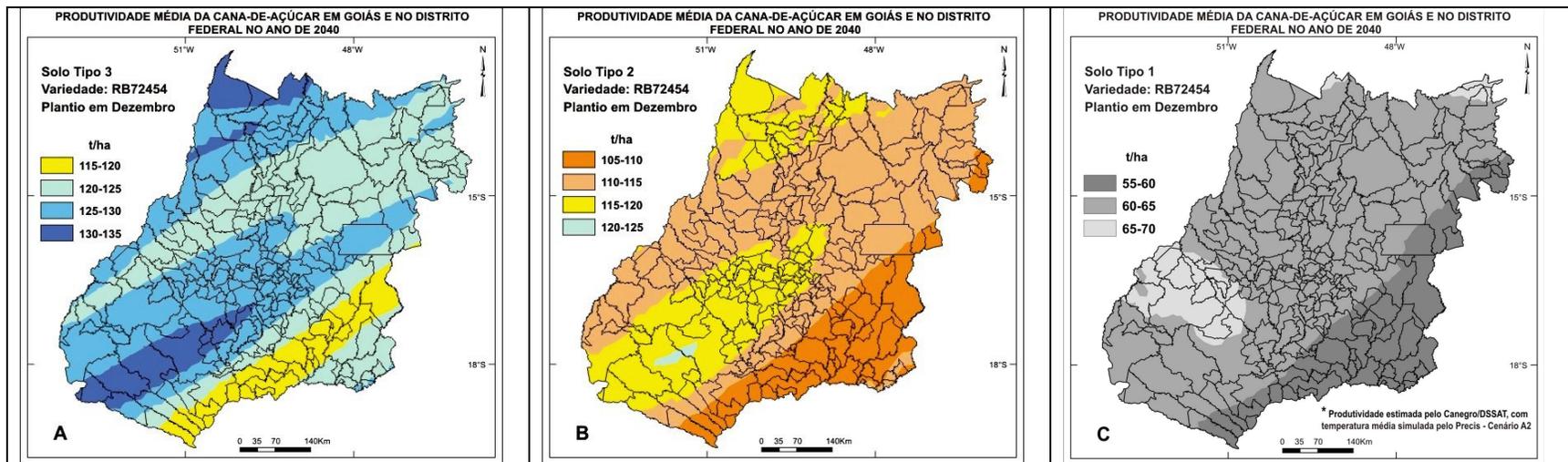


Figura 4.29. Produtividade média de cana-de-açúcar, variedade RB72454, em Goiás e Distrito Federal para plantio em dezembro de 2040 num solo tipo 3 (A), tipo 2 (B) e tipo 3 (C), estimada pelo DSSAT/CANEGRO a partir de projeções do sistema Precis para o cenário A2 de mudanças climáticas globais.

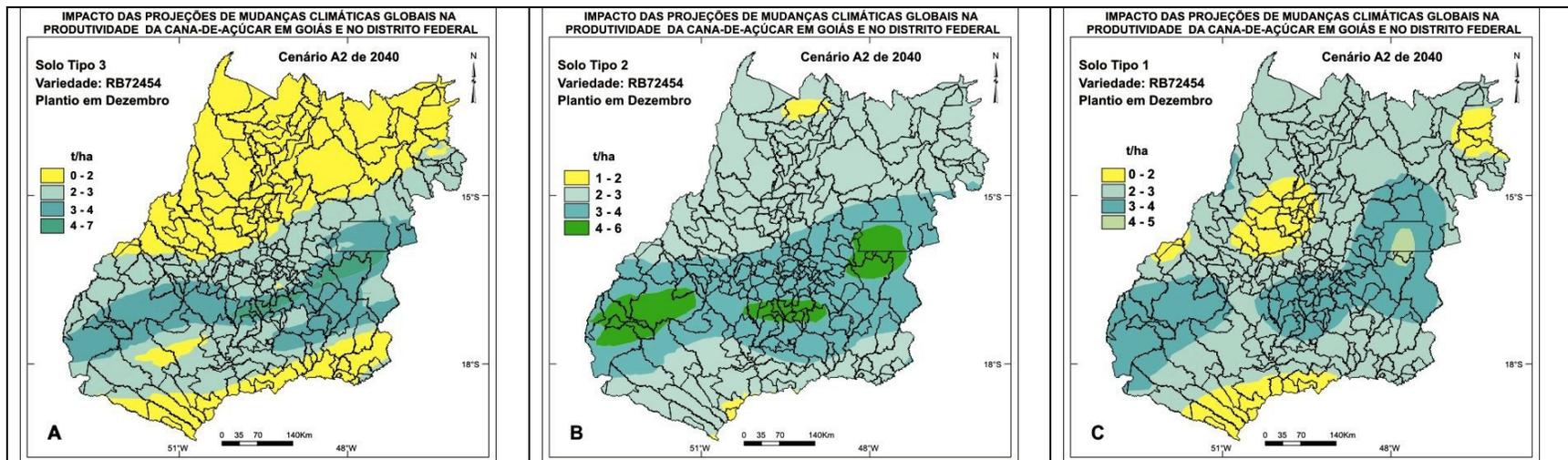


Figura 4.30. Impacto das mudanças climáticas globais na produtividade média de cana-de-açúcar, variedade RB72454, em Goiás e Distrito Federal para plantio em dezembro num solo tipo 3 (A), tipo 2 (B) e tipo 3 (C), estimado pelo DSSAT/CANEGRO a partir de projeções do sistema Precis para o cenário A2 de 2040.

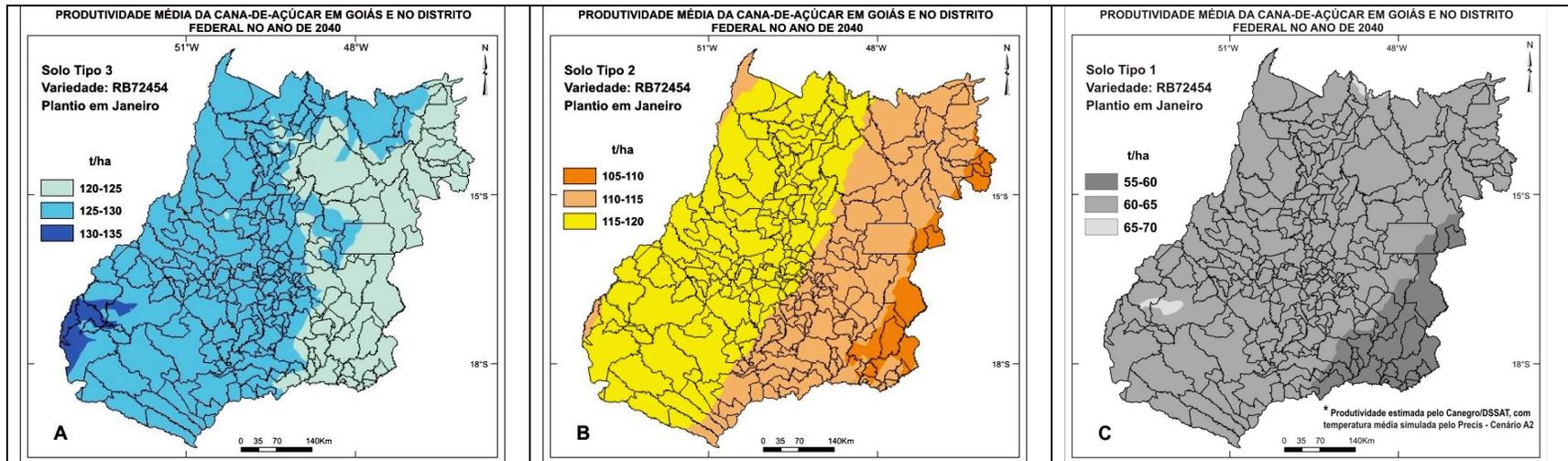


Figura 4.31. Produtividade média de cana-de-açúcar, variedade RB72454, em Goiás e Distrito Federal para plantio em janeiro de 2040 num solo tipo 3 (A), tipo 2 (B) e tipo 3 (C), estimada pelo DSSAT/CANEGRO a partir de projeções do sistema Precis para o cenário A2 de mudanças climáticas globais.

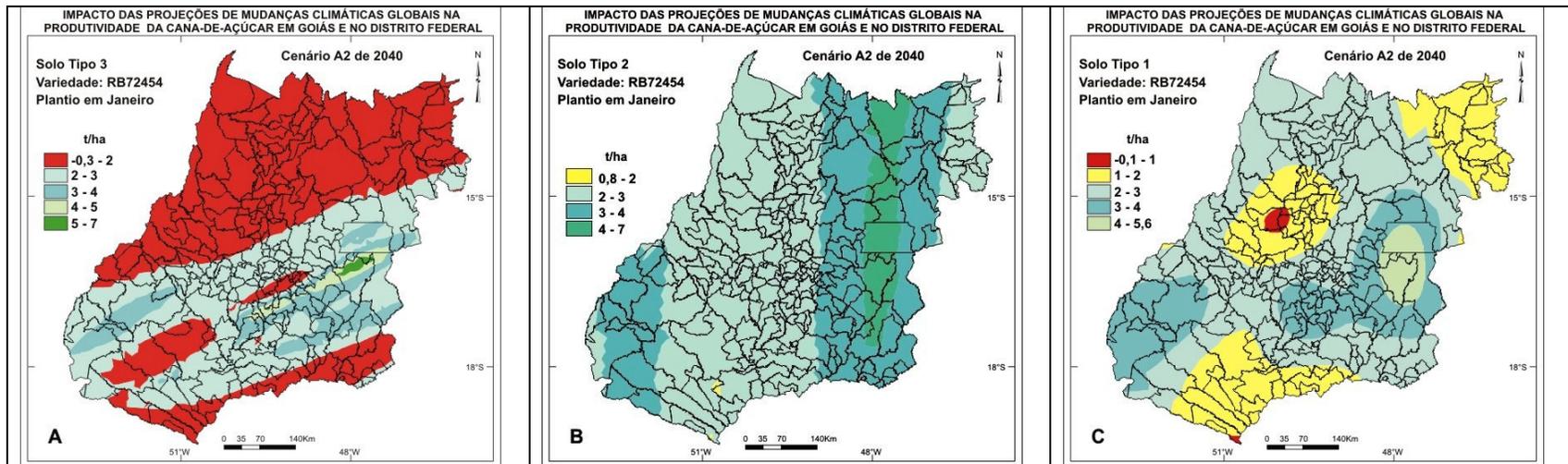


Figura 4.32. Impacto das mudanças climáticas globais na produtividade média de cana-de-açúcar, variedade RB72454, em Goiás e Distrito Federal para plantio em janeiro num solo tipo 3 (A), tipo 2 (B) e tipo 3 (C), estimado pelo DSSAT/CANEGRO a partir de projeções do sistema Precis para o cenário A2 de 2040.

Tabela 4.5. Área das classes de diferença de produção da cana-de-açúcar, variedade RB72454, entre o cenário atual e o A2 de 2040, estimada pelo CANEGRO/DSSAT para o Goiás e Distrito Federal, com temperaturas estimadas para o cenário A2 de 2040 pelo sistema Precís.

Plantio	Solo	Classe_Produtividade	Área		
			ha	%	
Outubro	LVd	0-3	5.253	15	
		3-4	28.570	82	
		4-7	884	3	
	NQ	0-3	241	1	
		3-4	10.131	29	
		4-5	23.463	68	
		5-7	871	3	
	LVAd	-1,6-0	3.187	9	
		0-1	16.627	48	
		1-2	10.716	31	
		2-3	3.527	10	
		3-5,7	649	2	
	Novembro	LVd	1-3	13.355	38
			3-4	21.188	61
4-7			163	0	
NQ		1,4-3	269	1	
		3-4	19.241	55	
		4-5	15.197	44	
LVAd		-0,7-0	9	0	
		0-1	796	2	
		1-2	19.213	55	
		2-3	10.067	29	
	3-5	4.622	13		
Dezembro	LVd	0-2	16.450	47	
		2-3	11.239	32	
		3-4	6.222	18	
		4-7	795	2	
	NQ	1-2	437	1	
		2-3	19.563	56	
		3-4	11.646	34	
	LVAd	4-6	3.060	9	
		0-2	4.377	13	
		2-3	20.426	59	
		3-4	9.638	28	
Janeiro	LVd	4-5	266	1	
		-0,3-2	18.814	54	
		2-3	11.808	34	
		3-4	3.468	10	
		4-5	504	1	
	NQ	5-7	112	0	
		0,8-2	36	0	
		2-3	19.131	55	
		3-4	12.558	36	
	LVAd	4-7	2.981	9	
-0,1-1		218	1		
1-2		9.181	26		
2-3		17.075	49		
3-4		7.091	20		
		4-5,6	1.141	3	

A análise espacial da produtividade estimada pelo modelo DSSAT/CANEGRO para cultivo da cana-de-açúcar, variedade RB72454, em solos de baixa, média e alta capacidade de armazenamento de água, admitindo-se o cenário A2 de mudanças climáticas globais em 2040, permite afirmar que, apesar do aumento da produtividade observada na maioria das simulações, a geografia da produção apresentou pouca alteração em relação à distribuição espacial atual.

Por outro lado, a espacialização do impacto ou da diferença de produção entre os dois cenários simulados não mostrou a mesma geografia do das produções totais. Pode-se justificar pelo fato das simulações de aumento das temperaturas terem ocorrido de forma não linear, mas sim, em função da localização geográfica, influenciados pelos demais fatores geográficos, como latitude, longitude e altitude.

Verificou-se a eficiência fotossintética da cana-de-açúcar através do incremento da produção em resposta ao aumento da temperatura. Mas, observou-se também que a precipitação pluviométrica, associada aos solos de maior água disponível (AD), apresentou-se com o elemento agroclimatológico preponderante no ordenamento espacial da produção de cana-de-açúcar em ambientes de Cerrado, haja vista que as simulações referentes às épocas de plantio de maior oferta hídrica e de solos com maior reserva de água apresentaram as maiores produtividades.

4.6.3. Análise espacial das estimativas do impacto das projeções das mudanças climáticas globais na produtividade da cana-de-açúcar, por tipo de solo, da variedade RB72454 cultivada em ambientes de Cerrado, válida para o cenário A2 de 2040

A representação espacial das estimativas do impacto das projeções das mudanças climáticas globais na produtividade da cana-de-açúcar, por tipo de solo, da variedade RB72454 cultivada em ambientes de cerrado, válida para o cenário A2 de 2040, estão apresentados nas Figuras 4.33 a 4.36, e resultaram do cruzamento dos mapas apresentados na seção 4.6.2 com mapa de tipos de solos apresentado na Figura 3.6 da seção anterior. Os cálculos das áreas referentes a esses mapas estão apresentados na Tabela 4.6.

Nos plantios simulados para o mês de outubro nos solos tipo 3, destacam-se as áreas com produtividades na faixa de 140-145 t/ha, e representam 28,4% dos solos. Nos solos tipo 2,

ilustrados na Figura 4.33B, 29% apresentam produtividades na faixa de 130-135 t/ha (15,1%) e de 135-140 t/ha (14,2%). Enquanto nos solos tipo 1, a maior área, representado 2,4% da área, apresenta produtividades na classe de 80-85 t/ha (Figura 4.33C).

Nos cenários de plantio em novembro e ilustrados na Figura 4.34, observam-se nos solos tipo 3 (A) a predominância das classes de produtividade de 125-130 t/ha e 130-135 t/ha, ocupando 20,6% e 32,9% das áreas, respectivamente. Nos solos tipo 2 (B), 21% da área apresentam produtividades de 120-125 t/ha, enquanto nos solos tipo 1 (C), a classe de 70-75 t/ha ocupa 2,9% dos 4,3% da área total da ocupada por esses solos.

Nos plantios simulados para o mês de dezembro e apresentados na figura 4.35, observa-se que dos 55,6% das áreas ocupada pelos solos tipo 3, 19,4% apresentam faixa de produtividade de 120-125 t/ha e 23,8% de 125-130 t/ha (Figura 4.35A). Nos solos tipo 2 (B), dos 36% de suas áreas 21,7% apresentam produtividade de 110-115 t/ha, enquanto nos solos tipo 1, 3,0% apresentam classe de 60-65 t/ha (Figura 4.35C).

Nas projeções de produtividades estimadas para o mês de janeiro, a faixa de produtividade de 125-130 t/ha estimada para os solos tipo 3 (Figura 4.36A) ocupa 37,9% das áreas. Nos solos tipo 2 (B) predominam a classe de 115-120 t/ha, em 20,1% das áreas, enquanto nos solos tipo 1 (C), 4,0% das áreas apresentam produtividade de 60-65 t/ha.

Em resumo, observou-se que nos três tipos de solos ocorreu redução da produtividade a partir do mês de outubro até janeiro.

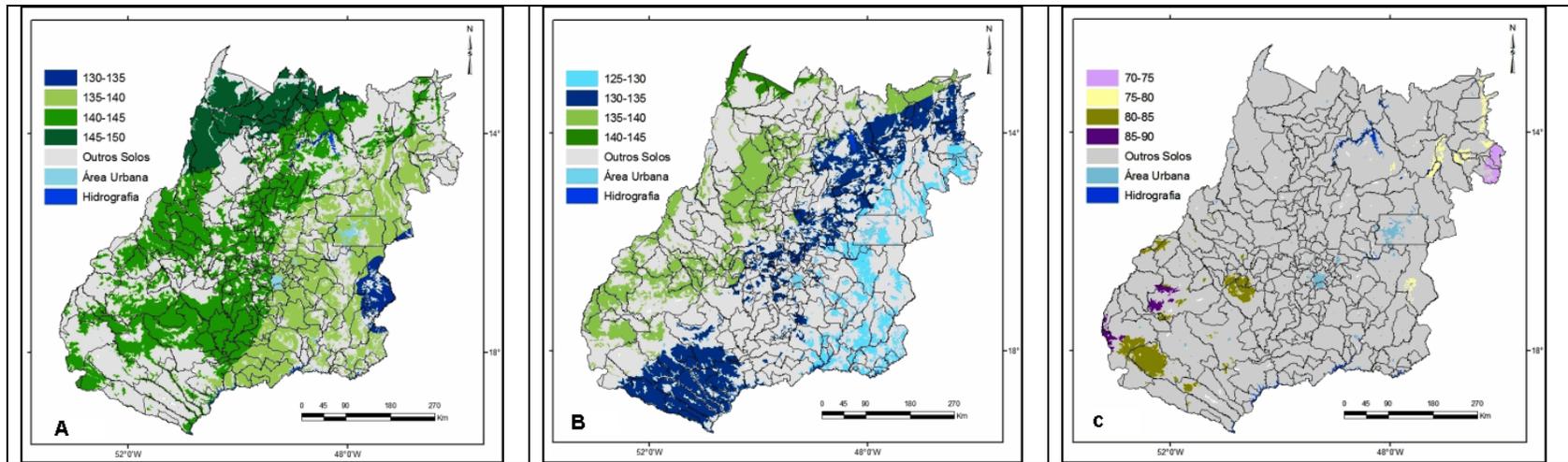


Figura 4.33. Produtividade média de cana-de-açúcar, variedade RB72454, em Goiás e Distrito Federal, para plantio em outubro de 2040 num solo tipo 3 (A), tipo 2 (B) e tipo 3 (C), estimada pelo DSSAT/CANEGRO a partir de projeções do sistema Precis para o cenário A2 de mudanças climáticas globais.

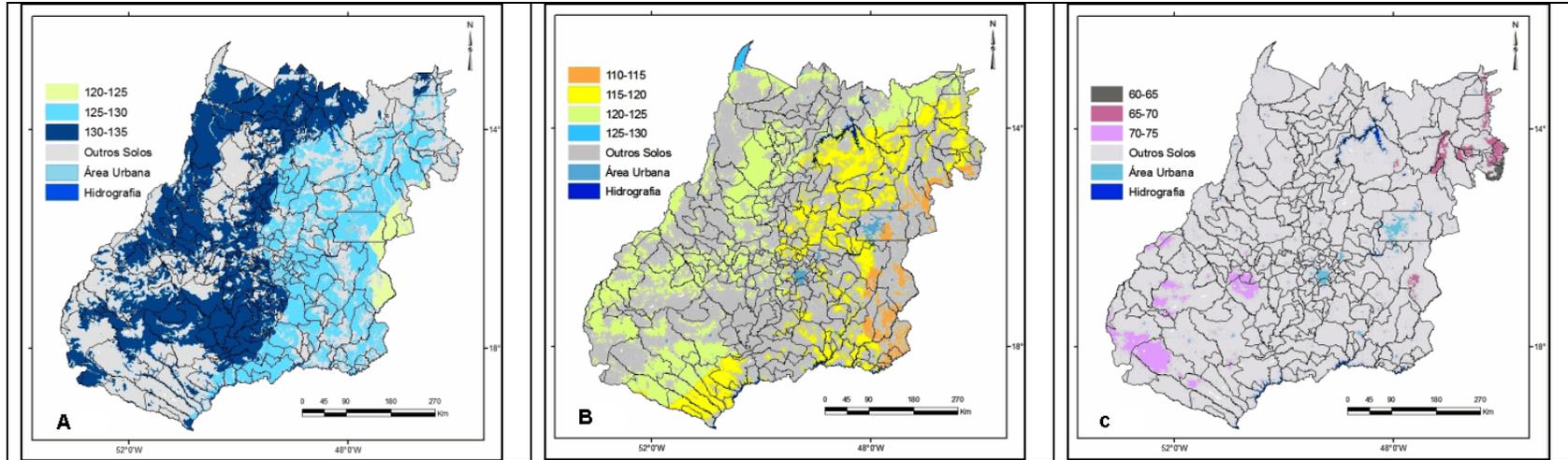


Figura 4.34. Produtividade média de cana-de-açúcar, variedade RB72454, em Goiás e Distrito Federal, para plantio em novembro de 2040 num solo tipo 3 (A), tipo 2 (B) e tipo 3 (C), estimada pelo DSSAT/CANEGRO a partir de projeções do sistema Precis para o cenário A2 de mudanças climáticas globais.

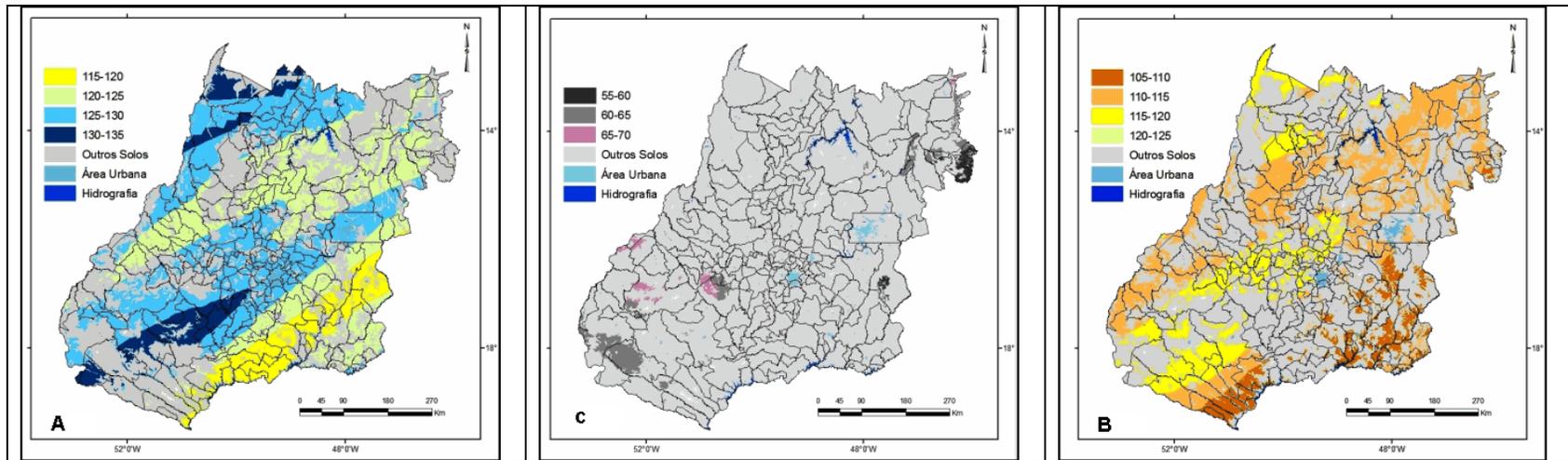


Figura 4.35. Produtividade média de cana-de-açúcar, variedade RB72454, em Goiás e Distrito Federal, para plantio em dezembro de 2040 num solo tipo 3 (A), tipo 2 (B) e tipo 3 (C), estimada pelo DSSAT/CANEGRO a partir de projeções do sistema Precis para o cenário A2 de mudanças climáticas globais.

