**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

Sensibilidade da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) ao excesso de água no solo

Antonio Clarette Santiago Tavares

**Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Agronomia. Área de concentração Irrigação e Drenagem**

**Piracicaba
2009**

Antonio Clarette Santiago Tavares
Engenheiro Agrônomo

Sensibilidade da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) ao excesso de água no solo

Orientador:
Prof. Dr. **SERGIO NASCIMENTO DUARTE**

**Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Agronomia. Área de concentração: Irrigação e Drenagem**

**Piracicaba
2009**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP**

Tavares, Antonio Clarette Santiago

Sensibilidade da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) ao excesso de água no solo /
Antonio Clarette Santiago Tavares. - - Piracicaba, 2009.
220 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2009.
Bibliografia.

1. Água do solo 2. Cana-de-açúcar 3. Drenagem 4. Umidade do solo I. Título

CDD 633.61
T231s

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

A Deus pela minha vida. À minha mãe Silvia Santiago Tavares pelo seu amor, a meu pai José Bispo Tavares (*in memoriun*) pela sua dedicação em me proporcionar educação; ao meu irmão Marconi pela amizade e companheirismo, ao meu tio José Nilton Bispo pelo apoio e compreensão das minhas escolhas; a minha avó Rosalina (*in memorian*) pelos seus princípios; ao meu avô Silvio Santiago (*in memorium*) pelo seu esforço em deixar amparados seus filhos e netos e a minha madrinha Quita pela consideração e apoio.

Dedico

Aos meus Tios, Tias e Primos.

Ofereço

AGRADECIMENTOS

Ao amigo e orientador Prof. Dr. Sergio Nascimento Duarte, pela amizade e confiança.

Aos amigos Cícero René, Pabblo Atahualpa, Kelly Tagianne, Marco Rosa, LÍlian e Raulzinho pela convivência.

Aos amigos da Pós-Graduação Priscylla Ferraz, Robson Armindo, Aliandra, Vanessa Duarte, Joyce, Carolzinha, Sula, Adalberto, Fabiana, Cláudio Japonês, Francisco Valfisio, Dalva, Rochane, Marcelo Preske, Ralini Mélo, Rodrigo Câmara, Tales Miler, Sergio, Yanê Gruber, Ronaldo Santos, Cleomar Ferreira, Marconi Batista, Waleska Eloi, Pedro Robson, Allan Cunha, Lucas Batatais... Enfim, a todos aqueles que se fizeram presentes nesse período de aprendizado.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” e à Universidade de São Paulo, por ter me dado a oportunidade de fazer esse curso de pós-graduação.

Ao Departamento de Engenharia Rural da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – Universidade de São Paulo, pela oportunidade que me foi dada de aperfeiçoar-me numa área da Agronomia que me identifico, e a seus funcionários: Beatriz, Hélio, Luiz, Antônio, Gilmar, Davilmar, Sandra e Osvaldo por serem sempre prestativos.

Ao CNPq e FAPESP pelo apoio financeiro que contribuiu para o bom aproveitamento do curso, sendo também determinante para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao IAC na pessoa do Dr. Rinaldo Calheiros.

A Usina Furlan por ter me cedido o material propagativo.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Rural da ESALQ/USP, que contribuíram para meu aprendizado.

A EMBRAPA Instrumentação Agropecuária (CNPDIA) nas pessoas do Dr. Paulo Sergio Hermman e André Bugnolli.

Aos professores e amigos Dr. Daniel Carvalho da Fonseca, Dr. Leonardo Batista Duarte, Dr. Jorge Pimenta da UFRRJ.

A todos os professores que tive e que contribuíram para me tornar o homem que sou hoje.

SUMÁRIO

<u>RESUMO</u>	23
<u>ABSTRACT</u>	25
LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE TABELAS	19
1 INTRODUÇÃO	27
2 DESENVOLVIMENTO	31
2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
2.1.1 Característica da cultura	31
2.1.1.1 Sistema radicular	31
2.1.1.2 Colmo	33
2.1.1.3 Folha	33
2.1.1.4 Propagação	34
2.1.1.5 Crescimento	35
2.1.1.6 Temperatura	37
2.1.1.7 Radiação solar	38
2.1.2 Potencial de água na folha	39
2.1.3 Planícies alagadas e solos hidromórficos	40
2.1.4 Critérios de drenagem	41
2.1.5 Estresse por excesso de umidade	43
2.2 MATERIAL E MÉTODOS	47
2.2.1 Localização e caracterização da área experimental	47
2.2.2 Descrição da estrutura experimental	47
2.2.3 Inundação dos lisímetros	49
2.2.3.1 Metodologia para o estabelecimento de diferentes velocidades de rebaixamento do NF	51
2.2.3.2 Cálculo das profundidades intermediárias do lençol freático	52
2.2.4 Condução do experimento	55
2.2.4.1 Caracterização do solo	55
2.2.4.2 Acondicionamento do solo	55
2.2.4.3 Plantio e condução	56

2.2.4.4	Adubação	57
2.2.4.5	Manejo da irrigação	57
2.2.4.6	Análise das folhas +3 da cana-de-açúcar foliar aos 315 após o plantio.....	59
2.2.4.7	Parâmetros químicos e gasosos do solo	60
2.2.4.7.1	Medida do pH e do potencial de óxido redução do solo.....	61
2.2.4.7.2	Medição do oxigênio dissolvido	62
2.2.4.8	Potencial de água na folha	62
2.2.4.8.1	Determinação da metodologia de coleta das folhas em condições experimentais para determinação do potencial de água na folha da cana-de-açúcar	63
2.2.4.8.2	Potencial de água na folha da cana-de-açúcar (cultivar RB 867515)	64
2.2.4.9	Parâmetros micro-climáticos da casa de vegetação	66
2.2.4.9.1	Determinação da radiação fotossinteticamente ativa no interior da casa de vegetação.....	67
2.2.4.10	Parâmetros biométricos relativo ao desenvolvimento das plantas e produção	68
2.2.4.10.1	Planejamento estatístico.....	68
2.2.4.10.2	Altura de plantas	69
2.2.4.10.2.1	Incremento de crescimento dos colmos	69
2.2.4.10.3	Número de folhas na parcela.....	70
2.2.4.10.4	Diâmetro de colmo.....	70
2.2.4.10.5	Número de perfilhos nas parcelas	70
2.2.4.10.6	Área foliar (AF)	70
2.2.4.10.7	Índice de área foliar (IAF)	72
2.2.4.11	Índices fisiológicos, índice de maturação, colheita e características tecnológicas	72
2.2.4.11.1	Planejamento estatístico.....	72
2.2.4.11.2	Taxa de assimilação líquida (TAL).....	73
2.2.4.11.3	Razão de área foliar (RAF)	73
2.2.4.11.4	Taxa de crescimento absoluto (TCA)	74
2.2.4.11.5	Taxa de crescimento relativo (TCR).....	74
2.2.4.11.6	Taxa de crescimento da cultura (TCC)	75
2.2.4.11.7	Área foliar específica (AFE).....	75
2.2.4.11.8	Índice de maturação	76
2.2.4.11.9	Colheita	77

2.2.4.11.10 Características químico-tecnológicas	78
2.2.4.11.10.1 Sólidos solúveis (°Brix)	78
2.2.4.11.10.2 Porcentagem em massa de sacarose aparente (Pol).....	79
2.2.4.11.10.3 Açúcar teórico recuperável (ATR)	81
2.2.4.11.10.4 Rendimento de açúcar teórico (RAT).....	81
2.2.4.11.10.5 Pureza aparente.....	82
2.2.4.11.10.6 Açúcares redutores	82
2.2.4.11.10.7 Açúcares redutores % caldo (estimados).....	82
2.2.4.11.10.8 Açúcares redutores % cana.....	83
2.2.4.11.10.9 Fibra.....	83
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	85
2.3.1 Parâmetros hídricos e climáticos	85
2.3.2 Parâmetros químicos do solo	91
2.3.2.1 pH do solo submetidos ao encharcamento	92
2.3.2.2 Potencial de oxiredução do solo submetido ao encharcamento	99
2.3.3 Parâmetro de troca gasosa	107
2.3.3.1 Oxigênio dissolvido na solução do solo submetido ao encharcamento	107
2.3.4 Radiação fotossinteticamente ativa (PAR) no interior da casa de vegetação.....	116
2.3.5 Potencial de água na folha	124
2.3.5.1 Resultado da metodologia de coleta de folhas para determinação do potencial de água na folha da cana-de-açúcar	124
2.3.5.2 Potencial de água nas folhas da cana de açúcar Cultivar RB 867515 submetidas à inundação e a irrigação.	128
2.3.6 Nutrição das plantas devido ao encharcamento.....	137
2.3.7 Parâmetros biométricos relativo ao desenvolvimento das plantas	147
2.3.7.1 Alturas dos colmos	149
2.3.7.1.1 Incremento de crescimento dos colmos (IC)	152
2.3.7.2 Número de folhas na parcela	153
2.3.7.3 Diâmetro dos colmos	155
2.3.7.4 Número de perfilhos nas parcelas.....	156
2.3.7.5 Área foliar das parcelas	158

2.3.7.6 Índice de área foliar.....	161
2.3.8 Produtividade e seus componentes	163
2.3.8.1 Massa verde dos colmos (MVC).....	165
2.3.8.2 Massa seca dos colmos (MSC)	166
2.3.8.3 Massa verde dos ponteiros (MVP).....	167
2.3.8.4 Massa seca dos ponteiros (MSP)	169
2.3.8.5 Massa verde total (MVT).....	170
2.3.8.6 Massa seca total (MST).....	171
2.3.9 Índices fisiológicos	172
2.3.9.1 Razão de área foliar (RAF)	174
2.3.9.2 Taxa de crescimento relativo (TCR).....	175
2.3.9.3 Área foliar específica (AFE).....	177
2.3.10 Índice de maturação	178
2.3.11 Parâmetros de qualidade	184
2.3.11.1 Porcentagem de sólidos solúveis (° Brix).....	185
2.3.11.2 Porcentagem em massa de sacarose aparente (Pol)	188
2.3.11.3 Açúcar teórico recuperável (ATR).....	189
2.3.11.4 Fibra	192
3 CONCLUSÕES	195
REFERÊNCIAS.....	197

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática do sistema radicular inicial em cana-planta, mostrando o desenvolvimento das raízes do tolete a partir do nó (primárias) e o desenvolvimento das raízes (secundárias) a partir da base dos perfilhos (VAN DILLEWIJN, 1952)....	32
Figura 2 – Numeração das folhas pelo sistema de Kuijper (VAN DILLEWIJN, 1952).....	34
Figura 3 – Ciclo da cana-de-açúcar e variações na temperatura e pluviosidade da região centro-sul do Brasil (CASTRO, 1999)	36
Figura 4 – Estufa experimental.....	48
Figura 5 – Tablado de madeira com dois reservatórios de mil litros cada	48
Figura 6 – Esquema de um lisímetro parcelar	49
Figura 7 – a) Tomadas de água da rede de abastecimento; b) Reservatório com chave bóia; c) Mini registro; d) Poços de observação; e) Poço de observação envelopado; f) Piezômetro	50
Figura 8 – Lisímetros inundados	51
Figura 9 – Correção do lisímetro com calcário	56
Figura 10 – Curva de retenção da água no solo.....	58
Figura 11 – a) pHgâmetro e as soluções de calibração; b) Sensores de pH; c)Potencial de óxido redução	61
Figura 12 – a) Oxímetro portátil de campo; b) Sensor	62
Figura 13 – Câmara de Scholander.....	63
Figura 14 – Folhas da cana-de-açúcar em um pré-teste com finalidade de validar se era possível utilizar uma única folha para determinar o potencial de água em dois horários distintos.....	64
Figura 15 – Esquema da retirada do segmento da folha da cana-de-açúcar para as medidas de potencial de água na folha	65
Figura 16 – Psicrômetro	66
Figura 17 – Sensores de temperatura instalado nas parcelas em condição de solo seco e encharcado	66
Figura 18 – Datalogger 21X e multiplexador de dezesseis canais – Campbell Scientific	67
Figura 19 – Sunscan System Radio Link	67
Figura 20 – Nível freático na superfície do solo e nível freático a 0,30 m da superfície	69

Figura 21 – a) Aparelho desintegrador e betoneira; b) Amostras dos tratamentos identificados com etiqueta.....	78
Figura 22 – Refratômetro digital.....	79
Figura 23 – a) Sacarímetro; b) Prensa hidráulica; c) Detalhe da prensa; d) Amostra de caldo e o Subacetado de chumbo usado para clarificar o caldo	80
Figura 24 – Teor de umidade no solo ao longo de vinte dias de avaliação, durante o primeiro período de inundação das parcelas.....	86
Figura 25 – Teor de umidade no solo ao longo de vinte dias de avaliação, durante o segundo período de inundação das parcelas.....	86
Figura 26 – Rebaixamento progressivo do NF efetuado na profundidade de 30 cm em 3, 6, 9, 12 e 15 dias	87
Figura 27 – Teor de umidade no solo ao longo de vinte dias de avaliação, durante o terceiro período de inundação das parcelas.....	88
Figura 28 – Perfis das temperaturas médias monitoradas ao longo de 15 dias para o primeiro período de inundação das parcelas.....	89
Figura 29 – Perfis das temperaturas médias monitoradas ao longo de 15 dias para o segundo período de inundação das parcelas.....	90
Figura 30 – Perfis das temperaturas médias monitoradas ao longo de 15 dias para o terceiro período de inundação das parcelas.....	90
Figura 31 – Potencial médio de hidrogênio nas parcelas experimentais submetidas aos diferentes tratamentos	93
Figura 32 – Potencial médio de hidrogênio nas parcelas experimentais submetidas aos diferentes períodos de inundação ao longo do ciclo cultural da cana.....	94
Figura 33 – Potencial médio de hidrogênio ao longo dos sucessivos dias de avaliação.....	95
Figura 34 – Potencial médio de hidrogênio nas parcelas experimentais submetidas aos diferentes tratamentos (período x velocidade) ao longo dos dias de avaliação para os tratamentos P1V1, P1V2, P1V3, P1V4 e P1V5	96
Figura 35 – Potencial médio de hidrogênio nas parcelas experimentais submetidas aos diferentes tratamentos (período x velocidade) ao longo dos dias de avaliação para os tratamentos P2V1, P2V2, P2V3, P2V4 e P2V5	97

Figura 36 – Potencial médio de hidrogênio nas parcelas experimentais submetidas aos diferentes tratamentos (período x velocidade) ao longo dos dias de avaliação para os tratamentos P3V1, P3V2, P3V3, P3V4 e P3V5	98
Figura 37 – Potencial médio de hidrogênio nas parcelas experimentais nos diferentes de períodos encharcamento submetidas a diferentes velocidades de rebaixamento do NF ao longo dos dias de avaliação	99
Figura 38 – Potencial médio de oxiredução nas parcelas experimentais submetidas aos diferentes tratamentos	100
Figura 39 – Potencial médio de oxiredução nas parcelas experimentais submetidas aos diferentes períodos de inundação ao longo do ciclo cultural da cana-de-açúcar	101
Figura 40 – Potencial médio de oxiredução nas parcelas experimentais submetidas às diferentes velocidades de rebaixamento do NF.....	102
Figura 41 – Potencial médio de oxiredução ao longo dos sucessivos dias de avaliação.....	103
Figura 42 – Potencial médio de oxiredução nas parcelas experimentais submetidas aos diferentes tratamentos (período x velocidade) ao longo dos dias de avaliação para os tratamentos P1V1, P1V2, P1V3, P1V4 e P1V5	104
Figura 43 – Potencial médio de oxiredução nas parcelas experimentais submetidas aos diferentes tratamentos (período x velocidade) ao longo dos dias de avaliação para os tratamentos P2V1, P2V2, P2V3, P2V4 e P2V5	105
Figura 44 – Potencial médio de oxiredução nas parcelas experimentais submetidas aos diferentes tratamentos (período x velocidade) ao longo dos dias de avaliação para os tratamentos P3V1, P3V2, P3V3, P3V4 e P3V5	106
Figura 45 – Potencial médio de oxiredução nas parcelas experimentais nos diferentes de períodos encharcamento submetidas a diferentes velocidades de rebaixamento do NF ao longo dos dias de avaliação	107
Figura 46 – Teor médio de oxigênio dissolvido nos poços de observação das parcelas experimentais submetidas aos diferentes tratamentos	109
Figura 47 – Teor médio de oxigênio dissolvido nos poços de observação nas parcelas experimentais submetidas aos diferentes períodos de inundação ao longo do ciclo cultural da cana.....	110

Figura 48 – Teor médio de oxigênio dissolvido nos poços de observação nas parcelas experimentais ao longo dos sucessivos dias de avaliação.....	111
Figura 49 – Teor médio de oxigênio dissolvido nos poços de observação nas parcelas experimentais submetidas aos diferentes tratamentos (período x velocidade) ao longo dos dias de avaliação para os tratamentos P1V1, P1V2, P1V3, P1V4 e P1V5	112
Figura 50 – Teor médio de oxigênio dissolvido nos poços de observação nas parcelas experimentais submetidas aos diferentes tratamentos (período x velocidade) ao longo dos dias de avaliação para os tratamentos P2V1, P2V2, P2V3, P2V4 e P2V5	114
Figura 51 – Teor médio de oxigênio dissolvido nos poços de observação nas parcelas experimentais submetidas aos diferentes tratamentos (período x velocidade) ao longo dos dias de avaliação para os tratamentos P3V1, P3V2, P3V3, P3V4 e P3V5	115
Figura 52 – Teor médio de oxigênio dissolvido nos poços de observação nas parcelas experimentais nos diferentes de períodos encharcamento submetidas a diferentes velocidades de rebaixamento do NF ao longo dos dias de avaliação	116
Figura 53 – Valores médios de radiação PAR para as diferentes seções.....	118
Figura 54 – Valores médios de radiação PAR em posições verticais ao longo do dossel	119
Figura 55 – Valores médios de radiação PAR para os diferentes horários.....	120
Figura 56 – Valores médios de radiação PAR para os diferentes dias	121
Figura 57 – Valores médios de radiação PAR para tratamentos nos diferentes horários	122
Figura 58 – Valores médios de radiação PAR para seções nos diferentes dias	123
Figura 59 – Valores médios de radiação PAR para seções nas diferentes posições.....	124
Figura 60 – Potenciais médios de água nas folhas cana-de-açúcar submetidos à irrigação e ao encharcamento	129
Figura 61 – Potenciais médios de água nas folhas da cana-de-açúcar nas parcelas irrigadas e nas que sofreram as velocidades de rebaixamento do NF.....	130
Figura 62 – Potencial médio de água nas folhas da cana-de-açúcar nos dois períodos de avaliação ao longo do ciclo cultural.....	131

