

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE FITOTECNIA E FITOSSANITARISMO

RONEI LUIZ ANDRETTA

**INFLUÊNCIA DE VARIÁVEIS CLIMÁTICAS, DA ÁGUA DISPONÍVEL NO SOLO, E
DOS EVENTOS EL NIÑO E LA NIÑA NA PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR
NO ESTADO DO PARANÁ**

CURITIBA

2012

RONEI LUIZ ANDRETTA

**INFLUÊNCIA DE VARIÁVEIS CLIMÁTICAS, DA ÁGUA DISPONÍVEL NO SOLO, E
DOS EVENTOS EL NIÑO E LA NIÑA NA PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR
NO ESTADO DO PARANÁ**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Área de Concentração em Produção Vegetal, Departamento de Fitotecnia e Fitossanitarismo, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Orientador: Prof. Dr. Edelclaiton Daros.

Co-orientador de estatística: Prof. Dr. Henrique Soares Koehler

Co-orientador de climatologia: Prof. Marco Aurélio de Mello Machado.

CURITIBA

2012

A561 Andretta, Ronei Luiz
Influência de variáveis climáticas, da água disponível no solo, e dos eventos el niño e la ninã na produtividade da cana-de-açúcar no Estado do Paraná / Ronei Luiz Andretta. – Curitiba, 2012
149f.

Orientador: Edelclaiton Daros
Co-orientador: Henrique Soares Koehler
Co-orientador: Marco Aurélio de Mello Machado
Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências Agrárias. Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Produção Vegetal

1. Cana-de-açúcar – Paraná. 2. Climatologia agrícola.
3. Vegetação e clima. 4. Solo e clima. I. Daros, Edelclaiton.
II. Koehler, Henrique Soares. III. Machado, Marco Aurélio de Mello
IV. Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências Agrárias.
Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Produção Vegetal.
V. Título

CDU 551.58:633.61(816.2)



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
AGRONOMIA - PRODUÇÃO VEGETAL



PARECER

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Produção Vegetal, reuniram-se para realizar a arguição da Dissertação de MESTRADO, apresentada pelo candidato **RONEI LUIZ ANDRETTA**, sob o título "**INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E DOS EVENTOS EL NIÑO E LA NIÑA NA PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR, NO ESTADO DO PARANÁ**", para obtenção do grau de Mestre em Ciências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Produção Vegetal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná.

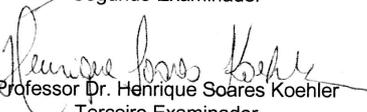
Após haver analisado o referido trabalho e argüido o candidato são de parecer pela "**APROVAÇÃO**" da Dissertação.

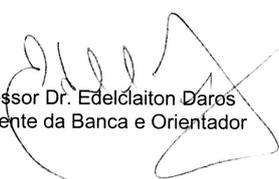
Curitiba, 29 de Fevereiro de 2012.


Professora Dra. Louise Larissa May De Mio
Coordenadora do Programa


Professor Dr. Ailton Rodrigues Pinto Junior
Primeiro Examinador


Dr. Marcos Silveira Wrege
Segundo Examinador


Professor Dr. Henrique Soares Koehler
Terceiro Examinador


Professor Dr. Edelclaiton Daros
Presidente da Banca e Orientador

AGRADECIMENTOS

Durante o desenvolvimento do trabalho, diversos colegas e mestres colaboraram para sua execução. Nossa sincera gratidão, em especial:

A UFPR/SCA/Departamento de Fitotecnia e Fitossanitarismo e aos professores do Curso de Pós Graduação em Produção Vegetal, pela oportunidade da realização, ensinamentos e sugestões recebidas;

Aos funcionários da Secretaria de Estado da Agricultura e do Abastecimento – SEAB, em especial, Gilka Cardoso Andretta, Baltazar Henrique dos Santos e Agenor Santa Rita Neto, responsáveis pela consistência da maioria dos dados históricos utilizados;

Ao professor orientador Dr. Edelclaiton Daros e aos professores co-orientadores Dr. Henrique Soares Koehler e Marco Aurélio de Mello Machado, pelos ensinamentos, pela amizade, objetividade e ajuda constante;

Aos colegas pós-graduandos, que com suas experiências de campo colaboraram com sugestões importantes para o enriquecimento do trabalho;

À minha esposa Gilka e meus filhos Larissa, Bruna e Filipe, que com paciência e compreensão abriram mão da minha companhia durante o tempo dedicado ao presente trabalho;

A todas as pessoas que, de alguma forma, colaboraram anonimamente para esta realização;

A Deus, pelo dom da vida.

BIOGRAFIA DO AUTOR

RONEI LUIZ ANDRETTA, filho de Eliezer Andretta e Tilda Bonato Andretta, nasceu em Curitiba, em 28 de março de 1963. É casado com Gilka Maria Aparecida Cardoso Andretta, com quem tem três filhos, Larissa, Bruna e Filipe.

Foi graduado em Engenharia Agrônoma no ano de 1984 na Universidade Federal do Paraná – UFPR, tendo ingressado neste mesmo ano na Associação de Crédito e Assistência Rural do Paraná – ACARPA, como extensionista rural no município de Quinta do Sol – Pr.

Trabalhou com projetos de conservação de solos em microbacias, e prestando assistência técnica a grandes culturas, como soja, milho, algodão, cana-de-açúcar e trigo, entre outras atividades.

Em 1986 assumiu a assessoria técnica do Programa de Irrigação e Drenagem – PROID, na Secretaria de Estado da Agricultura e Abastecimento do Paraná – SEAB, atuando em várias regiões do estado.

Em 1990, graduou-se especialista em Análise de Sistemas, pela Pontifícia Universidade Católica do Paraná – PUC-PR, tendo assumido neste mesmo ano a gerência de dados da SEAB, no Centro de Informações, Sistemas e Métodos - CISM.

Em 1995 graduou-se especialista em desenvolvimento de softwares na UFPR, em 2005 especialista em Gestão de Políticas Públicas na Faculdade Padre João Bagozzi, e em 2009 especialista em Ciências do Solo na UFPR.

Coordenou o desenvolvimento de sistemas informatizados nas áreas de agrometeorologia, custos de produção, produção de sementes, previsão de safras, valor bruto da produção agropecuária, rastreabilidade de bovinos, controle de trânsito animal, certificação de produtos vegetais, georreferenciamento de propriedades e receituário agrônomo, entre outros.

Em 2006 assumiu a chefia do Núcleo de Informática e Informações da SEAB

Desde maio de 2012 é responsável pela Gerência de Tecnologia de Informação da Agência de Defesa Agropecuária do Paraná – ADAPAR.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS	xv
LISTA DE ABREVIATURAS	xvi
LISTA DE SÍMBOLOS	xvii
LISTA DE ANEXOS	xx
RESUMO	xxiii
ABSTRACT	xxiv
1 INTRODUÇÃO	25
2 REVISÃO	27
2.1 FENOLOGIA E FISIOLOGIA DA CANA-DE-AÇÚCAR	27
2.2 INFLUÊNCIA DOS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS SOBRE O DESENVOLVIMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR	29
2.2.1 RADIAÇÃO, LUMINOSIDADE E ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR	31
2.2.2 TEMPERATURA	34
2.2.3 DISPONIBILIDADE DE ÁGUA E AR NO SOLO	37
2.2.4 EVAPOTRANSPIRAÇÃO	41
2.2.5 GRAUS-DIA	43
2.3 BALANÇO HÍDRICO COMO FORMA DE MONITORAR A ÁGUA DISPONÍVEL ÀS PLANTAS	44
2.3.1 PROFUNDIDADE EFETIVA DAS RAÍZES DA CANA-DE-AÇÚCAR	46
2.3.2 EVAPOTRANSPIRAÇÃO	47
2.3.3 ESTIMATIVAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO	48

2.3.4 ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO SEGUNDO O MÉTODO DE THORNTHWAITE	49
2.4 INFLUÊNCIA DOS EVENTOS EL NIÑO E LA NIÑA SOBRE O CLIMA DO PARANÁ	50
3 MATERIAL E MÉTODOS	53
3.1 ESCOLHA DOS MUNICÍPIOS PARANAENSES ESTUDADOS	53
3.2 CÁLCULO DO BALANÇO HÍDRICO MENSAL	53
3.2.1 PRECIPITAÇÃO E TEMPERATURAS DIÁRIAS	55
3.2.2 CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO DE ÁGUA NOS SOLOS DOS MUNICÍPIOS SELECIONADOS	55
3.2.3 LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS UTILIZADAS ...	56
3.2.4 COEFICIENTE DE CULTIVO DA CANA-DE-AÇÚCAR PARA O ESTADO DO PARANÁ	57
3.3 REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA PARA ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE DA CANA DE AÇÚCAR NO MESMO ANO DA COLETA DOS DADOS METEOROLÓGICOS	58
3.4 REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA PARA ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE DA CANA DE AÇÚCAR NO ANO SEGUINTE À COLETA DOS DADOS METEOROLÓGICOS	61
3.5 COMPARAÇÃO ENTRE PRODUTIVIDADE DE ANOS NORMAIS E DE ANOS COM INFLUÊNCIA DOS EVENTOS EL NIÑO E LA NIÑA	63
3.6 COMPARAÇÃO ENTRE PRODUTIVIDADE DO ANO SEGUINTE A ANOS NORMAIS E A ANOS COM INFLUÊNCIA DOS EVENTOS EL NIÑO E LA NIÑA	64
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	66
4.1 ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE NO MESMO ANO DOS EVENTOS METEOROLÓGICOS OBSERVADOS	68
4.1.1 PARANAÍ	68

4.1.2 CRUZEIRO DO OESTE	72
4.1.3 ENGENHEIRO BELTRÃO	75
4.1.4 CAMBARÁ	77
4.1.5 JACAREZINHO	80
4.2 ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE NO ANO SEGUINTE AOS EVENTOS METEOROLÓGICOS OBSERVADOS	82
4.2.1 PARANAÍ	82
4.2.2 CRUZEIRO DO OESTE	84
4.2.3 ENGENHEIRO BELTRÃO	87
4.2.4 CAMBARÁ	88
4.2.5 JACAREZINHO	91
4.3 ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR NO MESMO ANO DOS EVENTOS EL NIÑO E LA NIÑA	92
4.3.1 PARANAÍ	93
4.3.2 CRUZEIRO DO OESTE	95
4.3.3 ENGENHEIRO BELTRÃO	97
4.3.4 CAMBARÁ	101
4.3.5 JACAREZINHO	102
4.4 ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR NO ANO SEGUINTE AOS EVENTOS EL NIÑO E LA NIÑA	104
4.4.1 PARANAÍ	104
4.4.2 CRUZEIRO DO OESTE	106
4.4.3 ENGENHEIRO BELTRÃO	108
4.4.4 CAMBARÁ	110

4.4.5 JACAREZINHO	112
5 CONCLUSÕES	115
5.1 VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E DO BALANÇO HÍDRICO QUE INFLUENCIAM A PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR NO PARANÁ, NO MESMO ANO DOS EVENTOS METEOROLÓGICOS	115
5.2 VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E DO BALANÇO HÍDRICO QUE INFLUENCIAM A PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR NO PARANÁ, NO ANO SEGUINTE AOS EVENTOS METEOROLÓGICOS	115
5.3 INFLUÊNCIA DOS EVENTOS EL NIÑO E LA NIÑA NA PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR NO PARANÁ, NO MESMO ANO DA OCORRÊNCIA DOS EVENTOS CLIMÁTICOS	115
5.4 INFLUÊNCIA DOS EVENTOS EL NIÑO E LA NIÑA NA PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR NO PARANÁ, NO ANO SEGUINTE À OCORRÊNCIA DOS EVENTOS CLIMÁTICOS	116
5.5 CONCLUSÃO GERAL	116
REFERÊNCIAS	117

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Dinâmica do cultivo da cana-de-açúcar na região Centro-Sul (adaptado de RUDORFF, 1985)	27
FIGURA 2 – Classificação dos fatores de produção vegetal que afetam direta e indiretamente os processos fisiológicos das plantas. Linhas cheias correspondem a uma ação mais efetiva do que as linhas interrompidas. Fonte: MARCHIORI (2004)	30
FIGURA 3 – Variabilidade da media anual de irradiação solar global no período 1995 a 2005 de cada uma das regiões do Brasil, em kW.h.m ⁻² . Fonte: MARTINS <i>et al.</i> (2007)	31
FIGURA 4 – Condições oceânicas e atmosféricas no Oceano Pacífico tropical no final da primavera e verão do Hemisfério Sul em situação normal (a), El Niño (b) e La Niña (c). Fonte: BELATO e FONTANA (2003) e OLIVEIRA (1971)	52
FIGURA 5 – Idade da rebrota da cana-de-açúcar de corte anual no estado do Paraná, com respectivas porcentagens de área cultivada e coeficientes de cultura (<i>Kc</i>), adaptados de DOORENBOS e KASSAN (1994), calculados a partir das porcentagens de colheita mensal média em três anos (2007 a 2009) informadas pela SEAB/Deral	67
FIGURA 6 – Produtividade anual da cana-de-açúcar (kg.ha ⁻¹), em ordem crescente, observada entre os anos de 1992 e 2008, versus a produtividade estimada (kg.ha ⁻¹) resultante da equação ajustada por regressão múltipla a partir de dados meteorológicos e da disponibilidade de água no solo, no município de Paranavaí – PR	69
FIGURA 7 – Correlação entre precipitação diária (mm) e radiação global incidente diária (W.m ⁻²) no município de Paranavaí – PR, no ano de 2010. Fonte: SIMEPAR	71
FIGURA 8 – Produtividade anual da cana-de-açúcar (kg.ha ⁻¹), em ordem crescente, observada entre os anos de 1990 e 2008, versus a produtividade estimada (kg.ha ⁻¹) resultante da equação da regressão múltipla ajustada a partir de dados meteorológicos e da disponibilidade de água no solo, no município de Cruzeiro do Oeste – PR	73
FIGURA 9 – Produtividade anual da cana-de-açúcar (kg.ha ⁻¹), em ordem crescente, observada entre os anos de 1990 e 2008, versus a produtividade estimada (kg.ha ⁻¹) resultante da equação da regressão múltipla ajustada a partir de dados meteorológicos e da disponibilidade de água no solo, no município de Engenheiro Beltrão – PR	75

- FIGURA 10 – Produtividade anual da cana-de-açúcar ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), em ordem crescente, observada entre os anos de 1990 e 2008, versus a produtividade estimada ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) resultante da equação da regressão múltipla ajustada a partir de dados meteorológicos e da disponibilidade de água no solo, no município de Cambará – PR 78
- FIGURA 11 – Produtividade anual da cana-de-açúcar ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), em ordem crescente, observada entre os anos de 1990 e 2008, versus a produtividade estimada ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) resultante da equação ajustada a partir de dados meteorológicos e da disponibilidade de água no solo, no município de Jacarezinho – PR 80
- FIGURA 12 – Produtividade da cana-de-açúcar no ano seguinte ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), em ordem crescente, versus a produtividade estimada ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) resultante da equação ajustada da regressão linear múltipla a partir de dados meteorológicos e da disponibilidade de água no solo de 1997 a 2007, no município de Paranavaí – PR .. 83
- FIGURA 13 – Produtividade da cana-de-açúcar no ano seguinte ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), em ordem crescente, versus a produtividade estimada ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) pela equação ajustada da regressão linear múltipla a partir de dados meteorológicos e da disponibilidade de água no solo de 1990 a 2007, no município de Cruzeiro do Oeste – PR 85
- FIGURA 14 – Produtividade da cana-de-açúcar no ano seguinte ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), em ordem crescente, versus a produtividade estimada ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) resultante da equação da regressão linear múltipla ajustada a partir de dados meteorológicos e da disponibilidade de água no solo de 1990 a 2007, no município de Engenheiro Beltrão – PR 87
- FIGURA 15 – Produtividade da cana-de-açúcar no ano seguinte ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), em ordem crescente, versus a produtividade estimada ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) resultante da formula da regressão linear múltipla ajustada a partir de dados meteorológicos e da disponibilidade de água no solo de 1990 a 2007, no município de Cambará – PR 89
- FIGURA 16 – Produtividade da cana-de-açúcar no ano seguinte ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), em ordem crescente, versus a produtividade estimada ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) resultante da formula da regressão linear múltipla ajustada a partir de dados meteorológicos e da disponibilidade de água no solo de 1990 a 2007, no município de Jacarezinho – PR 91
- FIGURA 17 – Produtividade anual da cana-de-açúcar ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), em ordem crescente, observada entre os anos de 1992 e 2008, versus a produtividade estimada ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) resultante da formula da regressão linear múltipla ajustada a partir de classes de intensidade dos eventos “El Niño” e “La Niña” nos trimestres, no município de Paranavaí – PR 93

FIGURA 18 – Efeito do evento “La Niña” no clima do estado do Paraná no segundo trimestre do ano e a posição geográfica dos cinco municípios estudados. Adaptado de IAPAR(2011)	95
FIGURA 19 – Produtividade anual da cana-de-açúcar ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), em ordem crescente, observada entre os anos de 1990 e 2008, versus a produtividade estimada ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) pela equação da regressão múltipla ajustada a partir de classes de intensidade dos eventos El Niño e La Niña nos trimestres, no município de Cruzeiro do Oeste – PR	96
FIGURA 20 – Produtividade anual da cana-de-açúcar ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), em ordem crescente, observada entre os anos de 1990 e 2008, versus a produtividade estimada ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) pela equação da regressão múltipla ajustada a partir de classes de intensidade dos eventos El Niño e La Niña nos trimestres, no município de Engenheiro Beltrão – PR	98
FIGURA 21 – Efeito do evento “El Niño” no clima do estado do Paraná no primeiro trimestre do ano (verão) e a posição geográfica dos cinco municípios estudados. Adaptado de IAPAR(2010)	99
FIGURA 22 – Efeito do evento “La Niña” no clima do estado do Paraná no primeiro trimestre do ano (verão) e a posição geográfica dos cinco municípios estudados. Adaptado de IAPAR(2010)	100
FIGURA 23 – Efeito do evento “La Niña” no clima do estado do Paraná no quarto trimestre do ano (primavera) e a posição geográfica dos cinco municípios estudados. Adaptado de IAPAR(2010)	101
FIGURA 24 – Produtividade anual da cana-de-açúcar ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), em ordem crescente, observada entre os anos de 1990 e 2008, versus a produtividade estimada ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) pela formula da regressão múltipla ajustada a partir de classes de intensidade dos eventos El Niño e La Niña nos trimestres, no município de Cambará – PR	102
FIGURA 25 – Produtividade anual da cana-de-açúcar ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), em ordem crescente, observada entre os anos de 1990 e 2008, versus a produtividade estimada ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) pela equação da regressão múltipla ajustada a partir de classes de intensidade dos eventos El Niño e La Niña nos trimestres, no município de Jacarezinho – PR	103
FIGURA 26 – Produtividade anual da cana-de-açúcar ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) em ordem crescente, no ano seguinte às observações dos eventos climáticos entre os anos de 1990 e 2007, versus a produtividade estimada ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) resultante da formula da regressão linear múltipla ajustada a partir de classes de intensidade dos eventos El Niño e La Niña nos trimestres, para o município de Paranavaí – PR	105

FIGURA 27 – Produtividade anual da cana-de-açúcar (kg.ha^{-1}) em ordem crescente, no ano seguinte às observações dos eventos climáticos entre os anos de 1990 e 2007, versus a produtividade estimada (kg.ha^{-1}) resultante da formula da regressão linear múltipla ajustada a partir de classes de intensidade dos eventos El Niño e La Niña nos trimestres, para o município de Cruzeiro do Oeste – PR	107
FIGURA 28 – Efeito do evento “El Niño” no clima do estado do Paraná no segundo trimestre do ano e a posição geográfica dos cinco municípios estudados. Adaptado de IAPAR(2010)	108
FIGURA 29 – Produtividade anual da cana-de-açúcar (kg.ha^{-1}) em ordem crescente, no ano seguinte às observações dos eventos climáticos entre os anos de 1990 e 2007, versus a produtividade estimada (kg.ha^{-1}) resultante da formula da regressão linear múltipla ajustada a partir de classes de intensidade dos eventos El Niño e La Niña nos trimestres, para o município de Engenheiro Beltrão – PR	109
FIGURA 30 – Produtividade anual da cana-de-açúcar (kg.ha^{-1}) em ordem crescente, no ano seguinte às observações dos eventos climáticos entre os anos de 1990 e 2007, versus a produtividade estimada (kg.ha^{-1}) resultante da formula da regressão linear múltipla ajustada a partir de classes de intensidade dos eventos El Niño e La Niña nos trimestres, para o município de Cambará – PR	111
FIGURA 31 – Produtividade anual da cana-de-açúcar (kg.ha^{-1}) em ordem crescente, no ano seguinte às observações dos eventos climáticos entre os anos de 1990 e 2007, versus a produtividade estimada (kg.ha^{-1}) resultante da formula da regressão linear múltipla ajustada a partir de classes de intensidade dos eventos El Niño e La Niña nos trimestres, para o município de Jacarezinho – PR	112
FIGURA 32 – Efeito do evento “El Niño” no clima do estado do Paraná no quarto trimestre do ano e a posição geográfica dos cinco municípios estudados. Adaptado de IAPAR(2010)	113

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Posição geográfica e altitude das estações meteorológicas (IAPAR / SIMEPAR) mais próximas dos municípios selecionados. Fonte: SEAB/Deral	56
TABELA 2 – Porcentagem de áreas de cana-de-açúcar no Estado do Paraná, considerando cortes anuais, calculados a partir das colheitas mensais de três anos - 2007 a 2009 (% de área)	58
TABELA 3 – Coeficiente de cultivo (<i>Kc</i>) ponderado para área total de cana-de-açúcar no Estado do Paraná, considerando cortes anuais, adaptado de Doorenbos e Kassam (1994)	58
TABELA 4 – Produtividade da cana-de-açúcar (kg.ha ⁻¹) em cinco municípios de três regiões produtoras no Estado do Paraná, de 1990 a 2008. Fonte: SEAB / Deral	66

LISTA DE ABREVIATURAS

EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
DERAL	Departamento de Economia Rural
<i>EN</i>	El Niño
<i>ENOS</i>	El Niño oscilação sul
IAPAR	Instituto Agronômico do Paraná
<i>LN</i>	La Niña
SEAB	Secretaria de Estado da Agricultura e do Abastecimento do Paraná
SIMEPAR	Sistema Meteorológico do Paraná

LISTA DE SIMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
<i>IAF</i>	Índice de área foliar	$m^2.m^{-2}$
<i>ETR</i>	Evapotranspiração real	mm
<i>ET_c</i>	Evapotranspiração potencial da cultura	mm
<i>P</i>	Precipitação	mm
<i>I</i>	Irrigação	mm
<i>O</i>	Orvalho	mm
<i>AC</i>	Ascensão capilar	mm
<i>ES_E</i>	Escoamento superficial de entrada	mm
<i>DL_E</i>	Drenagem lateral de entrada	mm
<i>DL_S</i>	Drenagem lateral de saída	mm
<i>DP</i>	Drenagem profunda	mm
<i>ES_S</i>	Escoamento superficial da saída	mm
<i>ET_O</i>	Evapotranspiração de referência	mm
<i>EO</i>	Evapotranspiração da oásis	mm
<i>CAD</i>	Capacidade de água disponível	mm
<i>K_c</i>	Coefficiente de cultivo	adimensional
<i>K_{c_p}</i>	Coefficiente de cultivo ponderado	adimensional
<i>K_{c₁}</i>	Coefficiente de cultivo para plantas entre 0 e 1 mês	adimensional
<i>K_{c₃}</i>	Coefficiente de cultivo para plantas entre 1 e 3 meses	adimensional
<i>K_{c₄}</i>	Coefficiente de cultivo para plantas entre 3 e 4 meses	adimensional
<i>K_{c₁₀}</i>	Coefficiente de cultivo para plantas entre 4 e 10 meses	adimensional
<i>K_{c₁₁}</i>	Coefficiente de cultivo para plantas entre 10 e 11 meses	adimensional
<i>K_{c₁₂}</i>	Coefficiente de cultivo para plantas entre 11 e 12 meses	adimensional
<i>A₁</i>	Área com plantas entre 0 e 1 mês	%
<i>A₃</i>	Área com plantas entre 1 e 3 meses	%
<i>A₄</i>	Área com plantas entre 3 e 4 meses	%
<i>A₁₀</i>	Área com plantas entre 4 e 10 meses	%

Símbolo	Descrição	Unidade
A_{11}	Área com plantas entre 10 e 11 meses	%
A_{12}	Área com plantas entre 11 e 12 menses	%
ARM	Armazenamento	mm
L	Negativo acumulado	mm
$Prod$	Produtividade média anual	kg.ha ⁻¹
$TmaxV$	Temperatura máxima média no trimestre de verão	°C
$TmaxO$	Temperatura máxima média no trimestre de outono.....	°C
$TmaxI$	Temperatura máxima média no trimestre de inverno.....	°C
$TmaxP$	Temperatura máxima média no trimestre de primavera.....	°C
$TminV$	Temperatura mínima média no trimestre de verão	°C
$TminO$	Temperatura mínima média no trimestre de outono.....	°C
$TminI$	Temperatura mínima média no trimestre de inverno.....	°C
$TminP$	Temperatura mínima média no trimestre de primavera.....	°C
$TmedV$	Temperatura média no trimestre de verão	°C
$TmedO$	Temperatura média no trimestre de outono.....	°C
$TmedI$	Temperatura média no trimestre de inverno.....	°C
$TmedP$	Temperatura média no trimestre de primavera.....	°C
$GrdiaV$	Soma de graus-dia no trimestre de verão	°C
$GrdiaO$	Soma de graus-dia no trimestre de outono.....	°C
$GrdiaI$	Soma de graus-dia no trimestre de inverno.....	°C
$GrdiaP$	Soma de graus-dia no trimestre de primavera	°C
$PrecV$	Soma da precipitação no trimestre de verão	mm
$PrecO$	Soma da precipitação no trimestre de outono.....	mm
$PrecI$	Soma da precipitação no trimestre de inverno.....	mm
$PrecP$	Soma da precipitação no trimestre de primavera	mm
$DefV$	Soma da deficiência hídrica no trimestre de verão	mm
$DefO$	Soma da deficiência hídrica no trimestre de outono.....	mm
$DefI$	Soma da deficiência hídrica no trimestre de inverno.....	mm

Símbolo	Descrição	Unidade
<i>DefP</i>	Soma da deficiência hídrica no trimestre de primavera	mm
<i>ExcV</i>	Soma do excesso hídrico no trimestre de verão	mm
<i>ExcO</i>	Soma do excesso hídrico no trimestre de outono	mm
<i>ExcI</i>	Soma do excesso hídrico no trimestre de inverno	mm
<i>ExcP</i>	Soma do excesso hídrico no trimestre de primavera	mm
<i>ETrelV</i>	Soma da evapotranspiração relativa no trimestre de verão	mm
<i>ETrelO</i>	Soma da evapotranspiração relativa no trimestre de outono	mm
<i>ETrelI</i>	Soma da evapotranspiração relativa no trimestre de inverno	mm
<i>ETrelP</i>	Soma da evapotranspiração relativa no trimestre de primavera ...	mm
<i>Tcomp</i>	Temperatura média compensada	°C
<i>Nver</i>	Ocorrência de trimestre normal de verão	0 ou 1
<i>Nout</i>	Ocorrência de trimestre normal de outono	0 ou 1
<i>Ninv</i>	Ocorrência de trimestre normal de inverno	0 ou 1
<i>Npri</i>	Ocorrência de trimestre normal de primavera	0 ou 1
<i>ENver</i>	Intensidade do El Niño no trimestre de verão	0,1,2 ou 3
<i>ENout</i>	Intensidade do El Niño no trimestre de outono	0,1,2 ou 3
<i>ENinv</i>	Intensidade do El Niño no trimestre de inverno	0,1,2 ou 3
<i>ENpri</i>	Intensidade do El Niño no trimestre de primavera	0,1,2 ou 3
<i>LNver</i>	Intensidade do La Niña no trimestre de verão	0,1,2 ou 3
<i>LNout</i>	Intensidade do La Niña no trimestre de outono	0,1,2 ou 3
<i>LNinv</i>	Intensidade do La Niña no trimestre de inverno	0,1,2 ou 3
<i>LNpri</i>	Intensidade do La Niña no trimestre de primavera	0,1,2 ou 3
<i>S_{xy}%</i>	Erro padrão em porcentagem	%

LISTA DE ANEXOS

ANEXO I – Dados climáticos e de produtividade de Paranavaí / PR utilizados nas regressões lineares múltiplas (1990 a 2008)	123
ANEXO II – Dados climáticos e de produtividade de Cruzeiro do Oeste / PR utilizados nas regressões lineares múltiplas (1990 a 2008)	124
ANEXO III – Dados climáticos e de produtividade de Engenheiro Beltrão / PR utilizados nas regressões lineares múltiplas (1990 a 2008)	125
ANEXO IV – Dados climáticos e de produtividade de Cambará / PR utilizados nas regressões lineares múltiplas (1990 a 2008)	126
ANEXO V – Dados climáticos e de produtividade de Jacarezinho / PR utilizados nas regressões lineares múltiplas (1990 a 2008)	127
ANEXO VI – Eventos de El Niño e La Niña e suas intensidades em função das estações do ano no período de 1970 a 2008. F-,F,F+, eventos de La Niña fracos, moderados e fortes, respectivamente. Q-, Q, Q+, eventos de El Niño fracos, moderados e fortes, respectivamente	128
ANEXO VII - Eventos de “El Niño” e “La Niña” e suas intensidades em função das estações do ano no período de 1990 a 2008. Variáveis <i>N</i> com valores 1 para trimestres neutros e 0 para trimestres com eventos <i>EN</i> ou <i>LN</i> ; variáveis <i>LN</i> com valores 0,1,2 ou 3 para eventos “La Niña” ausente, fraco, moderado e forte, respectivamente; e variáveis <i>EN</i> com valores 0,1,2 ou 3 para eventos “El Niño” ausente, fraco, moderado e forte, respectivamente. Os valores foram utilizados nas regressões lineares múltiplas	129
ANEXO VIII – Gráficos comparativos da média das temperaturas mínimas nas quatro estações do ano, em cinco municípios paranaenses (1990 a 2008)	130
ANEXO IX – Gráficos comparativos da média das temperaturas máximas nas quatro estações do ano, em cinco municípios paranaenses (1990 a 2008)	131
ANEXO X – Gráficos comparativos da média das temperaturas médias nas quatro estações do ano, em cinco municípios paranaenses (1990 a 2008)	132
ANEXO XI – Gráficos comparativos do somatório de graus-dia (temperatura base = 20 °C) nas quatro estações do ano, em cinco municípios paranaenses (1990 a 2008)	133
ANEXO XII – Gráficos comparativos do somatório de precipitação, nas quatro estações do ano, em cinco municípios paranaenses (1990 a 2008)	134

ANEXO XIII – Gráficos comparativos do somatório de deficiência hídrica no solo, nas quatro estações do ano, em cinco municípios paranaenses (1990 a 2008)	135
ANEXO XIV – Gráficos comparativos do somatório do excesso hídrico no solo, nas quatro estações do ano, em cinco municípios paranaenses (1990 a 2008)	136
ANEXO XV – Gráficos comparativos das médias da evapotranspiração relativa (ETR/ET_c) nas quatro estações do ano, em cinco municípios paranaenses (1990 a 2008)	137
ANEXO XVI – Gráficos comparativos das precipitações acumuladas (mm) por trimestre (verão, outono, inverno e primavera) no município de Paranavaí, em trimestres normais, trimestres com evento “El Niño” e trimestres com evento “La Niña” (1990 a 2008)	138
ANEXO XVII – Gráficos comparativos da deficiência hídrica acumulada (mm) resultante do balanço hídrico segundo THONTHWAIT e MATHER (1955), por trimestre (verão, outono, inverno e primavera) no município de Paranavaí, em trimestres normais, trimestres com evento “El Niño” e trimestres com evento “La Niña” (1990 a 2008)	139
ANEXO XVIII – Gráficos comparativos do excedente hídrico acumulado (mm) resultante do balanço hídrico segundo THONTHWAIT e MATHER (1955), por trimestre (verão, outono, inverno e primavera) no município de Paranavaí, em trimestres normais, trimestres com evento “El Niño” e trimestres com evento “La Niña” (1990 a 2008)	140
ANEXO XIX – Gráficos comparativos das precipitações acumuladas (mm) por trimestre (verão, outono, inverno e primavera) no município de Cruzeiro do Oeste, em trimestres normais, trimestres com evento “El Niño” e trimestres com evento “La Niña” (1990 a 2008)	141
ANEXO XX – Gráficos comparativos da deficiência hídrica acumulada (mm) resultante do balanço hídrico segundo THONTHWAIT e MATHER (1955), por trimestre (verão, outono, inverno e primavera) no município de Cruzeiro do Oeste, em trimestres normais, trimestres com evento “El Niño” e trimestres com evento “La Niña” (1990 a 2008)	142
ANEXO XXI – Gráficos comparativos do excedente hídrico acumulado (mm) resultante do balanço hídrico segundo THONTHWAIT e MATHER (1955), por trimestre (verão, outono, inverno e primavera) no município de Cruzeiro do Oeste, em trimestres normais, trimestres com evento “El Niño” e trimestres com evento “La Niña” (1990 a 2008)	143

ANEXO XXII – Gráficos comparativos das precipitações acumuladas (mm) por trimestre (verão, outono, inverno e primavera) no município de Engenheiro Beltrão, em trimestres normais, trimestres com evento “El Niño” e trimestres com evento “La Niña” (1990 a 2008)	144
ANEXO XXIII – Gráficos comparativos da deficiência hídrica acumulada (mm) resultante do balanço hídrico segundo THONTHWAIT e MATHER (1955), por trimestre (verão, outono, inverno e primavera) no município de Engenheiro Beltrão, em trimestres normais, trimestres com evento “El Niño” e trimestres com evento “La Niña” (1990 a 2008)	145
ANEXO XXIV – Gráficos comparativos do excedente hídrico acumulado (mm) resultante do balanço hídrico segundo THONTHWAIT e MATHER (1955), por trimestre (verão, outono, inverno e primavera) no município de Engenheiro Beltrão, em trimestres normais, trimestres com evento “El Niño” e trimestres com evento “La Niña” (1990 a 2008)	146
ANEXO XXV – Gráficos comparativos das precipitações acumuladas (mm) por trimestre (verão, outono, inverno e primavera) nos municípios de Cambará e Jacarezinho, em trimestres normais, trimestres com evento “El Niño” e trimestres com evento “La Niña” (1990 a 2008)	147
ANEXO XXVI – Gráficos comparativos da deficiência hídrica acumulada (mm) resultante do balanço hídrico segundo THONTHWAIT e MATHER (1955), por trimestre (verão, outono, inverno e primavera) nos municípios de Cambará e Jacarezinho, em trimestres normais, trimestres com evento “El Niño” e trimestres com evento “La Niña” (1990 a 2008)	148
ANEXO XXVII – Gráficos comparativos do excedente hídrico acumulado (mm) resultante do balanço hídrico segundo THONTHWAIT e MATHER (1955), por trimestre (verão, outono, inverno e primavera) nos municípios de Cambará e Jacarezinho, em trimestres normais, trimestres com evento “El Niño” e trimestres com evento “La Niña” (1990 a 2008)	149

INFLUÊNCIA DE VARIÁVEIS CLIMÁTICAS, DA ÁGUA DISPONÍVEL NO SOLO, E DOS EVENTOS EL NIÑO E LA NIÑA NA PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR NO ESTADO DO PARANÁ

RESUMO

Com o crescente interesse na cultura da cana-de-açúcar como fonte renovável de energia, a área explorada no Paraná vem aumentando, sendo um dos maiores estados produtores do Brasil. Estando numa região de transição climática, as explorações ocupam parte da área setentrional do estado, onde as condições são adequadas às culturas tropicais. O conhecimento mais detalhado das variáveis climáticas que influenciam a produtividade nessas condições permite melhorar o manejo da cultura, o planejamento das operações nas usinas sucroalcooleiras, a escolha de ideótipos adaptados, a previsão de safras e o zoneamento agrícola-ambiental. O objetivo do trabalho foi analisar a produtividade histórica de cinco dos principais municípios produtores de cana-de-açúcar do Paraná, entre os anos 1990 e 2008, correlacionando-a, primeiro, com variáveis climáticas e do balanço hídrico, e, posteriormente, com a ocorrência dos eventos El Niño e La Niña. Dois municípios têm solos arenosos, com baixa capacidade de armazenamento de água (Paranavaí e Cruzeiro do Oeste), enquanto que os outros três possuem solos argilosos, com alta capacidade de armazenamento de água (Engenheiro Beltrão, Cambará e Jacarezinho). Na primeira parte do estudo foram ajustadas regressões lineares múltiplas correlacionando registros meteorológicos trimestrais (precipitação; graus-dia; temperaturas mínima, máxima e média compensada) e dos balanços hídricos trimestrais (deficiência hídrica; excesso hídrico; e evapotranspiração relativa) com a produtividade média anual da cana-de-açúcar, para cada município. A produtividade média da cana-de-açúcar, no mesmo ano da coleta dos registros meteorológicos, foi influenciada positivamente pelo aumento da evapotranspiração relativa no terceiro trimestre (inverno), resultando em maior acúmulo de reservas, e foi influenciada negativamente pelo aumento de precipitação e pelo excesso de água no perfil do solo no segundo trimestre (outono), com a interceptação da radiação pelas nuvens e pela condição hipóxica do solo. A produtividade média no ano seguinte aos registros meteorológicos foi influenciada positivamente por invernos com temperaturas mais altas e primaveras chuvosas, resultando numa rebrota mais vigorosa para a safra seguinte. Na segunda parte do estudo foram ajustadas regressões lineares múltiplas correlacionando a intensidade da ocorrência de eventos climáticos El Niño e La Niña, nos trimestres do ano, com a produtividade média anual da cana-de-açúcar. A ocorrência do evento La Niña não mostrou influência sobre a produtividade da cana-de-açúcar. Já o evento El Niño no segundo e terceiro trimestres (outono e inverno) diminuiu a produtividade média da cana-de-açúcar no ano seguinte à sua ocorrência. Está relacionado à interceptação da radiação pelas nuvens quando a radiação global disponível já está em declínio, e ao excesso de água no perfil do solo. Especificamente para a região Nordeste do estado, o evento El Niño trouxe chuvas abundantes na primavera, favorecendo a rebrota das plantas e influenciando positivamente a produtividade média da cana-de-açúcar no ano seguinte.

PALAVRAS CHAVE:

Balanço hídrico, modelagem, regressão linear múltipla, climatologia, *Saccharum spp.*

**INFLUENCE OF CLIMATIC ELEMENTS, WATER AVAILABLE IN SOIL
AND EVENTS EL NIÑO AND LA NIÑA IN THE SUGARCANE PRODUCTIVITY IN
FIVE CITIES OF THE STATE OF PARANÁ**

ABSTRACT

With the growing interest on the culture of sugarcane as a renewable energy source, the area explored in the Parana has been increasing and now is one of the biggest producing states in Brazil. It is in a climate transition region, the plantations are on northern area of the state, where conditions are suitable for tropical crops. The more detailed knowledge of climatic factors influencing productivity in these conditions would lead to better crop management, operations planning in sugarcane mills, the choice of adapted ideotype, crop forecasting and agricultural zoning. The objective of this study was to analyze the historical productivity of the five main producing municipalities of sugar cane in Paraná, between 1990 and 2008, correlating, first, with climatic factors and water balance, and subsequently, with the occurrence of El Niño and La Niña. Two municipalities have sandy soils with low water storage capacity (Paranavaí and Cruzeiro do Oeste), while the other three have clay soils with high water storage capacity (Engenheiro Beltrão, Cambará and Jacarezinho). In the first part of the study were performed multiple linear regressions correlating meteorological and water balances quarterly with the average annual productivity of sugarcane, for each municipality. The yield of sugarcane in the same year of the collection of meteorological records, was positively influenced by increased of the relative evapotranspiration in the third quarter (winter), resulting in greater accumulation of reserves, and was negatively affected by increased precipitation and excess water in the soil profile in the second quarter (fall), with the interception of radiation by clouds and hypoxic condition of the soil. The average productivity in the years following the meteorological records was positively affected by higher temperatures in winters and rainy springs, resulting in a more vigorous regrowth for the next harvest. In the second part of the study were performed multiple linear regressions correlating the intensity of occurrence of weather events El Niño and La Niña, in the quarters of the year, with average annual productivity of sugarcane. The occurrence of a La Nina showed no influence on the productivity of cane sugar. The El Niño event in the second and third trimesters (fall and winter), decreases the yield of cane sugar in the year following their occurrence. It is related to interception of radiation by clouds when the global radiation available is already in decline, and the excess water in the soil profile. Specifically for the Northeast region of the state, El Niño brings heavy rains in the spring, encouraging regrowth of plants and positively influencing the yield of sugarcane in the following year.

KEY WORDS:

Water balance, modeling, multiple linear regression, climatology, *Saccharum spp.*

1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) está presente desde o início da colonização brasileira, sendo utilizada para alimentação e geração de energia. O Brasil tornou-se o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, tendo produzido em 2009, segundo a CONAB, cerca de 612 milhões de Toneladas de colmos, dos quais o Paraná participou com cerca de 9%, sendo um dos principais estados produtores.

Para as atividades de pesquisa com novos cultivares, previsão de safras, planejamento de irrigação, planejamento das operações da indústria sucroalcooleira e zoneamento agrícola-ambiental, o conhecimento cada vez mais detalhado de variáveis ambientais regionais que influenciem a cultura torna-se significativo, pois envolvem recursos financeiros e operacionais de grande monta.

Como o estado do Paraná está numa região de transição entre o clima tropical e temperado, possui condições adequadas à exploração da cana-de-açúcar somente mais ao norte. Porém, onde pode ser plantada, a cana-de-açúcar alcança altas produtividades, pois a cultura tem crescimento vegetativo nas estações de primavera e verão, com precipitações abundantes.

O presente estudo pretendeu colaborar no entendimento da dinâmica de crescimento da cana-de-açúcar no ambiente do estado do Paraná, correlacionando os dados climáticos trimestrais à produtividade obtida pela cultura, nas principais regiões produtoras. Baseando-se numa série histórica de 19 anos, o estudo identificou as principais variáveis ambientais que influenciaram positiva ou negativamente a produtividade da cana-de-açúcar. É um modelo que pode ser atualizada e facilmente reproduzido em outros ambientes de produção.

A estimativa dessa produtividade tem grande importância para o planejamento estratégico das empresas sucroalcooleiras a fim de presumir o quanto de produção será processada e armazenada, a logística de transporte e para a tomada de decisão sobre a comercialização dos produtos finais. Estando disponíveis dados históricos de produtividade da cultura da cana-de-açúcar e dados meteorológicos, então é possível correlacionar as variáveis climáticas e a quantidade da água disponível no solo à essa produtividade, já que o desenvolvimento da cana-de-açúcar é sabidamente influenciado por essas variáveis, estimando a sua produtividade futura.

O objetivo geral do estudo foi avaliar, a partir de dados históricos oficiais de produtividade da cana-de-açúcar, a influência das variáveis climáticas e dos componentes do balanço hídrico do solo sobre a produtividade da cultura em cinco municípios das principais regiões produtoras do Paraná (Paranavaí, Cruzeiro do Oeste, Engenheiro Beltrão, Cambará e Jacarezinho).

Como objetivos específicos, definiram-se:

a) Estudar o efeito de variáveis climáticas e componentes do balanço hídrico sobre a produtividade da cana-de-açúcar, em cinco municípios das principais regiões produtoras do estado do Paraná;

b) Estudar o efeito de variáveis climáticas e componentes do balanço hídrico sobre a produtividade da cana-de-açúcar no ano seguinte aos eventos, em cinco municípios das principais regiões produtoras do estado do Paraná;

c) Estudar o efeito da ocorrência dos eventos climáticos “El Niño” e “La Niña” sobre a produtividade da cana-de-açúcar, em cinco municípios das principais regiões produtoras do estado do Paraná;

d) Estudar o efeito da ocorrência dos eventos climáticos “El Niño” e “La Niña” sobre a produtividade da cana-de-açúcar no ano seguinte aos eventos, em cinco municípios das principais regiões produtoras do estado do Paraná.

e) Avaliar a utilização de regressões lineares múltiplas, a partir de variáveis climáticas trimestrais e componentes do balanço hídrico, para estimar a produtividade da cana-de-açúcar.

2 REVISÃO

2.1 FENOLOGIA E FISIOLOGIA DA CANA-DE-AÇÚCAR

A duração de cada fase fenológica da cultura varia, dependendo da época de plantio e da precocidade da cultivar (RUDORFF, 1985; RODRIGUES, 1995). Em geral, para a região centro-sul do Brasil, a “cana-de-açúcar de ano e meio”, ou “cana-de-açúcar de 18 meses”, é plantada a partir de janeiro (FIGURA 1). Tem crescimento vegetativo durante três meses (janeiro a março); passa por um período de repouso de cinco meses, durante o inverno, onde as folhas permanecem verdes mas há pouco crescimento (abril a agosto); seguindo-se uma fase de oito meses com crescimento vegetativo intenso durante o verão (setembro a abril); e finalmente a maturação que dura aproximadamente dois meses (maio a junho) (RUDORFF, 1985).

Já a “cana-de-açúcar de ano”, cuja produtividade historicamente é menor, só é indicada em casos de necessidade urgente de matéria prima, para atender novas instalações industriais ou para compensar comprometimento de safra devido à ocorrência de adversidades climáticas (AGROBYTE, 2009). É plantada por volta de setembro; tem crescimento vegetativo intenso por oito meses (setembro a abril); maturação de quatro meses (maio a agosto) (RUDORFF, 1985). A partir do primeiro corte, o ciclo torna-se anual (cana soca), com cortes planejados para atender a demanda das indústrias.

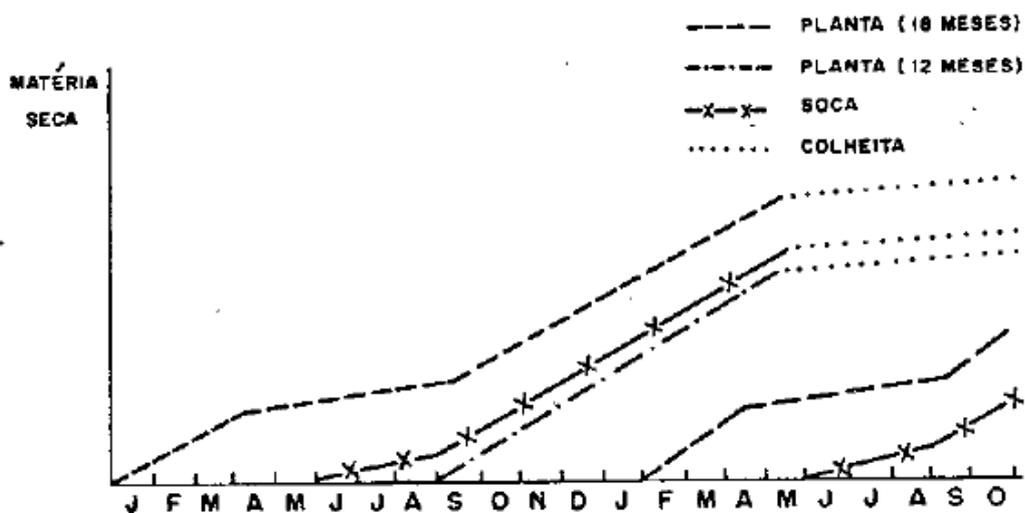


FIGURA 1 – Dinâmica do cultivo da cana-de-açúcar na região Centro-Sul (adaptado de RUDORFF, 1985).