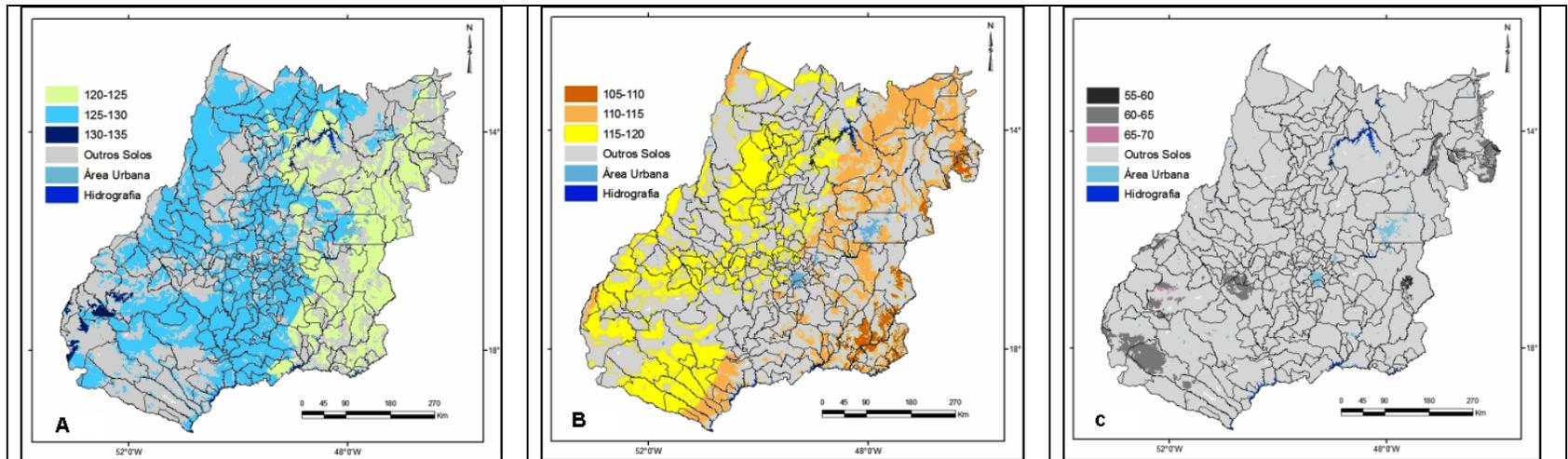


Figura 4.36. Produtividade média de cana-de-açúcar, variedade RB72454, em Goiás e Distrito Federal, para plantio em janeiro de 2040 num solo tipo 3 (A), tipo 2 (B) e tipo 3 (C), estimada pelo DSSAT/CANEGRO a partir de projeções do sistema Precis para o cenário A2 de mudanças climáticas globais.

Tabela 4.6. Área das classes de produtividade da cana-de-açúcar, variedade RB72454, estimada pelo DSSAT/CANEGRO para o Goiás e Distrito Federal, a partir de temperaturas estimadas para o cenário A2 de 2040, pelo sistema Precis.

Plantio_Mês	Solo_Tipo	Prod_Classe	Área_Classe	
			ha	%
Outubro	3	130-135	492.987,5	1,4
		135-140	6.256.087,5	18,0
		140-145	9.844.268,8	28,4
		145-150	2.628.131,3	7,6
	2	125-130	2.011.506,3	5,8
		130-135	5.230.318,8	15,1
		135-140	4.915.650,0	14,2
	1	140-145	408.212,5	1,2
		70-75	161.300,0	0,5
		75-80	317.025,0	0,9
		80-85	837.193,8	2,4
	Novembro	3	85-90	165.112,5
120-125			650.012,5	1,9
125-130			7.154.562,5	20,6
130-135			11.416.900,0	32,9
2		135-140	0,0	0,0
		110-115	794.231,3	2,3
		115-120	4.380.556,3	12,6
		120-125	7.298.612,5	21,0
1		125-130	92.287,5	0,3
		60-65	77.300,0	0,2
		65-70	401.025,0	1,2
		70-75	1.002.306,3	2,9
Dezembro	3	115-120	2.090.837,5	6,0
		120-125	6.717.806,3	19,4
		125-130	8.275.350,0	23,8
		130-135	2.137.481,3	6,2
	2	105-110	1.728.581,3	5,0
		110-115	7.517.150,0	21,7
		115-120	3.302.018,8	9,5
		120-125	18.025,0	0,1
	1	55-60	192.593,8	0,6
		60-65	1.025.318,8	3,0
		65-70	262.718,8	0,8
	Janeiro	3	120-125	5.840.962,5
125-130			13.138.931,2	37,9
130-135			241.581,2	0,7
2		105-110	686.537,5	2,0
		110-115	4.911.606,2	14,2
		115-120	6.967.543,7	20,1
1		55-60	51.975,0	0,1
		60-65	1.402.625,0	4,0
		65-70	26.031,2	0,1

4.7 Distribuição espacial da produtividade de cana-de-açúcar em Goiás e Distrito Federal, segundo IBGE (2010)

A Figura 4.37 ilustra a produtividade média da cana-de-açúcar no Distrito Federal e nos municípios de Goiás, referente ao período de 1990 a 2008. Do total de 246 municípios, 52 (21%) apresentam-se nas menores classes de produtividade, de 16 a 30 t/ha, e, de maneira geral, concentram-se no extremo norte do Estado; e 97 municípios, que representam 39,4% do Estado, apresentam rendimento médio de 30 a 60 t/ha. Observa-se que 65 municípios (26,4%) que apresentam produtividades acima de 60 t/ha, chegando a, até, 110 t/ha, estão concentrados numa faixa central vertical que se estende do centro-sul do Estado ao extremo sul de Goiás.

Observa-se que os municípios que apresentam rendimentos médios acima de 60 t/ha, valor a partir do qual a cultura é considerada economicamente viável pela EMBRAPA (2009), estão praticamente concentrados na mesma região de concentração das usinas processadoras de cana-de-açúcar, ilustrado na Figura 4.39. Nesta região, o cultivo da cana-de-açúcar é realizado seguindo padrões elevados de tecnologia, o que justifica os índices maiores de rendimento médio.

Os rendimentos máximos e mínimos dos municípios de Goiás e do Distrito Federal, registrados pelo IBGE no período de 1990 a 2008, estão ilustrados na Figura 4.38. Observaram-se rendimentos máximos (A) entre 16 e 140 t/ha, sendo que, de maneira geral, os municípios que apresentaram rendimentos máximos acima de 60 t/ha concentram-se espacialmente na faixa central, incluindo o Distrito Federal e outros municípios ao leste e noroeste do Estado. Os rendimentos mínimos (B) registrados foram de 6 a 110 t/ha, onde os índices de produtividade acima de 60 t/ha são observados nos municípios localizados, também, na região de concentração das usinas produtoras e processadoras de cana (Figura 4.39).

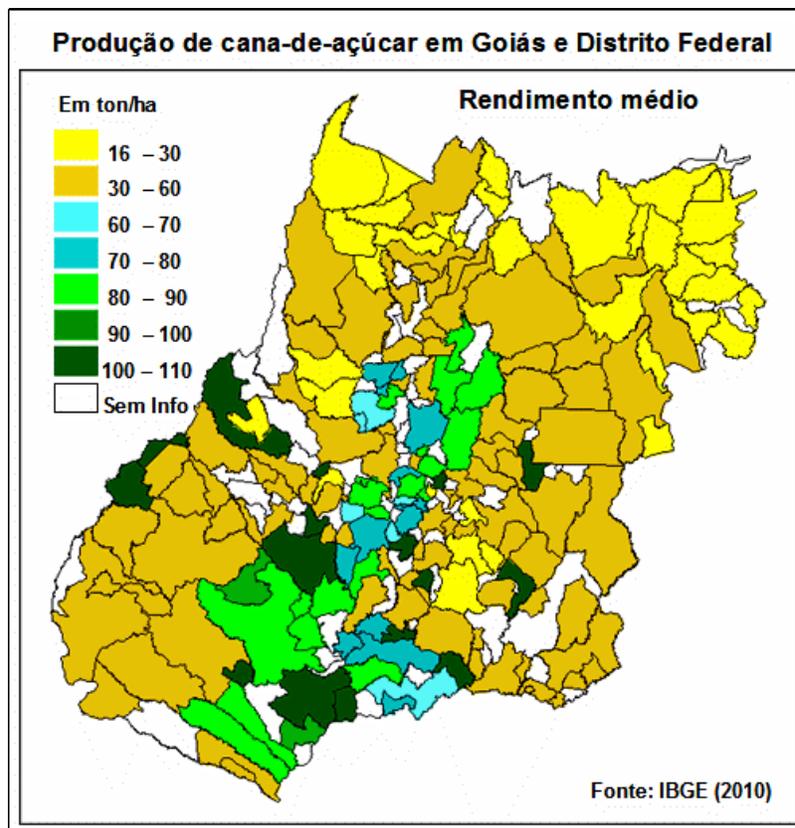


Figura 4.37. Distribuição espacial do rendimento médio da produção de cana-de-açúcar em Goiás e Distrito Federal. Fonte: IBGE (2010)

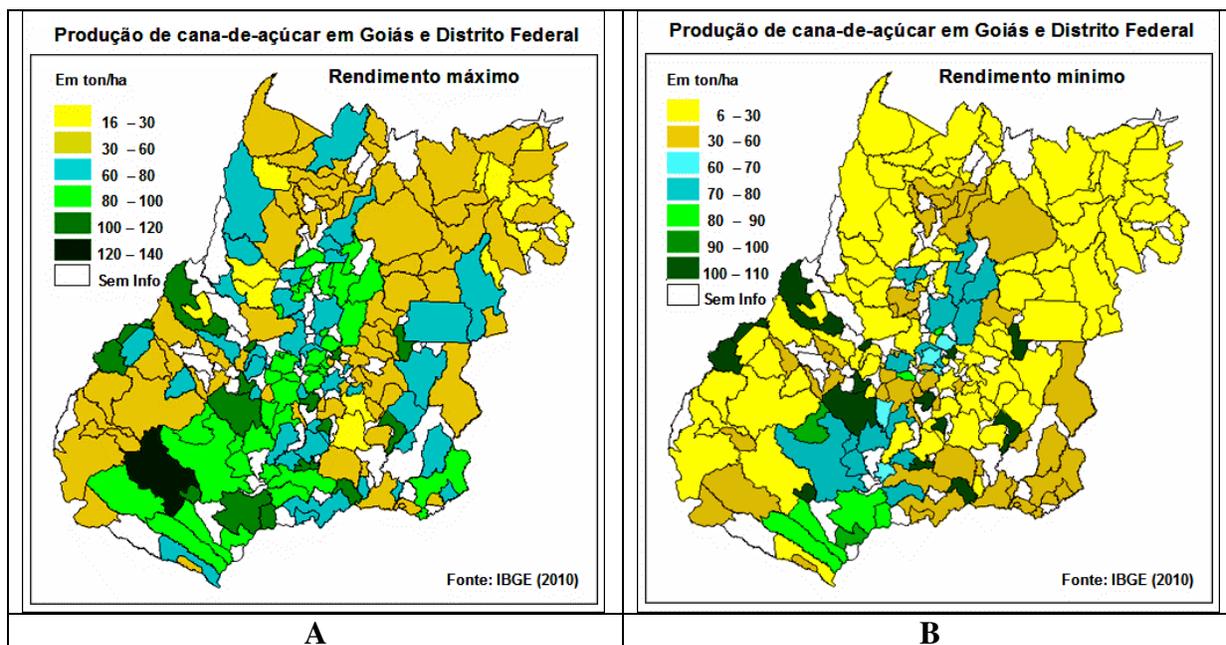


Figura 4.38. Distribuição espacial dos rendimentos máximo (A) e mínimo(B) da produção de cana-de-açúcar em Goiás e Distrito Federal. Fonte: IBGE (2010).

Da análise espacial quantitativa e comparativa entre a produtividade potencial estimada pelo modelo DSSAT/CANEGRO e a registrada pelo IBGE entre 1990 a 2008, não se espera índices de correlação estatisticamente elevados, uma vez que o modelo estimou a produtividade potencial para uma variedade de cana-de-açúcar específica (RB72454), de ciclo de 12 meses, plantada no mês de outubro, em três tipos de solos caracterizados fisicamente. Ainda, considerou um sistema produtivo de alta tecnologia e sem perdas decorrentes de ataques de pragas e/ou doenças. Por outro lado, o IBGE contempla, em suas estatísticas, as produções obtidas por cultivos desde sistemas familiares a empresariais, com todos os níveis tecnológicos, nos variados ambientes de produção, e todas as variedades cultivadas, com seus diferentes ciclos de desenvolvimento, cultivos bisados, por exemplo.

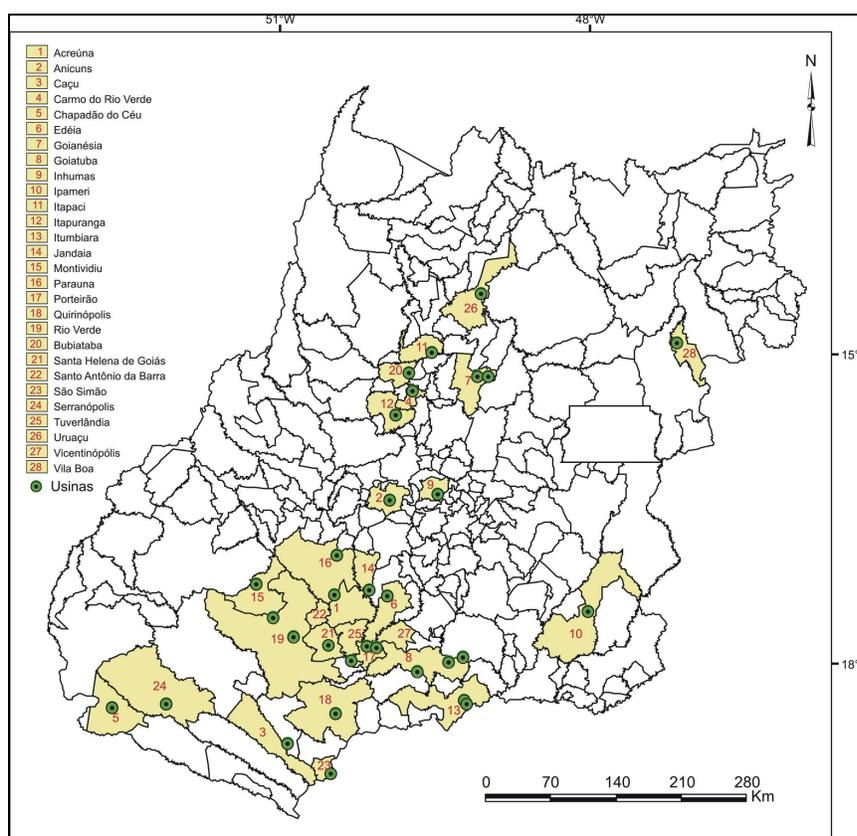


Figura 4.39. Localização geográfica das Usinas de cana-de-açúcar em Goiás. Fonte: CONAB (2010).

No entanto, é possível realizar uma análise comparativa qualitativa das estatísticas de produtividade, que pode apresentar indicadores do bom desempenho do modelo DSSAT/CANEGRO, como:

1. O IBGE registrou rendimentos máximos de 140 t/ha, enquanto o DSSAT/CANEGRO estimou até 150 t/ha, 7,1% superior, índice relativamente pequeno e aceitável para uma aplicação em escala regional.
2. As maiores produtividades registradas tanto pelo IBGE, quanto as estimadas pelo DSSAT/CANEGRO, estão concentradas numa zona que se estende do centro ao sudoeste do Estado. Esta também é a região que apresenta os menores riscos de perdas de produção por estresse hídrico, nos três solos simulados.
3. Em cenários de mudanças climáticas globais, simuladas para o ano de 2040, nas regiões central e sudeste, também se encontram as classes de maiores incrementos de produtividade, em solos de baixa e média capacidade de armazenamento de água, os LVAd e NQ, respectivamente.

Análises comparativas pontuais, realizadas nos municípios de Goianésia, Rio Verde e Santa Helena de Goiás, que apresentam índices de produtividade elevados, usinas processadoras de cana-de-açúcar instaladas e postos meteorológicos, que permitiram simulações de produtividade pelo DSSAT/CANEGRO, apresentam estatísticas que permitiram melhor quantificar e qualificar as relações com os rendimentos registrados pelo IBGE.

A distribuição temporal dos rendimentos médios do município de Goianésia, estimados pelo IBGE e pelo modelo, para os três tipos de solos analisados, está ilustrada na Figura 4.40. Observa-se, especialmente, que os rendimentos estimados para o Latossolo Vermelho-Amarelo apresentam distribuição temporal aproximada e regular em relação aos registrados pelo IBGE, principalmente no período de 1997/98 a 2005/06. A análise de regressão linear apresentada na Figura 4.41 ilustra melhor esta relação, através do coeficiente de ajuste obtido e igual a $R^2 = 0,6$ (B).

A mesma análise foi realizada para o município de Rio Verde para os anos-safra 1989/90 a 2007/2008 (Figura 4.42). Observa-se regularidade entre as curvas de distribuição temporal (A), e o coeficiente de ajuste da regressão linear ($R^2 = 0,3$), embora seja baixa, também apresenta indicativos significativos da relação entre as produtividades estimadas e registradas (B).

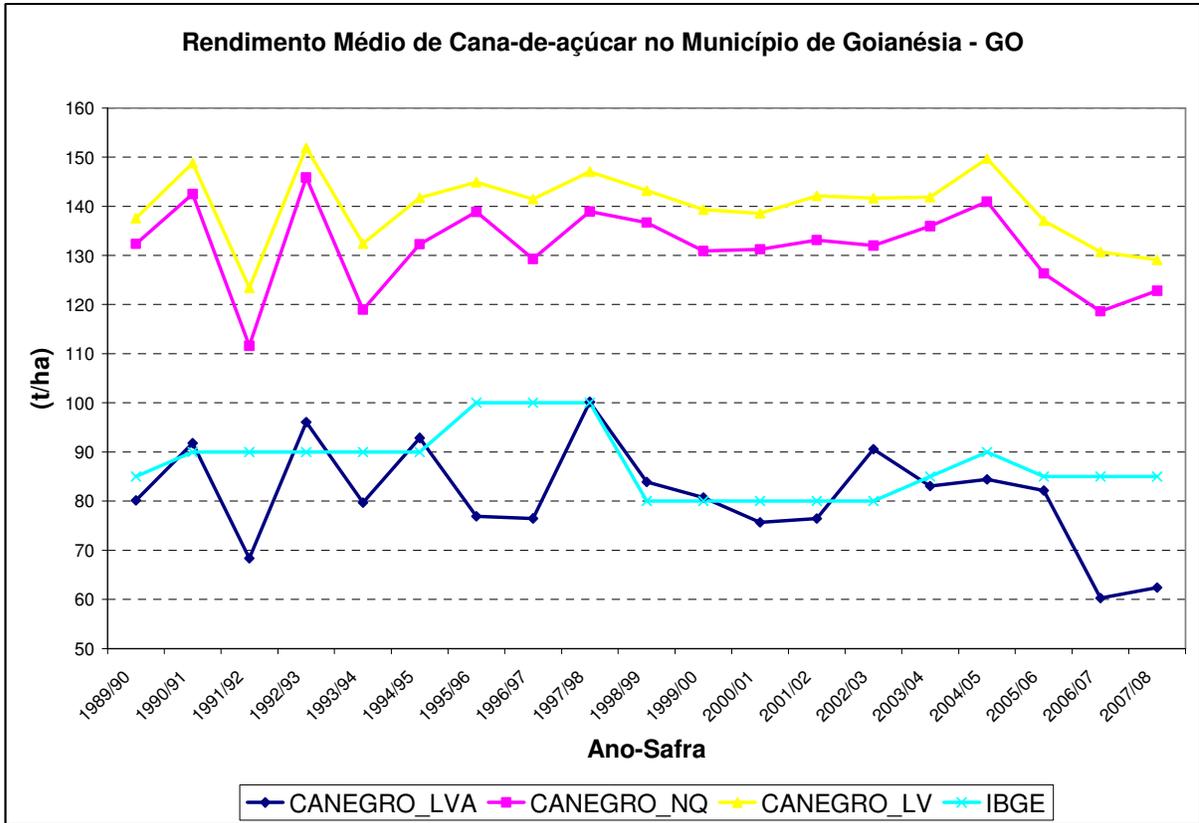


Figura 4.40. Produtividade média de cana-de-açúcar no município de Goianésia referente às safras 1989/90 a 2007/2008, estimada do DSSAT/CANEGRO, para um Latossolo Vermelho (LVd), um Neossolo Quartzarênico, um Latossolo Vermelho-Amarelo, e do IBGE (2010.)

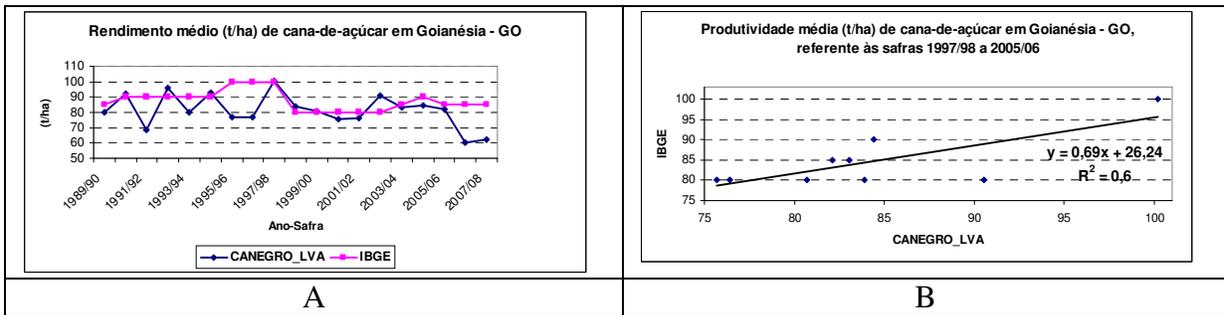


Figura 4.41. Produtividade média de cana-de-açúcar no município de Goianésia referente às safras 1989/90 a 2007/2008, registrada pelo IBGE (2010) e estimada pelo DSSAT/CANEGRO num Latossolo Vermelho-Amarelo (A), e análise de regressão linear entre o rendimento médio registrado pelo IBGE (2010) e a produtividade média estimada pelo DSSAT/CANEGRO, nas safras 1997/98 a 2005/06.

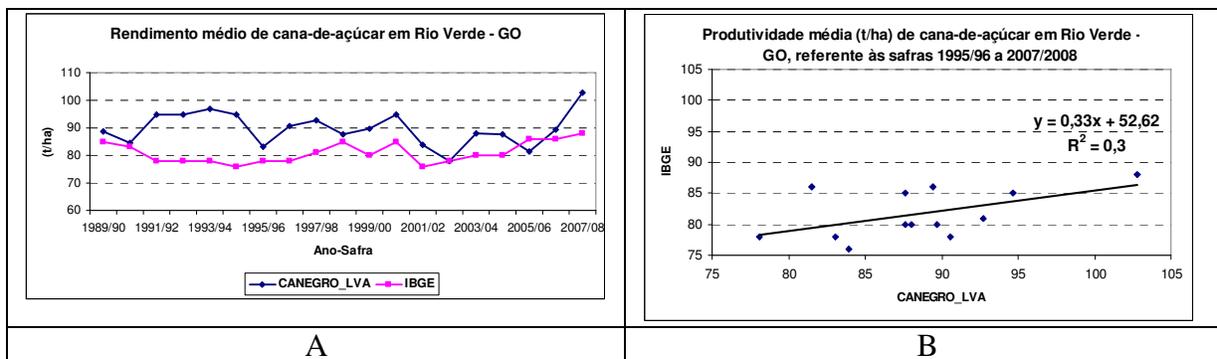


Figura 4.42. Produtividade média de cana-de-açúcar no município de Rio Verde, referente às safras 1989/90 a 2007/2008, registrada pelo IBGE (2010) e estimada do DSSAT/CANEGRO num Latossolo Vermelho-Amarelo (A), e análise de regressão linear entre o rendimento médio registrado pelo IBGE (2010) e a produtividade média estimada pelo DSSAT/CANEGRO, nas safras 1995/96 a 2007/08.

O município de Santa Helena de Goiás não dispõe de uma série climatológica que permitiu estimar a produtividade pelo DSSAT/CANEGRO. Mas, pela sua proximidade com Rio Verde, optou-se realizar uma análise entre as produtividades utilizando as estimativas para este município. Conforme pode ser observado através dos resultados ilustrados na Figura 4.43, a distribuição temporal das produtividades apresentam indicativos de similaridade e correlação, através do índice de ajuste da regressão linear ($R^2 = 0,3$).

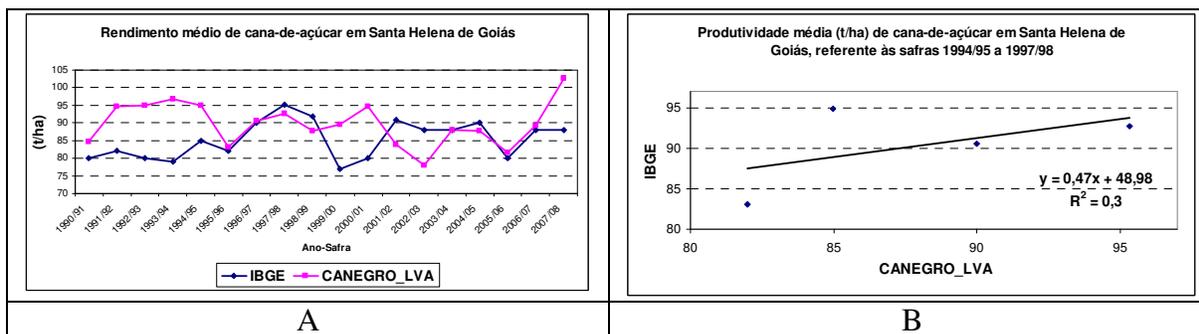


Figura 4.43. Produtividade média de cana-de-açúcar no município de Santa Helena de Goiás, referente às safras 1990/91 a 2007/2008, registrada pelo IBGE (2010) e estimada pelo DSSAT/CANEGRO num Latossolo Vermelho-Amarelo (A), e análise de regressão linear entre o rendimento médio registrado pelo IBGE (2010) e a produtividade média estimada pelo DSSAT/CANEGRO, nas safras 1994/95 a 1997/98(B).

Em resumo, os resultados das análises comparativas, espacial ou pontual, das produtividades estimadas pelo modelo DSSAT/CANEGRO e registradas pelo IBGE, permitem afirmar que embora os índices de correlação estatística não sejam elevados, existem

relações significativas em períodos específicos, consideradas as particularidades dos dois estimadores.

Os rendimentos registrados pelo IBGE referem-se à média real das diversas e diferentes condições de ambientes e sistemas de produção. Este fato pode justificar a correlação maior verificada com os dados de produtividade potencial estimados pelo modelo agrometeorológico para Latossolo Vermelho-Amarelo (LVAd), representativo dos ambientes mais restritivos de produção da cana-de-açúcar nos Cerrados.