Figura 63 – Potencial médio de água nas folhas da cana-de-açúcar nos dois horários de avaliação ao longo dos quinze dias que as plantas estiveram submetidas aos tratamentos.....	132
Figura 64 – Potencial médio de água nas folhas da cana-de-açúcar nos cinco dias de avaliação ao longo dos quinze dias que as plantas estiveram submetidas aos tratamentos	133
Figura 65 – Potencial médio de água nas folhas da cana-de-açúcar nos dois períodos de avaliação ao longo do ciclo da cultura.....	134
Figura 66 – Potencial médio de água nas folhas da cana-de-açúcar nos dois períodos de avaliação nos cinco dias de leituras ao longo dos quinze dias que as plantas estiveram sobre inundação.....	135
Figura 67 – Potencial médio de água nas folhas da cana-de-açúcar nos dois horários de avaliação nos cinco dias de leituras ao longo dos quinze dias que as plantas estiveram sobre inundação.....	136
Figura 68 – Teor médio de magnésio nas folhas da cana-de-açúcar para os diferentes tratamentos, sobre encharcamento e sob irrigação.....	142
Figura 69 – Teor médio de manganês nas folhas da cana-de-açúcar para os diferentes tratamentos, sobre encharcamento e sob irrigação.....	143
Figura 70 – Teor médio de cálcio nas folhas da cana-de-açúcar para os diferentes períodos de encharcamento e quando submetidas somente à irrigação (T).....	144
Figura 71 – Teor médio de magnésio nas folhas da cana-de-açúcar para os diferentes períodos de encharcamento e quando submetidas somente à irrigação (T).....	145
Figura 72 – Teor médio de manganês nas folhas da cana-de-açúcar para os diferentes períodos de encharcamento e quando submetidas somente à irrigação (T).....	145
Figura 73 – Teor médio de zinco nas folhas da cana-de-açúcar para os diferentes períodos de encharcamento e quando submetidas somente à irrigação (T).....	146
Figura 74 – Temperatura diárias para os meses de janeiro e meados de fevereiro	150
Figura 75 – Altura média dos colmos da cana-de-açúcar em oito períodos de avaliações	151
Figura 76 – Altura média final dos colmos da cana-de-açúcar submetidos aos diferentes tratamentos	151
Figura 77 – Incremento de crescimento médio dos colmos da cana-de-açúcar nas parcelas em seis períodos de avaliação	153

Figura 78 – Número médio de folhas nos colmos da cana-de-açúcar em oito períodos de avaliação	154
Figura 79 – Número médio de folhas nos colmos da cana-de-açúcar submetidos aos diferentes tratamentos	155
Figura 80 – Diâmetros médio dos colmos da cana-de-açúcar em sete períodos de avaliação.....	156
Figura 81 – Número de perfilhos nas parcelas em nove períodos de avaliação	157
Figura 82 – Área foliar nas parcelas em sete períodos de avaliação.....	160
Figura 83 – Área foliar média dos tratamentos.....	161
Figura 84 – Índice de área foliar nas parcelas em sete períodos de avaliação	162
Figura 85 – Índice de área foliar médio dos tratamentos	163
Figura 86 – Massa verde média dos colmos obtidos nas parcelas considerando a interação velocidade*período	165
Figura 87 – Massa seca média dos colmos obtidos nas parcelas considerando a interação velocidade*período	166
Figura 88 – a) Massa verde média dos ponteiros obtidos nas parcelas considerando os períodos; b) Massa verde média dos ponteiros obtidos nas parcelas considerando os diferentes tratamentos	168
Figura 89 – a) Massa seca média dos ponteiros obtidos nas parcelas considerando os períodos; b) Massa seca média dos ponteiros obtidos nas parcelas considerando os diferentes tratamentos	169
Figura 90 – Massa verde total média obtida nas parcelas considerando a interação velocidade*período	170
Figura 91 – Massa seca total média obtida nas parcelas considerando a interação velocidade*período	172
Figura 92 – Razão de área foliar obtida nas parcelas considerando os períodos	175
Figura 93 – Taxa de crescimento relativo obtido nas parcelas considerando os períodos.....	176
Figura 94 – Área foliar específica obtida nas parcelas considerando os períodos.....	177
Figura 95 – Valores médios de Brix obtido em diferentes posições dos colmos.....	180
Figura 96 – Valores médios de Brix obtido em diferentes posições dos colmos considerando a interação velocidade*período	181

Figura 97 – Valores médios de Brix obtido em considerando o desenvolvimento dos colmos amostrados	181
Figura 98 – Valores médios de Brix obtido considerando os diferentes tratamentos	182
Figura 99 – Índice de maturação obtido nas parcelas considerando o desenvolvimento dos colmos amostrados	183
Figura 100 – Brix médio obtido nas parcelas considerando a interação velocidade*período.....	186
Figura 101 – Brix médio obtido nas parcelas considerando os diferentes tratamentos.....	187
Figura 102 – Pol médio obtido nas parcelas considerando a interação velocidade*período	188
Figura 103 – Pol médio obtido nas parcelas considerando os diferentes tratamentos	189
Figura 104 – Açúcar teórico recuperável obtido nas parcelas considerando a interação velocidade*período.....	190
Figura 105 – Açúcar teórico recuperável obtido nas parcelas considerando os diferentes tratamentos	191
Figura 106 – Fibra da cana obtida nas parcelas considerando os períodos	192

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Rebaixamento do nível freático (NF)	53
Tabela 2 – Resultado da análise granulométrica do solo utilizado no preenchimento dos lisímetros	55
Tabela 3 – Resultados da análise química do solo utilizado no preenchimento dos lisímetros	55
Tabela 4 – Resultado da análise química de micronutrientes no solo utilizado no preenchimento dos lisímetros	55
Tabela 5 – Resultados da análise química do solo 60 dias após o plantio ¹	56
Tabela 6 – Resultados da análise de micronutrientes do solo 60 DAP	56
Tabela 7 – Análise de variância para análise foliar (macronutrientes e micronutrientes) feita na cultivar de cana-de-açúcar RB 867515 sob encharcamento aos 315 DAP	60
Tabela 8 – Análise de variância para os parâmetros do solo pH, potencial de oxiredução, oxigênio dissolvido	61
Tabela 9 – Informações climatológicas do ambiente nos dias e horários que foram feitas as medidas de potencial de água na folha	64
Tabela 10 – Análise de variância para o potencial de água na folhas da cana-de-açúcar na cultivar de cana-de-açúcar SP803280	64
Tabela 11 – Análise de variância para o potencial de água na folhas da cana-de-açúcar	65
Tabela 12 – Análise de variância para radiação fotossinteticamente ativa (PAR) e radiação líquida (Rn)	68
Tabela 13 – Esquema da análise de variância utilizada para dados obtidos nas avaliações biométricas	69
Tabela 14 – Esquema da análise de variância utilizada para dados obtidos no experimento	73
Tabela 15 – Índice de maturação da cana-de-açúcar baseada em valores do Brix do ápice e da base do colmo	77
Tabela 16 – Resultados dos quadrados médios da análise de variância do potencial de hidrogênio (pH), potencial de oxiredução (mV) medidos nas parcelas submetidas ao encharcamento com o rebaixamento do NF a uma profundidade de 0,30 m em 3, 6, 9, 12 e 15 dias nos períodos de 67, 210 e 305 DAP	92

Tabela 17 – Resultados dos quadrados médios da análise de variância do oxigênio dissolvido (OD), medidos nas parcelas submetidas ao encharcamento com o rebaixamento do NF a uma profundidade de 0,30 m em 3, 6, 9, 12 e 15 dias nos períodos de 67, 210 e 305 DAP.....	108
Tabela 18 – Análise de variância para a radiação fotossinteticamente ativa (PAR) no interior da casa de vegetação.....	117
Tabela 19 – Resultado da análise de variância para potencial de água na folha (bar) na cultivar de cana-de-açúcar SP803280.....	125
Tabela 20 – Potencial de água na folha (bar) nos tratamentos folhas sem proteção (FSP), folhas protegidas (FP) e folhas com nervura (FN) na cultivar de cana-de-açúcar SP803280.....	126
Tabela 21 – Potencial de água na folha (bar) nos horários 10:00 e 14:00 horas na cultivar de cana-de-açúcar SP803280.....	126
Tabela 22 – Potencial médio de água na folha (bar) nos dias 1 (10/12/08) e 2 (11/12/08).....	126
Tabela 23 – Potencial médio de água na folha (bar) nos tratamentos folhas sem proteção (FSP), folhas protegidas (FP) e folhas com nervura (FN) nos dois horários 10:00 e 14:00 horas.....	127
Tabela 24 – Potencial médio de água na folha (bar) nos dois horários 10:00 e 14:00 horas para os dois dias de avaliações.....	127
Tabela 25 – Resultado da análise de variância para potencial de água na folha (bar) na cultivar de cana-de-açúcar RB 867515 sobre encharcamento entre 67 e 82 dias após o plantio.....	128
Tabela 26 – Teores médios dos macronutrientes nas folhas da cana-de-açúcar aos 315 dias após o plantio na qual as parcelas sofreram estresse por encharcamento.....	139
Tabela 27 – Teores médios dos micronutrientes nas folhas da cana-de-açúcar aos 315 dias após o plantio na qual as parcelas sofreram estresse por encharcamento.....	140
Tabela 28 – Resultado da análise de variância para análise foliar (macronutrientes) feita na cultivar de cana-de-açúcar RB 867515 sob encharcamento aos 315 DAP.....	141
Tabela 29 – Resultado da análise de variância para análise foliar (micronutrientes) feita na cultivar de cana-de-açúcar RB 867515 sob encharcamento aos 315 DAP.....	142

Tabela 30 – Resultados dos quadrados médios da análise de variância da altura média dos colmos e do número de folhas nos colmos nas parcelas com os tratamentos P1V1, P1V2, P1V3, P1V4, P1V5, P2V1, P2V2, P2V3, P2V4, P2V5, P3V1, P3V2, P3V3, P3V4, P3V5 ao longo do ciclo cultural da cana-de-açúcar	148
Tabela 31 – Resultados dos quadrados médios da análise de variância dos diâmetros dos colmos, área foliar e índice de área foliar e do número de folhas nos colmos nas parcelas com os tratamentos P1V1, P1V2, P1V3, P1V4, P1V5, P2V1, P2V2, P2V3, P2V4, P2V5, P3V1, P3V2, P3V3, P3V4, P3V5 ao longo do ciclo cultural da cana-de-açúcar.....	148
Tabela 32 – Resultados dos quadrados médios da análise de variância do incremento de crescimento, números de perfilhos nas parcelas com os tratamentos P1V1, P1V2, P1V3, P1V4, P1V5, P2V1, P2V2, P2V3, P2V4, P2V5, P3V1, P3V2, P3V3, P3V4, P3V5 ao longo do ciclo cultural da cana-de-açúcar	149
Tabela 33 – Área da folha da cana-de-açúcar cultivar RB 867515 medida no integrador foliar LICOR aos 67 dias após o plantio.....	158
Tabela 34 – Dimensões e área da folha da cana-de-açúcar cultivar RB 867515 aos 67 dias após o plantio	158
Tabela 35 – Área da folha da cana-de-açúcar cultivar RB 867515 medida no integrador foliar LICOR aos 215 dias após o plantio.....	159
Tabela 36 – Dimensões e área da folha da cana-de-açúcar cultivar RB 867515 aos 215 dias após o plantio	159
Tabela 37 – Resultados dos quadrados médios da análise de variância da massa verde dos colmos (MVC), massa seca dos colmos (MSC), massa verde dos ponteiros (MVP) e massa seca dos ponteiros (MSP) nas parcelas com os tratamentos P1V1, P1V2, P1V3, P1V4, P1V5, P2V1, P2V2, P2V3, P2V4, P2V5, P3V1, P3V2, P3V3, P3V4 e P3V5	164
Tabela 38 – Resultados dos quadrados médios da análise de variância da massa verde total (MVT), massa seca total (MST) e volume de colmos colhidos (VCC) nas parcelas com os tratamentos P1V1, P1V2, P1V3, P1V4, P1V5, P2V1, P2V2, P2V3, P2V4, P2V5, P3V1, P3V2, P3V3, P3V4 e P3V5.....	164
Tabela 39 – Resultados dos quadrados médios da análise de variância da taxa de crescimento absoluto (TCA), taxa de crescimento relativo (TCR), taxa de assimilação líquida	

(TAL) nas parcelas com os tratamentos P1V1, P1V2, P1V3, P1V4, P1V5, P2V1, P2V2, P2V3, P2V4, P2V5, P3V1, P3V2, P3V3, P3V4 e P3V5..... 173

Tabela 40 – Resultados dos quadrados médios da análise de variância da razão de área foliar (RAF), área foliar específica (AFE), taxa de crescimento da cultura (TCC) nas parcelas com os tratamentos P1V1, P1V2, P1V3, P1V4, P1V5, P2V1, P2V2, P2V3, P2V4, P2V5, P3V1, P3V2, P3V3, P3V4 e P3V5 174

Tabela 41 – Resultados dos quadrados médios da análise de variância do Brix em diferentes posições dos colmos, para determinação do índice de maturação, para os tratamentos P1V1, P1V2, P1V3, P1V4, P1V5, P2V1, P2V2, P2V3, P2V4, P2V5, P3V1, P3V2, P3V3, P3V4 e P3V5..... 179

Tabela 42 – Resultados dos quadrados médios da análise de variância do índice de maturação dos colmos nos tratamentos P1V1, P1V2, P1V3, P1V4, P1V5, P2V1, P2V2, P2V3, P2V4, P2V5, P3V1, P3V2, P3V3, P3V4 e P3V5 183

Tabela 43 – Resultados dos quadrados médios da análise de variância do Brix, Pol e açúcar redutor da cana (ARC) nas parcelas com os tratamentos P1V1, P1V2, P1V3, P1V4, P1V5, P2V1, P2V2, P2V3, P2V4, P2V5, P3V1, P3V2, P3V3, P3V4 e P3V5..... 184

Tabela 44 – Resultados dos quadrados médios da análise de variância da Fibra, açúcar teórico recuperável (ATR) e RAT nas parcelas com os tratamentos P1V1, P1V2, P1V3, P1V4, P1V5, P2V1, P2V2, P2V3, P2V4, P2V5, P3V1, P3V2, P3V3, P3V4 e P3V5 185

RESUMO

Sensibilidade da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) ao excesso de água no solo

Praticamente toda cana-de-açúcar produzida no Estado de São Paulo é cultivada em condições de sequeiro e o aproveitamento de novas áreas para a sua produção, nas quais haja necessidade de drenagem, torna-se importante. O dimensionamento de sistemas de drenagem agrícola baseado apenas na experiência prática do projetista tem levado a freqüentes insucessos. Para o dimensionamento racional, é necessário se conhecer a velocidade mínima de rebaixamento do lençol freático a ser proporcionado pelos drenos, o que depende da sensibilidade de cada cultura. Assim, este trabalho tem como objetivos determinar o efeito de diferentes velocidades de rebaixamento do NF, em diferentes estádios de desenvolvimento da cana-de-açúcar. O experimento foi conduzido em 64 lisímetros, em um delineamento experimental de blocos casualizados, arranjado em um fatorial de $(3 \times 5 + 1)$, sendo 3 estádios de desenvolvimento, 5 velocidades de rebaixamento do NF mais uma testemunha que não sofrerá estresse por excesso de umidade. Os resultados obtidos permitiram a obtenção de um critério de drenagem para o cálculo do espaçamento de drenos utilizando equações de movimento não permanente. A produtividade e seus componentes expressos em valores médios de massa verde de colmos, massa seca dos colmos, massa verde dos ponteiros, massa seca dos ponteiros, massa verde total e massa seca total não foram afetados pelas velocidades de rebaixamento de 0,30 m em 3, 6, 9, 12 e 15 dias. Entre os índices fisiológicos avaliados a condição de inundação das parcelas proporcionada pelas diferentes velocidades de rebaixamento do NF não interferiu nos valores médios da taxa de crescimento absoluto, taxa de assimilação líquida e na taxa de crescimento da cultura. Já a razão de área foliar, a taxa de crescimento relativo, e área foliar específica apresentaram diferenças significativas para os períodos. O valor médio de Brix obtidos nas plantas que sofreram estresse pelo encharcamento no período de 305 DAP sob uma velocidade rebaixamento de 0,30 m em 12 dias apresentou valor médio de 16,03 % de brix, inferior e significativamente diferente dos demais períodos e velocidades. As parcelas inundadas aos 67 dias após o plantio apresentaram valores de pH no solo superiores aos demais períodos 210 e 305. Os valores médios de potenciais de oxiredução aumentam a medida que reduz o teor de umidade do solo. Os valores médios de oxigênio dissolvido aumentaram ao longo dos períodos de avaliação. Ocorreu uma redução e estabilização nos valores médios das leituras com o decorrer dos dias de avaliação. Em experimentos onde se tem uma limitação de material é possível utilizar uma mesma folha da cana-de-açúcar para determinar o potencial de água na folha. No entanto há a necessidade de proteger o local da fração foliar destacada com um papel alumínio. Os valores médios de potencial de água na folhas não se apresentaram diferentes estatisticamente entre as parcelas submetidas à inundação, assim como, quando comparados as parcelas sob irrigação. A severidade dos cinco velocidades de rebaixamentos não refletiu nos teores dos macronutrientes na folhas das plantas.