A produtividade da cana-de-açúcar é muito dependente do clima, sofrendo influências conhecidas, tanto na sua fase de crescimento vegetativo como na sua fase de maturação (MARCHIORI, 2004). Analisando a fisiologia da cana-de-açúcar, a assimilação de clorofila é máxima durante a manhã, utilizando a energia solar para sintetizar açúcares monossacarídeos (glicose e frutose) a partir do gás carbônico e água. O processo prossegue posteriormente, mesmo na ausência de luz e clorofila, para a formação de açúcares dissacarídeos (sacarose) ou de polissacarídeos (amido e celulose). Os açúcares são utilizados, em parte para a respiração e em parte para constituição de tecidos de sustentação (celulose) no período de crescimento, ou de reserva (sacarose) no período de amadurecimento (REIS, 1981).

Os produtos da assimilação de CO₂ atmosférico resultam de duas rotas glicogênicas separadas: sacarose no citossol e amido nos cloroplastos. Sob iluminação a sacarose (dissacarídeo) é exportada continuamente do citossol para as partes não fotossintetizantes da planta, enquanto o amido (polissacarídeo) é acumulado nos cloroplastos. Com o anoitecer, cessa a assimilação de carbono e começa a degradação do amido transitório dos cloroplastos, acumulado durante o dia, continuando a exportação de sacarose (TAIZ e ZEIGER, 2009).

Sendo uma gramínea tropical de metabolismo C₄, é altamente eficiente na conversão de energia radiante em energia química, com taxas fotossintéticas calculadas em até 100 mg de CO₂ fixado por dm² de área foliar por hora. Entretanto a alta atividade fotossintética não está correlacionada diretamente com a produção de biomassa. A grande capacidade da cana-de-açúcar em produzir matéria orgânica, reside na alta taxa de fotossíntese por unidade de superfície de terreno, influenciado pelo Índice de Área Foliar – *IAF* (TAIZ e ZEIGER, 2009).

Os processos de bioconversão de energia da cana-de-açúcar são mais afetados pelos seguintes variáveis ambientais: luz (intensidade e quantidade), concentração de CO₂, disponibilidade de água e nutrientes e temperatura. Além dos variáveis ambientais citados, o crescimento vegetal ainda é afetado pela cultivar plantada, pelo espaçamento entre plantas, pela época de florescimento e pelas condições nutricionais disponíveis, naturais do solo, ou por adubação (RODRIGUES, 1995).

Segundo SEGATO *et al.* (2006), a cana-de-açúcar é adaptada a regiões com alta intensidade luminosa, altas temperaturas e relativa escassez de água em algumas épocas, apesar de 70% de sua massa ser água e só 30% matéria seca.

2.2 INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS SOBRE O DESENVOLVIMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR

A maior parte das regiões tropicais e sub-tropicais é apta para o cultivo da cana-de-açúcar, já que sua limitação maior é a altitude e o frio (REIS, 1981). É cultivada desde a latitude de 35° N a 30° S e em altitudes que variam desde o nível do mar até 1.000 metros (RODRIGUES, 1995).

É uma gramínea perene que perfilha de maneira abundante na fase inicial de desenvolvimento. Posteriormente, com o auto-sombreamento, são induzidas a inibição do perfilhamento e a aceleração do crescimento do colmo principal. O crescimento em altura continua até a ocorrência de alguma limitação no suprimento de água, ocorrência de baixas temperaturas ou ainda devido ao florescimento (RODRIGUES, 1995).

A influência do clima sobre a cana-de-açúcar está relacionada às fases de desenvolvimento da planta. Para cada fase existem condições climáticas ideais para o crescimento ou para acúmulo de reservas.

As fases de desenvolvimento, em geral, são divididas em:

- 1° sub-período – Plantio à emergência;
- 2° sub-período – Emergência ao final do perfilhamento;
- 3° sub-período – Final do perfilhamento ao início da maturação;
- 4° sub-período – Início da maturação ao corte.

O 1° sub-período tem suas condições ideais com presença de umidade no solo, aeração e temperaturas entre 25 e 30 °C. Excesso de umidade do solo, com encharcamento das raízes e falta de aeração são prejudiciais, podendo ocasionar a fermentação dos toletes. Terrenos alagados por dois ou três dias podem ocasionar a morte das raízes de plantas mais novas, reduzindo o rendimento final (REIS, 1981).

No 2° sub-período o perfilhamento é prejudicado se houver falta de água disponível no solo. O desenvolvimento vegetativo é muito lento com temperaturas abaixo dos 20 °C e alcança seu ponto ótimo entre 30 e 34 °C (SEGATO *et al*, 2006).

A produção de clorofila aumenta de 23 a 32 °C aproximadamente, para decrescer para valores superiores de temperatura. A respiração máxima situa-se entre 36 e 38 °C, mas acima de 33 °C a acumulação de matéria seca decresce. Acima de 38 °C o crescimento da planta é nulo (RODRIGUES, 1995; OLIVEIRA, 2004).

No 3º sub-período há o crescimento do colmo principal, que é influenciado positivamente pela presença de umidade no solo e pela luminosidade.

O 4º sub-período, compreendendo a maturação, tem suas condições ideais com baixas temperaturas sem, contudo, atingir o congelamento, restrição hídrica e fotoperíodo reduzido (UFPR, 1983; RODRIGUES, 1995).

MARCHIORI (2004) considera a temperatura, a insolação e a umidade as variáveis determinantes do clima para o desenvolvimento da cana-de-açúcar. Citando vários outros autores elege o clima como o fator que mais influencia na produtividade da cana-de-açúcar. Além do clima, estudou as interações com as outras variáveis que influenciam direta e indiretamente a produção das plantas (FIGURA 2).

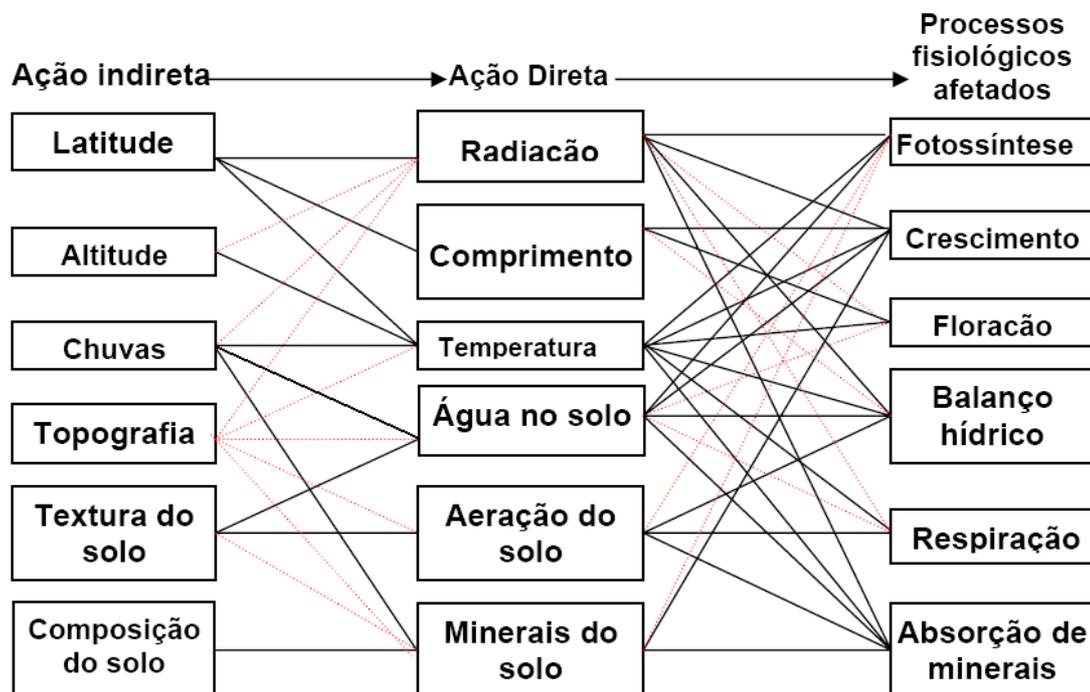


FIGURA 2 – Classificação dos fatores de produção vegetal que afetam direta e indiretamente os processos fisiológicos das plantas, idealizada por Castro em 1999. Linhas cheias correspondem a uma ação mais efetiva do que as linhas interrompidas. Fonte: MARCHIORI (2004).

SEGATO *et al.* (2006) relacionam variáveis ambientais, de manejo e genéticos às fases do ciclo fenológico da cana-de-açúcar. Considerando somente as ambientais, a brotação e o enraizamento são influenciados pelas variáveis: temperatura, umidade relativa do ar, doenças, pragas, plantas daninhas, textura e estrutura do solo. O perfilhamento é influenciado pelas variáveis: radiação solar, temperatura, umidade, aeração, vento, doenças, pragas e plantas daninhas. E a maturação é influenciada pelas variáveis: temperatura, umidade, vento, pragas, doenças e características do solo.

2.2.1 RADIAÇÃO, LUMINOSIDADE E ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR

O Sol é a principal fonte de energia às plantas, com maior intensidade no equador e diminuindo com a mudança do ângulo de incidência, até chegar aos pólos. Ao chegar na atmosfera a energia solar é transmitida por três processos: a condução, de uma molécula para outra; a convecção, através do movimento de massas fluidas pela diferença de densidades (ar ou água, por exemplo); e pela radiação, que se trata da transferência do calor de um objeto para outro sem contato entre eles, através de ondas eletromagnéticas (MOTA, 1986).

A energia radiante que incide sobre os materiais é, por sua vez absorvida, refletida ou transmitida. Essa energia é composta de um conjunto de radiações com comprimentos de onda de 0,2 a 4 μm , compondo o espectro solar.

As radiações ultravioletas são em parte absorvidas nas camadas superiores pelo oxigênio e pelo ozônio, e as infravermelhas são em parte absorvidas pelo vapor d'água e gás carbônico. Quando o céu está nublado o extremo infravermelho é em grande parte absorvido pelo vapor d'água e o extremo ultravioleta é completamente dispersado (CENTENO 2004).

MARTINS *et al.* (2007), estudando o mapeamento de energia solar no Brasil entre os anos de 1995 e 2005, constataram que a região Sul além de apresentar os menores valores de irradiação solar global, tem a maior variação inter-sazonal de irradiação, devido às características de clima temperado e a influência de sistemas frontais, que contribuem com o aumento da nebulosidade (FIGURA 3). Segundo GRIMM (2011), do total de radiação solar que chega no

topo da atmosfera, 6% é espalhado diretamente para o espaço, 20% é refletido pelas nuvens, 19% é absorvido pelas nuvens, 4% é refletido pela superfície, 26% chega á superfície após espalhamento e 25% chega diretamente à superfície terrestre. MOTA (1986), afirma que as nuvens podem refletir à atmosfera até 25% da radiação solar extraterrestre total incidente.

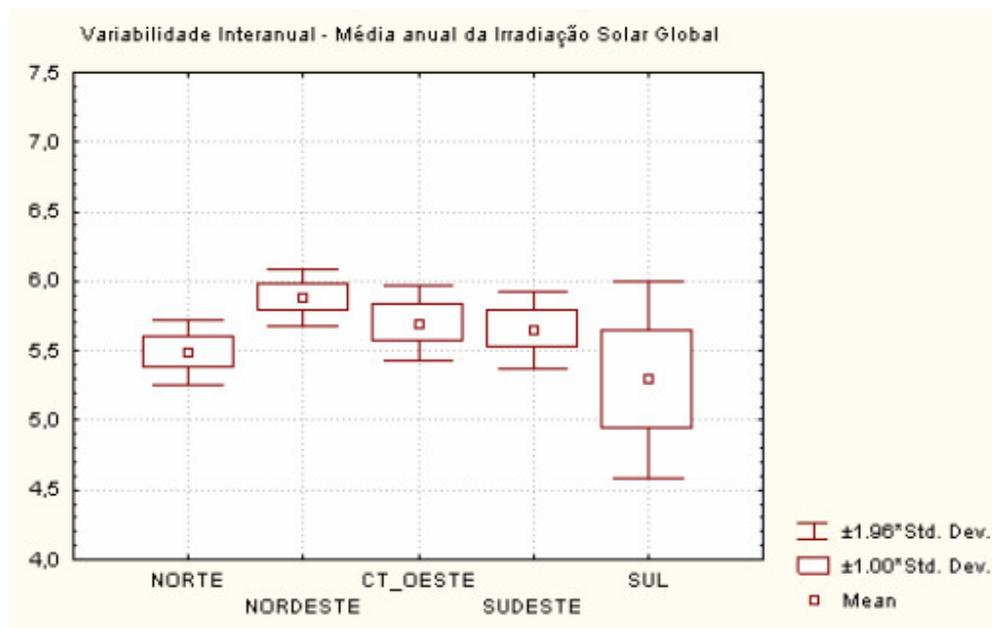


FIGURA 3 – Variabilidade da media anual de irradiação solar global no período 1995 a 2005 de cada uma das regiões do Brasil, em kW.h.m⁻². Fonte: MARTINS (2007).

Ainda segundo MOTA (1986), o espectro é dividido em oito faixas, segundo efeitos específicos sobre os vegetais:

1^a faixa: Radiações com comprimento de onda maior que um micrón. Não causam danos à planta e são por ela absorvidas. São aproveitadas sob a forma de calor sem que haja interferência com os processos biológicos.

2^a faixa: Radiação entre 1 e 0,72 μm . Esta é a região que exerce efeito sobre o crescimento das plantas. O trecho mais próximo a 1 μm é importante para o fotoperiodismo, germinação da semente, controle de floração e coloração do fruto.

3^a faixa: Radiação entre 0,72 e 0,61 μm . Esta região espectral é fortemente absorvida pela clorofila. Gera forte atividade fotossintética, apresentando em vários casos também forte atividade fotossintética.

4^a faixa: Radiação entre 0,61 e 0,51 μm . É uma região espectral de baixo efeito fotossintético e de fraca ação sobre a formação da planta. Corresponde à região verde do espectro.

5^a faixa: Radiação entre 0,51 e 0,40 μm . Esta é essencialmente a região mais fortemente absorvida pelos pigmentos amarelos e pela clorofila. Corresponde ao azul violeta do espectro e é também região de grande atividade fotossintética, exercendo ainda vigorosa ação na formação da planta.

6^a faixa: Radiação entre 0,40 e 0,315 μm . Esta faixa exerce efeitos de formação. As plantas tornam-se mais baixas e as folhas mais grossas.

7^a faixa: Radiação entre 0,315 e 0,28 μm . É prejudicial à maioria das plantas.

8^a faixa: Radiação com um comprimento de onda mais curto que 0,28 μm . Mata rapidamente as plantas.

A cana-de-açúcar é uma gramínea tropical com alta eficiência fotossintética e que alcança elevados índices de área foliar (*IAF*), e tem a capacidade de absorver grande quantidade de radiação e de aproveitar altas intensidades luminosas. RODRIGUES (1995) escreve que com elevadas taxas de radiação, os colmos são mais grossos, mais curtos, as folhas são mais longas e mais verdes e o perfilhamento mais intenso. Em fotoperíodos de 10 a 14 horas o colmo é mais alongado, e em fotoperíodos entre 16 e 18 horas são encurtados.

A luminosidade está diretamente ligada ao processo de síntese fotossintética, cuja fonte de energia é a radiação solar. A redução na luminosidade determina menor armazenamento de açúcares e acumulação de amido nas folhas, prejudicando a eficiência das plantas de cana-de-açúcar (MARCHIORI, 2004).

SEGATO *et al.* (2006) destacam que a cultura da cana-de-açúcar possui a habilidade de utilizar o máximo da luz solar para a fotossíntese, renovando suas folhas em cerca de dez dias, mantendo oito a dez folhas por colmo. OLIVEIRA (2004), estudando o crescimento da cana-de-açúcar no município de Paranaíba-PR, observou os valores máximos do *IAF* entre os meses de dezembro a abril, alcançando entre 4 a 6 $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$.

MARCHIORI (2004) escreve que, no seu estágio máximo de desenvolvimento, apresenta área foliar que corresponde a sete vezes a área de solo ocupada. Afirma que evidências experimentais indicam que a grande capacidade para produção de matéria orgânica reside na alta

taxa de fotossíntese por unidade de terreno, influenciada diretamente pelo *IAF*. Por outro lado, o longo ciclo de crescimento da cana-de-açúcar é que permite elevadas produções acumuladas de matéria seca. O *IAF* da cana-de-açúcar tem muita variabilidade devido às características das próprias cultivares, ao manejo da área, da época de plantio e das épocas de cortes (PICOLI, 2007).

2.2.2 TEMPERATURA

MOTA (1986) relembra que as plantas, como os animais, precisam regular sua temperatura para funcionar num ótimo de eficiência fisiológica. Isto é conseguido por meio de três mecanismos: radiação, transpiração e convecção. A radiação é quantitativamente mais importante, sendo dividida em radiação solar, que é absorvida de maneira diferente para cada comprimento de onda, e radiação termal, que é a energia emitida por qualquer objeto mais quente que o zero absoluto. A transpiração é o processo pelo qual as plantas livram-se do excesso de calor, convertendo água das folhas em vapor d'água, que consome grande quantidade de energia, resfriando a planta. A abertura e o fechamento dos estômatos, pela ação das células guarda, controlam a taxa de transpiração, estando normalmente fechados à noite e abertos durante o dia. Finalmente, a convecção é o mecanismo pelo qual a transferência de energia entre as plantas e a camada de ar que contorna sua superfície se dá diretamente de molécula a molécula, com o movimento do ar pela sua expansão. Tanto poderá esfriar uma planta quente como poderá esquentar uma planta fria, dependendo apenas se o ar é mais quente ou mais frio que a planta.

TERAMOTO (2003) e MARCHIORI (2004) consideram que a temperatura, das variáveis climáticas, é o mais importante para a produção de cana-de-açúcar. Sendo tropical, produz em regiões com temperatura de até 47 °C no verão, desde que irrigada. Temperaturas mais baixas (menores que 21 °C) diminuem o crescimento dos colmos e promovem o acúmulo de sacarose.

O crescimento das plantas depende do saldo de matéria seca acumulada pela fotossíntese, menos a perda por respiração, conhecido como taxa de fotossíntese líquida. As condições ideais

para a fotossíntese líquida são a combinação de altas temperaturas diurnas e baixas temperaturas noturnas, sendo desejado grande variação de temperatura (MOTA, 1986).

A fotossíntese ocorre nas folhas, durante o dia, e a respiração realiza-se em de toda a planta durante o dia e a noite. A taxa de respiração aumenta com a temperatura até um máximo que varia para diferentes plantas. A temperatura noturna influi mais no crescimento do que a diurna, sendo que quando as noites são frias, o desenvolvimento é lento e há maior concentração de açúcares. Para SEGATO *et al.* (2006), a brotação exige temperaturas altas, acima de 30 °C, e o crescimento vegetativo tem como condições mais favoráveis temperaturas entre 25 e 30 °C. Já RODRIGUES (1995), observa que a elevação de temperatura do ar e das raízes na época de maturação aumenta a quantidade de sacarose existente e transportada.

SCARPARI (2007), também alerta que, quando as noites são frias, o desenvolvimento é lento e normalmente há aumento na concentração de sacarose, entretanto, temperaturas noturnas abaixo de 10 °C diminuem a produção de piruvato, ortofosfato e malato nas folhas, deixando de favorecer o acúmulo de sacarose. Considera o intervalo de 10 a 25 °C como ideal para partição de fotoassimilados e translocação para as diversas partes da planta.

A faixa ótima para o crescimento está entre 25 °C e 35 °C. É praticamente nulo abaixo de 20 °C e acima de 38 °C, sendo bastante lento acima de 35 °C (REIS, 1981; RODRIGUES, 1995; MARCHIORI, 2004).

GOUVEIA *et al.* (2009) avalia que o aumento previsto para a temperatura nos próximos anos, devido às mudanças climáticas resultantes do efeito estufa, contribuirá para o incremento da produtividade da cana-de-açúcar no centro-sul do Brasil.

Segundo SCARPARI (2007), a taxa fotossintética aumenta com a temperatura até 30 °C, estabilizando-s entre 30 e 34 °C, decrescendo em temperaturas mais elevadas, devido ao fechamento dos estômatos com a perda de turgidez celular. Relata, por outro lado, que o decréscimo da temperatura do ar de 23 °C para 14 °C provoca queda de 84% na taxa fotossintética.

RODRIGUES (1995) relaciona a temperatura com a radiação solar, principalmente, nos primeiros estádios de desenvolvimento da cultura: “o prolongamento da fase juvenil, normalmente em condições de baixas temperaturas, ocorre em função da expansão relativa da razão da área foliar, em condições de períodos de recepção de alta radiação solar”.

Na região centro-sul a cultura está sujeita a geadas, com o congelamento de líquidos nos espaços intracelulares, rompimento de tecidos e precipitação de proteínas, que podem causar grandes prejuízos. MARCHIORI (2004), considera a geada o principal problema climático do Sul do Estado de São Paulo e Norte do Estado do Paraná (entre paralelos 22° e 24° S).

O tempo de exposição às baixas temperaturas também é importante. Irvine (1965; citado por RODRIGUES, 1995) observou que uma geada de $-6,1$ °C com duração de quatro horas, provocou danos semelhantes a uma de $-0,5$ °C que durou 48 horas.

Na carta de aptidão climática para o Brasil (EMBRAPA, 2009) são estabelecidas como regiões aptas, com condições satisfatórias para a cana-de-açúcar, as com temperatura média anual acima de 20 °C. Temperaturas médias anuais superiores a 24 °C, aliadas a deficiência hídrica nula, tornam a região inapta ao cultivo da cana-de-açúcar pela falta de uma estação de repouso.

RODRIGUES (1995) cita que plantas crescidas a campo e removidas para ambientes controlados a 17 °C, aumentaram o conteúdo de açúcares de 10 para 17% do seu peso verde em 90 dias, e que, inversamente, quando levadas a ambiente com temperatura constante de 30 °C sofreram perda de açúcares, com rápida reativação do crescimento vegetal. E se novamente levadas a ambiente com 17 °C, novamente há o acúmulo de açúcares.

Mas também ressalta a combinação da temperatura com elementos geográficos e microclimáticos influencia a produtividade, constatando que o conteúdo de sacarose também é função da latitude, insiste que valores mais elevados de sacarose são encontrados a 18° N e 18° S, sendo por este ponto de vista o fotoperíodo mais importante que a temperatura. No Irã, de 30 a 33° N de latitude, ocorrem altas temperaturas no verão com produção maior que na Louisiana e Flórida. O inverno é muito frio, sendo comum as geadas. A cana-de-açúcar cresce, nessas condições, a uma temperatura média anual de 15,6 °C, maturando à temperatura mínima de 2,5 °C, sendo definitivamente o fator temperatura mais importante que a luz solar, no Irã.

CAMPBELL *et. al.* (1998) estudaram o aparecimento de nós em duas variedades na Austrália, cultivadas por seis meses em ambiente controlado a 14, 18, 22 e 26 °C, e obtiveram correlação significativa entre a temperatura e a taxa de aparecimento de nós e folhas. MARCHIORI (2004) observa que vários autores consideram a temperatura como fator de maior importância na maturação fisiológica da cana-de-açúcar, porque afeta a absorção de água e

nutrientes através do fluxo transpiratório e, para que ocorra o acúmulo de sacarose, são necessárias oscilações de temperatura associadas a períodos de seca moderada.

2.2.3 DISPONIBILIDADE DE ÁGUA E AR NO SOLO

MARCHIORI (2004) afirma que déficits internos de água das plantas envolvem redução da fotossíntese, o fechamento dos estômatos, hidratação reduzida do protoplasma, resistência na difusão de CO_2 entre a atmosfera e os cloroplastos, e perda de água utilizada na translocação de solutos pelo tecido condutor. Já o excesso de água no solo altera processos químicos e biológicos, limitando a quantidade de oxigênio e acelerando a formação de compostos tóxicos à raiz.

SALASSIER (2009), discorrendo sobre o manejo da irrigação na cultura da cana-de-açúcar, afirma que nos dois primeiros estágios (emergência e perfilhamento) são os mais críticos quanto ao déficit hídrico, que o estágio de crescimento vegetativo responde à lâmina de água, mas o déficit hídrico não causa tantos prejuízos quanto os dois primeiros, e que o quarto estágio (maturação) responde positivamente ao déficit hídrico. Entretanto o consumo de água é maior no terceiro estágio, em função do maior índice de área foliar – *IAF*. Observou, em experimento realizado no Estado do Rio de Janeiro, que à medida que se aumentou a quantidade de água aplicada houveram incrementos positivos de produtividade, até atingir um valor máximo, por volta de 1500 mm. A partir daí a produtividade passa a decrescer, devido ao excesso de água no solo, à baixa aeração na zona radicular e lixiviação de nutrientes.

Quando o solo está exaurido de O_2 , os microorganismos anaeróbicos obtêm energia por redução, produzindo substâncias tóxicas às plantas. Mesmo a condição hipóxica do solo (parcialmente deficiente de O_2) já afeta a respiração das raízes, que passam a realizar o metabolismo fermentativo do piruvato, através de produção de etanol ou lactato, com baixa eficiência na produção de moléculas de ATP (TAIZ e ZEIGEL, 2009).

COSTA LIMA (2004), discorrendo sobre as principais alterações nos solos cultivados com cana-de-açúcar, alerta que a compactação é uma das principais alterações físicas, resultado da força exercida sobre a camada superior do solo pelo tráfego de máquinas, aumentando a

densidade do solo e impedindo a penetração das raízes. Observa que solos argilosos são mais suscetíveis à compactação do que os arenosos, apesar de ter relatado acréscimos de densidade, independentemente da textura e reduções da macroporosidade a níveis críticos em alguns casos. Verificou, também, que a compactação diminui a quantidade de macroporos, responsáveis pela difusão do oxigênio (O₂) e do dióxido de carbono (CO₂), causando deficiência do primeiro e excesso do segundo, paralisando o crescimento das raízes e podendo causar sua morte.

Para TERAMOTO (2003), a cana-de-açúcar encontra suas melhores condições quando ocorre um período quente e úmido, com intensa radiação solar durante a fase de crescimento, seguido de um período seco durante as fases de maturação e colheita. Considera a disponibilidade de água para a planta da cana-de-açúcar o principal fator climático causador de variabilidade, ano a ano, de sua produtividade.

SOUZA e GALVANI (2010), em estudo desenvolvido na região de Campo Mourão/PR, observaram que as oscilações na condição anual do clima alteram os resultados de produtividade da cana-de-açúcar, mas que, se o regime hídrico, acima ou abaixo da média, não atingir determinadas fases críticas da cultura, os rendimentos não apresentam quebra. MARCHIORI (2004) afirma que a cana-de-açúcar requer boa quantidade de umidade no solo somente no período de crescimento, tendo papel fundamental na turgescência, na translocação e na pressão de crescimento. Porém, durante o período de maturação, o ideal é que haja redução na água disponível, não drasticamente, mas o suficiente para reduzir o crescimento e induzir a maior concentração de açúcar nos colmos.

Segundo RODRIGUES (1995), o regime de água eficiente para promover o amadurecimento da cana-de-açúcar é aquele que apresenta maior restrição ao crescimento, no entanto mantendo suprimento suficiente para síntese, transporte e armazenamento do açúcar. Cita que, em trabalho com suprimento variável de água, observou-se que: a) o aumento dos açúcares redutores na lâmina foliar e na bainha e diminuição desses açúcares nos colmos, nas plantas deficientes em água; b) teores de sacarose e polissacarídeos elevam-se em folhas de plantas deficientes em água; e c) ocorre a síntese de outros polissacarídeos além do amido em folhas, bainhas e colmos imaturos. Conclui-se que plantas não deficientes em água, aumentam a taxa fotossintética e o transporte de açúcares, direcionando-os para o crescimento”.

CLAYTON *et al.* (2009), analisando o rendimento de açúcar e álcool da cana-de-açúcar submetida a diferentes níveis de irrigação por inundação, concluíram que o aumento da lâmina de irrigação resultou em acréscimo na produção de colmos, no rendimento bruto de açúcar e no rendimento bruto de álcool. DALRI e CRUZ (2008) afirmam que em todas as pesquisas com cana-de-açúcar envolvendo culturas de sequeiro e irrigada, as conclusões são unânimes em afirmar o incremento de produção da cultura irrigada em relação à cultura sem irrigação. Trabalhando com irrigação por gotejamento em Botucatu-SP, observaram incremento de produção de colmos de 43 e 67% na soca e ressoça, respectivamente.

RODRIGUES (1995), cita que, em condições de campo, a “cana planta” consome o máximo de 4,5 mm/dia de água, o mínimo de 2,3 mm/dia e o consumo médio de 3,3 mm/dia. Já a “cana soca” consome 4,4; 2,2 e 3,2 mm/dia, respectivamente.

MAULE *et al.* (1999), analisando dez cultivares de cana-de-açúcar no Noroeste do Estado de São Paulo, observaram produtividades em média 28% menores sempre que plantadas num Planosolo com excesso de água no perfil, comparadas com as mesmas cultivares plantadas num solo Podzólico Vermelho Amarelo com boas condições de drenagem. Atribuíram, além de elementos químicos, a presença de excesso de água na região das raízes como causa dessa diferença. Baixos potenciais de água (déficit hídrico) e elevados potenciais (excesso de água) mostram efeitos parecidos, com murchamento das folhas, secamento das bainhas, amarelecimento das folhas e parada do crescimento (RODRIGUES,1995).

DANTAS NETO *et al.* (2006), analisando a resposta da cana-de-açúcar à irrigação no município de Capim-PB, concluíram que a lâmina de irrigação aplicada nos primeiros seis meses à cana-de-açúcar de ciclo anual influenciou positivamente o crescimento numa proporção linear, e o teor de sacarose (POL) numa proporção quadrática. MOURA *et al.* (2005), também em Capim-PB, correlacionando irrigação e produtividade da cana-de-açúcar, registram que o regime irrigado possibilitou aumento de 13 e 22% no diâmetro e número de internódios do colmo, e o peso médio do colmo passou de 994,7 g para 1059,58 g com a irrigação.

ASSIS *et al.* (2004) citam que a ocorrência de déficit hídrico que proporciona maiores diminuições nas produtividades da “cana planta” é no período de máximo desenvolvimento, e na “cana soca” no estágio inicial de crescimento.

DIAS *et al.* (1999), correlacionando produtividade da cana-de-açúcar com dados de clima e solo na região noroeste do Estado de São Paulo, observaram que o regime hídrico foi mais influenciado pelas características físicas do solo do que pelas características climáticas. Concluíram que características químicas, físicas e hídricas do horizonte B apresentaram correlações significativas com a produtividade, sendo que na análise de regressão linear múltipla, o procedimento “stepwise” selecionou o Ca do horizonte B como a variável que mais influenciou.

Devido à diferença entre classes de solos, a produtividade é menos afetada por déficit hídrico em solos argilosos do que em solos arenosos devido à diferença na capacidade de retenção de água destes solos (PICOLI, 2007). Com relação à temperatura, solos úmidos diminuem os efeitos das geadas por perderem menos calor, ocorrendo o contrário com os solos com baixa capacidade de água disponível.

SCARPARI (2007) observa que, além da temperatura, a umidade do solo também pode influenciar a maturação. Para ocorrer o processo de maturação fisiológica e o acúmulo de açúcar em locais onde não há redução sazonal de temperatura do ar, a cultura deve ser submetida a uma seca moderada. Essas variáveis restringem a alongação dos internódios, resultando no aumento do conteúdo de sacarose pela reduzida demanda de fotoassimilados nas regiões meristemáticas.

Comenta que o conteúdo de sacarose depende da temperatura, disponibilidade de água do solo, radiação solar e biomassa do colmo. Cita que déficit hídrico superior a 120 mm anuais reduz grandemente o acúmulo de biomassa e que déficit hídrico entre 130 e 145 mm anuais afetam o acúmulo de sacarose no colmo, mas que o limiar de quanto seria o déficit hídrico ideal para não interferir no acúmulo de sacarose ainda não está devidamente esclarecido.

Na carta de aptidão climática para o Brasil (CAMARGO *et al.*, 1977) são estabelecidas como regiões aptas, com condições satisfatórias para a cana-de-açúcar, as com deficiência hídrica anual inferior a 200mm, e inaptas por excedente hídrico as regiões com valores acima de 400mm anuais. Por outro lado estabelece regiões marginais e inaptas por falta de estação de repouso por frio ou seca, com temperatura anual média superior a 24 °C e deficiência hídrica nula. Entre 200 e 400mm anuais de deficiência hídrica recomenda suplementação com irrigação.

RODRIGUES (1995) observa que para a “cana planta” o pico de absorção de nutrientes ocorre a partir dos nove meses, e para a “cana soca” o pico de absorção de nutrientes ocorre até

os seis meses de idade. Afirma que a sacarose é o componente principal translocado na cana-de-açúcar. Sintetizada nas folhas é rapidamente translocada para a bainha e para o colmo, podendo, depois, ser metabolizada em parte para formação de novos tecidos.

ASSIS *et al.* (2004), escrevem que até o quinto mês de idade a absorção de nutrientes pela cana-de-açúcar é pequena, aumentando intensamente a partir daí em diante, chegando ao nono mês contendo 50% de potássio, cálcio e magnésio e pouco mais de 30% de nitrogênio, fósforo e enxofre do total absorvido durante o ciclo vegetativo; do nono ao décimo segundo mês a absorção de nitrogênio é ainda mais intensa, acumulando 90% do total extraído pela planta.

MARCHIORI (2004), relata que as folhas de cana-de-açúcar supridas com água sintetizam dez vezes mais sacarose que folhas desprovidas de água e que a atividade fotossintética não cessa no ponto de murcha, mas permanece extremamente reduzido abaixo dele. Cita que a cana-de-açúcar necessita de 1.200 a 1.500 mm de chuva bem distribuída durante o ano, sendo ideal que durante a época de maturação a precipitação seja menor que na época de crescimento pleno. SCARPARI (2007), relaciona a senescência foliar com o conteúdo de água no solo, sendo acelerada em períodos de stress hídrico.

Com relação à capacidade de água disponível (*CAD*) de cada solo, TERAMOTO (2003) declara que a cana-de-açúcar tem uma grande adaptabilidade, podendo ser cultivada tanto em solos arenosos, que apresentam como limitações a baixa *CAD* e alta taxa de perda de nutrientes por lixiviação, como em solos argilosos, que podem apresentar uma drenagem mais lenta, propiciando menor aeração da zona radicular e alta suscetibilidade à compactação. Cita que os solos argilosos possuem maior potencial.

2.2.4 EVAPOTRANSPIRAÇÃO

A radiação solar intervém diretamente sobre o crescimento e desenvolvimento das plantas e, indiretamente, pelos efeitos no regime térmico, sendo fundamental à produção de biomassa. É igualmente importante no condicionamento da evaporação e da evapotranspiração. Em regiões úmidas a radiação solar global pode apresentar estreita relação com a evapotranspiração (MARCHIORI, 2004)

A evapotranspiração influencia diretamente o balanço hídrico, que é a contabilização da água do solo, cujo conhecimento é muito importante, tanto para a determinação imediata da necessidade hídrica dos vegetais, quanto para a tomada de decisão em projetos agrícolas, sendo um indicador do potencial climático de uma região para uma certa cultura (MOTA, 1986; TERAMOTO, 2003).

Quando as necessidades hídricas da cultura são atendidas plenamente, a evapotranspiração real (*ETR*) é igual à evapotranspiração da cultura (*ETc*), não ocorrendo perdas de produtividade (TERAMOTO, 2003). DOOREMBOS e KASSAM (1994) propuseram um modelo agrônomico para estimar a produtividade das culturas, baseado na penalização da produtividade máxima em função do estress hídrico, dado pela relação entre a evapotranspiração real (*ETR*) e a evapotranspiração potencial máxima da cultura (*ETc*), limitado por um fator de resposta à produtividade (*ky*), cujo valor é dado em função da cultura e do seu estágio de desenvolvimento (PICOLI, 2007).

MOTA (1986) escreve que a relação entre a evapotranspiração real e a potencial permite comparar regiões diferentes em anos diferentes. Cita como exemplo estudo realizado no Havai, relacionando disponibilidade de água e rendimento da cana-de-açúcar, utilizando-se da evapotranspiração relativa, demonstrando que déficit de água na época de crescimento vegetativo proporcionam dano maior do que se ocorrer mais tarde.

FRIZZONE (2001) estudando a viabilidade econômica de irrigação suplementar em cana-de-açúcar, trabalhou com a equação que estima o aumento da produtividade relativa, determinada por Scardua em 1985, a partir da evapotranspiração relativa (*ETR/ETc*) em três períodos da cultura, mostrando a importância desse fator, que pode ser facilmente calculado a partir do balanço hídrico:

$$\hat{Y} = 0,0620 + 0,6610 \cdot x_1 + 0,2762 \cdot x_2 - 0,0306 \cdot x_3 \quad (1)$$

sendo:

$Y = (1 - \text{Produtividade real} / \text{Produtividade máxima})$, estimado em $T \cdot ha^{-1}$;

$x_1 = (1 - ETR / ETc)$ do 1º estágio (perfilhamento);

$x_2 = (1 - ETR / ETc)$ do 2º estágio (crescimento vegetativo);

$x_3 = (1 - ETR / ETc)$ do 3º estágio (maturação).

2.2.5 GRAUS-DIA

O método de graus-dia corresponde a área compreendida entre a curva da temperatura base da cultura e a curva da temperatura média diária, abaixo da qual o desenvolvimento é considerado nulo. Segundo MARCHIORI (2004) é o melhor método para correlacionar o desenvolvimento vegetal e a temperatura ambiente. Estabelece a temperatura basal para a cana-de-açúcar em torno de 20 °C.

SCARPARI (2007) revisa vários trabalhos que determinam a temperatura basal da cana-de-açúcar entre 18 e 20 °C. Afirma que o comportamento do crescimento foliar durante o ciclo da cultura pode ser relacionado com o acúmulo de graus-dia e ao déficit hídrico. Ainda refere-se a Inman-Bamber, que relacionou a soma térmica com o aparecimento de perfilhos, atingindo um pico com 500 °C.d e ocorrendo o começo da senescência dos perfilhos com 1500 °C.d.

MOTA (1986), porém, aponta imperfeições no conceito de graus-dia: a) A temperatura base varia com o estágio de desenvolvimento da planta; b) Temperaturas noturnas e diurnas têm importâncias diferentes no desenvolvimento das plantas; c) A resposta das plantas não é linear em todas as faixas de temperatura; d) Altas temperaturas podem ser prejudiciais, sendo que o método dá pesos crescentes desconsiderando eventuais efeitos deprimentes dessas altas temperaturas; e) Não diferencia uma combinação de primavera quente e verão frio de outra com primavera fria e verão quente; f) Nenhuma consideração é dada à variação de temperatura diurna, a qual é freqüentemente mais significativa do que o valor médio diário.

A constante térmica, por sua vez, é a quantidade de unidades de calor acumulada desde os primeiros dias até a maturação da planta, e também é influenciada por variáveis ambientais, como a fertilidade do solo, quando altos teores de N causam maior crescimento e atrasam a maturação, ao passo que altos teores de P a aceleram; altas populações de plantas podem retardar a maturação; solos arenosos aquecem-se mais rapidamente que argilosos; na primavera a temperatura do solo atrasa-se em relação à temperatura do ar; e solos pobremente drenados são mais frios que solos secos. Todos essas variáveis, ainda segundo MOTA (1986), influenciam o total de graus-dia acumulados desde a germinação até a colheita.

2.3 BALANÇO HÍDRICO COMO FORMA DE MONITORAR A ÁGUA DISPONÍVEL ÀS PLANTAS

O balanço hídrico surgiu da necessidade de se contabilizar as entradas e saídas de água que ocorre num ecossistema, baseando-se na aplicação do princípio físico de conservação da massa (SEDIYAMA, 1990). Assim, o balanço da água pode ser computado em bases diárias, semanais ou mensais (MOTA, 1986). Quanto à escala temporal, eles podem ser classificados em sequenciais e cíclicos. Os cíclicos utilizam dados médios de series históricas da região e são destinados a estudos climáticos; já os sequenciais são realizados para períodos menores e destinam-se ao manejo das culturas, contabilizando a condição hídrica local (GOMES, 2005).

O balanço hídrico pode ser representado pela equação geral:

$$P + I + O + AC + ES_E + DL_E - ET - DL_S + DP - ES_S = ARM \quad (2)$$

sendo:

P , a precipitação (mm);

I , a água de irrigação (mm);

O , o orvalho (mm);

AC , a ascensão capilar (mm);

ES_E , o escoamento superficial de entrada (mm);

DL_E , a drenagem lateral de entrada (mm);

ET , a evapotranspiração (mm);

DL_S , a drenagem lateral de saída (mm);

DP , a drenagem profunda (mm);

ES_S , o escoamento superficial de saída (mm);

ARM , o armazenamento de água no solo (mm).

A EQUAÇÃO 2 envolve vários componentes do ciclo hidrológico. Algumas são difíceis de serem medidas ou estimadas, em função da área de estudo que se pretende abordar, vários

métodos de cálculo foram propostos e se encontram na literatura visando equacionar a contabilização das entradas e saídas de água de um sistema.

Por sua simplicidade, o método de THORNTHWAITE e MATHER (1955) apresentou grande difusão na área agrícola, florestal e hidrológica (GOMES, 2005). A Secretaria de Estado da Agricultura e Abastecimento do Paraná utiliza o método de THORNTHWAITE e MATHER (1955) desde a década de 80 em boletins mensais de acompanhamento de dados meteorológicos e balanços hídricos de vinte núcleos regionais.

Segundo GOMES (2005), o balanço hídrico de THORNTHWAITE e MATHER (1955) é o método mais eficiente para quantificar o potencial hídrico de uma região, pois considera a interação entre elementos edáficos e climáticos. O fator edáfico interfere no armazenamento de água do solo e o climático, por sua vez, é representado pela precipitação pluvial e pela evapotranspiração. Mas, propositalmente, desconsidera alguns componentes do ciclo hidrológico, em função dos seguintes motivos:

- O orvalho representa uma contribuição pequena, com no máximo $0,5 \text{ mm.dia}^{-1}$ em locais úmidos e pode ser desprezado;
- O escoamento superficial de entrada e de saída, bem como a drenagem lateral de entrada e de saída, geralmente tendem a se anular;
- Como a variação de armazenamento de água ocorre na camada onde se encontra aproximadamente 80% do sistema radicular da planta em questão (profundidade efetiva), a drenagem profunda é contabilizada como excesso;
- A ascensão capilar pode ser desprezível em solos profundos;
- A água de irrigação representa uma prática de manejo que pode se adotada ou suprimida conforme a necessidade e não é considerada uma componente de natureza climática.

Como alguns componentes interferem muito pouco na quantidade de água que pode ser aproveitada pelas plantas, e em função do tipo de estudo a que se destina o balanço hídrico de THORNTHWAITE e MATHER (1955), pode-se afirmar que a precipitação e a evapotranspiração são os componentes principais para se estimar o armazenamento de água que se encontra disponível às plantas, em função das propriedades físico-hídricas do solo (capacidade de campo, ponto de murcha permanente, densidade do solo) e do estágio de desenvolvimento da cultura (profundidade do sistema radicular, fenologia, entre outros).

2.3.1 PROFUNDIDADE EFETIVA DAS RAÍZES DA CANA-DE-AÇÚCAR

SCARPARI (2007), fazendo revisão de vários trabalhos sobre a forma e distribuição das raízes da cana-de-açúcar, constatou que 89 a 92% das raízes da “cana planta” localizam-se até os 30 cm de profundidade, e que de 85 a 92% das raízes da “cana soca” localizam-se até os 40 cm de profundidade.

DUARTE (2009), estudando a distribuição das raízes de oito cultivares de cana-de-açúcar no Estado de Alagoas, apenas encontrou correlação entre a produtividade e a quantidade de raízes presentes nos primeiros 20 cm do perfil do solo analisado, com uma média de 49,38% de raízes até esta profundidade.

Segundo ASSIS *et al.* (2004), o sistema radicular da cana-de-açúcar pode atingir até 5 metros de profundidade, mas em áreas irrigadas, a água é retirada a, no máximo, 2 metros; a distribuição do sistema radicular apresenta cerca de 50%, em peso, nos primeiros 20 cm de profundidade, e 85% até os 60 cm, estando cerca de 55% das raízes concentradas num raio de 30 cm da touceira.

SEGATO *et al.* (2006) informam que o corte da cana-de-açúcar possibilita a renovação não só da parte aérea, mas também das raízes, sendo que na soqueira o sistema radicular é mais superficial, ficando cerca de 60% das raízes nos primeiros 30 cm de profundidade.

CINTRA *et al.* (2006), em estudos com adubação orgânica e verde, observou de 89 a 92% das raízes da cana-de-açúcar nos primeiros 60 cm.

IDO (2003), analisou o desenvolvimento das raízes de três cultivares de cana-de-açúcar em rizotron, na estação experimental da UFPR em Paranaíba – PR, com dois tipos de substratos, arenoso e argiloso. Após colheita da “cana planta” e da primeira “soca”, observou distribuição mais ou menos uniforme das raízes em todo o perfil, até dois metros de profundidade. Na cultivar RB855536, por exemplo, contabilizou uma média de 39% das raízes até 60 cm, 57% até 100 cm e 82% até 160 cm, em substrato arenoso; e 34% das raízes até 60 cm, 54% até 100 cm e 80% até 160 cm, em substrato argiloso.

Como os substratos do rizotron foram homogeneizados, corrigidos e fertilizados, observa-se que a maior concentração de raízes superficiais nas condições de produção a campo devem-se a problemas de acidez e fertilidade em profundidade, e pela compactação do solo decorrente da mecanização e tráfego pesado nas lavouras de cana-de-açúcar, conforme afirma COSTA LIMA (2004).