4.8 Análise comparativa da produtividade de cana-de-açúcar estimada pelo modelo DSSAT/CANEGRO e registrada em usinas

Os índices de produtividade da cana-de-açúcar, variedade RB72454, estimados pelo modelo DSSAT/CANEGRO, referem-se ao primeiro corte para um cultivo com ciclo de 12 meses (precoce), enquanto os dados de produtividade obtidos de Usinas referem-se aos diversos cortes, o que restringe a análise comparativa com resultados estatísticos.

As estatísticas de produção da cana-de-açúcar, variedade RB72454, para três unidades de mapeamento de solos da usina Goiatuba – GO estão apresentadas na Tabela 4.7. Observa-se que o Latossolo Vermelho-Amarelo (LVAd) e o Latossolo Vermelho (LVd), apresentam teores de argila de 36% e 34% respectivamente, e rendimentos aproximados. O Latossolo Vermelho, com 65% de argila, apresenta os maiores rendimentos, superior a 110 t/ha no primeiro corte. Observa-se, ainda, redução de rendimento na sequência de aumento dos cortes, em todas as classes de solo, chegando a 31,3 t/ha, no quarto corte, num LVd.

Tabela 4.7. Produtividade de cana-de-açúcar, obtida da variedade RB72454 em três ambientes de produção da Usina Goiasa, em Goiatuba - GO.

Ano-Safra	LVAd			LVd			LVd		
	(t/ha)	N.Corte	Idade (mês)	(t/ha)	N.Corte	Idade (mês)	(t/ha)	N.Corte	Idade (mês)
2003/04	84,8	1	18	91,6	1	18	111,1	1	18
2004/05	78,2	2	11	80,8	2	11	71,6	2	14
2005/06	69,2	3	12	59,9	3	14	51,4	3	11
2006/07	58,0	4	13	31,3	4	10			
2007/08	54,6	5	14						

Fonte: Usina Goiasa, em Goiatuba - GO.

A análise comparativa entre os rendimentos registrados na Usina e os estimados pelo DSSAT/CANEGRO pode ser realizada a partir da ilustração da Figura 4.44. Os rendimentos registrados na Usina, para o primeiro corte, apresentam-se superiores ao estimado pelo modelo para um LVA e muito próximo para um NQ, com média retenção de água.

Os rendimentos obtidos pela Usina Anicuns, no município de Anicuns – GO, em três safras cultivadas, em quatro unidades de mapeamento de Latossolo Vermelho, sendo dois em ambiente B e dois em ambiente C, foram superiores aos rendimentos simulados pelo DSSAT/CANEGRO para o Latossolo Vermelho-amarelo (LVA), de menor retenção de água (Figura 4.45).

O maior rendimento obtido na usina, no Latossolo Vermelho eutrófico, Ambiente B, foi de, aproximadamente, 100 t/ha, inferior ao rendimento simulado pelo modelo DSSAT/CANEGRO em cerca de 30% para o NQ e 40% para o LV, de média e alta capacidade de armazenamento de água, respectivamente.

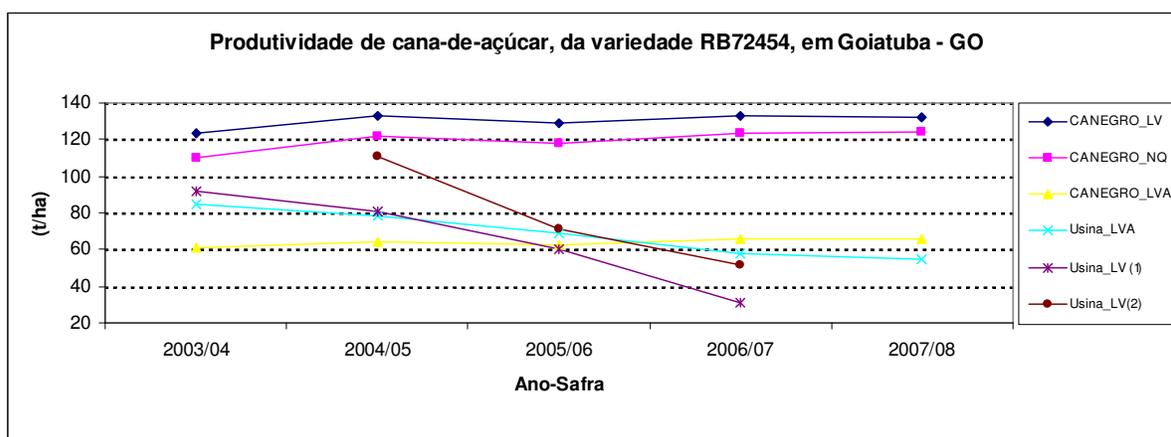


Figura 4.44 - Rendimento médio em t/ha da cana-de-açúcar, variedade RB72454, obtido pela Usina Goiasa, em Goiatuba – GO, e estimada pelo modelo DSSAT/CANEGRO para diferentes tipos de solos.

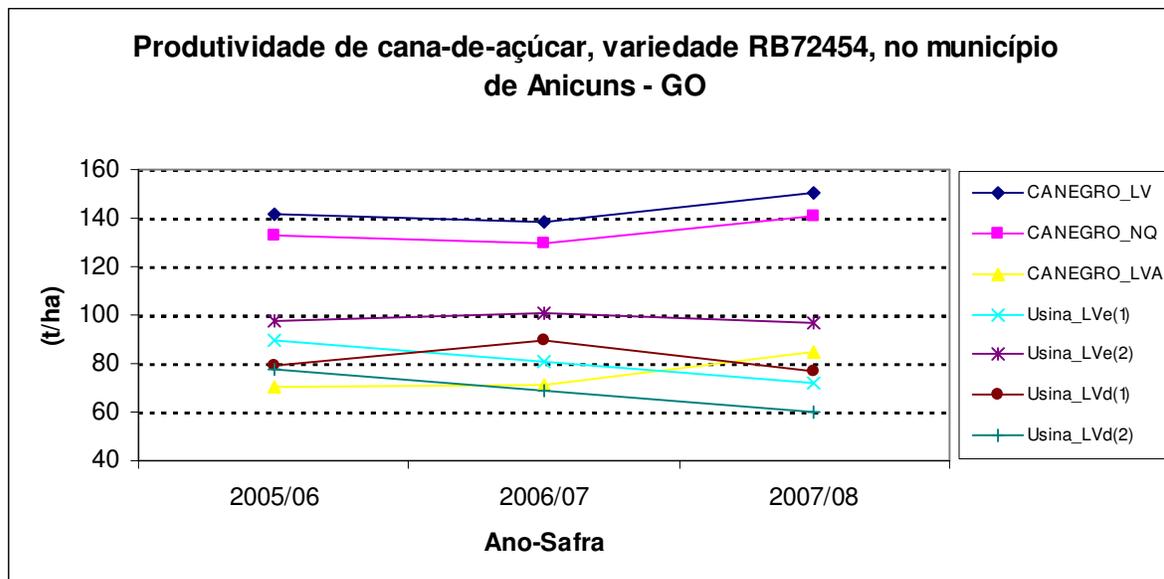


Figura 4.45. *Rendimento médio em t/ha da cana-de-açúcar, variedade RB72454, obtido pela Usina Anicuns, em Anicuns - GO, e estimado pelo modelo DSSAT/CANEGRO para diferentes tipos de solo.*

Embora o conjunto de dados de produção obtidos de Usinas não apresente histórico suficiente que permita uma análise de correlação com os dados estimados pelo modelo DSSAT/CANEGRO, com validação estatística consistente, as poucas medições permitem afirmar que o modelo simula produtividades similares às obtidas em ambientes de cultivo das Usinas e que é preciso incorporar uma penalização para os cortes seguintes.

4.9 Zoneamento de riscos climáticos da cultura da cana-de-açúcar, variedade RB72454, em ambientes de cerrado, estimado pelo SARRA/SARRAZON

Nas Figuras 4.46 a 4.49 estão ilustrados os mapas do zoneamento de riscos climáticos (ZARC) da cultura da cana-de-açúcar no Estado de Goiás e no Distrito Federal, enquanto na Tabela 4.8 estão apresentadas as áreas de cada classe de risco, elaborados de acordo com a metodologia descrita no item 3.5. Ressalta-se que este trabalho não adotou as mesmas metodologias empregadas no Zoneamento Agroecológico da Cana-de-açúcar no Brasil para a Produção de Etanol e Açúcar: Seleção de Terras Potenciais para a Expansão do seu Cultivo, realizado pela EMBRAPA (2008).

Embora o modelo SARRA/SARRAZON tenha sido parametrizado para simular o

balanço hídrico da variedade RB72454, acredita-se que os resultados apresentados possam representar as demais variedades de ciclo anual, uma vez que os riscos são de perdas de produção potencial devido a limitações hídricas, e estimados em função da razão entre a oferta hídrica (solo-clima) e a demanda da planta expressada pelo seu coeficiente de cultura (K_c) das variedades de ciclo anual (planta/clima).

As áreas de baixo risco indicam que a cultivar não foi penalizada por deficiência hídrica durante as fases de desenvolvimento inicial (perfilhamento) e desenvolvimento vegetativo pleno, numa frequência de oito anos em cada dez (80%), ou seja, a demanda hídrica foi atendida em 26 dos 30 anos (1979 a 2008), e significa que o risco de perdas de rendimento não ultrapassou 20% das safras. As zonas de médio e alto risco ocorreram com a mesma frequência apresentada, ou seja, em 80% dos anos estudados.

O zoneamento agrícola de riscos climáticos (ZARC) para plantios no primeiro decêndio de outubro num Latossolo Vermelho, de alta capacidade de retenção de água (CAD) está apresentado na Figura 4.46 A. Observa-se que, praticamente, todo o Estado de Goiás, incluindo o DF, apresentou baixo risco climático (98,5%). No Neossolo Quartzarênico (NQ), Figura 4.46 B, uma faixa no extremo leste e uma zona situada no sul do Estado apresentaram risco médio (26%), sendo que a maior parte do Estado apresentou risco baixo (74%). No Latossolo Vermelho-Amarelo (C), de CAD baixa, somente uma faixa do centro ao extremo sudoeste apresentou baixo risco climático (30,7%), com a maior extensão da superfície do Estado apresentando risco médio (69,3%).

O ZARC referente a plantios no primeiro decêndio do mês de novembro apresentou praticamente a mesma geografia, com valores percentuais de áreas de riscos inferiores a 5%, em relação ao mês de outubro, especialmente para plantio no LV e NQ (Figuras 4.47 A e B. No LVA (Figura 4.47 C), apenas a zona central, adjacente ao DF, e uma faixa ao sudoeste de GO, apresentou baixo risco (24,2%). As demais áreas da região apresentaram médio risco.

Tabela 4.8. Estimativa de áreas, em hectares, relativa às classes de riscos do zoneamento de risco climático da cultura da cana-de-açúcar, variedade RB 72454, cultivada em Goiás e Distrito Federal.

Plantio_Mês	Solo_Tipo	Classe_Risco					
		Baixo		Médio		Alto	
		ha	%	ha	%	ha	%
Outubro	LVd	34.178,4	98,5	528,9	1,5	0,0	0,0
	NQ	25.682,9	74,0	9.024,4	26,0	0,0	0,0
	LVAd	10.658,6	30,7	24.048,9	69,3	0,0	0,0
Novembro	LVd	34.607,4	99,7	100,2	0,3	0,0	0,0
	NQ	23.287,3	67,1	11.420,2	32,9	0,0	0,0
	LVAd	8.415,0	24,2	26.292,2	75,8	0,0	0,0
Dezembro	LVd	9.736,9	28,1	24.970,4	71,9	0,0	0,0
	NQ	0,0	0,0	33.538,8	96,6	1.168,6	3,4
	LVAd	0,0	0,0	31.693,5	91,3	3.014,1	8,7
Janeiro	LVd	0,0	0,0	32.899,1	94,8	1.808,1	5,2
	NQ	0,0	0,0	16.182,0	46,6	18.525,2	53,4
	LVAd	0,0	0,0	6.637,8	19,1	28.069,4	80,9

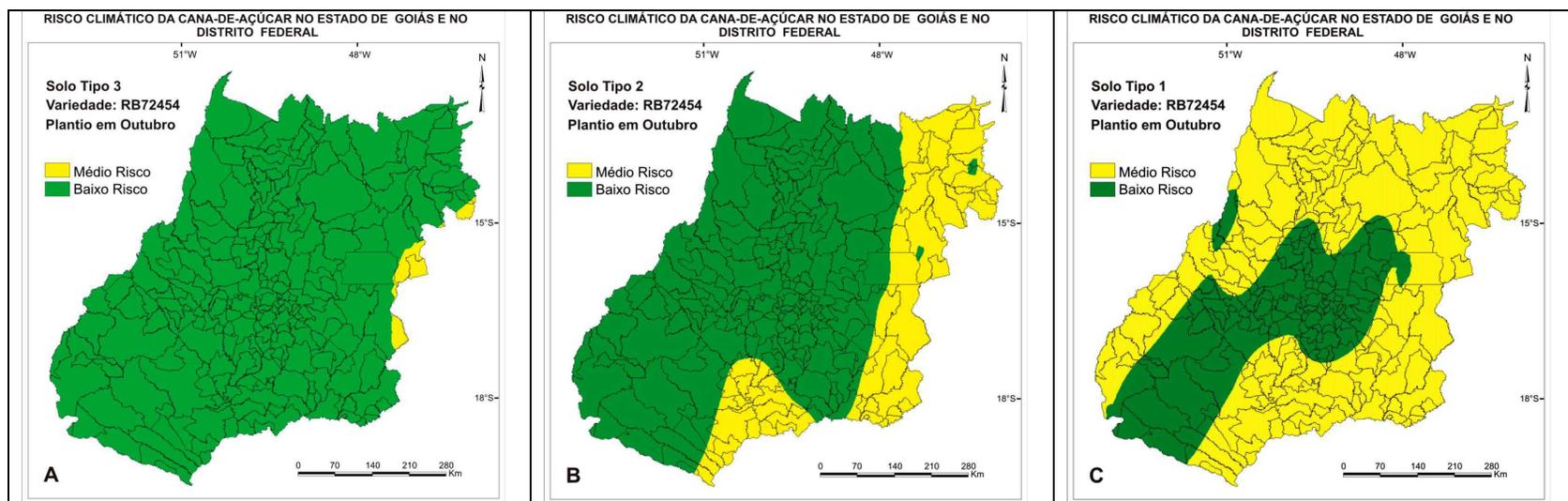


Figura 4.46. Risco climático da cana-de-açúcar, variedade RB72454, no Estado de Goiás e Distrito Federal para plantio em outubro num solo tipo 3 (A), tipo 2 (B) e tipo 1 (C).

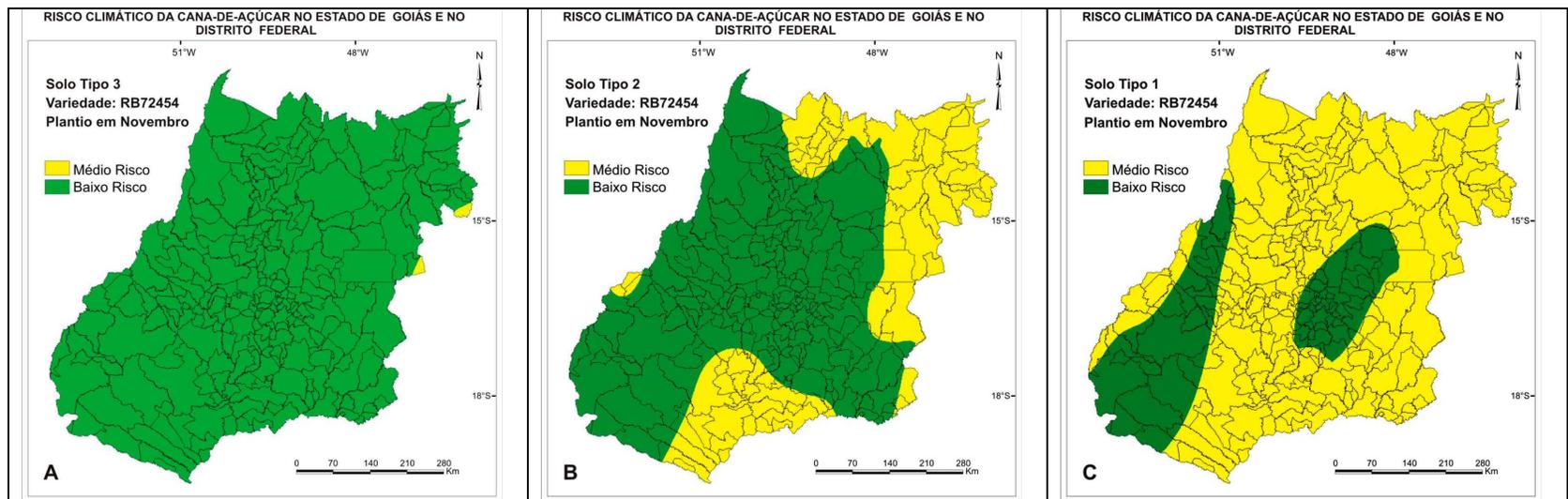


Figura 4.47. Risco climático da cana-de-açúcar, variedade RB72454, no Estado de Goiás e Distrito Federal para plantio em novembro num solo tipo 3 (A), tipo 2 (B) e tipo 1 (C).

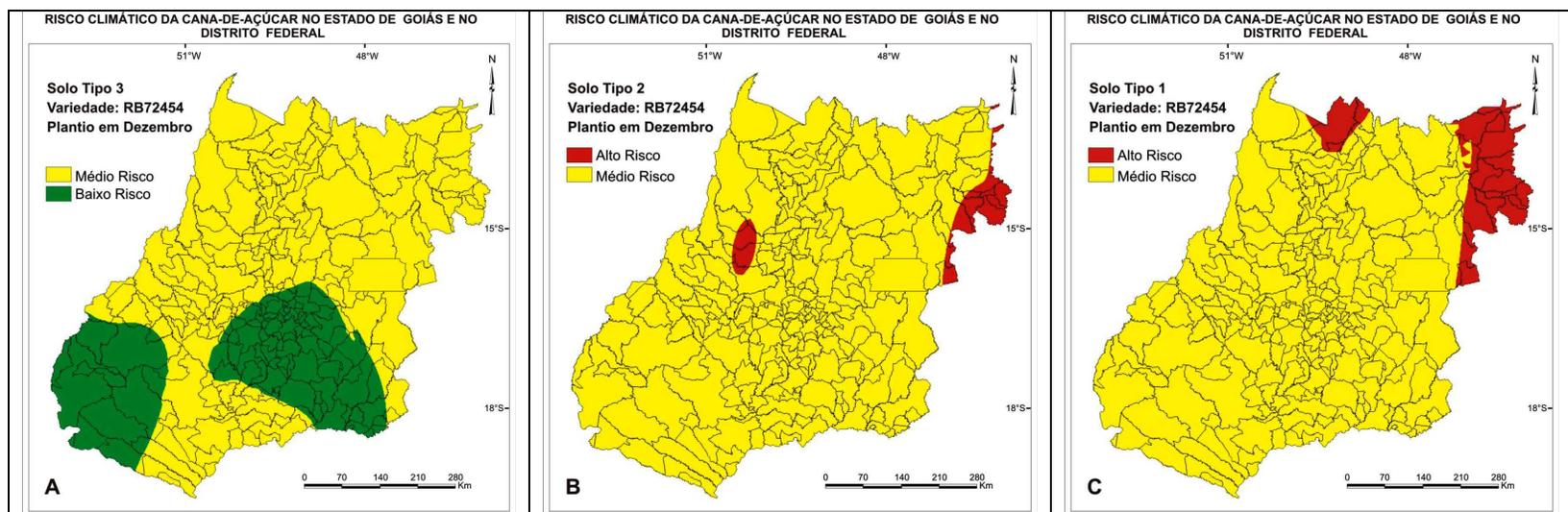


Figura 4.48. Risco climático da cana-de-açúcar, variedade RB72454, no Estado de Goiás e Distrito Federal para plantio em dezembro num solo tipo 3 (A), tipo 2 (B) e tipo 1 (C).

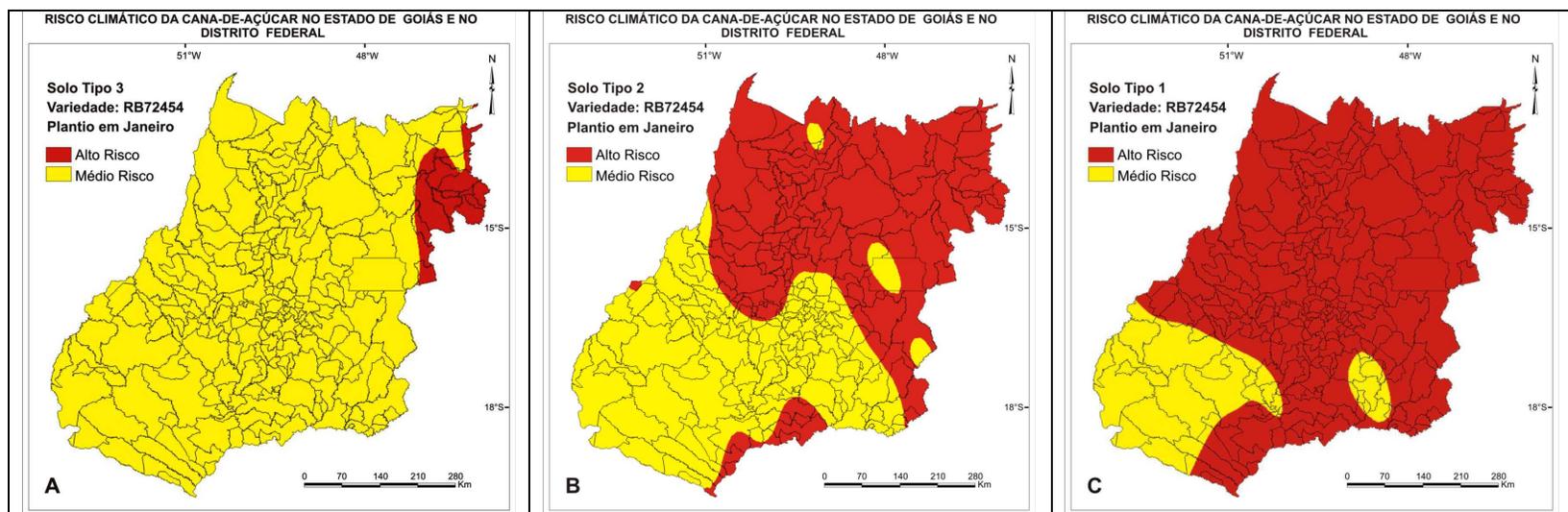


Figura 4.49. Risco climático da cana-de-açúcar, variedade RB72454, no Estado de Goiás e no Distrito Federal para plantio em janeiro num solo tipo 3 (A), tipo 2 (B) e tipo 1 (C).

No mês de dezembro, somente foi observado risco baixo para plantios realizados em duas zonas localizadas na metade sul do Estado e no solo de maior disponibilidade hídrica para a cultura (Figura 4.48 A). Nos demais cenários, predominaram as áreas com risco médio, com áreas pequenas de risco alto nos solos de CAD média e baixa (NQ e LVA), conforme apresentado nas Figuras 4.48 B e C.

Para o plantio realizado no mês de janeiro, o zoneamento apresentou riscos médio e alto em todos os cenários simulados. Para a condição de LV (Figura 4.49 A), grande predominância de área de risco médio. Em LVA (Figura 4.49 C), predominam áreas de risco alto. No NQ (Figura 4.49 B), a metade norte apresenta risco alto e a metade sul do Estado apresenta risco médio de perdas de produção da cultura.

Neste trabalho, não foram excluídas as áreas inaptas indicadas pelo Zoneamento Agroecológico do Brasil (Figura 3.10), que foi realizado na escala de 1:250.000. E, devido a esta escala, é possível aquele tenha ignorado as áreas pequenas dos solos que apresentariam aptidão e baixo risco para o cultivo da cana-de-açúcar.

Comparando com o zoneamento agrícola de riscos climáticos da cana-de-açúcar de 12 meses, publicado na portaria Nº 247, de 9 de agosto de 2010, no D.O.U., em 10/08/2010 (MAPA, 2010), destacam-se algumas observações:

I - Admitindo-se a possibilidade de ocorrerem solos aptos para cultivo da cana em todos os municípios de Goiás, este trabalho indicaria praticamente todos os municípios do Estado para plantio em solos de textura argilosa, a região a oeste, a partir da longitude que cruza o Distrito Federal, em solos de textura média, e áreas ao centro e sudoeste do Estado, em solos com CAD baixa.

II - O zoneamento de risco climático do MAPA (2010) não recomenda plantios em alguns municípios localizados no nordeste e noroeste de Goiás (Figura 4.50), por apresentarem solos inaptos para uso agrícola.

III - Enquanto aquele estudo apresenta os mesmos indicativos de plantio para os três grupos de solos (texturas arenosa, média e argilosa), de 21 de outubro a 31 de dezembro, este trabalho recomendaria épocas de plantio diferenciadas por tipo de solo, com início no primeiro decêndio de outubro, finalizando em novembro nos solos de CAD baixa e média, estendendo até dezembro em solos de CAD alta, mas, restrito a municípios localizados em duas regiões no sul de Goiás.