Palavras-chave: Planícies alagadas; Encharcamento; Cultivar RB867515; Nível freático; Critério drenagem

ABSTRACT

Sugar cane sensitivity (*Saccharum spp.*) to soil water excess

Almost all sugar cane produced in the State of Sao Paulo is grown under rainfed conditions and the exploration of new cultivated areas, where there is a need for drainage, becomes important. The design of agricultural drainage systems based only on practical experience of the designer has led to frequent failures. For the rational sizing, it is necessary to know the minimum speed of lowering the water table to be provided by the drains, which depends on the sensitivity of each crop. Thus, this study aims to determine the effect of different speeds of lowering the water table, at different development stages of sugar cane. The experiment was conducted in 64 lysimeters in a randomized blocks design, arranged in a factorial of $(3 \times 5 + 1)$, of three development stages, five speed of lowering the water table and a control that did not suffer stress by excess moisture. The results enabled to obtain a criteria of drainage for calculating the spacing of drains using no permanent motion equations. The yield and its components expressed in average values of green mass of stalks, dry weight of stalks, green mass of top, top of dry mass, total mass green and total dry mass were not affected by lowering speeds of 0,30 m 3, 6, 9, 12 and 15 days, no differences between them and not the control. Among the evaluated physiological indexes the flood condition of the plots provided by the different speeds of lowering of the water table did not interfere in the average values of absolute growth rate, net assimilation rate and growth rate of the crop. Whereas the leaf area ratio, the relative growth rate and specific leaf area showed significant differences for the periods. The average value of Brix obtained in plants that have suffered stress by flooding in the period of 305 DAP under lowering a speed of 0,30 m in 12 days showed a mean value of 16,03% of Brix, and significantly different than the other periods and speeds. The plots flooded for 67 days after planting showed pH values in soil higher than other periods 210 and 305. The average values of potential oxidation increase with the reduction of the moisture content of soil. The average values of dissolved oxygen increased over the evaluation periods. And a reduction and stabilization in the average of the readings over the course of days evaluation. In experiments where there is a limitation of material one can use a single leaf sheet of sugar cane to determine the potential of water on the sheet. However there is a need to protect the site of the fraction leaf with an aluminum sheet. The average values of water potential in leaves did not show statistically different between plots subjected to flooding as well as, when compared to plots under irrigation. The severity of the five speeds, did not reflected in lower levels of macronutrients in the plant leaves.

Keywords: Flooded plains; Soil water logging; RB867515 Cultivar; Water table level; Drainage criteria

1 INTRODUÇÃO

No mundo, a cana-de-açúcar é cultivada predominantemente em áreas subtropicais, entre 15° e 30° de latitude, mas podendo se estender até 35° de latitude, tanto norte como sul, e em altitudes que variam desde o nível do mar até cerca de mil metros, sendo produzida comercialmente em mais de 79 países e territórios, em uma área de cerca de 12 milhões de hectares, sendo os maiores produtores, o Brasil, Cuba, Índia, México, China, Filipinas, Austrália, África do Sul, Estados Unidos da América (principalmente Havaí), República Dominicana e Formosa.

A previsão da produção brasileira de cana-de-açúcar na safra 2008/2009 é de 591.432 mil toneladas de colmos destinados às usinas de açúcar e álcool, com uma área colhida em 2008 de 7.619.169 hectares e o Brasil ocupando a primeira posição mundial em termos de produção de açúcar. No Estado de São Paulo em 2008 apresentava uma previsão de produção de colmos da ordem de 337.148 mil toneladas, representando 43 % da produção nacional. O Brasil é atualmente o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, destacando-se os Estados de São Paulo, Paraná, Minas Gerais, Goiás, Alagoas, Mato Grosso do Sul e Pernambuco (FNP, 2009).

Em sua publicação da Coordenadoria Regional-Sul, para caracterização da área canavieira, Barbieri e Villa Nova (1977), citavam que a cana-de-açúcar era cultivada em quase todos os 21 estados do Brasil, mas as grandes zonas canavieiras restringiam-se principalmente à área costeira, entre as latitudes 8° e 23° S. A temperatura média anual é de 20° C na região Centro – Sul e 26° C na região Norte – Nordeste. A precipitação média anual é de 1.250 a 1.750 mm no Centro – Sul, de 750 a 1.250 mm no Nordeste e de 1.750 a 2.500 mm no extremo norte.

Existem expressivas áreas produtivas do território nacional, potencialmente aptas para o cultivo da cana-de-açúcar, onde há problemas relacionados à deficiência natural de drenagem. Dentre estas áreas destacam-se as várzeas, as áreas localizadas à meia encosta, sujeitas à temporária interferência do lençol freático, as situadas em topografia desfavorável, sujeitas à acúmulo temporário de água proveniente do escoamento superficial, as com solos em recuperação, degradados pelo manejo excessivo, ou ainda áreas em terras altas cujos solos são de estruturas ou textura que conferem baixa capacidade de infiltração de água. Estes problemas podem ser corrigidos de forma economicamente viável, garantindo, concomitantemente, que os impactos decorrentes da nova forma de exploração sejam minimizados.

Para sanar a deficiência de drenagem natural, visando permitir o cultivo da cana de forma rentável e sustentável, sistemas de drenagem têm sido implantados em vários Estados do Brasil, como São Paulo, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, Goiás e Zona da Mata dos Estados do Nordeste, entre outros. Entretanto, estes sistemas vêm sendo projetados geralmente de forma empírica, tomando muito mais por base padrões baseados na experiência prática do projetista do que os critérios técnicos racionais. Como as causas do problema e conseqüentemente a necessidade de drenagem artificial variam bastante de uma área para outra, a adoção desse procedimento empírico padronizado tem levado a vários insucessos.

Uma das etapas relevantes no dimensionamento do sistema de drenagem se refere à definição do espaçamento a ser adotado entre os drenos. A adoção de um espaçamento correto é decisiva, não só para que o lençol freático seja rebaixado em tempo suficientemente curto para que a produtividade da cultura não seja comprometida, como também para se estimar a viabilidade econômica do sistema ao longo de sua vida útil.

A definição do espaçamento, quando baseada em um procedimento técnico, depende da obtenção de valores representativos das propriedades físico-hídricas e geométricas do perfil do solo, da escolha de uma equação de espaçamento adequada e da utilização de um critério de drenagem que seja comprovadamente válido para a cultura e região em questão. A variabilidade do solo freqüentemente dificulta a adoção de valores representativos para as propriedades físico-hídricas e geométricas do perfil do solo. Entretanto, este problema pode ser contornado com uma investigação de campo mais detalhada, ponderando-se sempre para o fato de que o custo das investigações não deve assumir valores excessivos.

As equações de espaçamento são fórmulas matemáticas deduzidas a partir dos fundamentos da teoria do movimento da água em direção aos drenos. Estas equações vêm sendo bastante testadas em condições de laboratório e de campo, de forma que a escolha da equação correta para uma certa condição hidrológica e de perfil de solo já está relativamente bem definida.

Desta forma, o fator mais limitante à obtenção de espaçamentos corretos entre os drenos concentra-se na falta de um critério de drenagem adequado à cultura. Trabalhos disponíveis na literatura têm demonstrado que a sensibilidade das culturas ao excesso de umidade do solo depende principalmente do clima da região e do estágio fenológico em que o encharcamento ocorre. Assim, é necessário se identificar o estágio mais restritivo e a velocidade média mínima de

rebaixamento do lençol capaz de não comprometer a produtividade significativamente, de forma que as equações de espaçamento possam ser aplicadas com segurança.

Assim sendo, o trabalho proposto tem os seguintes objetivos:

- 1- Quantificar a sensibilidade da cana-de-açúcar ao encharcamento do solo em diferentes estádios de desenvolvimento de um ciclo de cana planta;
- 2- Definir a velocidade média mínima de rebaixamento do lençol freático capaz de manter a produtividade e a qualidade do caldo;
- 3- Relacionar a condição de inundação do solo que ocasiona estresse às plantas aos parâmetros químicos e gasosos do solo;
- 4- Definir uma metodologia de coleta de material foliar para a determinação do potencial de água na folha da cana-de-açúcar e relacionar a condição de inundação aos valores de potencial de água na folhas da cana-de-açúcar;
- 5- Relacionar a condição de encharcamento à disponibilidade e toxidez dos nutrientes às plantas;

A partir dos objetivos propostos resultaram as seguintes hipóteses:

- 1- Ho: existe sensibilidade da planta de cana-de-açúcar ao encharcamento nos diferentes estádios da cultura;
- 2- Ho: existe uma velocidade média mínima de rebaixamento do NF capaz de manter a produtividade e a qualidade do caldo;
- 3- Ho: a condição de inundação altera os parâmetros químicos e gasosos do solo;
- 4- Ho: é possível utilizar uma única folha da cana-de-açúcar para determinar o potencial de água na folha em dois horários em um mesmo dia;
- 5- Ho: o excesso de água no solo é condicionante de um menor potencial de água na folha;
- 6- Ho: o solo com excesso de umidade indisponibiliza os nutrientes e ocasionam toxidez as plantas;

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Revisão bibliográfica

2.1.1 Característica da cultura

Segundo Magalhães (1987), a cana-de-açúcar é uma gramínea perene que perfilha abundantemente na sua fase inicial de desenvolvimento. Quando se estabelece como uma cultura, a competição intra-específica por luz (auto-sombreamento) induz uma inibição no perfilhamento e uma aceleração do crescimento do colmo principal. Este crescimento em altura continua até a ocorrência de temperaturas baixas, ou ainda devido ao florescimento. O crescimento da cana-de-açúcar é variável, dependendo da época de plantio, tipo de muda e condições ambientais, mas, sabe-se que há uma produção média de 2 a 4 entrenós por mês, com 10 a 15 cm de comprimento cada um (BACCHI, 1983). Em culturas comerciais, o florescimento é uma ocorrência indesejável.

2.1.1.1 Sistema radicular

A propagação da cana-de-açúcar normalmente é feita por meio de pedaços de colmos, conhecidos por toletes. Dos primórdios radiculares do tolete plantado, desenvolvem-se as primeiras raízes denominadas de raízes de fixação. Inicialmente, aproximadamente nos 30 primeiros dias, a planta sobrevive de reservas nutricionais contidas nos toletes e do material (água e sais minerais) absorvido pelas raízes dos perfilhos primários. O desenvolvimento do sistema radicular é lento inicialmente, aumenta a velocidade com o crescimento, e posteriormente declina. Com 2 a 3 meses de plantio, o sistema radicular já está bem desenvolvido e qualquer prática, nas entrelinhas, pode prejudicá-lo e, portanto, não é aconselhável. Aproximadamente 3 meses após o plantio, a cana-de-açúcar depende exclusivamente das raízes dos perfilhos e as raízes de fixação perdem sua função (ROCHECOUSTE, 1967). Nesse momento, praticamente todo o sistema radicular está distribuído nos primeiros 30 cm de solo.

Todos os perfilhos apresentam um sistema radicular próprio. Após o corte da cana-planta, o sistema radicular mantém-se em atividade por determinado tempo e posteriormente há substituição através dos sistemas radiculares do perfilhos da soqueira (BACCHI, 1985). Segundo Van DILLEWIJN (1952), as raízes das soqueiras são mais superficiais que as da cana-planta. Assim, quanto maior o número de cortes, mais superficial fica o sistema radicular das soqueiras. Na Figura 1 tem-se o esquema do sistema radicular inicial da cana-de-açúcar segundo Van DILLEWIJN (1952)

A curva de perfilhamento da cana-de-açúcar tem seu ponto máximo, em geral, entre quatro e seis meses em cana-planta. Quando os perfilhos maiores atingem em torno de 50 cm de altura do colarinho da folha +1, inicia-se a concorrência por luz, água e nutrientes dentro e entre plantas. A tendência é de estabilizar-se o número de perfilhos e mais tarde, com o crescimento dos colmos dominantes, o seu número decresce com a eliminação dos mais fracos, doentes e mal posicionados (TOKESHI, 1986).

O rápido crescimento inicial, responsável por um fechamento do dossel, é uma característica importante para a cultura. O ideal seria um rápido crescimento dos colmos, promovendo fechamento do dossel, com um baixo número de perfilhos por área; assim, a massa seca dos perfilhos formados seria maior, devido à diminuição da competição intra-específica (TERAUCHI et al., 1999 e TERAUCHI; MATSUOKA, 2000).

Figura 1 – Representação esquemática do sistema radicular inicial em cana-planta, mostrando o desenvolvimento das raízes do tolete a partir do nó (primárias) e o desenvolvimento das raízes (secundárias) a partir da base dos perfilhos (VAN DILLEWIJN, 1952)

Segundo Lee (1926), Inforzato e Alvarez (1957) e Rostron (1974), citados por Machado (1987), o crescimento e a distribuição das raízes da cana variam acentuadamente com a idade da planta. Deste modo, até o 6º mês, o crescimento das raízes é lento, aumentando rapidamente até o desenvolvimento máximo, ao redor dos 12º mês, podendo então diminuir com a idade. O

crescimento das raízes até o 6º é maior em profundidade, enquanto, entre o 6º e 12º é maior no sentido lateral.

Souza (1976), estudando a irrigação da cana-de-açúcar por sulcos de infiltração, em Araras-SP, conclui que, nos primeiros 60 cm de profundidade, se encontram 82% das raízes e 75% das raízes da cana não irrigada. Korndorfer; Primavessi e Deuber (1989), estudando a distribuição das raízes de 5 variedades, para cana-planta com 10,6 meses e cana soca com 4,5 meses de idade, num solo PVA álico, concluíram, para a cana-planta, que entre 89% e 92% das raízes se situaram nos primeiros 30 cm de profundidade. Para a cana soca, os resultados indicaram que entre 85% e 92% das raízes se localizaram no horizonte de 0 a 40 cm de profundidade.

2.1.1.2 Colmo

A composição aproximada da cana-de-açúcar é a seguinte: possui 84 a 90 % de caldo e 10 a 16 % de fibras (matéria insolúvel em água). O caldo por sua vez, é composto de água (75 a 82%) e 18 a 25% de sólidos solúveis (Brix), correspondendo em maior parte aos açúcares (principalmente sacarose, 14 a 24 %) e outros elementos (sais minerais, gorduras e ceras, substâncias pécnicas, gomas e mucilagens, materiais corantes, ácidos aminados, ácidos livres e substâncias nitrogenadas) (BERNARDES; AMARAL, 2001).

2.1.1.3 Folha

Van DILLEWIJN (1952) afirma que as folhas da cana-de-açúcar basicamente podem dividir-se em lâmina (ou limbo foliar), que é a parte superior, e a bainha, que é a parte inferior que envolve o colmo, cuja função básica é fixar a folha ao colmo. As folhas da cana-de-açúcar são alternas, opostas e fixas aos nós dos colmos, correspondendo uma folha a cada nó, de coloração verde característica, variando a tonalidade de acordo com a região da folha, sua idade e o cultivar.

As folhas da cana-de-açúcar podem ser ordenadas através do “sistema de Kuijper” (Figura 2) o qual pode auxiliar nos estudos de crescimento e de nutrição. Ordenadas, de cima para baixo, a folha de inserção mais alta, que se encontra desenrolada apresentando a primeira aurícula visível recebe a denominação de folha +1; e o nó, no qual essa folha está presa, também seria o nó +1. As folhas que estão abaixo dela seriam sucessivamente +2, +3, etc; o mesmo acontecendo com os nós respectivos. Já as folhas mais novas que a folha +1 receberiam a denominação de 0, -1, -2, etc., o mesmo acontecendo com os respectivos nós (VAN DILLEWIJN, 1952).

Figura 2 – Numeração das folhas pelo sistema de Kuijper (VAN DILLEWIJN, 1952)

2.1.1.4 Propagação

Normalmente, em cultivos comerciais, a cana-de-açúcar é propagada assexuadamente através dos pedaços de colmos, os toletes, com 2 a 3 gemas, os quais podem ser: “toletes de ponta” denominados “toletes sementes”, ou os toletes de colmos mais maduros. O colmo primário desenvolve-se de cada gema, e o mesmo se dá sucessivamente formando touceiras. A esse processo se denomina perfilhamento da cana-de-açúcar (VAN DILLEWIJN, 1952).

Em nossas condições, são plantadas de 6 a 12 gemas por metro linear de sulco, as quais vão originar, aproximadamente, 15 perfilhos (BACCHI, 1983). Após o corte da cana-planta, o sistema radicular antigo mantém-se ainda em atividade por algum tempo, quando tem início a sua substituição pelas raízes dos novos perfilhos da soqueira. Essa substituição é lenta e gradual, ocorrendo um período onde o sistema radicular antigo atua concomitantemente com o novo sistema em formação. As raízes das soqueiras normalmente são mais superficiais que as da cana-planta, pelo fato de que os perfilhos das soqueiras brotam mais próximos da superfície do que os da cana-planta. Pelo mesmo fato, quanto maior o número de cortes, mais superficial torna-se o sistema radicular das soqueiras (BACCHI, 1985; CASTRO, 2001).

A brotação das gemas pode ocorrer em um período de 5 a 6 dias, podendo chegar de 20 a 25 dias em condições ambientais adversas (CAMARGO, 1970). A emergência dos toletes depende do cultivar, do estado nutricional do tolete, teor de umidade no tolete, no solo e no ar, temperatura

e aeração do solo e do tratamento térmico dos toletes. Nickel (1975) observou, no Havaí, que a temperatura ideal para a emergência das gemas situa-se entre 34°C e 37°C, e que 21° C e 44° C são os limites para o processo.

A multiplicação da cana-de-açúcar, devido ao fenômeno da dominância apical, é normalmente feita através de toletes, que são pedaços de colmos contendo duas ou três gemas no estado latente, que encontrando condições favoráveis, passam ao estado ativo de crescimento e desenvolvimento, devido às mudanças das reservas nutritivas pela atividade (VAN DILLEWIJN, 1952). O processo de brotação das gemas nos toletes de cana-de-açúcar depende de fatores endógeno, enzimas e reguladores de crescimentos, e exógenos descritos, entre outros, por Van Dillewijn (1952), Humbert (1968) e Fauconnier e Bassereau (1975). O seccionamento dos colmos em toletes de 3 gemas é recomendado e de aplicação tradicional no Brasil, como também em todo o mundo canavieiro, fundamentado no efeito da dominância apical existente entre as gemas distribuídas ao longo do colmo da cana (GHELLER, 1995).

As canas tropicais grossas usualmente têm um sistema de perfilhamento simples, descrito como brotos primários, secundários, terciários e assim por diante (BARNES, 1964).

O clima no Estado de São Paulo permite o plantio da cana-de-açúcar num largo período do ano. Normalmente, são recomendadas duas épocas de plantio. Uma menos ampla, ao início da primavera, e outra, mais longa, no verão, quando principalmente as condições de temperatura e umidade são favoráveis à boa e rápida emergência dos colmos. É importante também considerar que, após a emergência dos colmos primários deve haver condições favoráveis a um máximo perfilhamento e a formação de touceiras vigorosas que vão fornecer quantidade maior de colmos por área e possivelmente permitindo maior número de cortes econômicos (ROCHA, 1984).

Barbieri e Villa Nova (1977), descrevem que o plantio da cana-de-açúcar na região Centro-Sul, é feito em duas épocas, conhecidas como “plantio de cana de ano” e “plantio de cana de ano e meio”. O plantio feito em outubro, permite a colheita da cana com aproximadamente 12 meses (Set.– Out. do ano seguinte) é conhecida como “cana de ano”. O plantio feito em Janeiro - Fevereiro, permite a colheita da cana com 18 meses (Set.–Out. do ano seguinte) e é conhecido como “cana de ano e meio”.