2.3.2 EVAPOTRANSPIRAÇÃO

O termo evapotranspiração foi utilizado na década de 40 para expressar a ocorrência simultânea dos processos de transpiração de água pela planta e a evaporação da água do solo e da superfície da planta (THORNTHWAITE, 1948). Segundo SOUZA (2004), fazendo um histórico, a partir do termo geral evapotranspiração foram desenvolvidos conceitos mais precisos, procurando definir qual a condição geral do local e a cultura de referência para a estimativa da evapotranspiração em questão:

- Em 1948, Thornthwaite introduziu o conceito de evapotranspiração potencial (ET_p) como sendo a quantidade de água evaporada e transpirada por uma vegetação em fase de crescimento ativo, sem restrição de água. Penman, em 1956, complementou incluindo a condição da cultura ser de porte baixo, com altura uniforme;
- Em 1971, Jensen definiu o conceito de evapotranspiração de referência (ET_o) como sendo a evapotranspiração máxima por uma cultura de alfafa com 0,3 a 0,5 m de altura e com 100 m de área tampão vegetada. Já Doorenbos e Pruitt, em 1977, consideraram evapotranspiração de referência como a quantidade de água evapotranspirada pela cultura de grama entre 0,08 a 0,15 m de altura e nas condições definidas por Penman. Smith, em 1991, aprimorando o conceito de ET_o , considerou a evapotranspiração de uma cultura hipotética, com altura de 0,12 m, albedo de 0,23 e resistência estomática de 69 s.m^{-1} com as mesmas condições descritas por Penman (condições fixas, próximas a um campo gramado);
- Em 1979, Doorenbos e Kassan definiram evapotranspiração máxima como aquela ocorrida numa cultura agrônômica em qualquer fase de desenvolvimento. Atualmente costuma-se chamar a evapotranspiração nessas condições de evapotranspiração da cultura (ET_c). Vários trabalhos

procuram definir os coeficientes de cultura (Kc) que correlacionem a evapotranspiração de referência com a evapotranspiração das culturas nas várias fases de crescimento.

— Em 1997, Pereira *et al.* definiram evapotranspiração de oásis (EO) como a condição de uma pequena área úmida rodeada por área seca; ou se a área tampão não é suficiente para eliminar os efeitos advectivos do calor sensível, que nessas condições, causam um aumento na evapotranspiração.

— Finalmente, evapotranspiração real (ETR) é conceituada como a evapotranspiração efetivamente medida numa superfície vegetada, sem qualquer condição imposta, segundo THORNTHWAITE (1948).

2.3.3 ESTIMATIVAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO

A evapotranspiração pode ser medida ou estimada. As medidas são obtidas por meio de equipamentos instalados em condições de campo. Os evapotranspirômetros coletam a água percolada, e os lisímetros medem a massa do solo úmido. As estimativas geralmente empregam o uso de modelos teóricos que consideram variáveis do clima, solo e da planta (CAMARGO e CAMARGO, 2000).

SOUZA (2004), cita que medidas da evapotranspiração diretamente a campo, por meio de lisímetros e evapotranspirômetros, constituem tarefa onerosa e trabalhosa, sendo geralmente utilizados somente no desenvolvimento de pesquisas e para calibrar os modelos teóricos nas diferentes condições climáticas existentes.

Os modelos teóricos de estimativa da evapotranspiração mais utilizados são baseados no balanço de energia e em métodos aerodinâmicos. Segundo SEDIYAMA (1990), esses métodos são derivados do método de Thornthwaite (1948), que considera medidas de temperatura e duração do fotoperíodo; do método de Penman (1956), baseados em princípios físicos; e em métodos que relacionam a evaporação em tanques de água com a evapotranspiração, inicialmente testados por Pruitt (1960) e atualmente muito utilizados para manejo de irrigação.

2.3.4 ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO SEGUNDO O MÉTODO DE THORNTHWAITE

O método de THORNTHWAITE (1948) foi desenvolvido de forma analítica ou dedutiva, comparando balanços hídricos climatológicos com excedentes hídricos registrados nas bacias hidrográficas próximas. Inicialmente desenvolveu os trabalhos nos Estados Unidos, e posteriormente, preparou balanços hídricos para diferentes partes do planeta (CAMARGO e CAMARGO, 2000). Como utiliza dados de fácil obtenção (temperatura média), o método de já foi largamente testado nas mais variadas condições de latitude, altitude e umidade (MOTA et al., 1986). SANDERSON (1948) testou o método em várias regiões do Canadá e BURGOS e VITAL (1951) testaram para várias localidades da Argentina, mostrando que para condições de climas frios e até glaciais o método fez boas estimativas.

No Brasil, MOTA *et al.* (1986) desenvolveu vários balanços hídricos para locais do estado do Rio Grande do Sul e CAMARGO e CAMARGO (1983) testaram o método para 19 localidades paulistas, considerando-o adequado para essas regiões. Já para climas áridos, o método de Thornthwaite não funciona tão bem, tendo sido testado por Doorenbos e Pruitt em 1975 na localidade de Davis – Califórnia e por Stanhill em 1961 na região de Negev – Israel, constatando que os resultados estimados foram prejudicados pelo fato de não considerar o efeito da advecção de regiões vizinhas, chamado efeito oásis (citados por CAMARGO e CAMARGO, 2000).

CAMARGO e CAMARGO (2000), após revisão de vários métodos de estimativa de evapotranspiração, concluem que o método de Thonthwaite é satisfatório para regiões úmidas, mas a superestima para condições de super-umidade e a subestima em regiões áridas.

No Estado do Paraná, a evapotranspiração de referência estimada pelo método de THORNTHWAITE (1948) é utilizada pelo Departamento de Economia Rural da Secretaria de Estado da Agricultura e do Abastecimento, como um dos dados de entrada do balanço hídrico, para monitoramento climatológico, apoio das atividades de previsão de safras, acompanhamento conjuntural agrícola, acompanhamento do valor bruto da produção – VBP e como subsídio à assistência técnica oficial e privada.

2.4 INFLUÊNCIA DOS EVENTOS EL NIÑO E LA NIÑA SOBRE O CLIMA DO PARANÁ

“El Niño” (*EN*) e “La Niña” (*LN*) são eventos climáticos que têm origem em alterações no sistema oceano-atmosfera do Oceano Pacífico Tropical, os quais têm conseqüências em todo o planeta, com o aumento de episódios extremos. O evento refere-se à combinação de dois mecanismos: o “El Niño” representa o componente oceânico e a oscilação sul (*OS*) representa o componente atmosférico, que expressa a correlação inversa existente entre a pressão atmosférica nos extremos leste e oeste do Oceano Pacífico. Na realidade, o evento climático “El Niño” oscilação sul (*ENOS*) faz parte de uma variação irregular nas condições normais do oceano e da atmosfera na região do Pacífico Tropical. Um extremo dessa variação é representado pelo “El Niño”, quando há o aquecimento das águas simultaneamente com a diminuição da pressão atmosférica no Pacífico Leste, e o outro extremo é representado pelo “La Niña”, com o resfriamento das águas e aumento na pressão atmosférica no Pacífico leste (GRIMM, 2009).

Nos eventos fortes de *EN* a temperatura do mar na região de influência pode subir de 2 °C a 5 °C, enquanto que eventos fortes de *LN* podem levar a diminuição da temperatura do mar de 1 °C e 4 °C na mesma região. BERLATO e FONTANA (2003) classificaram trimestres com evento climáticos *EN* e *LN* fracos, moderados e fortes, desde o ano de 1950 até o ano de 2000. Posteriormente tal classificação foi complementada até o ano de 2008 (anexo VI) por WALTRICK (2010).

Quando ocorre “El Niño”, há um aquecimento anormal das águas superficiais e sub-superficiais do Pacífico Equatorial central-leste e o enfraquecimento dos ventos alísios, que sopram dos trópicos para o Equador. Já quando ocorre “La Niña”, observa-se a diminuição da temperatura no Oceano Pacífico equatorial central-leste e aumento dos ventos alísios.

Afetam a quantidade de chuva em várias regiões do planeta, causando impacto sobre a agricultura e sobre o gerenciamento de recursos hídricos (TEDESCHI, 2008). No sul do Brasil os eventos têm grande influência, principalmente na primavera, provocando anomalias positivas de precipitação durante *EN* e negativas durante *LN*. Anomalias positivas de precipitação também são observadas no outono e inverno do ano seguinte à ocorrência de *EN*, principalmente quando o evento se estende por muito tempo (GRIMM, 2004).

Segundo BERLATO e FONTANA (2003), durante o EN as frentes frias vindas do sul ficam estacionadas sobre a região sul do Brasil, causando precipitação abundante na primavera do ano em que ocorre o evento e precipitação acima do normal no final do outono e início do inverno do ano seguinte.

Temperatura e precipitação tendem a ser positivamente correlacionadas no sul do Brasil, afetadas pela advecção, por ventos quentes vindos do norte e por ventos frios vindos do sul (GRIMM, 2009). Já o evento LN, segundo os mesmos autores, causa passagens rápidas dessas frentes frias sobre o sul do Brasil, causando diminuição da precipitação, principalmente na primavera e início do verão, e tendência de temperaturas abaixo da média na primavera no estado do Rio Grande do Sul.

O IAPAR (2010), estudando as influências dos dois eventos no clima do Paraná indica, em geral, um aumento da precipitação nos meses de outubro, novembro, abril e maio quando ocorre *EN*; e seca nos meses de outubro e novembro, quando da ocorrência de *LN*.

Porém, quando se analisam as regiões paranaenses em separado, o mesmo estudo indica que a ocorrência de *EN* causa: seca no Noroeste em setembro; muita chuva no Nordeste em outubro; chuva em todo o estado em novembro; chuva no centro e oeste paranaense em março; chuva em todo o estado em abril; e chuva no centro e leste em maio. Já a ocorrência de *LN* no Paraná, ainda segundo o IAPAR, acarreta: seca generalizada no estado em novembro; janeiro e fevereiro chuvosos em toda a faixa central; chuva generalizada em todo o estado em abril; e chuva em toda a faixa norte em junho.

WALTRICK (2010), analisando a erosividade das chuvas no estado do Paraná durante os eventos *EN* e *LN*, concluiu que o potencial erosivo é influenciado por ambos, sendo 40 a 100% maior nos períodos de *EN*, e de 10 a 50% menor nos períodos de *LN*. Segundo o mesmo estudo, os meses mais influenciados pelo *EN* no Paraná são abril, maio, junho e novembro com aumento da precipitação; e os meses mais influenciados pelo *LN* são julho, outubro e novembro, com diminuição da precipitação.

O mês de novembro é o mês mais crítico tanto num caso como no outro, com maiores anomalias de precipitação. As regiões mais afetadas são a sudoeste e oeste, com aumento de erosividade na ocorrência de *EN*, justamente na época de plantio das lavouras de verão, quando

grande parte do solo está descoberto; e diminuição da erosividade quando da ocorrência de *LN*, com seca nessa mesma época, prejudicando a germinação.

GRIMM (2009) escreve que o efeito do *ENOS* não é tão forte sobre a temperatura quanto sobre a precipitação. No sul do Brasil o efeito mais significativo se dá no inverno, com anomalias positivas quando ocorre *EN* e anomalias negativas quando ocorre *LN*, com variação de até 2 °C.

A FIGURA 4 ilustra a dinâmica que envolve a ocorrência dos eventos “El Niño” e “La Niña”.

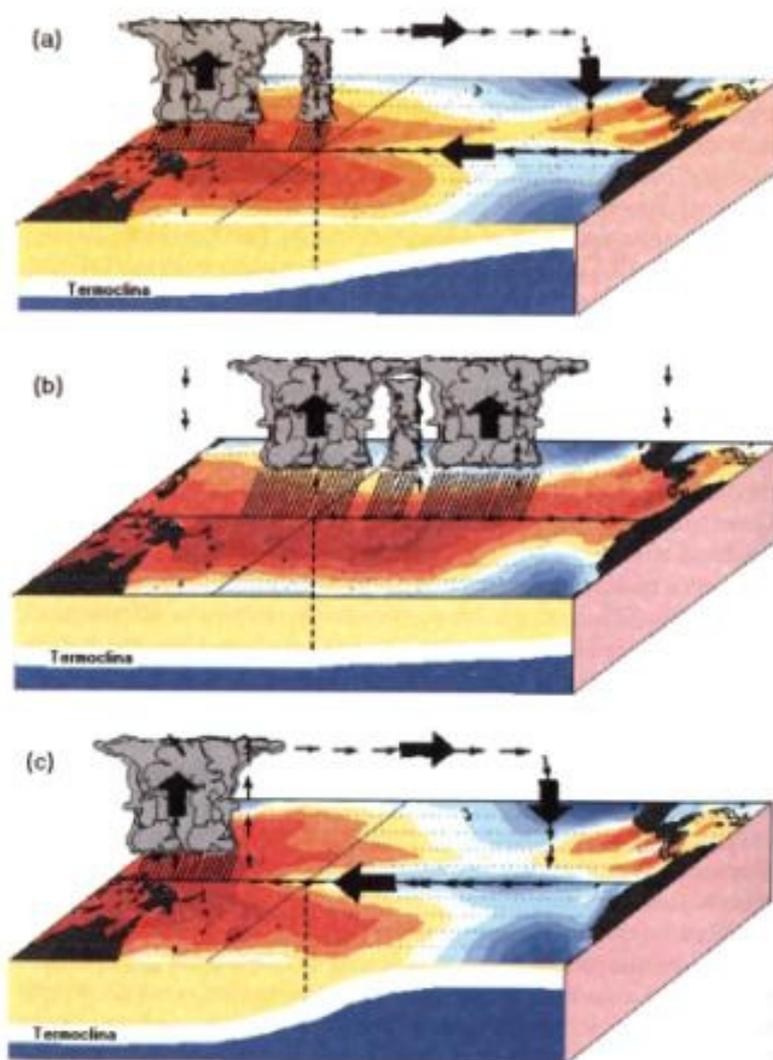


FIGURA 4 – Condições oceânicas a atmosféricas no Oceano Pacífico tropical no final da primavera e verão do Hemisfério Sul em situação normal (a), El Niño (b) e La Niña (c). Fonte: BERLATO e FONTANA (2003) e OLIVEIRA (1971).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 ESCOLHA DOS MUNICÍPIOS PARANAENSES ESTUDADOS

A partir dos municípios com maior produção de cana-de-açúcar na safra 2008, foram escolhidos cinco municípios, representativos das principais regiões produtoras do Estado: dois municípios da região Noroeste (Norte Pioneiro), dois municípios da região Nordeste (Norte Novíssimo) e um município da região Centro-Oeste.

Os critérios para a escolha foram:

- Estar entre os vinte e cinco municípios com maior produção no Estado (TABELA 1);
- Existir, com algum grau de proximidade, uma estação meteorológica com dados disponíveis dentro da série histórica de interesse (1990 a 2008), e consistidos pela SEAB;
- Possuir solos de interesse agrícola para a cana-de-açúcar, com características físicas uniformes dentro do município, para permitir a correta parametrização do balanço hídrico.

A partir dos critérios estabelecidos, foram escolhidos os seguintes municípios para o estudo:

No Norte Pioneiro (Nordeste do estado): Cambará e Jacarezinho;

No Norte Novíssimo (Noroeste do estado): Paranavaí e Cruzeiro do Oeste;

Na região Centro-Oeste: Engenheiro Beltrão.

3.2 CÁLCULO DO BALANÇO HÍDRICO MENSAL

Foram realizadas estimativas da água disponível no solo e da evapotranspiração a partir do balanço hídrico mensal, segundo a metodologia de THORNTHWAITE e MATTER (1955),

calculado para cada um dos cinco municípios, no período de 1990 a 2008. Para o cálculo do balanço hídrico mensal foram levantados os seguintes dados: precipitação diária; profundidade efetiva das raízes da cultura; capacidade de água disponível (*CAD*) do solo; latitude do local estudado; coeficiente de cultivo da cana-de-açúcar (*Kc*) para correção da evapotranspiração de referência (*Eto*); temperaturas diárias mínima, máxima, das 9:00 e das 21:00 horas.

A estimativa da evapotranspiração potencial foi ajustada para um valor mensal, conforme o mês considerado e a latitude da estação meteorológica, segundo os fatores de correção adotados por MOTA (1986).

Para as estimativas do armazenamento (*ARM*) e do negativo acumulado (*L*) mensal de água disponível, para solos com diferentes *CAD*, foram utilizadas as equações exponenciais de THORNTHWAITE e MATTER (1955), citadas por GOMES (2005):

$$L = -CAD \cdot \ln\left(\frac{ARM}{CAD}\right) \quad (3)$$

$$ARM = CAD \cdot e^{\left(\frac{-L}{CAD}\right)} \quad (4)$$

sendo:

L o negativo acumulado (mm);

CAD a Capacidade de Água Disponível (mm);

ARM o armazenamento de água no solo (mm).

O cálculo do balanço hídrico foi realizado com o programa de agrometeorologia do Departamento de Economia Rural da SEAB, desenvolvido em linguagem Clipper 5.2 por ANDRETTA (1990), alterado com os dados relativos à cana-de-açúcar (com diferentes valores de *Kc* para cada fase) e tipos de solos estudados (com diferentes valores de *CAD* para cada tipo de solo).

3.2.1 PRECIPITAÇÃO E TEMPERATURAS DIÁRIAS

Os valores da precipitação e temperaturas foram coletados diariamente nas estações meteorológicas do Instituto Agrônômico do Paraná – IAPAR e do Sistema Meteorológico do Paraná – SIMEPAR mais próximas dos municípios selecionados, os quais foram consistidos pelo setor de Agrometeorologia do DERAL / SEAB, e armazenados em banco de dados.

3.2.2 CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO DE ÁGUA NOS SOLOS DOS MUNICÍPIOS SELECIONADOS

A capacidade de água disponível (*CAD*) é definida como a quantidade máxima de água retida entre o ponto de murcha permanente e a capacidade de campo de cada solo. O valor da respectiva *CAD* para cada tipo de solo foi estimado a partir da caracterização dos principais grupos de solos do Estado, realizado por HAMAKAWA (1994), utilizado pelo IAPAR para estudos de zoneamento agrícola e previsão de safras de várias culturas, com os seguintes valores: solo com textura argilosa: *CAD* = 12% do volume ; solo de textura média: *CAD* = 10% do volume; e solo com textura arenosa: *CAD* = 7% do volume.

A profundidade efetiva explorada pelas raízes de cana-de-açúcar considerada foi de 60 cm, resultando numa capacidade máxima de água disponível (*CAD*) para solos arenosos de 42 mm, e para solos argilosos de 72 mm. Os solos com interesse agrícola para a cana-de-açúcar nos municípios selecionados, segundo levantamento de solos da EMBRAPA (2008) estão relacionados na TABELA 1.

Para os solos dos municípios de Cambará, Jacarezinho e Engenheiro Beltrão foi adotada *CAD* igual a 12% do volume; e para os solos dos municípios de Paranavaí e Cruzeiro do Oeste foi adotada *CAD* igual a 7% do volume.

3.2.3 LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS UTILIZADAS:

A TABELA 1 mostra a posição geográfica e a altitude de cada estação meteorológica considerada, que possui séries históricas de dados dos períodos de 1990 a 2008, disponíveis na SEAB. Também mostra os tipos de solos e CAD consideradas para cada município.

TABELA 1 – Posição geográfica, altitude das estações meteorológicas mais próximas dos municípios selecionados, tipos de solos e CAD considerada para os balanços hídricos .

Município	Estação Meteorológica	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Tipos de solo (*)	CAD considerada
Cambará	Cambará	23°00'	50°02'	450	LVEf3	12%
					NVEf3	(72 mm)
Jacarezinho	Cambará	23°00'	50°02'	450	LVEf3	12%
					NVEf3	(72 mm)
Engenheiro. Beltrão	Maringá	23°25'	51°57'	542	LVdf13 LVEf1	12%
					NVEf3	(72 mm)
Paranavaí	Paranavaí	23°05'	52°26'	480	PVd2	7%
					LVd19	(42 mm)
Cruzeiro do Oeste	Umuarama	23°44'	53°17'	480	PVe1 PVe2	7%
					LVd19	(42 mm)

Fonte: SEAB/Deral, EMBRAPA, IAPAR e SIMEPAR.

(*) Tipos de solo de interesse para o cultivo da cana-de-açúcar, segundo EMBRAPA (2008):

LVEf3 – LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico típico, textura argilosa, A moderado, fase floresta tropical subperenifólia relevo suave ondulado;

NVEf3 – NITOSSOLO VERMELHO Eutroférico típico, textura argilosa, A moderado, fase floresta tropical subperenifólia, relevo suave ondulado e ondulado;

LVdf13 – LATOSSOLO VERMELHO Distroférico típico, textura argilosa, A moderado, fase floresta tropical perenifólia, relevo suave ondulado;

LVEf1 – LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico típico, textura argilosa, A moderado, fase floresta tropical perenifólia relevo suave ondulado;

PVd2 – ARGISSOLO VERMELHO Distrófico típico, textura arenosa/média, A moderado, fase floresta subperenifólia, relevo suave ondulado;

LVd19 – LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico, textura média, A moderado, fase floresta subperenifólia, relevo suave ondulado e plano;

PVe1 – ARGISSOLO VERMELHO Eutrófico típico, textura arenosa/média, A moderado, fase floresta subperenifólia, relevo suave ondulado;

PVe2 – ARGISSOLO VERMELHO Eutrófico abrupto, textura arenosa/média, A moderado, fase floresta subperenifólia, relevo ondulado;

3.2.4 COEFICIENTE DE CULTIVO DA CANA DE AÇÚCAR PARA O ESTADO DO PARANÁ

A partir da informação mensal sobre a porcentagem de área de cana-de-açúcar colhida, fornecida pela SEAB/Deral, nos anos de 2007, 2008 e 2009, foi estabelecido o cronograma de rebrota dos canaviais, considerando apenas cortes em intervalos anuais. A opção de somente utilizar períodos de corte da cana-de-açúcar com intervalos anuais para determinar os coeficientes de cultivo, deve-se ao fato de cerca de 80 a 85% da área dos canaviais serem de “cana soca”, dentro da programação das usinas, sendo o restante destinado a replantio com cana-de-açúcar de 18 ou de 12 meses.

Os coeficientes de cultivo recomendados por DOORENBOS e KASSAN (1994) para a cana-de-açúcar foram adaptados aos meses do cronograma de rebrota, resultando num coeficiente de cultivo ponderado para o Estado do Paraná, representando o coeficiente de cultivo relativo a totalidade da população de plantas de cana-de-açúcar no campo, para cada mês do ano (TABELAS 3 e 4), calculado pela equação:

$$Kc_p = (Kc_1 \cdot A_1) + (Kc_3 \cdot A_3) + (Kc_4 \cdot A_4) + (Kc_{10} \cdot A_{10}) + (Kc_{11} \cdot A_{11}) + (Kc_{12} \cdot A_{12}) \quad (5)$$

sendo:

Kc_p , coeficiente de cultivo ponderado para o mês em questão;

Kc_1 , coeficiente de cultivo para plantas de 0 a 1 mês após a rebrota;

A_1 , porcentagem de área no mês em questão com plantas entre 0 a 1 mês após a rebrota;

Kc_3 , coeficiente de cultivo para plantas entre 1 e 3 meses após a rebrota;

A_3 , porcentagem de área no mês em questão com plantas entre 1 e 3 meses após a rebrota;

Kc_4 , coeficiente de cultivo para plantas entre 3 e 4 meses após a rebrota;

A_4 , porcentagem de área no mês em questão com plantas entre 3 e 4 meses após a rebrota;

Kc_{10} , coeficiente de cultivo para plantas entre 4 e 10 meses após a rebrota;

A_{10} , porcentagem de área no mês em questão com plantas entre 4 e 10 meses após a rebrota;

Kc_{11} , coeficiente de cultivo para plantas entre 10 e 11 meses após a rebrota;

A_{11} , porcentagem de área no mês em questão com plantas entre 10 e 11 meses após a rebrota;

Kc_{12} , coeficiente de cultivo para plantas entre 11 e 12 meses após a rebrota;

A_{12} , porcentagem de área no mês em questão com plantas entre 11 e 12 meses após a rebrota.

TABELA 2 – Porcentagem de área da cana-de-açúcar no Estado do Paraná,, considerando cortes anuais, calculadas a partir das médias das colheitas mensais de três anos - 2007 a 2009.

Fase	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
0 a 1 mês	7,2	3,9	1,5	1,6	3,9	11,5	11,5	11,8	14,4	11,5	10,1	11,1
1 a 3 meses	21,3	18,3	11,1	5,4	3,1	5,6	15,4	22,9	23,2	26,2	25,9	21,6
3 a 4 meses	11,5	10,1	11,1	7,2	3,9	1,5	1,6	3,9	11,5	11,5	11,8	14,4
4 a 10 meses	54,7	64,5	70,7	70,4	66,1	58,3	45,3	35,5	29,3	29,6	33,9	41,7
10 a 11 meses	1,5	1,6	3,9	11,5	11,5	11,8	14,4	11,5	10,1	11,1	7,2	3,9
11 a 12 meses	3,9	1,5	1,6	3,9	11,5	11,5	11,8	14,4	11,5	10,1	11,1	7,2
%	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Fonte: SEAB / Deral

TABELA 3 – Coeficiente de cultivo (Kc) ponderado para área total de cana-de-açúcar no Estado do Paraná, considerando cortes anuais, adaptado de Doorenbos e Kassam (1994).

Fase	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Kc para a fase
0 a 1 mês	0,04	0,02	0,01	0,01	0,02	0,06	0,06	0,06	0,07	0,06	0,05	0,06	0,50
1 a 3 meses	0,18	0,16	0,09	0,05	0,03	0,05	0,13	0,19	0,20	0,22	0,22	0,18	0,85
3 a 4 meses	0,11	0,10	0,11	0,07	0,04	0,01	0,02	0,04	0,11	0,11	0,12	0,14	1,00
4 a 10 meses	0,57	0,68	0,74	0,74	0,69	0,61	0,48	0,37	0,31	0,31	0,36	0,44	1,05
10 a 11 meses	0,01	0,01	0,03	0,09	0,09	0,09	0,12	0,09	0,08	0,09	0,06	0,03	0,80
11 a 12 meses	0,02	0,01	0,01	0,02	0,07	0,07	0,07	0,09	0,07	0,06	0,07	0,04	0,60
Kc ponderado	0,94	0,98	1,00	0,98	0,94	0,89	0,87	0,84	0,84	0,86	0,87	0,90	

Fonte: SEAB / Deral

3.3 REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA PARA ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR NO MESMO ANO DA COLETA DOS DADOS METEOROLÓGICOS

A partir dos dados anuais coletados de 1990 a 2008, organizados e agrupados, foi ajustada a equação de regressão linear múltipla, tendo como variável dependente estimada a produtividade da cana-de-açúcar ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), com a melhor equação ajustada determinada pelo método “stepwise” com o uso do software estatístico SPSS – versão 16.0.

A regressão linear múltipla seleciona equações do tipo:

$$\hat{Y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + \dots + b_nx_n \quad (6)$$

sendo:

Y a variável dependente estimada, de difícil obtenção;

b_0, b_1, b_2, b_3 e b_n coeficientes;

x_1, x_2, x_3 e x_n variáveis independentes, de fácil obtenção.

Após o ajuste de todas as equações foram verificadas as suas condicionantes, que requerem singularidade de variáveis, ausência de multicolinearidade entre variáveis e ausência de resíduos acima de 3,3 desvios padrões (outliers).

Como variáveis independentes da equação foram usadas grandezas de temperatura, graus-dia, precipitação, armazenagem de água no solo e evapotranspiração, para cada trimestre que, com a maioria dos dias estando numa estação do ano, representam o verão (janeiro, fevereiro e março), o outono (abril, maio e junho), o inverno (julho, agosto e setembro) e a primavera (outubro, novembro e dezembro). Os dados utilizados para as regressões estão nos anexos I a V.

As variáveis utilizadas, para cada um dos cinco municípios escolhidos, foram:

Variável dependente:

- Produtividade média anual: *Prod* ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$);

Variáveis independentes (total de 32 variáveis analisadas):

- Média das temperaturas máximas ($^{\circ}\text{C}$) no primeiro trimestre (verão): *TmaxV*;
- Média das temperaturas máximas ($^{\circ}\text{C}$) no segundo trimestre (outono): *TmaxO*;
- Média das temperaturas máximas ($^{\circ}\text{C}$) no terceiro trimestre (inverno): *TmaxI*;
- Média das temperaturas máximas ($^{\circ}\text{C}$) no quarto trimestre (primavera): *TmaxP*;
- Média das temperaturas mínimas ($^{\circ}\text{C}$) no primeiro trimestre (verão): *TminV*;
- Média das temperaturas mínimas ($^{\circ}\text{C}$) no segundo trimestre (outono): *TminO*;
- Média das temperaturas mínimas ($^{\circ}\text{C}$) no terceiro trimestre (inverno): *TminI*;
- Média das temperaturas mínimas ($^{\circ}\text{C}$) no quarto trimestre (primavera): *TminP*;
- Média das temperaturas médias compensadas ($^{\circ}\text{C}$) no primeiro trimestre (verão): *TmedV*;
- Média das temperaturas médias compensadas ($^{\circ}\text{C}$) no segundo trimestre (outono): *TmedO*;
- Média das temperaturas médias compensadas ($^{\circ}\text{C}$) no terceiro trimestre (inverno): *TmaxI*;
- Média das temperaturas médias compensadas ($^{\circ}\text{C}$) no quarto trimestre (primavera): *TmaxP*;
- Soma de graus-dia ($^{\circ}\text{C}$) no primeiro trimestre (verão): *GrdiaV*;
- Soma de graus-dia ($^{\circ}\text{C}$) no segundo trimestre (outono): *GrdiaO*;
- Soma de graus-dia ($^{\circ}\text{C}$) no terceiro trimestre (inverno): *GrdiaI*;

- Soma de graus-dia (°C) no quarto trimestre (primavera): *GrdiaP*;
- Soma da precipitação (mm) no primeiro trimestre (verão): *PrecV*;
- Soma da precipitação (mm) no segundo trimestre (outono): *PrecO*;
- Soma da precipitação (mm) no terceiro trimestre (inverno): *PrecI*;
- Soma da precipitação (mm) no quarto trimestre (primavera): *PrecP*;
- Soma da deficiência de água no solo (mm) no primeiro trimestre (verão): *DefV*;
- Soma da deficiência de água no solo (mm) no segundo trimestre (outono): *DefO*;
- Soma da deficiência de água no solo (mm) no terceiro trimestre (inverno): *DefI*;
- Soma da deficiência de água no solo (mm) no quarto trimestre (primavera): *DefP*;
- Soma do excesso de água no solo (mm) no primeiro trimestre (verão): *ExcV*;
- Soma do excesso de água no solo (mm) no segundo trimestre (outono): *ExcO*;
- Soma do excesso de água no solo (mm) no terceiro trimestre (inverno): *ExcI*;
- Soma do excesso de água no solo (mm) no quarto trimestre (primavera): *ExcP*;
- Média da evapotranspiração relativa (%) no primeiro trimestre (verão): *ETrelV*;
- Média da evapotranspiração relativa (%) no segundo trimestre (outono): *ETrelO*;
- Média da evapotranspiração relativa (%) no terceiro trimestre (inverno): *ETrelI*;
- Média da evapotranspiração relativa (%) no quarto trimestre (primavera): *ETrelP*.

O cálculo dos Graus-dia foi realizado com base na soma dos valores positivos diários resultantes da equação:

$$\text{Grau-dia} = \frac{(T_{max} - T_{min})}{2} - 20 \quad (7)$$

sendo:

Grau-dia o valor da temperatura média acima de uma temperatura base considerada (°C.d);

Tmax a temperatura máxima diária (°C);

Tmin a temperatura mínima diária (°C);

20 é o valor da temperatura base para a cana-de-açúcar (°C).

A evapotranspiração relativa mensal foi calculada pela divisão da evapotranspiração real pela evapotranspiração da cultura (SEDIYAMA, 1990):

$$ET_{rel} = \frac{ETR}{ETc} \quad (8)$$

$$ETc = Eto \cdot Kc \quad (9)$$

sendo:

ET_{rel} a evapotranspiração relativa mensal (valor entre 0 e 1);

ETR a evapotranspiração real mensal (mm);

ETc a evapotranspiração potencial mensal da cultura (mm);

Eto evapotranspiração potencial mensal de referência;

Kc o coeficiente da cultura ponderado para as condições paranaenses.

A temperatura média compensada (TUBELIS, 1990) foi calculada pela equação:

$$T_{comp} = \frac{(T_{9h} + (2 \cdot T_{21h}) + T_{max} + T_{min})}{5} \quad (10)$$

sendo:

T_{comp} temperatura média compensada (°C);

T_{9h} temperatura das 9 horas (°C);

T_{21h} temperatura das 21 horas (°C);

T_{max} temperatura máxima (°C);

T_{min} temperatura mínima (°C).

3.4 REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA PARA ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR NO ANO SEGUINTE À COLETA DOS DADOS METEOROLÓGICOS

Visando medir a influência sofrida pela produtividade no ano seguinte aos eventos meteorológicos observados, também foi ajustada a equação linear múltipla, a partir dos mesmos

dados anuais coletados de 1990 a 2008, tendo como variável dependente a produtividade do ano seguinte, com a melhor equação foi selecionada pelo método “stepwise” com o uso de software estatístico SPSS – versão 16.0.

As variáveis independentes analisadas, para cada um dos cinco municípios escolhidos, foram as mesmas do item 3.3, alterando-se somente a variável dependente.

Os dados utilizados no ajuste das equações estão nos anexos I a V.

Variável dependente:

- Produtividade média anual do ano seguinte à coleta dos dados meteorológicos: *ProdS* ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$);

Variáveis independentes (total de 32 variáveis analisadas):

- Média das temperaturas máximas ($^{\circ}\text{C}$) no primeiro trimestre (verão): *TmaxV*;
- Média das temperaturas máximas ($^{\circ}\text{C}$) no segundo trimestre (outono): *TmaxO*;
- Média das temperaturas máximas ($^{\circ}\text{C}$) no terceiro trimestre (inverno): *TmaxI*;
- Média das temperaturas máximas ($^{\circ}\text{C}$) no quarto trimestre (primavera): *TmaxP*;
- Média das temperaturas mínimas ($^{\circ}\text{C}$) no primeiro trimestre (verão): *TminV*;
- Média das temperaturas mínimas ($^{\circ}\text{C}$) no segundo trimestre (outono): *TminO*;
- Média das temperaturas mínimas ($^{\circ}\text{C}$) no terceiro trimestre (inverno): *TminI*;
- Média das temperaturas mínimas ($^{\circ}\text{C}$) no quarto trimestre (primavera): *TminP*;
- Média das temperaturas médias compensadas ($^{\circ}\text{C}$) no primeiro trimestre (verão): *TmedV*;
- Média das temperaturas médias compensadas ($^{\circ}\text{C}$) no segundo trimestre (outono): *TmedO*;
- Média das temperaturas médias compensadas ($^{\circ}\text{C}$) no terceiro trimestre (inverno): *TmaxI*;
- Média das temperaturas médias compensadas ($^{\circ}\text{C}$) no quarto trimestre (primavera): *TmaxP*;
- Soma de graus-dia ($^{\circ}\text{C}$) no primeiro trimestre (verão): *GrdiaV*;
- Soma de graus-dia ($^{\circ}\text{C}$) no segundo trimestre (outono): *GrdiaO*;
- Soma de graus-dia ($^{\circ}\text{C}$) no terceiro trimestre (inverno): *GrdiaI*;
- Soma de graus-dia ($^{\circ}\text{C}$) no quarto trimestre (primavera): *GrdiaP*;
- Soma da precipitação (mm) no primeiro trimestre (verão): *PrecV*;
- Soma da precipitação (mm) no segundo trimestre (outono): *PrecO*;

- Soma da precipitação (mm) no terceiro trimestre (inverno): *PrecI*;
- Soma da precipitação (mm) no quarto trimestre (primavera): *PrecP*;
- Soma da deficiência de água no solo (mm) no primeiro trimestre (verão): *DefV*;
- Soma da deficiência de água no solo (mm) no segundo trimestre (outono): *DefO*;
- Soma da deficiência de água no solo (mm) no terceiro trimestre (inverno): *DefI*;
- Soma da deficiência de água no solo (mm) no quarto trimestre (primavera): *DefP*;
- Soma do excesso de água no solo (mm) no primeiro trimestre (verão): *ExcV*;
- Soma do excesso de água no solo (mm) no segundo trimestre (outono): *ExcO*;
- Soma do excesso de água no solo (mm) no terceiro trimestre (inverno): *ExcI*;
- Soma do excesso de água no solo (mm) no quarto trimestre (primavera): *ExcP*;
- Média da evapotranspiração relativa (%) no primeiro trimestre (verão): *ETrelV*;
- Média da evapotranspiração relativa (%) no segundo trimestre (outono): *ETrelO*;
- Média da evapotranspiração relativa (%) no terceiro trimestre (inverno): *ETrelI*;
- Média da evapotranspiração relativa (%) no quarto trimestre (primavera): *ETrelP*.

3.5 COMPARAÇÃO ENTRE PRODUTIVIDADE DE ANOS NORMAIS E DE ANOS COM INFLUÊNCIA DOS EVENTOS EL NINO E LA NINA

A partir do trabalho de BERLATO e FONTANA (2003), com eventos acrescentados até 2008 por WALTRICK (2010), pode-se identificar a intensidade dos eventos “La Niña” (*LN*) e “El Niño” (*EN*) nos trimestres de cada ano, classificados como eventos fracos, moderados ou fortes (anexo VI). Considerando as categorias da planilha original, foram atribuídos valores aos eventos para poder correlacioná-los com as produtividades anuais da cana-de-açúcar levantadas pelo Departamento de Economia Rural da SEAB, para o Estado do Paraná.

Para cada ano foram atribuídas 12 variáveis, representando a ocorrência de trimestres normais: *Nver*, *Nout*, *Ninv*, *Npri*; intensidade dos trimestres com “La Niña”: *LNver*, *LNout*, *LNinv*, *LNpri*; e intensidade com trimestres com “El Niño”: *ENver*, *ENout*, *ENinv* e *ENpri*, respectivamente para os trimestres de verão (1º trimestre), outono (2º trimestre), inverno (3º trimestre) e primavera (4º trimestre).

Os valores atribuídos para cada categoria de trimestre observados foram:

- Trimestre com clima normal: $N=1, LN=0, EN=0$;
- Trimestre com “La Niña” fraco: $N=0, LN=1, EN=0$;
- Trimestre com “La Niña” moderado: $N=0, LN=2, EN=0$;
- Trimestre com “La Niña” forte: $N=0, LN=3, EN=0$;
- Trimestre com “El Niño” fraco: $N=0, LN=0, EN=1$;
- Trimestre com “El Niño” moderado: $N=0, LN=0, EN=2$;
- Trimestre com “El Niño” forte: $N=0, LN=0, EN=3$;

Assim, por exemplo, no ano de 1973, que teve 1º trimestre (verão) com “EL Niño” moderado, 2º trimestre (outono) com clima normal, 3º trimestre (inverno) com “La Niña” fraco e 4º trimestre (primavera) com “La Niña” forte, os trimestres foram representados pela seguinte combinação de variáveis: $N_{ver}=0, LN_{ver}=0, EN_{ver}=2, N_{out}=1, LN_{out}=0, EN_{out}=0, N_{inv}=0, LN_{inv}=1, EN_{inv}=0, N_{pri}=0, LN_{pri}=3$ e $EN_{pri}=0$.

A partir da valoração das 12 variáveis de cada ano, de acordo com as categorias dos trimestres, foi ajustada a regressão linear múltipla, tendo como variável dependente a produtividade anual em $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, com a melhor equação sendo selecionada pelo método “stepwise”, pelo uso do software estatístico SPSS – versão 16.0, para cada um dos cinco municípios paranaenses escolhidos para o estudo.

3.6 COMPARAÇÃO ENTRE PRODUTIVIDADE DO ANO SEGUINTE A ANOS NORMAIS E A ANOS COM INFLUÊNCIA DOS EVENTOS EL NINO E LA NINA

De forma semelhante, a partir do trabalho de BERLATO e FONTANA (2003), com eventos acrescentados até 2008 (anexo VI), foram identificados os trimestres com influência dos eventos “La Niña” (LN) e “El Niño” (EN), classificados como eventos fracos, moderados ou fortes.

Considerando as categorias da planilha original, foram atribuídos valores aos eventos para correlacioná-los com as produtividades médias anuais da cana-de-açúcar, segundo a SEAB/Deral, dos anos seguintes aos eventos climáticos.

Igualmente ao item 3.5, os valores atribuídos para cada categoria de trimestre observada foram:

- Trimestre com clima normal: $N=1$, $LN=0$, $EN=0$;
- Trimestre com La Niña fraco: $N=0$, $LN=1$, $EN=0$;
- Trimestre com La Niña moderado: $N=0$, $LN=2$; $EN=0$;
- Trimestre com La Niña forte: $N=0$, $LN=3$, $EN=0$;
- Trimestre com El Niño fraco: $N=0$, $LN=0$, $EN=1$;
- Trimestre com El Niño moderado: $N=0$, $LN=0$, $EN=2$;
- Trimestre com El Niño forte: $N=0$, $LN=0$, $EN=3$;

A partir da valoração das 12 variáveis (N_{ver} , LN_{ver} , EN_{ver} , N_{out} , LN_{out} , EN_{out} , N_{inv} , LN_{inv} , EN_{inv} , N_{pri} , LN_{pri} e EN_{pri}) de cada ano, de acordo com as categorias dos trimestres, foi ajustada a regressão linear múltipla tendo como variável dependente a produtividade anual ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) do ano seguinte a ocorrência dos eventos climáticos, com a melhor equação sendo selecionada pelo método “stepwise”, com o uso do software estatístico SPSS – versão 16.0, para cada um dos cinco municípios paranaenses escolhidos para o estudo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na TABELA 4 são apresentadas as produtividades anuais da cana-de-açúcar, utilizadas nas regressões lineares múltiplas, e suas médias por ano e por município.

Nos anexos VIII a XV são apresentadas as variáveis ambientais medidas, que influenciaram nas produtividades, e que também serviram de base para a análise dos resultados obtidos.

TABELA 4 – Produtividade da cana-de-açúcar (kg.ha⁻¹) em cinco municípios de três regiões produtoras no Estado do Paraná, de 1990 a 2008.

Ano	Norte Novíssimo		Região Central	Norte Pioneiro		Média
	Paranavaí	Cruzeiro do Oeste	Eng. Beltrão	Cambará	Jacarezinho	
1990	-	81.091	90.000	78.000	78.000	81.773
1991	-	60.127	98.000	80.000	80.000	79.532
1992	47.750	71.746	98.000	70.000	70.000	71.499
1993	-	50.758	80.000	78.000	78.000	71.690
1994	-	-	92.000	70.000	68.000	76.667
1995	-	87.525	93.000	90.000	68.000	84.631
1996	87.143	80.487	78.150	78.000	78.000	80.356
1997	-	76.897	92.500	78.000	78.000	81.349
1998	45.379	86.024	97.030	94.000	94.000	83.287
1999	49.000	65.522	74.390	94.000	99.000	76.382
2000	69.478	71.370	76.960	84.600	84.600	77.402
2001	77.000	72.567	88.000	100.000	100.000	87.513
2002	80.357	86.716	78.170	92.000	92.000	85.849
2003	-	93.592	100.000	100.000	100.000	98.398
2004	77.875	80.686	85.500	95.000	95.000	86.812
2005	77.057	67.329	85.500	80.000	80.000	77.977
2006	102.233	85.262	76.432	78.000	78.000	83.985
2007	95.203	84.727	89.900	95.000	95.000	91.966
2008	87.985	85.294	92.000	95.000	95.000	91.056
média	74.705	77.096	87.660	85.768	84.768	81.999

(-) sem informação

Fonte: SEAB / Deral.

Na FIGURA 5 são apresentados as fases da cana-de-açúcar de corte anual no Estado do Paraná, e respectivos coeficientes de cultura (K_c) utilizados nos balanços hídricos mensais, no cálculo da evapotranspiração relativa, excesso hídrico e deficiência hídrica. Estão destacadas as fases de 01 a 03 meses – perfilhamento; 04 a 10 meses – pleno crescimento vegetativo da cultura; e 11 a 12 meses – maturação e colheita.

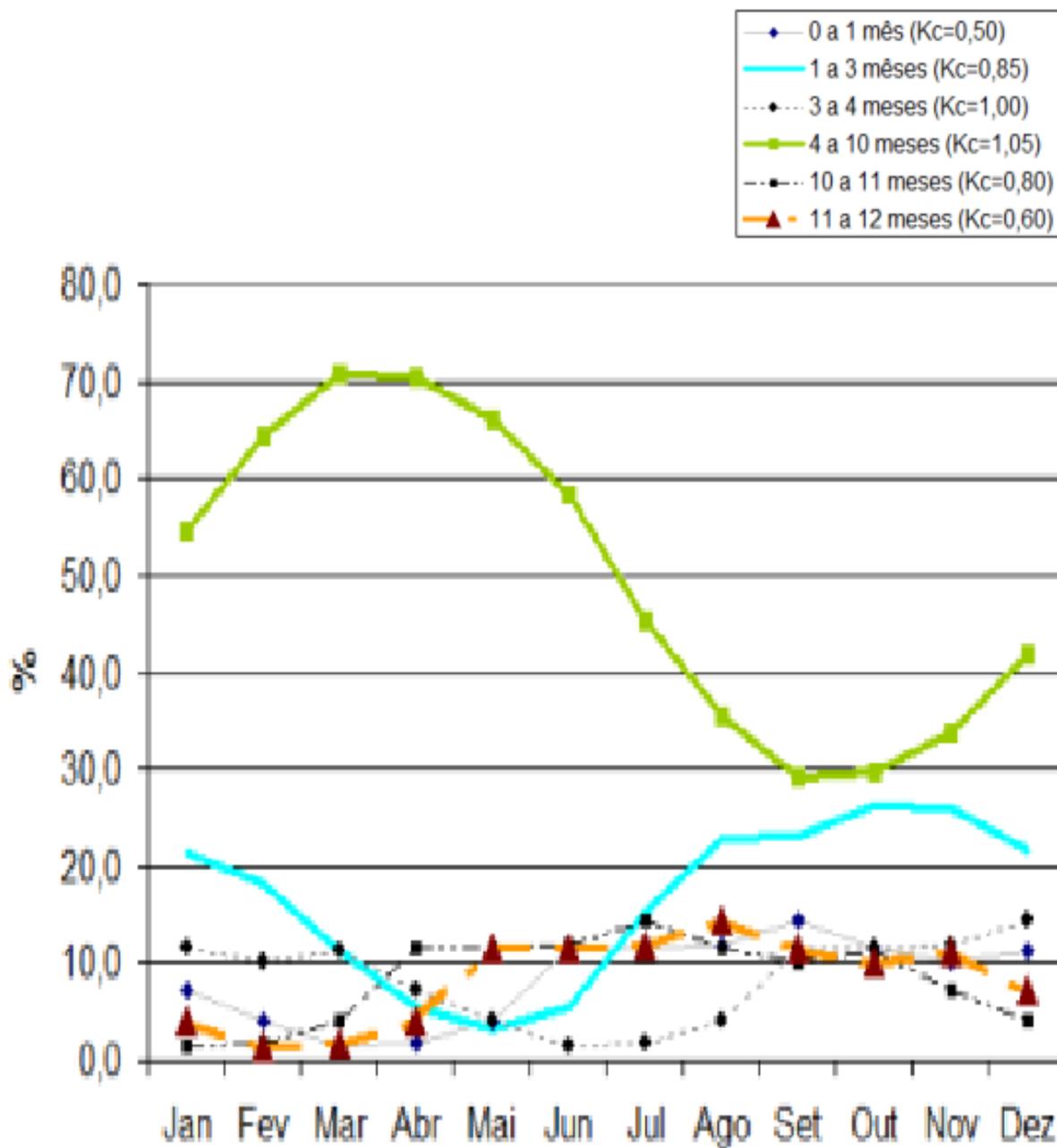


FIGURA 5 – Idade da rebrota da cana-de-açúcar de corte anual no estado do Paraná, com respectivas porcentagens de área cultivada e coeficientes de cultura (K_c), adaptados de DOORENBOS e KASSAN (1994), calculados a partir das porcentagens de colheita mensal média em três anos (2007 a 2009) informadas pela SEAB/Deral.