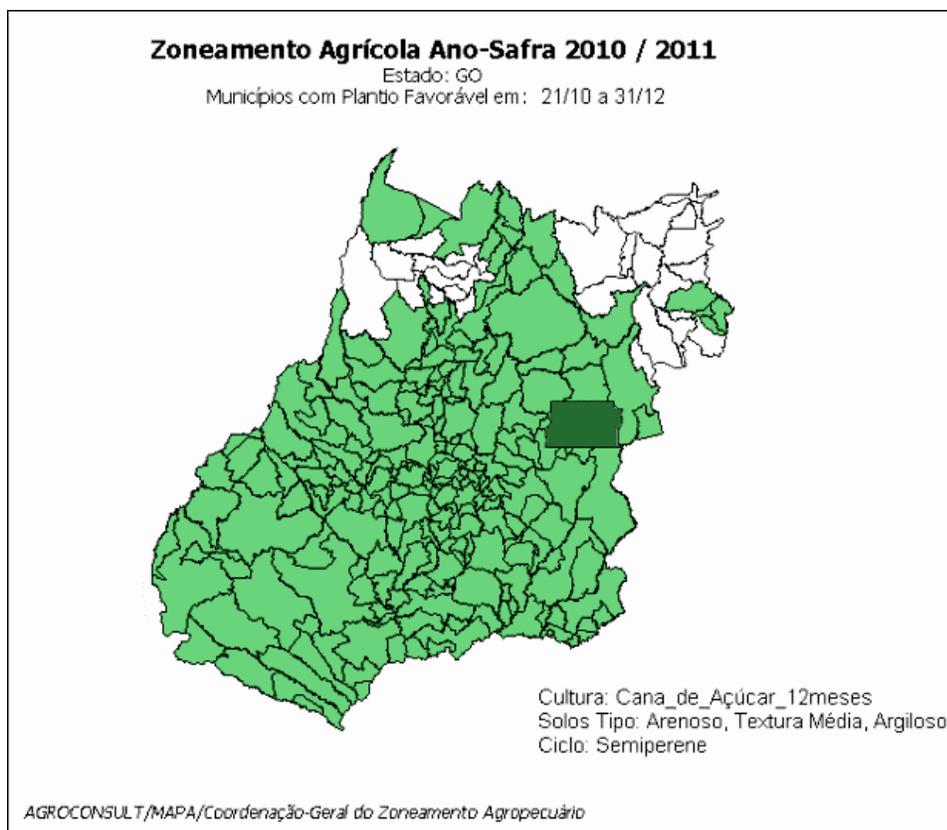


Figura 4.50. Zoneamento de risco climático da cultura da cana-de-açúcar em Goiás e Distrito Federal. Fonte: MAPA (2010).

4.9.1 Zoneamento de riscos climáticos, por tipo de solo, da cultura da cana-de-açúcar em ambientes de cerrado, estimado pelo SARRA/SARRAZON

As Figuras 51 a 54 representam o zoneamento de risco climático da cana-de-açúcar por tipo de solo. É resultado do cruzamento de cada mapa de classe de solo (LV, NQ e LVA) analisada neste trabalho e apresentada nas figuras 4.46 a 4.49, com o mapa de tipos de solo, agrupados segundo a textura e retenção de água (AD) em baixa (tipo 1), média (tipo 2) e alta retenção de água (tipo 3), e ilustrado na Figura 3.2 da seção anterior.

Observa-se que nos solos de alta retenção de água (tipo 3), que representam em torno de 56% da área de Goiás e Distrito Federal (Tabela 3.2), o plantio com baixo risco nos meses de outubro e novembro (Figuras 4.51A e 4.52A) ocorre em praticamente toda a região, com 54,3 e 55,3% da áreas desses solos (Tabela 4.9). Nos meses de dezembro (Figuras 4.53) observam-se apenas duas grandes áreas no sul do Estado, sendo que em janeiro (Figuras 4.54A), não foram observadas áreas para plantio com baixo risco.

Nos solos tipo 2, que representam 36% da área da região estudada (Tabela 3.2), os plantios com baixo risco em outubro e novembro (Figuras 4.51B e 4.52B) se concentram em praticamente dois terços localizados no centro e oeste de Goiás, e somam 27,0 e 24,5% da área ocupada por esses solos (Tabela 4.9). Em dezembro e janeiro (Figuras 4.53B e 4.54B) não são observados plantios com baixo risco nesse grupo de solos.

No grupo de solos tipo 1, que representam apenas 4,3% da área total de GO e DF (Tabela 3.2), somente são observadas pequenas áreas localizadas na região sudoeste para plantio com baixo risco nos meses de outubro e novembro (Figuras 4.51C e 4.52C) e representam 2,0 e 2,4% das áreas ocupadas por este grupo de solos (Tabela 4.9).

Em resumo, observa-se que de uma maneira geral, em toda a região os plantios com baixo risco se concentram nos meses de outubro e novembro e em solos do tipo 3 e 2.

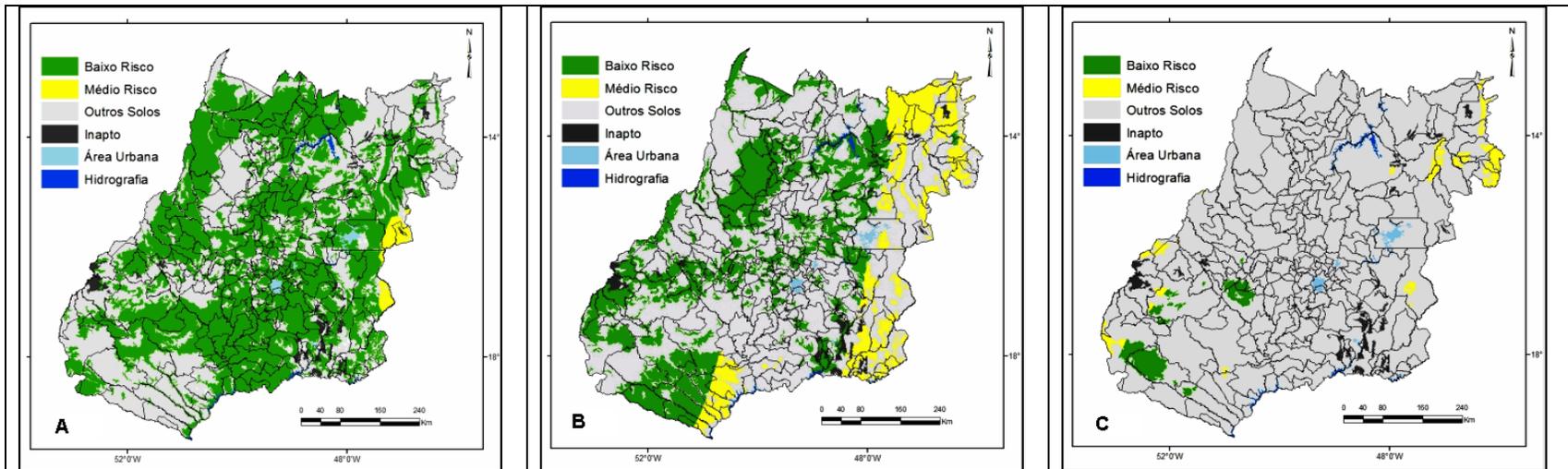


Figura 4.51. Risco climático da cana-de-açúcar, variedade RB72454, no Estado de Goiás e Distrito Federal para plantio em outubro num solo tipo 3 (A), tipo 2 (B) e tipo 1 (C).

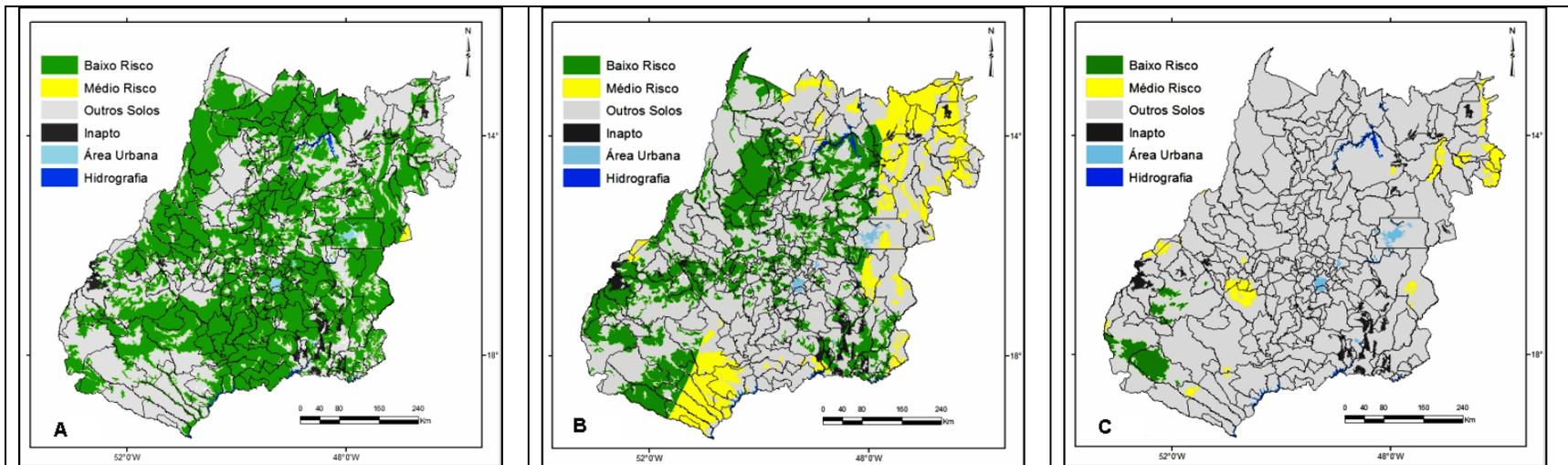


Figura 4.52. Risco climático da cana-de-açúcar, variedade RB72454, no Estado de Goiás e Distrito Federal para plantio em novembro num solo tipo 3 (A), tipo 2 (B) e tipo 1 (C).

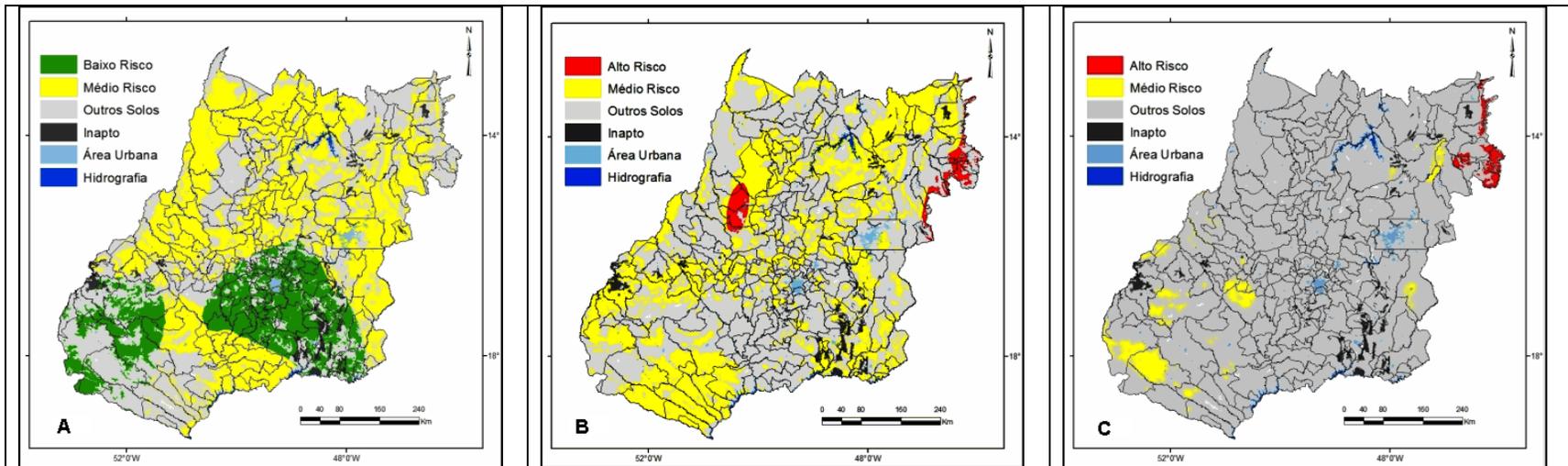


Figura 4.53. Risco climático da cana-de-açúcar, variedade RB72454, no Estado de Goiás e Distrito Federal para plantio em dezembro num solo tipo 3 (A), tipo 2 (B) e tipo 1 (C).

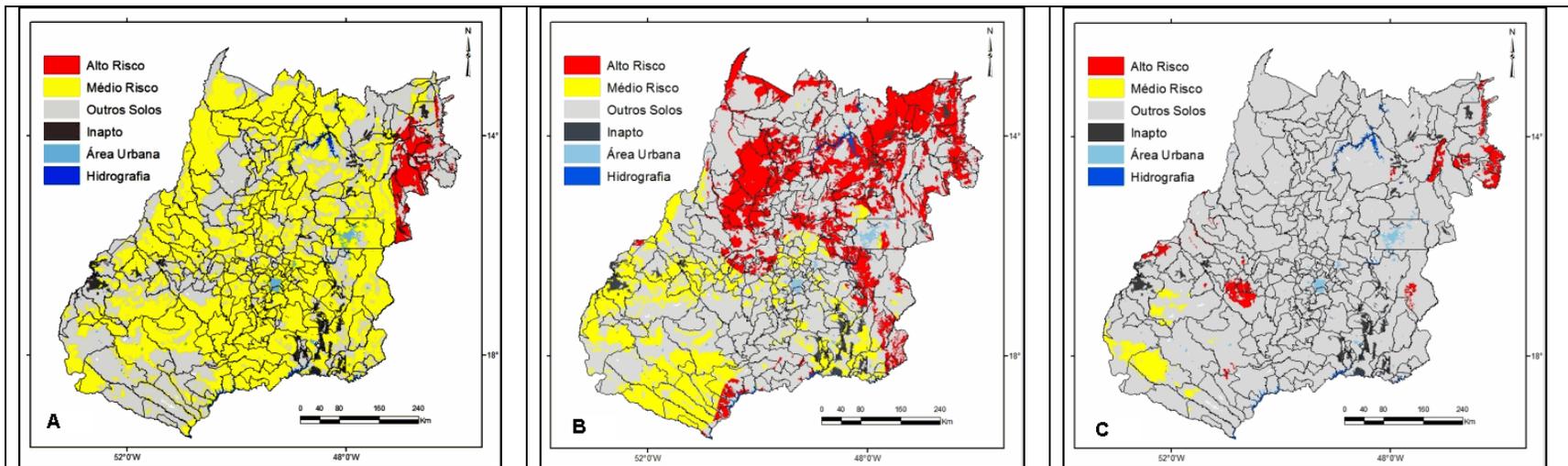


Figura 4.54. Risco climático da cana-de-açúcar, variedade RB72454, no Estado de Goiás e no Distrito Federal para plantio em janeiro num solo tipo 3 (A), tipo 2 (B) e tipo 1 (C).

Tabela 4.9. Estimativa das áreas das classes de risco do zoneamento de risco climático da cultura da cana-de-açúcar, variedade RB 72454, cultivada em Goiás e Distrito Federal.

Plantio_Mês	Solo_Tipo	Área Risco_Classe					
		Baixo		Médio		Alto	
		ha	%	ha	%	ha	%
Outubro	3	18.852.475,0	54,3	374.437,5	1,1	0,0	0,0
	2	9.372.706,3	27,0	3.198.131,3	9,2	0,0	0,0
	1	772.606,3	2,2	708.918,8	2,0	0,0	0,0
Novembro	3	19.195.062,5	55,3	31.850,0	0,1	0,0	0,0
	2	8.503.931,3	24,5	4.067.168,8	11,7	0,0	0,0
	1	657.718,8	1,9	823.518,8	2,4	0,0	0,0
Dezembro	3	5.360.543,8	15,4	13.866.368,8	40,0	0,0	0,0
	2	0,0	0,0	0,0	0,0	622.831,3	1,8
	1	0,0	0,0	1.166.606,3	3,4	314.631,3	0,9
Janeiro	3	0,0	0,0	18.392.181,3	53,0	834.731,3	2,4
	2	0,0	0,0	5.570.568,8	16,1	7.000.268,8	20,2
	1	0,0	0,0	684.168,8	2,0	797.068,8	2,3

4.10 Ajuste de modelo agrometeorológico PrISNA para estimativa da produtividade da cana-de-açúcar em ambientes de Cerrado

Na Tabela 4.10 estão apresentados os índices de satisfação das necessidades de água (ISNAs) estimados pelo SARRA/SARRAZON para as quatro fases fenológicas da cana-de-açúcar cultivada e a produtividade média estimada pelo modelo DSSAT/CANEGRO nos três solos representativos de cada localidade. Esses índices foram utilizados para ajustar um modelo de regressão linear múltipla capaz de estimar a produtividade da cana-de-açúcar a partir dos ISNAs.

O modelo PrISNA ajustado, bem como os coeficientes estatísticos de ajuste que caracteriza a eficiência de estimativa do modelo, estão apresentados, a seguir.

Tabela 4.10. Índice de satisfação das necessidades de água e produtividade da cana-de-açúcar: valores médios referentes ao período 1979 - 2008, estimados pelo SARRA e DSSAT/CANEGRO.

Nº	Estações	Long (O)	Lat (S)	Tipos de Solo															
				LVA (40 mm)				NQ (49 mm)					LV (76 mm)						
				ISNA (SARRA)				DSSAT	ISNA (SARRA)				DSSAT	ISNA (SARRA)			DSSAT		
				F1	F2	F3	F4	t/ha	F1	F2	F3	F4	t/ha	F1	F2	F3	F4	t/ha	
1	Aragarças	-52,23	-15,90	0,8	0,8	0,7	0,3	86,9	0,8	0,8	0,8	0,4	143,1	0,8	0,9	0,8	0,5	150,9	
2	Arinos	-46,05	-15,90	0,6	0,7	0,5	0,2	61,4	0,6	0,8	0,6	0,2	115,9	0,6	0,8	0,6	0,4	126,9	
3	Brasília	-47,93	-15,78	0,8	0,8	0,7	0,5	64,9	0,9	0,8	0,8	0,5	112,2	0,9	0,9	0,8	0,7	122,5	
4	Capinópolis	-49,55	-18,72	0,7	0,7	0,7	0,4	88,3	0,8	0,8	0,7	0,4	137,2	0,8	0,8	0,8	0,6	137,2	
5	Catalão	-47,95	-18,18	0,7	0,8	0,7	0,4	81,6	0,8	0,8	0,7	0,5	127,4	0,8	0,9	0,8	0,7	135,3	
6	Embrapa Hortaliças	-48,13	-15,93	0,8	0,8	0,7	0,4	77,9	0,8	0,8	0,8	0,5	127,2	0,8	0,9	0,8	0,7	136,6	
7	Embrapa Cerrados	-47,71	-15,59	0,8	0,8	0,7	0,4	55,2	0,8	0,8	0,7	0,5	102,1	0,8	0,9	0,8	0,6	115,0	
8	Embrapa A. Feijão	-49,28	-16,47	0,8	0,8	0,7	0,4	82,4	0,8	0,8	0,8	0,4	132,9	0,9	0,9	0,8	0,6	139,6	
9	Formosa	-47,33	-15,53	0,8	0,8	0,7	0,3	76,2	0,8	0,8	0,8	0,4	123,7	0,8	0,9	0,8	0,6	133,1	
10	Formoso	-46,25	-14,93	0,7	0,7	0,7	0,2	75,9	0,7	0,7	0,7	0,3	131,5	0,7	0,8	0,8	0,5	140,9	
11	Goiânia	-49,25	-16,67	0,8	0,8	0,8	0,4	77,7	0,8	0,9	0,8	0,5	136,9	0,8	0,9	0,8	0,6	144,1	
12	Aruanã	-51,00	-14,90	0,8	0,8	0,8	0,4	77,7	0,8	0,9	0,8	0,5	136,9	0,8	0,9	0,8	0,6	144,1	
13	Bom J. de Goiás	-50,18	-18,07	0,8	0,7	0,7	0,5	74,3	0,8	0,8	0,7	0,6	126,3	0,8	0,8	0,7	0,7	135,0	
14	Catalão	-47,07	-18,12	0,7	0,8	0,7	0,4	71,7	0,8	0,8	0,7	0,5	115,3	0,8	0,8	0,8	0,6	125,3	
15	Cristalina	-47,27	-17,12	0,8	0,8	0,7	0,5	84,4	0,8	0,8	0,8	0,5	118,2	0,8	0,9	0,8	0,7	128,3	
16	Caldas Novas	-48,61	-17,71	0,8	0,8	0,7	0,5	75,3	0,9	0,8	0,8	0,5	120,0	0,9	0,9	0,8	0,7	129,0	
17	Caiapônia	-51,82	-16,97	0,8	0,8	0,7	0,4	91,4	0,8	0,8	0,8	0,5	128,1	0,8	0,8	0,8	0,7	137,6	
18	Faina	-50,37	-15,43	0,8	0,7	0,7	0,3	61,1	0,8	0,8	0,8	0,4	123,6	0,8	0,8	0,8	0,6	131,8	
19	Goiás	-50,13	-15,92	0,8	0,8	0,8	0,3	81,4	0,8	0,9	0,8	0,4	139,6	0,8	0,9	0,8	0,6	147,6	
20	Luziânia	-47,98	-16,27	0,7	0,7	0,7	0,4	77,5	0,7	0,8	0,7	0,5	117,9	0,7	0,8	0,8	0,7	128,1	
21	Morrinhos	-49,11	-17,70	0,8	0,8	0,7	0,5	79,2	0,8	0,9	0,8	0,5	119,3	0,8	0,9	0,8	0,7	119,3	
22	Mineiros	-52,60	-17,57	0,8	0,8	0,7	0,6	78,4	0,8	0,8	0,8	0,7	122,5	0,8	0,9	0,8	0,8	131,3	
23	Paraúna	-50,49	-17,51	0,8	0,7	0,7	0,4	77,2	0,8	0,8	0,7	0,5	127,2	0,8	0,8	0,7	0,7	135,3	
24	Porangatu	-49,13	-13,43	0,8	0,8	0,7	0,2	92,7	0,8	0,8	0,8	0,3	134,3	0,8	0,9	0,8	0,6	143,6	
25	Quirinópolis	-50,40	-18,60	0,7	0,7	0,7	0,5	67,1	0,8	0,8	0,8	0,5	117,6	0,8	0,8	0,8	0,7	127,9	
26	Varjão	-49,67	-17,09	0,7	0,8	0,7	0,5	85,2	0,8	0,8	0,8	0,5	125,5	0,8	0,8	0,8	0,7	125,5	
27	Goianésia	-49,00	-15,22	0,8	0,8	0,7	0,3	79,0	0,8	0,8	0,8	0,4	131,6	0,8	0,9	0,8	0,5	139,7	
28	Ipameri	-48,17	-17,72	0,8	0,8	0,7	0,4	80,3	0,8	0,9	0,8	0,5	124,9	0,8	0,9	0,8	0,6	135,0	
29	Itumbiara	-49,22	-18,42	0,7	0,7	0,7	0,4	69,2	0,7	0,8	0,7	0,4	125,0	0,7	0,8	0,8	0,6	133,2	
30	Jataí	-51,72	-17,88	0,8	0,8	0,8	0,5	94,5	0,8	0,8	0,8	0,6	142,5	0,8	0,9	0,8	0,7	150,9	
31	Paracatu	-46,88	-17,23	0,7	0,8	0,6	0,3	64,3	0,7	0,8	0,7	0,4	120,3	0,7	0,9	0,7	0,5	129,7	
32	Paranaíba	-51,18	-19,75	0,7	0,7	0,7	0,5	73,0	0,7	0,8	0,7	0,6	129,3	0,7	0,8	0,8	0,7	136,7	
33	Peixe	-48,35	-12,02	0,7	0,8	0,7	0,2	91,0	0,8	0,8	0,8	0,2	146,9	0,8	0,8	0,8	0,4	154,1	
34	Pirenópolis	-48,97	-15,85	0,8	0,8	0,8	0,4	84,2	0,8	0,9	0,8	0,5	135,0	0,8	0,9	0,8	0,6	143,8	
35	Posse	-46,37	-14,10	0,7	0,8	0,7	0,2	68,7	0,8	0,8	0,8	0,3	118,9	0,8	0,9	0,8	0,5	127,2	
36	Rio Verde	-50,92	-17,80	0,8	0,8	0,7	0,5	91,5	0,8	0,8	0,8	0,6	136,9	0,8	0,9	0,8	0,7	144,4	
37	Taguatinga	-46,42	-12,40	0,7	0,8	0,7	0,2	84,2	0,8	0,8	0,7	0,3	138,0	0,8	0,8	0,8	0,5	147,0	
38	Unai	-46,80	-16,36	0,7	0,7	0,6	0,3	78,0	0,7	0,8	0,6	0,4	137,2	0,7	0,8	0,7	0,5	144,3	

Os coeficientes de sensibilidade, que representam o peso relativo de cada fase da cultura, bem como os demais indicadores estatísticos de eficiência do modelo, estão apresentados na Tabela 4.11, com transformação logarítmica. Observa-se que todos os valores do ISNA de todas as fases, assim como a variável Solo, contribuíram, significativamente, com 95% de intervalo de confiança, para a construção do modelo proposto. Observa-se, ainda, que os valores do ISNA das fases 2 e 3 (F2_Ln e F3_Ln) foram os que apresentaram contribuição maior no ajuste do modelo, com pesos de -0,83 e 0,675, respectivamente.

Tabela 4.11. Coeficientes de ajuste do modelo agroclimatológico PrISNA.

Variáveis Modelo	Coeficientes Não-Padronizados		Coeficientes Padronizados	t	Sig	Int. Confiança 95% para B		Correlações		
	B	E.Padão	Beta			Lim.Inf	Lim.Sup.	Or.-Zero	Parcial	Part
Constante	4,338	0,071		60,703	0,000	4,197	4,480			
F1	0,518	0,256	0,137	2,025	0,045	0,011	1,025	0,382	0,191	0,073
F2	-0,830	0,345	-0,178	-2,407	0,018	-1,514	-0,147	0,647	-0,226	-0,086
F3	0,675	0,249	0,201	2,709	0,008	0,181	1,169	0,616	0,252	0,097
F4	-0,203	0,045	-0,239	-4,493	0,000	-0,293	-0,114	0,501	-0,397	-0,161
TSolo	0,598	0,036	1,017	16,522	0,000	0,527	0,670	0,904	0,846	0,593

Variável dependente: PrISNA.

F1, F2, F3 e F4= fases fenológicas da cana e TSolo=tipo de solo.