2.1.1.5 Crescimento

Castro (1999) descreve que a curva que caracteriza o crescimento da cana-de-açúcar de primeiro corte é simétrica para cana de ano, mostrando-se bimodal em cana de ano e meio. As

curvas de temperatura e pluviosidade que caracterizam a Região centro-sul, considerando o ciclo cultural da cana-de-açúcar, podem ser visualizadas na Figura 3.

Figura 3 – Ciclo da cana-de-açúcar e variações na temperatura e pluviosidade da região centro-sul do Brasil (CASTRO, 1999)

Segundo Machado (1987), o acúmulo de matéria seca apresenta a forma sigmóide (Figura 3), podendo ser dividido em três fases: I) fase inicial, na qual o crescimento é lento entre o plantio e 200 dias após o plantio (março-outubro); II) fase de rápido crescimento, entre 200 a 400 dias após o plantio, onde 70 a 80% de toda matéria seca é acumulada, e; III) fase final, em que o crescimento é novamente lento, entre 400 - 500 dias após o plantio, acumulando cerca de 10% da matéria seca total (maio-agosto).

A curva de crescimento da cana de primeiro corte pode ser mais simétrica se o ciclo for anual (cana-de-ano) ou bimodal, caso seja ciclo de mais de um ano (cana-de-ano e meio). A cana-de-ano (12 meses), plantada em setembro-outubro, tem seu desenvolvimento máximo de novembro a abril, diminuindo logo após, devido às condições climáticas adversas do período de inverno no Centro-Sul, podendo essa colheita ocorrer a partir de julho, isto em função do cultivar. Considerando-se esse grande período de desenvolvimento, pode-se constatar que para a cana-de-ano e a cana-soca, a fase de maior desenvolvimento, ocorre na primeira metade do grande período. Já para a cana-de-ano e meio, isto acontece na segunda metade do grande período. A

matéria seca (M.S.) total da parte aérea se acumula segundo uma curva sigmóide, obtida através da função logística, apresentada pela Equação 1 (RODRIGUES, 1995).

$$P = \frac{5389,5}{1 + e^{(5,6609 - 0,01874 t)}} \quad (1)$$

em que:

P – matéria seca total, g m⁻²;

t – número de dias após o plantio.

Para acúmulo de M.S. das folhas, MACHADO et al. (1982), estabeleceram a seguinte função logística expressa na Equação 2:

$$F = \frac{370}{1 + e^{(3,9615 - 0,02494 t)}} \quad (2)$$

em que:

F – massa seca total acumulada pelas folhas, g m⁻²;

t – número de dias após o plantio.

2.1.1.6 Temperatura

O crescimento torna-se estável em temperaturas abaixo de 25°C. Para valores abaixo de 20°C, o crescimento é praticamente nulo. Em termos de temperatura máxima, o crescimento seria lento acima de 35°C e nulo acima de 38°C. Logo, deduz-se que a faixa ótima de temperatura, para o crescimento dos colmos, estaria entre 25° e 35°C, não esquecendo de relacionar a temperatura com a radiação solar, principalmente, nos primeiros estádios de desenvolvimento da cultura. O prolongamento da fase juvenil, normal em condições de baixas temperaturas, ocorre em função da expansão relativa da razão de área foliar, em condições de períodos de recepção de alta radiação solar (RODRIGUES, 1995), porém para a maturação e colheita, se faz necessário a redução da temperatura para 10 a 20 °C; com isso, ocorre diminuição na taxa de crescimento e maior acúmulo de sacarose, produto mais nobre da cana e objetivo da indústria sucro-alcooleira (DOOREMBOS; KASSAM, 1979).

Um dos graves problemas da cultura canavieira na região Centro-Sul seria as geadas, tanto a “branca” como a “negra”. A “branca” ocorre quando o ponto de orvalho está abaixo de 0°C,

normalmente em condições de alta umidade relativa. Quando a temperatura cair abaixo de 0° C (acima do ponto de orvalho), ocorre a geada “negra”, nome devido ao surgimento de tecido vegetal escuro, sem a presença de gelo, após o período da geada. Dependendo das condições do tempo e da exposição, a geada negra pode ser mais prejudicial que a branca, possivelmente devido à liberação de energia, que ocorre quando a água passa do estado líquido para o sólido, retardando o abaixamento da temperatura. Solos úmidos diminuem o efeito das geadas por perderem menos calor, ocorrendo o contrário com os solos com baixos potenciais água. Dependendo do tempo de exposição, baixas temperaturas podem causar danos severos à cultura, como períodos longos de temperaturas ao redor de 0°C (RODRIGUES, 1995).

O perfilhamento também aumenta com o aumento da temperatura até o máximo ao redor de 30°C (CASAGRANDE, 1991). Segundo Inman-Bamber (2004), em temperaturas próximas aos 16 °C, ocorreria uma estabilização no número de perfilhos.

2.1.1.7 Radiação solar

A cana-de-açúcar é considerada, por excelência, uma “planta de sol”. A radiação solar afeta todos os estágios de desenvolvimento (ORTOLANI; MARGO, 1987).

Sendo a cana planta C4, altas eficiências fotossintéticas devem-se à altas intensidades luminosas. Com elevadas taxas de radiação, os colmos são mais grossos, mas mais curtos; as folhas mais longas e mais verdes e o perfilhamento mais intenso. Em condições de baixas irradiâncias os colmos são mais finos e longos, as folhas estreitas e amarelas. O fotoperíodo também é importante, afetando o comprimento do colmo. Em fotoperíodos de 10 a 14 horas o colmo aumenta, sofrendo redução, no entanto, em fotoperíodos longos, entre 16 e 18 horas (RODRIGUES, 1995).

A distribuição da intensidade estacional da energia solar sobre o globo constitui a causa principal de todos os fenômenos meteorológicos, pois intervém parcial ou totalmente na origem e no desenvolvimento dos demais fatores do meio. A radiação solar intervém diretamente sobre o crescimento e o desenvolvimento da planta 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. A radiação líquida disponível ao meio, resultante do

balanço energético, é a variável mais utilizada para estimativa da demanda hídrica (ORTOLANI; CAMARGO, 1987).

Segundo Lucchesi (2001), é observado que em luminosidade deficiente, os colmos são mais finos e longos; as folhas estreitas e amareladas; as plantas têm menor teor de matéria seca e o sistema radicular é escasso e apresenta raízes frágeis. Em plena luminosidade, os colmos são mais grossos e curtos; as folhas são mais longas e mais verdes; as plantas possuem maior teor de matéria seca; ocorre um maior perfilhamento e as raízes são mais abundantes e vigorosas.

Sendo uma planta com metabolismo C₄, responde melhor a intensidade luminosa mais alta. O ponto de saturação lumínico é muito mais elevado, e pode variar dependendo do cultivar, segundo Nickell (1975).

Christoffoleti (1986) relata que plantas que foram deixadas em casa-de-vegetação, com baixa luminosidade, apresentaram perfilhos mortos, o que não ocorreu quando a mesma cultivar foi plantada em ambiente com luminosidade maior.

O perfilhamento varia de espécie para espécie e entre variedades, embora dentro das mesmas existam diferenças, em função de diversos fatores como a luminosidade, temperatura, nutrientes, umidade de solo, espaçamento, entre outros. O aumento no número de perfilhos depois do mês de julho pode ser explicado pelo fato das condições ambientais serem mais favoráveis principalmente, os efeitos da radiação solar e da temperatura. Nos meses de agosto a outubro são encontrados valores mais altos, com destaque para o mês de outubro, resultado da combinação entre temperatura alta, radiação solar e umidade. Depois deste pico, inicia a redução no número de perfilhos por touceira, até chegarem os meses do inverno. Neste período, a queda populacional é menor, pois a população está estabilizada, priorizando o acúmulo de sacarose. Com alta luminosidade o fluxo de auxina diminui e observa-se então decréscimo no grau de inibição das gemas laterais, o que resulta numa maior formação de perfilhos (CASAGRANDE, 1991).

2.1.2 Potencial de água na folha

O potencial da água na folha indutor do fechamento estomático diferencia-se de espécie para espécie. O controle estomático da condutância foliar é um mecanismo através do qual as plantas reduzem em suas perdas de água e na maioria das vezes indica uma condição de déficit hídrico (Mc DERMIT, 1990). O fechamento estomático pode ocorrer dentro de uma larga faixa de potencial de água na folha, dependendo da espécie. Em plantas sem restrição hídrica, a condutância estomática pode aumentar com a diminuição do potencial da água na folha, resultante

de uma maior taxa de transpiração à medida que a abertura estomática aumenta (JONES, 1992). Estudos realizados em condições controladas e em condições de campo, sugerem que o ácido abscísico (ABA) produzido na raiz pode desempenhar papel importante no controle da condutância estomática e que a resposta dos estômatos ao ABA depende do estado hídrico da planta (DAVIES; ZANG, 1991; TARDIEU; DAVIES, 1992).

O limiar de fração de água disponível para a planta, quantidade de água existente no solo a partir da qual a condutância diminui comparada com um valor de referência (fração de água disponível igual a um), varia para diferentes espécies. Além disso, o limiar de fração de água disponível para as plantas é maior para o potencial da água na folha e expansão foliar do que para a condutância estomática e trocas gasosas, e há variação intra-específica dependendo das condições experimentais como o tipo de solo e demanda evaporativa principalmente (SADRAS; MILROY, 1996).

2.1.3 Planícies alagadas e solos hidromórficos

Em geral, os solos de várzeas podem estar aptos ao cultivo de culturas como alface, alho, amendoim, aveia, batata, berinjela, cebola, ervilha, feijão, melancia, melão, milho, pimentão, tomate, trigo, soja e sorgo. No entanto, muitas destas culturas não estão adaptadas a ambientes suscetíveis a variações extremas de falta ou de excesso de água. Neste caso, a drenagem deficiente dos solos hidromórficos torna-se um impedimento natural ao desenvolvimento das culturas mesófitas (SÁ, 2001).

As várzeas ou planícies de inundação constituem terrenos baixos e relativamente planos, localizados nas margens dos rios, ribeirões, lagos, pântanos, sendo áreas propensas a inundações periódicas, em períodos de chuvas, devido ao nível freático (NF) pouco profundo, limitando dessa forma a exploração agrônômica natural só a períodos não chuvosos do ano, ainda com algum risco devido a probabilidade de que ocorram enchentes extemporâneas em períodos de seca (CURI; RESENDE; SANTANA, 1988).

Segundo Klamt; Kampf e Schneider (1985) e Curi; Resende e Santana (1988) os solos tipo Glei Húmico, Glei pouco Húmico, Orgânicos e Aluviais são denominados hidromórficos tendo em suas origens sedimentos provenientes de fontes diversas. Com isso ocorre uma variabilidade vertical e horizontal dentro dos perfis, estando os mesmos predispostos ao encharcamento e ao secamento rápido, em função da flutuação do lençol freático. Um manejo técnico é exigido nessas

áreas para que não ocorra uma drenagem excessiva, com posterior aumento dos custos na implantação práticas que visem corrigir esta situação, assim como a minimização das alterações do meio.

Nos solos hidromórficos, freqüentemente ocorrem inundações temporárias ou contínuas, ocasionadas principalmente pelo excesso de precipitação e pela drenagem natural deficiente. Nestas condições, o excesso de umidade interfere na aeração do solo, diminuindo a disponibilidade de oxigênio para a planta (SÁ, 2001).

Nos solos inundados, a redução de O_2 no solo, afeta o crescimento da parte aérea e das raízes da planta, provoca o escurecimento e a morte dos ápices radiculares e alterações nas organelas celulares, reduzindo a absorção de água e nutrientes pelas raízes (KAWASE, 1981; PATWARDHAN; NIEBER; MOORE, 1988; RODRIGUES; RODRIGUES; REIS, 1993).

Em solos hidromórficos, a drenagem é imprescindível para que o cultivo de espécies sensíveis seja realizado, permitindo que se promova a remoção do excesso de água acumulada na superfície e no perfil do solo, de forma a aumentar a taxa de difusão de oxigênio. A taxa de difusão de oxigênio e o potencial redox chegam a valores de menos de $20 \times 10^{-8} \text{ g cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ e 600 mV, respectivamente, indicando a restrição de oxigênio para as raízes da planta em um solo encharcado, após 24 h (MUKHTAR; BAKER; KANWAR, 1996); no entanto, ainda são necessárias maiores informações sobre as culturas para que se tenha o correto dimensionamento dos sistemas de drenagem, destacando-se o conhecimento da velocidade de rebaixamento do nível freático (NF) que o sistema deve ser capaz de proporcionar para que não ocorra o comprometimento da produtividade (SCOTT et al., 1989; SÁ; CRUCIANI; DUARTE, 2002).

2.1.4 Critérios de drenagem

O dimensionamento do sistema de drenagem deve permitir efetuar-se a retirada do excesso de água dentro dos limites de tolerância de cada cultura, para não acarretar injúrias ao desenvolvimento da mesma. Para isto, os critérios de drenagem utilizam dois parâmetros básicos, que são a altura do lençol freático e o tempo que o rebaixamento do lençol freático deve levar para atingir a profundidade preestabelecida. A remoção do excesso de água acumulada na superfície e no perfil do solo por intermédio da implantação de um sistema de drenagem adequado é um meio eficiente e necessário para promover a adaptação e o desenvolvimento das plantas (SÁ, 2001).

Esta concepção é apropriada para regiões úmidas, onde se deve eliminar a água proveniente do escoamento superficial e realizar o controle da posição do lençol freático em relação à

superfície do solo. No caso de regiões áridas e semi-áridas, o propósito é o de controlar a salinidade do solo, mantendo-a a níveis que sejam toleráveis pelos cultivos. A intenção final da drenagem agrícola é a de manter as propriedades físicas e químicas do solo para propiciar um ambiente favorável ao desenvolvimento das culturas (WILLIAMSOM, 1970).

Para projetar um sistema de drenagem deve-se ter em conta a origem do encharcamento, as condições geológicas e topográficas do solo, as necessidades das plantas e as características especiais do agroecossistema (SCHWAB et al. 1977). Uma das razões de maior importância pelo quais os sistemas de drenagem muitas vezes não são utilizados, principalmente em solos rasos e de permeabilidade reduzida, é o custo de implantação que pode tornar-se elevado (CARTER et al. 1984).

Os critérios de drenagem podem ser estabelecidos para condições de regime permanente ou não permanente. No primeiro caso, é preciso se definir a profundidade ideal em que o lençol freático ficará estabilizado e para qual magnitude de recarga hidrológica. Este critério é geralmente utilizado em regiões de clima temperado onde a recarga se dá devido ao degelo da neve precipitada durante o inverno ou em situações onde as chuvas sejam bem distribuídas e de baixa intensidade. No segundo caso, os critérios de drenagem se aplicam a problemas de lençóis freáticos originados da percolação proveniente de precipitações intensas ou de irrigações e envolvem dois parâmetros básicos, além da magnitude da recarga, que são a profundidade de rebaixamento do lençol freático e o tempo que o lençol freático gasta para atingir a profundidade pré-estabelecida. Essa velocidade de descida do lençol freático vai depender das características hidrodinâmicas do solo e do sistema de drenagem implantado (FERREIRA, 1987).

Segundo Pizarro (1978), para se determinar o espaçamento ótimo dos drenos de uma obra de drenagem, deve-se optar pelo critério econômico que dá uma maior relação custo/benefício e não pelo critério técnico-fisiológico, que geralmente objetiva evitar qualquer decréscimo na produção da cultura.

Uma vez que os sistemas de drenagem sejam planejados e executados adequadamente (com o conhecimento da variável sensibilidade da planta ao encharcamento), pode-se obter um grau de controle do lençol freático suficiente para a habilitação de solos que antes permaneciam inundados o ano todo, permitindo a prática da agricultura ou pecuária, além de assegurar a produção nos terrenos alagados parcialmente, com uma melhor relação benefício/custo (SILVA, 1982).

2.1.5 Estresse por excesso de umidade

Segundo Russell (1959) e Letey; Stolzy e Blank (1962), a tolerância e conseqüentemente a extensão dos danos causados pelas inundações depende da espécie cultivada, do estágio de desenvolvimento da cultura, da duração do fenômeno, da temperatura predominante no momento da inundação e dos organismos formados durante o processo. Schaffer; Andersen e Pletz (1992) afirmam que a fertilidade, a porosidade, o tipo de solo e o manejo da água ao longo do desenvolvimento da cultura, são fatores que, também devem ser considerados.

A transferência interna do O_2 das folhas para as raízes não se dá em proporções suficientes para suprir as necessidades de O_2 nos tecidos das raízes na maioria das plantas, com exceção daquelas adaptadas, como o arroz. Para um crescimento adequado, as raízes requerem um grau de aeração, de tal modo que o intercâmbio gasoso entre a atmosfera e o solo se dê em níveis suficientes para não permitir deficiências de O_2 , ou excesso de CO_2 (REICHARDT, 1985).

Segundo Coelho et al. (1988), o solo é um meio poroso na qual a fase sólida (minerais e matéria orgânica), líquida e gasosa fornecem à planta oxigênio e nutrientes determinantes para seu desenvolvimento. Para que ocorra a validação da interação desses componentes em benefício das culturas, os teores de água e oxigênio devem estar em proporções que favoreçam um ambiente ótimo para o crescimento vegetal.

Cruciani (1981a) afirma que em solo saturado, a respiração das raízes das plantas fica significativamente comprometida em função da redução ou completa falta de oxigênio. A respiração é uma das mais importantes e necessárias atividades no funcionamento metabólico dos vegetais e sua redução constitui o fator mais determinante na diminuição do desenvolvimento das culturas. Na respiração dos vegetais, em sua normalidade, o ar é difundindo do solo até as raízes; esse processo é drasticamente reduzido em situação de encharcamento. Segundo Beltrán (1986), o encharcamento é um aspecto físico do solo ocasionado por excesso de precipitações ou irrigações, ascensão capilar a partir do nível freático (NF), inundações e presença de camadas superficiais compactadas devido a reduzida permeabilidade dos solos.

A falta de oxigenação no solo causa distúrbios funcionais em toda a planta, especialmente na absorção de nutrientes (GLINSKI; STEPNIEWSKI, 1986). Segundo Kozłowski (1984), a resposta comum ao encharcamento é a inibição da expansão foliar, resultando em redução no tamanho e número de folhas, relacionando-se também ao aumento da abscisão foliar.