4.1 ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE NO MESMO ANO DOS EVENTOS METEOROLÓGICOS OBSERVADOS

4.1.1 PARANAÍ

Na FIGURA 6 é apresentado o gráfico comparativo entre a produtividade média real observada em Paranaíba - PR e a produtividade estimada pela equação da regressão linear múltipla ajustada a partir de variáveis ambientais e da disponibilidade de água do solo, conforme metodologia descrita no item 3.3 e os valores observados, disponíveis no anexo I.

A melhor equação selecionada para o município foi:

$$Prod = - 214.016 + 17.443(TminP) - 105(PrecI) - 76(ExcO) - 199(ExcV) + 86(DefV) \quad (11)$$

Sendo:

Prod, produtividade média anual estimada em kg.ha⁻¹;

TminP, média das temperaturas mínimas do quarto trimestre (primavera) em °C;

PrecI, precipitação do terceiro trimestre (inverno) em mm;

ExcO, excesso de água no solo no segundo trimestre (outono) em mm;

ExcV, excesso de água no solo no primeiro trimestre (verão) em mm;

DefV, deficiência de água no solo no primeiro trimestre (verão) em mm.

Foram observadas as seguintes estatísticas para a equação ajustada:

$F = 120,78$ ** ($\alpha < 0,01$);

Coefficiente de correlação $R = 0,995$;

Coefficiente de determinação R^2 ajustado = 0,982;

Erro padrão = 2.544 kg ($S_{xy\%} = 3,4 \%$).

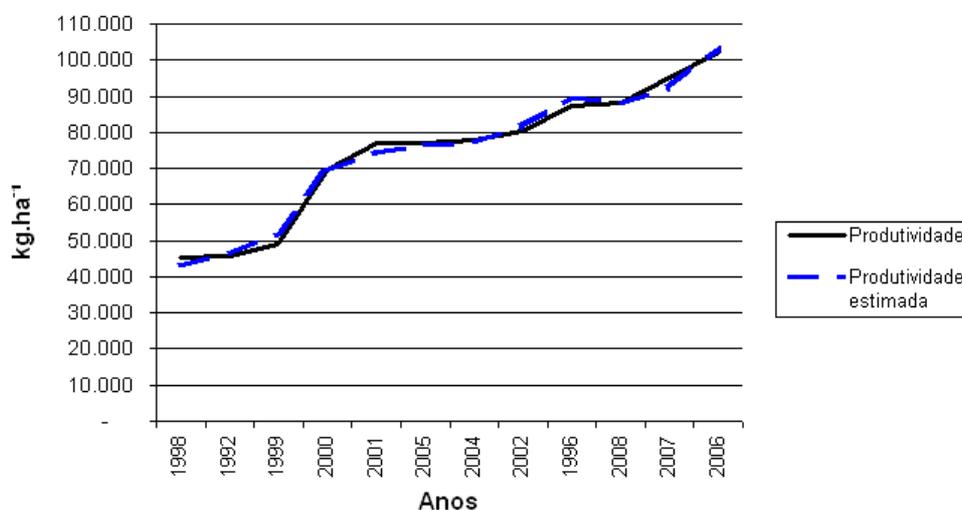


FIGURA 6 – Produtividade anual da cana-de-açúcar (kg.ha⁻¹), em ordem crescente, observada entre os anos de 1992 e 2008, versus a produtividade estimada (kg.ha⁻¹) resultante da equação ajustada por regressão múltipla a partir de variáveis climáticas e da disponibilidade de água no solo, no município de Paranavaí – PR.

As informações sobre cana-de-açúcar produzida em grande escala, no município de Paranavaí, começam em 1992, com dados de apenas 12 safras, até o ano de 2008. Mesmo assim os altos coeficientes de correlação e determinação ajustado, ambos acima de 98%, mostraram grande ajuste e exatidão do modelo com relação à produtividade média real (FIGURA 6), com grande influência do clima na produtividade da cultura, naquela condição.

As variáveis selecionadas que influenciaram positivamente a produtividade são a temperatura mínima média do trimestre de primavera (T_{minP}) e a deficiência hídrica no trimestre de verão ($DefV$).

A primeira variável (T_{minP}), tem valores entre 18,5 e 21 °C (ANEXO VIII), indicando que quanto maiores as temperaturas noturnas, dentro da faixa ótima para acúmulo de sacarose apontada por SCARPARI (2007), entre 10 e 25 °C, maior a produtividade anual resultante naquele município.

A somatória da deficiência de água no solo no verão ($DefV$) que, segundo a regressão linear múltipla, influenciou positivamente a produtividade, foi somente a quinta variável selecionada.

Apesar da relação parecer contraditória, a média de deficiência hídrica em toda a estação de verão foi de apenas 29 mm, e em 75% dos anos fica abaixo de 42 mm (anexo XIII),

mostrando que, nesses casos, existiu um mínimo de água disponível ao bom desenvolvimento da cultura no verão.

É provável que também indique maior radiação disponível à realização de fotossíntese pelas plantas, com a ausência de nuvens nos meses de verão, resultando em maior crescimento vegetativo, justamente quando o *IAF* da cana-de-açúcar tem seus maiores valores, como demonstra OLIVEIRA (2004), e quando em mais de 60% da área plantada a evapotranspiração potencial da cultura também é máxima, segundo DOORENBOS e KASSAN (1994), como pode ser observado na FIGURA 5.

Já as variáveis que são apontadas como negativas à produtividade anual da cana-de-açúcar, estão todas ligadas ao excesso de chuvas na região. A variável precipitação total do trimestre de inverno (*PrecI*), teve grande variabilidade (82 a 491 mm), com média de 245 mm, desvio padrão de 103 mm e coeficiente de variação igual a 0,42. Maiores precipitações nesta fase influenciam negativamente a produtividade da massa de colmos, confirmando o que é relatado por RODRIGUES (1995), SALASSIER (1997), TERAMOTO (2003) e MARCHIORI (2004), que afirmam que plantas sem deficiência hídrica na fase de maturação continuam vegetando, diminuindo o acúmulo de sacarose no colmo.

Com relação à água disponível no solo, excessos hídricos na época de maior crescimento vegetativo, no verão (*ExcV*) e outono (*ExcO*), que podem chegar a mais de 350 mm em cada trimestre, influenciaram negativamente a produtividade, sugerindo, além da menor radiação global incidente pela presença de nuvens, resultante da grande variabilidade da radiação global disponível na região sul, conforme observado por MARTINS *et al.* (2007), também ocorreu baixa aeração da zona radicular, dificultando a respiração e originando a formação de substâncias tóxicas às raízes, conforme escrevem SALASSIER (1997) e TAIZ e ZEIGEL (2009).

Na FIGURA 7, com as informações do ano de 2010, quando estão disponíveis também os dados de radiação, observa-se o efeito da precipitação durante as estações do ano. Verifica-se que, no outono, precipitações de apenas 25 mm, pela presença de nuvens, podem reduzir a radiação global incidente na superfície a valores próximos de zero. Já no verão, a radiação global incidente caiu pela metade, com volume de precipitação semelhante.

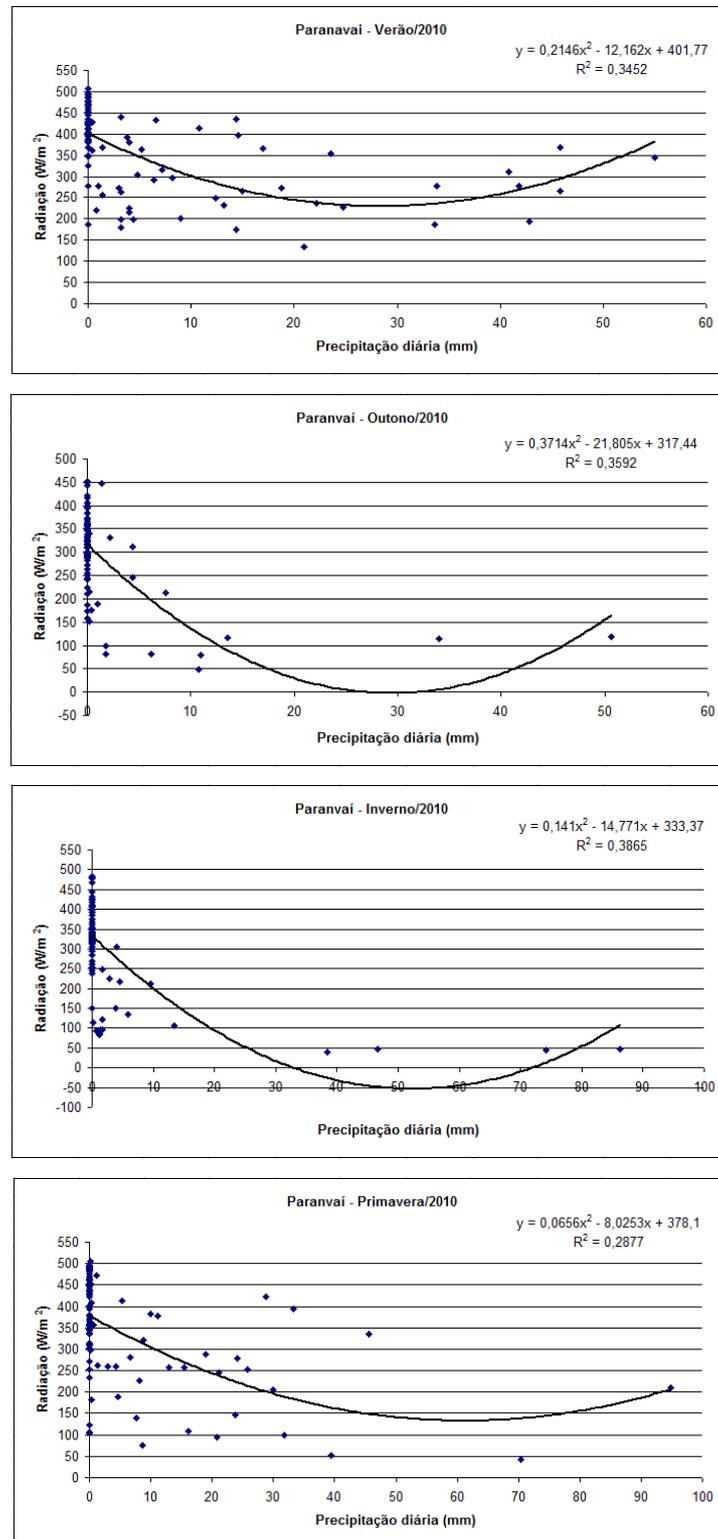


FIGURA 7 – Correlação entre precipitação diária (mm) e radiação global incidente diária ($W.m^{-2}$) no município de Paranavai – PR, no ano de 2010. Fonte: SIMEPAR.

A influência negativa sobre a produtividade é reforçada pela baixa *CAD* do solo arenoso da região e, pela presença de argissolos com gradiente textural no horizonte B, que causa acúmulo de água nos horizontes superiores do perfil e aumento do escoamento superficial (COSTA LIMA, 2004).

4.1.2 CRUZEIRO DO OESTE

Na FIGURA 8 é apresentado o gráfico comparativo entre a produtividade média real observada em Cruzeiro do Oeste - PR e a produtividade estimada pela equação de regressão linear múltipla ajustada a partir de variáveis climáticas e da disponibilidade de água do solo, conforme metodologia descrita no item 3.3 e os valores observados, disponíveis no anexo II.

A melhor equação selecionada para o município foi:

$$Prod = -217.677 + 67(ExcV) + 282(GrdiaV) + 66.196(ETrell) + 2.579(TmaxI) + 35(PrecV) \quad (12)$$

Sendo:

Prod, produtividade média anual estimada em kg.ha⁻¹;

ExcV, excesso de água no solo no primeiro trimestre (verão) em mm;

GrdiaV, graus-dia do primeiro trimestre (verão) em °C;

ETrell, evapotranspiração relativa no terceiro trimestre (inverno) em mm;

TmaxI, média das temperaturas máximas no terceiro trimestre (inverno) em °C;

PrecV, precipitação no primeiro trimestre (verão) em mm.

Foram observadas as seguintes estatísticas para a equação ajustada:

$F = 12,19$ ** ($\alpha < 0,01$);

Coefficiente de correlação $R = 0,91$;

Coefficiente de determinação R^2 ajustado = 0,77;

Erro padrão = 5.336 kg ($S_{xy\%} = 6,92$ %).

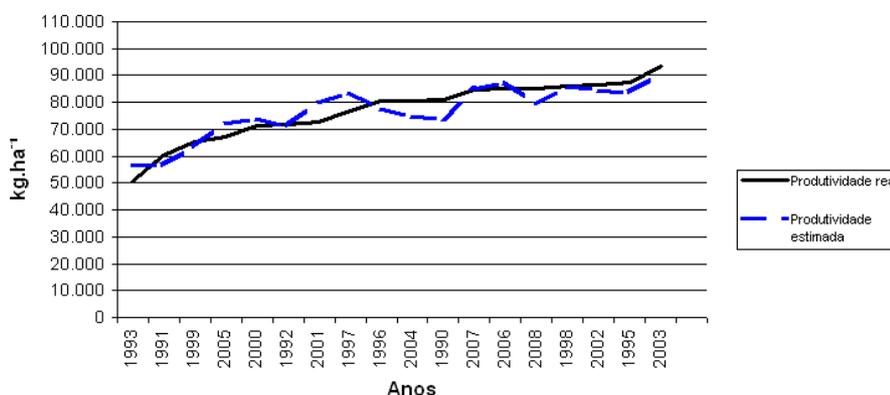


FIGURA 8 – Produtividade anual da cana-de-açúcar ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), em ordem crescente, observada entre os anos de 1990 e 2008, versus a produtividade estimada ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) resultante da equação da regressão múltipla ajustada a partir de variáveis climáticas e da disponibilidade de água no solo, no município de Cruzeiro do Oeste – PR.

Os altos valores dos coeficientes de correlação e de determinação ajustado da equação (0,93 e 0,79) indicaram a grande dependência da produtividade da cana-de-açúcar às variáveis climáticas, no município.

Três das cinco variáveis selecionadas pela regressão referem-se ao trimestre de verão, mostrando a grande influência das condições ambientais dessa estação. Apesar de também possuir solos de baixa CAD, no município de Cruzeiro do Oeste, ao contrário do município de Paranaíba, o excedente hídrico do solo no trimestre de verão teve influência positiva sobre a produtividade da cana-de-açúcar. O município encontra-se mais ao sul, e seu microclima, durante os anos estudados, apresentou o menor excedente hídrico na estação de verão de todos os cinco municípios (ANEXO XIV), levando à conclusão que os valores alcançados no trimestre (média de 96 mm e desvio padrão de 97 mm) foram benéficos à cultura, mesmo em regiões com solos arenosos com baixa CAD.

Houve forte correlação (0,86) com outra variável que contribuiu positivamente para a produtividade: a precipitação no trimestre de verão (P_{recV}), sem, no entanto caracterizar multicolinearidade, que exigiria a retirada de uma das duas variáveis da equação, segundo a metodologia. Mostrou que, naquelas condições, o aumento da quantidade total de precipitação no verão refletiu no melhor desenvolvimento vegetativo da cultura, e, conseqüente, em maior produtividade, em concordância com as afirmações de SALASSIER (1997), que o sub-período de crescimento vegetativo responde à lâmina d'água.

A outra variável selecionada no verão foi a somatória de grau-dia (*G_{rdiaV}*), que teve uma das maiores médias, entre os cinco municípios estudados (ANEXO XI) e também contribuiu positivamente para a produtividade. Vem de encontro às observações de SCARPARI (2007) e MARCHIORI (2008), que correlacionam graus-dia ao desenvolvimento vegetal. Também relaciona-se indiretamente com a radiação global incidente disponível à fotossíntese.

No entanto, é importante recordar as limitações de correlacionar-se graus-dia com produtividade, apontadas por MOTA (1986), como a não diferenciação de temperaturas diurnas e noturnas, bem como a não linearidade da resposta das plantas às faixas de temperatura. Duas variáveis no trimestre de inverno, segundo a equação ajustada, influenciam positivamente a produtividade, sendo a evapotranspiração relativa e a temperatura máxima. Com relação à evapotranspiração relativa no trimestre de inverno (*ET_{rell}*), segundo MARCHIORI (2004), em regiões com alta umidade no ar a radiação solar global pode ter estreita relação com a evapotranspiração, resultando em maior produção de fotoassimilados.

TERAMOTO (2003) também afirma que quando as necessidades hídricas da cultura são atendidas plenamente, igualando-se a *ETR* da *ET_c*, não ocorrem perdas de produtividade. No trimestre de inverno, a plena evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar resulta em acúmulo de sacarose no colmo e aumento de produtividade média da massa de colmos.

MOTA (1986) já citava trabalhos no Havaí, e também correlacionou a evapotranspiração relativa com a produtividade potencial da cana-de-açúcar.

Quanto à temperatura máxima de inverno, observa-se no ANEXO IX, que em 75% dos anos estudados a temperatura máxima esteve abaixo de 26,5 °C, ficando sempre abaixo de 29 °C. Segundo SCARPARI (2007), a taxa fotossintética aumenta com a temperatura até 30 °C, o que leva a crêr que, para as condições de Cruzeiro do Oeste, quanto mais quentes os dias de inverno, maior a taxa fotossintética e maior acúmulo de sacarose.

4.1.3 ENGENHEIRO BELTRÃO

Na FIGURA 9 é apresentado o gráfico comparativo entre a produtividade média real observada em Engenheiro Beltrão - PR e a produtividade estimada pela equação da regressão

linear múltipla ajustada a partir de variáveis climáticas e da disponibilidade de água do solo, conforme metodologia descrita no ítem 3.3 e os valores observados, disponíveis no anexo III.

A melhor equação selecionada para o município foi:

$$Prod = -14.210 + 21.461(ETrelO) + 38.706(ETrell) + 59.141(ETrelP) + 7.549(TminV) - 5.357(TmaxV) \quad (13)$$

Sendo:

Prod, produtividade média anual estimada em $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$;

ETrelO, média da evapotranspiração relativa no segundo trimestre (outono) em %;

ETrell, média da evapotranspiração relativa no terceiro trimestre (inverno) em %;

ETrelP, média da evapotranspiração relativa no quarto trimestre (primavera) em %;

TminV, temperatura mínima no primeiro trimestre (verão) em $^{\circ}\text{C}$;

TmaxV, temperatura máxima no primeiro trimestre (verão) em $^{\circ}\text{C}$.

Foram observadas as seguintes estatísticas para a equação:

$$F = 3,8 * (\alpha < 0,05);$$

Coefficiente de correlação $R = 0,77$;

Coefficiente de determinação R^2 ajustado = 0,43;

Erro padrão = 6.170 kg ($S_{xy}\% = 7,03 \%$).

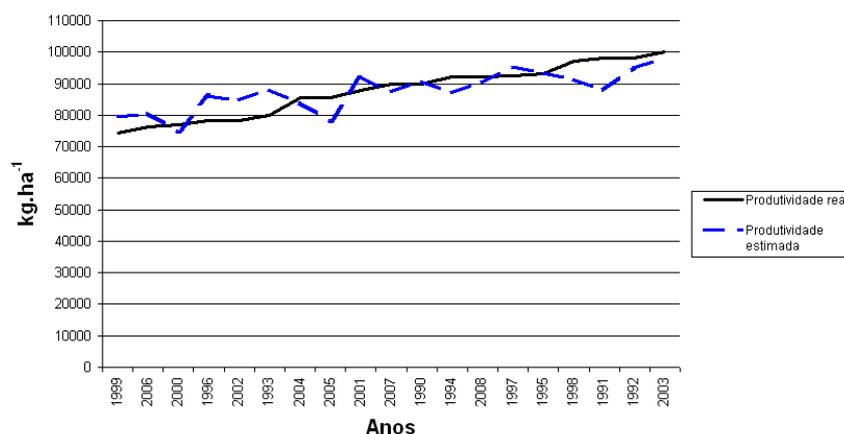


FIGURA 9 – Produtividade anual da cana-de-açúcar ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), em ordem crescente, observada entre os anos de 1990 e 2008, versus a produtividade estimada ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) resultante da equação da regressão múltipla ajustada a partir de variáveis climáticas e da disponibilidade de água no solo, no município de Engenheiro Beltrão – PR.

O município de Engenheiro Beltrão possui, historicamente, a melhor condição para a cultura da cana-de-açúcar no Estado, com a maior produtividade média, solos férteis, argilosos e profundos. Nessa condição, observamos que as médias da evapotranspiração relativa dos trimestres de outono, inverno e primavera influenciaram positivamente a produtividade da cultura. Tal relação corrobora os estudos realizados e citados por MOTA (1986), TERAMOTO (2003), MARCHIORI (2004) e PICOLI (2007).

Quando não existem restrições hídricas ou térmicas, a evapotranspiração relativa tem correlação com a radiação global, e a produtividade da cultura aproxima-se do seu potencial máximo (MARCHIORI, 2004). Com valores de ER médios de 0,89, 0,87 e 0,94, respectivamente, para outono, inverno e primavera, observaram-se no outono boas condições para o desenvolvimento vegetativo; e nas estações de inverno e primavera, boas condições para a produção e transporte de carboidratos das folhas para os colmos, onde a sacarose é acumulada.

No outono, mais de 60% da área de cana-de-açúcar do Estado está na fase de crescimento vegetativo pleno (FIGURA 5), quando, segundo DOORENBOS e KASSAN (1994), o coeficiente de cultura (K_c), que correlaciona a evapotranspiração da cultura com a evapotranspiração de referência (ET_o), tem valor igual a 1,05, revelando grande eficiência na produção de fotoassimilados.

Comparando-se a equação ajustada para Engenheiro Beltrão ao trabalho de FRIZZONE (2001), notas-se que o coeficiente da evapotranspiração relativa atribuído naquele estudo à fase de maturação é negativo, isto é, seria inversamente proporcional à produtividade. Já em Engenheiro Beltrão, a equação ajustada atribuiu coeficientes positivos aos trimestres de inverno e primavera, que correspondem à maturação de grandes áreas da cultura, no estado do Paraná.

Com relação à temperatura de verão a equação ajustada apontou a temperatura máxima de verão como fator inversamente proporcional à produtividade, e a temperatura mínima de verão como fator diretamente proporcional à produtividade. A temperatura máxima média do trimestre de verão ficou entre 28,8 e 30,7 °C; e a média das temperaturas mínimas, no mesmo período, ficou entre 19,4 e 20,9 °C.

SEGATO (2006) afirma que o crescimento vegetativo da cana-de-açúcar tem sua condição ideal com temperaturas entre 25 e 30 °C; e MARCHIORI (2004) relata que o

crescimento é praticamente nulo abaixo de 20 °C e acima de 38 °C. Já, segundo SCARPARI (2007), a taxa fotossintética cresce até os 30 °C, estabilizando-se até 34 °C e decrescendo em temperaturas mais elevadas.

Observa-se que, com temperaturas mínimas mais altas e temperaturas máximas mais baixas, durante o verão no município de Engenheiro Beltrão, o crescimento da cultura da cana-de-açúcar foi beneficiado por condições mais próximas da ideal ao crescimento das plantas.

4.1.4 CAMBARÁ

Na FIGURA 10 é apresentado o gráfico comparativo entre a produtividade média real observada em Cambará - PR e a produtividade estimada pela equação da regressão linear múltipla ajustada a partir de variáveis climáticas e da disponibilidade de água do solo, conforme metodologia descrita no item 3.3 e os valores observados, disponíveis no anexo IV.

A melhor equação selecionada para o município foi:

$$Prod = - 23.831 - 43(PrecP) - 72(ExcO) + 4.033(TmaxI) + 28.305(ETreII) \quad (14)$$

Sendo:

Prod, produtividade média anual estimada em kg.ha⁻¹;

PrecP, precipitação no quarto trimestre (primavera) em mm;

ExcO, excesso hídrico no segundo trimestre (outono) em mm;

TmaxI, média das temperaturas máximas no terceiro trimestre (inverno) em °C;

ETreII, média da evapotranspiração relativa no terceiro trimestre (inverno) em %.

Foram observadas as seguintes estatísticas para a equação ajustada:

$F = 7,04$ * ($\alpha < 0,05$);

Coefficiente de correlação $R = 0,82$;

Coefficiente de determinação R^2 ajustado = 0,57;

Erro padrão = 6.384 kg. ($S_{xy}\% = 7,44$ %).

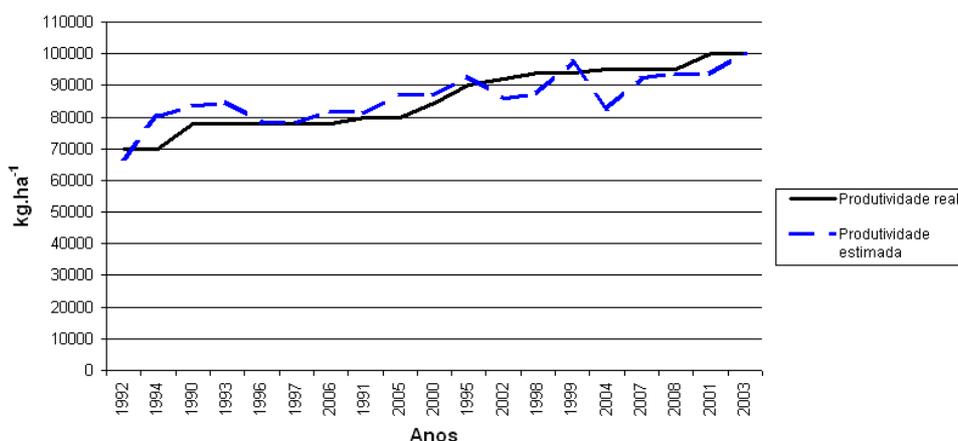


FIGURA 10 – Produtividade anual da cana-de-açúcar ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), em ordem crescente, observada entre os anos de 1990 e 2008, versus a produtividade estimada ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) resultante da equação da regressão múltipla ajustada a partir de variáveis climáticas e da disponibilidade de água no solo, no município de Cambará – PR.

A equação ajustada selecionou quatro variáveis, dentre as estudadas, que influenciaram a produtividade média anual, sendo que duas incrementaram e duas reduziram seu valor. A primeira variável selecionada pela equação ajustada foi a precipitação do trimestre de primavera (*PrecP*), que contribuiu negativamente para a produtividade, e sugere que, no microclima do Noroeste do Estado a precipitação na estação de primavera levou a cana-de-açúcar a vegetar em vez de acumular carboidratos, na época que seria ideal para sua maturação, resultando em menor acúmulo de massa por hectare no final do ciclo. MARCHIORI (2004) e RODRIGUES (1995) alertam que o excesso de água na fase de maturação da cana leva ao direcionamento o transporte de açúcares ao crescimento vegetativo.

A outra variável que prejudicou a produtividade foi o excesso hídrico no solo nos meses do trimestre de outono.

Apesar dos solos predominantes serem profundos, com CAD elevada, são extremamente argilosos, e estão sujeitos a compactação causada pelo tráfego de máquinas pesadas, com diminuição da quantidade de macroporos, responsáveis pela movimentação da água, aeração e penetração das raízes (COSTA LIMA, 2004).

Porém, essa influência negativa pareceu estar mais ligada à menor disponibilidade de radiação global disponível, quando há presença excessiva de nuvens na época ideal para o desenvolvimento vegetativo (FIGURA 5), prejudicando o crescimento das plantas.

A região sul do Brasil, segundo MARTINS (2007), tem a maior variabilidade de radiação solar global, sendo muito influenciada pela presença de nuvens resultantes do encontro das frentes frias, vindas dos países vizinhos ao sul, com frentes quentes e úmidas, vindas do norte do Brasil.

Já a temperatura máxima no inverno contribuiu com maior produtividade. Isto deveu-se porque o Nordeste do Paraná foi a região mais fria durante o inverno, dentre as regiões estudadas (ANEXOS VIII, IX e X). Durante o dia são produzidos amido e sacarose, e durante a noite a sacarose é acumulada, com a metabolização do amido produzido anteriormente (TAIZ e ZEIGEL, 2009).

A temperatura máxima durante o dia chegou até o máximo de 28,5 °C. Como, segundo SCARPARI (2007), a faixa de temperatura onde há aumento da fotossíntese está entre 23 e 30 °C, quanto maior a temperatura máxima, com a conseqüente produção de amido que ocorre durante os dias de inverno, maior o acúmulo de sacarose durante as noites frias.

A última variável, que influenciou positivamente a produtividade, foi a evapotranspiração relativa no trimestre de inverno (*ETrel*), que, como a temperatura máxima de inverno, sinalizou condições favoráveis para a fotossíntese plena, com condições de umidade e temperatura que resultaram em produção de carboidratos, acumulados na forma de hexoses nos colmos da cana-de-açúcar, confirmando os estudos realizados e citados por MOTA (1986), TERAMOTO (2003), MARCHIORI (2004) e PICOLI (2007).

O alto coeficiente da variável evapotranspiração relativa de inverno (28.305) mostrou sua importância. Pela equação ajustada, a cada ponto percentual de aumento na evapotranspiração média no inverno, há o incremento de 283 kg de cana-de-açúcar produzido por hectare cultivado.

4.1.5 JACAREZINHO

Na FIGURA 11 é apresentado o gráfico comparativo entre a produtividade média real observada em Jacarezinho - PR e a produtividade estimada pela equação da regressão linear múltipla ajustada a partir de variáveis climáticas e da disponibilidade de água do solo, conforme metodologia descrita no item 3.3 e os valores observados, disponíveis no anexo V.

A melhor equação seleccionada para o município foi:

$$Prod = 506.901 - 80.150(ETrelP) - 94(ExcO) + 23.986(ETrell) - 33.517(TmedO) + 191(GrdiaO) + 17.673(TminO) + 299(DefO) \quad (15)$$

Sendo:

Prod, produtividade média anual estimada em $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$;

ETrelP, evapotranspiração relativa média no quarto trimestre (primavera) em %;

ExcO, excesso hídrico no segundo trimestre (outono) em mm;

ETrell, evapotranspiração relativa média no terceiro trimestre (inverno) em %;

TmedO, temperatura média no segundo trimestre (outono) em $^{\circ}\text{C}$;

GrdiaO, total de graus-dia no segundo trimestre (outono) em $^{\circ}\text{C}$;

TminO, média das temperaturas mínimas no segundo trimestre (outono) em $^{\circ}\text{C}$;

DefO, deficiência hídrica no segundo trimestre (outono) em mm.

Foram observadas as seguintes estatísticas para a equação ajustada:

$F = 10,56$ ** ($\alpha < 0,01$);

Coefficiente de correlação $R = 0,93$;

Coefficiente de determinação R^2 ajustado = 0,78;

Erro padrão = 5.058 kg ($S_{xy\%} = 5,96$ %).

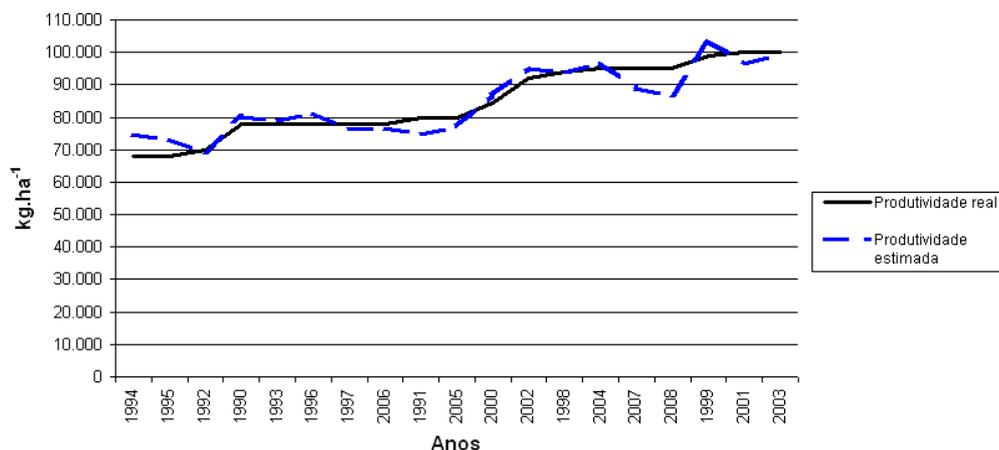


FIGURA 11 – Produtividade anual da cana-de-açúcar ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), em ordem crescente, observada entre os anos de 1990 e 2008, versus a produtividade estimada ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) resultante da equação ajustada a partir de variáveis climáticas e da disponibilidade de água no solo, no município de Jacarezinho – PR.

O outono, sendo a estação em que mais de 60% das áreas com cana-de-açúcar de 4 a 10 meses (FIGURA 5), em pleno desenvolvimento vegetativo, mostrou-se decisivo no município de Jacarezinho, contendo nada menos de cinco variáveis independentes, das sete selecionadas, que mais influenciaram a produtividade. As variáveis da estação de outono que influenciaram negativamente a produtividade no município são o excedente hídrico e a temperatura média. E as variáveis que incrementaram a produtividade são o total de graus-dia, a média das temperaturas mínimas e a deficiência hídrica.

O efeito negativo do excedente hídrico no trimestre de outono (*ExcO*), possivelmente foi reflexo de uma estação de crescimento com baixa radiação disponível, pela influência da presença de nuvens, graças à grande variabilidade da radiação global incidente na região sul do Brasil (MARTINS *et al.*, 2007) combinada com excesso de água no perfil, que, apesar da região contar com solos profundos, sabendo-se que o manejo da cana-de-açúcar normalmente ocasiona compactação sub-superficial (COSTA LIMA, 2004), causando uma condição hipóxica do solo, e conseqüente falta de oxigenação ideal das raízes e produção de substâncias tóxicas a elas, conforme alertam TAIZ e ZEIGEL (2009).

Tendo sido, das regiões estudadas, a com menores temperaturas no outono (12,4 a 15 °C), quanto maior foi a temperatura mínima na estação, maior desenvolvimento vegetativo (ANEXO VIII). Esse fato vem de encontro ao estudo realizados por CAMPBELL *et al.* (1998), que obteve correlação significativa entre temperaturas entre 14 e 26 °C e o aparecimento de folhas e nós. Assim também, quanto maior foi o total de graus-dia, acima da temperatura base nessa estação, maior a radiação absorvida e produção de fotossintetizados, resultando em maior massa de colmos.

No entanto, segundo a equação ajustada, quanto maior a temperatura média de outono, que variou de 18 a 21 °C, menor a produtividade, sendo um dado controverso às conclusões do mesmo estudo de CAMPBELL *et al.* (1998), que afirmam que temperaturas crescentes favorecem o crescimento vegetativo. Não foi esclarecido o motivo pelo qual o aumento da temperatura média de outono prejudicou a produtividade da cana-de-açúcar.

As outras duas variáveis independentes selecionadas dizem respeito à evapotranspiração. A evapotranspiração relativa de inverno mais uma vez apareceu favorecendo a produtividade,

confirmando as afirmações de MOTA (1986), TERAMOTO (2003), MARCHIORI (2004) e PICOLI (2007).

Já, a evapotranspiração relativa de primavera foi inversamente proporcional à produtividade de massa de colmos na estação, sugerindo que, quando a evapotranspiração relativa aumenta nesta época, os carboidratos são destinados à constituição de tecidos de sustentação nas folhas e bainhas, com conseqüente crescimento vegetativo, em vez de serem direcionados à reserva nos colmos, como relata RODRIGUES (1995), referindo-se a trabalhos com suprimento variável de água.

4.2 ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE NO ANO SEGUINTE AOS EVENTOS METEOROLÓGICOS OBSERVADOS

4.2.1 PARANAÍ

Na FIGURA 12 é apresentado o gráfico comparativo entre a produtividade média real observada em Paranavaí – PR no ano seguinte aos eventos meteorológicos estudados e a produtividade estimada (*ProdS*) pela equação da regressão linear múltipla ajustada a partir de variáveis climáticas e da disponibilidade de água do solo, conforme metodologia descrita no ítem 3.3 e os valores observados, disponíveis no anexo I.

A melhor equação selecionada para o município foi:

$$ProdS = - 469.628 + 29.093(TmaxV) - 130(ExcO) - 12.443(TmaxP) + 64(PrecP) \quad (16)$$

Sendo:

ProdS, produtividade média anual do ano seguinte aos eventos meteorológicos, estimada em $kg.ha^{-1}$;

TmaxV, temperatura máxima média do primeiro trimestre (verão) em °C;

ExcO, excesso de água no solo no segundo trimestre (outono) em mm;

TmaxP, temperatura máxima média do quarto trimestre (primavera) em °C;

PrecP, precipitação do quarto trimestre (primavera) em mm.

Foram observadas as seguintes estatísticas para a equação:

$F = 6,37 * (\alpha < 0,05)$;

Coefficiente de correlação $R = 0,88$;

Coefficiente de determinação R^2 ajustado = 0,66;

Erro padrão = 11.023 kg ($S_{xy}\% = 14,75 \%$).

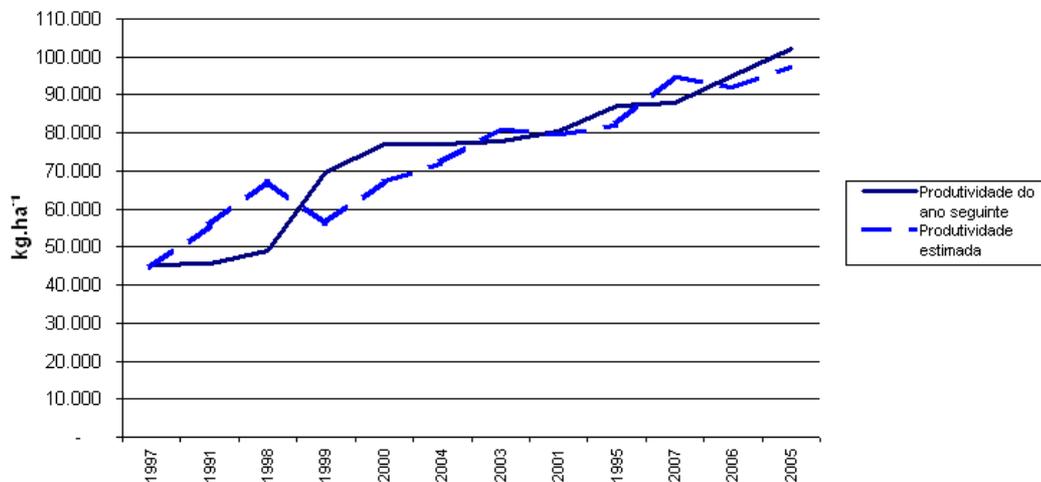


FIGURA 12 – Produtividade da cana-de-açúcar no ano seguinte (kg.ha^{-1}), em ordem crescente, versus a produtividade estimada (kg.ha^{-1}) resultante da equação ajustada da regressão linear múltipla a partir de variáveis climáticas e da disponibilidade de água no solo de 1997 a 2007, no município de Paranaíba – PR.

A produtividade do ano seguinte aos eventos estudados foi influenciada por duas variáveis na fase de crescimento no início do ano, e por duas variáveis na primavera, no final do ano, segundo a equação ajustada. A temperatura máxima do trimestre de verão foi diretamente proporcional à produtividade do ano seguinte, já o excesso de água no perfil do solo no trimestre de outono foi inversamente proporcional. A temperatura máxima variou, durante os anos estudados, entre 30 e 32 °C, estando na faixa considerada ideal para a brotação, segundo SEGATO *et al.* (2006), e crescimento vegetativo, segundo REIS (1981), RODRIGUES (1995) e MARCHIORI, (2004).

O excesso de água no trimestre de outono apareceu como fator prejudicial à produtividade no município de Paranaíba, tanto no mesmo ano quanto no ano seguinte à sua

ocorrência. Fato resultante da menor radiação global incidente pela presença de nuvens causando grande variabilidade da radiação global disponível na região sul, conforme observado por MARTINS *et al.* (2007) e demonstrado na FIGURA 3. Também supõe-se uma baixa aeração da zona radicular nos solos de baixa CAD, dificultando a respiração e originando a formação de substâncias tóxicas às raízes, conforme escrevem SALASSIER (1997) e TAIZ e ZEIGEL (2009).

Na primavera, quando mais de 20% da cana-de-açúcar de ciclo anual está em perfilhamento e de 30 a 40% está iniciando o crescimento vegetativo (FIGURA 5) as condições do tempo são fundamentais para o aumento produtividade da cana-de-açúcar no ano seguinte. Na primavera o aumento da temperatura máxima prejudicou e o aumento da precipitação favoreceu a produtividade da safra seguinte.

A precipitação em Paranaíba, dentre os cinco municípios, teve a maior variação na primavera, com cerca de 500 mm de diferença entre as primaveras mais e menos chuvosas, com média de 367 mm, mínimo de 283 mm e máximo de 784 mm. A precipitação nesta época beneficiou as brotações novas, que produziram no ano seguinte. SALASSIER (1997) alerta que os sub-períodos de emergência e perfilhamento são os que mais críticos quanto à disponibilidade de água, com os maiores prejuízos ocorrendo nesta fase, quando da ocorrência de déficits hídricos. MARCHIORI (2004) cita que, no período de crescimento, a cana-de-açúcar requer boa quantidade de água, com ação fundamental na turgescência, na translocação de solutos e na pressão de crescimento das células.

4.2.2 CRUZEIRO DO OESTE

Na FIGURA 13 é apresentado o gráfico comparativo entre a produtividade média real observada em Cruzeiro do Oeste – PR no ano seguinte aos eventos meteorológicos estudados e a produtividade estimada (*ProdS*) pela equação da regressão linear múltipla ajustada a partir de variáveis climáticas e da disponibilidade de água do solo, conforme metodologia descrita no item 3.3 e os valores observados, disponíveis no anexo II.

A melhor equação selecionada para o município foi:

$$ProdS = - 61.138 + 4.813(TmedI) + 154(GrdiaO) + 24(PrecV) \quad (17)$$

Sendo:

ProdS, produtividade média anual do ano seguinte aos eventos meteorológicos, estimada em kg.ha^{-1} ;

TmedI, temperatura média do terceiro trimestre (inverno) em $^{\circ}\text{C}$;

GrdiaO, graus-dia do segundo trimestre (outono) em $^{\circ}\text{C.d}$; *PrecV*, precipitação do primeiro trimestre (verão) em mm.

Foram observadas as seguintes estatísticas para a equação:

$F = 31,24$ ** ($\alpha < 0,01$);

Coefficiente de correlação $R = 0,94$;

Coefficiente de determinação R^2 ajustado = 0,85;

Erro padrão = 4.284 kg ($S_{xy}\% = 5,55 \%$).

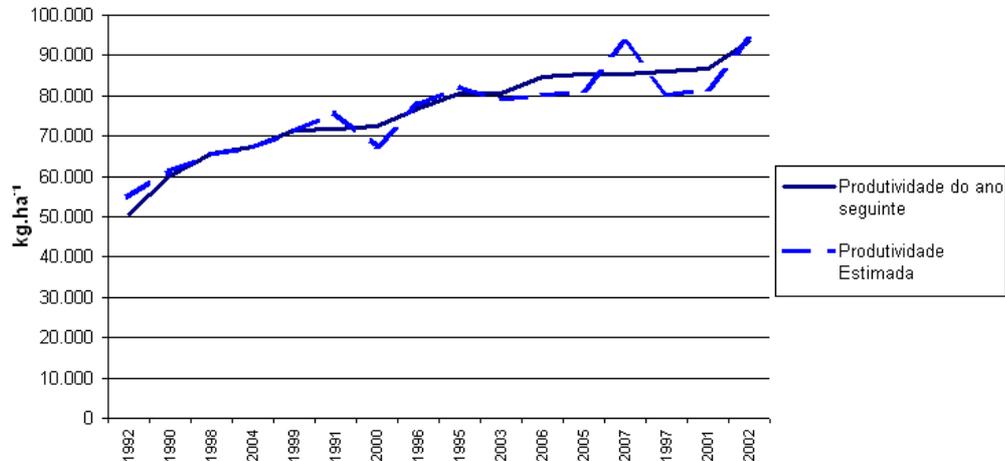


FIGURA 13 – Produtividade da cana-de-açúcar no ano seguinte (kg.ha^{-1}), em ordem crescente, versus a produtividade estimada (kg.ha^{-1}) pela equação ajustada da regressão linear múltipla a partir de variáveis climáticas e da disponibilidade de água no solo de 1990 a 2007, no município de Cruzeiro do Oeste – PR.

Três variáveis apareceram favorecendo a produtividade da safra seguinte, no município de Cruzeiro do Oeste: precipitação do trimestre de verão (*PrecV*); graus-dia do trimestre de outono (*GrdiaO*), que sugerem um desenvolvimento vegetativo vigoroso nas estações mais quentes, refletindo na safra seguinte; e temperatura média do trimestre de inverno, que indica um

inverno menos rigoroso, também favorecendo a continuidade da vegetação durante a estação mais fria.

DANTAS NETO *et al.* (2006) estudando o cultivo irrigado da cana-de-açúcar de ciclo anual, observou correlação linear entre a lâmina de irrigação aplicada nos primeiros seis meses e o crescimento das plantas.

A temperatura média de inverno no município de Cruzeiro do Oeste varia de 17 a 22 °C (ANEXO XI). Como, segundo REIS (1981), RODRIGUES (1995) e MARCHIORI (2004), a faixa ótima para o crescimento está entre 25° C e 35° C, e este é praticamente nulo abaixo de 20° C, quanto mais quentes os dias de inverno, mais o crescimento vegetativo das áreas já colhidas é beneficiado, refletindo-se na produtividade do ano seguinte.

4.2.3 ENGENHEIRO BELTRÃO

Na FIGURA 14 é apresentado o gráfico comparativo entre a produtividade média real observada em Engenheiro Beltrão – PR no ano seguinte aos eventos meteorológicos estudados e a produtividade estimada (*ProdS*) pela equação da regressão linear múltipla ajustada a partir de variáveis climáticas e da disponibilidade de água do solo, conforme metodologia descrita no ítem 3.3 e os valores observados, disponíveis no anexo III.