As estatísticas apresentadas nas Tabelas 4.12 e 4.13 permitem avaliar o ajuste do modelo e verificar seu bom desempenho, com índice de acerto significativo, superior a 85%, conforme o coeficiente de determinação (R^2) de 0,86, obtido para um intervalo de confiança de 95%.

Tabela 4.12. Resumo do ajuste estatístico do modelo agroclimatológico PrISNA.

R ^a	R ²	R ² Ajustado	Erro Padrão	Testes Estatísticos					Durbin-Watson
				R ²	F	df1	df2	Sig. F	
0,928	0,861	0,855	0,10225	0,861	133,899	5	108	0,000	1,791

Variável dependente: PrISNA

a. Variáveis independentes: (Constante), TSolo, F1, F4, F2, F3

F1, F2, F3 e F4= fases fenológicas da cana e TSolo=tipo de solo.

Tabela 4.13. Teste de significância do modelo (ANOVA).

Modelo	Soma dos Quadrados	df	Quadrado Médio	F	Sig.
Regressão	6,999	5	1,400	133,899	0,000 ^a
Residual	1,129	108	0,010		
Total	8,129	113			

Variável dependente: PrISNA

a. Variáveis independentes: (Constante), TSolo, F1, F4, F2, F3

F1, F2, F3 e F4= fases fenológicas da cana e TSolo=tipo de solo.

Após a transformação da equação do modelo linear para o modelo logarítmico, tem-se o modelo descrito nas Equações 21 e 22.

$$\text{Pr ISNA} = e^{4,338} \cdot (F1^{0,518} \cdot F2^{-0,830} \cdot F3^{0,675} \cdot F4^{-0,203}) \cdot \text{TSolo}^{0,598} \dots\dots\dots (21)$$

Ou

$$\text{Pr ISNA} = 76,55 \cdot \left(\frac{F1^{0,518} \cdot F3^{0,675}}{F2^{0,830} \cdot F4^{0,203}} \right) \cdot \text{TSOLO}^{0,598} \dots\dots\dots (22)$$

onde:

F1 é o ISNA médio da primeira fase fenológica da cana-de-açúcar;

F1 é o ISNA médio da primeira fase fenológica da cana-de-açúcar;

F1 é o ISNA médio da primeira fase fenológica da cana-de-açúcar;

F1 é o ISNA médio da primeira fase fenológica da cana-de-açúcar; e

TSolo é o tipo de solo (1, 2 ou 3).

Os coeficientes de correlação e as covariâncias entre as variáveis independentes estão apresentadas na Tabela 4.14.

Tabela 4.14. Coeficientes de correlação e covariância do modelo ajustado. Variável dependente: PrISNA.

Modelo		TSolo	F1	F4	F2	F3
Correlações	TSolo	1,000	0,470	-0,490	-0,504	-0,206
	F1	0,470	1,000	-0,349	-0,336	-0,525
	F4	-0,490	-0,349	1,000	0,086	-0,005
	F2	-0,504	-0,336	0,086	1,000	-0,359
	F3	-0,206	-0,525	-0,005	-0,359	1,000
Covariâncias	TSolo	-0,006	0,004	-0,001	-0,006	-0,002
	F1	0,004	0,065	-0,004	-0,030	-0,033
	F4	-0,001	-0,004	0,002	0,001	-5,7E-005
	F2	-0,006	-0,030	0,001	0,119	-0,031
	F3	-0,002	-0,033	-5,7E-005	-0,031	0,062

F1, F2, F3 e F4= fases fenológicas da cana e TSolo=tipo de solo.

O desempenho do modelo também pode ser observado e atestado através das estatísticas descritivas obtidas dos erros de estimativas (Figura 4.55). A distribuição de frequência dos erros padronizados apresenta distribuição normal (Figura 4.55A) e o bom ajuste entre as probabilidades acumuladas e os erros estimados e observados (Figura 4.55B). A anormalidade dos resíduos também pode ser verificada pela sua distribuição espacial aleatória

(Figura 4.55C). Por último, verifica-se a distribuição linear dos valores observados e estimados, ainda com transformação logarítmica, com equação ajustada e índice de ajuste 0,85 (R^2), aproximadamente.

Os resultados apresentados aqui podem ser considerados bastante satisfatórios quando comparados aos apresentados por DELGADO-ROJAS e BARBIERI (1999), que, embora conseguindo melhor ajustamento, foram obtidos em ambientes controlados ou campos experimentais, que permitiram maior disponibilidade e precisão das variáveis necessárias ao modelo.

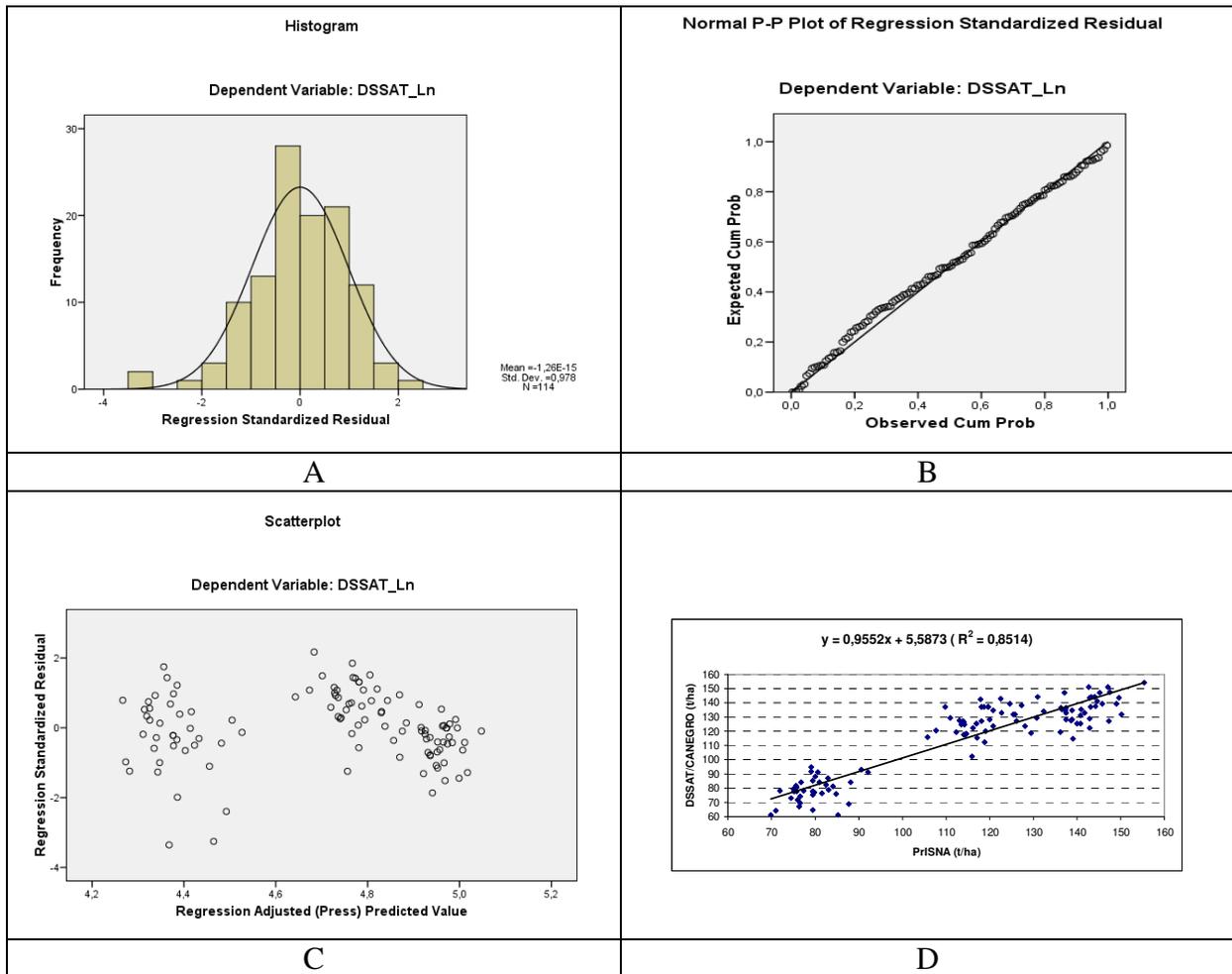


Figura 4.55. Estatística descritiva dos erros de estimativa (resíduos) e teste de validação.

Assim, é possível estimar a produtividade da cana-de-açúcar em ambientes de Cerrado, em escala regional, com eficiência estatística, utilizando modelos agrometeorológicos que exigem número reduzido de variáveis, a exemplo do SARRA.

Consideradas as limitações de aplicações dos modelos agroclimatológicos em estimativas de rendimento das culturas em escalas regionais, acredita-se que o modelo PrISNA, ajustado para estimativas da produtividade da cana-de-açúcar em ambientes de Cerrado, apresentou resultados satisfatórios e coloca-se como opção viável eficiente para aprimoramento do zoneamento agrícola de riscos climáticos do MAPA, na medida em que pode relacionar os ISNA aos índices de produtividade da cultura.

4.11 Exemplo de aplicação do modelo agrometeorológico PrISNA para estimativa da produtividade média de cana-de-açúcar na região de Cerrados

Os resultados da aplicação do modelo agrometeorológico para estimativa de produtividade de cana-de-açúcar na região de Cerrado a partir da estimativa de índices de satisfação das necessidades de água, expressados pela razão entre as taxas de evapotranspirações real (ETR) e potencial (ETP), estão ilustrados nas Figuras 4.56 a 4.58.

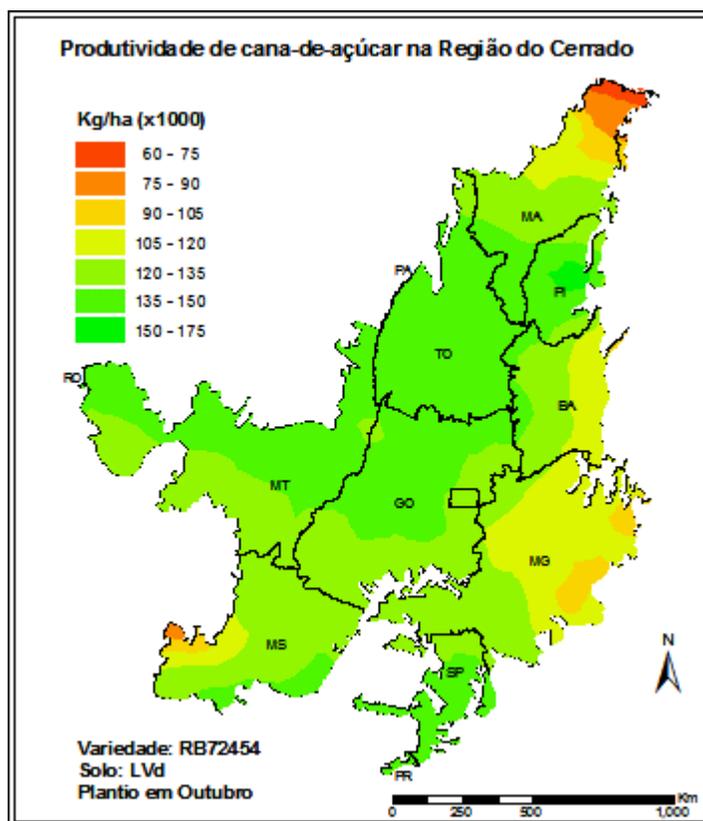


Figura 4.56. Distribuição espacial da produtividade estimada da cana-de-açúcar, variedade RB72454, plantada no mês de outubro num Latossolo Vermelho da região de Cerrado.

O exemplo de aplicação refere-se ao plantio variedade RB72454 no mês de outubro em solos similares ao Latossolo Vermelho distrófico (LVd), ao Neossolo Quartzarênico e ao Latossolo Vermelho-Amarelo (LVAd), com características físico-hídricas de alta, média e baixa capacidade de armazenamento de água (CAD), respectivamente.

A Figura 4.56 ilustra a distribuição espacial da produtividade potencial da cana-de-açúcar num cenário de alta capacidade de armazenamento de água, representado pelo LVd. Observaram-se áreas com produtividades entre 60 até 175 t/ha. As regiões que apresentam classes de produtividades menores localizam-se nas zonas que apresentam os maiores índices de deficiência hídrica, como aquelas zonas com características climáticas de semi-árido, no Maranhão, Piauí, Bahia e em Minas Gerais, e também no sul do Mato Grosso do Sul, com áreas de menores ofertas hídricas. Por outro lado, as regiões que apresentam as maiores produtividades se localizam nos Estados e regiões que associam altos índices pluviométricos com temperaturas elevadas, como norte de Goiás e Mato Grosso, sul do Maranhão e Piauí, praticamente todo o Estado do Tocantins e norte de São Paulo.

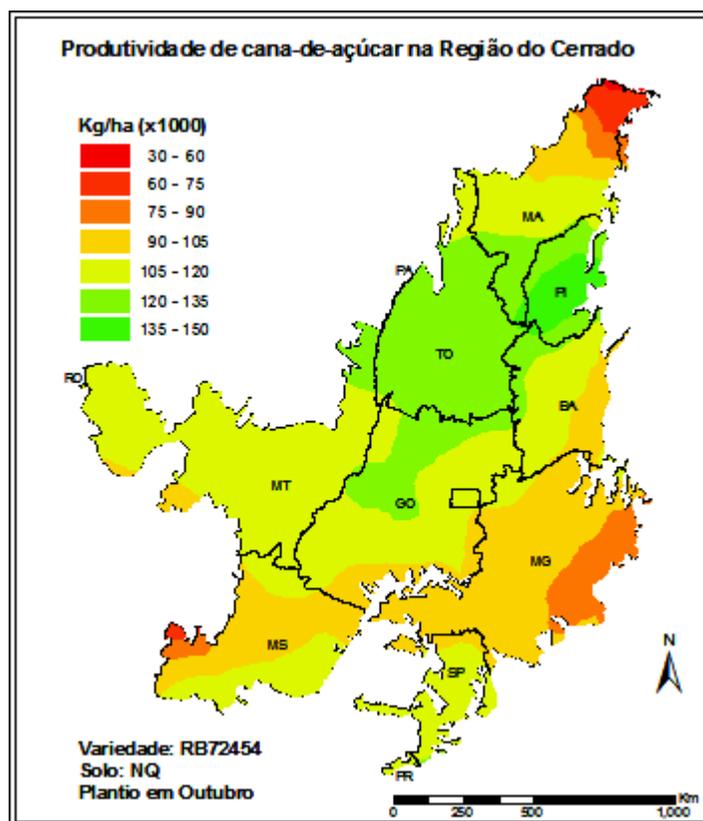


Figura 4.57. Distribuição espacial da produtividade estimada da cana-de-açúcar, variedade RB72454, plantada no mês de outubro num Neossolo Quartzarênico da região de Cerrado.

Quando a simulação de plantio foi realizada para o cenário de média capacidade de armazenamento de água observou-se grande redução das áreas com classes de produtividades elevadas (Figura 4.57), entre 120 e 150 t/ha e, por outro lado, avanço das áreas com produtividades reduzidas, justificada pela redução de água disponível para a cultura deste solo quando comparado ao LV (Figura 4.56).

No cenário de baixa capacidade de armazenamento de água, representado neste trabalho pela simulação realizada para um Latossolo Vermelho-Amarelo (Figura 4.58), observou-se que mais de 50% da região de Cerrado apresentou produtividades potenciais máximas de 80 t/ha, enquanto uma zona de limites estaduais, sul do Piauí, sul do Maranhão e leste de Tocantins, apresentam os maiores potenciais de produtividade, entre 90 e 120 t/ha.

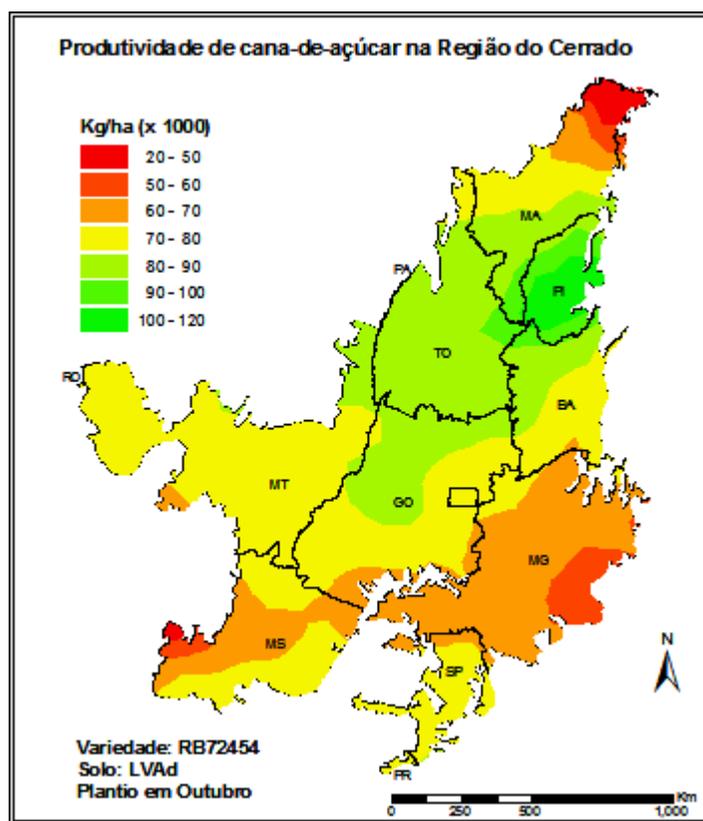


Figura 4.58. Distribuição espacial da produtividade estimada da cana-de-açúcar, variedade RB72454, plantada no mês de outubro num Latossolo Vermelho-Amarelo da região de Cerrado.

É importante ressaltar que neste exemplo, para toda a região de Cerrados, aplicou-se o modelo proposto (PrISNA) ajustado somente com base em dados de estações meteorológicas

pertencentes ao Estado de Goiás e zonas vizinhas de Estados limítrofes ao Estado, e aplicado para ISNAs obtidos para 1464 postos pluviométricos.

Em Goiás, de uma forma geral, neste exemplo, observaram-se praticamente os mesmos índices de produtividade obtidos anteriormente, a partir dos dados das 38 estações meteorológicas utilizadas para o ajuste do modelo proposto (Seção 4.5, Figura 4.8), mas com geometria espacial diferente. Nos demais Estados que compõem a região de Cerrados, as estimativas de produtividade devem ser validadas com a incorporação de séries de dados de novas estações meteorológicas, para um melhor ajustamento local do modelo PrISNA.

5. CONCLUSÕES

1. Foi possível determinar e expressar em escala espacial regional, com eficiência e confiabilidade, a produtividade potencial e os riscos climáticos relativos à produção da cana-de-açúcar em ambientes do bioma Cerrado, tanto para as condições climáticas atuais quanto para as condições de projeções de mudanças climáticas globais.

2. O modelo DSSAT/CANEGRO apresentou resultados estatisticamente consistentes, espacialmente coerentes com a oferta hídrica, e índices significativos de correlação quando comparados com os dados de rendimento registrados pelo IBGE e pelas Usinas de cana-de-açúcar. Observou-se também que os plantios realizados no mês de outubro apresentaram os maiores rendimentos.

3. De maneira geral, observou-se impacto positivo do cenário MCG, A2 de 2040, sobre a produção da cana-de-açúcar, estimada pelo DSSAT/CANEGRO. O mês de outubro continuou tendo os maiores índices de produtividade, com evidência de aproveitamento melhor das chuvas pela cultura.

4. A aplicação do modelo SARRA/SARRAZON permitiu estimar com eficiência os riscos climáticos da cana-de-açúcar em ambientes de cerrado. Observou-se que os meses de outubro e novembro como melhores épocas de plantio nos solos de baixa e média capacidade de retenção de água (AD), estendendo até dezembro em algumas regiões, nos solos maior capacidade de retenção de água.

5. Observou-se que a oferta hídrica é o maior limitante da produção de cana-de-açúcar em ambiente de cerrados, para cultivos em sequeiro. Embora apresente totais anuais que permite produções elevadas e com baixos riscos, sua distribuição temporal restringe o período de plantio para, no máximo, três meses - outubro a dezembro.

6. Foi possível desenvolver e propor um modelo agrometeorológico para estimar com eficiência a produtividade da cana-de-açúcar em ambientes de cerrado, a partir dos (ISNA) - o modelo PrISNA.

7. Os resultados permitem afirmar que o trabalho apresentou avanço científico, uma vez que as metodologias apresentadas são possíveis de aplicação em sistemas produtivos, economicamente viáveis e de baixos riscos; orientadoras de políticas públicas do agronegócio ambientalmente sustentável.

8. O modelo DSSAT/CANEGRO apresentou-se como ferramenta robusta, sensível às variáveis incorporadas e de grande potencial de aplicação. Entretanto, para maior confiabilidade, é recomendado que suas funções de simulação de rendimento e desenvolvimento das plantas, relativas à cultura, aos solos e ao clima, sejam calibradas/ajustadas ao ambiente brasileiro.

9. A análise dos resultados apresentados neste trabalho de pesquisa permite afirmar que os objetivos propostos foram atingidos, com evidências suficientes para a aceitação da hipótese testada.

10. Sugestões de trabalhos futuros:

a) Incorporar aos modelos, dados e informações obtidas por sensores remotos orbitais (satélites ambientais e agrometeorológicos), como temperatura e precipitação, por exemplo, para reduzir as limitações e melhorar a distribuição espacial.

b) Analisar as possíveis interações entre os índices de produtividade obtidos pelos modelos agroclimatológicos e aqueles obtidos por meio de sensores remotos orbitais como, por exemplo, NDVI (NOAA, MODIS).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADÂMOLI, J.; MACÊDO, J.; AZEVEDO, L. G.; NETTO, J. M. Caracterização da região dos Cerrados. In: GOEDERT, W. J. (editor). **Solos dos Cerrados: tecnologias e estratégias de manejo**. São Paulo: Nobel; Brasília: Embrapa, Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados, Cap 2, p. 33-74. 422p.1985.

AFFHOLDER, F.; COSTA RODRIGUES, G.; ASSAD, E. Modelo agroclimático para avaliação do comportamento do milho na região dos Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.32, 1997. p.993-1002.

AGRIANUAL. **Anuário da Agricultura Brasileira**. Produção brasileira de cana-de-açúcar, açúcar e álcool e custo de produção da cana-de-açúcar. São Paulo: FNP, p. 228-234. 2010.

AGRITEMPO. 2010. Disponível em: <<http://www.agritempo.org.br>>. Acesso: 05 de ago de 2010.

ALFONSI, R. R.; PEDRO JR, M. J.; BRUNINI, O.; BARBIERI, V. Condições climáticas para a cana-de-açúcar. In: PARANHOS, S.B. **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, v.1, n.135, p.42-81, set. 1987.

ALFONSI, R. R., PEDRO JÚNIOR, M. J., PEREIRA, A. R. Variação da difusividade térmica, profundidade de amortecimento e camada de extinção da onda de calor para solo da região de Campinas. **Ecossistema**, Espírito Santo do Pinhal, v. 9, p. 172-179, 1984.

ALVES, L. M; MARENDO, J. Assessment of regional seasonal predictability using the PRECIS regional climate modeling system over South America. **Theor Appl Climatol**, Springer-Verlag, 14 p. 2009.

AMARAL, E. F.; BARDALES, N. G.; AMARAL, E. F.; ARAÚJO, E. A.; PINHEIRO, C. L. S.; SOUZA, A. **Aptidão dos solos do Acre para cultivo da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) no Estado do Acre**. Rio Branco: Embrapa - Comunicado Técnico, n.143, p. 1-6, dez. 2001.

ARGENTON, P. E. **Influências das variáveis edafoclimáticas e de manejo no rendimento de variedades de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) na região de Piracicaba.** 109 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2006.

ASSAD, E. D. et al. Zoneamento agroclimático do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) para o estado de Goiás e sudoeste do estado da Bahia. In: **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n. 3, p. 510-518, 2001.

ASSAD, E. D.; MACEDO, M. A.; ZULLO, J.; PINTO, H. S.; BRUNINI, O. Avaliação de métodos geoestatísticos na espacialização de índices agrometeorológicos para definir riscos climáticos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 2, p. 161-171, fev. 2003.

ASSAD, E. D.; MARIN, F. R.; MARTINS, N. P.; PINTO, H. S.; ZULLO JÚNIOR, J. Análise de Riscos Climáticos para Competitividade Agrícola e Conservação dos Recursos Naturais. In: **Savanas: desafios e estratégias pra o equilíbrio entre sociedade, agronegócio e recursos naturais** / editores técnicos Fábio Gelape Faleiro, Austeclínio Lopes de Farias Neto. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, p. 1083-1108, 2008. 1.198 p.

ASSAD, E. D.; PINTO, H. S.; ZULLO JR J., MARIN, F. R.; PELEGRINI, G. Mudanças climáticas e a agricultura brasileira: avaliação dos possíveis impactos. In: **Sistemas Agrossilvipastoris na América do sul: desafios e potencialidades** / editores Elizabeth Nogueira Fernandes ... [et al.]. – Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, Cap. 8, p. 219-243. 362p, 2007.

ASSAD, E. D.; PINTO, H. S.; ZULLO JR, J. et al. **Aquecimento Global e a nova Geografia da Produção Agrícola no Brasil.** 1. ed. Brasília: Embaixada Britânica: v. 1. 84 p. 2008.

ASSOCIAÇÃO PROFISSIONAL DA INDÚSTRIA DA FABRICAÇÃO DE ÁLCOOL, AÇÚCAR, SIMILARES E CONEXOS - UDOP. **A cultura da cana-de-açúcar no Estado de Minas Gerais.** Disponível em: <<http://www.udop.com.br/geral.php?item=noticia&cod=987>>, Acesso 01 de Nov. de 2007.

ASSOCIAÇÃO PROFISSIONAL DA INDÚSTRIA DA FABRICAÇÃO DE ÁLCOOL, AÇÚCAR, SIMILARES E CONEXOS - UDOP. **A história da cana-de-açúcar: da**

antiguidade aos dias atuais. Disponível em:
<<http://www.udop.com.br/geral.php?item=noticia&cod=993>>, Acesso 01 de Nov. de 2007.