Kozlowski (1976) é incisivo em afirmar que a quantidade de O_2 torna-se insuficiente devido ao excesso de água; a intensidade do processo de óxido-redução e a respiração abaixam e ocorre redução do nível de energia nas células radiculares. Ocorre também a diminuição da absorção de substâncias nutritivas. A capacidade de retenção de água pelas raízes aumenta, quando os meios de desidratação aplicados são insuficientes, e esta capacidade declina levemente, ao serem utilizados meios severos de desidratação, devido a redução da energia nas células das raízes e da movimentação e estrutura da água intercelular.

Segundo Meyer (1960), a deterioração do ar e das composições gasosas do solo, assim como a redução do estoque e a disponibilidade de substâncias nutritivas, com o excesso de água, tornam-se adversas. A deterioração da composição gasosa do solo é caracterizada pela redução do oxigênio formando compostos reduzidos contendo ferro e manganês. Como o aumento das concentrações de CO_2 a dinâmica do cálcio se altera. O equilíbrio entre os hidróxidos, carbonatos e bicarbonatos de cálcio é mantido pelo ácido carbônico no solo. Ocorre diminuição na quantidade de microorganismos aeróbicos responsáveis pela oxidação do material orgânico. A consequência é que a desintegração das substâncias orgânicas, ao invés dos produtos finais da respiração aeróbica (CO_2 , nitratos, fosfatos, cálcio, magnésio, potássio, compostos de metano, hidrogênio, sulfeto, amônia, aldeídos e formas mais reduzidas de compostos de ferro) ocorre a formação de nitritos, ácido carboxílico e etileno.

No entanto o aumento da concentração de substâncias tóxicas como dióxido de carbono, etileno, ferro reduzido, metano, sulfetos e outros compostos no solo não devem ser atribuídos a deficiência de O_2 , mas ao acúmulo de água no solo, que impede a liberação desses gases para a atmosfera (BENICASA, 1984).

A sensibilidade das culturas ao excesso de umidade é dependente do clima e do estágio fenológico em que a inundação acontece. No que diz respeito ao segundo aspecto, experimentos realizados no Brasil com as culturas do trigo, feijão, pimentão e milho, revelaram que a floração é o estágio em que o encharcamento causa maior redução de produtividade e que, no estágio final do ciclo, o efeito adverso do encharcamento diminui (CRUCIANI, 1981b; SILVA, 1982; CRUCIANI; MINAMI, 1982; CRUCIANI, 1985).

De acordo com Lange (1953) e Nobel (1974) a concentração de etileno aumenta, fortalecida pela inundação. Em condições anaeróbicas, após 7 dias, a concentração de etileno varia de 9,3 a 10,6 $mg\ kg^{-1}$ enquanto em condições aeróbicas, à profundidade do solo de 15 cm, esta

concentração é de $0,07 \text{ mg kg}^{-1}$ e a uma profundidade do solo de 60 cm, de $0,14 \text{ mg kg}^{-1}$. A crescente concentração de etileno causa afinamento das hastes, senescência epinástica e queda das folhas.

O aumento da concentração de etileno no solo pode induzir em certas espécies de plantas sob encharcamento o crescimento de raízes adventícias, produção de aerênquima, hipertrofia dos caules e epinastia foliar. Nas leguminosas, a atividade da nitrogenase é afetada pelo aumento da taxa de produção do etileno em condições de anoxia, podendo ser um importante fator na determinação da sensibilidade dessas espécies à inundação (BRADFORD; YANG, 1981; KAWASE, 1981; SMITH, 1984 e VOESENEK et al. 1992). Além disso, a fixação de nitrogênio também é reduzida pela menor disponibilidade de oxigênio, pois o rizóbio, que está localizado no interior dos nódulos é um microorganismo aeróbio (SÁ, 2001).

Em pesquisas desenvolvidas em casas de vegetação sobre a sensibilidade das plantas ao alagamento, verifica-se que as medidas necessárias para o estabelecimento de um critério útil para projetos de drenagem, constituem as informações sobre a variação da concentração de oxigênio no solo e sobre o movimento de água na zona radicular (SCHILFGAARDE; WILLIAMSON, 1965). Outro aspecto é a reduzida condutividade hidráulica desses solos, o que provoca acúmulo prolongado de água nas camadas mais superficiais. Desse modo, a água ocupa os espaços porosos do oxigênio, e a falta de O_2 prejudica a ação da estimulação enzimática formadora do etileno, comprometendo o melhor efeito de maturadores da cana-de-açúcar (PRADO, 2005).

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 Localização e caracterização da área experimental

O experimento foi conduzido no período de 03/10/07 a 03/10/08 no Departamento de Engenharia Rural da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - USP, no município de Piracicaba-SP, situado nas coordenadas geográficas de 22⁰ 42’ de latitude sul e 47⁰ 38’ de longitude oeste, a uma altitude de 540 m.

Segundo a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo C_{Wa}, isto é, tropical úmido, com 3 meses mais secos (junho, julho e agosto), ocorrendo chuvas de verão e secas de inverno, apresentando temperatura média do mês mais quente superior a 22 °C e do mês mais frio inferior a 18 °C.

2.2.2 Descrição da estrutura experimental

O experimento foi conduzido em uma estufa plástica visando o melhor controle da umidade do solo, o que seria prejudicado com um experimento a campo. A estufa tem cobertura em arco, com 6,40 m de largura e 22,50 m de comprimento, paredes laterais e frontais confeccionadas com telas antiafídeas e rodapé de 0,20 m em concreto armado. A cobertura consiste de manta de polietileno de baixa densidade, transparente, com 0,10 mm de espessura, tratada contra a ação de raios ultravioletas. Os filmes de polietileno de baixa densidade, utilizados amplamente em estufas, apresentam transmissividade mínima de 65% e máxima de 90% para radiação solar (FARIAS et al. 1993; CAMACHO et al. 1995; BECKMANN et al. 2006). A estrutura experimental é provida de energia elétrica e de abastecimento de água de boa qualidade.

Em função das características do experimento, sendo a cana-de-açúcar plantada em tubulões com 1,20 m de altura acima do piso da estufa, e pelo fato da cultura ter um desenvolvimento expressivo, fez-se necessário ter um pé direito que permitisse o seu desenvolvimento sem limitação, e para isso construiu-se uma estufa com pé direito de 4,0 m, podendo ser visualizada na Figura 4.

Figura 4 – Estufa experimental

A cana-de-açúcar foi cultivada em 64 lisímetros, constituídos de tubulões de concreto impermeabilizados com 1,2 m de altura e 0,5 m de diâmetro, com área uma plantada de $0,20 \text{ m}^2$ e volume útil de 240 litros, instalados na área experimental; os recipientes foram posicionados em 4 linhas de 16 tubulões e cada um desses recipientes representou uma parcela experimental.

A alimentação de água para os lisímetros foi realizada por meio de dois reservatórios de cimento-amianto com capacidade de 1000 litros cada, providos de chave bóia e colocados sobre um tablado de madeira com 2,5 m de comprimento, 1,6 m de largura e 1,6 m de altura, localizado no interior da casa de vegetação, como mostra a Figura 5.

Figura 5 – Tablado de madeira com dois reservatórios de mil litros cada

2.2.3 Inundação dos lisímetros

Para a admissão de água e para a drenagem foram feitos orifícios, próximo à base dos lisímetros, onde foram inseridos tubos de PVC de 19 mm de diâmetro, e vedado com massa epóxi e veda calha. Os tubos tinham um comprimento de 0,60 m, com furos de 5 mm de diâmetro em seu perímetro espaçados entre si de 0,05 m. Para facilitar a drenagem e evitar o carreamento de solo, utilizou-se como materiais filtrantes manta sintética (bidim OP -20) e uma camada de 0,10 m de brita lavada.

Os tubulões possuíam uma entrada para água na parte inferior, entradas estas que foram conectadas aos reservatórios móveis auxiliares, que permitiam manter o NF no interior dos tubulões na profundidade desejada, conforme apresentado na Figura 6, representando esquematicamente um recipiente-parcela.

Figura 6 – Esquema de um lisímetro parcelar

A partir dos reservatórios suspensos, o abastecimento de água aos recipientes de concreto foi realizado por meio de uma rede subterrânea de tubos de PVC e de polietileno, 19,0 e 12,5 mm de diâmetro, respectivamente, enterrados a 20 cm de profundidade, localizados entre as linhas da bateria de recipientes. Cada lisímetro tinha uma tomada de água diretamente da rede principal (Figura 7a). Os tubos de PVC foram seccionados para a colocação das derivações onde foram acopladas a mangueiras de polietileno de 12,5 mm conectadas a pequenos reservatórios

retangulares, 0,30 x 0,27 x 0,40 m, confeccionados a partir de tambores de 30 litros, providos com chaves bóia (Figura 7b). A saída de água para os lisímetros foi controlada por um mini registro, (Figura 7c). Estes reservatórios foram utilizados para controlar e manter constante o NF no interior dos lisímetros, individualmente, durante a realização dos tratamentos. Para melhor visualização do NF no interior dos recipientes e facilitar a aplicação dos tratamentos foram instalados poços de observação confeccionados com tubo de PVC, 0,80 m, perfurado com orifícios de 4,0 mm de diâmetro e espaçados a cada 0,03 m, e envolvido com manta sintética (bidim OP-20), como pode ser visto nas Figura 7d e Figura 7e, conjuntamente com piezômetros, presente em todas as parcelas, utilizando mangueiras cristal de 7 mm de diâmetro apoiadas em sarrafos de madeira como apresentado na Figura 7f.

Figura 7 – a) Tomadas de água da rede de abastecimento; b) Reservatório com chave bóia; c) Mini registro; d) Poços de observação; e) Poço de observação envelopado; f) Piezômetro

2.2.3.1 Metodologia para o estabelecimento de diferentes velocidades de rebaixamento do NF

Para estudar o efeito causado pelas diferentes velocidades de rebaixamento do NF, nas plantas de cana-de-açúcar, foi adotada a metodologia anteriormente utilizada por Williamson e Schilfgaarde (1965), já empregada em várias pesquisas sobre o desenvolvimento das culturas a períodos de inundações do solo, em casa de vegetação ou em experimento de campo. A metodologia consiste basicamente na elevação do NF em um determinado estágio de desenvolvimento da cultura durante intervalos de tempo, seguido de um rebaixamento do NF. Neste trabalho, realizou-se o rebaixamento do NF em diferentes velocidades, após um período de completa inundação do sistema radicular das plantas. O momento da inundação foi determinado pelos estádios de desenvolvimento das culturas. A inundação no estágio vegetativo ocorreu aos 67 DAP (dias após o plantio), quando as plantas estavam num estágio inicial de desenvolvimento, e também aos 210 DAP, quando o desenvolvimento do sistema radicular ainda se encontrava em ritmo lento e aos 300 DAP, estágio em que a cana-de-açúcar tem um desenvolvimento acelerado do seu sistema radicular; no entanto é um estágio próximo a data de colheita, podendo o estresse influenciar no valor qualitativo da produção.

O efeito da inundação nas plantas foi estudado no estágio vegetativo da cultura e com o rebaixamento progressivo do NF efetuado na profundidade de 0,30 m em 3, 6, 9, 12 e 15 dias mantendo-se inicialmente uma lâmina de água acima da superfície de aproximadamente 2 cm por 12 horas, como é apresentado na Figura 8. Após esses intervalos o rebaixamento progressivo continuou até a drenagem total do lisímetro seguindo o cronograma apresentado na Tabela 1. De forma a obter valores oriundos de plantas não submetidas ao estresse utilizou-se um tratamento de controle que não foi inundado (Testemunha).

Figura 8 – Lisímetros inundados

Cada lisímetro foi inundado apenas uma vez, no momento em a planta atingiu o estágio fenológico estabelecido, exceto para o tratamento controle, que foi somente irrigado.

2.2.3.2 Cálculo das profundidades intermediárias do lençol freático

Para o cálculo das profundidades intermediárias do lençol freático, relativas aos diferentes tratamentos durante os rebaixamentos, foi utilizada a fórmula de Boussinesq e Glover (SCHILFGAARDE, 1974) representada pela equação 3.

$$S^2 = \frac{9 \cdot K \cdot t}{2 \cdot \alpha} \cdot \left(\frac{h_0 \cdot h_t}{h_0 - h_t} \right) \quad (3)$$

em que:

S – espaçamentos entre drenos, m ;

K – condutividade hidráulica do solo saturado, $m \cdot d^{-1}$;

t – tempo de rebaixamento, d ;

α – porosidade drenável, decimal ;

h_0 – distância inicial do lençol em relação ao plano que passa na linha dos drenos, m; e

h_t – distância final do lençol freático em relação ao plano que passa na linha dos drenos, m.

Desenvolvendo-se a equação 3, obtém-se:

$$\frac{S^2 \cdot 2 \cdot \alpha}{9 \cdot K} = \frac{t \cdot h_0 \cdot h_t}{(h_0 - h_t)} \quad (4)$$

Introduzindo uma variável auxiliar W , tem-se:

$$W = \frac{S^2 \cdot 2 \cdot \alpha}{9 \cdot K} \quad (5)$$

Substituindo-se (5) em (4), obtém-se a equação 6:

$$W = \frac{t \cdot h_0 \cdot h_t}{(h_0 - h_t)} \quad (6)$$

Explicitando-se o valor de h_t na equação 6, tem-se a equação 7:

$$h_t = \frac{W \cdot h_0}{(W + t \cdot h_0)} \quad (7)$$

Considerando $h_0 = 0,80$ m (distância do centro do tubo de drenagem à superfície do solo) e $h_t = 0,50$ m (distância do centro do tubo de drenagem ao plano localizado a uma profundidade de 30 cm abaixo da superfície do solo), para t igual a 3, 6, 9, 12 e 15 dias, obtém-se os valores de W igual a 2,33, 4,67, 7,00 e 9,33. A equação 7, aplicada com estes valores de W , foi utilizada para o cálculo das profundidades intermediárias do lençol freático, visando contabilizar o fato do rebaixamento do lençol não ser linear. Como resultados foram obtidas as profundidades apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Rebaixamento do nível freático (NF) (continua)

Período dias	Profundidades do LF (cm)				
	30 cm em 3 dias	30 cm em 6 dias	30 cm em 9 dias	30 cm em 12 dias	30 cm em 15 dias
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,5	6,7	3,4	2,3	1,8	1,4
1,0	12,5	6,7	4,5	3,4	2,8
1,5	17,6	9,7	6,7	5,1	4,1
2,0	22,2	12,5	8,7	6,7	5,4
2,5	26,3	15,2	10,6	8,2	6,7
3,0	30,0	17,6	12,5	9,7	7,9
3,5	33,3	20,0	14,3	11,1	9,1
4,0	36,4	22,2	16,0	12,5	10,3
4,5	39,1	24,3	17,6	13,8	11,4
5,0	41,7	26,3	19,2	15,2	12,5
5,5	44,0	28,2	20,8	16,4	13,6
6,0	46,2	30,0	22,2	17,6	14,6
6,5	48,1	31,7	23,6	18,8	15,7
7,0	50,0	33,3	25,0	20,0	16,7
7,5	51,7	34,9	26,3	21,1	17,6
8,0	53,3	36,4	27,6	22,2	18,6
8,5	54,8	37,8	28,8	23,3	19,5
9,0	56,3	39,1	30,0	24,3	20,5

Período dias	Profundidades do LF (cm)				
	30 cm em 3 dias	30 cm em 6 dias	30 cm em 9 dias	30 cm em 12 dias	30 cm em 15 dias
9,5	57,6	40,4	31,1	25,3	21,3
10,0	58,8	41,7	32,3	26,3	22,2
10,5	60,0	42,9	33,3	27,3	23,1
11,0	61,1	44,0	34,4	28,2	23,9
11,5	62,2	45,1	35,4	29,1	24,7
12,0	63,2	46,2	36,4	30,0	25,5
12,5	64,1	47,2	37,3	30,9	26,3
13,0	65,0	48,1	38,2	31,7	27,1
13,5	65,9	49,1	39,1	32,5	27,8
14,0	66,7	50,0	40,0	33,3	28,6
14,5	67,4	50,9	40,8	34,1	29,3
15,0	68,2	51,7	41,7	34,9	30,0
15,5	68,9	52,5	42,5	35,6	30,7
16,0	69,6	53,3	43,2	36,4	31,4
16,5	70,2	54,1	44,0	37,1	32,0
17,0	70,8	54,8	44,7	37,8	32,7
17,5	71,4	55,6	45,5	38,5	33,3
18,0	72,0	56,3	46,2	39,1	34,0
18,5	72,5	56,9	46,8	39,8	34,6
19,0	73,1	57,6	47,5	40,4	35,2
19,5	73,6	58,2	48,1	41,1	35,8
20,0	74,1	58,8	48,8	41,7	36,4
20,5	74,5	59,4	49,4	42,3	36,9
21,0	75,0	60,0	50,0	42,9	37,5
21,5	75,4	60,6	50,6	43,4	38,1
22,0	75,9	61,1	51,2	44,0	38,6
22,5	76,3	61,6	51,7	44,6	39,1
23,0	76,7	62,2	52,3	45,1	39,7
23,5	77,0	62,7	52,8	45,6	40,2
24,0	77,4	63,2	53,3	46,2	40,7
24,5	77,8	63,6	53,8	46,7	41,2
25,0	78,1	64,1	54,3	47,2	41,7
25,5	78,5	64,6	54,8	47,7	42,1
26,0	78,8	65,0	55,3	48,1	42,6
26,5	79,1	65,4	55,8	48,6	43,1
27,0	79,4	65,9	56,3	49,1	43,5
27,5	79,7	66,3	56,7	49,5	44,0
28,0	80,0	66,7	57,1	50,0	44,4
28,5	80,3	67,1	57,6	50,4	44,9
29,0	80,6	67,4	58,0	50,9	45,3
29,5	80,8	67,8	58,4	51,3	45,7
30,0	81,1	68,2	58,8	51,7	46,2
30,5	No fundo	No fundo	No fundo	No fundo	No fundo

2.2.4 Condução do experimento

2.2.4.1 Caracterização do solo

Para o preenchimento dos lisímetros, foi utilizado solo da Série “Sertãozinho” (Latossolo Vermelho Amarelo), de textura franco-arenosa, presente no campus da ESALQ, retirado do seu perfil natural, na profundidade de 0 a 0,50 m. Com coleta de amostras deformadas foram determinadas as características químicas (pH, bases trocáveis, alumínio e hidrogênio extraíveis, fósforo assimilável, carbono orgânico, CTC, soma de bases, saturação por bases e por alumínio) segundo Raij e Quaggio (1983) apresentadas nas Tabela 3 e Tabela 4 e físicas (granulometria); a análise granulométrica das amostras foi realizada pelo Método do Densímetro e apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultado da análise granulométrica do solo utilizado no preenchimento dos lisímetros

Amostra (m)	AREIA (%)	SILTE (%)	ARGILA (%)	Densidade Real
0 – 0,5	78	4	18	2,86

Tabela 3 – Resultados da análise química do solo utilizado no preenchimento dos lisímetros

Amostra	pH	M.O	P	S	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	T	V	m
(m)	CaCl ₂	g dm ⁻³	mg dm ⁻³										%
0 - 0,5	4,2	8	2	20	3,6	7	3	6	20	13,6	33,6	40	31

Tabela 4 – Resultado da análise química de micronutrientes no solo utilizado no preenchimento dos lisímetros

Amostra	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Si
(m)			mg dm ⁻³			mg kg ⁻¹
0 – 0,5	0,11	0,5	9	0,2	0,2	7,98

2.2.4.2 Acondicionamento do solo

O solo foi homogeneizado antes do preenchimento dos lisímetros. A calagem foi realizada, no momento em que os lisímetros eram preenchidos, utilizando-se calcário dolomítico na dosagem de 2 Mg ha⁻¹ (40 g por lisímetro), homogeneizado ao solo em camadas a partir dos 0,50 m debaixo para cima, corrigindo uma camada total de solo de 0,40 m, como pode ser visto na

Figura 9. Os resultados das análises químicas para as profundidades de 0 – 20 cm e 20 – 40 cm feitas 60 DAP estão apresentados nas Tabela 5 e Tabela 6.