A melhor equação selecionada para o município foi:

$$ProdS = 124.522 + 8.265(TminP) - 9.382(TminV) - 71(DefV) - 21(ExcP) \quad (18)$$

Sendo:

ProdS, produtividade média anual do ano seguinte aos eventos meteorológicos, estimada em kg.ha⁻¹;

TminP, média das temperaturas mínimas do quarto trimestre (primavera) em °C;

TminV, média das temperaturas mínimas do primeiro trimestre (verão) em °C; *DefV*, deficiência hídrica do primeiro trimestre (verão) em mm;

ExcP, excesso hídrico no quarto trimestre (primavera) em mm.

Foram observadas as seguintes estatísticas para a equação:

$$F = 11,00 \text{ ** } (\alpha < 0,01);$$

$$\text{Coeficiente de correlação } R = 0,77;$$

$$\text{Coeficiente de determinação } R^2 \text{ ajustado} = 0,70;$$

$$\text{Erro padrão} = 4.613 \text{ kg } (S_{xy}\% = 5,26 \%).$$

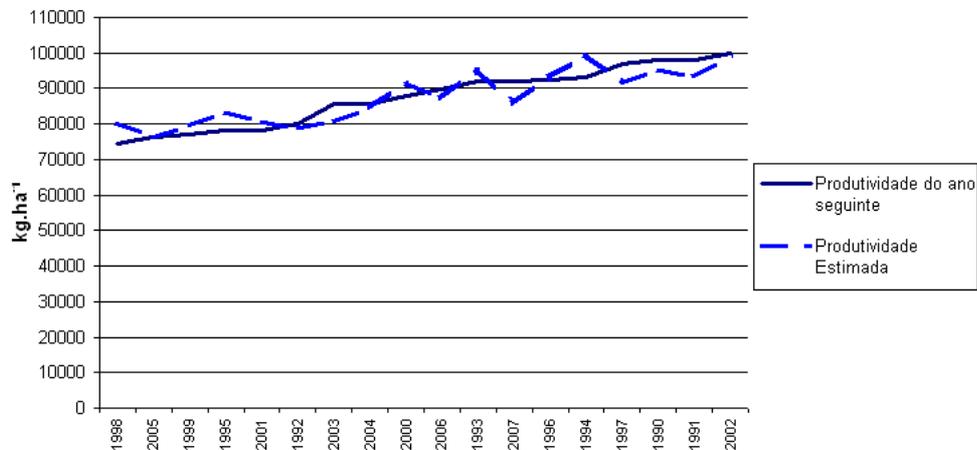


FIGURA 14 – Produtividade da cana-de-açúcar no ano seguinte ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), em ordem crescente, versus a produtividade estimada ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) resultante da equação da regressão linear múltipla ajustada a partir de variáveis climáticas e da disponibilidade de água no solo de 1990 a 2007, no município de Engenheiro Beltrão – PR.

A média das temperaturas mínimas no trimestre de primavera (T_{minP}), em Engenheiro Beltrão, variou entre 18,1 a 20,1 °C (ANEXO VIII). Essa variação, aparentemente pequena, é indicada pela equação ajustada como responsável pela maior produtividade da safra seguinte de cana-de-açúcar. Quanto mais as temperaturas noturnas estão acima da temperatura base de 20°C, abaixo da qual, segundo MARCHIORI (2008) e SCARPARI (2007), o crescimento da cana-de-açúcar é nulo, maior reflexo terá na produtividade da cana-de-açúcar na safra seguinte, beneficiando o perfilhamento e crescimento inicial de mais de 50% da área plantada (FIGURA 5). Cada grau centígrado a mais na média da temperatura mínima da primavera representa 8 toneladas a mais na produtividade do ano seguinte, segundo a equação ajustada.

No entanto, a média das temperaturas mínimas no trimestre de verão (T_{minV}) aparece na equação diminuindo a produtividade do ano seguinte. Variando de 19,4 a 20,9 °C, a cada aumento de um grau centígrado há o decréscimo de 9,3 Toneladas de cana-de-açúcar por hectare, segundo a equação ajustada. A ação negativa atribuída ao aumento da temperatura mínima de

verão parece contraditória, se considerarmos as observações de RODRIGUES (1985), segundo o qual plantas levadas a um ambiente controlado mais quente tenderam a aumentar seu crescimento vegetativo. Também contraria a consideração anterior sobre a temperatura base de 20°C para a cana-de-açúcar.

Outras duas variáveis diminuem a produtividade da cana-de-açúcar no ano seguinte, segundo a equação ajustada, sendo uma na estação do verão: deficiência hídrica (*DefV*); e uma na primavera: excesso hídrico (*ExcP*).

O déficit hídrico de verão varia de zero a 125 mm, com média de apenas 24 mm e com 75% dos anos com menos de 50 mm de déficit (ANEXO XIII). Quando ocorrem déficits extremos, a produtividade é prejudicada, inclusive no ano seguinte ao verão seco, revelando a importância do vigor adquirido pela planta para a safra futura, sendo a disponibilidade de água um fator importante de variabilidade da produtividade, conforme afirma TERAMOTO (2003).

Já o excesso hídrico no trimestre de primavera variou de zero a 266 mm, com média de 111 mm (ANEXO XIV). Segundo a equação ajustada, tal excesso causou uma diminuição de até 5.586 kg (fator 21 multiplicado por 266 mm, no máximo). Se considerarmos o erro padrão calculado de 4.613 kg (5,26 %), verificamos que a influência do excesso de água na primavera foi pequeno, comparado às outras variáveis selecionadas. Normalmente, nos outros municípios, o excesso hídrico na primavera aparece como sendo favorável à produtividade da cana-de-açúcar no ano seguinte, ao contrário do que aponta a equação ajustada para Engenheiro Beltrão .

No caso, a diminuição da produtividade pode ter relação com a condição desfavorável das raízes submetidas à de falta de oxigênio no solo, apontada por TAIZ e ZEIGEL (2009), que no caso dos solos muito argilosos, como os latossolos e nitossolos do município (EMBRAPA, 2008), é agravado pela compactação resultante do tráfego de máquinas na cultura da cana-de-açúcar, que permanece cinco a seis anos no local sem revolvimento do solo (COSTA LIMA, 2004).

4.2.4 CAMBARÁ

Na FIGURA 15 é apresentado o gráfico comparativo entre a produtividade média real observada em Cambará – PR no ano seguinte aos eventos meteorológicos estudados e a

produtividade estimada (*ProdS*) pela equação da regressão linear múltipla ajustada a partir de variáveis climáticas e da disponibilidade de água do solo, conforme metodologia descrita no ítem 3.3 e os valores observados, disponíveis no anexo IV.

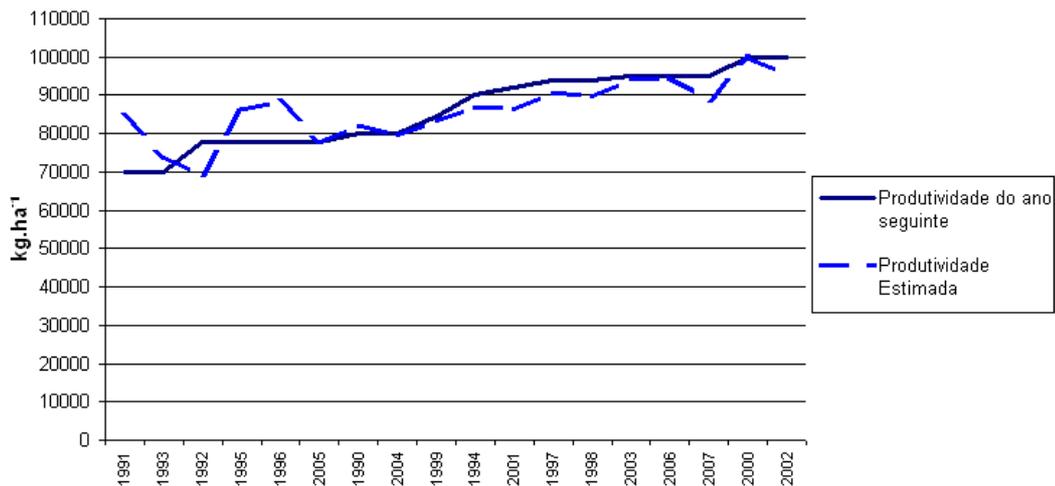


FIGURA 15 – Produtividade da cana-de-açúcar no ano seguinte ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), em ordem crescente, versus a produtividade estimada ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) resultante da fórmula da regressão linear múltipla ajustada a partir de variáveis climáticas e da disponibilidade de água no solo de 1990 a 2007, no município de Cambará – PR.

A melhor equação selecionada para o município foi:

$$ProdS = - 28.103 - 82(PrecO) + 3962(TmaxI) + 26.813(ETrell) + 40(ExcP) \quad (19)$$

Sendo:

ProdS, produtividade média anual do ano seguinte aos eventos meteorológicos, estimada em $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$;

PrecO, precipitação no segundo trimestre (outono) em mm;

TmaxI, média das temperaturas máximas do terceiro trimestre (inverno) em °C;

ETrell, média da evapotranspiração relativa do terceiro trimestre (inverno) em mm;

ExcP, excesso hídrico no quarto trimestre (primavera) em mm.

Foram observados as seguintes estatísticas para a equação:

$F = 5,39$ ** ($\alpha < 0,01$);

Coefficiente de correlação $R = 0,79$;

Coefficiente de determinação R^2 ajustado = 0,51;

Erro padrão = 6.921 kg ($S_{xy\%} = 8,06 \%$).

O aumento da precipitação no trimestre de outono (*PrecO*) influenciou diminuindo a produtividade do ano seguinte. Assim, como muitas vezes o excesso de água nos meses de outono também foram selecionados para outros municípios, a precipitação no outono como fator negativo tem relação com a diminuição da radiação global disponível para a realização da fotossíntese, que na região sul é maior que no resto do país (MARTINS *et al.* (2007), em meses de alto índice de área foliar, como demonstrado por OLIVEIRA (2004), e alta demanda de fotoassimilados para o desenvolvimento das plantas (FIGURA 5).

Já, todos as variáveis climáticas do segundo semestre que aparecem aumentando a produtividade do ano seguinte favorecem o crescimento vegetativo, com reflexo na produtividade do ano seguinte, sendo: temperatura máxima do inverno, evapotranspiração relativa do inverno e o excesso de água na primavera (ANEXO IX).

A temperatura máxima de inverno variou de 24,2 a 28,2 °C. Como a temperatura ótima para o crescimento vegetativo, segundo REIS (1981), RODRIGUES (1995) e MARCHIORI (2004), esta na faixa de 25 a 35 °C, verifica-se que os invernos mais quentes favorecem o crescimento das áreas de cana-de-açúcar já colhidas, resultando em maior produtividade no ano seguinte.

Da forma semelhante, a evapotranspiração relativa apontada por MOTA (1986), TERAMOTO (2003) e PICOLI (2007), como fator essencial para um bom desenvolvimento vegetativo. No caso, uma alta evapotranspiração relativa no inverno evidencia o pleno atendimento das necessidades hídricas da cultura durante o início do crescimento vegetativo das plantas, que serão colhidas no ano seguinte.

Também o excesso de água durante a primavera, quando a radiação disponível à fotossíntese gradualmente vai aumentando, evidencia o atendimento das necessidades hídricas da planta nos períodos de emergência e perfilhamento da cana-de-açúcar já colhida, que são críticos quanto à disponibilidade de água, segundo SALASSIER (1997).

4.2.5 JACAREZINHO

Na FIGURA 16 é apresentado o gráfico comparativo entre a produtividade média real observada em Jacarezinho – PR no ano seguinte aos eventos meteorológicos estudados e a produtividade estimada (*ProdS*) pela equação da regressão linear múltipla ajustada a partir de variáveis climáticas e da disponibilidade de água do solo, conforme metodologia descrita no item 3.3 e os valores observados, disponíveis no anexo V.

A melhor equação selecionada para o município foi:

$$ProdS = 22.511 - 101(PrecO) + 6.780(TminI) - 123(DefI) \quad (20)$$

Sendo:

ProdS, produtividade média anual do ano seguinte aos eventos meteorológicos, estimada em $kg.ha^{-1}$;

PrecO, precipitação no segundo trimestre (outono) em mm;

TminI, média das temperaturas mínimas do terceiro trimestre (inverno) em °C;

DefI, deficiência hídrica no terceiro trimestre (inverno) em mm.

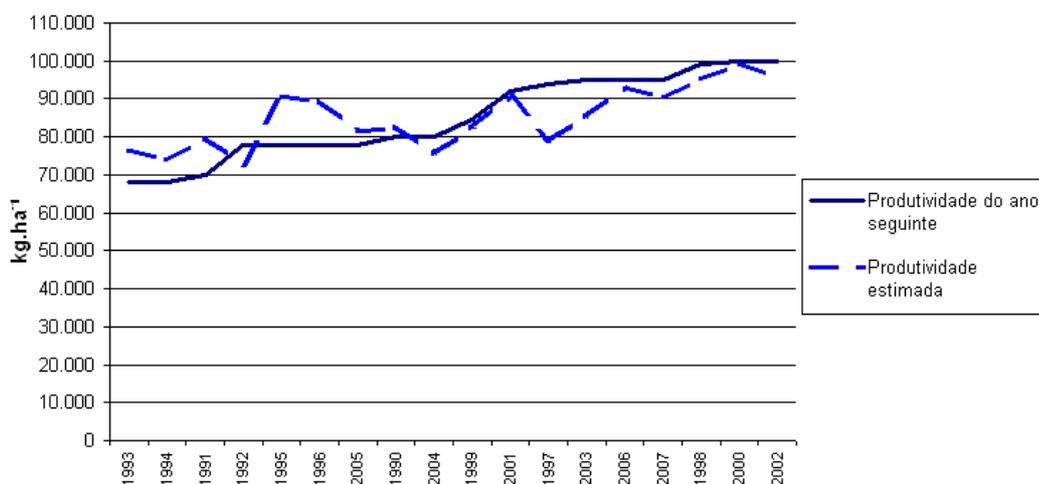


FIGURA 16 – Produtividade da cana-de-açúcar no ano seguinte ($kg.ha^{-1}$), em ordem crescente, versus a produtividade estimada ($kg.ha^{-1}$) resultante da fórmula da regressão linear múltipla ajustada a partir de variáveis climáticas e da disponibilidade de água no solo de 1990 a 2007, no município de Jacarezinho – PR.

Foram observadas as seguintes estatísticas para a equação:

$F = 5,56$ ** ($\alpha = 0,01$);

Coefficiente de correlação $R = 0,74$;

Coefficiente de determinação R^2 ajustado = 0,44;

Erro padrão = 8.318 kg ($S_{xy\%} = 9,81$ %).

Semelhante ao município vizinho, o aumento da precipitação no trimestre de outono diminui a produtividade do ano seguinte em Jacarezinho, quando as temperaturas são mais baixas e a radiação disponível é menor. A presença de nuvens nessa época causa grande diminuição da radiação absorvida pelo limbo foliar para realização de fotossíntese (MARTINS *et al.*, 2007).

Invernos com temperaturas mais altas favorecem a produtividade do ano seguinte, com os carboidratos sendo destinados à estrutura de bainhas e folhas, conforme observa RODRIGUES (1985), relatando estudos em ambientes controlados.

Já a deficiência hídrica no trimestre de inverno, que favorece o acúmulo de carboidratos de reserva no colmo, segundo SALASSIER (1997) e TERAMOTO (2003), prejudica a produtividade no ano seguinte.

4.3 ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR NO MESMO ANO DOS EVENTOS EL NIÑO E LA NIÑA.

Nos ANEXOS XVI a XXVII são apresentados precipitações, deficiências hídricas e excessos hídricos, acumulados e separados por: trimestres com eventos *EN*; trimestres com evento *LN*; e trimestres normais. Os balanços hídricos foram calculados segundo o método de THORNTHWAITE e MATHER (1955) desde 1990 até 2008, para os municípios de Paranavaí, Cruzeiro do Oeste, Engenheiro Beltrão, Cambará e Jacarezinho.

Juntamente com as regressões lineares múltiplas ajustadas para os mesmos municípios, segundo a metodologia descrita no item 3.5, auxiliam na discussão dos resultados observados.

4.3.1 PARANAÍ

Na FIGURA 17 é apresentado o gráfico comparativo entre a produtividade média real da cana-de-açúcar observada em Paranaíba - PR e a produtividade estimada pela equação da regressão linear múltipla ajustada a partir de variáveis que classificam a intensidade dos eventos El Niño e La Niña em cada trimestre do ano, conforme metodologia descrita no item 3.3 e os valores observados, disponíveis no anexo I.

A melhor equação selecionada para o município foi:

$$Prod = 88.096 - 14.012(ENver) - 16.154(LNout) \quad (21)$$

Sendo:

Prod, produtividade média anual estimada em $kg \cdot ha^{-1}$;

ENver, intensidade do evento “EL Niño” no primeiro trimestre (verão) igual a 0,1, 2 ou 3 para evento ausente, fraco, moderado ou forte, respectivamente;

LNout, intensidade do evento “La Niña” no segundo trimestre (outono) igual a 0,1, 2 ou 3 para evento ausente, fraco, moderado ou forte, respectivamente.

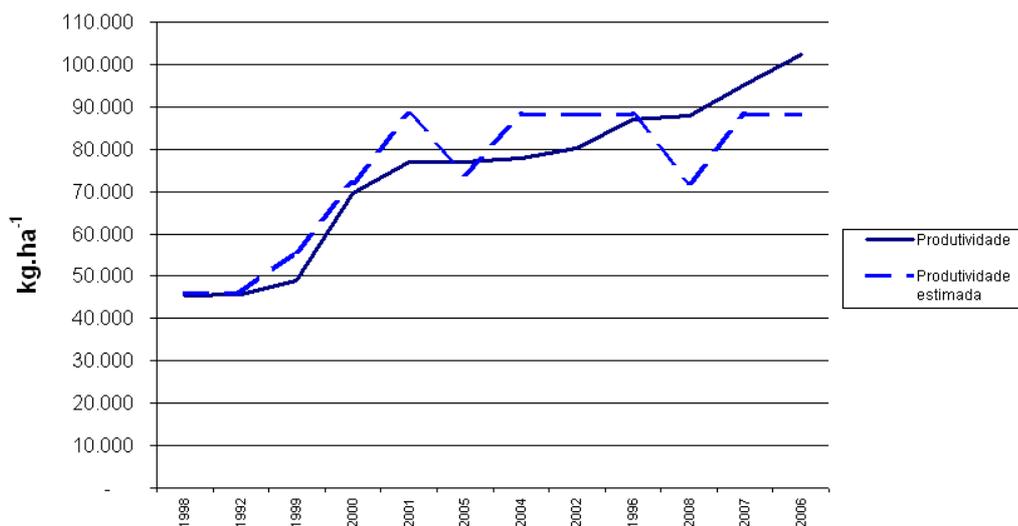


FIGURA 17 – Produtividade anual da cana-de-açúcar ($kg \cdot ha^{-1}$), em ordem crescente, observada entre os anos de 1992 e 2008, versus a produtividade estimada ($kg \cdot ha^{-1}$) resultante da fórmula da regressão linear múltipla ajustada a partir de classes de intensidade dos eventos “El Niño” e “La Niña” nos trimestres, no município de Paranaíba – PR

Foram observadas as seguintes estatísticas para a equação:

$F = 16,21$ ** ($\alpha < 0,01$);

Coefficiente de correlação $R = 0,88$;

Coefficiente de determinação R^2 ajustado = $0,73$;

Erro padrão = 9.762 kg ($S_{xy\%} = 13,06$ %).

Segundo a equação ajustada, a produtividade potencial de 88.096 kg.ha⁻¹ foi penalizada com a ocorrência do evento “El Niño” no trimestre de verão e do evento “La Niña” no trimestre de outono.

No estudo com regressão linear múltipla com componentes dos balanços hídricos para o município, no mesmo período (1990 a 2008), ficou identificada a influência negativa do excesso de água no perfil do solo no verão para a produtividade da cana-de-açúcar, tanto por representar menor radiação global disponível com a presença de nuvens para a realização da fotossíntese (MARTINS *et al.*, 2007), quanto pela baixa oxigenação da zona radicular em solo com baixa CAD existentes na região, com prejuízos descritos por TAIZ e ZEIGEL (2009), o que explica a influência negativa da ocorrência do “El Niño” nesta estação.

Já o “La Niña” na estação de outono, segundo estudo do IAPAR (2010) produz um período chuvoso no mês de Junho no micro-clima de Paranaíba, apesar do evento estar normalmente relacionado a períodos secos no sul do Brasil (FIGURA 18).

O segundo trimestre (outono) coincide com o aumento da área colhida que cresce de, aproximadamente, $3,9\%$ em abril para cerca de $11,5\%$ em maio e $11,5\%$ em junho (FIGURA 6). Também há ainda uma grande área (de 58 a 70%) que está na fase de pleno desenvolvimento vegetativo

A presença de períodos excessivamente chuvosos nos trimestres de verão e outono foram identificados como prejudiciais à produtividade nas condições de clima e solo de Paranaíba.

Apesar do que mostra o estudo do IAPAR (2010), quando observam-se os gráficos de excessos hídricos (ANEXO XVIII), notamos alguma concentração nos trimestres de *EN* com excesso hídrico acima de 150 mm no verão, e excessos hídricos em trimestres de *LN* similares a trimestres normais no outono, não demonstrando claramente a diferença entre trimestres com e sem eventos *LN* e *EN*, quando analisamos dados acumulados entre os anos de 1990 e 2008.

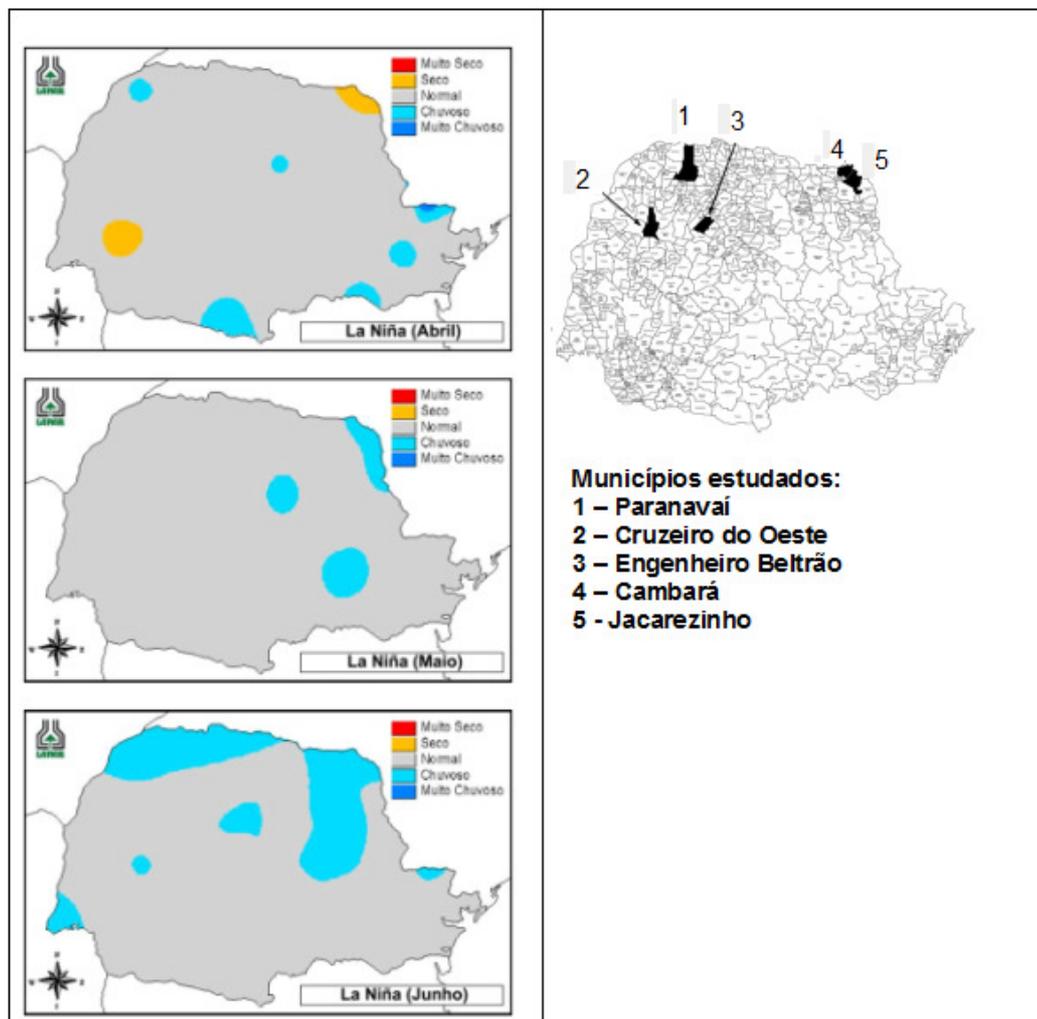


FIGURA 18 – Efeito do evento “La Niña” na precipitação do estado do Paraná no segundo trimestre do ano, e a posição geográfica dos cinco municípios estudados: vermelho – muito seco; amarelo – seco; cinza – normal; azul claro – chuvoso; azul escuro – muito chuvoso. Adaptado de IAPAR(2011).

4.3.2 CRUZEIRO DO OESTE

Na FIGURA 19 é apresentado o gráfico comparativo entre a produtividade média real da cana-de-açúcar observada em Cruzeiro do Oeste - PR e a produtividade estimada pela equação da regressão linear múltipla ajustada a partir de variáveis que classificam a intensidade dos eventos El Niño e La Niña em cada trimestre do ano, conforme metodologia descrita no item 3.3 e os valores observados, disponíveis no anexo II.

A melhor equação selecionada para o município foi:

$$Prod = 72.717 + 8.756(Nout) \quad (22)$$

Sendo:

Prod, produtividade média anual estimada em $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$;

Nout, ocorrência de segundo trimestre com clima normal (outono) com valor igual a 0 (trimestre com eventos *EN* ou *LN*) ou 1 (trimestre normal).

Foram observadas as seguintes estatísticas para a equação:

$F = 3,45^{ns}$ ($\alpha > 0,05$);

Coefficiente de correlação $R = 0,40$;

Coefficiente de determinação R^2 ajustado = 0,11;

Erro padrão = 10.408 kg ($S_{xy}\% = 13,5\%$).

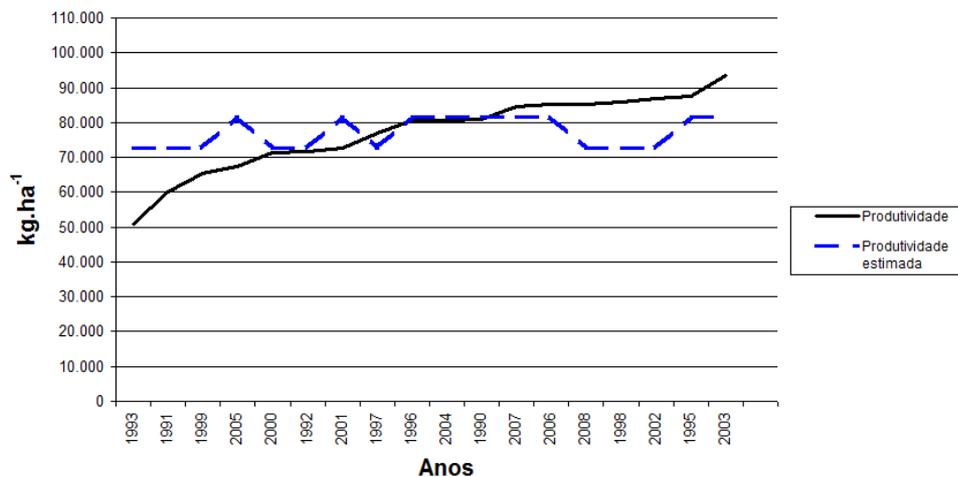


FIGURA 19 – Produtividade anual da cana-de-açúcar ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$), em ordem crescente, observada entre os anos de 1990 e 2008, versus a produtividade estimada ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) pela equação da regressão múltipla ajustada a partir de classes de intensidade dos eventos El Niño e La Niña nos trimestres, no município de Cruzeiro do Oeste – PR.

No município de Cruzeiro do Oeste, que também possui solo arenoso e arenoso/argiloso com baixa *CAD*, mas está mais ao sul, o regime de chuvas no verão e outono é menos intenso que em Paranavaí.

No caso, não ficou demonstrado influência dos eventos El Niño e La Niña na produtividade da cana-de-açúcar no município. Os coeficientes de correlação e determinação

ajustados baixos (0,40 e 0,11) e probabilidade não significativa de F confirmam essa situação diferenciada entre os dois municípios.

Os estudos do IAPAR (2010) sobre a influência dos eventos EN e LN no clima do Estado do Paraná, evidenciam que a região onde fica o município de Cruzeiro do Oeste não é tão influenciado quanto os municípios do extremo norte, localizados na divisa com o estado de São Paulo.

4.3.3 ENGENHEIRO BELTRÃO

A melhor equação selecionada para o município foi:

$$Prod = 86.159 + 3.949(ENver) - 2.536(LNver) \quad (23)$$

Sendo:

$Prod$, produtividade média anual estimada em $kg \cdot ha^{-1}$;

$ENver$, intensidade do evento “EL Niño” no primeiro trimestre (verão) igual a 0,1, 2 ou 3 para evento ausente, fraco, moderado ou forte, respectivamente;

$LNout$, intensidade do evento “La Niña” no primeiro trimestre (verão) igual a 0,1, 2 ou 3 para evento ausente, fraco, moderado ou forte, respectivamente.

O município de Engenheiro Beltrão teve a maior produtividade média de cana-de-açúcar nos 18 anos estudados (TABELA 4), sendo considerado um ambiente com condições muito favoráveis à cultura no Estado, tem solos profundos, férteis e com alta capacidade de água disponível (CAD). Porém são solos muito argilosos, suscetíveis à compactação (COSTA LIMA, 2004).

Na FIGURA 20 é apresentado o gráfico comparativo entre a produtividade média real da cana-de-açúcar observada em Engenheiro Beltrão - PR e a produtividade estimada pela equação da regressão linear múltipla ajustada a partir de variáveis que classificam a intensidade dos eventos El Niño e La Niña em cada trimestre do ano, conforme metodologia descrita no item 3.3 e os valores observados, disponíveis no anexo III.

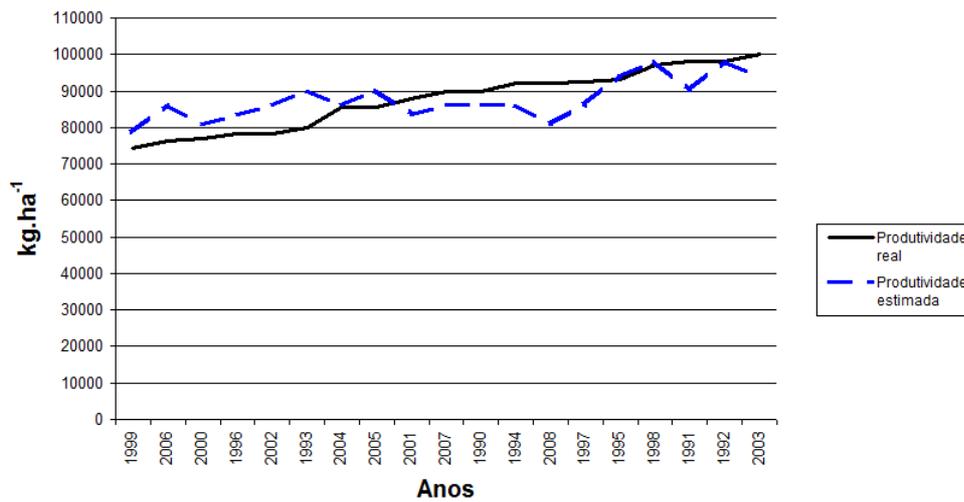


FIGURA 20 – Produtividade anual da cana-de-açúcar ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), em ordem crescente, observada entre os anos de 1990 e 2008, versus a produtividade estimada ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) pela equação da regressão múltipla ajustada a partir de classes de intensidade dos eventos El Niño e La Niña nos trimestres, no município de Engenheiro Beltrão – PR.

Foram observadas as seguintes estatísticas para a equação:

$$F = 6,18^{**} (\alpha < 0,01);$$

$$\text{Coeficiente de correlação } R = 0,66;$$

$$\text{Coeficiente de determinação } R^2 \text{ ajustado} = 0,36;$$

$$\text{Erro padrão} = 6.555 \text{ kg } (S_{xy}\% = 7,47 \%).$$

No caso, a equação ajustada aponta como fator positivo à produtividade da cultura a ocorrência do evento “El Niño” no verão, trazendo mais chuvas para a região central do Estado (FIGURA 21) apenas no mês de março, numa época de pleno crescimento vegetativo.

Neste caso, segundo o IAPAR (2010), a intensidade de precipitação, normal nos primeiros meses do verão, e uma maior precipitação no final do verão, quando o perfilhamento já ocorreu na maior parte da área da cultura (FIGURA 5) e as estruturas da planta estão bem desenvolvidas, é indicada como ideal para o ambiente da Engenheiro Beltrão.

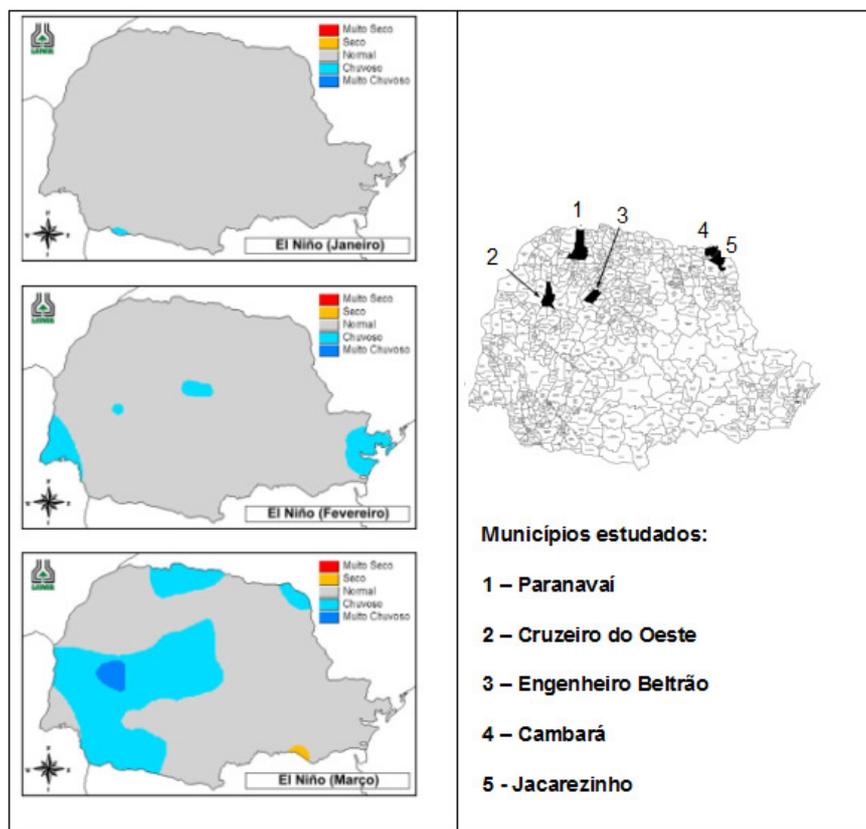


FIGURA 21 – Efeito do evento “El Niño” na precipitação do estado do Paraná no primeiro trimestre do ano (verão) e a posição geográfica dos cinco municípios estudados: vermelho – muito seco; amarelo – seco; cinza – normal; azul claro – chuvoso; azul escuro – muito chuvoso. Adaptado de IAPAR(2010).

Já a ocorrência do evento *LN* no verão, segundo a equação ajustada, diminui a produtividade média da cana-de-açúcar (*TCH*).

Analisando o estudo do IAPAR (2010) e CARAMORI *et. al.* (2011), verificamos que, no Paraná, o evento *LN* causa seca apenas no mês de novembro, na primavera (FIGURA 23), corroborando os resultados obtidos por WALTRICK (2010), estudando a erosividade da chuva quando ocorre *LN*.

No verão, diferentemente do senso comum de que *LN* causa seca, no Paraná, o IAPAR aponta aumento da precipitação nos meses do primeiro trimestre (FIGURA 22), em especial no centro do estado, onde localiza-se o município de Engenheiro Beltrão.

Prejuízos originados dos problemas de compactação do solo pela mecanização agindo sobre solos muito argilosos, diminuindo a oxigenação das raízes, apontados por COSTA LIMA

(2004), somados à diminuição da radiação global incidente, pela presença de nuvens durante o verão excessivamente chuvoso. MARTINS *et al.* (2007) verificaram que na região Sul do Brasil ocorre maior variabilidade de radiação incidente, e a cana-de-açúcar, sendo uma planta tropical altamente eficiente, tem seu processo fotossintético prejudicado e o perfilhamento menos intenso quando há excesso de nuvens (RODRIGUES, 1995).

Quando a cultura foi submetida a excesso de precipitação durante a época de crescimento vegetativo intenso, causam mais efeitos negativos do que positivos. A condição hipóxica do solo diminui drasticamente a eficiência da respiração das raízes (TAIZ e ZEIGEL, 2009). Quando são analisados os gráficos dos excessos hídricos ocorridos entre os anos de 1990 e 2008 (ANEXO XXIV), verificamos que nos trimestres de verão com *LN* há uma concentração de valores entre 150 e 200 mm acumulados, que denota uma situação desfavorável à cultura.

Já nos trimestres de verão com *EN*, apesar de haverem valores extremos com mais de 450 mm de excesso, mais de 50% das vezes somam menos de 80 mm acumulados. O evento, segundo a equação ajustada, apareceu indicando condições climáticas favoráveis à produtividade da cana-de-açúcar.

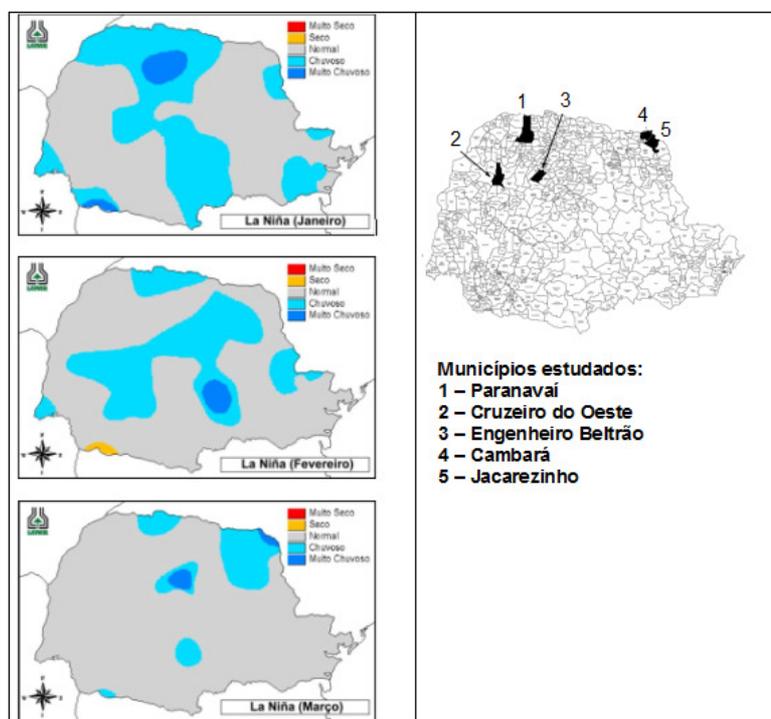


FIGURA 22 – Efeito do evento “La Niña” na precipitação do estado do Paraná no primeiro trimestre do ano (verão) e a posição geográfica dos cinco municípios estudados: vermelho – muito seco; amarelo – seco; cinza – normal; azul claro – chuvoso; azul escuro – muito chuvoso. Adaptado de IAPAR(2010).

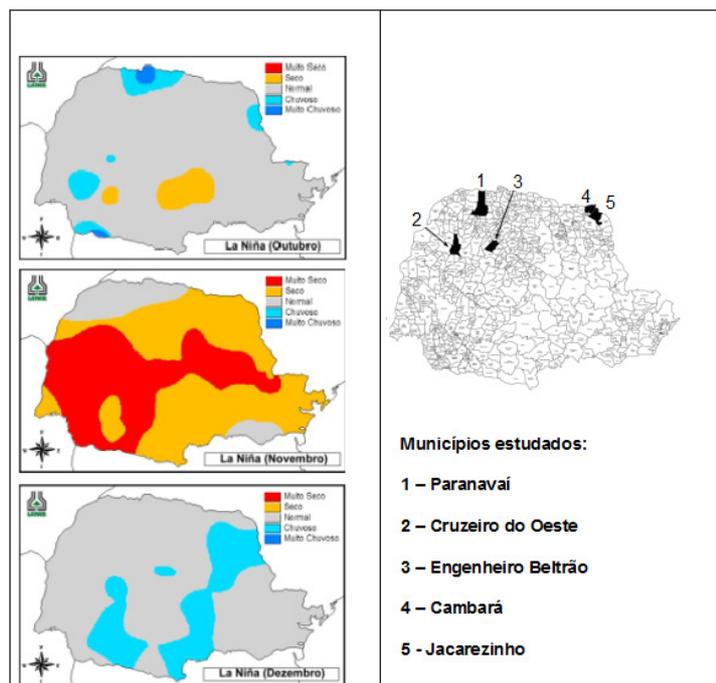


FIGURA 23 – Efeito do evento “La Niña” na precipitação do estado do Paraná no quarto trimestre do ano (primavera) e a posição geográfica dos cinco municípios estudados: vermelho – muito seco; amarelo – seco; cinza – normal; azul claro – chuvoso; azul escuro – muito chuvoso. Adaptado de IAPAR(2010).

4.3.4 CAMBARÁ

Na FIGURA 24 é apresentado o gráfico comparativo entre a produtividade média real da cana-de-açúcar observada em Cambará - PR e a produtividade estimada pela equação da regressão linear múltipla ajustada a partir de variáveis que classificam a intensidade dos eventos El Niño e La Niña em cada trimestre do ano, conforme metodologia descrita no item 3.3 e os valores observados, disponíveis no anexo IV.

A melhor equação selecionada para o município foi:

$$Prod = 88.629 - 4.182(EN_{inv}) \quad (24)$$

Sendo:

$Prod$, produtividade média anual estimada em $kg \cdot ha^{-1}$;

EN_{inv} , intensidade do evento “EL Niño” no terceiro trimestre (inverno) igual a 0,1, 2 ou 3 para evento ausente, fraco, moderado ou forte, respectivamente.

Foram observadas as seguintes estatísticas para a equação:

$$F = 2,84^{ns} (\alpha > 0,05);$$

Coefficiente de correlação $R = 0,38$;

Coefficiente de determinação R^2 ajustado = 0,093;

Erro padrão = 9.309 kg ($S_{xy\%} = 10,85\%$).

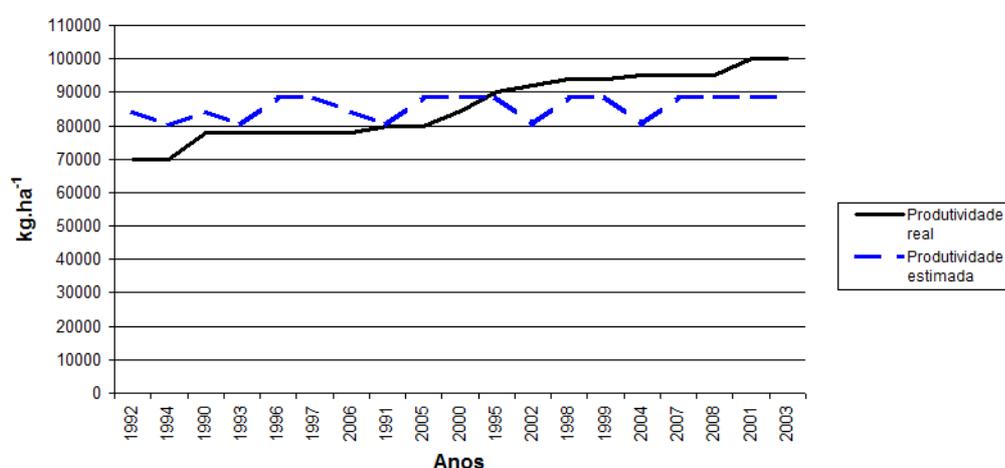


FIGURA 24 – Produtividade anual da cana-de-açúcar (kg.ha^{-1}), em ordem crescente, observada entre os anos de 1990 e 2008, versus a produtividade estimada (kg.ha^{-1}) pela fórmula da regressão múltipla ajustada a partir de classes de intensidade dos eventos El Niño e La Niña nos trimestres, no município de Cambará – PR.

Com baixíssimo coeficiente de determinação ajustado ($R^2 = 0,093$) e estatística F não significativa, a equação ajustada não indicou influência nem do evento “El Niño” quanto do “La Niña” sobre a produtividade média anual da cana-de-açúcar no município de Cambará.

4.3.5 JACAREZINHO

Na FIGURA 25 é apresentado o gráfico comparativo entre a produtividade média real da cana-de-açúcar observada em Jacarezinho - PR e a produtividade estimada pela equação da regressão linear múltipla ajustada a partir de variáveis que classificam a intensidade dos eventos

El Niño e La Niña em cada trimestre do ano, conforme metodologia descrita no item 3.3 e os valores observados, disponíveis no anexo V.

A melhor equação selecionada para o município foi:

$$Prod = 82.477 + 4.837(LNver) \quad (25)$$

Sendo:

Prod, produtividade média anual estimada em $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$;

LNver, intensidade do evento “La Niña” no primeiro trimestre (verão) igual a 0,1, 2 ou 3 para evento ausente, fraco, moderado ou forte, respectivamente.

Foram observadas as seguintes estatísticas para a equação:

$$F = 3,2^{ns} \quad (\alpha > 0,05);$$

Coefficiente de correlação $R = 0,39$;

Coefficiente de determinação R^2 ajustado = 0,15;

Erro padrão = 10.370 kg ($S_{xy}\% = 12,23\%$).

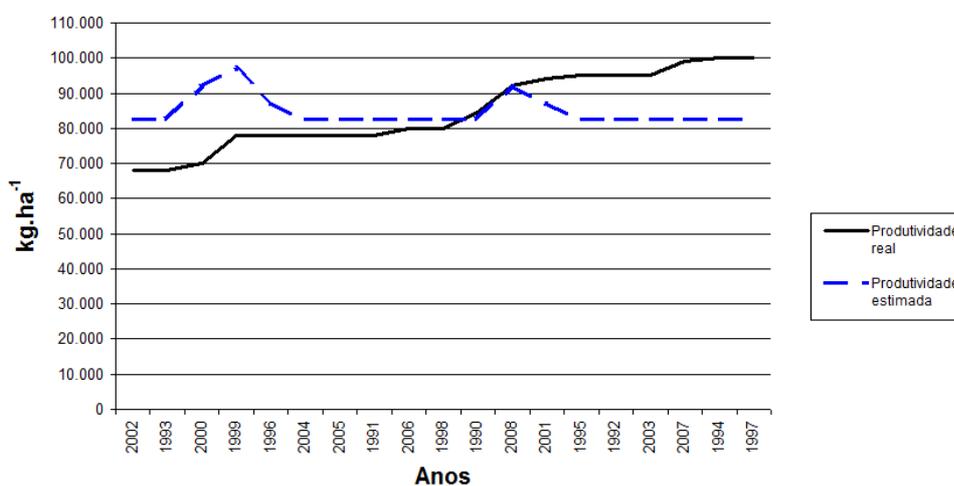


FIGURA 25 – Produtividade anual da cana-de-açúcar ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), em ordem crescente, observada entre os anos de 1990 e 2008, versus a produtividade estimada ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) pela equação da regressão múltipla ajustada a partir de classes de intensidade dos eventos El Niño e La Niña nos trimestres, no município de Jacarezinho – PR.