BACCHI, O.O.S.; SOUZA, J.A.G.C. Minimum threshold temperature for sugar cane growth. In: CONGRESS OF THE SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 1, 1978, London. **Anais...** London: ISSCT, v.2, p.1733-1741, 1978.

BALL-COELHO, B.; SAMPAIO, E. V. S. B.; TIESSEN, H.; STEWART, J. W. B. Root dynamic in plant ratoon crops of sugar cane. **Plant and Soil**, Springer Netherlands, v.142, p.297-305, 1992.

BARBIERI, V. **Condicionamento climático da produtividade potencial da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*):** um modelo matemático-fisiológico de estima. 142p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade de São Paulo - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba. 1993.

BARBIERI, V. **Medidas e estimativas de consumo hídrico na cana-de-açúcar (*saccharum spp.*)**. 82p. Dissertação (Mestrado em estatísticas e experimentos) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 1981.

BARBIERI, V.; BACCHI, O.O.S.; VILLA NOVA, N.A. Espaçamento em cana-de-açúcar. In: CONGRESSO NACIONAL DA STAB, 2, 1981. Rio de Janeiro, **Anais...** Rio de Janeiro: STAB, v.3, p.512-522, 1981.

BARBIERI, V.; BACCHI, O. O. S.; VILLA NOVA, N.A. Análise do fator temperatura média do ar no desenvolvimento da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 1., 1979. Mossoró. **Anais ...** Mossoró: SB Agro, p. 192-197, 1979.

BARON, C.; PRESEZ, P.; MARAUX, F. Systeme d'Analyse Regionale des Risques Agroclimatiques - **Bilan Hydrique Applique au Zonage (SARRAZON)**. Montpellier: CIRAD-CA, 1996. 26p.

BARROS, A. H. C., **Desenvolvimento de funções de pedotransferência e sua utilização em modelo agro-hidrológico**. 149p. Tese (Doutorado em agronomia) - Universidade de São Paulo - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba. 2010.

BOOTE, K. J. et al. **Peanut crop growth simulation model**. **Agricultural Experiment Station Journal**. **University of Florida**, Gainesville, Florida. User’s guiden n.8420, 1987.

BOOTE, K.J.; JONES, J. W.; PICKERING, N. B. Potential e uses and limitations of crop models. **Agronomy Journal**, v.88, n.5, 1996. p.704-716.

BOSCHI, R. S.; LOPES-ASSAD, M. L.; SANS, L. M. A. Estimativa da retenção de água no solo visando o zoneamento agrícola de risco climático. **XXXI Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**, Gramado - RS, 2007. 5p.

BRASIL, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. 2008. [Online]. **Instrução Normativa nº 2**. Homepage: <http://www.agricultura.gov.br/>. Consultado em 15 de agosto de 2010.

BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Secretaria Geral. **Projeto RADAMBRASIL**. Folha SD.22 - Goiás, SD.23 - Brasília, SE.22 - Goiânia. (Levantamento de Recursos Naturais, 25, 29, 31). Rio de Janeiro. 1981, 1982, 1983.

BRISTOW, K. L., CAMPBELL, G. S. On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 31, p. 159-166, 1984

BURROUGH, P. A.; McDONNELL R. A. **Principles of geographical information systems**. New York: Oxford University Press, 1998. 333 p.

CABRAL, O. M. R. **O sistema solo-vegetação-atmosfera: Observação e modelagem da cana-de-açúcar no estado de São Paulo**. 95p. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, São Paulo. 2001.

CÂMARA G.; SOUZA, R. C. M.; FREITAS, U. M.; GARRIDO, J. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. **Computers & Graphics**, 20: (3) 395-403, May-Jun. 1996.

CÂMARA, G.; MEDEIROS, J. S. Princípios Básicos do Geoprocessamento. In: ASSAD, E.; SANO, E. **Sistema de Informações Geográficas: Aplicações na Agricultura**. 2a. ed. Brasília, v. único, p. 3-12, 1998.

CAMARGO, A. P., MARIN, F. R., SENTELHAS, P. C., PICINI, A.G. Ajuste da equação de Thornthwaite para estimar a evapotranspiração potencial em climas áridos e superúmidos, com base na amplitude térmica diária. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.7, n.2, p.251 – 257, 1999.

CAMARGO, A. P.; PICINI, A.G. Modelo para estimativa de ETp considerando a advecção regional em climas áridos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 9, 1995. Campina Grande, **Anais...** Campina Grande: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, p. 407-408, 1995.

CAMARGO, A. P.; ALFONSI, R. R.; PINTO, H. S.; CHIARINI, J.V. Zoneamento da aptidão para culturas comerciais em áreas do cerrado. In: SIMPÓSIO SOBRE O CERRADO, 4, 1976. Brasília, **Anais...** Bases para utilização agropecuária. Belo Horizonte: Itatiaia/São Paulo: USP, p. 89-120, 1977.

CAMARGO, M. N.; KLANT, E.; KAUFFMAN, J. H. Sistema Brasileiro de classificação de solos. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.12, p.11-33, Jan/abr. 1987.

CAMARGO, MBP **Determination of the water balance components and drought sensitivity indices for a sorghum crop**. 131 p. Thesis (Phd) – University of Nebraska, Lincoln. 1992.

CAMPOS, A. B.; LUIZ, G. C.; MACEDO, R. A. R.; PEIXOTO, V. M. R. Análise do comportamento espacial e temporal das temperaturas e pluviosidades no Estado de Goiás. In: **Abordagens geográficas de Goiás: o natural e o social na contemporaneidade** / Maria Geralda de Almeida (org.) -Goiânia: IESA, 2002. p.91-118

CARVALHO, E. P. **Formulação de uma estratégia para garantir o aumento da produção.** In: SEMINÁRIO “UMA ESTRATÉGIA PARA O ETANOL BRASILEIRO”, 1, 2006, Rio de Janeiro: Casa do Brasil, nov. 2006.

CASAGRANDE, A. A. e VASCONCELOS, A. C. M. Fisiologia da parte aérea. In: DINARDO MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. (Eds.) **Cana-de-açúcar.** Campinas: Instituto Agrônômico, 2008. p.57-78.

CASAGRANDE, A. A. **Tópicos de morfologia e fisiologia da cana-de-açúcar.** Jaboticabal: Funep, 1991, 157p.

CECÍLIO, R. A.; MEDEIROS, S. S.; DANTAS NETO, F. S.; SOUZA, J. A. A.; SOARES, A. A. Zoneamento climático associado ao potencial de cultivo das culturas do café, cana-de-açúcar e amendoim nas sub-bacias do alto e médio São Francisco em Minas Gerais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11, 2003, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: INPE, p. 39-45, 2003.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO: **Acompanhamento da safra brasileira.** Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1253&t=>>, Acesso 31 de out. de 2010.

CONCEIÇÃO, M. A. F.; MARIN, F. R. Avaliação de modelos para a estimativa de valores diários de radiação solar global com base na temperatura do ar. **Revista Brasileira de Agrometeorologia,** Campinas, v.15, n.1, p.103-108, 2007.

COPERSUCAR – CTC. **O efeito estufa e o bioálcool combustível – Relatório 05/97.** Piracicaba, São Paulo. 1997.

COPERSUCAR. **Recomendação de adubação para a cultura da cana-de-açúcar.** Piracicaba: CTC, 1988.

COSTA, L. C. **Modelagem e simulação em agrometeorologia.** Piracicaba, ESALQ, Jul. 1997. X Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 1997.

CUNHA, G. R. et al. Zoneamento agrícola e época de semeadura para trigo no Brasil. In: **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n. 3, p. 400-414, 2001.

CUNHA, G. R.; ASSAD, E. D. Uma visão geral do numero especial da RBA sobre o zoneamento agrícola no Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.9, n.3, p.377-385, 2001.

DALRI, A. B. Irrigação em cana-de-açúcar. In: SEGATO, S. V.; PINTO, A. S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J.C.M. **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: CP 2, p. 19-36, 2006.

DE JONG, R. Soil water models. A Review. Tech. Bull. 1984- 6E. **Research Branch, Agriculture Canada**, Ottawa, ON. 39 pp. 1984

DE WIT, C. T. **Photosynthesis of leaf canopies**. Wageningen: Pudoc, 1965. 57p. (Agricultural Research Report 663).

DELGADO-ROJAS, J. S.; 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.

DIAS, F. L. F. **Relação entre a Produtividade, clima, solo e variedades de cana-de-açúcar na Região Noroeste do Estado de São Paulo**, Piracicaba. 64p. Dissertação (Mestrado em agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 1997.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. Yield response to water. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1979. 193p. (**Irrigation and Drainage**, Paper 33).

EGLI, D. B.; BRUENING, W. Planting date end soybean yield: Evaluation of enviromental effects with a crop simulation model: SOYGRO. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.62, 1992. p.19-29.

EITEN, GEORGE. **Vegetação**. In: NOVAIS PINTO, MARIA (org). Cerrado: caracterização, ocupação e perspectivas. 2ª Ed. Brasília, DF: Editora Universidade de Brasília. 1993. 681p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Zoneamento Agroecológico da Cana-de-açúcar no Brasil para a Produção de Etanol e Açúcar: Seleção de Terras Potenciais para a Expansão do seu Cultivo.** Relatório Técnico. Embrapa Solos. Rio de Janeiro. 2008.

EVANGELISTA, B. A.; MARIN, F. R.; ZULLO, J. Impacto das mudanças climáticas sobre a produção de cana-de-açúcar no estado de Goiás. In: XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 9, 2009. Belo Horizonte, 2009. CD-ROM.

EVANGELISTA, B. A. **Aplicações Geoestatísticas na análise espacial da precipitação pluviométrica no Estado de Goiás e Distrito Federal.** 127p. Dissertação (Mestrado em Gestão Ambiental e Territorial), Universidade de Brasília, Brasília - DF, 2004.

FARIAS, J. R. B. et al. Caracterização de risco de déficit hídrico nas regiões produtoras de soja no Brasil. In: **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n. 3, p. 415-421, 2001.

FAUCONIER, R.; BASSEREAU, D. **La caña de azúcar.** Barcelona: Blume, 1975, 433p.

FAUCONIER, R.; BASSEREAU, D. **La cane à sucre.** Paris. 1970, 468p.

FUKS, S. D. Novos modelos para mapas derivados de informações de solos. In: ASSAD, E. D., SANO, E. E. **Sistemas de Informações Geográficas: aplicações na agricultura.** Brasília: EMBRAPA – SPI/Embrapa Cerrados, 1998. p.373-410.

GLOVER, J., Practical and theoretical assessments of sugarcane yield potential in Natal. **Proceeding of the South African Sugar Technologists Association.** V.46, p.138–141. 1972.

GÖEPFERT, H.; ROSSETI, A. L. SOUZA, J. **Eventos generalizados e seguridade agrícola.** Brasília: IPEA, 65p., 1993.

GONÇALVES, N. H. Manejo do solo para implantação da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S. V.; PINTO, A. S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J. C. M. **Atualização em produção de cana-de-açúcar.** Piracicaba: CP 2, p.93-106, 2006.

GOOVAERST, P. **Geostatistics for natural resources evaluation**. New York: Oxford University Press, 1997. 481p.

GOUVÊA, J. R. F.; SENTELHAS, P. C.; GAZZOLA, S. T.; SANTOS, M. C. Climate changes and technological advances: Impacts on sugarcane productivity in tropical southern Brazil. **Sci. Agric.** (Piracicaba, Braz.), v.66, n.5, p.593-605, September/October 2009.

HOFFMANN, H.P. et al. **Variedades RB de Cana-de-açúcar**. 1. Ed. CCA/UFSCar: Araras, 2008. 30p.

INMAN-BAMBER, N. G. Temperature and seasonal effects on canopy development and light interception of sugar cane. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.36, p. 41-51, 1993.

INMAN-BAMBER, N. G.; THOMPSON, G. D. Models of dry matter accumulation by sugarcane. **Proceeding of the South African Sugar Technologists Association**. V.63, p.212–216. 1989.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA: **Acompanhamento da safra brasileira**. < <http://www.sidra.ibge.gov.br>>, 05/01/2008.

IPCC. Climate change 2007: **The physical science basis**: summary for policymakers. Geneva: IPCC, 2007. 18 p. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/SPM2feb07.pdf>>, Acesso 06 de set. de 2010.

ISSAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989. 561 p.

JENSEN, M.E. Water consumption by agricultural plants. In: KOZLOWSKI, T.T. (Ed.) **Water deficits and plant growth**. New York: Academic Press, V.2, p.1-22, 1968.

JOAQUIM, A. C. **Identificação de variedades de cana-de-açúcar em três classes texturais de solos, na região de Araraquara - SP, através de análise de nível de cinza em imagens Landsat/TM**. 118p. Dissertação (Mestrado em Planejamento e Desenvolvimento Rural

Sustentável) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998.

JOHNSTON, K.; HOEF, J. M. V.; KRIVORUCHKO, K.; LUCAS, N. **Using ArcGIS Geostatistical Analyst**. New York: ESRI. 2001. 300 p.

JONES, C. A.; KINIRY, J. R. **CERES-Maize Model: A simulation model of maize growth and development**. Texas A&M University Press, 1986. 194p.

JONES, R.; HASSEL, D.; HUDSON, D.; WILSON, S.; JENKINS, G.; MITCHELL, J. **Workbook on generating high resolution climate change scenarios using PRECIS**. Hadley Centre for Climate Prediction and Research, Met Office, Bracknell, UK. 2003. 34 p.

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. 61, p. 253-271, 1999.

KOFFLER, N. F.; DONZELI, P. L. Avaliação dos solos brasileiros para a cultura da cana-de-açúcar. In: PARANHOS, S.B. **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, 1987.

KORNDÖRFER, G. H.; VIEIRA, G. G.; MARTINS, J.; MATHIESEN, L. A. Resposta da cana-planta à diferentes fontes de fósforo. São Paulo: **Boletim Técnico Copersucar**, São Paulo, v.45, p.31-37, 1989.

LEPSCH, I. Influência dos fatores edáficos na produção. In: CATRO, P. R. C.; FERREIRA, S.O.; YAMADA, T. **Ecofisiologia da produção**. Piracicaba: Potafós, p. 83-98, 1987.

LIU, D. L.; BULL, T. A. Simulation of biomass and sugar accumulation in sugarcane using process – based model. **Ecological Modelling** 144, 181-211. 2001.

LIU, D. L.; KINGSTON, G. QCANE: A simulation model of sugarcane growth and sugar accumulation. In: ROBERTSON, M.J. (Ed.). **Research and modelling approaches to assess**

sugarcane production opportunities and constrains. Brisbane: University of Queensland, 1995. p. 25-29.

LOPES, A. S. **Solos sob “cerrado”:** características, propriedades e manejo. Piracicaba, Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1983. 162 p.

LOPES-ASSAD, M. L.; BOSCHI, R. S.; NOMURA, E.; EVANGELISTA, B. A.; SILVA, J. S. V. Uso de informações de solos no zoneamento agrícola de risco climático. In: **XV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia** - 02 a 05 de julho de 2007 - Aracaju - SE.5p. CD-Rom

LOPES-ASSAD, M. L.; SANS, L. M. A; ASSAD, E. D.; ZULLO, J. Relação entre água retida e conteúdo de areia total em solos brasileiros. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.9, n.3, (Nº Especial: Zoneamento Agrícola), p.588-596, 2001.

LUCHIARI Jr, A.; RESENDE, M.; RITCHEY, K. D.; FREITAS JÚNIOR, E.; SOUZA, P. I. de M. Manejo do solo e aproveitamento de água. In:GOEDERT, W. J. (editor). **Solos dos Cerrados: tecnologias e estratégias de manejo.** São Paulo: Nobel; Brasília: Embrapa, Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados, Cap 2, p. 285-322. 422p.1985.

LYRA, G. B.; PEREIRA, A. R.; LYRA, G. B.; SEDIYAMA, G. C.; MAIA, S. M. F. Evapotranspiração da cultura de cana-de-açúcar na região de Tabuleiros Costeiros do Estado de Alagoas: coeficiente da cultura “Dual” padrão boletim FAO-56. **Stab**, Piracicaba, v. 25, n. 5, p. 44-50, mai/jun. 2007.

MACHADO, E. C. **Um modelo matemático-fisiológico para simular o acúmulo de matéria seca na cultura de cana-de-açúcar (*Saccharum* sp).** 115p. Dissertação (Mestrado em Biologia) - Faculdade de Biologia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1982.

MALEK, E. Comparison of alternative methods for estimating ETp and evaluation of advection in the Bajgah area. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.39, p.185-192, 1987.

MANZATTO, C. V.; ASSAD, E. D.; MANSILLA BACA, J. F.; PEREIRA, S. E. M. **Zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009. 55p.

MANZATTO, Celso Vainer org. **Zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar** [et al.]. - Rio de Janeiro : Embrapa Solos, 2009. 55 p.: il. - (Documentos / Embrapa Solos, ISSN 1517-2627 ; 110).

MARENGO J. A. Cenários de Mudanças Climáticas para o Brasil em 2100. **Ciência & Ambiente**, v. 34, p. 100-125, 2007.

MARIN, F. R.; JONES, J. W.; ROYCE, F.; SUGUITANI, C.; DONZELLI, J.L.; PALLONE FILHO, W. J.; NASSIF, D.S.P. Parameterization and Evaluation of Predictions of DSSAT/CANEGRO for Brazilian Sugarcane. **Agronomy Journal** (in Press), 2010.

MARIN, F. R.; PELLEGRINO, G. Q.; ASSAD, E. D.; NASSIF, D. S. P.; VIANA, M. s.; SOARES, F. A.; CABRAL, L. L.; GUIATTO, D. Cenários futuros para cana-de-açúcar no estado de São Paulo baseados em projeções regionalizadas de mudanças climáticas. In: **XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA**, 9, 2009. Belo Horizonte, 2009, 5p. Disponível em: <<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/item/16846/1/204.pdf>>, Acesso 25 de jun. de 2010.

MARIN, F. R.; SENTELHAS, P. C.; UNGARO, M. R. G. Perda de rendimento potencial da cultura do girassol por deficiência hídrica, no Estado de São Paulo. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 57, n. 1, p. 1-6, 2000.

MARIN, F.R.; LOPES-ASSAD, M. L.; PILAU, F. G.; VIAN, C. E.; ASSAD, E. D.; SANTOS, M. C. Crop efficiency sugarcane in the State of São Paulo. I. Climate and soil aspects. In: XV CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 15, 2007, Aracaju. **Anais...** Aracaju: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2007, CD-Rom.

MARIN, F. R.; SUGUITANI, C.; DONZELLI, J. L.; et al. Avaliação do modelo Canegro/Dssat para quatro cultivares de cana-de-açúcar. **Congresso Brasileiro de Agrometeorologia**. 2009. CDROM.

MATOS, O. C. de. Livro - **Econometria Básica: teoria e aplicações** / Orlando Carneiro de Matos. – São Paulo: Atlas, 1995.

MAULE, R. F.; MAZZA, J. A.; MARTHA JR, G. B. Produtividade agrícola de cultivares de cana-de-açúcar em diferentes solos e época de colheita. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.58, n.2, p.295-301, abr./jun., 2001.

MEYER, S. J, HUBBARD, K. G., WILHITE, D. A. A crop specific drought index for corn. I. Model development and validation. **Agronomy Journal**, Madison, V.86, n.1, p. 388-395, 1992.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/pls/portal/docs/PAGE/MAPA/SERVICOS/USINAS_DESTILARIAS/USINAS_CADASTRADAS/UPS_22_11_2007_0.PDF>, Acesso 25 de Nov. de 2007.

MIOCQUE, J. Avaliacao de crescimento e produtividade de matéria verde da cana-de-açúcar na região de Araracoara, SP. **STAB - Açúcar Álcool e Subprodutos**, v.18, n.2, p.45-47, 1999.

MONTEITH, J. L. The quest for balance in crop modeling. **Agronomy Journal**, Madison, v.88, p.695-697, 1996.

MOZAMBANI, A. E; PINTO, A. S.; SEGATO, S. V.; MATTIUZ, C.F.M. História e morfologia da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S. V.; PINTO, A.S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J.C.M. **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: CP 2, p. 11-18, 2006.

NUNES JR, D. M. S. Variedades de cana-de-açúcar. In: Paranhos, S. B. **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. São Paulo: Fundação Cargill, 856p. cap. 2 v.1, p.187-259, 1987.

O'LEARY, G. J. A review of three sugarcane simulation models in the prediction of sucrose Yield. **Field Crops Res.** 68:97-111. 2000.

O'LEARY, G. J. A review of three sugarcane simulation models with respect to their prediction of sucrose yield. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 68, p. 97-111, 2000.

OLIVEIRA, J. B. **Solos do Estado de São Paulo: descrição das classes registradas no mapa pedológico**. Campinas: Instituto Agronômico, 1999, 112p. (Boletim Científico 45).

OMETTO, J. C. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo. Editora Agronômica Ceres. 1981. p.440.

ORTOLAN, M. C. A. Perspectivas para o setor sucroalcooleiro brasileiro. In: SEGATO, S. V.; PINTO, A.S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J.C.M. **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: CP 2, p. 407-415, 2006.

PEREIRA, A. R. Balanço de Carbono: Uso de Modelos e Simulação. In: CROCOMO, O. J.; SILVEIRA, J. A. G. da (Ed.) SEMINÁRIO DE BIOTECNOLOGIA AGRÍCOLA, 5., Piracicaba, 1987. **Anais**. Piracicaba: CEBTEC/FEALQ, 1987. p. 189-207.

PEREIRA, A. R.; MACHADO, E. C. Um simulador dinâmico do crescimento de uma cultura de cana-de-açúcar. **Bragantia**, v.45, n.1, p.107-122, 1986

PIACENTE, F. J.; PIACENTE, E. A. **Desenvolvimento sustentável da agroindústria canavieira: uma discussão sobre resíduos**. <<http://www.cori.rei.unicamp.br/IAU/completos/Desenvolvimento%20Sustentavel%20Agroindustria%20Canavieira%20uma%20discussao%20sobre%20os%20residuos.doc>>, 06/01/2008.

PICKERING, N. B., HANSEN, J. W., et al. WeatherMan: A utility for managing and generating daily weather data. **Agronomy Journal**, Madison, v. 86, p. 332-337, 1994

PRADO, H. Ambientes de produção de cana-de-açúcar na região central do Brasil. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 110, p. 12-17, jun. 2005.

PRADO, H.; VAN-LIER, Q. J.; LANDELL, M. G. A.; VASCONCELOS, A. C. M.; **Classes de disponibilidade de água para cana-de-açúcar nos principais solos da região centro-sul do Brasil**. <http://www.pedologiafacil.com.br/artig_4.php>, 21/01/2008.

PRADO, H.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A.; PERECIN, D. XAVIER, M. A. **Produtividade da cana-de-açúcar em Latossolos ácricos sob diferentes condições de disponibilidade hídrica**. <http://www.pedologiafacil.com.br/artig_5.php>, 21/01/2008.

PRECIS - **Providing Regional Climates for Impacts Studies**: The Hadley Centre regional climate modelling system. Met Office, Bracknell, UK [Exeter]: MetOffice, 2001. 20 p.

PRUITT, W. O. Cyclic relations between evapotranspiration and radiation *Transactions of the ASAE, St. Joseph*, v.7, n.3, p.271-275, 1964.

RAMOS, P. A indústria canavieira do Brasil: referencial historiográfico, temas e fontes. **América Latina En La História Econômica**, Cidade do México. v. 1, p.1, 1999.

REATTO, A.; BRUAND, A.; SILVA, E. M.; MARTINS, E. S.; BROSSARD, M. Hydraulic properties of the diagnostic horizon of Latosols of a regional toposequence across the Brazilian Central Plateau. **Geoderma**, v. 139, p. 51-59, 2007.

RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. C. **Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente**. Piracicaba: Barros e Marques Editoração Eletrônica, 1 ed. 2004. 302 p.

RIPOLI, T.C.C.; RIPOLI, M.L.C.; CASAGRANDI, D.V.; IDE, B.Y. **Plantio de cana-de-açúcar: Estado da Arte**. Piracicaba: Livrocere, 2ed., 2007. 198 p.

RITCHIE, J. T., J. R. KINIRY, C. A. JONES, and DYKE, P. T. 1986. Model inputs. pp. 37-48. In C. A. JONES and J. R. KINIRY (ed.) **CERES-Maize: A simulation model of maize growth and development**. Texas A&M Press, College Station, TX.

ROLIM, G. S.; SENTELHAS, P. C.; UNGARO, M. R. G. Análise de risco climático para a cultura do girassol, em algumas localidades de São Paulo e do Paraná, usando os modelos DSSAT/OILCROP-SUN e FAO. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n. 1, p. 91-102, 2001.

ROSENBERG, N. J.; BLAD, B. L.; VERMA, S. B. **Microclimate: the biological environment**. 2.ed. New York: John Wiley e Sons, 1983. 495p.

ROSENFELD, U. **Período crítico de deficiência hídrica para a cana planta em cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*)**. Piracicaba, 89 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 1989.

ROSSETTI, A. L. Zoneamento agrícola em aplicações de crédito e seguridade rural no Brasil: aspectos atuariais e de política agrícola. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.9, n.3, p.386-399, 2001.

RUDORFF, B. F. T.; BATISTA, G.T. **Relatório da fase I do projeto ESTIMA: desenvolvimento de um modelo para estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar baseado em dados Landsat e agrometeorológicos**. 93p. Relatório Técnico - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1988.

RUIZ, H. A.; FERREIRA, G. B.; PEREIRA, J. B. M. Estimativa da capacidade de campo de latossolos e neossolos quartzarênicos pela determinação do equivalente de umidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 389-393, 2003.

SACHS, R. C. C.; MARTINS V. A. Análise da cultura da cana-de-açúcar, por escritório de desenvolvimento rural, Estado de São Paulo, 1995-2006. **Informações Econômicas**, São Paulo, v. 37, n. 9, 2007.