Figura 9 – Correção do lisímetro com calcário

Após o preenchimento dos lisímetros elevou-se o NF até a superfície do solo de forma que este acomodasse e o calcário reagisse, ficando pronto para o plantio.

Tabela 5 – Resultados da análise química do solo 60 dias após o plantio¹

Amostra (m)	pH CaCl ₂	M.O g dm ⁻³	P mg dm ⁻³	S mg dm ⁻³	K	Ca	Mg	Al	H+Al mmolc dm ⁻³	SB	T	V %	m
0 – 0,2	6,4	11	14	1199	37	56	24	0	12	117	129	91	0
0,2 – 0,4	5,9	11	18	52	8,4	22	9	0	12	39,4	51,4	77	0

¹ Dados referentes a uma amostra composta, resultante de 5 pontos de amostragem

Tabela 6 – Resultados da análise de micronutrientes do solo 60 DAP

Amostra (m)	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	mg dm ⁻³				
0,0 – 0,2	0,19	0,5	8	2,1	1,8
0,2 – 0,4	0,19	0,4	12	1,9	1,0

2.2.4.3 Plantio e condução

Utilizou-se a cultivar de cana-de-açúcar RB867515. Em se tratando do atual cenário varietal para o Estado de São Paulo, segundo o Centro de Tecnologia Canavieira (2006), e levando em conta o percentual da área de plantio realizado em 2005 e o percentual de área de colhida nos últimos cinco cortes, observa-se um aumento anual de 3,12 % desta cultivar. Ela é recomendada para ambientes médio a inferiores, levando em consideração a textura do solo, a fertilidade do solo, a CTC do horizonte A, a retenção de cátions e o teor de água; com um perfil responsivo, com grande resposta a uma condição favorável de cultivo, mas que não se adapta a ambientes

mais restritos e estáveis, ou seja, responde a uma condição mais favorável de cultivo, mas também tem bom desempenho em condições desfavoráveis de produção; o plantio deve ser realizado no período de inverno-primavera.

O plantio foi feito no dia 03 de outubro de 2007, colocando um tolete de cana por parcela, a uma profundidade de 0,05 m, sendo que cada tolete possuía três gemas.

2.2.4.4 Adubação

A adubação química foi feita em função da demanda da cultura, parcelada em três vezes, para que houvesse seu pleno desenvolvimento vegetativo com uma produtividade esperada de 150 a 300 Mg ha⁻¹. Utilizaram-se as seguintes doses: 67 kg de Nitrogênio por hectare, 180 kg de P₂O₅ por hectare e 225 kg de K₂O por hectare (DIAS; ROSSETO, 2006) o que correspondeu a 10,5, 20 e 10 g por lisímetro, respectivamente. A adubação fosfatada foi feita toda no plantio, utilizando o fertilizante super fosfato simples (18 % de P₂O₅). O nitrogênio e o potássio foram aplicados em duas coberturas aos 40, 110 e 220 DAP, utilizando o nitrato de potássio (45 % K₂O e 13 % N). Aos 150 DAP foi incorporado 5 kg de matéria orgânica em cada parcela, de forma a melhorar a aeração na camada superficial do solo, melhorando a estrutura do solo e também proporcionando uma redução da temperatura superficial do solo.

2.2.4.5 Manejo da irrigação

No estágio inicial do ciclo cultural da cana-planta, preocupou-se em proporcionar as condições de umidade ideais para a brotação e enraizamento dos toletes. Nos primeiros 20 dias após o plantio (DAP) fazia-se irrigação diária, usando uma mangueira com água fornecida da rede de abastecimento do Departamento de Engenharia Rural da ESALQ-USP, sem a preocupação de aplicar uma lâmina específica, e sim manter o solo com uma umidade aparente satisfatória. Entre o período de 20 a 30 DAP estacionou-se o NF a 0,30 m da superfície, através do sistema de inundação utilizado, uma vez que o sistema radicular ainda se encontrava em desenvolvimento, evitando assim que a cultura sofresse algum estresse hídrico nessa fase inicial, já que o NF a essa profundidade demonstrou manter uma umidade satisfatória na superfície do solo. Após 30 DAP o NF foi rebaixado a 0,40 m de profundidade de forma proporcionar o desenvolvimento do sistema

radicular, momento em que foram instalados os tensiômetros nas parcelas a 30 cm de profundidade.

A cana foi irrigada ao longo de todo o ciclo, com exceção do período em que os tratamentos foram aplicados, para garantir que as diferenças obtidas fossem proporcionadas apenas pelo estresse por excesso de umidade. Após aplicado os tratamentos, fazia-se o rebaixamento do NF até a 0,80 m da superfície do solo e a irrigação destas plantas recomeçava no momento em que o valor das leituras dos tensiômetros instalados a 0,30 m de profundidade nos lisímetros atingia o valor de 50 kPa. A leitura dos tensiômetros foi realizada semanalmente, com um tensiômetro por parcela, utilizando-se um tensiômetro digital.

O sistema de irrigação utilizado foi a sub-irrigação, utilizando o mesmo sistema de inundação dos lisímetros. O nível do reservatório ficou estacionado a 0,40 m de profundidade e quando se detectava que as leituras dos tensiômetros estavam acima da tensão especificada, os registros dos reservatórios eram abertos e ali permanecendo por um período de 24 horas. Assim, a lâmina aplicada em cada irrigação foi a suficiente para elevar novamente a umidade do solo próxima ao valor da umidade na capacidade de campo (6 kPa), caracterizada pela curva característica de retenção da água no solo apresenta na Figura 10, momento em que os registros eram fechados.

Figura 10 – Curva de retenção da água no solo

A irrigação foi contínua e mantida até sua paralização, 45 dias antes do corte, uma vez que, segundo Scardua (1985); Delgado-Rojas e Barbieri (1999) existe uma ótima correlação entre o consumo de água e a produção de colmos. A água apresenta grande importância para a cana-de-açúcar, principalmente no primeiro período de produção, ou seja, na brotação, perfilhamento e estabelecimento, no período de crescimento vegetativo o peso da água no ciclo da cultura diminui, chegando a ser considerado como quase insignificante no período de maturação. Segundo Rodrigues (1995) em termos gerais, o regime de água mais eficiente em promover o amadurecimento da cana é aquele que apresenta maior restrição ao crescimento, embora mantendo um suprimento líquido suficiente para síntese, transporte e armazenamento do açúcar. Estudos antigos mostraram que a fotossíntese não era interrompida em folhas murchas de cana, embora esta se realizasse em nível inferior àquele de folhas com suprimento de água adequado. Em outro trabalho com suprimento variável de água, observou-se: a. aumento dos açúcares redutores na lâmina foliar e na bainha e diminuição desses açúcares nos colmos, nas plantas deficientes em água; b. sacarose e polissacarídeos elevam-se em folhas de plantas deficientes em água e c. 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. Conclui-se que se o déficit hídrico não for tão limitante a ponto de prejudicar a fotossíntese, não há argumento fisiológico contrário ao corte da água para a obtenção da maturação.

2.2.4.6 Análise das folhas +3 da cana-de-açúcar foliar aos 315 após o plantio

A avaliação do estado nutricional das culturas constitui uma ferramenta indispensável para atingir alta produtividade. Um dos principais métodos para avaliar o estado nutricional das culturas é a análise química de folhas. Com a interpretação da análise química de folhas é possível emitir um parecer indicando possível deficiência ou excesso de nutrientes e contribuindo para estabelecimento de programas de adubação com maior eficiência agrônômica e econômica. Aos 315 dias após o plantio foram realizadas amostragens das folhas de 48 parcelas, sendo coletada a folha +3, segundo o sistema de Kuijper (Van DILLEWIJN, 1952). As amostras (incluindo a nervura) foram analisadas para determinação das concentrações de N, P, K, Ca, Mg e S (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997) nas parcelas submetidas à inundação e posterior rebaixamento de 0,30 m em 3, 6, 9, 12 e 15 dias após a inundação nos períodos 67 (P1), 210 (P2)

e 305 (P3) DAP. O planejamento estatístico foi em blocos casualizados, arranjado em um fatorial de $[(3 \times 5) \times 3]$. Na análise estatística dos resultados foram feitas a análise de variância cujo esquema é apresentado na Tabela 7 e a comparação de médias empregando os testes de Tukey em nível de 5 % de probabilidade nos valores obtidos da causa de variação caracterizado como qualitativo (tratamentos, período e dias) e análise de regressão para os efeitos das velocidades.

Tabela 7 – Análise de variância para análise foliar (macronutrientes e micronutrientes) feita na cultivar de cana-de-açúcar RB 867515 sob encharcamento aos 315 DAP

Causas da variação	GL
Tratamentos	15
Períodos	2
Velocidades	4
Velocidades*Períodos	8
Blocos	2
Resíduo	30
Total	47

2.2.4.7 Parâmetros químicos e gasosos do solo

Nos períodos de avaliação aos 67 (P1), 210 (P2) e 305 (P3) DAP foram monitorados o potencial de hidrogênio do solo (pH), potencial de oxiredução do solo e oxigênio dissolvido na solução do solo, presente nos poços de observação, nas parcelas submetidas à inundação e posterior rebaixamento de 0,30 m em 3, 6, 9, 12 e 15 dias após a inundação, durante 9 dias consecutivos, obtendo as seguintes combinações: P1V1, P1V2, P1V3, P1V4, P1V5, P2V1, P2V2, P2V3, P2V4, P2V5, P3V1, P3V2, P3V3, P3V4 e P3V5, usando as leituras obtidas de 4 parcelas para representar cada tratamento. Para isso utilizou-se um pHgâmetro, apresentado na Figura 11, quantificando o pH e também medindo o potencial de oxiredução, já o oxigênio dissolvido foi medido com um oxímetro portátil, visualizado na Figura 12. O estudo foi caracterizado por um delineamento estatístico em blocos casualizados, arranjado em um fatorial de $[(3 \times 5) \times 9 \times 4]$. Na análise estatística dos resultados foram feitas a análise de variância cujo esquema é apresentado na Tabela 8 e a comparação de médias empregando os testes de Tukey em nível de 5 % de probabilidade nos valores obtidos da causa de variação caracterizado como qualitativo (tratamentos, período e dias) e análise de regressão para os efeitos das velocidades.

Tabela 8 – Análise de variância para os parâmetros do solo pH, potencial de oxiredução, oxigênio dissolvido

Causas de variação	GL
Tratamentos	14
Períodos	2
Velocidades	4
Dias	8
Tratamentos*Dias	120
Períodos*Dias	16
Blocos	3
Resíduo	402
Total	539

2.2.4.7.1 Medida do pH e do potencial de óxido redução do solo

Para as medidas de pH e potencial de óxido redução do solo utilizou-se pHgâmetro Portátil de Campo e Laboratório com Registro Microprocessado modelo DM-2P da Digimed juntamente com o eletrodo de pH, Modelo DME-CV2, e eletrodo de redox, Modelo DMR-CP2, como é apresentado na Figura 11. Antes de cada leitura eram feitas calibrações com as soluções tampões pH 6,86, Modelo DM-S1A, Solução Tampão pH 4,01, Modelo DM-S1B e Solução Padrão de Redox 475 mV a 25°C, Modelo DM-S7A, respectivamente.

Figura 11 – a) pHgâmetro e as soluções de calibração; b) Sensores de pH; c) Potencial de óxido redução

2.2.4.7.2 Medição do oxigênio dissolvido

As medidas foram feitas em um Oxímetro Portátil (OD) de Campo e Laboratório, modelo DM-4P com uma célula de OD, modelo DM-C01, faixa de medição de 0 a 60 mg L⁻¹, apresentado na Figura 12.

O medidor de oxigênio possui uma célula eletrolítica, com um catodo de platina e um anodo tubular de prata que estão separados por resina epoxy fundida. Ambos estão imersos em eletrólito e o conjunto está isolado por uma membrana de PTFE permeável a gases.

Para determinação do oxigênio dissolvido aplica-se uma diferença de potencial de polarização entre o anodo e o catodo. O oxigênio da amostra difunde-se através da membrana, reduzindo-se no catodo e formando no anodo o produto da oxidação. A corrente resultante é proporcional a quantidade de oxigênio presente.

Figura 12 – a) Oxímetro portátil de campo; b) Sensor

2.2.4.8 Potencial de água na folha

No decorrer do estudo teve-se o interesse de determinar o potencial de água na folha em função condições experimentais existentes e dos tratamentos propostos. Sendo assim, o potencial de água na folha foi mensurado por uma câmara de pressão de Scholander apresentada na Figura 13.

Figura 13 – Câmara de Scholander

2.2.4.8.1 Determinação da metodologia de coleta das folhas em condições experimentais para determinação do potencial de água na folha da cana-de-açúcar

Em experimentos sob casa de vegetação, onde se tem limitação de material para as análises, e faz-se necessário destruir as amostras, a solução é otimizar o material disponível, sem contudo prejudicar o desenvolvimento das parcelas, neste caso reduzindo sua área foliar. Propôs-se a utilizar uma única folha para os dois horários de avaliação, e para dar consistência a essas medidas fez-se necessário um pré-teste, com a cultivar SP 803280, de forma validar os resultados. Objetivou-se a propor uma metodologia para coleta das folhas da cana-de-açúcar para o estudo do potencial de água nas folhas da cana-de-açúcar. Esta proposta seria o estudo de segmentos da lamina foliar, de forma a racionalizar o material disponível no experimento sem contudo prejudicar o desenvolvimento do cultivo. Os tratamentos foram compostos de forma a combinar três segmentos de folhas, coletados de forma diferente, em dois horários, as 10:00 e as 14:00 horas e em dois dias consecutivos resultando nos seguintes tratamentos: uma folha por horário (FN), metade da folha para cada horário, sem proteção (FSP) e metade da folha para cada horário, protegida por papel alumínio (FP). Sendo assim o estudo foi planejado em um delineamento inteiramente aleatorizado constituindo uma combinação de $[(3 \times 2 \times 2) \times 3]$. A análise estatística dos resultados foi composta pela análise de variância onde o esquema é apresentado Tabela 10 e pela comparação de médias empregando o teste Tukey em nível de 5 % de probabilidade. As imagens das folhas após retirada do material para as leituras pode ser conferida na Figura 14. Os dados climatológicos foram obtidos de um termohigrógrafo e os hídricos com um tensímetro digital a partir de tensiômetros de cápsula porosa. As leituras de temperatura, umidade e tensão estão apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Informações climatológicas do ambiente nos dias e horários que foram feitas as medidas de potencial de água na folha

Dias	Horários	Temperatura (°C)	Umidade (%)	Tensão (kPa)
01/02/2008	10:00	30	52	4,86
	14:00	38	25	4,63
02/02/2008	10:00	32,5	37,5	4,78
	14:00	42	25	7,35

Tabela 10 – Análise de variância para o potencial de água na folhas da cana-de-açúcar na cultivar de cana-de-açúcar SP803280

Causas de variação	GL
Tratamentos	2
Horários	1
Dias	1
Repetições	2
Tratamentos*Horários	2
Tratamentos*Dias	2
Horários*Dias	1
Resíduo	24
Total	35

Figura 14 – Folhas da cana-de-açúcar em um pré-teste com finalidade de validar se era possível utilizar uma única folha para determinar o potencial de água em dois horários distintos

2.2.4.8.2 Potencial de água na folha da cana-de-açúcar (cultivar RB 867515)

O potencial de água permitiu um melhor esclarecimento dos efeitos do encharcamento sobre a dinâmica da água na planta e conseqüentemente no ambiente. O estudo consistiu em determinar o potencial de água na folha das plantas quando submetidas à inundação e posterior rebaixamento de 0,30 m em 3, 6, 9, 12 e 15 dias após a inundação das parcelas, em dois momentos do ciclo cultural aos 67 (P1) e 210 (P2) DAP e quando as parcelas foram somente irrigadas, tratamentos T1 (1º período) e T2 (2º período), obtendo as seguintes combinações: T1, P1V1, P1V2, P1V3, P1V4,

P1V5, T2, P2V1, P2V2, P2V3, P2V4 e P2V5. Foram retirados segmentos de 0,08 m do terço inferior da folha, ou seja, a 0,40 m da ponta da folha de acordo, como mostrado na Figura 15, (SALIENDRA; MEINZER; GRANTZ, 1990), obtidos de quatro parcelas constituindo as repetições, nos horários de 10:00 e 14:00 horas. Caracterizando o delineamento estatístico em blocos casualizados, arranjado em um fatorial de $\{(2 \times 5) + 1\} \times 4 \times 2$. Na análise estatística dos resultados foram feitas a análise de variância cujo esquema é apresentado na Tabela 11 e a comparação de médias empregando os testes de Tukey e Dunnett em nível de 5 % de probabilidade nos valores obtidos das causas de variações caracterizado como qualitativo (tratamentos, período, horários e dias) e análise de regressão para os efeitos das velocidades. A folha utilizada foi a +3, completamente desenvolvida segundo Van Dillewijn (1952).