Em Jacarezinho, município vizinho a Cambará, igualmente a equação ajustada não evidenciou influência dos dois eventos estudados sobre a produtividade da cana-de-açúcar, com

probabilidade não significativa para a estatística F e coeficiente de determinação ajustado (R^2) apenas com valor 0,15.

Essas estatísticas confirmam os levantamentos feitos pelo IAPAR (2010) e por WALTRICK (2010), com relação à influência do EN e LN no Paraná. Na região Nordeste do estado a influência de ambos os eventos estão concentrados apenas no mês de Novembro, com chuva quando ocorre EN e seca quando ocorre o LN .

4.4 ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR NO ANO SEGUINTE AOS EVENTOS EL NIÑO E LA NIÑA.

4.4.1 PARANAÍ

Na FIGURA 26 é apresentado o gráfico comparativo entre a produtividade média real da cana-de-açúcar em Paranaíba - PR no ano seguinte às observações dos eventos climáticos “El Niño” e “La Niña”, versus a produtividade estimada pela equação da regressão linear múltipla ajustada a partir de variáveis que classificam a intensidade dos eventos El Niño e La Niña em cada trimestre do ano, conforme metodologia descrita no item 3.3 e os valores observados, disponíveis no anexo VII.

A melhor equação selecionada para o município foi:

$$ProdS = 49.491 + 36.225(Nout) + 7.829(LNver) \quad (26)$$

Sendo:

$ProdS$, produtividade média anual estimada para o ano seguinte das observações dos eventos climáticos, em $kg.ha^{-1}$;

$Nout$, segundo trimestre (outono) com valor igual a 0 (trimestre com eventos EN ou LN) ou 1 (trimestre normal);

LN_{ver} , intensidade do evento “La Niña” no primeiro trimestre (verão) igual a 0,1, 2 ou 3 para evento ausente, fraco, moderado ou forte, respectivamente.

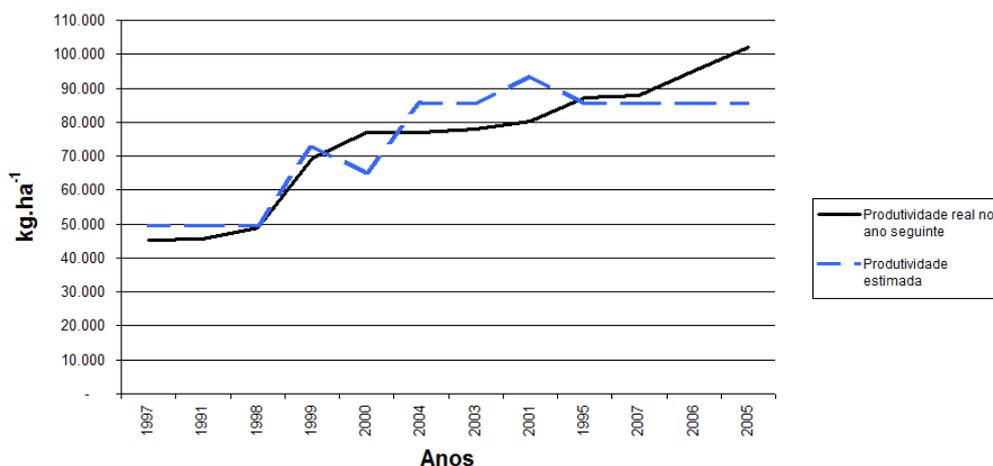


FIGURA 26 – Produtividade anual da cana-de-açúcar (kg.ha⁻¹) em ordem crescente, no ano seguinte às observações dos eventos climáticos entre os anos de 1990 e 2007, versus a produtividade estimada (kg.ha⁻¹) resultante da fórmula da regressão linear múltipla ajustada a partir de classes de intensidade dos eventos El Niño e La Niña nos trimestres, para o município de Paranaíba – PR.

Foram observadas as seguintes estatísticas para a equação:

$$F = 16,05 \text{ ** } (\alpha = 0,001);$$

$$\text{Coeficiente de correlação } R = 0,88;$$

$$\text{Coeficiente de determinação } R^2 \text{ ajustado} = 0,73;$$

$$\text{Erro padrão} = 9.799 \text{ kg } (S_{xy}\% = 13,11 \%).$$

Segundo os estudos do IAPAR (2010), o evento LN , quando ocorre no verão, trás tempo chuvoso em janeiro, para a região do município de Paranaíba.

Coincide com a época em que cerca de 30% da área plantada se encontra em fase de brotação e perfilhamento (TABELA 2), ocorrendo uma boa formação da cultura, que se reflete na produtividade do ano seguinte.

Já nos meses de outono (abril, maio e junho), o tempo chuvoso trazido tanto pelo evento EN como pelo LN (FIGURAS 29 e 19) é prejudicial à produtividade no ano seguinte.

Repetidamente, no estudo realizado também com regressão linear múltipla com os componentes dos balanços hídricos, o excesso de chuva nesta fase foi indicado como elemento prejudicial ao desenvolvimento da cana-de-açúcar, que encontra-se em pleno crescimento

vegetativo em mais de 60% da área (FIGURA 5) e a temperatura média desce de cerca de 25 °C no verão para cerca de 20 °C no outono. Há menos radiação disponível nos dias nublados, e o excesso de água no perfil do solo arenoso com gradiente textural provoca falta de oxigênio para as raízes, prejudicando a respiração (SALASSIER, 1997; TAIZ e ZEIGEL, 2009; COSTA LIMA, 2004).

Principalmente o excesso de água no perfil do solo nos trimestres com *EN* é evidenciado no ANEXO XVIII, onde se pode verificar um mínimo de 50 mm até mais de 450 mm acumulados no período.

4.4.2 CRUZEIRO DO OESTE

Na FIGURA 27 é apresentado o gráfico comparativo entre a produtividade média real da cana-de-açúcar em Cruzeiro do Oeste - PR no ano seguinte às observações dos eventos climáticos “El Niño” e “La Niña”, versus a produtividade estimada pela equação da regressão linear múltipla ajustada a partir de variáveis que classificam a intensidade dos eventos El Niño e La Niña em cada trimestre do ano, conforme metodologia descrita no item 3.3 e os valores observados, disponíveis no anexo VII.

A melhor equação selecionada para o município foi:

$$ProdS = 79.298 - 7.095(ENout) \quad (27)$$

Sendo:

ProdS, produtividade média anual estimada para o ano seguinte das observações dos eventos climáticos, em kg.ha⁻¹;

ENout, intensidade do evento “El Niño” no segundo trimestre (outono) igual a 0,1, 2 ou 3 para evento ausente, fraco, moderado ou forte, respectivamente.

Foram observadas as seguintes estatísticas para a equação:

$F = 6,28$ * ($\alpha = 0,025$);

Coefficiente de correlação $R = 0,55$;

Coefficiente de determinação R^2 ajustado = 0,26;

Erro padrão = 9.782 kg ($S_{xy}\%$ = 12,68 %).

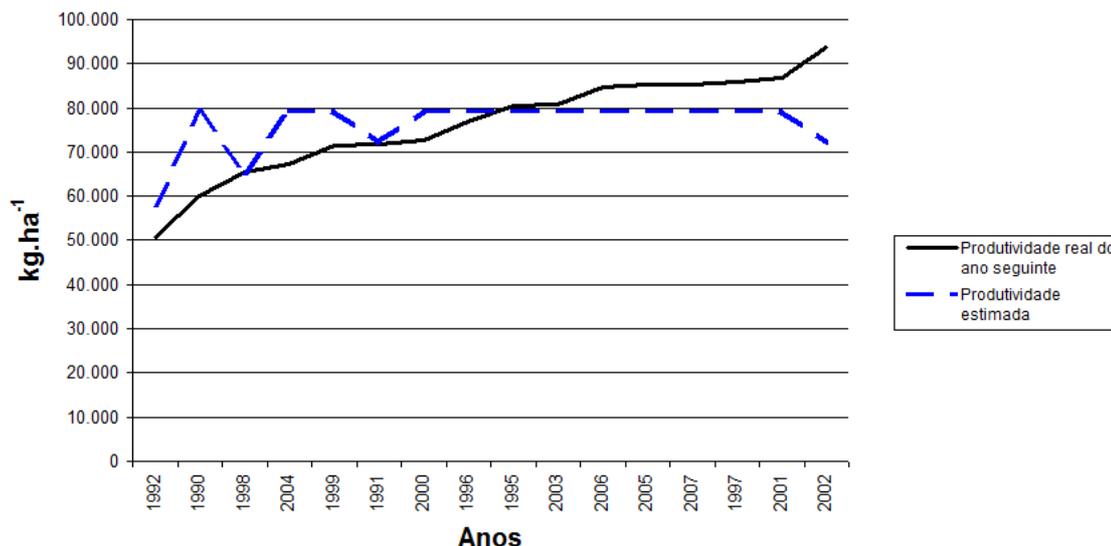


FIGURA 27 – Produtividade anual da cana-de-açúcar (kg.ha⁻¹) em ordem crescente, no ano seguinte às observações dos eventos climáticos entre os anos de 1990 e 2007, versus a produtividade estimada (kg.ha⁻¹) resultante da fórmula da regressão linear múltipla ajustada a partir de classes de intensidade dos eventos El Niño e La Niña nos trimestres, para o município de Cruzeiro do Oeste – PR.

Novamente o tempo chuvoso nos meses de outono apareceu penalizando a produtividade do ano seguinte na cana-de-açúcar.

O excesso de água no perfil do solo arenoso com gradiente textural, como são os nitossolos do município, causou menor disponibilidade de oxigênio às raízes (SALASSIER, 1997; TAIZ e ZEIGEL, 2009); e a presença de nuvens, numa época com temperaturas normalmente mais baixas (ANEXOS VIII, IX e X), diminui a quantidade de radiação disponível à realização da fotossíntese (MARTINS *et al.*, 2007).

Quando são analisados os gráficos de precipitação e excesso hídrico no outono (ANEXOS XIX e XXI), fica evidente o efeito do EN, com mais de 400 mm de média de precipitação e mais de 300 mm de média de excesso hídrico no trimestre.

Na FIGURA 28, são mostrados os efeitos do El Niño nas regiões do Estado do Paraná, nos meses de Abril, Maio e Junho, confirmando o aumento da precipitação nesses meses.

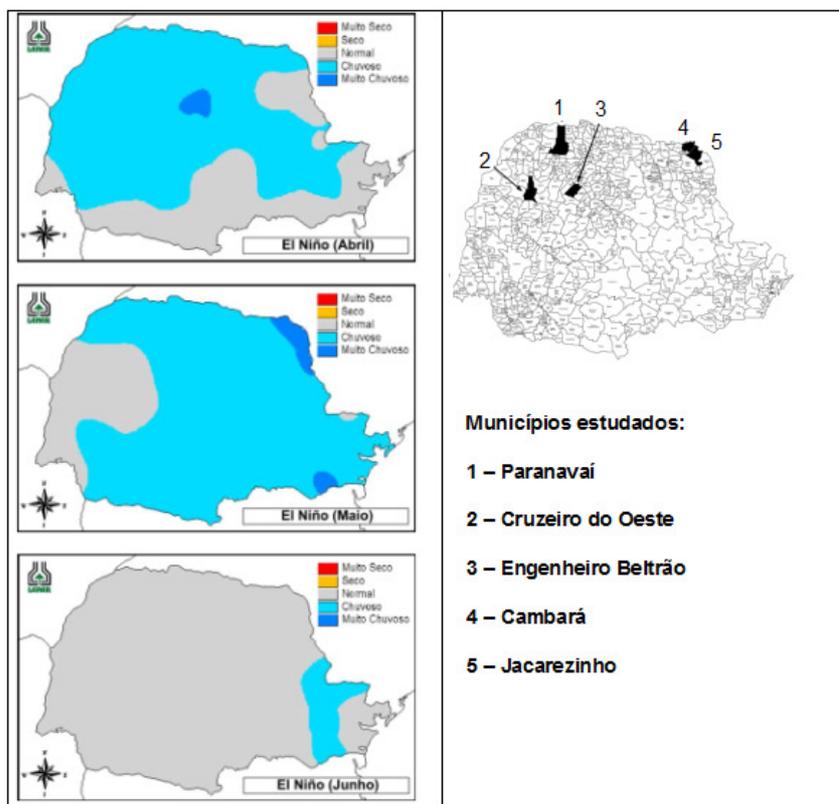


FIGURA 28– Efeito do evento “El Niño” na precipitação do estado do Paraná no segundo trimestre do ano e a posição geográfica dos cinco municípios estudados: vermelho – muito seco; amarelo – seco; cinza – normal; azul claro – chuvoso; azul escuro – muito chuvoso. Adaptado de IAPAR(2010).

4.4.3 ENGENHEIRO BELTRÃO

Na FIGURA 29 é apresentado o gráfico comparativo entre a produtividade média real da cana-de-açúcar em Engenheiro Beltrão - PR no ano seguinte às observações dos eventos climáticos “El Niño” e “La Niña”, versus a produtividade estimada pela equação da regressão linear múltipla ajustada a partir de variáveis que classificam a intensidade dos eventos El Niño e La Niña em cada trimestre do ano, conforme metodologia descrita no item 3.3 e os valores observados, disponíveis no anexo VII.

A melhor equação selecionada para o município foi:

$$ProdS = 85.034 + 4.617(Nver) + 3.483(ENinv) - 2.514(ENver) \quad (28)$$

Sendo:

$ProdS$, produtividade média anual estimada para o ano seguinte das observações dos eventos climáticos, em $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$;

$Nver$, ocorrência de primeiro trimestre com clima normal (verão) com valor igual a 0 (trimestre com eventos EN ou LN) ou 1 (trimestre normal);

$ENinv$, intensidade do evento “El Niño” no terceiro trimestre (inverno) igual a 0,1, 2 ou 3 para evento ausente, fraco, moderado ou forte, respectivamente;

$ENver$, intensidade do evento “El Niño” no primeiro trimestre (verão) igual a 0,1, 2 ou 3 para evento ausente, fraco, moderado ou forte, respectivamente.

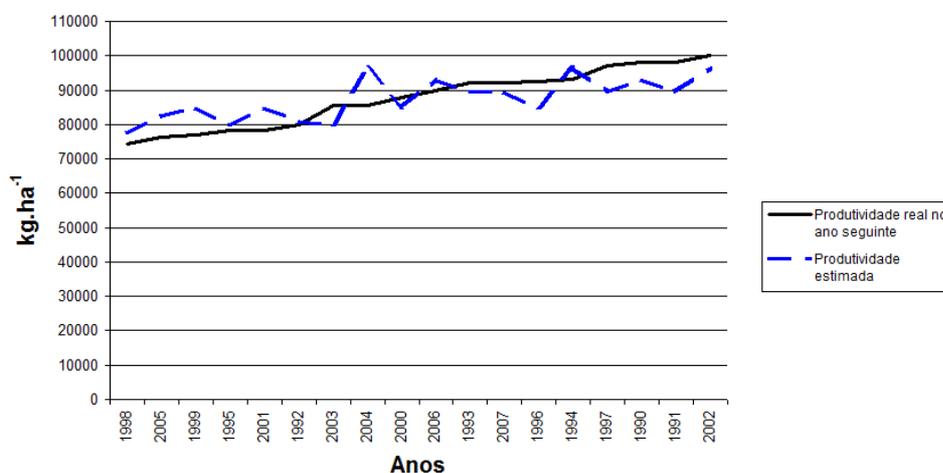


FIGURA 29 – Produtividade anual da cana-de-açúcar ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) em ordem crescente, no ano seguinte às observações dos eventos climáticos entre os anos de 1990 e 2007, versus a produtividade estimada ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) resultante da fórmula da regressão linear múltipla ajustada a partir de classes de intensidade dos eventos El Niño e La Niña nos trimestres, para o município de Engenheiro Beltrão – PR.

Foram observadas as seguintes estatísticas para a equação:

$$F = 5,11 * (\alpha = 0,014);$$

$$\text{Coeficiente de correlação } R = 0,72;$$

$$\text{Coeficiente de determinação } R^2 \text{ ajustado} = 0,42;$$

$$\text{Erro padrão} = 6.431 \text{ kg } (S_{xy}\% = 7,33 \%).$$

Segundo a equação ajustada, para o município de Engenheiro Beltrão, a ocorrência do evento “El Niño” no verão influenciou prejudicando a produtividade da cana-de-açúcar, do ano

seguinte à ocorrência. Segundo o IAPAR (2010), traz tempo chuvoso em março, para a região (FIGURA 21).

Analisando os gráficos do excedente hídrico no solo entre os anos de 1990 e 2008 (ANEXO XXIV), verifica-se que o *EN* elevou muito o valor acumulado para o trimestre de verão, com 50% das ocorrências entre 100 e 450 mm, sugerindo dificuldade para respiração das raízes nos solos argilosos da região, sujeitos a compactação com o tráfego de máquinas e caminhões comuns no manejo da cana-de-açúcar, que diminui a quantidade de macroporos do solo (COSTA LIMA, 2004).

Já o primeiro trimestre com clima normal, para a região do município de Engenheiro Beltrão, combinou boa precipitação no trimestre, com mais de 400 mm (ANEXO XXII), com a aeração necessária às raízes, que pode ser observada pelo comportamento do alto déficit hídrico do solo (ANEXO XXIII), atingindo valor máximo de 125 mm e do baixo excesso hídrico do solo (ANEXO XXIV), com valor máximo de 143 mm, quando comparados aos trimestres de verão com *EN* e *LN*.

Finalmente, o “El Niño”, acontecendo no inverno, refletiu positivamente à produtividade da cultura no ano seguinte. Analisando os gráficos de deficiência hídrica no inverno (ANEXO XXIII), verifica-se que, na ocorrência de *EN*, houve um aumento da média da deficiência total, havendo maior acúmulo de sacarose, conforme afirmam TERAMOTO (2003) e MARCHIORI (2004), refletindo em maior reserva para a brotação no ano seguinte.

4.4.4 CAMBARÁ

Na FIGURA 30 é apresentado o gráfico comparativo entre a produtividade média real da cana-de-açúcar em Cambará - PR no ano seguinte às observações dos eventos climáticos “El Niño” e “La Niña”, versus a produtividade estimada pela equação da regressão linear múltipla ajustada a partir de variáveis que classificam a intensidade dos eventos El Niño e La Niña em cada trimestre do ano, conforme metodologia descrita no item 3.3 e os valores observados, disponíveis no anexo VII.

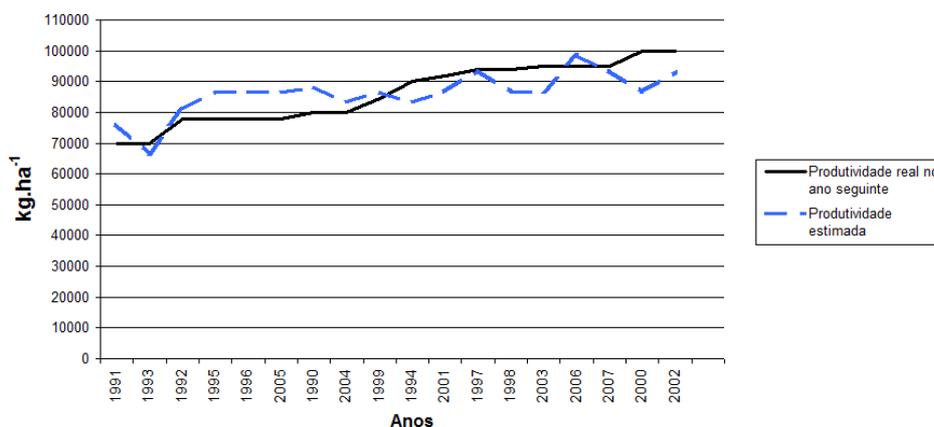


FIGURA 30 – Produtividade anual da cana-de-açúcar (kg.ha^{-1}) em ordem crescente, no ano seguinte às observações dos eventos climáticos entre os anos de 1990 e 2007, versus a produtividade estimada (kg.ha^{-1}) resultante da fórmula da regressão linear múltipla ajustada a partir de classes de intensidade dos eventos El Niño e La Niña nos trimestres, para o município de Cambará – PR.

A melhor equação selecionada para o município foi:

$$ProdS = 86.684 + 7.053(Nver) - 15.033(ENinv) + 9.810(ENpri) \quad (29)$$

Sendo:

ProdS, produtividade média anual estimada para o ano seguinte das observações dos eventos climáticos, em kg.ha^{-1} ;

Nver, ocorrência de primeiro trimestre com clima normal (verão) com valor igual a 0 (trimestre com eventos EN ou LN) ou 1 (trimestre normal);

ENinv, intensidade do evento “El Niño” no terceiro trimestre (inverno) igual a 0,1, 2 ou 3 para evento ausente, fraco, moderado ou forte, respectivamente;

ENpri, intensidade do evento “El Niño” no quarto trimestre (primavera) igual a 0,1, 2 ou 3 para evento ausente, fraco, moderado ou forte, respectivamente.

Foram observadas as seguintes estatísticas para a equação:

$$F = 4,86 * (\alpha < 0,05);$$

$$\text{Coeficiente de correlação } R = 0,71;$$

$$\text{Coeficiente de determinação } R^2 \text{ ajustado} = 0,40;$$

$$\text{Erro padrão} = 7.611 \text{ kg } (S_{xy\%} = 8,87 \%).$$

4.4.5 JACAREZINHO

Na FIGURA 31 é apresentado o gráfico comparativo entre a produtividade média real da cana-de-açúcar em Jacarezinho - PR no ano seguinte às observações dos eventos climáticos “El Niño” e “La Niña”, versus a produtividade estimada pela equação selecionada pela regressão linear múltipla obtida a partir de variáveis que classificam a intensidade dos eventos El Niño e La Niña em cada trimestre do ano, conforme metodologia descrita no item 3.3 e os valores observados, disponíveis no ANEXO VII.

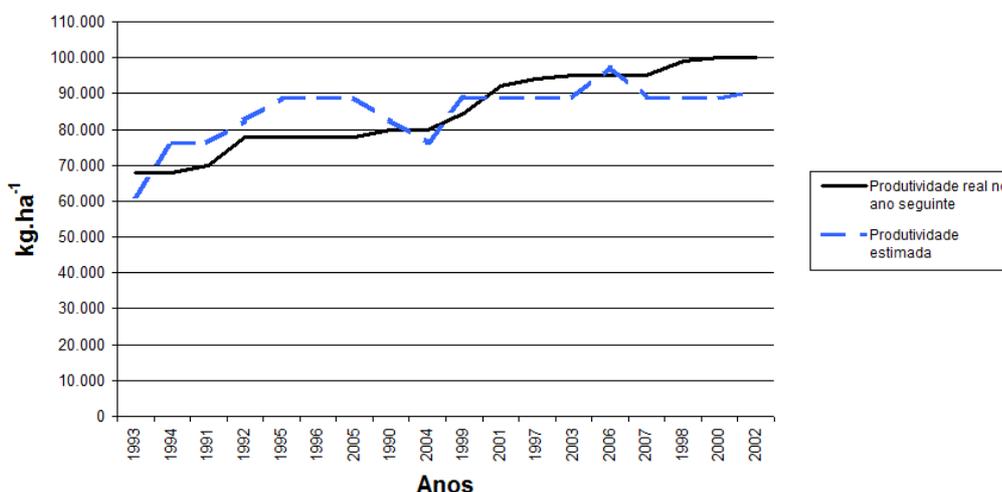


FIGURA 31 – Produtividade anual da cana-de-açúcar (kg.ha⁻¹) em ordem crescente, no ano seguinte às observações dos eventos climáticos entre os anos de 1990 e 2007, versus a produtividade estimada (kg.ha⁻¹) resultante da fórmula da regressão linear múltipla ajustada a partir de classes de intensidade dos eventos El Niño e La Niña nos trimestres, para o município de Jacarezinho – PR.

A melhor equação selecionada para o município foi:

$$ProdS = 88.884 - 21.128(ENinv) + 14.811(ENpri) \quad (30)$$

Sendo:

ProdS, produtividade média anual estimada para o ano seguinte das observações dos eventos climáticos, em kg.ha⁻¹;

ENinv, intensidade do evento “El Niño” no terceiro trimestre (inverno) igual a 0, 1, 2 ou 3 para evento ausente, fraco, moderado ou forte, respectivamente;

EN_{pri} , intensidade do evento “El Niño” no quarto trimestre (primavera) igual a 0,1, 2 ou 3 para evento ausente, fraco, moderado ou forte, respectivamente.

Foram observadas as seguintes estatísticas para a equação:

$F = 8,63$ ** ($\alpha < 0,01$);

Coeficiente de correlação $R = 0,73$;

Coeficiente de determinação R^2 ajustado = 0,47;

Erro padrão = 8.114 kg ($S_{xy}\% = 9,57\%$).

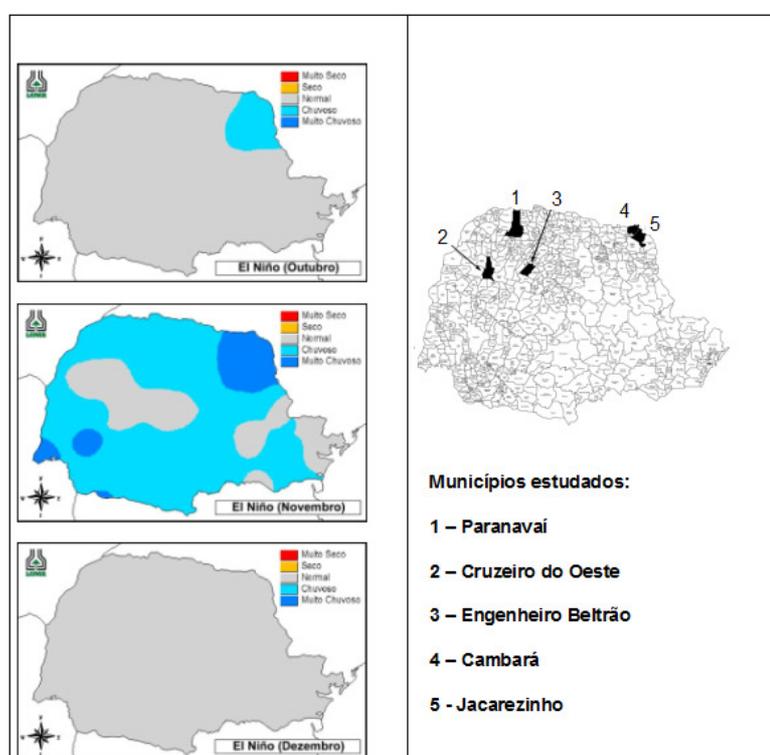


FIGURA 32 – Efeito do evento “El Niño” na precipitação do estado do Paraná no quarto trimestre do ano e a posição geográfica dos cinco municípios estudados: vermelho – muito seco; amarelo – seco; cinza – normal; azul claro – chuvoso; azul escuro – muito chuvoso. Adaptado de IAPAR(2010).

Tanto para Cambará quanto para Jacarezinho, a ocorrência do “El Niño” influenciou a produtividade da cana-de-açúcar. Ocorrendo no inverno, diminuiu a produtividade do ano seguinte e ocorrendo na primavera, aumentou a produtividade do ano seguinte.

No inverno, sugere que o excesso de água no perfil do solo e a presença de nuvens no período mais frio do ano, com pouca radiação disponível, dificultam o desenvolvimento da

cultura, que nessa época encontra-se com cerca de 25% da área na fase de perfilhamento, entre 1 a 4 meses após a emergência (FIGURA 5)

Já na primavera, ficou evidente a influência positiva do evento “El Niño” para a região dos municípios de Cambará e Jacarezinho, causando chuvas intensas nos meses de outubro e, principalmente, em novembro (FIGURA 32). Fato observado tanto pelos estudos do IAPAR (2010), quanto por WALTRICK (2010), e confirmado pelo comportamento da precipitação, deficiência e excesso hídrico vistos nos ANEXOS XXV, XXVI e XXVII.

Variáveis convergentes do clima, favoráveis ao desenvolvimento vegetativo da cultura, como chuva abundante, temperatura em elevação, aumento do comprimento do dia e da radiação total disponível, resultaram em aumento da produtividade da cana-de-açúcar no ano seguinte.

5. CONCLUSÕES

5.1 VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E DO BALANÇO HÍDRICO QUE INFLUENCIAM A PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR NO PARANÁ, NO MESMO ANO DOS EVENTOS METEOROLÓGICOS

A evapotranspiração relativa (ETR/ETc), no trimestre de inverno, é diretamente proporcional à produtividade média anual (TCH), sendo a variável que mais influencia positivamente a maioria dos municípios paranaenses estudados.

Altas precipitações e o excesso de água no perfil do solo no trimestre de outono foram as variáveis que mais aparecem prejudicando a produtividade média anual da cana-de-açúcar, influenciando tanto pela presença excessiva de nuvens, numa época de temperatura e radiação global em declínio, quanto pela condição hipóxica para as raízes, quando mais de 60% da área cultivada no Paraná está em pleno desenvolvimento vegetativo.

5.2 VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E DO BALANÇO HÍDRICO QUE INFLUENCIAM A PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR NO PARANÁ, NO ANO SEGUINTE AOS EVENTOS METEOROLÓGICOS

Em geral, nos municípios paranaenses estudados, trimestres de inverno com temperaturas mais altas e trimestres de primavera chuvosos influenciaram positivamente a produtividade da cana-de-açúcar no ano seguinte aos eventos.

5.3 INFLUÊNCIA DOS EVENTOS “EL NIÑO” E “LA NIÑA” NA PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR NO PARANÁ, NO MESMO ANO DA OCORRÊNCIA DOS EVENTOS CLIMÁTICOS.

Os eventos “El Niño” e “La Niña”, no estado do Paraná, tiveram pouca influência sobre a produtividade média de colmos da cana-de-açúcar (TCH) no mesmo ano dos eventos.

Causaram diferentes efeitos sobre a precipitação das regiões produtoras, sendo que, especificamente para o município de Paranavaí, o *EN* no verão e o *LN* no outono causaram quebra significativa na produtividade.

5.4 INFLUÊNCIA DOS EVENTOS CLIMÁTICOS “EL NIÑO” E “LA NIÑA” NA PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR NO PARANÁ, NO ANO SEGUINTE À OCORRÊNCIA DOS EVENTOS CLIMÁTICOS.

O evento *EN*, ocorrendo nos trimestres de outono ou inverno, diminuiu a produtividade média da cana-de-açúcar no Paraná (TCH), no ano seguinte aos eventos climáticos.

Para a região Nordeste do estado (Cambará e Jacarezinho), a ocorrência do *EN* na primavera causou precipitações abundantes, favorecendo a rebrota e perfilhamento da cultura, com aumento da produtividade no ano seguinte.

O evento *LN*, em geral, não causou grandes alterações na produtividade da cana-de-açúcar no ano seguinte à ocorrência do evento climático, no Paraná.

5.5 CONCLUSÃO GERAL

A utilização da regressão linear múltipla, a partir de dados históricos trimestrais, mostrou-se satisfatória para a análise da influência de variáveis e eventos climáticos sobre a produtividade anual de colmos de cana-de-açúcar, de acordo com a característica de cada solo onde a cultura foi plantada (hipótese verdadeira).

Reflete bem a influência das estações do ano sobre a cultura, e pode ser utilizada para previsão de safras tanto em propriedades como para áreas mais extensas, como municípios e regiões, onde existam séries históricas de dados meteorológicos e de produtividade.

REFERÊNCIAS

- AGROBYTE (2009). Disponível em <http://www.agrobyte.com.br/cana.htm>. Acesso em 15 de outubro de 2009.
- ANDRETTA, R.L. **Sistema de Agrometeorologia (software)**. Curitiba: Secretaria de Estado da Agricultura e do Abastecimento – SEAB, 1990.
- ASSIS, P.C.O.; LACERDA, R.D.; AZEVEDO, H.M.; DANTAS NETO, J.; FARIAS C.H.A. Resposta dos parâmetros tecnológicos da cana-de-açúcar a diferentes lâminas de irrigação e adubação. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v.4, n.2, 2º sem./2004.
- BERLATO, M.A. FONTANA, D.C. **El Niño e La Niña: impacto no clima, na vegetação e na agricultura do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: UFRGS Editora, 2003. p:19-36.
- BERNARDO, S. **Manual de Irrigação**. 7ª ed. Viçosa – MG: Imprensa Universitária, 2005. 611p.
- BURGOS, J.J.; VIDAL, A.L. The climates of the Argentina Republic according to the Thornthwaite climatic classification. Buenos Aires: **Association of American Geographers**. v.XLI, n.3, p.237-263, 1951.
- CAMARGO, M. B. P. ; ALFONSINI, R. R.; PINTO, H.S. **Zoneamento da aptidão climática para culturas comerciais em áreas do cerrado**. Anais do Simpósio sobre o Cerrado, Bases para Utilização Agropecuária. Ed. Itatiaia, 89, 120 pp. 1977.
- CAMARGO, A.P.; CAMARGO M.B.P. Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. Campinas: **Bragantia**, n.59, p.125-137, 2000
- CAMARGO, A. P.; CAMARGO, M.B. Paes. **Teste de uma equação simples para estimativa da evapotranspiração potencial baseada na radiação solar extraterrestre e na temperatura do ar**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 3., Campinas, Anais... Campinas: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1983. p.229-244.

CAMPBELL J.A.; ROBERTSON M.J.; Grof C.P.L. **Temperature effects on node appearance in sugarcane.** Australian Journal of Plant Physiology 25, p.815–818, 1998

CARAMORI, P.H.; OLIVEIRA, D.; GRODZKI, L.; MORAIS, H.; RICCE, W.S.; COSTA, A.B. **O fenômeno La Niña a a agricultura do Paraná – Aviso especial para a safra 2010/2011.** Disponível em www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=1212. Acesso em 01/10/2011.

CENTENO, J.A.S. **Sensoriamento remoto e processamento de imagens digitais.** Curitiba: Ed. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, UFPR, 2004. 219 p.

CINTRA, F.L.D.; MELLO IVO, W.M.P.; SILVA, L.V.; LEAL, M.L.S. **Distribuição das raízes da cana-de-açúcar em sistemas de cultivo com adubação orgânica e *Cotalaria spectabilis*.** 1.ed. Aracaju: EMBRAPA, 2006.

CLAYTON, M.C.; AZEVEDO, H.M.; DANTAS NETO, J.; FARIAS, C.H.A.; SILVA, C.T.S.; GOMES FILHO, R.R. **Rendimento de açúcar e álcool da cana-de-açúcar submetida e diferentes níveis de irrigação.** Revista Brasileira de Ciências Agrárias, v.4, n.1, p 72-77, jan.-mar., 2009.

COSTA LIMA, V. Solos cultivados com cana-de-açúcar. In: **Fundamentos de pedologia.** Curitiba; UFPR – Setor de Ciências Agrárias – Departamento de solos, p. 163-175, 2004.

DANTAS NETO, J.; FIGUEIREDO, J.L.C.; FARIAS, C.H.A.; AZEVEDO, H.M.; AZEVEDO, A.V. **Resposta da cana-de-açúcar, primeira soca, a níveis de irrigação e adubação de cobertura.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.10,n.2, p.283-288, 2006.

DARLI, A.B.; CRUZ, R.L. **Produtividade da cana-de-açúcar ferti-irrigada com N e K via gotejamento subsuperficial.** Revista de Engenharia Agrícola, v.28, n.3, 2008.

DIAS, F.L.F.; MAZZA, J.A.; MATSUOKA S.; PERECIN D.; MAULE R.F. **Produtividade da cana-de-açúcar em relação a clima e solos da região noroeste do estado de São Paulo.** Revista Brasileira de Ciências do Solo, v.23, p.627-634, 1999.

DOORENBOS, J.; KASSAN, A. H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Tradução de H. R. Gheyi, A. A. de Souza, F. A. V. Damasceno, J. F. de Medeiros. Campina Grande: UFBP, 1994. 306 p. (FAO. Estudos de Irrigação e Drenagem, 33).

DUARTE, W.G. **Quantificação e distribuição do sistema radicular em variedades de cana-de-açúcar sob condições de campo**. Arapiraca, 2009. 31p. T.C.C. para conclusão do curso de Engenharia Agrônômica – UFAL.

EMBRAPA. **Zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar**. Documento 110, Rio de Janeiro, 2009. 54p.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, 2008.

FRIZONE, J.A.; MATIOLI, C.S., REZENDE, R. GONÇALVES, A.C.A. **Viabilidade econômica da irrigação suplementar da cana-de-açúcar, *Saccharum spp.*, para a região norte do estado de São Paulo**. *Acta Scientiarum*, v.23, n.5, p. 1131-1137, 2001.

GOMES, S. **Ajuste e avaliação de um modelo de balanço hídrico decenal e estudo dos limites de sua utilização em algumas localidades no estado do Paraná**. Curitiba, 2005. 103p. Dissertação (Mestrado). UFPr.

GOUVEIA, J.R.F.; SENTELHAS, P.C.; GAZZOLA, S.T.; SANTOS, M.C. Mudanças climáticas e avanço tecnológico: impactos na produtividade da cana-de-açúcar na região centro-sul do Brasil. *Scientia Agrícola*, v.66, n.5, p:593-605, 2009.

GRIMM, A.M. How do La Niña events disturb the summer monsoon system in Brazil? *Climate Dynamics*, v.22, n. 2-3, p. 123-138, 2004.

GRIMM, A.M. Variabilidade Interanual do Clima no Brasil. In: **Tempo e Clima no Brasil**. CAVALCANTI, I.F.A.; FERREIRA, N.J.; JUSTIDA SILVA, M.G.A.; SILVA DIAS, M.A.F. Oficina de textos, p.353-374, 2009.

GRIMM, A.M. **Meteorologia básica – notas de aula.** Disponível em <http://fisica.ufpr.br/grimm>. Acesso em 23/04/2011.

HAMAKAWA, P. J.; HENKLAIN, J.C.; ROSA, J.A.; CALHEIROS, R.O.; FARIA, R.T.; BISCAIA, R.C.M.; COSTA, A.C.S. **Caracterização físico-hídrica das principais unidades de solos.** In: Potencial de uso agrícola das áreas de várzeas do Estado do Paraná. Bacias Hidrográficas dos Rios das Cinzas e Laranjinha, Iapó, Iguaçu, Piquiri, Tibagi e Litoral. 1 ed. Londrina: IAPAR, 1994, v. 2, p. 61-69.

IAPAR **O que é o El Niño Oscilação Sul (ENOS).** Disponível em <http://www.iapar.br/modules/conteudo/>, acessado em 20 de novembro de 2010.

IDO, O.T. **Desenvolvimento radicial e caulinar, de três variedades de cana-de-açúcar, em rizotron, em dois substratos.** Curitiba, 2003. 155p. Tese (Doutorado). UFPR.

MARCHIORI, L.F.S. **Influência da Época de Plantio e Corte na Produtividade da Cana-de-Açúcar.** Piracicaba, 2004. 284p. Tese (Doutorado). ESALQ, Universidade de São Paulo.

MARTINS, F.R. **Mapeamento dos Recursos de Energia Solar no Brasil Utilizando Modelo de Transferência Radiativa no Brasil.** Fortaleza – CE: I Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2007.10p.

MOTA, F.S. **Meteorologia Agrícola.** 7. ed. São Paulo: Ed. Nobel, 1986.

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

MOURA, M.V.P.S.; FARIAS, C.H.A.; AZEVEDO, C.A.V.; DANTAS NETO, J.; AZEVEDO, H.M.; PORDEUS, R.V. Doses de adubação nitrogenada e potássica em cobertura na cultura da cana-de-açúcar, primeira soca, com e sem irrigação. **Revista de Ciência e Agrotecnologia**, v.29, n.4, p.753-760, 2005.

OLIVEIRA, G.S. **O El Niño e você – O fenômeno climático**. 1. ed. Ed. Transtec, 1971.

OLIVEIRA, R.A. **Análise de crescimento da cana-de-açúcar, na região noroeste do Paraná**. Curitiba, 2004. 80p. Dissertação (Mestrado) – UFPR.

PICOLI, M.C.A. **Estimativa da Produtividade Agrícola da Cana-de-Açúcar Utilizando Agregados de Redes Neurais Artificiais: Estudo de Caso Usina Catanduvas**. São José dos Campos, 2007. 93p. Dissertação (Mestrado). INPE.

REIS, O.S. **Cultura da cana-de-açúcar**. Empresa Paranaense de Assistência Técnica e Extensão Rural, Curitiba, 1981. 37p.

RODRIGUES, J.D. **Fisiologia da Cana-de-açúcar**. Universidade Estadual Paulista, 1995. 101p.

RUDORFF, B.F.T. **Dados Landsat na estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar**. São José dos Campos, 1985. 115p. Dissertação (Mestrado) – INPE.

SALASSIER, B. **Manejo da irrigação na cana-de-açúcar**. Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Cana_irrigada_producao_000fizvd3t102wyiv802hvm3j1wle6b8.pdf, acessado em 25 de outubro de 2009.

SANDERSON, Marie. The climates of Canada according to the new Thornthwaite climatic classification. Toronto: **Scientific Agriculture**. v.28, p.501-517, 1948.

SCARPARI, M.S. **PREDPOL: Um modelo de previsão da maturação da cana-de-açúcar visando planejamento otimizado**. Piracicaba, 2007. 120p. Tese (Doutorado) ESALQ, Universidade de São Paulo.

SEDIYAMA, G.C. **Necessidade de água para os cultivos**. Brasília: ABEAS, 1990. 143p.

SEGATO, S.V. MATTIUS, C.F.M. MOZAMBANI, A.E. Aspectos fenológicos da cana-de-açúcar. In: **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: EALQ/USP CP 2, p. 20-36, 2006.

SOUZA, J.A.; GALVANI, E. **Clima e produtividade da cultura da cana-de-açúcar na microrregião de Campo Mourão, PR, sul do Brasil.** Coimbra, Portugal: VI Seminário Latino-Americano de Geografia Física e II Seminário Ibero-Americano de Geografia Física, 2010. 12p.

SOUZA, J.L.M. **Programa de dados ambientais.** Curitiba: UFPR, 2004. 216p.

TAIZ, L.; ZEIGER E. **Fisiologia Vegetal.** 4a ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. p. 75-93.

TEDESCHI, R.G. **Impacto de episódios El Niño e La Niña sobre a frequência de eventos extremos de precipitação e vazão na América do Sul.** Curitiba, 2008. 159p. Dissertação (Mestrado) UFPR.

TERAMOTO, E.R. **Avaliação e aplicação de modelos de estimativa de produção de cana-de-açúcar baseados em parâmetros do solo e do clima.** Piracicaba, 2003. 78p. Tese (Doutorado) ESALQ, Universidade de São Paulo.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. **The water balance.** Centerton, N.J.: Drexel Institute of Technology – Publications in Climatology, v. 8, n. 1 1955. 104p.

THORNTHWAITE, C.W. An approach toward a rational classification of climate. **Geogr. Rev**, v.38, p.55-94, 1948.

TUBELIS, A. **Aspectos climáticos e hidrológicos.** Brasília: ABEAS, 1990. 88p.

UFPR. **Cultura da cana-de-açúcar.** UFPR – Setor de Ciências Agrárias – Departamento de Fitotecnia e Fitossanitarismo, 1983. 33p.

WALTRICK, P.C. **Erosividade de Chuvas no Paraná: Atualização, Influência do “El Niño” e “La Niña” e Estimativas para Cenários Climáticos Futuros.** Curitiba, 2010. 107p. Dissertação (Mestrado). UFPR.

ANEXO I - Dados climáticos e de produtividade da cana-de-açúcar do município de Paranavai / PR, utilizados nas regressões lineares múltiplas (1990 a 2008).