SALASSIER, B. **Manejo da Irrigação na Cana-de-açúcar**. Disponível em: <www.agronegocio.goias.gov.br/docs/portal/seminarioIII.pdf>, Acesso 19 de fev. de 2008.

SAMANI, Z. Estimating solar radiation and evapotranspiration using minimum climatological data. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v.126, n.4, p.265-267, 2000.

SANO, E. E.; ROSA, R.; BRITO, J. L. S.; FERREIRA, L. G. Land cover mapping of the tropical savanna region in Brazil. Springer Science + Business Media B.V. **Environ Monit Assess** (2010) 166:113–124. 2009.

SANS, L. M. A. et al. Zoneamento de riscos climáticos para a cultura de milho na Região Centro-Oeste do Brasil e para o estado de Minas Gerais. In: **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n. 3, p. 527-535, 2001.

SANTOS, C. G.; SOUZA, J. L.; MOURA FILHO, G.; CARNAÚBA, P. J. P.; SANTOS, V. R. Análise pluviométrica durante o cultivo da cana-de-açúcar na região de Coruripe-AL. **Stab**, Piracicaba, v. 26, n. 2, p. 38-43, nov/dez. 2007.

SANTOS, M. J. Z. **Influências climáticas associadas às pedológicas e econômicas na produção de cana-de-açúcar nos núcleos canavieiros do Estado de São Paulo.** 411p. Tese (Doutorado em Geografia) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo. 1981.

SCARDUA, R. **O clima e a irrigação na produção agro-industrial da cana-de-açúcar.** 122p. Livre Docência (Livre Docência em Hidráulica Geral) - Departamento de Engenharia Rural, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 1985.

SEDIYAMA, G. C. Estimativa da evapotranspiração: histórico, evolução e análise crítica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 4, n. 1, p. 1-12, 1996.

SEGATO, S. V.; FERNADES, C.; PINTO, A.S. **Expansão e renovação de canavial.** Piracicaba: CP 2, 2007, 352p.

SEGATO, S. V.; MATTIUZ, C.F.M; MOZAMBANI, A.E. Aspectos fenológicos da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S. V.; PINTO, A.S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J.C.M. **Atualização em produção de cana-de-açúcar.** Piracicaba: CP 2, p.19-36, 2006.

SEGATO, S. V.; PINTO, A.S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J. C. M. **Atualização em produção de cana-de-açúcar.** Piracicaba: CP 2, 2006, 415p.

SENTELHAS, P. C., FARIA, R. T., CHAVES, M. O., HOOGENBOOM, G. Evaluation of the WGEN and SIMMETEO weather generators for the brazilian tropics and subtropics, using crop simulation models. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n. 2, p. 357-376, 2001.

SILVA, E. M. ; LIMA, J. E. F. W.; AZEVEDO, J. A.; RODRIGUES, L. N. Valores de tensão na determinação da curva de retenção de água de solos do Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 2, p. 323-330, 2006.

SILVA, E. M. da; AZEVEDO, J. A. de; RAUBER, J. C.; REATTO, A. **Caracterização físico-hídrica e hidráulica de solos do bioma Cerrado submetidos a diferentes sistemas de**

preparo. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2003. 22 p. (Embrapa Cerrados. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 101).

SILVA, F. A. M. **Parametrização e modelagem do balanço hídrico em sistema de plantio direto no Cerrado brasileiro.** 218p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas. 2004.

SILVA, F. C.; BERGAMASCO, A. F. Levantamento de modelos matemáticos descritos para a cultura da cana-de-açúcar. **Rev. biociênc.**, Taubaté, v.7, n.1, p.7-14, jan.-jun.2001.

SINCLAIR, T. R.; SELIGMAN, N. G. Crop modeling: From infancy to maturity. **Agronomy Journal**, v.88, n.5, 1996. p.698-703.

SINGELS, A. K.; BEZUIDENHOUT, C. N. A new method of simulation dry matter partitione in the Canegro sugarcane model. **Field Crops Research** 78: 151-164. 2002.

SINGELS, A. K.; BEZUIDENHOUT, C. N. IRRICANE: A simple computerized irrigation scheduling method for sugarcane. **Proceeding of the South African Sugar Technologists Associotion.** V.72, p.117-122. 1989.

SINGELS, A. K.; DONALDSON, R. A. A simple model for unstressed canopy development. **Proceeding of the South African Sugar Technologists Associotion.** V.74, p.151-154, 1998.

SINGELS, A. K.; DONALDSON, R. A.; SMIT, M. A. Improving biomass production end partitioning in sugarcane: theory and practice. **Field Crops Research** 92: 291-303. 2005.

SINGELS, A.; JONES, M. R. and VAN DEN BERG, M. **DSSAT V4.5 – Canegro Sugarcane Plant Module:** Scientific documentation, ICMS report. 2008.

SMA-USINA SÃO MARTINHO. **O mercado sucroalcooleiro: o setor sucroalcooleiro no Brasil.** Disponível em:
<http://www.mzweb.com.br/saomartinho/web/conteudo_pt.asp?idioma=0&tipo=12559&submenu=1&conta=28#1>, Acesso 05 de Nov. de 2007.

SOARES, R. A. B.; OLIVEIRA, P. F. M.; CARDOSO, H. R.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A.; ROSENFELD, U. Efeito da irrigação sobre o desenvolvimento e a produtividade de duas variedades de cana-de-açúcar colhidas em início de safra. **STAB – Açúcar Álcool e Subprodutos**, v.22, n.4, p.6-8, 2004.

STAUT, L. A. **Condições dos solos para o cultivo de cana-de-açúcar**. 2006. Disponível em: <http://www.infobibos.com/Artigos/2006_2/CanaSolo/index.htm>, Acesso 05 de jan. de 2008.

STEDUTO, P.; ALBRIZIO, R. Resource use efficiency of field-grown sunflower, sorghum, wheat and chickpea II. Water use efficiency and comparison with radiation use efficiency. **Agricultural and Forest Meteorology**, Davis, v.130, p. 269-281, 2005.

SUGUITANI, C. **Entendendo o crescimento e produção da cana-de-açúcar: Avaliação do modelo Mosaic**. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

SZMRECSÁNYI, T. **O planejamento da agroindústria canavieira do Brasil (1930 - 1975)** - Universidade Estadual de Campinas, HUCITEC, São Paulo. 1979.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719p.

TERAMOTO, E. R. **Avaliação e aplicação de modelos de estimativa de produção de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) baseado em parâmetros do solo e do clima**. 96p. Tese (Doutorado em Fitotecnia). Universidade de São Paulo - ESALQ, Piracicaba, 2003.

THOMPSON, G. D. Water use by sugarcane. **The South African Sugar Journal**, v. 60, n. 11, p.593-600, 1976.

THORNTHWAITE, C. W. An approach towards a rational classification of climate. **Geographical Review**, New York, v.38, p.55-94, 1948.

TOMASELLA, J., HODNETT, M. G., ROSSATO, L. Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in brazilian soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.1, n.2, p.327-338, 2000.

TSUNECHIRO, A.; COELHO, P.J.; CASER, D.V.; AMARAL, A.M.P.; FERREIRA BUENO, C.R.F.; GHOBRI, C.N.; PINATTI, E. Valor da produção agropecuária do Estado de São Paulo em 2006. **Informações Econômicas**, São Paulo, v. 37, n. 4, p. 52-63, abr. 2007.

UNICA. Posição da safra 04/05. **Informação UNICA**, São Paulo, ano 7, n. 62, p.4-5, nov/dez 2004.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS. **Sistema de simulação de crescimento e produtividade econômica da cana-de-açúcar**. 128p. Relatório Técnico Final Faculdade de Biologia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 1983.

VASCONCELOS, A. C. M.; PRADO, H.; LANDELL, M. G. A. **Desenvolvimento do Sistema Radicular da Cana-de-açúcar e características físico-hídricas e químicas dos ambientes de produção**. Projeto RHIZOCANA: relatório de pesquisa, 2004. 31p.

VILLEGAS, F. D.; DAZA, O. H.; JONES, J. W.; ROYCE, F. S. CASUPRO. An industry-driven sugarcane model. In: **ASAE ANNUAL INTERNATIONAL MEETING**, 2005, Tampa. Proceedings. Tampa, 2005. p. 22.

WALDHEIM, P. V.; CARVALHO, V. S. B.; CORREA, E.; FRANÇA, J.R.A. Zoneamento Climático da Cana-de-açúcar, da Laranja e do Algodão Herbáceo para a Região Nordeste do Brasil. In: **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**. Rio de Janeiro: UFRJ, vol. 29, n. 2, 2006, p. 28-41.

WOLF, J. M. Soil-water relations in Oxisols of Puerto Rico and Brazil. In: ORMEMISZA, E. e ALVARADO, A. (ed.) **Soil Management in Tropical America**. Raleigh, North Carolina State University. P. 145-154. 1975.

APÊNDICES

Tabela 7.1a. Estatísticas descritivas das produtividades de cana-de-açúcar estimadas para plantios nos meses de outubro e novembro num Latossolo Vermelho distrófico - LVd do Estado de Goiás e Distrito Federal.

Estação	Outubro									Novembro								
	Med	Mda	QIn	QSu	Max	Min	Var	DP	CV	Med	Mda	QIn	QSu	Max	Min	Var	DP	CV
Aragarças	151	152	148	156	161	134	49	7	5	134	134	130	139	148	121	49	7	5
Arinos	127	128	116	141	149	90	229	15	12	108	110	96	117	136	71	241	16	14
Brasília	123	124	117	128	142	92	102	10	8	120	122	112	130	147	84	202	14	12
Capinópolis	144	144	141	149	153	131	30	5	4	132	131	126	138	149	113	94	10	7
Catalão	135	137	131	140	148	122	42	6	5	127	128	120	134	148	106	102	10	8
Embrapa Hortaliças	137	137	133	141	150	123	46	7	5	130	126	123	137	155	112	106	10	8
Embrapa Cerrados	115	113	108	122	134	95	92	10	8	113	113	103	123	143	85	238	15	14
Embrapa A. Feijão	140	140	136	145	149	126	36	6	4	131	129	125	137	149	116	82	9	7
Formosa	133	135	130	139	143	103	65	8	6	123	121	116	125	141	107	73	9	7
Formoso	141	143	136	149	153	105	118	11	8	129	127	121	137	152	108	134	12	9
Goiânia	144	144	142	148	153	133	26	5	4	135	135	128	142	159	118	105	10	8
Aruanã	135	136	130	141	148	110	79	9	7	123	122	117	128	145	108	64	8	7
Bom J. de Goiás	135	138	132	140	145	108	68	8	6	129	129	123	136	153	103	126	11	9
Catalão	125	125	121	130	137	113	40	6	5	119	118	113	125	140	100	105	10	9
Cristalina	128	128	122	133	140	118	40	6	5	122	121	118	127	142	99	73	9	7
Caldas Novas	129	129	125	135	143	109	59	8	6	123	123	120	127	144	109	69	8	7
Caiapônia	138	137	135	140	143	132	10	3	2	131	131	124	136	148	115	61	8	6
Faina	132	133	124	138	145	117	68	8	6	122	126	113	132	145	100	145	12	10
Goiás	148	149	145	151	159	131	36	6	4	133	134	130	138	148	106	73	9	6
Luziânia	128	130	125	133	137	112	41	6	5	114	115	108	119	129	98	69	8	7
Morrinhos	129	130	125	133	145	114	56	8	6	123	124	116	128	147	103	112	11	9
Mineiros	131	130	127	134	146	118	33	6	4	120	119	114	126	146	100	93	10	8
Paraúna	135	137	130	141	145	123	46	7	5	129	130	121	138	148	105	122	11	9
Porangatu	144	144	141	147	153	128	33	6	4	133	133	127	137	145	120	38	6	5
Quirinópolis	128	128	123	132	147	112	72	8	7	124	123	114	130	160	103	158	13	10
Varjão	135	134	133	137	143	127	18	4	3	124	124	121	127	140	110	42	6	5
Goianésia	140	141	138	143	152	123	44	7	5	124	124	119	129	142	106	78	9	7
Ipameri	135	136	130	139	148	120	48	7	5	126	127	120	132	142	107	94	10	8
Itumbiara	133	135	130	142	152	99	164	13	10	118	119	113	126	133	80	129	11	10
Jataí	151	150	146	155	166	137	54	7	5	141	140	133	146	168	123	126	11	8
Nova Xavantina	146	145	144	150	155	131	33	6	4	131	131	127	135	146	114	60	8	6
Paracatu	130	133	120	139	151	109	141	12	9	120	120	115	129	143	97	116	11	9
Paranaíba	137	136	133	139	151	123	55	7	5	124	126	115	132	151	99	165	13	10
Peixe	154	155	153	157	160	142	21	5	3	138	139	135	143	148	123	32	6	4
Pirenópolis	144	145	144	148	153	109	86	9	6	131	131	127	137	144	110	60	8	6
Posse	127	130	125	133	136	107	71	8	7	116	115	112	122	139	91	116	11	9
Rio Verde	144	143	141	148	166	134	52	7	5	135	136	129	141	150	116	84	9	7
Taguatinga	147	149	145	151	155	134	30	5	4	132	132	130	135	142	124	17	4	3
Unai	144	147	142	151	157	90	175	13	9	126	126	119	132	146	107	83	9	7
Média	136	137	132	141	149	118	64	8	6	126	126	120	132	146	106	101	10	8
Máximo	154	155	153	157	166	142	229	15	12	141	140	135	146	168	124	241	16	14
Mínimo	115	113	108	122	134	90	10	3	2	108	110	96	117	129	71	17	4	3

Med, média; Mda, mediana; QIn, quartil inferior; QSu, quartil superior; Max, máximo; Min, mínimo; Var, variância; DP, desvio padrão; CV, coeficiente de variação.

Tabela 7.1b. Estatísticas descritivas das produtividades de cana-de-açúcar estimadas para plantios nos meses de dezembro e janeiro num Latossolo Vermelho distrófico - LVd do Estado de Goiás e Distrito Federal.

Estação	Dezembro									Janeiro								
	Med	Mda	QIn	QSu	Max	Min	Var	DP	CV	Med	Mda	QIn	QSu	Max	Min	Var	DP	CV
Aragarças	132	135	124	142	156	106	193	14	11	129	128	123	135	161	112	145	12	9
Arinos	102	99	96	105	132	84	148	12	12	108	108	102	113	131	82	154	12	12
Brasília	127	126	119	136	157	97	195	14	11	125	124	114	133	156	95	165	13	10
Capinópolis	133	131	127	138	156	112	110	10	8	133	134	125	139	162	105	148	12	9
Catalão	129	126	121	136	156	109	159	13	10	130	126	121	137	155	105	218	15	11
Embrapa Hortaliças	130	130	121	142	155	103	187	14	10	126	127	116	137	153	104	184	14	11
Embrapa Cerrados	124	124	117	130	151	99	134	12	9	121	118	113	128	150	91	187	14	11
Embrapa A. Feijão	121	122	112	129	140	88	143	12	10	122	121	116	126	147	94	100	10	8
Formosa	124	125	119	131	147	97	130	11	9	120	120	111	129	144	103	118	11	9
Formoso	123	123	114	129	151	103	136	12	10	125	125	117	132	158	102	159	13	10
Goiânia	135	136	124	145	161	102	211	15	11	138	134	129	148	165	113	179	13	10
Aruanã	122	122	111	134	151	93	195	14	11	124	126	119	132	146	100	127	11	9
Bom J. de Goiás	127	129	119	136	153	101	173	13	10	133	132	128	137	156	109	116	11	8
Catalão	122	122	113	127	163	93	206	14	12	117	120	104	125	141	98	160	13	11
Cristalina	122	122	111	131	152	95	202	14	12	127	126	117	136	151	103	159	13	10
Caldas Novas	114	111	102	124	147	88	214	15	13	118	119	110	125	151	91	157	13	11
Caiapônia	133	132	122	143	162	113	173	13	10	134	135	127	140	167	93	178	13	10
Faina	104	103	95	112	130	81	140	12	11	103	104	95	110	124	77	168	13	13
Goiás	138	137	131	146	153	120	95	10	7	133	133	130	138	148	112	91	10	7
Luziânia	109	108	99	119	140	86	163	13	12	108	110	101	116	130	87	123	11	10
Morrinhos	118	118	108	130	139	87	206	14	12	119	119	108	131	144	92	190	14	12
Mineiros	112	113	104	118	141	84	160	13	11	116	114	108	123	140	93	136	12	10
Paraúna	133	131	126	146	167	103	257	16	12	126	126	116	137	148	94	174	13	10
Porangatu	131	133	123	138	146	107	95	10	7	131	132	126	136	155	111	93	10	7
Quirinópolis	105	107	96	114	135	79	150	12	12	107	110	96	115	138	82	184	14	13
Varjão	112	112	103	121	142	91	148	12	11	115	113	106	119	147	92	136	12	10
Goianésia	121	123	109	129	145	96	166	13	11	129	130	124	136	149	101	105	10	8
Ipameri	124	126	112	134	153	101	171	13	11	126	128	118	138	150	95	227	15	12
Itumbiara	103	105	93	113	129	75	221	15	14	108	109	100	113	123	86	89	9	9
Jataí	134	131	125	143	166	98	231	15	11	141	139	129	148	187	112	305	17	12
Nova Xavantina	127	126	119	137	148	107	128	11	9	126	124	119	132	146	98	118	11	9
Paracatu	118	119	111	124	140	99	109	10	9	121	122	116	127	142	94	151	12	10
Paranaíba	114	114	105	124	136	84	197	14	12	122	121	114	128	153	98	181	13	11
Peixe	132	132	127	141	151	106	95	10	7	131	132	126	134	147	107	74	9	7
Pirenópolis	117	115	111	121	135	95	97	10	8	115	117	110	121	143	95	120	11	10
Posse	116	117	108	126	142	86	162	13	11	115	115	105	123	139	93	126	11	10
Rio Verde	140	139	132	151	167	113	197	14	10	140	141	131	150	164	110	198	14	10
Taguatinga	129	128	121	134	153	109	107	10	8	127	127	120	137	145	92	147	12	10
Unai	121	120	113	126	146	110	78	9	7	121	121	113	129	140	102	101	10	8
Média	122	122	114	131	149	97	161	13	10	123	123	115	131	149	98	151	12	10
Máximo	140	139	132	151	167	120	257	16	14	141	141	131	150	187	113	305	17	13
Mínimo	102	99	93	105	129	75	78	9	7	103	104	95	110	123	77	74	9	7

Med, média; Mda, mediana; QIn, quartil inferior; QSu, quartil superior; Max, máximo; Min, mínimo; Var, variância; DP, desvio padrão; CV, coeficiente de variação.

Tabela 7.2a. Estatísticas descritivas das produtividades de cana-de-açúcar estimadas para plantios nos meses de outubro e novembro num Neossolo Quartzarênico do Estado de Goiás e Distrito Federal.

Estação	Outubro									Novembro								
	Med	Mda	QIn	QSu	Max	Min	Var	DP	CV	Med	Mda	QIn	QSu	Max	Min	Var	DP	CV
Aragarças	143	145	139	149	157	124	81	9	6	126	125	118	131	153	108	105	10	8
Arinos	116	114	102	132	136	77	300	17	15	96	100	81	109	129	54	340	18	19
Brasília	112	116	108	118	130	71	151	12	11	107	110	99	117	133	64	212	15	14
Capinópolis	137	138	134	143	148	115	60	8	6	122	121	118	130	142	101	103	10	8
Catalão	127	130	123	131	140	110	46	7	5	115	115	109	123	136	94	106	10	9
Embrapa Hortaliças	127	129	124	132	140	106	54	7	6	117	116	110	122	140	96	111	11	9
Embrapa Cerrados	102	104	92	111	124	71	175	13	13	100	101	90	112	132	66	301	17	17
Embrapa A. Feijão	133	132	130	137	141	124	26	5	4	119	119	113	125	135	102	84	9	8
Formosa	124	125	120	129	133	88	80	9	7	110	110	103	114	129	94	89	9	9
Formoso	131	136	125	142	145	82	208	14	11	118	121	112	126	140	87	143	12	10
Goiânia	137	137	133	142	147	127	34	6	4	125	124	116	133	146	106	109	10	8
Aruanã	126	128	123	133	137	97	98	10	8	110	109	105	116	134	93	87	9	8
Bom J. de Goiás	126	129	124	132	139	91	89	9	7	118	118	113	126	141	84	149	12	10
Catalão	115	117	111	120	127	99	59	8	7	107	106	100	114	133	86	152	12	12
Cristalina	118	118	111	124	129	105	52	7	6	109	109	104	112	126	82	74	9	8
Caldas Novas	120	120	116	126	133	92	89	9	8	110	111	106	118	127	94	78	9	8
Caiapônia	128	128	126	130	134	122	10	3	2	118	117	113	122	136	101	66	8	7
Faina	124	127	113	132	139	102	110	10	8	111	115	98	122	133	80	224	15	13
Goiás	140	143	135	144	155	118	63	8	6	124	125	119	131	141	87	108	10	8
Luziânia	118	120	115	123	128	100	52	7	6	101	102	95	107	114	82	79	9	9
Morrinhos	119	119	114	125	135	98	76	9	7	109	110	102	115	133	85	135	12	11
Mineiros	122	122	118	126	140	107	47	7	6	107	105	101	112	134	85	105	10	10
Paraúna	127	128	122	132	138	112	46	7	5	117	118	108	126	133	88	152	12	11
Porangatu	134	135	132	138	145	117	47	7	5	120	119	114	125	133	109	44	7	6
Quirinópolis	118	118	112	123	139	95	109	10	9	110	108	98	121	149	86	230	15	14
Varjão	126	125	123	128	135	116	22	5	4	112	112	107	118	130	99	52	7	6
Goianésia	132	132	129	137	146	112	64	8	6	114	111	107	121	141	91	130	11	10
Ipameri	125	125	119	131	140	107	84	9	7	113	113	109	122	134	92	110	10	9
Itumbiara	125	128	119	135	146	91	223	15	12	106	109	100	117	127	66	193	14	13
Jataí	143	142	138	148	156	128	51	7	5	129	128	121	134	157	108	151	12	10
Nova Xavantina	139	140	135	143	147	125	37	6	4	121	122	116	127	136	104	71	8	7
Paracatu	120	123	114	130	142	89	191	14	11	111	112	106	120	131	76	163	13	12
Paranaíba	129	128	124	132	149	112	103	10	8	114	119	102	125	145	83	265	16	14
Peixe	147	149	144	151	154	130	35	6	4	130	130	124	136	140	111	49	7	5
Pirenópolis	135	138	135	140	145	96	104	10	8	119	120	116	124	131	99	62	8	7
Posse	119	123	111	126	131	96	104	10	9	106	105	103	114	139	75	186	14	13
Rio Verde	137	137	133	141	159	126	50	7	5	125	125	118	132	146	101	117	11	9
Taguatinga	138	139	132	144	149	114	70	8	6	124	123	120	128	134	113	29	5	4
Unai	137	140	136	145	156	63	273	17	12	115	116	107	121	136	93	91	10	8
Média	128	129	123	133	141	104	92	9	7	114	115	108	122	136	90	130	11	10
Máximo	147	149	144	151	159	130	300	17	15	130	130	124	136	157	113	340	18	19
Mínimo	102	104	92	111	124	63	10	3	2	96	100	81	107	114	54	29	5	4

Med, média; Mda, mediana; QIn, quartil inferior; QSu, quartil superior; Max, máximo; Min, mínimo; Var, variância; DP, desvio padrão; CV, coeficiente de variação.

Tabela 7.2b. Estatísticas descritivas das produtividades de cana-de-açúcar estimadas para plantios nos meses de dezembro e janeiro num Neossolo Quartzarênico do Estado de Goiás e Distrito Federal.