Figura 15 – Esquema da retirada do segmento da folha da cana-de-açúcar para as medidas de potencial de água na folha

Tabela 11 – Análise de variância para o potencial de água na folhas da cana-de-açúcar

Causas de variação	GL
Tratamentos	11
Repetições	3
Períodos	1
Velocidades	5
Horários	1
Dias	4
Períodos*Dias	4
Períodos*Horários	1
Horários*Dias	4
Resíduo	443
Total	454

2.2.4.9 Parâmetros micro-climáticos da casa de vegetação

A temperatura do ar, a umidade relativa e a evaporação da água foram registradas utilizando-se aparelhos instalados em um abrigo meteorológico, localizado no interior da casa de vegetação. A temperatura e a umidade do ar foi medida com um psicrômetro, apresentado na Figura 16, com a finalidade de medir a influência desta na transferência de umidade do solo para o ambiente, e em função desenvolvimento da cultura, pois tem influência direta na quantidade de água nas camadas superficiais do solo, contribuindo para o monitoramento do experimento e servindo de subsidio para fundamentar os resultados que foram obtidos.

Figura 16 – Psicrômetro

Na obtenção da temperatura do solo foram usados sensores de temperatura do solo, instalados na profundidade de 0,10 m, em cada um dos tratamentos (Figura 17). Esse conjunto de sensores foi conectado a um sistema de aquisição de dados, Datalogger 21X – Campbell Scientific (Figura 18), sendo transferidos para um microcomputador. Foram monitoradas as temperaturas do solo em 16 parcelas cultivadas com a cana representando todos os tratamentos do estágio em avaliação.

Figura 17 – Sensores de temperatura instalado nas parcelas em condição de solo seco e encharcado

Figura 18 – Datalogger 21X e multiplexador de dezesseis canais – Campbell Scientific

2.2.4.9.1 Determinação da radiação fotossinteticamente ativa no interior da casa de vegetação

Em função da atenuação da radiação natural pela cobertura da casa de vegetação, utilizou-se o Sunscan Canopy Analysis System type SS1 da Delta - T Devices Ltd. (Figura 19) para quantificar a radiação fotossinteticamente ativa que chegava ao nível das folhas, comparando-a com a radiação natural, aquela medida fora da estufa. Dividiu-se o ambiente interior da casa de vegetação em três secções (entrada, meio e fundo), de forma a caracterizar a intensidade de radiação em cada segmento. Para cada secção do ambiente foram feitas oito leituras, quatro em cada posição e três horários distintos (8:00, 12:00 e 16:00 horas). Também foi feita a avaliação da radiação que chegava ao nível das folhas e aquela ao nível do solo nos lisímetros, ou seja, abaixo do nível das folhas, em dois dias consecutivos. O planejamento estatístico para os resultados obtidos constituiu-se em um delineamento em blocos casualizados constituindo numa combinação de $[(4 \times 2) \times 3 \times 2 \times 4]$. A análise estatística dos resultados foi composta pela análise de variância onde o esquema é apresentado Tabela 12 e pela comparação de médias empregando o teste Tukey em nível de 5 % de probabilidade.

Figura 19 – Sunscan System Radio Link

Tabela 12 – Análise de variância para radiação fotossinteticamente ativa (PAR) e radiação líquida (Rn)

Causas de variações	G.L
Tratamentos (ambiente externo e as secções)	3
Posições	1
Horários	2
Dias	1
Repetições	3
Tratamentos*Horários	6
Tratamentos*Dias	3
Tratamentos*Posições	3
Resíduo	145
Total	167

2.2.4.10 Parâmetros biométricos relativo ao desenvolvimento das plantas e produção

2.2.4.10.1 Planejamento estatístico

Foi realizado em função dos tratamentos compostos pelos 3 estádios de desenvolvimento em que o encharcamento foi aplicado aos 67 (DAP), 210 DAP e 300 DAP denominados P1, P2 e P3, respectivamente; 5 velocidades de rebaixamento do NF, rebaixamento a uma profundidade de 0,30 m em 3, 6, 9, 12 e 15 dias, denominados V1, V2, V3, V4 e V5, respectivamente, (Figura 20) e uma testemunha, constituindo em 16 tratamentos com 4 repetições, totalizando 64 parcelas. As plantas dessas parcelas foram avaliadas a partir dos 30 DAP para os parâmetros alturas de plantas, incremento de crescimento, número de folhas, diâmetro de colmo, número de entrenós, número de perfilhos, área foliar e índices de área foliar. Sendo assim fez-se sete avaliações para a altura dos colmos e número de folha nos colmos, seis avaliações para o diâmetro dos colmos, número de entrenós, área foliar e índice de área foliar e cinco avaliações para incremento de crescimento e número de perfilhos constituindo os períodos de avaliação (PA). O planejamento estatístico constituiu em blocos casualizados, arranjado em fatorial de [(16 x 4) x PA]. Para a análise estatística dos resultados, foi feito análise de variância cujo esquema é apresentado na Tabela 13. Tendo em vista que os fatores empregados foram qualitativos realizou-se, o teste F, conjuntamente com os testes de Tukey e Dunnett em nível de 5 % de probabilidade para comparação da média entre os tratamentos e a testemunha, respectivamente.

Figura 20 – Nível freático na superfície do solo e nível freático a 0,30 m da superfície

Tabela 13 – Esquema da análise de variância utilizada para dados obtidos nas avaliações biométricas

Causas de variação	GL
Blocos	3
Períodos de avaliações	7
Tratamentos*Períodos	105
Resíduo	381
Total	511

Os parâmetros foram avaliados mensalmente e são descritos a seguir.

2.2.4.10.2 Altura de plantas

A altura foi medida do nível do solo até a última região auricular visível da folha +1, segundo o sistema Kuijper, descrito por Van Dillewijn (1952).

2.2.4.10.2.1 Incremento de crescimento dos colmos

Para o cálculo do incremento de crescimento, foi medida a distância da folha +3 antiga (da amostragem anterior) até a folha +3 atual, dividido pelo número de dias passados entre as duas amostragens (Equação 8).

$$IC = \frac{Pfat - Pfan}{Ndp} \quad (8)$$

em que:

IC – incremento de crescimento, m;

Pfat – posição da folha +3 atual, m;

Pfan – posição da folha +3 antiga, m;

Ndp – números de dias passados entre as medições

2.2.4.10.3 Número de folhas na parcela

O número de folhas totalmente abertas (expandidas) com pelo menos 20 % da área foliar verde, a partir da folha +1, conforme identificação foliar do “sistema Kuijper”.

2.2.4.10.4 Diâmetro de colmo

Para obtenção do diâmetro, foi feita a medição na base do colmo, na porção mediana do 3º entrenó, com o um paquímetro digital.

2.2.4.10.5 Número de perfilhos nas parcelas

Foram feitas as contagens de todos os perfilhos de cada parcela, na cana-planta, ao longo do ciclo. Eram considerados como perfilhos até o momento que os colmos apresentavam a folha +3, ou seja, três folhas totalmente abertas (expandidas).

2.2.4.10.6 Área foliar (AF)

A área foliar é um dos mais importantes parâmetros da análise de crescimento, podendo ser medida através de aparelhos específicos ou de equações que permitem sua estimativa, em muitos casos, com bastante precisão.

A escolha da folha a ser usada na mensuração, deve seguir a numeração proposta por Kuijper em Van DILLEWIJN (1952), que consiste em designar como +1 a primeira folha de cima para baixo, que se apresenta inserida com a aurícula (colarinho) bem visível (Figura 2). As folhas abaixo passariam a receber a numeração +2, +3, e assim por diante. As acima da +1 seriam 0, -1, -2, -3, etc. Em geral, deve-se utilizar a folha +3, considerada como madura.

O comprimento (C) foi tomado a partir da intersecção da folha com a bainha até a ponta da folha, e a largura (L) foi determinada no terço basal da folha. Estes parâmetros foram utilizados para determinação da área foliar. Esses parâmetros eram mensurados nos colmos que apresentavam a folha +3 e entrenó exposto; caso contrario não eram medidos e considerados como perfilhos. Para determinação da área foliar de cada planta (perfilho; colmo) foi utilizada a Equação 9 proposta por Hermann e Câmara (1999), expressa como:

$$AFc = C \cdot L \cdot f \cdot (N + 2) \quad (9)$$

em que:

AFc – área foliar do colmo, cm^2 ;

C – comprimento da folha +3, cm;

L – maior largura da folha +3, cm;

f – fator de forma (0,66);

N – número de folhas totalmente abertas e com pelo menos 20% da área verde (folha +1 até folha +7); e

2 – fator de correção.

O fator de forma foi conseguido pelas medidas do C x L de cinco folhas +3 de cada um dos tratamentos nos três diferentes estádios de avaliação. Essas mesmas folhas foram passadas no integrador de área foliar da LICOR modelo LI-3100 AREA METER obtendo-se cinco medidas de cada uma das folhas de cada um dos tratamentos. Teve-se o cuidado de desprezar a maior e a menor leitura, só então fez-se a média das três leituras. Depois de obtidas as áreas foliares de cada uma das folhas fez a relação expressa na Equação 10.

$$f = \frac{AI1 + AI2 + AI3 + AI4 + AI5}{AC1 + AC2 + AC3 + AC4 + AC5} \cdot 5 \quad 10)$$

em que:

f – fator de forma;

AI – área obtida no integrador de folhas LI-3100, cm^2 ;

AC – área obtida no campo (C x L), cm².

A área foliar de cada parcela foi obtida pelo somatório das áreas foliares de todos os colmos de cada parcela.

2.2.4.10.7 Índice de área foliar (IAF)

É a relação entre área foliar e a área do solo sombreada pelas folhas; foi obtido através do cálculo da área foliar média (m²) de uma planta, multiplicado número de plantas por metro quadrado como apresentado na Equação 11.

$$IAF = \frac{AF}{As} \cdot Npp \quad (11)$$

em que:

AF – área foliar, m²;

As – área de solo, m²;

Npp – número de plantas por parcela.

2.2.4.11 Índices fisiológicos, índice de maturação, colheita e características tecnológicas

2.2.4.11.1 Planejamento estatístico

O delineamento estatístico utilizado foi o de blocos casualizados, arranjado em um fatorial de [(3 x 5) + 1] x 4, ou seja, 3 estádios de desenvolvimento em que o encharcamento foi aplicado, 5 velocidades de rebaixamento do NF e uma testemunha que não sofreu estresse por excesso de umidade, constituindo em 16 tratamentos com 4 repetições, totalizando 64 parcelas. Os tratamentos consistiram em: períodos de aplicação do encharcamento, 67 dias após o plantio (DAP), 210 DAP e 300 DAP denominados P1, P2 e P3, respectivamente; velocidades de rebaixamento do NF, rebaixamento a uma profundidade de 0,30 m em 3, 6, 9, 12 e 15 dias, denominados V1, V2, V3, V4 e V5, respectivamente.

Para a análise estatística dos resultados, foi feita análise de variância cujo esquema é apresentado na Tabela 14. Tendo em vista que os fatores empregados foram quantitativos e

qualitativos realizou-se, o teste F, conjuntamente com os testes de Tukey e Dunnett em nível de 5 % de probabilidade para comparação da média entre os tratamentos e dos tratamentos como a testemunha, respectivamente, nos períodos, e análise de regressão para os efeitos das velocidades.

Tabela 14 – Esquema da análise de variância utilizada para dados obtidos no experimento

Causa de variação	Graus de liberdade
Blocos	3
Período de aplicação	2
Velocidade de rebaixamento	4
Período x Velocidade	8
Tratamentos ((períodos x velocidade) + testemunha)	15
Resíduo	45
Total	63

2.2.4.11.2 Taxa de assimilação líquida (TAL)

Este termo expressa a taxa de fotossíntese líquida, em termos de massa seca produzida (quilogramas), por m² quadrado de área foliar, por unidade de tempo, (kg m⁻² dia⁻¹) expressa pela Equação 12.

$$TAL = \frac{(Ms_f - Ms_i) \cdot (\ln AF_f - \ln AF_i)}{(AF_f - AF_i) \cdot U_t} \quad (12)$$

em que:

TAL – taxa de assimilação líquida, kg m⁻² dia⁻¹;

Ms – massa seca produzida, kg;

AF – área foliar, m²;

Ut – unidade de tempo, dia.

2.2.4.11.3 Razão de área foliar (RAF)

É um componente morfo-fisiológico, sendo a razão entre a área responsável pela interceptação de energia luminosa (AF) e CO₂ e a massa seca total resultante da fotossíntese, sendo calculada em cm² g⁻¹ expressa pela Equação 13.

$$RAF = \frac{AF}{Mst} \quad (13)$$

em que:

RAF – razão de área foliar, $m^2 \text{ kg}^{-1}$;

AF – área foliar, m^2 ;

Mst – massa seca total, kg.

2.2.4.11.4 Taxa de crescimento absoluto (TCA)

Equação 14, leva-se em consideração a variação da massa seca em um intervalo de tempo.

$$TCA = \frac{Msf - Msi}{\Delta t} \quad (14)$$

em que:

Msf – massa seca final, kg;

Msi – massa seca inicial, kg;

ΔT – intervalo de tempo entre duas medições consecutivas, dias.

2.2.4.11.5 Taxa de crescimento relativo (TCR)

É o crescimento de uma planta ou qualquer órgão, calculado tendo como parâmetros a área foliar útil para a fotossíntese e a taxa de fotossíntese líquida, em duas amostragens sucessivas ($m \text{ m}^{-1} \text{ dia}^{-1}$) podendo ser obtida pela Equação 15.

$$TCR = \frac{\ln(AFf) - \ln(AFi)}{\Delta T} \quad (15)$$

em que:

TCR – taxa de crescimento relativo, $m \text{ m}^{-1} \text{ dia}^{-1}$;

Ln – logaritmo neperiano;

AFf – área foliar final, m²;

AFi – área foliar inicial, m²;

ΔT – intervalo de tempo entre duas medições consecutivas, dias.

2.2.4.11.6 Taxa de crescimento da cultura (TCC)

Correlaciona o índice de área foliar com a taxa de assimilação líquida, expressando a produção de massa seca em relação à área cultivada; matematicamente, pode-se representá-la pela Equação 16, (BLACKMAN, 1968):

$$TCC = IAF \cdot TAL \quad (16)$$

em que:

IAF – índice de área foliar;

TAL – taxa de assimilação líquida, kg m⁻² dia⁻¹.

2.2.4.11.7 Área foliar específica (AFE)

É um índice que permite avaliar se as plantas estão acumulando fotoassimilados em suas folhas ou translocando para outros drenos (RADFORD, 1967), medida em cm² dia⁻¹ expresso pela Equação 17.

$$AFE = \frac{AF}{Msf} \quad (17)$$

em que:

AFE – área foliar específica, m² kg⁻¹;

AF – área foliar, m²;

Msf – massa seca da folha, kg.

2.2.4.11.8 Índice de maturação

Segundo Pereira e Segato (2006) a estimativa do estado de maturação do talhão pode ser feita através de uma pré-análise baseada na determinação do Brix. O índice de maturação foi determinado aos 330 dias após o plantio; para tanto utilizou-se do refratômetro de campo. O refratômetro fornece diretamente a concentração de sólidos solúveis do caldo (Brix). O Brix está estreitamente correlacionado ao teor de sacarose da cana-de-açúcar. O critério mais racional de estimar a maturação pelo refratômetro de campo é pelo índice de maturação (IM), que fornece o quociente da relação conseguido pela Equação 19:

$$IM = \frac{\text{Brix da ponta do colmo}}{\text{Brix da base do colmo}} \quad (18)$$

Para extrair o caldo do colmo, usou-se um amostrador do tipo “furador” no terceiro ou quarto entrenó, partindo da base, dos três principais colmos das parcelas transferindo o caldo para o prisma do refratômetro. Para a determinação do Brix do ápice do colmo, extraiu-se o caldo do último entrenó maduro dos três principais colmos das parcelas que abrigavam os tratamentos compostos das cinco velocidades de rebaixamento de 0,30 m em 3, 6, 9, 12 e 15 dias em três diferentes períodos do ciclo cultural (67, 215 e 305 DAP). Seguindo a recomendação de Cesnik e Miocque (2004), utilizou como último entrenó maduro, aquele imediatamente abaixo do que se desprende por inteiro do colmo (palmito), pressionando com a unha os últimos entrenós. O primeiro que ofereceu resistência, do ápice para a base, foi definido como o primeiro entrenó maduro, e a parte apical o palmito.

As médias do IM foram interpretadas seguindo os estágios de maturação da cana-de-açúcar, segundo Cesnik e Miocque (2004) que apresentam valores limites de IM que caracteriza os estes estágios, como mostra a Tabela 15, na qual tomou-se a decisão de colher quando apresentava o estágio de maturação de “cana madura”.

Tabela 15 – Índice de maturação da cana-de-açúcar baseada em valores do Brix do ápice e da base do colmo

IM	Estagio de maturação
< 0,70	Cana verde
0,71 – 0,80	Cana em maturação baixa
0,81 – 0,90	Cana em maturação média
0,91 – 1,00	Cana madura
> 1,00	Cana em maturação ultrapassada

2.2.4.11.9 Colheita

Foram avaliadas as seguintes variáveis na colheita da cana-planta (340 DAP): número de colmos colhidos; número médio de entrenós; diâmetro médio (mm); altura (m); massa seca dos colmos e características tecnológicas dos colmos colhidos.

Os colmos foram colhidos com corte rente ao solo, fazendo o desponete para colheita (fixado sempre num mesmo colarinho da folha +5). Foram separados e pesados a parte aérea: folhas + bainhas; colmos dos ponteiros (palmito) e colmos, que posteriormente, secos em estufa, com circulação de ar forçado a temperatura de 105° C, até peso constante e avaliada a massa seca. Uma vez que os colmos após a pesagem foram usados para determinação das características químico-tecnológicas, foi determinado a massa seca desses colmos da seguinte maneira:

- Pela massa verde do colmo bem como a umidade da cana, calculada na determinação das análises tecnológicas em laboratório;
- Para determinar a massa seca do colmo: produto da massa verde do colmo pela umidade da cana, dividido por 100 como é discriminado na Equação 18.

$$MSCP = MVCP - \left(\frac{MVCP \cdot \text{Umidade cana}}{100} \right) \quad (19)$$

em que:

MSCP – massa seca do colmo, kg;

MVCP – massa verde do colmo, kg.

2.2.4.11.10 Características químico-tecnológicas

Após a avaliação dos parâmetros necessários, os colmos foram enviados ao laboratório do Departamento de Tecnologia de alimentos da ESALQ/USP para determinação das características químico-tecnológicas.