Ano	Produtiv.	TmaxV	TmaxO	TmaxI	TmaxP	TminV	TminO	TminI	TminP	TmedV	TmedO	TmedI	TmedP	GrdiaV	GrdiaO	GrdiaI	GrdiaP
1990		31,13	25,52	23,23	30,85	21,04	16,23	13,26	20,68	25,07	19,93	17,43	24,98	536,54	194,90	72,25	531,90
1991		30,34	26,49	27,12	30,31	20,53	16,39	15,29	19,75	24,49	20,48	20,17	24,31	488,70	194,30	205,75	472,55
1992	45.750	31,14	25,54	23,70	29,99	20,70	16,94	13,68	19,44	25,10	20,31	17,86	23,95	540,31	159,60	67,10	435,10
1993		30,15	26,53	25,45	30,91	20,70	15,56	14,54	19,91	24,19	19,56	18,82	24,62	454,17	180,60	158,45	499,90
1994		30,51	26,08	28,04	31,02	20,34	16,44	15,66	20,27	24,56	20,30	20,86	24,86	490,34	195,55	274,55	520,00
1995		30,48	26,06	28,54	29,56	20,91	15,42	17,15	19,01	24,83	19,75	21,82	23,61	508,11	151,15	313,65	403,00
1996	87.143	30,17	25,76	26,55	29,67	20,77	15,96	14,71	19,83	24,60	19,80	19,72	23,90	497,83	181,25	161,75	440,30
1997		29,91	25,29	27,39	29,62	20,52	15,89	16,67	20,30	24,47	19,63	20,98	24,25	475,54	185,55	240,20	458,10
1998	45.379	31,15	25,00	25,37	29,97	21,20	15,54	15,85	19,08	25,49	19,23	19,75	23,81	561,92	141,75	143,55	416,45
1999	49.000	30,94	25,49	27,76	30,58	20,99	15,02	15,62	18,46	25,12	19,23	20,70	23,81	541,21	156,00	238,70	426,10
2000	69.478	30,94	27,23	25,05	30,98	20,64	15,91	14,00	19,74	24,85	20,43	18,63	24,58	521,10	234,30	151,90	493,69
2001	77.000	31,53	26,26	27,43	30,16	21,00	15,78	16,14	19,31	25,13	19,93	20,77	23,99	562,81	235,90	230,25	438,49
2002	80.357	31,51	26,93	26,47	31,72	20,89	18,35	15,67	20,54	25,22	22,63	20,14	25,29	551,47	351,35	223,65	565,60
2003		31,31	27,65	26,51	30,54	20,83	16,52	14,53	18,94	25,20	20,98	19,52	24,06	542,91	239,30	187,55	436,72
2004	77.875	31,78	24,71	27,10	29,34	20,27	15,71	15,79	18,63	25,03	19,29	20,51	23,34	535,35	166,45	262,55	368,47
2005	77.057	31,54	26,16	25,33	30,05	20,98	18,11	14,43	19,71	25,18	22,12	19,01	24,23	555,22	314,75	160,70	450,15
2006	102.233	31,79	27,09	27,69	31,50	21,30	15,78	16,15	20,60	25,62	20,40	21,02	25,17	585,34	190,40	259,60	556,85
2007	95.203	31,99	28,84	28,05	31,61	21,38	16,79	15,90	20,07	25,67	21,46	21,06	25,12	603,64	342,30	297,00	537,90
2008	87.985	30,65	26,13	27,29	31,26	20,57	15,92	15,91	19,60	24,79	20,13	20,84	24,81	499,99	197,40	223,75	500,70

Ano	Produtiv.	PrecV	PrecO	PrecI	PrecP	DefV	DefO	DefI	DefP	ExcV	ExcO	ExcI	ExcP	ETreV	ETreO	ETreI	ETreP
1990		524,90	366,70	393,70	358,30	56	0	0	61	155	158	267	95	0,860	1,000	1,000	0,840
1991		419,80	234,00	82,20	423,90	27	33	65	40	42	56	0	77	0,920	0,850	0,650	0,870
1992	45.750	407,70	635,10	336,30	298,10	86	5	1	55	106	464	192	41	0,800	0,970	1,000	0,860
1993		475,20	266,20	202,10	417,40	23	8	10	9	131	50	56	72	0,940	0,970	0,940	0,970
1994		443,00	318,00	126,90	333,30	5	0	58	28	77	113	17	0	0,990	1,000	0,750	0,930
1995		573,70	167,00	243,30	519,70	5	9	62	25	187	2	54	25	0,990	0,940	0,770	0,920
1996	87.143	513,00	224,80	171,70	573,90	0	2	45	0	138	32	36	233	1,000	0,990	0,730	1,000
1997		691,40	485,80	165,00	784,40	27	21	15	0	375	291	0	412	0,930	0,920	0,910	1,000
1998	45.379	479,30	311,00	491,60	352,10	14	1	4	37	98	146	323	75	0,970	0,990	0,970	0,890
1999	49.000	486,70	308,20	277,90	317,30	8	0	67	83	122	111	65	18	0,980	1,000	0,710	0,730
2000	69.478	491,70	185,40	358,60	350,00	33	42	0	4	159	0	301	1	0,920	0,820	1,000	0,990
2001	77.000	529,00	325,60	146,40	434,60	0	31	8	25	134	157	0	111	1,000	0,910	0,950	0,920
2002	80.357	422,20	404,40	249,20	307,00	55	126	11	77	138	265	43	44	0,870	0,590	0,950	0,800
2003		606,60	227,60	255,40	352,60	0	2	0	7	180	22	80	20	1,000	0,990	1,000	0,980
2004	77.875	327,00	572,20	144,70	458,00	42	0	76	55	0	363	68	194	0,890	1,000	0,670	0,860
2005	77.057	426,00	230,00	332,00	367,60	152	26	36	48	188	0	181	103	0,610	0,870	0,820	0,880
2006	102.233	547,60	84,60	257,40	448,40	0	86	40	17	107	0	50	98	1,000	0,550	0,810	0,950
2007	95.203	540,00	114,30	174,20	426,30	6	97	90	54	161	0	60	69	0,990	0,560	0,690	0,850
2008	87.985	437,50	197,60	250,80	283,20	28	32	36	67	102	17	71	34	0,930	0,880	0,810	0,840

(Fonte: SEAB / DERAL)

ANEXO II - Dados climáticos e de produtividade da cana-de-açúcar do município de Cruzeiro do Oeste / PR utilizados nas regressões lineares múltiplas (1990 a 2008).

ANO	Produtiv.	TmaxV	TmaxO	TmaxI	TmaxP	TminV	TminO	TminI	TminP	TmedV	TmedO	TmedI	TmedP	GrdiaV	GrdiaO	GrdiaI	GrdiaP
1990	81.091	30,32	24,87	22,72	30,21	21,10	16,07	13,17	20,90	24,90	19,72	17,37	24,97	505,56	178,95	67,85	515,55
1991	60.127	30,49	26,14	25,90	29,46	20,88	16,93	15,51	19,65	25,07	20,90	20,22	24,07	501,55	203,20	184,30	437,08
1992	71.746	30,58	24,94	23,18	29,55	21,29	16,89	13,62	19,49	25,23	20,18	17,65	24,01	524,93	146,05	62,55	421,35
1993	50.758	30,14	25,61	24,68	29,71	20,75	16,05	14,74	19,85	24,76	20,33	18,99	24,45	472,11	189,65	160,55	443,20
1995	87.525	29,89	25,86	27,56	29,21	21,00	15,50	17,29	19,21	24,61	19,87	21,80	23,77	477,50	150,20	298,15	397,80
1996	80.467	29,65	25,38	26,20	29,04	20,97	15,88	14,73	19,67	24,38	19,83	19,74	23,79	488,90	172,80	143,45	404,30
1997	76.897	30,02	25,35	26,35	29,22	20,82	15,57	16,65	20,28	24,58	19,58	20,73	24,15	472,58	187,15	210,85	440,20
1998	86.024	30,77	24,44	24,76	29,26	21,63	15,49	15,93	19,29	25,55	19,30	19,67	23,84	540,79	128,85	133,20	394,60
1999	65.522	30,71	25,07	27,18	30,45	21,28	15,24	15,39	18,83	25,30	19,41	20,61	24,06	527,01	154,95	228,30	438,00
2000	71.370	30,59	25,88	24,13	30,05	20,94	16,01	13,74	19,72	25,00	20,22	18,40	24,41	514,84	196,30	127,80	449,95
2001	72.567	30,59	25,16	26,67	29,65	21,37	15,92	16,22	19,50	25,03	19,93	20,75	24,05	523,77	216,55	213,85	423,70
2002	86.716	31,20	26,18	25,97	30,54	20,97	18,42	15,41	20,30	25,39	22,52	19,97	24,75	545,57	333,65	194,70	500,30
2003	93.592	31,38	27,21	26,06	30,32	21,25	16,70	14,57	19,12	25,18	21,17	19,61	24,23	550,74	232,55	182,10	436,05
2004	80.686	32,03	24,45	26,57	29,40	20,41	15,77	15,84	18,64	25,51	19,33	20,38	23,46	558,44	165,72	236,75	371,65
2005	67.329	31,98	27,87	24,74	29,85	21,44	18,03	14,05	19,92	25,30	22,18	18,65	24,46	591,23	311,35	154,95	450,90
2006	85.262	31,55	26,52	26,91	30,93	21,60	16,05	16,29	20,83	25,82	20,58	21,02	25,33	580,42	183,50	251,35	541,40
2007	84.727	31,42	27,37	27,43	31,34	21,91	16,73	15,85	20,32	25,88	21,16	20,92	25,21	589,20	290,20	284,75	537,15
2008	85.294	31,02	25,77	26,95	31,43	20,94	15,75	15,71	20,13	25,26	20,00	20,84	25,14	529,47	196,20	208,95	532,80

ANO	Produtiv.	PrecV	PrecO	PrecI	PrecP	DefV	DefO	DefI	DefP	ExcV	ExcO	ExcI	ExcP	ETrelV	ETrelO	ETrelI	ETrelP
1990	81.091	477,00	376,70	364,40	405,70	30	0	0	12	110	162	238	78	0,918	1,000	1,000	0,971
1991	60.127	345,70	231,90	146,10	495,70	45	36	28	26	0	38	0	170	0,877	0,875	0,812	0,914
1992	71.746	345,70	744,40	469,30	382,60	89	0	0	32	40	553	340	103	0,788	1,000	1,000	0,923
1993	50.758	460,20	356,00	294,40	533,50	13	37	19	0	58	183	157	179	0,962	0,885	0,878	1,000
1995	87.525	639,40	233,70	162,40	508,70	4	3	43	4	283	37	0	178	0,986	0,976	0,824	0,987
1996	80.467	725,50	173,60	171,00	673,40	0	8	42	0	334	0	21	349	1,000	0,970	0,720	1,000
1997	76.897	537,80	398,40	246,70	625,80	57	55	5	0	256	232	64	275	0,840	0,780	0,970	1,000
1998	86.024	509,40	729,30	561,30	415,20	8	0	14	22	128	542	404	135	0,980	1,000	0,920	0,940
1999	65.522	401,30	513,40	101,00	237,30	11	0	66	104	20	313	5	0	0,970	1,000	0,710	0,670
2000	71.370	403,30	278,80	512,00	555,30	58	40	0	0	61	93	361	200	0,880	0,870	1,000	1,000
2001	72.567	404,00	233,60	160,40	434,40	26	42	12	0	75	51	0	79	0,940	0,870	0,940	1,000
2002	86.716	312,60	480,60	278,20	466,40	117	127	4	23	84	349	73	151	0,720	0,590	0,980	0,940
2003	93.592	430,20	125,20	188,40	535,20	52	102	5	0	95	0	0	168	0,870	0,630	0,970	1,000
2004	80.686	203,40	579,60	216,10	535,20	151	0	23	9	0	245	77	217	0,610	1,000	0,900	0,980
2005	67.329	196,60	194,60	240,60	474,80	169	59	36	49	0	0	96	211	0,570	0,800	0,790	0,870
2006	85.262	498,20	127,80	225,60	632,80	0	47	43	0	47	0	33	259	1,000	0,740	0,780	1,000
2007	84.727	376,60	167,40	179,20	406,40	78	52	81	38	89	0	63	40	0,810	0,740	0,710	0,890
2008	85.294	370,60	223,80	286,20	461,40	48	15	11	2	52	10	106	110	0,880	0,950	0,940	1,000

(Fonte: SEAB / DERAL)

ANEXO III - Dados climáticas e de produtividade da cana-de-açúcar do município de Engenheiro Beltrão / PR utilizados nas regressões lineares múltiplas (1990 a 2008).

Ano	Produtiv.	TmaxV	TmaxO	TmaxI	TmaxP	TminV	TminO	TminI	TminP	TmedV	TmedO	TmedI	TmedP	GrdiaV	GrdiaO	GrdiaI	GrdiaP
1990	90.000	30,31	25,28	22,87	30,28	20,48	15,70	12,79	20,09	24,76	19,85	17,36	24,69	476,15	178,25	51,09	481,10
1991	98.000	29,73	25,97	26,20	29,67	19,67	16,16	15,40	19,00	24,19	20,44	20,11	24,00	413,78	163,63	172,95	416,33
1992	98.000	30,13	24,70	23,85	29,57	20,50	16,43	13,23	18,68	24,74	20,11	18,03	23,76	471,74	120,25	56,46	383,72
1993	80.000	29,79	25,58	24,63	30,11	19,92	15,65	14,43	19,41	23,99	19,95	19,04	24,41	419,27	163,25	122,10	441,30
1994	92.000	29,76	25,86	27,73	30,42	20,03	15,98	15,73	19,84	24,18	20,23	21,04	24,60	426,33	178,60	261,65	472,40
1995	93.000	29,89	25,91	27,84	29,07	20,47	15,46	16,97	18,77	24,40	19,99	21,87	23,57	455,72	138,80	279,40	369,30
1996	78.150	29,66	25,44	26,26	29,06	19,85	15,91	14,55	19,43	24,17	19,89	19,72	23,77	422,14	160,90	143,05	393,70
1997	92.500	29,55	25,27	27,22	29,63	20,31	15,06	15,89	19,69	24,25	19,41	20,73	24,19	431,54	150,65	200,55	430,65
1998	97.030	30,72	24,80	25,81	29,75	20,94	15,14	15,70	18,90	25,17	19,22	19,98	23,89	508,83	120,01	151,46	398,25
1999	74.390	30,46	25,22	27,42	29,87	20,73	14,56	15,96	18,22	24,94	19,29	20,82	23,66	491,43	139,50	232,90	386,15
2000	76.960	29,80	26,10	24,24	30,14	20,19	16,03	13,86	19,32	24,32	20,60	18,53	24,22	446,06	215,05	137,70	436,20
2001	88.000	30,26	25,03	26,46	29,68	20,57	15,87	16,13	19,02	24,56	19,87	20,68	23,82	476,30	203,95	199,90	405,00
2002	78.170	30,27	28,35	26,01	30,56	20,38	18,47	15,68	20,14	24,84	22,77	20,26	24,86	471,79	337,09	214,05	494,55
2003	100.000	30,15	26,41	25,73	29,65	20,80	16,89	14,89	18,51	24,77	21,04	19,73	23,80	475,81	216,35	183,05	381,60
2004	85.500	30,49	23,88	26,49	28,37	19,66	15,40	15,96	18,15	24,60	19,02	20,73	22,91	469,22	139,60	259,30	306,60
2005	85.500	30,30	27,30	24,71	29,05	20,69	18,06	14,37	19,07	24,65	22,06	19,02	23,72	481,77	286,80	149,40	375,65
2006	76.432	30,23	24,95	26,04	29,47	20,61	15,21	15,81	19,46	24,65	19,64	20,44	24,00	482,26	113,60	212,30	411,80
2007	89.900	29,61	25,85	26,51	29,78	20,65	16,23	15,56	18,82	24,39	20,49	20,49	23,91	457,08	213,85	240,45	398,60
2008	92.000	28,89	24,66	26,19	30,15	19,44	15,26	15,45	18,65	23,57	19,35	20,40	23,98	367,88	148,00	186,20	408,70

Ano	Produtiv.	PrecV	PrecO	PrecI	PrecP	DefV	DefO	DefI	DefP	ExcV	ExcO	ExcI	ExcP	ETreIV	ETreIO	ETreII	ETreIP
1990	90.000	481,10	404,40	508,30	262,00	43	0	0	42	227	194	372	0	0,880	1,000	1,000	0,890
1991	98.000	416,33	323,38	147,00	485,60	6	0	13	16	90	109	0	147	0,980	1,000	0,910	0,950
1992	98.000	383,72	644,40	268,50	413,70	65	0	2	18	69	447	125	136	0,850	1,000	0,990	0,950
1993	80.000	441,30	331,70	254,60	447,80	3	0	11	33	93	107	102	124	0,990	1,000	0,940	0,910
1994	92.000	472,40	326,10	99,00	462,70	1	0	61	0	166	109	0	46	1,000	1,000	0,750	1,000
1995	93.000	369,30	251,70	281,60	515,50	0	8	32	2	305	65	84	192	1,000	0,960	0,880	0,990
1996	78.150	393,70	297,50	173,20	609,00	0	1	41	0	185	109	22	266	1,000	0,990	0,750	1,000
1997	92.500	430,65	538,90	156,20	614,80	3	18	14	0	467	347	0	228	0,990	0,930	0,920	1,000
1998	97.030	398,25	459,40	480,30	448,80	6	1	6	37	214	287	291	163	0,990	1,000	0,970	0,900
1999	74.390	386,15	367,90	152,50	355,10	4	0	49	55	90	163	47	22	0,990	1,000	0,790	0,820
2000	76.960	436,20	58,20	376,00	235,80	44	143	0	61	51	0	147	7	0,880	0,380	1,000	0,830
2001	88.000	405,00	324,60	188,40	460,80	81	60	2	10	0	113	0	102	0,780	0,820	0,990	0,970
2002	78.170	494,55	366,00	233,20	322,90	8	102	10	17	107	216	7	0	0,980	0,680	0,950	0,950
2003	100.000	381,60	204,40	187,80	418,20	0	4	8	0	188	5	0	73	1,000	0,980	0,950	1,000
2004	85.500	306,60	449,80	180,00	592,80	7	0	39	0	20	246	65	231	0,980	1,000	0,940	1,000
2005	85.500	375,65	172,20	267,40	396,20	125	72	51	30	143	0	91	138	0,680	0,720	0,730	0,920
2006	76.432	411,80	105,00	248,00	455,80	29	36	60	8	66	0	65	119	0,930	0,770	0,690	0,980
2007	89.900	398,60	149,40	269,80	413,80	7	39	70	1	179	0	149	12	0,980	0,800	0,740	0,990
2008	92.000	408,70	285,40	241,80	351,40	3	0	20	17	68	88	65	63	0,990	1,000	0,890	0,960

(Fonte: SEAB / DERAL)

ANEXO IV - Dados climáticos e de produtividade da cana-de-açúcar do município de Camará / PR utilizados nas regressões lineares múltiplas (1990 a 2008).

Ano	Produtiv.	TmaxV	TmaxO	TmaxI	TmaxP	TminV	TminO	TminI	TminP	TmedV	TmedO	TmedI	TmedP	GrdiaV	GrdiaO	GrdiaI	GrdiaP
1990	78.000	31,12	26,69	24,22	30,70	19,62	13,64	11,58	19,28	24,40	19,20	17,03	24,09	158,25	166,90	40,30	460,64
1991	80.000	30,24	26,69	27,08	30,52	19,53	14,92	13,06	18,57	23,83	19,64	18,99	23,72	168,35	124,55	103,75	425,40
1992	70.000	30,41	26,80	24,59	30,08	19,67	15,39	12,86	18,31	24,06	19,81	17,97	23,47	183,90	137,40	46,30	387,65
1993	78.000	30,30	26,79	25,66	31,13	19,71	14,47	12,73	19,19	23,83	19,28	18,10	24,30	191,15	142,75	78,95	475,25
1994	70.000	30,85	26,76	27,99	31,05	19,52	14,94	12,31	18,82	24,08	19,61	19,44	24,13	143,95	161,85	133,95	469,70
1995	90.000	30,31	26,79	27,41	30,14	20,04	14,24	14,28	17,75	24,12	19,31	20,26	23,27	192,40	114,30	134,25	369,30
1996	78.000	30,70	26,66	25,50	30,10	20,35	14,28	12,36	19,26	24,38	19,32	18,52	23,76	182,25	135,60	67,65	431,15
1997	78.000	30,27	25,66	28,20	30,57	19,84	13,53	13,47	19,56	23,96	18,39	19,72	24,11	162,10	93,65	137,05	466,40
1998	94.000	31,71	25,40	26,30	30,00	21,01	13,34	14,10	18,16	25,23	18,28	19,12	23,34	218,25	90,20	93,05	378,00
1999	94.000	31,10	25,68	26,99	30,58	20,23	12,66	12,62	17,40	24,52	18,09	18,97	23,48	173,85	102,10	97,70	376,60
2000	84.600	30,34	27,70	25,53	31,24	19,67	13,44	12,39	19,09	24,04	19,24	17,96	24,46	184,10	148,35	119,75	475,65
2001	100.000	31,14	26,58	26,87	30,43	20,19	14,07	13,38	18,18	24,51	19,15	19,30	23,72	182,00	177,70	108,65	396,80
2002	92.000	30,63	29,21	25,74	32,04	19,41	15,96	13,16	19,73	23,89	21,31	19,17	24,90	139,35	261,95	97,70	543,45
2003	100.000	31,14	27,66	27,17	30,51	20,20	14,67	11,82	17,85	24,55	19,42	18,29	23,30	177,05	181,70	76,75	391,30
2004	95.000	30,98	25,66	26,44	29,57	18,54	14,05	12,87	17,68	23,72	18,76	19,14	22,85	149,80	139,25	140,90	336,00
2005	80.000	31,25	28,38	24,79	29,80	19,49	15,88	12,74	18,17	23,90	20,97	18,47	22,89	157,80	227,25	63,05	367,75
2006	78.000	31,42	26,74	28,00	30,96	19,95	12,40	13,16	19,25	24,61	18,40	19,62	24,20	184,75	73,70	136,95	465,70
2007	95.000	31,06	28,10	27,23	31,36	20,10	14,36	13,11	18,37	24,44	19,87	19,47	24,06	162,30	199,90	159,75	450,70
2008	95.000	30,28	26,44	27,59	30,97	19,04	13,49	12,15	17,90	23,57	18,63	18,47	23,59	140,75	110,70	86,20	410,75

Ano	Produtiv.	PrecV	PrecO	PrecI	PrecP	DefV	DefO	DefI	DefP	ExcV	ExcO	ExcI	ExcP	ETrelV	ETrelO	ETrelI	ETrelP
1990	78.000	595,30	182,10	276,50	412,70	0	3	0	0	148	10	141	68	1,000	0,970	1,000	1,000
1991	80.000	633,70	273,20	116,70	470,40	0	7	29	26	273	99	0	148	1,000	0,960	0,820	0,820
1992	70.000	489,20	334,80	247,10	428,90	40	4	27	18	169	174	119	153	0,900	0,970	0,790	0,950
1993	78.000	750,20	316,70	169,80	296,80	0	0	1	21	350	140	29	0	1,000	1,000	1,000	0,940
1994	70.000	545,30	239,80	52,90	545,60	0	1	62	0	159	64	0	143	1,000	1,000	0,680	1,000
1995	90.000	605,60	269,50	207,80	323,80	3	1	17	23	260	62	29	61	0,990	0,980	0,920	0,930
1996	78.000	600,70	117,50	215,90	479,60	23	19	40	4	220	0	66	143	0,960	0,890	0,720	0,990
1997	78.000	770,20	315,90	119,60	596,80	6	0	25	8	441	133	0	270	0,990	1,000	0,830	0,980
1998	94.000	535,80	220,80	294,50	428,60	41	0	2	37	163	59	135	141	0,910	1,000	0,980	0,890
1999	94.000	629,30	236,40	122,20	158,80	0	0	15	120	244	84	0	0	1,000	1,000	0,890	0,670
2000	84.600	482,40	69,40	283,20	475,80	29	47	0	3	38	0	85	139	0,930	0,740	1,000	0,990
2001	100.000	619,80	199,00	113,60	320,00	3	28	19	11	242	39	9	2	0,990	0,910	0,910	0,970
2002	92.000	537,40	154,20	174,80	472,60	0	55	3	59	144	27	0	188	1,000	0,780	0,990	0,840
2003	100.000	394,80	172,40	183,20	316,60	11	5	0	15	15	0	16	48	0,970	0,960	1,000	0,950
2004	95.000	239,80	262,00	110,20	416,20	81	18	63	22	0	40	54	123	0,760	0,940	0,730	0,940
2005	80.000	405,60	263,80	160,40	374,20	85	13	5	10	150	3	20	83	0,750	0,950	0,970	0,970
2006	78.000	275,20	90,60	105,00	503,20	46	60	77	14	0	0	0	131	0,890	0,560	0,520	0,960
2007	95.000	669,60	131,20	207,80	327,10	0	23	62	48	295	0	111	0	1,000	0,860	0,730	0,850
2008	95.000	315,80	265,20	147,00	348,70	18	0	9	42	0	63	18	110	0,950	1,000	0,920	0,890

(Fonte: SEAB / DERAL)

ANEXO V - Dados do município de Jacarezinho / PR, utilizados nas regressões lineares múltiplas.

Ano	Produtiv.	TmaxV	TmaxO	TmaxI	TmaxP	TminV	TminO	TminI	TminP	TmedV	TmedO	TmedI	TmedP	GrdiaV	GrdiaO	GrdiaI	GrdiaP
1990	78.000	31,12	26,69	24,22	30,70	19,62	13,64	11,58	19,28	24,40	19,20	17,03	24,09	158,25	166,90	40,30	460,64
1991	80.000	30,24	26,69	27,08	30,52	19,53	14,92	13,06	18,57	23,83	19,64	18,99	23,72	168,35	124,55	103,75	425,40
1992	70.000	30,41	26,80	24,59	30,08	19,67	15,39	12,86	18,31	24,06	19,81	17,97	23,47	183,90	137,40	45,30	387,66
1993	78.000	30,30	26,79	25,66	31,13	19,71	14,47	12,73	19,19	23,83	19,28	18,10	24,30	191,15	142,75	78,95	475,25
1994	68.000	30,85	26,76	27,99	31,05	19,52	14,94	12,31	18,92	24,08	19,61	19,44	24,13	143,95	161,85	133,95	459,70
1995	68.000	30,31	26,79	27,41	30,14	20,04	14,24	14,28	17,75	24,12	19,31	20,26	23,27	192,40	114,30	134,25	369,30
1996	78.000	30,70	26,66	25,50	30,10	20,35	14,28	12,36	19,26	24,38	19,32	18,52	23,76	182,25	135,60	67,65	431,15
1997	78.000	30,27	25,56	28,20	30,57	19,84	13,53	13,47	19,56	23,96	18,39	19,72	24,11	162,10	93,65	137,05	466,40
1998	94.000	31,71	25,40	26,30	30,00	21,01	13,34	14,10	18,16	25,23	18,28	19,12	23,34	218,25	90,20	93,05	378,00
1999	99.000	31,10	25,68	26,99	30,58	20,23	12,66	12,62	17,40	24,52	18,09	18,97	23,48	173,85	102,10	97,70	376,60
2000	84.600	30,34	27,70	25,53	31,24	19,67	13,44	12,39	19,09	24,04	19,24	17,96	24,46	184,10	148,35	119,75	475,65
2001	100.000	31,14	26,58	26,87	30,43	20,19	14,07	13,38	18,18	24,51	19,15	19,30	23,72	182,00	177,70	108,65	396,80
2002	92.000	30,63	29,21	25,74	32,04	19,41	15,96	13,16	19,73	23,89	21,31	19,17	24,90	139,35	261,95	97,70	543,45
2003	100.000	31,14	27,66	27,17	30,51	20,20	14,67	11,82	17,85	24,55	19,42	18,29	23,30	177,05	181,70	76,75	391,30
2004	95.000	30,98	25,66	26,44	29,57	18,54	14,05	12,87	17,68	23,72	18,76	19,14	22,85	149,80	139,25	140,90	336,00
2005	80.000	31,25	28,38	24,79	29,80	19,49	15,88	12,74	18,17	23,90	20,97	18,47	22,89	157,80	227,25	63,05	367,75
2006	78.000	31,42	26,74	28,00	30,86	19,95	12,40	13,16	19,25	24,61	18,40	19,62	24,20	184,75	73,70	136,95	465,70
2007	95.000	31,06	28,10	27,23	31,36	20,10	14,36	13,11	18,37	24,44	19,87	19,47	24,06	162,30	199,90	159,75	450,70
2008	95.000	30,28	26,44	27,59	30,97	19,04	13,49	12,15	17,90	23,57	18,63	18,47	23,59	140,75	110,70	86,20	410,75

Ano	Produtiv.	PrecV	PrecO	PrecI	PrecP	DefV	DefO	DefI	DefP	ExcV	ExcO	ExcI	ExcP	ETreV	ETreO	ETreI	ETreP
1990	78.000	595,30	182,10	276,50	412,70	0	3	0	0	148	10	141	68	1,000	0,970	1,000	1,000
1991	80.000	633,70	273,20	116,70	470,40	0	7	29	26	273	99	0	148	1,000	0,960	0,820	0,920
1992	70.000	489,20	334,80	247,10	428,90	40	4	27	18	169	174	119	153	0,900	0,970	0,790	0,950
1993	78.000	750,20	316,70	169,80	296,80	0	0	1	21	350	140	29	0	1,000	1,000	1,000	0,940
1994	68.000	545,30	239,80	52,90	545,60	0	1	62	0	159	64	0	143	1,000	1,000	0,680	1,000
1995	68.000	605,60	259,50	207,80	323,80	3	1	17	23	260	82	29	61	0,990	0,980	0,920	0,930
1996	78.000	600,70	117,50	215,90	479,60	23	19	40	4	220	0	66	143	0,950	0,890	0,720	0,990
1997	78.000	770,20	315,90	119,60	596,80	6	0	25	8	441	133	0	270	0,990	1,000	0,830	0,980
1998	94.000	635,80	220,80	294,50	428,60	41	0	2	37	163	59	135	141	0,910	1,000	0,980	0,890
1999	99.000	629,30	236,40	122,20	158,80	0	0	15	120	244	84	0	0	1,000	1,000	0,890	0,670
2000	84.600	482,40	69,40	283,20	475,80	29	47	0	3	33	0	85	139	0,930	0,740	1,000	0,990
2001	100.000	619,80	199,00	113,60	320,00	3	28	19	11	242	39	9	2	0,990	0,910	0,910	0,970
2002	92.000	537,40	154,20	174,80	472,60	0	55	3	59	144	27	0	188	1,000	0,780	0,990	0,840
2003	100.000	394,80	172,40	183,20	316,60	11	5	0	15	15	0	16	48	0,970	0,960	1,000	0,950
2004	95.000	239,80	262,00	110,20	416,20	81	18	63	22	0	40	54	123	0,760	0,940	0,730	0,940
2005	80.000	405,60	263,80	160,40	374,20	85	13	5	10	160	3	20	83	0,750	0,950	0,970	0,970
2006	78.000	275,20	90,80	105,00	503,20	46	60	77	14	0	0	0	131	0,890	0,560	0,520	0,960
2007	95.000	669,60	131,20	207,80	327,10	0	23	62	48	295	0	111	0	1,000	0,860	0,730	0,850
2008	95.000	315,80	265,20	147,00	348,70	18	0	9	42	0	63	18	110	0,950	1,000	0,920	0,890

(Fonte: SEAB / DERAL)

ANEXO VI – Eventos de “El Niño” e “La Niña” e suas intensidades em função das estações do ano no período de 1970 a 2008. F-, F, F+, eventos “La Niña” fracos, moderados e fortes, respectivamente. Q-, Q, Q+, eventos de “El Niño” fracos, moderados e fortes, respectivamente.

ANO	JFM	AMJ	JAS	OND
1970	Q-			
1971	F	F-	F-	F-
1972		Q-	Q	Q+
1973	Q		F-	F+
1974	F+	F	F-	F-
1975	F-	F-	F	F+
1976	F			Q-
1977				Q-
1978	Q-			
1979				
1980	Q-			
1981				
1982		Q-	Q	Q+
1983	Q+	Q		F-
1984	F-	F-		F-
1985	F-	F-		
1986			Q-	Q
1987	Q	Q	Q+	Q
1988	Q-		F-	F+

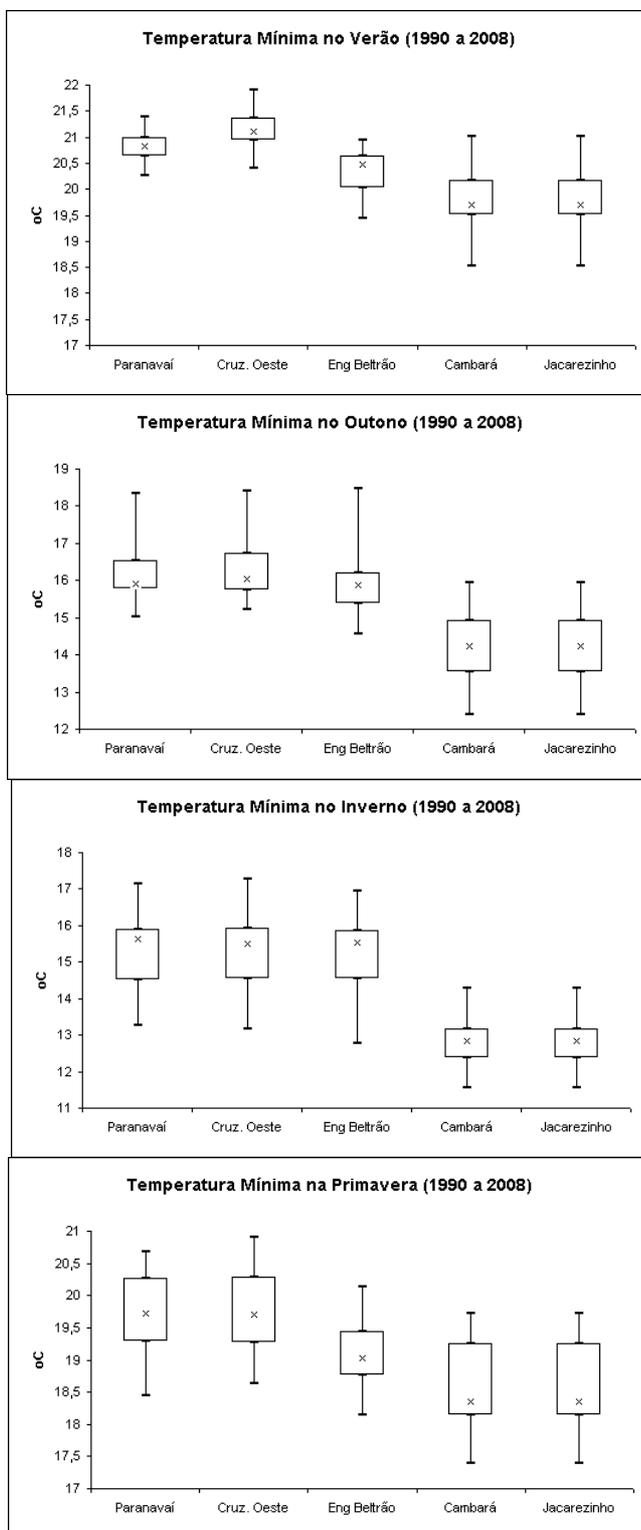
ANO	JFM	AMJ	JAS	OND
1989	F+	F-		
1990			Q-	Q-
1991	Q-	Q-	Q	Q
1992	Q+	Q+	Q-	Q-
1993	Q-	Q	Q	Q-
1994			Q	Q
1995	Q			F-
1996	F-			
1997		Q	Q+	Q+
1998	Q+	Q	F-	F
1999	F+	F	F-	F
2000	F	F-		F-
*2001	F-			
*2002		Q-	Q	Q+
*2003	Q			
*2004			Q	Q
*2005	Q-			
*2006			Q-	Q
*2007			F-	F-
*2008	F	F-		

(Fonte: FONTANA e BERLATO, 2003)

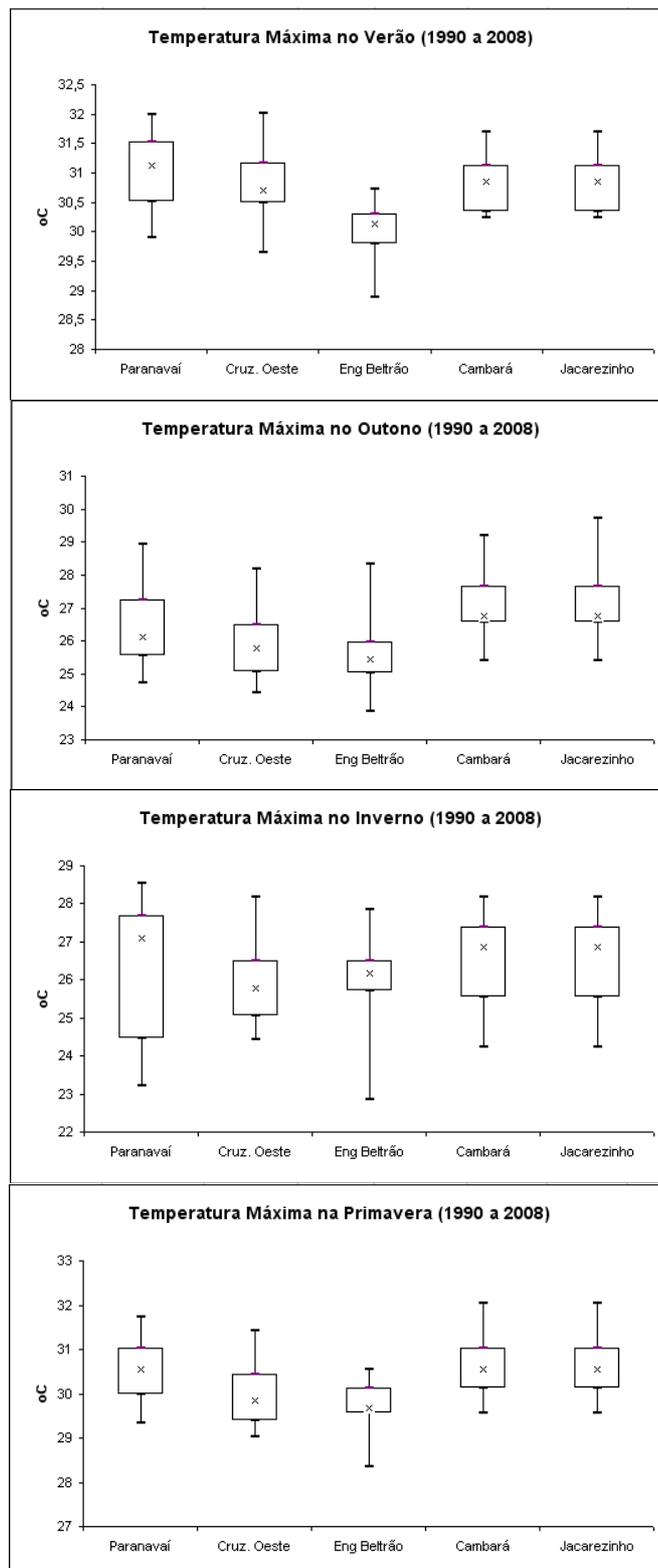
* Eventos acrescentados por WALTRICK (2010).

ANEXO VII – Eventos de “El Niño” e “La Niña” e suas intensidades em função das estações do ano no período de 1990 a 2008. Variáveis *N* com valores 1 para trimestres normais e 0 para trimestres com eventos *EN* ou *LN*; variáveis *LN* com valores 0,1,2 ou 3 para eventos “La Niña” ausente, fraco, moderado e forte, respectivamente; e variáveis *EN* com valores 0,1,2 ou 3 para eventos “El Niño” ausente, fraco, moderado e forte, respectivamente. Os valores foram utilizados nas regressões lineares múltiplas.

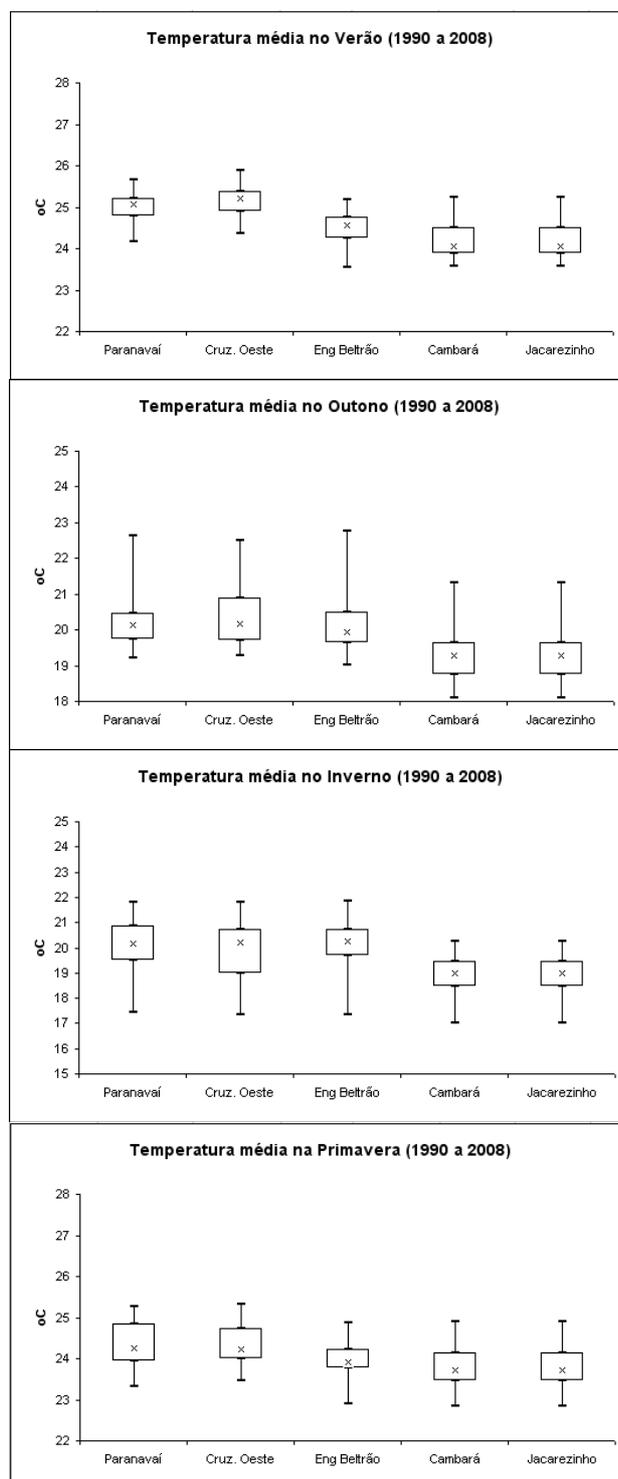
Ano	Nver	Nout	Ninv	Npri	LNver	LNout	LNinv	LNpri	ENver	ENout	ENinv	ENpri
1990	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
1991	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	2
1992	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	1	1
1993	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	2	1
1994	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2
1995	0	1	1	0	0	0	0	1	2	0	0	0
1996	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
1997	1	0	0	0	0	2	3	3	0	0	0	0
1998	0	0	0	0	0	0	1	2	3	2	0	0
1999	0	0	0	0	3	2	1	2	0	0	0	0
2000	0	0	1	0	2	1	0	1	0	0	0	0
2001	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
2002	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3
2003	0	1	1	1	0	0	0	0	2	0	0	0
2004	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2
2005	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0
2006	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2
2007	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
2008	0	0	1	1	2	1	0	0	0	0	0	0



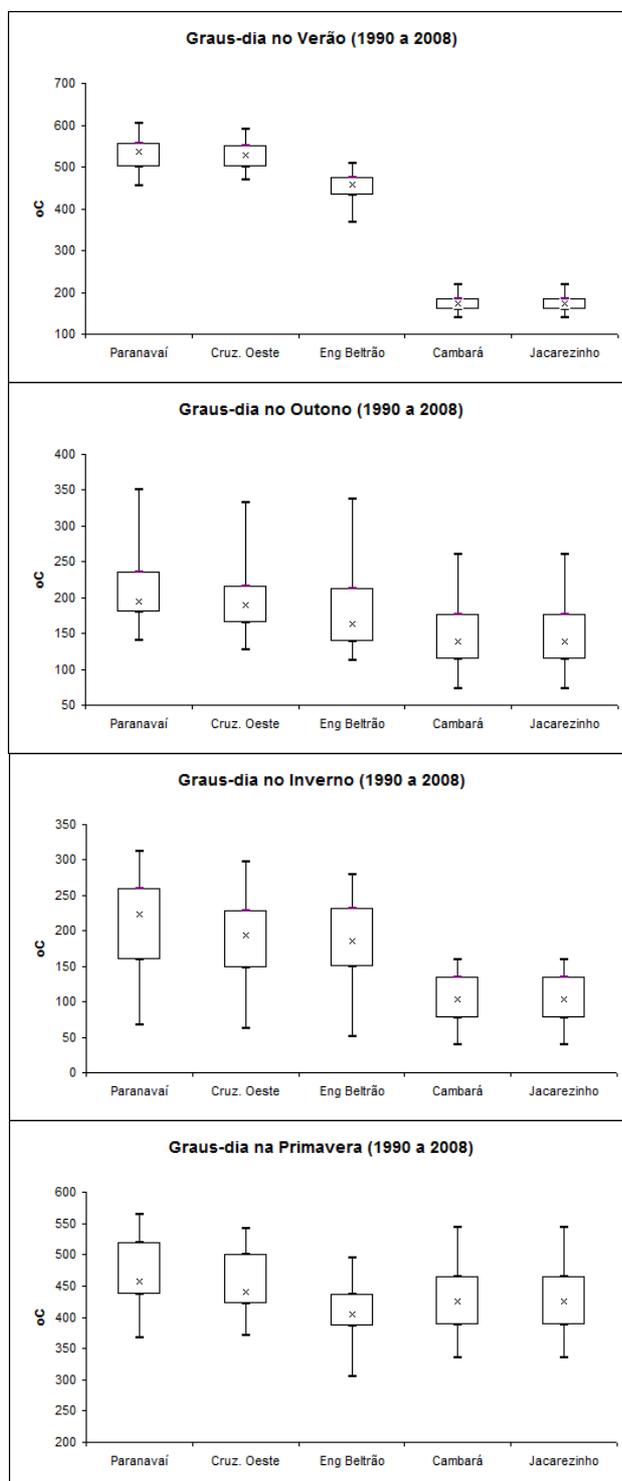
ANEXO VIII – Gráficos comparativos da média das temperaturas mínimas nas quatro estações do ano, em cinco municípios paranaenses (1990 a 2008).



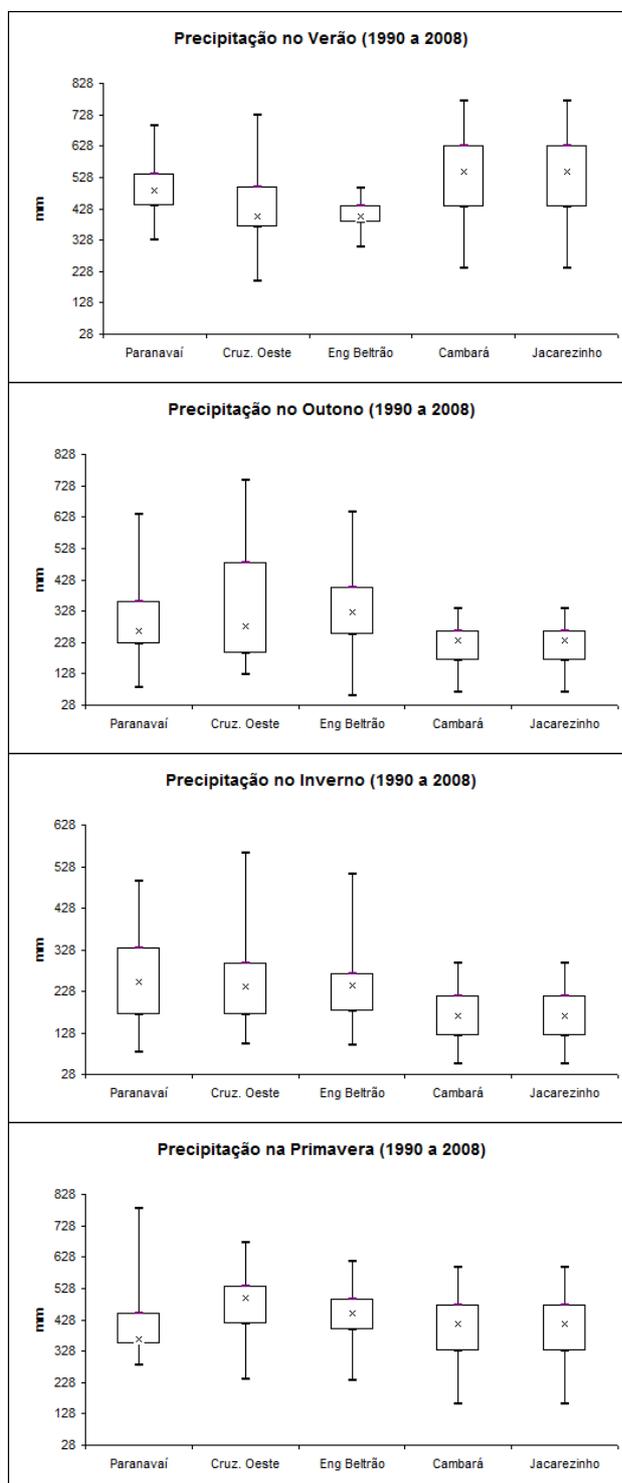
ANEXO IX – Gráficos comparativos da média das temperaturas máximas nas quatro estações do ano, em cinco municípios paranaenses (1990 a 2008).