Estação	Dezembro									Janeiro								
	Med	Mda	QIn	QSu	Max	Min	Var	DP	CV	Med	Mda	QIn	QSu	Max	Min	Var	DP	CV
Aragarças	122	126	109	132	152	92	279	17	14	119	115	107	124	153	100	217	15	12
Arinos	88	88	79	94	120	64	175	13	15	94	93	85	103	126	63	232	15	16
Brasília	112	111	103	123	139	83	170	13	12	109	108	101	119	142	76	187	14	13
Capinópolis	120	118	114	127	145	94	135	12	10	120	121	110	128	146	89	171	13	11
Catalão	115	111	107	125	142	93	176	13	12	116	115	108	127	142	89	232	15	13
Embrapa Hortaliças	117	115	110	131	139	87	213	15	12	113	112	101	124	138	84	232	15	14
Embrapa Cerrados	109	107	101	117	140	86	155	12	11	105	105	95	113	133	76	234	15	15
Embrapa A. Feijão	108	108	97	118	130	69	192	14	13	108	108	101	114	133	78	114	11	10
Formosa	110	112	106	118	139	80	162	13	12	107	108	97	117	130	84	152	12	12
Formoso	109	107	101	119	138	90	155	12	11	111	112	102	117	143	86	178	13	12
Goiânia	123	125	111	133	151	86	269	16	13	126	122	116	137	155	97	200	14	11
Aruanã	107	109	96	119	135	74	230	15	14	110	109	99	119	136	84	194	14	13
Bom J. de Goiás	116	118	107	124	147	81	226	15	13	121	120	112	127	143	93	156	12	10
Catalão	109	108	99	115	155	74	291	17	16	105	107	91	113	143	82	228	15	14
Cristalina	107	109	96	118	135	78	239	15	14	112	111	102	120	132	84	156	12	11
Caldas Novas	99	96	88	110	133	66	233	15	15	103	103	96	111	139	70	178	13	13
Caiapônia	119	118	111	126	150	95	183	14	11	120	121	113	127	149	76	176	13	11
Faina	91	92	82	99	126	60	207	14	16	89	93	79	102	114	56	242	16	17
Goiás	127	127	120	137	145	100	132	11	9	123	123	117	132	139	101	114	11	9
Luziânia	93	93	83	102	129	68	201	14	15	93	95	86	102	121	71	152	12	13
Morrinhos	104	106	94	119	128	67	294	17	17	106	106	93	119	135	76	246	16	15
Mineiros	97	96	84	105	136	67	246	16	16	100	98	91	107	128	74	196	14	14
Paraúna	120	119	111	131	152	90	276	17	14	113	112	105	124	137	76	202	14	13
Porangatu	117	119	108	126	135	90	133	12	10	117	116	110	124	142	93	135	12	10
Quirinópolis	90	92	79	101	129	59	262	16	18	93	95	81	102	128	63	264	16	18
Varjão	98	98	89	106	139	70	234	15	16	101	99	92	110	139	74	193	14	14
Goianésia	109	111	99	118	143	82	233	15	14	118	118	110	126	143	91	132	11	10
Ipameri	111	113	99	121	141	85	223	15	13	113	115	103	124	137	75	289	17	15
Itumbiara	88	91	75	99	121	54	286	17	19	94	94	84	103	115	70	156	12	13
Jataí	121	119	109	133	157	81	288	17	14	129	129	115	136	178	95	343	19	14
Nova Xavantina	114	115	105	123	133	91	152	12	11	114	114	106	122	134	77	153	12	11
Paracatu	104	103	97	113	128	81	139	12	11	108	110	100	115	133	76	181	13	12
Paranaíba	101	102	88	114	129	68	258	16	16	112	107	102	120	144	85	238	15	14
Peixe	121	121	114	130	139	91	111	11	9	120	121	116	124	139	97	85	9	8
Pirenópolis	102	103	97	108	126	79	111	11	10	100	103	94	107	128	77	147	12	12
Posse	104	103	94	114	142	71	243	16	15	103	103	93	111	142	76	208	14	14
Rio Verde	129	126	121	142	157	99	237	15	12	128	130	118	140	157	92	258	16	13
Taguatinga	116	114	109	120	143	97	119	11	9	115	114	106	127	141	76	182	13	12
Unai	106	103	97	111	137	95	97	10	9	107	107	101	115	130	86	113	11	10
Média	109	109	100	118	139	80	204	14	13	110	110	101	119	138	81	191	14	13
Máximo	129	127	121	142	157	100	294	17	19	129	130	118	140	178	101	343	19	18
Mínimo	88	88	75	94	120	54	97	10	9	89	93	79	102	114	56	85	9	8

Med, média; Mda, mediana; QIn, quartil inferior; QSu, quartil superior; Max, máximo; Min, mínimo; Var, variância; DP, desvio padrão; CV, coeficiente de variação.

Tabela 7.3a. Estatísticas descritivas das produtividades de cana-de-açúcar estimadas para plantios nos meses de outubro e novembro num Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico do Estado de Goiás e Distrito Federal.

Estação	Outubro									Novembro								
	Med	Mda	QIn	QSu	Max	Min	Var	DP	CV	Med	Mda	QIn	QSu	Max	Min	Var	DP	CV
Aragarças	87	88	77	97	107	61	147	12	14	71	70	66	76	84	51	62	8	11
Arinos	61	58	54	69	82	43	109	10	17	49	49	44	57	65	29	86	9	19
Brasília	65	65	62	71	80	35	82	9	14	64	64	56	72	90	34	166	13	20
Capinópolis	88	88	83	95	107	68	109	10	12	74	75	68	80	97	52	99	10	13
Catalão	82	82	78	87	95	63	77	9	11	71	70	66	78	91	48	102	10	14
Embrapa Hortaliças	78	79	71	85	93	56	87	9	12	68	66	61	73	90	51	84	9	14
Embrapa Cerrados	55	54	51	59	71	38	62	8	14	57	58	49	65	81	35	158	13	22
Embrapa A. Feijão	82	81	76	90	99	67	78	9	11	74	75	67	78	94	55	80	9	12
Formosa	76	77	71	83	99	47	114	11	14	66	67	62	72	82	50	59	8	12
Formoso	76	74	66	87	100	40	178	13	18	68	68	60	74	91	49	110	10	15
Goiânia	78	76	74	84	96	57	75	9	11	73	71	67	80	89	61	75	9	12
Aruanã	74	72	63	84	100	53	148	12	16	62	62	56	65	92	46	86	9	15
Bom J. de Goiás	74	73	70	82	95	49	106	10	14	67	67	60	71	88	48	90	9	14
Catalão	72	71	65	78	89	53	89	9	13	60	60	54	66	78	41	90	10	16
Cristalina	84	83	79	91	103	64	91	10	11	64	63	60	70	82	41	66	8	13
Caldas Novas	75	74	69	83	99	55	115	11	14	65	66	59	71	83	49	64	8	12
Caiapônia	91	91	87	98	103	78	53	7	8	75	75	72	79	89	62	41	6	9
Faina	61	63	58	66	70	46	43	7	11	59	60	53	64	73	42	66	8	14
Goiás	81	81	72	88	99	65	91	10	12	76	76	69	82	91	49	91	10	13
Luziânia	77	79	74	84	93	58	95	10	13	60	59	55	66	78	42	90	9	16
Morrinhos	79	81	72	85	97	58	80	9	11	60	62	54	67	81	45	95	10	16
Mineiros	78	79	73	83	95	65	62	8	10	66	66	62	72	88	45	95	10	15
Paraúna	77	76	72	83	91	56	72	8	11	67	65	59	74	89	48	108	10	16
Porangatu	93	97	84	102	111	67	155	12	13	76	77	71	80	88	60	57	8	10
Quirinópolis	67	67	61	73	83	51	77	9	13	61	61	54	66	82	42	93	10	16
Varjão	85	84	77	92	103	70	85	9	11	69	70	65	76	84	51	81	9	13
Goianésia	79	79	76	84	100	60	96	10	12	63	62	55	69	79	49	78	9	14
Ipameri	80	79	71	89	99	62	101	10	13	67	67	63	72	81	48	78	9	13
Itumbiara	69	70	65	76	90	42	134	12	17	56	57	52	63	73	35	82	9	16
Jataí	94	96	87	102	113	74	100	10	11	78	77	71	84	92	62	62	8	10
Nova Xavantina	92	91	85	98	114	69	120	11	12	75	72	68	82	98	59	103	10	13
Paracatu	64	66	57	72	81	45	83	9	14	63	63	56	67	86	45	87	9	15
Paranaíba	73	70	67	80	91	59	65	8	11	63	66	55	72	81	44	118	11	17
Peixe	91	89	87	96	108	70	76	9	10	80	81	75	84	91	64	50	7	9
Pirenópolis	84	84	82	90	99	55	97	10	12	72	73	66	78	88	50	72	9	12
Posse	69	72	62	75	85	53	72	8	12	59	59	53	64	79	36	102	10	17
Rio Verde	92	91	88	95	112	78	58	8	8	76	76	70	82	94	53	99	10	13
Taguatinga	84	86	76	90	112	58	170	13	15	75	72	66	82	90	57	95	10	13
Unai	78	82	72	86	102	35	168	13	17	62	61	54	70	83	44	97	10	16
Média	78	78	72	85	97	57	98	10	13	67	67	61	73	86	48	88	9	14
Máximo	94	97	88	102	114	78	178	13	18	80	81	75	84	98	64	166	13	22
Mínimo	55	54	51	59	70	35	43	7	8	49	49	44	57	65	29	41	6	9

Med, média; Mda, mediana; QIn, quartil inferior; QSu, quartil superior; Max, máximo; Min, mínimo; Var, variância; DP, desvio padrão; CV, coeficiente de variação.

Tabela 7.3b. Estatísticas descritivas das produtividades de cana-de-açúcar estimadas para plantios nos meses de dezembro e janeiro num Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico do Estado de Goiás e Distrito Federal.

Estação	Dezembro									Janeiro								
	Med	Mda	QIn	QSu	Max	Min	Var	DP	CV	Med	Mda	QIn	QSu	Max	Min	Var	DP	CV
Aragarças	69	70	62	76	87	48	110	10	15	68	69	60	75	83	53	79	9	13
Arinos	43	43	39	46	61	27	53	7	17	46	45	41	52	62	27	81	9	19
Brasília	59	59	50	63	82	40	124	11	19	58	59	51	64	76	36	74	9	15
Capinópolis	63	61	57	67	83	41	92	10	15	63	63	57	69	89	47	101	10	16
Catalão	63	62	57	69	82	48	79	9	14	65	63	56	73	88	45	144	12	18
Embrapa Hortaliças	61	61	53	66	83	44	104	10	17	59	58	51	66	82	40	117	11	18
Embrapa Cerrados	54	53	47	58	79	41	87	9	17	53	53	47	56	75	38	84	9	17
Embrapa A. Feijão	60	60	55	66	74	31	83	9	15	59	58	54	63	78	40	62	8	13
Formosa	61	60	55	65	82	40	96	10	16	58	60	51	65	71	42	76	9	15
Formoso	63	62	56	68	96	48	105	10	16	64	65	56	72	87	44	115	11	17
Goiânia	68	68	60	76	86	43	125	11	16	68	70	61	74	91	47	109	10	15
Aruanã	52	53	47	57	70	33	75	9	17	54	52	49	59	79	38	65	8	15
Bom J. de Goiás	62	60	55	68	83	42	98	10	16	65	64	60	70	83	46	59	8	12
Catalão	55	54	48	59	81	35	136	12	21	54	52	47	62	80	37	98	10	18
Cristalina	55	56	45	62	75	38	104	10	19	59	60	52	64	81	37	100	10	17
Caldas Novas	52	49	45	59	71	33	101	10	19	55	55	48	60	79	30	105	10	19
Caiapônia	66	66	59	73	86	48	101	10	15	64	64	59	70	87	36	98	10	15
Faina	47	47	41	51	61	32	59	8	17	47	49	39	54	65	28	86	9	20
Goiás	73	74	69	78	88	55	58	8	10	70	71	65	76	83	49	67	8	12
Luziânia	48	47	40	55	67	32	87	9	19	49	50	43	55	63	37	61	8	16
Morrinhos	50	51	42	57	67	31	95	10	20	52	52	47	57	65	35	60	8	15
Mineiros	50	51	46	55	66	31	74	9	17	50	49	43	55	70	38	78	9	18
Paraúna	65	67	58	71	88	44	135	12	18	61	62	56	68	77	39	99	10	16
Porangatu	62	62	57	68	77	46	63	8	13	64	64	60	68	81	47	60	8	12
Quirinópolis	46	46	40	53	67	29	83	9	20	46	45	43	50	68	32	79	9	19
Varjão	53	53	46	61	79	36	95	10	18	54	53	48	58	79	37	74	9	16
Goianésia	59	59	53	63	79	43	83	9	16	64	64	58	70	82	51	70	8	13
Ipameri	57	58	50	62	73	40	79	9	16	59	58	50	68	82	36	169	13	22
Itumbiara	45	46	36	52	62	24	108	10	23	47	48	41	53	60	31	61	8	17
Jataí	66	65	59	70	92	40	111	11	16	71	70	64	80	106	44	162	13	18
Nova Xavantina	65	64	57	71	92	48	102	10	16	63	63	58	70	83	37	81	9	14
Paracatu	56	57	52	62	71	37	57	8	13	59	59	53	64	77	39	84	9	16
Paranaíba	54	53	46	63	72	32	108	10	19	60	57	54	68	77	42	81	9	15
Peixe	69	68	63	75	83	52	60	8	11	71	72	68	75	84	54	56	7	11
Pirenópolis	58	58	53	63	78	40	66	8	14	57	59	51	62	73	36	92	10	17
Posse	52	53	46	57	74	36	73	9	16	53	53	47	57	74	36	67	8	16
Rio Verde	72	72	63	81	92	53	118	11	15	72	70	68	80	86	47	86	9	13
Taguatinga	70	70	64	75	91	53	65	8	11	69	69	62	74	90	41	106	10	15
Unai	56	55	51	59	78	44	49	7	13	57	57	52	63	72	41	72	9	15
Média	58	58	52	64	78	40	90	9	16	59	59	53	65	79	40	88	9	16
Máximo	73	74	69	81	96	55	136	12	23	72	72	68	80	106	54	169	13	22
Mínimo	43	43	36	46	61	24	49	7	10	46	45	39	50	60	27	56	7	11

Med, média; Mda, mediana; QIn, quartil inferior; QSu, quartil superior; Max, máximo; Min, mínimo; Var, variância; DP, desvio padrão; CV, coeficiente de variação.

Tabela 7.4.1. Produtividade média (t/ha) de cana-de-açúcar estimada pelo modelo DSSAT/CANEGRO para um Latossolo Vermelho - LVd.

Estação	Lat	Long	Outubro			Novembro			Dezembro			Janeiro		
			Atual	A2	B2	Atual	A2	B2	Atual	A2	B2	Atual	A2	B2
Aragarças	-52.23	-15.90	151	155	155	134	139	138	132	134	133	129	131	131
Arinos	-46.05	-15.90	127	129	128	108	110	110	102	103	103	108	108	108
Brasília	-47.93	-15.78	123	125	125	120	124	124	127	131	131	125	129	128
Capinópolis	-49.55	-18.72	144	149	149	132	134	134	133	133	133	133	133	133
Catalão	-47.95	-18.18	135	138	138	127	129	129	129	130	130	130	131	131
Embrapa Hortaliças	-48.13	-15.93	137	140	139	130	132	132	130	133	133	126	129	129
Embrapa Cerrados	-47.71	-15.59	115	118	118	113	115	115	124	127	127	121	124	124
Embrapa A. Feijão	-49.28	-16.47	140	143	143	131	133	133	121	123	123	122	124	123
Formosa	-47.33	-15.53	133	136	136	123	126	125	124	127	127	120	123	122
Formoso	-46.25	-14.93	141	145	144	129	132	131	123	125	124	125	127	127
Goiânia	-49.25	-16.67	144	149	149	135	137	137	135	136	136	138	138	138
Aruanã	-51.00	-14.90	135	137	137	123	124	124	122	124	124	124	125	126
Bom J. de Goiás	-50.18	-18.07	135	138	137	129	131	131	127	129	129	133	135	135
Catalão	-47.07	-18.12	125	129	129	119	124	124	122	126	126	117	122	122
Cristalina	-47.27	-17.12	128	133	133	122	127	127	122	127	127	127	131	131
Caldas Novas	-48.61	-17.71	129	132	132	123	126	126	114	118	118	118	121	121
Caiaopônia	-51.82	-16.97	138	141	141	131	135	134	133	138	137	134	138	138
Faina	-50.37	-15.43	132	132	132	122	124	124	104	105	105	103	104	104
Goiás	-50.13	-15.92	148	151	151	133	137	137	138	139	138	133	135	134
Luziânia	-47.98	-16.27	128	135	134	114	121	119	109	115	114	108	115	114
Morrinhos	-49.11	-17.70	129	133	133	123	127	126	118	122	121	119	123	123
Mineiros	-52.60	-17.57	131	134	134	120	125	124	112	116	116	116	120	119
Paraúna	-50.49	-17.51	135	137	137	129	132	131	133	135	134	126	128	128
Porangatu	-49.13	-13.43	144	148	146	133	134	134	131	131	131	131	132	131
Quirinópolis	-50.40	-18.60	128	131	130	124	126	125	105	107	107	107	109	109
Varjão	-49.67	-17.09	135	139	138	124	129	128	112	119	118	115	121	120
Goianésia	-49.00	-15.22	140	145	145	124	128	128	121	123	123	129	130	130
Ipameri	-48.17	-17.72	135	138	138	126	128	128	124	125	125	126	128	128
Itumbiara	-49.22	-18.42	133	137	137	118	122	121	103	104	104	108	108	108
Jataí	-51.72	-17.88	151	154	153	141	142	142	134	136	136	141	142	142
Nova Xavantina	-52.35	-14.70	146	148	148	131	135	134	127	129	129	126	127	127
Paracatu	-46.88	-17.23	130	134	133	120	121	121	118	119	119	121	122	122
Paranaíba	-51.18	-19.75	137	140	139	124	126	126	114	114	114	122	122	122
Peixe	-48.35	-12.02	154	158	158	138	143	142	132	133	133	131	133	132
Pirenópolis	-48.97	-15.85	144	147	147	131	133	133	117	119	119	115	118	118
Posse	-46.37	-14.10	127	132	132	116	120	119	116	118	118	115	116	116
Rio Verde	-50.92	-17.80	144	148	147	135	137	137	140	142	142	140	141	141
Taguatinga	-46.42	-12.40	147	152	152	132	138	137	129	132	132	127	129	129
Unai	-46.80	-16.36	144	146	146	126	128	127	121	121	122	121	121	121
Média			136	139	139	126	129	128	122	125	124	123	125	125
Máxima			154	158	158	141	143	142	140	142	142	141	142	142
Mínima			115	118	118	108	110	110	102	103	103	103	104	104
Diferença (Kg/ha)			39	40	40	33	33	32	38	38	39	39	38	38
Diferença (%)			25	25	25	23	23	23	27	27	27	27	27	27

Tabela 7.4.2. Produtividade média (t/ha) de cana-de-açúcar estimada pelo modelo DSSAT/CANEGRO para um Neossolo Quartzarênico - NQ.

Estação	Lat	Long	Outubro			Novembro			Dezembro			Janeiro		
			Atual	A2	B2	Atual	A2	B2	Atual	A2	B2	Atual	A2	B2
Aragarças	-52.23	-15.90	143	148	148	126	129	129	122	124	123	119	121	121
Arinos	-46.05	-15.90	116	119	118	96	97	97	88	90	90	94	95	95
Brasília	-47.93	-15.78	112	115	115	107	111	112	112	118	118	109	115	114
Capinópolis	-49.55	-18.72	137	143	142	122	125	125	120	121	121	120	121	121
Catalão	-47.95	-18.18	127	132	132	115	118	118	115	117	117	116	118	118
Embrapa Hortaliças	-48.13	-15.93	127	132	131	117	121	121	117	121	120	113	116	116
Embrapa Cerrados	-47.71	-15.59	102	106	105	100	103	103	109	113	113	105	110	109
Embrapa A. Feijão	-49.28	-16.47	133	138	137	119	123	123	108	110	110	108	111	111
Formosa	-47.33	-15.53	124	127	127	110	114	113	110	113	113	107	109	109
Formoso	-46.25	-14.93	131	136	136	118	122	122	109	112	112	111	114	114
Goiânia	-49.25	-16.67	137	142	142	125	128	128	123	125	125	126	128	128
Aruanã	-51.00	-14.90	126	127	127	110	113	112	107	109	109	110	112	112
Bom J. de Goiás	-50.18	-18.07	126	130	130	118	121	121	116	118	118	121	123	123
Catalão	-47.07	-18.12	115	120	120	107	112	111	109	113	113	105	108	108
Cristalina	-47.27	-17.12	118	123	123	109	114	114	107	112	112	112	118	118
Caldas Novas	-48.61	-17.71	120	124	124	110	114	114	99	104	104	103	108	108
Caiapônia	-51.82	-16.97	128	133	132	118	123	122	119	124	123	120	126	125
Faina	-50.37	-15.43	124	124	124	111	114	114	91	92	92	89	91	91
Goiás	-50.13	-15.92	140	144	143	124	128	128	127	130	129	123	125	125
Luziânia	-47.98	-16.27	118	125	124	101	108	106	93	99	98	93	100	99
Morrinhos	-49.11	-17.70	119	124	123	109	114	113	104	108	108	106	111	110
Mineiros	-52.60	-17.57	122	126	126	107	113	112	97	102	101	100	105	104
Paraúna	-50.49	-17.51	127	130	129	117	120	120	120	123	122	113	116	116
Porangatu	-49.13	-13.43	134	141	139	120	124	123	117	119	119	117	119	119
Quirinópolis	-50.40	-18.60	118	122	121	110	113	113	90	92	92	93	95	95
Varjão	-49.67	-17.09	126	131	130	112	117	116	98	104	103	101	107	106
Goianésia	-49.00	-15.22	132	137	137	114	119	119	109	112	112	118	120	120
Ipameri	-48.17	-17.72	125	129	129	113	116	116	111	113	113	113	115	115
Itumbiara	-49.22	-18.42	125	129	129	106	111	110	88	90	90	94	96	96
Jataí	-51.72	-17.88	143	147	146	129	132	131	121	123	123	129	131	130
Nova Xavantina	-52.35	-14.70	139	141	140	121	125	124	114	116	116	114	116	115
Paracatu	-46.88	-17.23	120	124	124	111	112	112	104	106	106	108	110	109
Paranaíba	-51.18	-19.75	129	133	132	114	116	116	101	102	102	112	113	112
Peixe	-48.35	-12.02	147	152	151	130	135	134	121	124	123	120	123	123
Pirenópolis	-48.97	-15.85	135	139	139	119	123	123	102	106	106	100	104	104
Posse	-46.37	-14.10	119	123	123	106	111	110	104	106	106	103	105	104
Rio Verde	-50.92	-17.80	137	142	141	125	128	128	129	131	131	128	131	131
Taguatinga	-46.42	-12.40	138	144	143	124	130	129	116	121	121	115	119	119
Unai	-46.80	-16.36	137	140	139	115	118	117	106	108	108	107	108	108
Média			127	131	131	114	118	118	109	112	112	110	113	113
Máxima			147	152	151	130	135	134	129	131	131	129	131	131
Mínima			102	106	105	96	97	97	88	90	90	89	91	91
Diferença (Kg/ha)			45	46	46	34	37	36	41	41	41	39	40	40
Diferença (%)			30	30	30	26	28	27	32	31	31	31	31	30

Tabela 7.4. Produtividade média (t/ha) de cana-de-açúcar estimada pelo modelo DSSAT/CANEGRO para um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico - LVAd.

Estação	Lat	Long	Outubro			Novembro			Dezembro			Janeiro		
			Atual	A2	B2	Atual	A2	B2	Atual	A2	B2	Atual	A2	B2
Aragarças	-52.23	-15.90	87	87	87	71	71	71	69	70	69	68	70	70
Arinos	-46.05	-15.90	61	61	61	49	50	50	43	44	44	46	47	47
Brasília	-47.93	-15.78	65	65	65	64	68	67	59	63	63	58	62	62
Capinópolis	-49.55	-18.72	88	90	90	74	76	76	63	65	64	63	64	64
Catalão	-47.95	-18.18	82	82	82	71	73	73	63	66	66	65	67	67
Embrapa Hortaliças	-48.13	-15.93	78	80	79	68	71	71	61	64	64	59	63	63
Embrapa Cerrados	-47.71	-15.59	55	56	56	57	59	59	54	59	59	53	58	57
Embrapa A. Feijão	-49.28	-16.47	82	83	83	74	77	77	60	63	63	59	62	62
Formosa	-47.33	-15.53	76	78	78	66	69	68	61	64	64	58	61	61
Formoso	-46.25	-14.93	76	77	77	68	69	69	63	66	66	64	66	66
Goiânia	-49.25	-16.67	78	79	79	73	74	74	68	70	70	68	70	70
Aruanã	-51.00	-14.90	74	74	75	62	64	64	52	56	56	54	57	57
Bom J. de Goiás	-50.18	-18.07	74	75	75	67	68	68	62	64	64	65	67	67
Catalão	-47.07	-18.12	72	75	75	60	63	63	55	58	57	54	56	56
Cristalina	-47.27	-17.12	84	90	90	64	68	68	55	58	58	59	63	63
Caldas Novas	-48.61	-17.71	75	77	77	65	69	69	52	55	55	55	58	58
Caiapônia	-51.82	-16.97	91	95	94	75	79	79	66	71	70	64	68	67
Faina	-50.37	-15.43	61	61	61	59	60	60	47	47	47	47	47	47
Goiás	-50.13	-15.92	81	82	82	76	75	75	73	75	74	70	71	71
Luziânia	-47.98	-16.27	77	83	82	60	65	63	48	53	52	49	55	54
Morrinhos	-49.11	-17.70	79	83	83	60	65	64	50	52	52	52	54	54
Mineiros	-52.60	-17.57	78	79	79	66	70	69	50	54	53	50	54	54
Paraúna	-50.49	-17.51	77	78	77	67	69	69	65	67	67	61	63	63
Porangatu	-49.13	-13.43	93	92	92	76	78	78	62	65	65	64	67	66
Quirinópolis	-50.40	-18.60	67	68	68	61	62	62	46	48	47	46	48	47
Varjão	-49.67	-17.09	85	88	88	69	73	73	53	58	57	54	59	58
Goianésia	-49.00	-15.22	79	81	81	63	65	65	59	61	61	64	66	66
Ipameri	-48.17	-17.72	80	82	82	67	69	69	57	59	59	59	61	61
Itumbiara	-49.22	-18.42	69	69	69	56	57	57	45	46	46	47	48	48
Jataí	-51.72	-17.88	94	95	95	78	80	80	66	68	68	71	73	73
Nova Xavantina	-52.35	-14.70	92	90	90	75	78	78	65	67	67	63	64	64
Paracatu	-46.88	-17.23	64	65	65	63	63	63	56	58	58	59	60	60
Paranaíba	-51.18	-19.75	73	73	73	63	64	64	54	54	54	60	61	61
Peixe	-48.35	-12.02	91	89	90	80	79	79	69	71	70	71	72	72
Pirenópolis	-48.97	-15.85	84	85	85	72	74	74	58	61	61	57	59	59
Posse	-46.37	-14.10	69	70	70	59	61	61	52	54	53	53	54	53
Rio Verde	-50.92	-17.80	92	93	93	76	79	79	72	75	75	72	74	74
Taguatinga	-46.42	-12.40	84	86	86	75	75	75	70	73	73	69	70	70
Unai	-46.80	-16.36	78	77	77	62	64	63	56	57	57	57	58	58
Média			78	79	79	67	69	69	58	61	61	59	61	61
Máxima			94	95	95	80	80	80	73	75	75	72	74	74
Mínima			55	56	56	49	50	50	43	44	44	46	47	47
Diferença (Kg/ha)			39	39	39	30	30	30	30	31	31	26	27	27
Diferença (%)			42	41	41	38	38	38	41	41	41	36	37	36