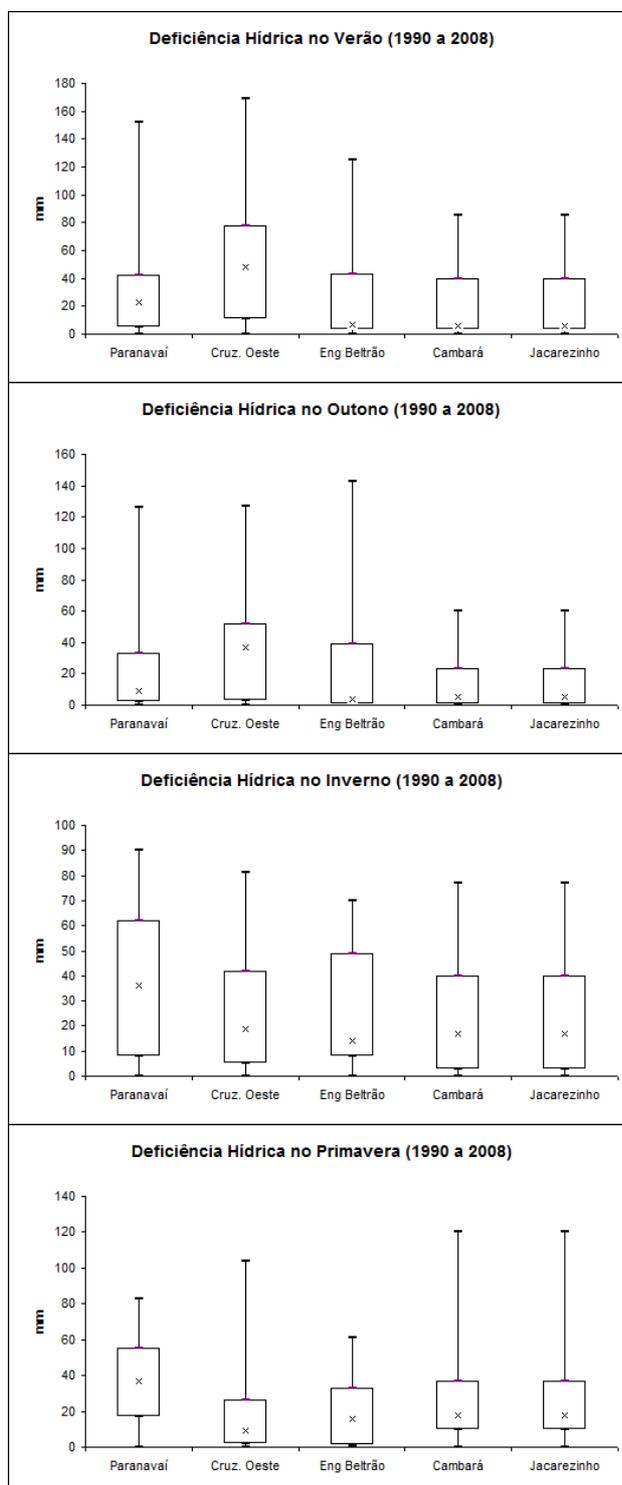
ANEXO X – Gráficos comparativos da média das temperaturas médias nas quatro estações do ano, em cinco municípios paranaenses (1990 a 2008).



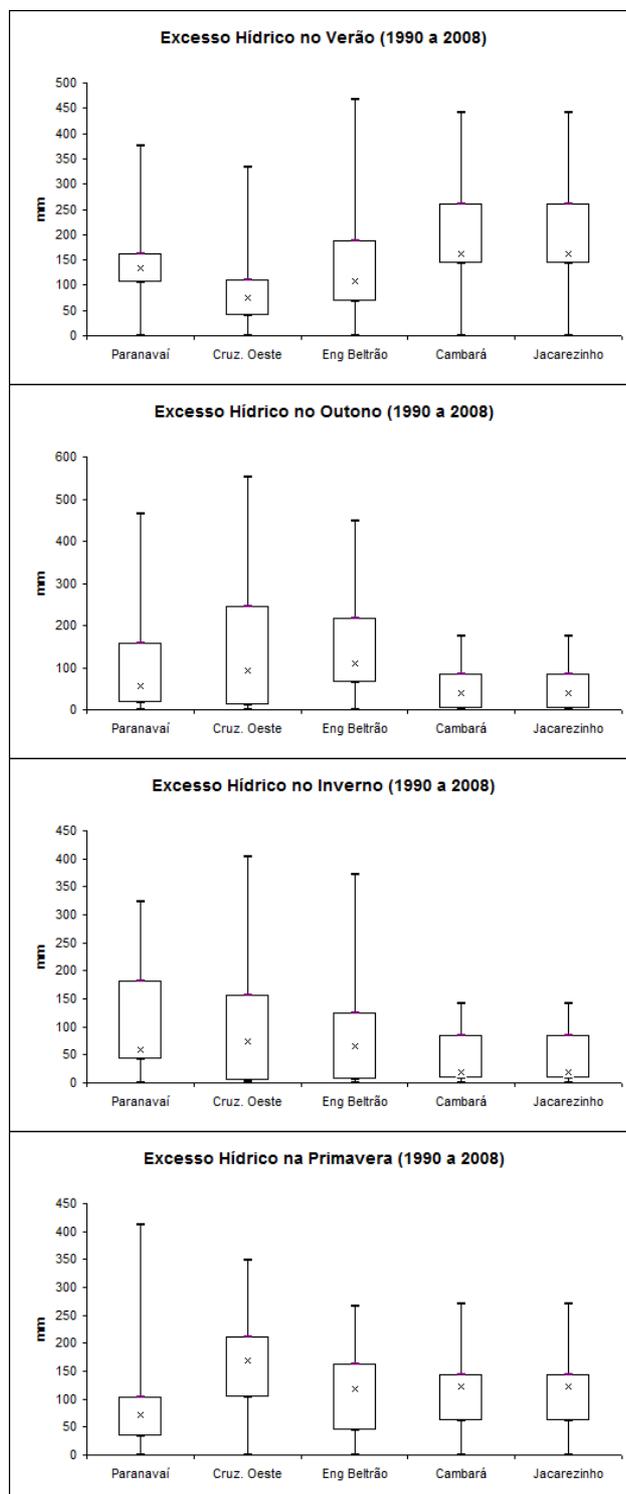
ANEXO XI – Gráficos comparativos do somatório de graus-dia (temperatura base = 20 °C) nas quatro estações do ano, em cinco municípios paranaenses (1990 a 2008).



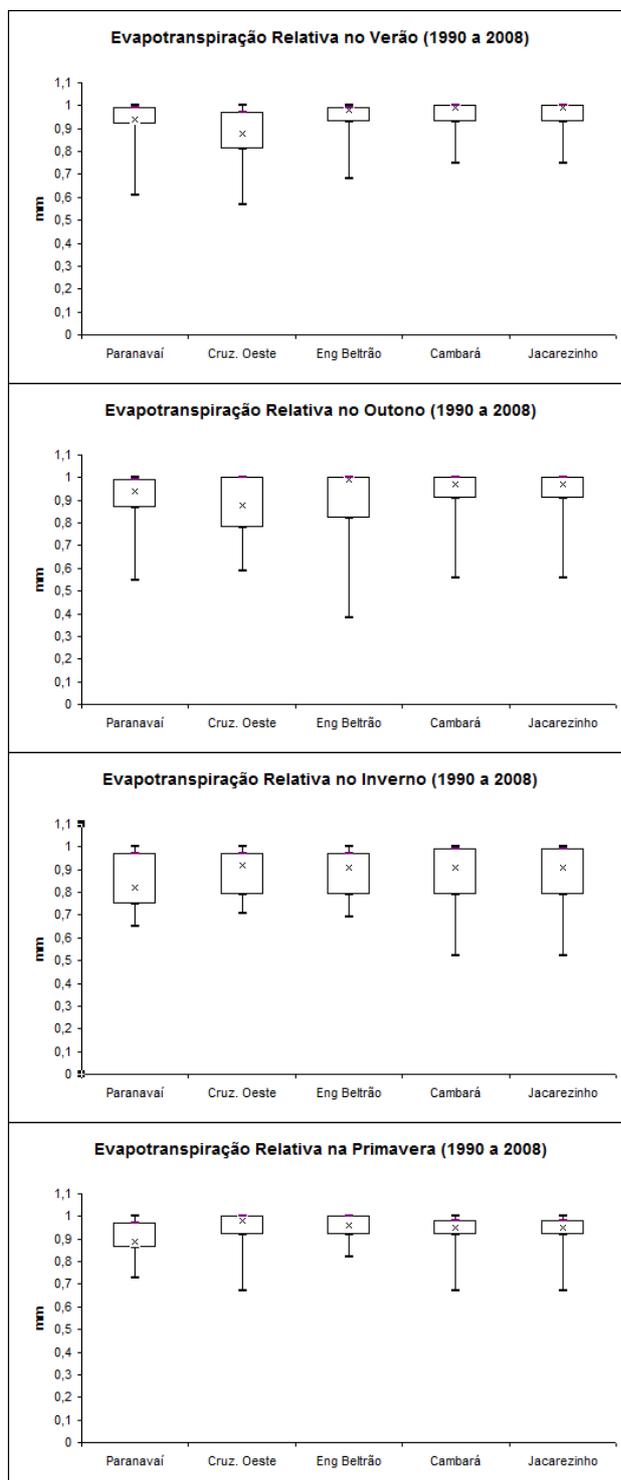
ANEXO XII – Gráficos comparativos do somatório de precipitação, nas quatro estações do ano, em cinco municípios paranaenses (1990 a 2008).



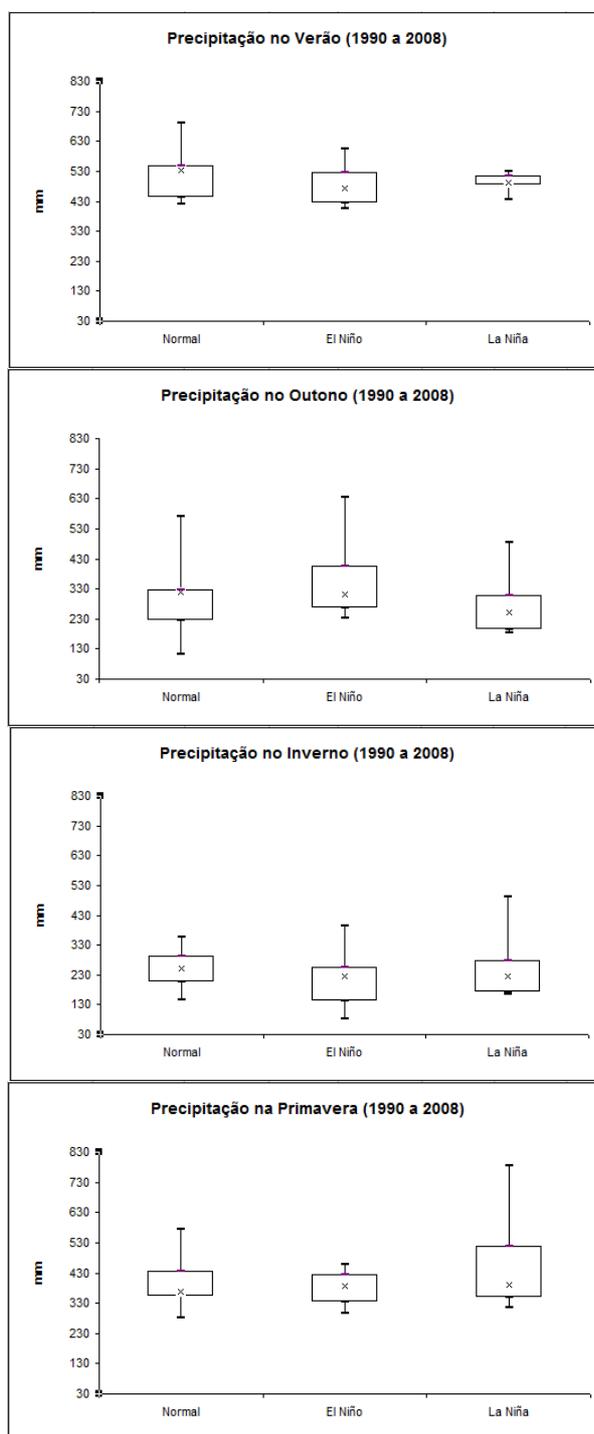
ANEXO XIII – Gráficos comparativos do somatório de deficiência hídrica no solo, nas quatro estações do ano, em cinco municípios paranaenses (1990 a 2008).



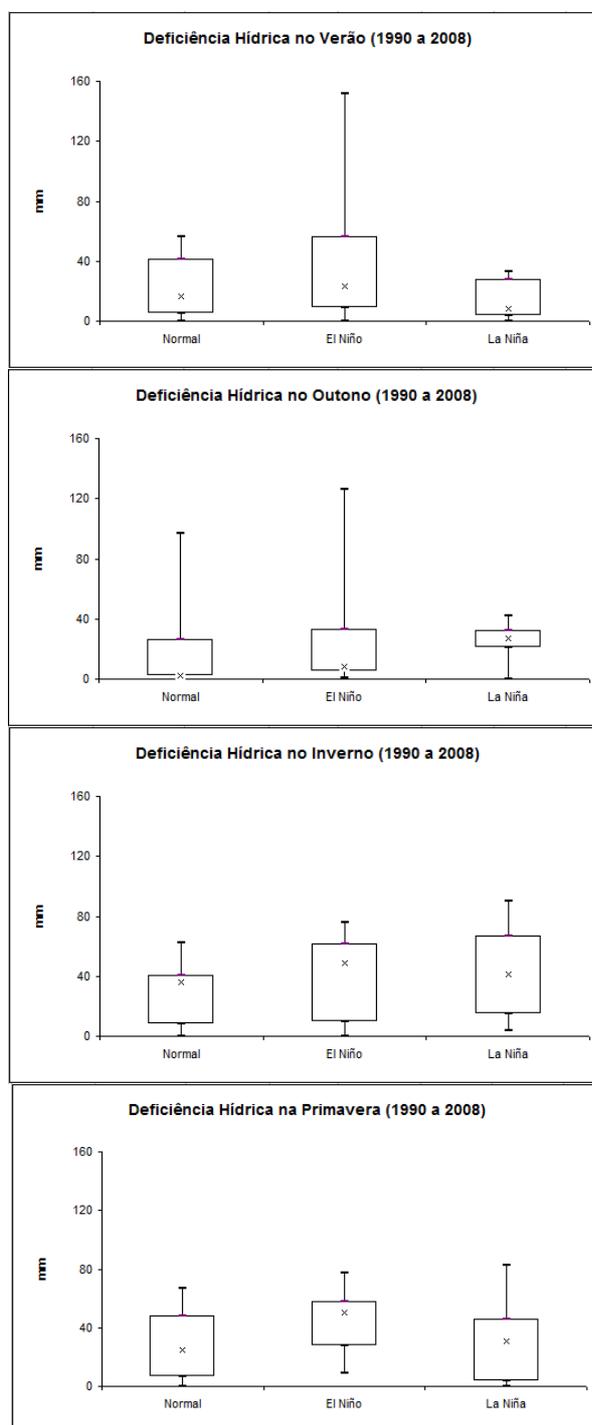
ANEXO XIV – Gráficos comparativos do somatório do excesso hídrico no solo, nas quatro estações do ano, em cinco municípios paranaenses (1990 a 2008).



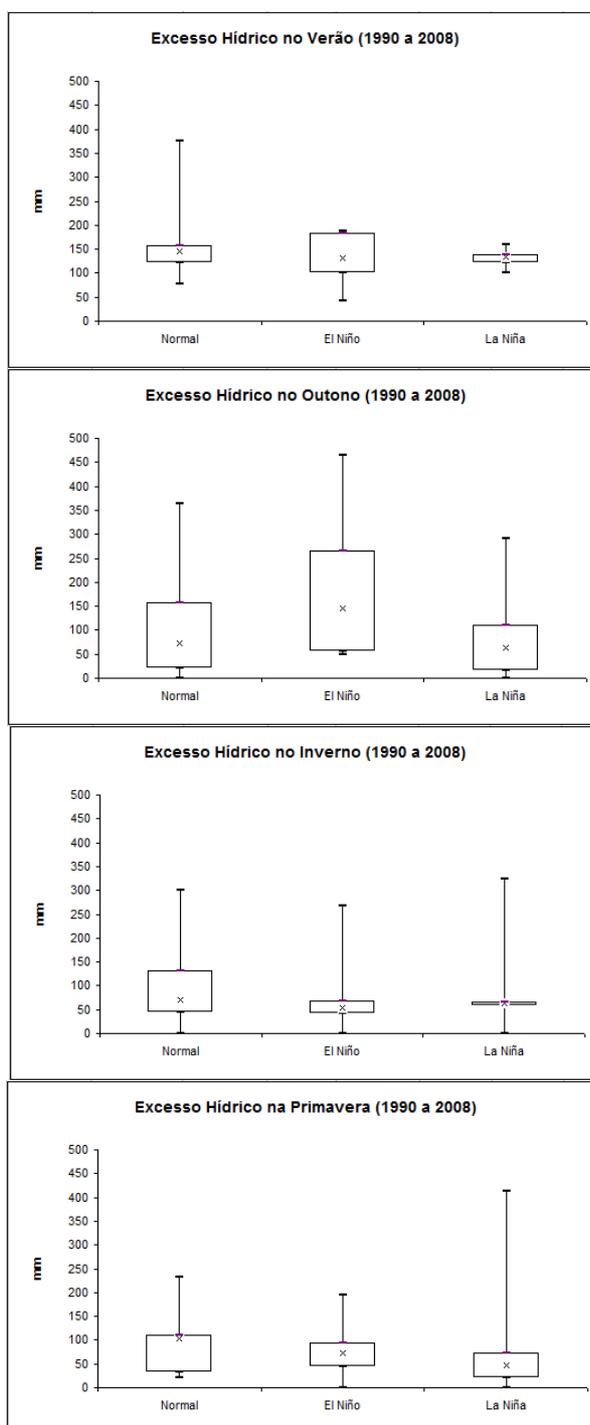
ANEXO XV – Gráficos comparativos das médias da evapotranspiração relativa (ETR/ET_c) nas quatro estações do ano, em cinco municípios paranaenses (1990 a 2008).



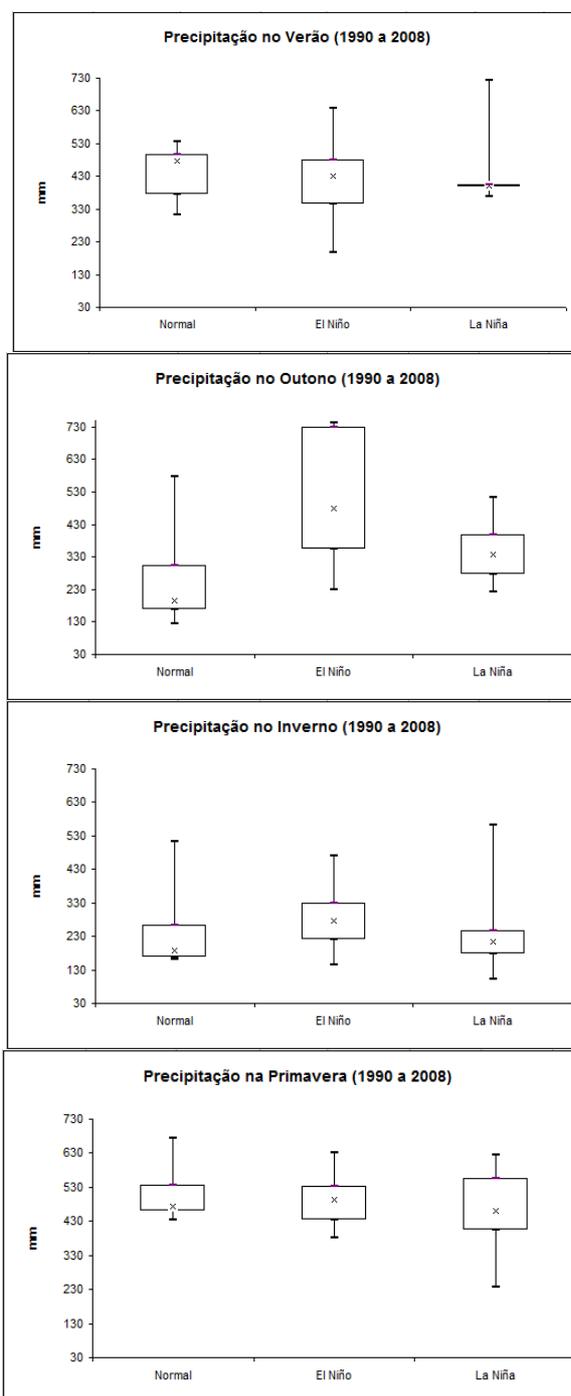
ANEXO XVI – Gráficos comparativos das precipitações acumuladas (mm) por trimestre (verão, outono, inverno e primavera) no município de Paranavaí, em trimestres normais, trimestres com evento “El Niño” e trimestres com evento “La Niña” (1990 a 2008).



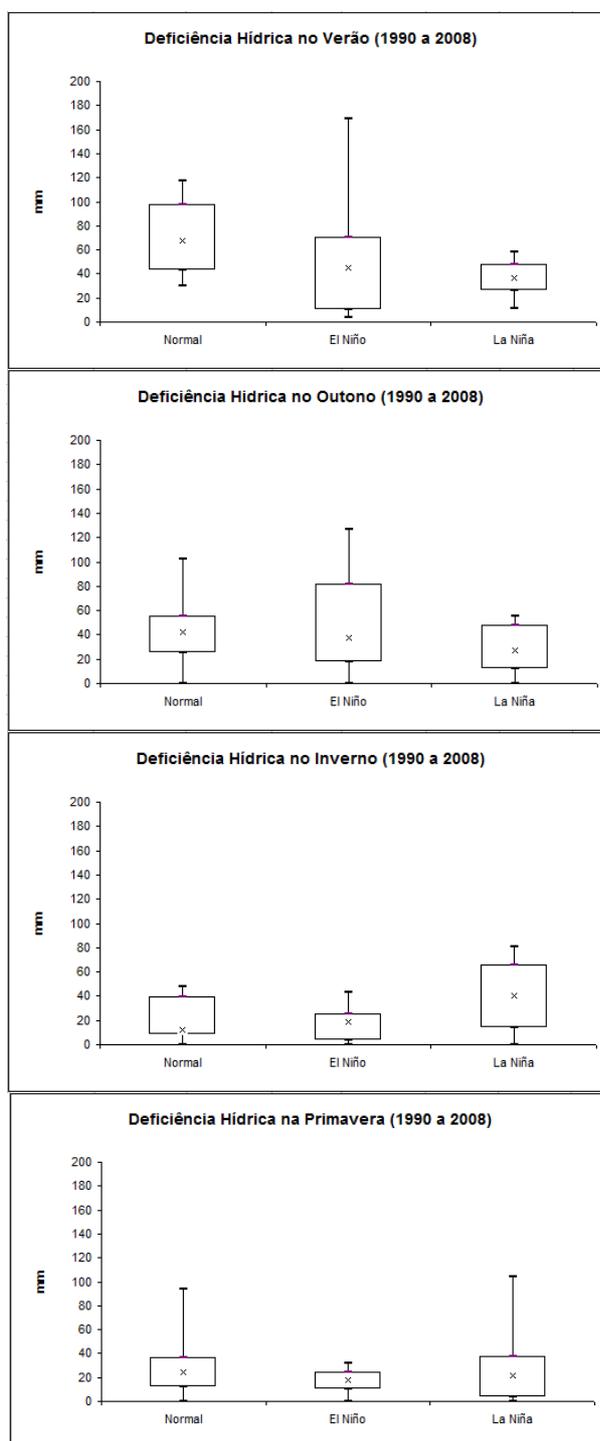
ANEXO XVII – Gráficos comparativos da deficiência hídrica acumulada (mm) resultante do balanço hídrico segundo THONTHWAIT & MATHER (1955), por trimestre (verão, outono, inverno e primavera) no município de Paranavaí, em trimestres normais, trimestres com evento “El Niño” e trimestres com evento “La Niña” (1990 a 2008).



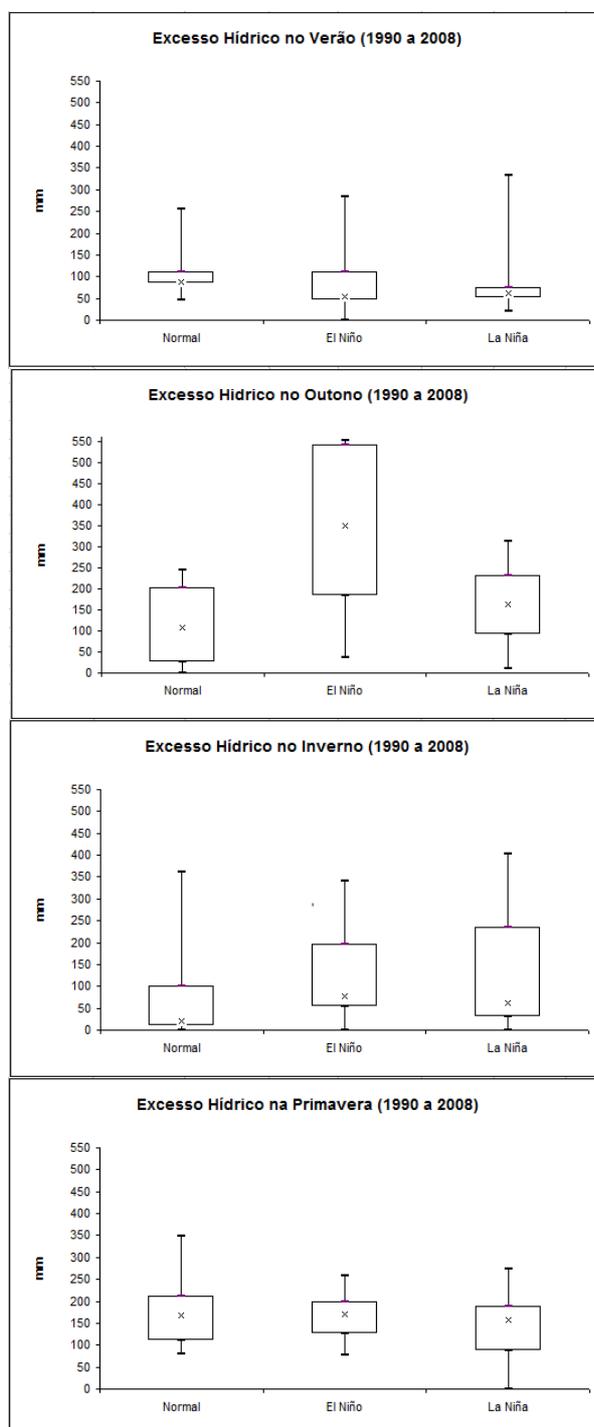
ANEXO XVIII – Gráficos comparativos do excedente hídrico acumulado (mm) resultante do balanço hídrico segundo THONTHWAIT & MATHER (1955), por trimestre (verão, outono, inverno e primavera) no município de Paranavaí, em trimestres normais, trimestres com evento “El Niño” e trimestres com evento “La Niña” (1990 a 2008).



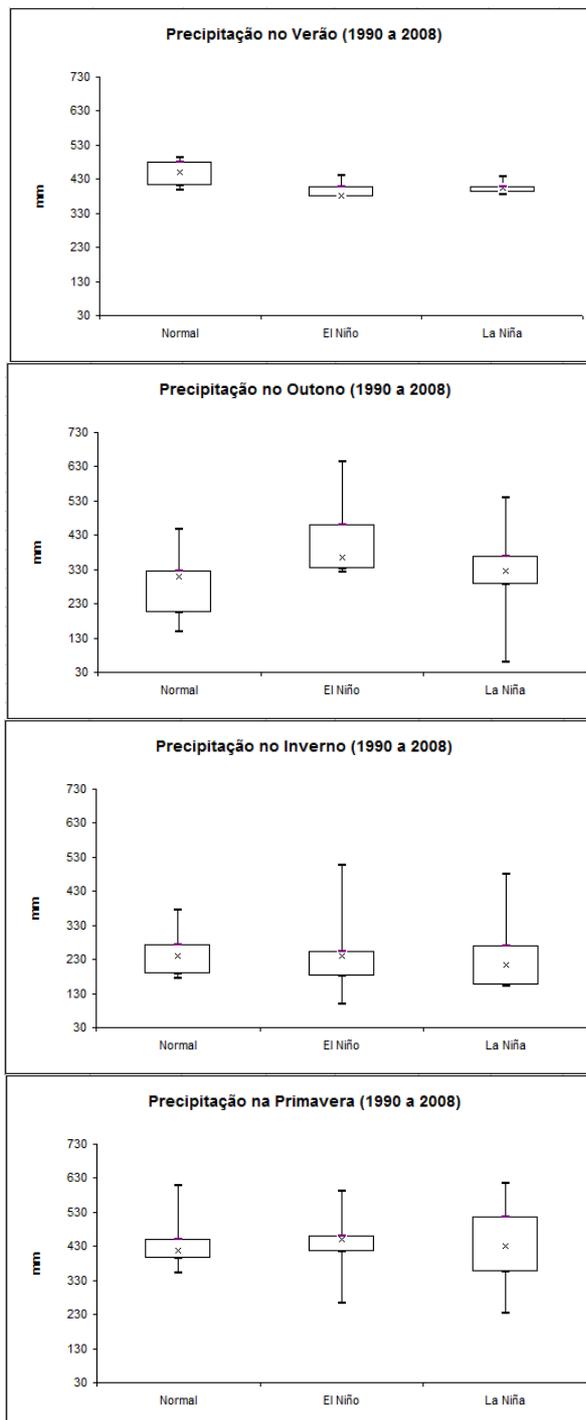
ANEXO XIX – Gráficos comparativos das precipitações acumuladas (mm) por trimestre (verão, outono, inverno e primavera) no município de Cruzeiro do Oeste, em trimestres normais, trimestres com evento “El Niño” e trimestres com evento “La Niña” (1990 a 2008).



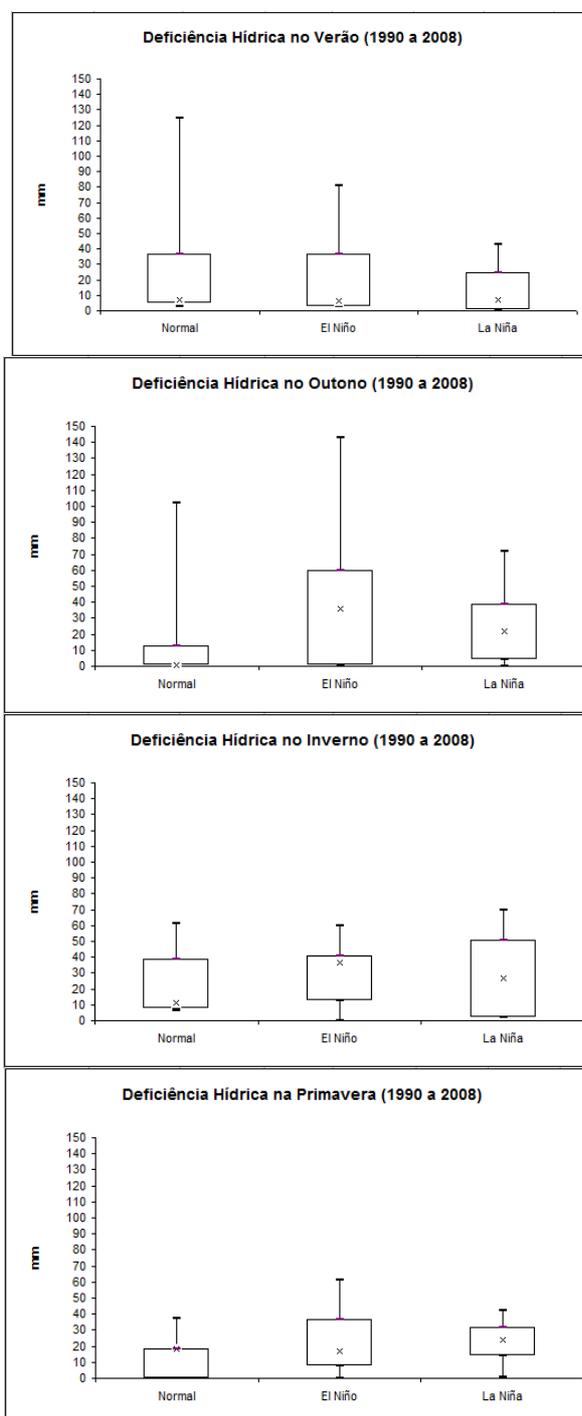
ANEXO XX – Gráficos comparativos da deficiência hídrica acumulada (mm) resultante do balanço hídrico segundo THONTHWAIT & MATHER (1955), por trimestre (verão, outono, inverno e primavera) no município de Cruzeiro do Oeste, em trimestres normais, trimestres com evento “El Niño” e trimestres com evento “La Niña” (1990 a 2008).



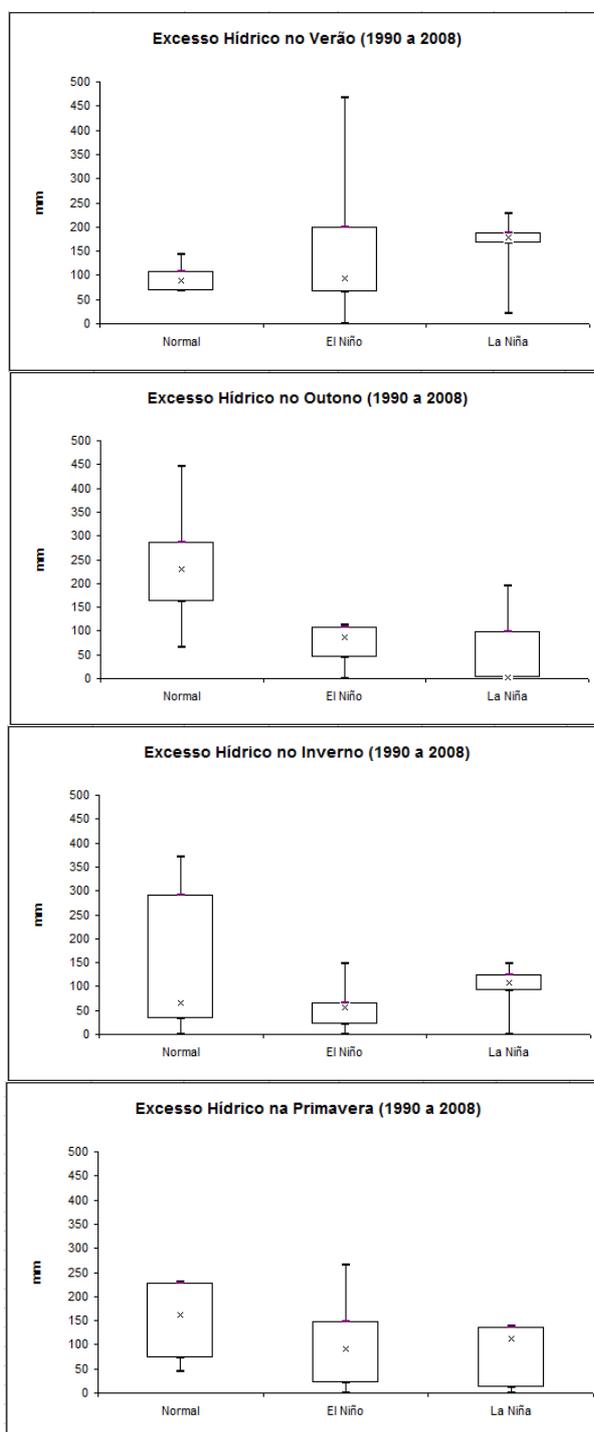
ANEXO XXI – Gráficos comparativos do excedente hídrico acumulado (mm) resultante do balanço hídrico segundo THONTHWAIT & MATHER (1955), por trimestre (verão, outono, inverno e primavera) no município de Cruzeiro do Oeste, em trimestres normais, trimestres com evento “El Niño” e trimestres com evento “La Niña” (1990 a 2008).



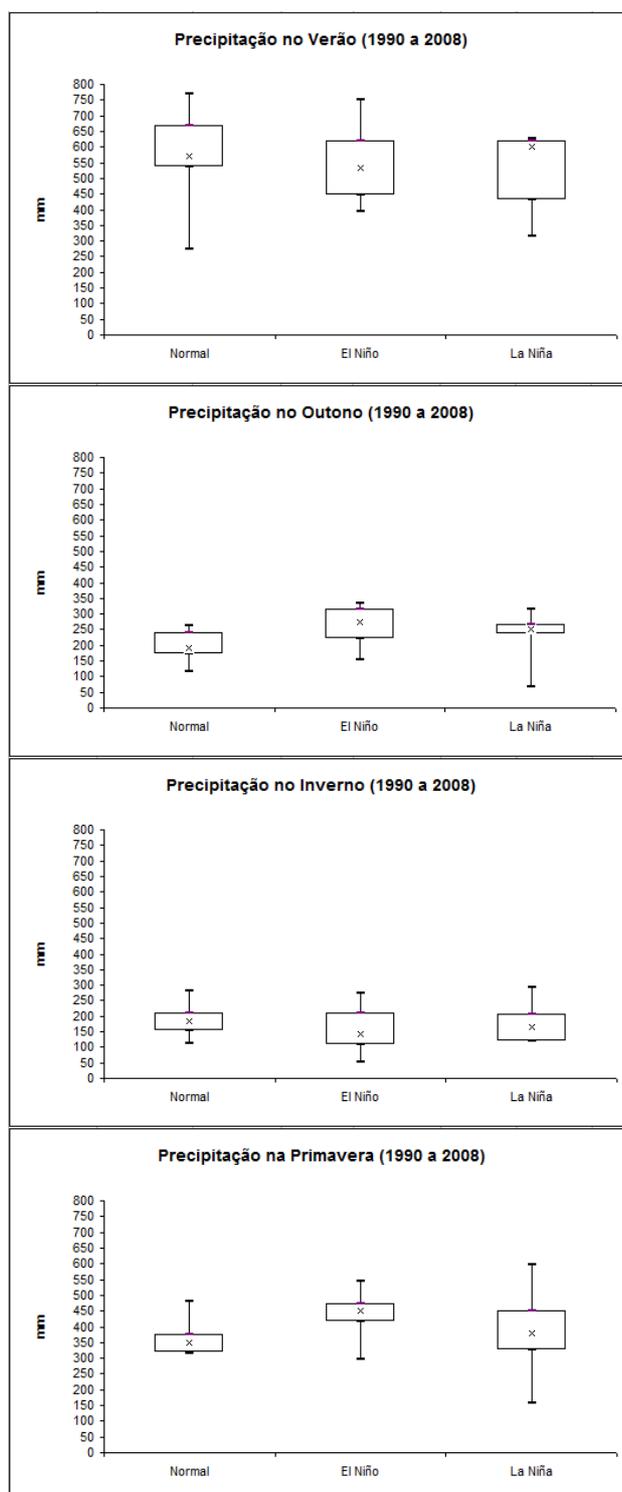
ANEXO XXII – Gráficos comparativos das precipitações acumuladas (mm) por trimestre (verão, outono, inverno e primavera) no município de Engenheiro Beltrão, em trimestres normais, trimestres com evento “El Niño” e trimestres com evento “La Niña” (1990 a 2008).



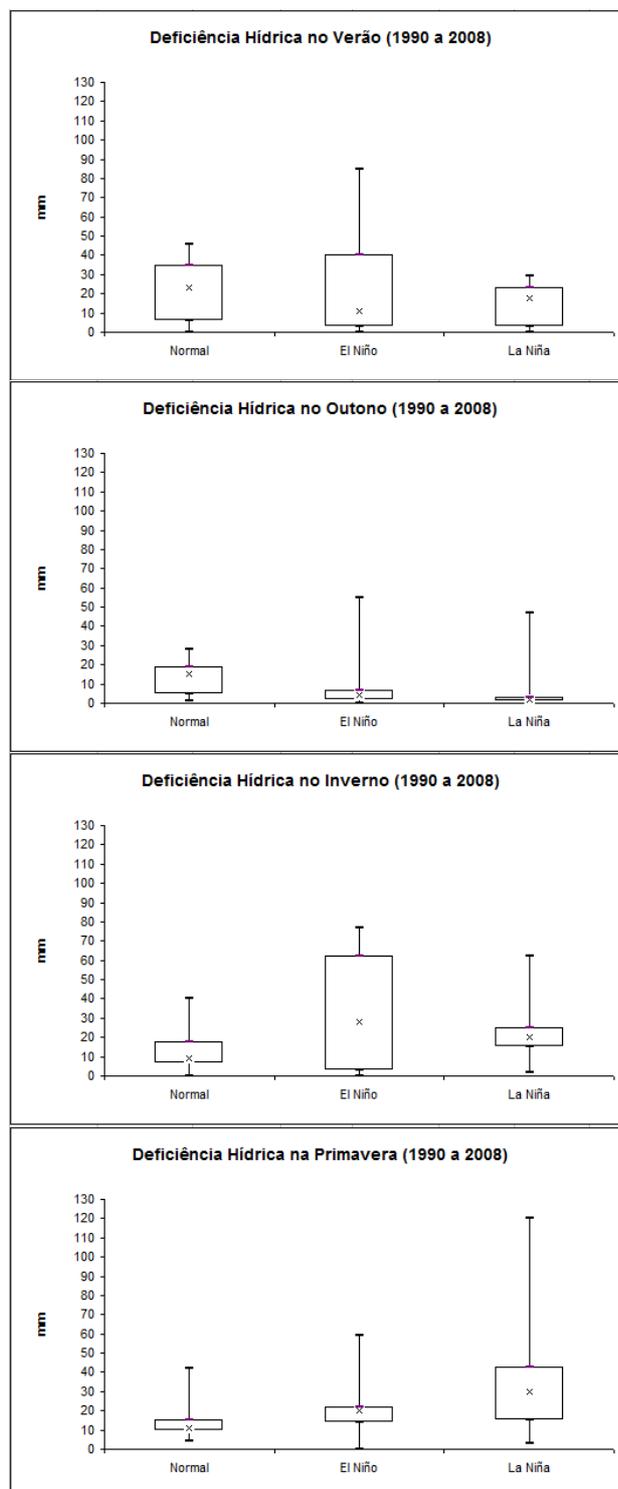
ANEXO XXIII – Gráficos comparativos da deficiência hídrica acumulada (mm) resultante do balanço hídrico segundo THONTHWAIT & MATHER (1955), por trimestre (verão, outono, inverno e primavera) no município de Engenheiro Beltrão, em trimestres normais, trimestres com evento “El Niño” e trimestres com evento “La Niña” (1990 a 2008).



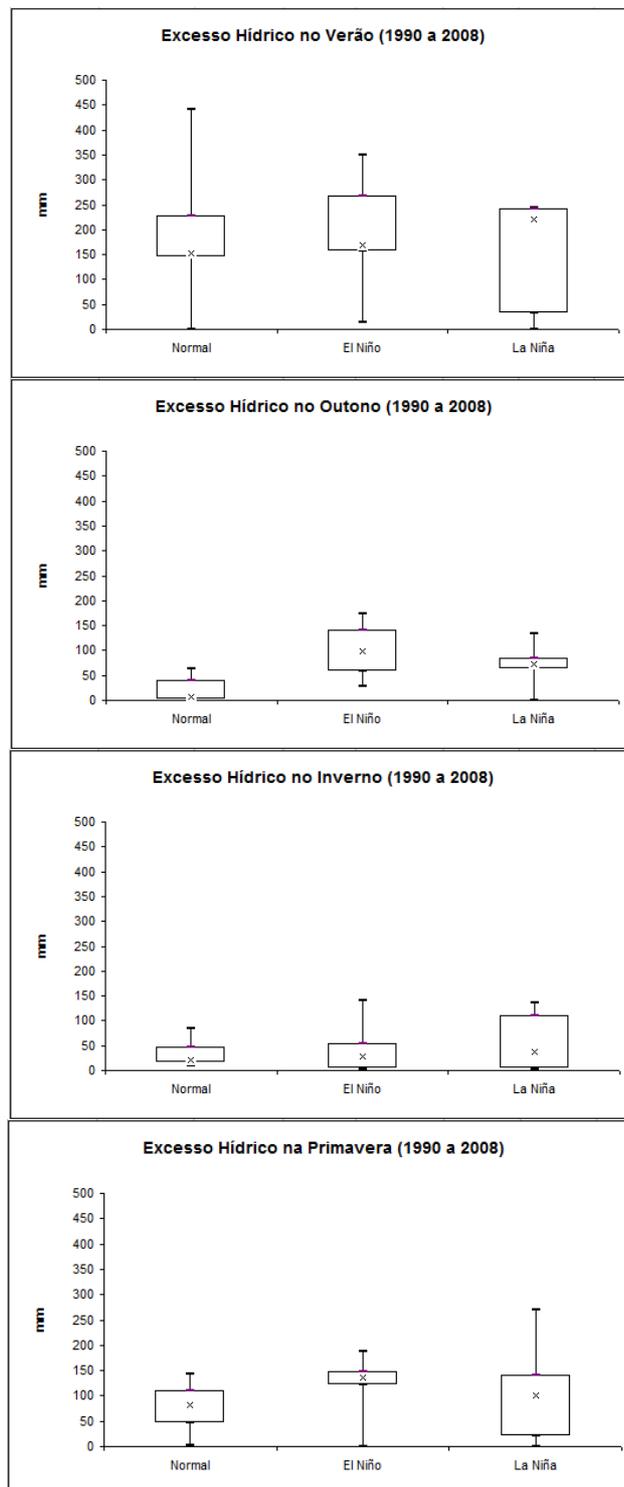
ANEXO XXIV – Gráficos comparativos do excedente hídrico acumulado (mm) resultante do balanço hídrico segundo THONTHWAIT & MATHER (1955), por trimestre (verão, outono, inverno e primavera) no município de Engenheiro Beltrão, em trimestres normais, trimestres com evento “El Niño” e trimestres com evento “La Niña” (1990 a 2008).



ANEXO XXV – Gráficos comparativos das precipitações acumuladas (mm) por trimestre (verão, outono, inverno e primavera) nos municípios de Cambará e Jacarezinho, em trimestres normais, trimestres com evento “El Niño” e trimestres com evento “La Niña” (1990 a 2008).



ANEXO XXVI – Gráficos comparativos da deficiência hídrica acumulada (mm) resultante do balanço hídrico segundo THONTHWAIT & MATHER (1955), por trimestre (verão, outono, inverno e primavera) nos municípios de Camará e Jacarezinho, em trimestres normais, trimestres com evento “El Niño” e trimestres com evento “La Niña” (1990 a 2008).



ANEXO XXVII – Gráficos comparativos do excedente hídrico acumulado (mm) resultante do balanço hídrico segundo THONTHWAIT & MATHER (1955), por trimestre (verão, outono, inverno e primavera) nos municípios de Cambará e Jacarezinho, em trimestres normais, trimestres com evento “El Niño” e trimestres com evento “La Niña” (1990 a 2008).