A amostra a ser analisada, resultante da mistura das amostras simples, foi preparada em um aparelho desintegrador, recolhida e homogeneizada em betoneira de acordo com a Figura 21, (CONSECANA, 2003).

Pesou-se o resíduo úmido (ou bolo úmido) resultante dessa prensagem, e do caldo extraído; analisaram-se brix e pol, conforme as metodologias descritas Leme Filho (2005).

Figura 21 – a) Aparelho desintegrador e betoneira; b) Amostras dos tratamentos identificados com etiqueta

2.2.4.11.10.1 Sólidos solúveis (°Brix)

Representam a porcentagem, em peso, de sólidos solúveis no caldo de cana. O °Brix representa o peso de sólidos dissolvidos em 100 g de solução. Assim, quando uma solução tem 20° Brix, quer dizer que em 100 g desta solução tem 20 g de sólidos dissolvidos, sendo os 80 g restantes composto de água. A determinação do brix (percentual em massa de sólidos solúveis) foi realizada em refratômetro digital com correção automática de temperatura, com resolução máxima de 0,1° brix, devendo o valor final ser expresso a 20 °C, como é apresentado na Figura 22, (CONSECANA, 2003).

Figura 22 – Refratômetro digital

2.2.4.11.10.2 Porcentagem em massa de sacarose aparente (Pol)

Segundo Rodrigues (1995), é a porcentagem, em peso, de sacarose aparente ou a soma algébrica dos desvios provocados no plano de polarização pelas substâncias opticamente ativas (açúcares), contidos nos produtos da usina (caldo), por leitura direta. Na prática, corresponde à porcentagem de sacarose aparente contida na cana-de-açúcar. Assim, quando uma solução tem Pol de 14, quer dizer que em 100 g desta solução tem-se 14 g de sacarose, determinada em sacarímetro (Figura 23a). A extração do caldo foi feita por meio de uma prensagem, a 250 kgf cm^{-2} por 1 minuto, de 500 g de amostra de cana desfibrada e homogeneizada, sendo as amostras obtidas pelo método da prensa hidráulica como pode ser visto nas Figura 23b e Figura 23c, (TANIMOTO, 1964).

A pol foi determinada usando-se como clarificante uma mistura à base de chumbo, devendo a leitura sacarimétrica ser transformada para a leitura equivalente em subacetato de chumbo. Em uma amostra de 200 ml de caldo colocar de 3 a 4 gramas de subacetato de chumbo como a apresentada na Figura 23d.

Figura 23 – a) Sacarímetro; b) Prensa hidráulica; c) Detalhe da prensa; d) Amostra de caldo e o Subacetado de chumbo usado para clarificar o caldo

A pol do caldo (S) foi calculada pela Equação 20, segundo Consecana (2006).

$$S = LAI \cdot (0,2605 - 0,0009882 \cdot B) \quad (20)$$

em que:

LAI – leitura sacarimétrica obtida com a mistura clarificante à base de subacetato de chumbo;

B – brix do caldo.

Para o caldo clarificado usado para a leitura sacarimétrica, fixou-se o mínimo de 70 ml (setenta mililitros). Na hipótese de lavagem do tubo sacarimétrico com água, usou-se 100 ml (cem mililitros) de caldo para a próxima leitura da pol.

A Equação 21 foi utilizada para o cálculo da pol da cana segundo a Consecana (2006).

$$PC = S_j \cdot (1 - 0,01 \cdot F_{\text{pcts}}) \cdot (1,0313 - 0,00575 \cdot F_{\text{pcts}}) \quad 21$$

em que:

PC – Pol da cana, %;

S_j – Pol do caldo, %;

F_{pcts} – Fibra % cana.

2.2.4.11.10.3 Açúcar teórico recuperável (ATR)

Os ATR representam a quantidade de açúcares (na forma de açúcares invertidos ou ART) que são recuperados na usina (kg Mg⁻¹ cana) assumindo perdas de 9,5% na lavagem de cana, extração (perda de pol no bagaço final), torta dos filtros ou prensas e as “indeterminadas”. Foi calculado o ATR ou açúcar teórico recuperável (kg Mg⁻¹ cana), conforme metodologia Consecana (2006), utilizando-se a Equação 22.

$$ATR = (9,5263 \cdot PC) + (9,05 \cdot ARC) \quad (22)$$

em que:

ATR – açúcar teórico recuperável, kg.Mg⁻¹ cana;

PC (sacarose) – Pol da cana, %;

ARC – açúcares redutores da cana, %.

2.2.4.11.10.4 Rendimento de açúcar teórico (RAT)

O rendimento de açúcar teórico foi calculado pela Equação 23.

$$RAT = ATR \cdot TCH \quad (23)$$

em que:

RAT – rendimento de açúcar teórico;

ATR – açúcar teórico recuperável, kg kg⁻¹;

MVCP – massa verde dos colmos da parcela, kg parcela⁻¹.

2.2.4.11.10.5 Pureza aparente

Porcentagem de sacarose nos sólidos solúveis totais (Brix); calculada pela Equação 24.

$$\text{Pureza Aparente} = 100 \cdot \frac{\text{Pol}}{\text{Brix}} \quad (24)$$

2.2.4.11.10.6 Açúcares redutores

Todos os açúcares (monossacarídeos) que tem a propriedade de reduzir o cobre das soluções cupro-alcálicas (licor de Fehling). No caldo da cana, são a glicose e a levulose. Além da quantidade normalmente existente na cana, se formam na fabricação do açúcar, pelo desdobramento da molécula de sacarose, sob a ação de ácidos diluídos e calor, conforme:

Logo, 100 gramas de sacarose dão 105 gramas de açúcares redutores, pois um mol de sacarose = 342, enquanto os redutores possuem PM de 180 cada.

2.2.4.11.10.7 Açúcares redutores % caldo (estimados)

Foi determinado o teor de açúcares redutores no caldo, pela Equação 25, segundo Consecana (2006).

$$\text{AR} = (3,641 - 0,0343 \cdot \text{PURA}) \quad (25)$$

em que:

AR – açúcares redutores do caldo, %

PURA – pureza aparente;

2.2.4.11.10.8 Açúcares redutores % cana

Para obter os açúcares redutores em porcentagem de cana (ARC), foram utilizados os mesmos coeficientes do cálculo da pol na cana, dado pela Equação 26, segundo a Consecana (2006).

$$ARC = AR_j \cdot (1 - 0,01 \cdot F_{\text{pts}}) \cdot (1,0313 - 0,00575 \cdot F_{\text{pts}}) \quad 26$$

em que:

ARC – açúcares redutores da cana, %;

AR – açúcares redutores do caldo, %;

F_{pts} – Fibra cana, %.

2.2.4.11.10.9 Fibra

Parte lenhosa da cana, insolúvel na água; sua determinação foi realizada diretamente da fibra da cana pela Equação 27, segundo Consecana (2006).

$$F = 0,08 \times \text{PBU} + 0,876 \quad (27)$$

em que:

F – fibra, g;

PBU – peso do bagaço úmido resultante da extração do caldo da cana, g.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Dentre as culturas que ocupa nossa área agrícola, a cana-de-açúcar é uma cultura de fundamental importância sócio-econômica, consumo humano, açúcar, fonte de energia, álcool, e na fabricação de ração animal. Assim, torna-se importante conhecer seus mecanismos fisiológicos frente ao excesso de umidade no solo, uma vez que, este estado do solo ocorre em parte de nossas áreas cultivadas, em períodos variando de curtos a permanentes. Estas áreas podem ser consideradas potencialmente produtivas desde que se conheçam as limitações da cultura explorada, neste caso a condição de encharcamento, ou seja, o excesso de umidade no solo.

2.3.1 Parâmetros hídricos e climáticos

Obtida a curva característica do solo, Figura 10, definiu-se a umidade de saturação em $0,3882 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$; e a umidade na capacidade de campo em $0,28 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ para um potencial de água no solo 8 kPa. Os tensiômetros foram instalados a uma profundidade de 0,30 m de forma a caracterizar a umidade no sistema radicular das plantas. O teor de umidade nas parcelas experimentais que sofreu o encharcamento e nas que comportavam as plantas testemunhas nos três períodos de avaliação são apresentados nas Figuras 24, 25 e 27. Observa-se que no início do primeiro período de inundação as parcelas que sofreram o encharcamento apresentaram um teor de umidade de $0,55 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ enquanto que a parcela que foi somente irrigada apresentou um teor de $0,32 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ de acordo com Van Genuchten (1980). As parcelas com as plantas testemunhas, no período avaliado, mantiveram um teor de umidade no solo variando entre 0,40 a $0,28 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, esses valores próximos a capacidade de campo se deveram ao fato de que as parcelas que continham as plantas testemunhas tinham sido irrigadas. No final do período, representado na Figura 24, os valores médios dos teores de umidades encontram-se próximos para os diferentes tratamentos, variando entre $0,26 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, para o tratamento P1V1, e $0,34 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ para os tratamentos P1V5 e T (testemunha), caracterizando o rebaixamento do NF abaixo de 0,30 m que comporta o sistema radicular efetivo da cana-de-açúcar.

Figura 24 – Teor de umidade no solo ao longo de vinte dias de avaliação, durante o primeiro período de inundação das parcelas

Para o segundo período de inundação os valores médios de umidades no início variaram de $0,65 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$ para as parcelas inundadas e $0,32 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$ para as irrigadas (Figura 25).

Figura 25 – Teor de umidade no solo ao longo de vinte dias de avaliação, durante o segundo período de inundação das parcelas

No entanto após 20 dias de avaliações os teores médios de umidades nos 0,30 m do perfil do solo das parcelas foram reduzidos para $0,38 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ para o tratamento, P2V5, que sofreu o maior estresse, e $0,29 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ para o tratamento P2V1, parcelas submetidas a uma rápida inundação, estando à umidade deste último próxima de $0,23 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, que é o teor médio de umidade das parcelas com as plantas testemunhas. Cabe lembrar que mesmo após rebaixar o NF além dos 0,30 m, o rebaixamento continuou até chegar aos 0,80 m de profundidade, de forma gradativa, conforme Figura 26.

O tempo gasto para rebaixar o NF a 0,80 m variou de 24 dias para o velocidade de rebaixamento de 0,30 m em 3 dias a 140 dias para a menor velocidade, 0,30 m em 15 dias.

Figura 26 – Rebaixamento progressivo do NF efetuado na profundidade de 30 cm em 3, 6, 9, 12 e 15 dias

No início do terceiro período de avaliações os valores médios de umidade nas parcelas que sofreram inundação apresentaram teores variando entre $0,71$ a $0,88 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, enquanto nas parcelas irrigadas, contendo as plantas testemunhas, encontravam-se teores médios de umidade de $0,21 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (Figura 27); isso se deveu a suspensão da irrigação 40 dias antes da colheita. Por esse motivo, no final do período de avaliação, ocorreu o distanciamento dos valores de umidades detectado nas parcelas inundadas em relação aos valores encontrados nas parcelas submetidas à irrigação. Esses extremos de umidade podem ser caracterizados da seguinte forma: $0,3253 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ para o P3V5, $0,2994 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ para P3V4, $0,2994 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ para P3V3, $0,2700 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ para

P3V2, $0,2414 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ para P3V1 e $0,0929 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ para T, a diferença chegou a 61 % quando comparado o tratamento T com o P3V1.

Figura 27 – Teor de umidade no solo ao longo de vinte dias de avaliação, durante o terceiro período de inundação das parcelas

As temperaturas, tanto do ar como do solo, foram monitoradas durante todo o período que as parcelas estiveram sob a condição de inundação e irrigadas. As Figuras 28, 29 e 30 apresentam os perfis de temperatura do ar e do solo para as parcelas inundadas e irrigadas. Segundo Rodrigues (1995) a máxima produção de matéria seca, máxima produção de açúcar por planta e máxima concentração de açúcar no colmo, foram sempre obtidas a 30°C . Baixa produção de açúcar foi obtida (acima de 12% do peso verde), quando a temperatura permaneceu constante ou quando só variou no dia, ou ainda, com a combinação de altas temperaturas diárias e baixas temperaturas noturnas. Baixas temperaturas são o principal fator no amadurecimento da cana, havendo vários autores que relataram o efeito positivo das baixas temperaturas, na ocorrência de concentrações elevadas de sacarose. Crawford e Braendlle (1996) afirmam que em condições de prolongada anoxia, sob altas temperaturas, esgota-se a reserva de carboidratos e permite-se o acúmulo de metabólitos causando danos ao tecido celular, quando reoxigenados. Não pode ser negligenciado o adicional efeito negativo da condição de água estagnada executada nesse experimento, facilmente evitada em condições naturais de várzeas.

Durante o primeiro período as temperaturas do ar variaram entre o 20 e 35 °C. No entanto a temperatura do solo seja na condição de encharcamento (P1V1, P1V2, P1V3, P1V4 e P1V5) ou de solo seco (T) apresentaram maior variação, entre 10 e 45 °C. Observa-se que a temperatura do solo para os diferentes tratamentos apresentaram perfis semelhantes, indicando que a massa de água diferenciada, presente nos lisímetros, pouco interferiu nos valores médios de temperatura.

Figura 28 – Perfis das temperaturas médias monitoradas ao longo de 15 dias para o primeiro período de inundação das parcelas

As temperaturas médias do ar para o segundo período em que se submeteram as plantas ao encharcamento apresentaram inferiores as do primeiro período, consequência do período que foram realizadas as medidas, mês de maio, onde ocorre queda da temperatura para região de Piracicaba – SP (Figura 29). A variação esteve entre 10 e 25 °C para temperatura do ar e entre 5 e 40 °C para o solo.

Para Rodrigues (1995) a temperatura, dos fatores climáticos, é o mais importante para a produção de cana-de-açúcar. A planta, geralmente, é tolerante a altas temperaturas, produzindo em regiões com temperatura média de verão de 47 °C, desde que empregada irrigação. Temperaturas mais baixas (menos de 21 °C), diminuem o crescimento dos colmos e promovem o acúmulo de sacarose. Verifica-se uma inconsistência quanto à informação dos parâmetros térmicos principalmente relacionados à temperatura basal (LIU; KINGSTON; BULL, 1998). Barbieri; Bacchi e Villa Nova (1979) determinaram a temperatura basal em torno de 20°C.

Figura 29 – Perfis das temperaturas médias monitoradas ao longo de 15 dias para o segundo período de inundação das parcelas

O terceiro período de avaliação ocorreu em agosto, período que as temperaturas médias se elevam. Sendo assim a temperatura do ar variou entre 12 e 33 °C e as do solo entre 10 e 45 °C.

Figura 30 – Perfis das temperaturas médias monitoradas ao longo de 15 dias para o terceiro período de inundação das parcelas

A explicação de se ter valores tão elevados vem da condição em que o experimento foi conduzido, em um ambiente protegido e com solo confinado em vasos de concreto.

Segundo Calheiros et al. (2000) nas regiões tropicais e subtropicais, a temperatura maximiza o efeito hipóxico tanto pela menor dissolução do O_2 na água como pelo maior consumo da planta e microrganismos, implicando no aumento da velocidade das reações químicas. Teoricamente, pode ser factível induzir-se a adaptabilidade fisiomorfológica das plantas através de um regime de hipoxia/anoxia específico, sendo que o manejo adequado do lençol freático pode ser a chave para este processo. O estabelecimento abrupto do estado hipóxico não permite aclimação e/ou a indução de um metabolismo alternativo antes da condição se tornar letal (VAN WADMAN e VAN ANDEL, 1985).

2.3.2 Parâmetros químicos do solo

As reações de hidrólise, o pH e as condições de oxiredução são fatores que tendem a alterar, às vezes sensivelmente, o equilíbrio das reações de dissolução/precipitação. Além disso, o pH tem efeito marcante na dissociação de radicais orgânicos, alterando desta forma o número de sítios de ligação. Estes dois índices, E_H -pH, refletem as atividades do elétron ou do próton. Uma vez que prótons (H^+) podem neutralizar elétrons (e^-), e vice-versa; a abundância de um deles resulta no déficit do outro. Por exemplo, um alto pH, o E_H é geralmente baixo, enquanto que a altos valores de E_H , o pH é geralmente baixo (CAMARGO; ALLEONI; CASAGRANDE, 2001).

A velocidade com que se rebaixou o NF proporcionou uma condição de intensidade de encharcamento do solo. Para os parâmetros químicos do solo (pH e potencial de oxiredução) com exceção da velocidade, todos os componentes considerados como causa de variação apresentaram significância quando se fez a análise de variância para os valores médios obtidos nas avaliações, essas causas de variação são apresentadas na Tabela 16.

Os estudos referentes à físico-química dos solos inundados podem ser realizados do ponto de vista das alterações eletroquímicas, que podem ocorrer nestes solos logo após a inundação. Entre as alterações observadas, as mais pronunciadas verificam-se sobre o sistema oxiredutor, no qual o potencial de oxiredução (E_H) apresenta-se como o indicador mais importante do estado de oxidação ou redução destes solos, refletindo a posição de equilíbrio dinâmico ("steady state") existente entre os vários sistemas redox (oxigênio, ferro, manganês, nitrogênio, enxofre e carbono) e determinando a direção das reações destes sistemas quando fora do equilíbrio. Este potencial caracteriza-se através de uma ampla faixa de variações, as mudanças químicas ocorridas

no solo e os efeitos sobre o desenvolvimento de cultivos em ambientes anóxicos (CAMARGO; SANTOS; ZONTA, 1999).

Tabela 16 – Resultados dos quadrados médios da análise de variância do potencial de hidrogênio (pH), potencial de oxiredução (mV) medidos nas parcelas submetidas ao encharcamento com o rebaixamento do NF a uma profundidade de 0,30 m em 3, 6, 9, 12 e 15 dias nos períodos de 67, 210 e 305 DAP

Causas de variação	GL	pH	Potencial Redox
		----- QM -----	-----
Tratamentos	14	0,87 ^{**}	947243,25 ^{**}
Períodos	2	5,51 ^{**}	6016530,46 ^{**}
Velocidades	4	0,07 ^{ns}	166532,47 ^{**}
Dias	8	0,51 ^{**}	449153,36 ^{**}
Tratamentos*Dias	120	0,09 ^{**}	49899,12 ^{**}
Períodos*Dias	16	0,34 ^{**}	95486,43 ^{**}
Blocos	3	0,08 ^{ns}	11353,50 ^{ns}
Resíduo	402	0,04	8384,56
Total	539		
CV (%)		2,90	67,18
Média geral		6,89	136,49

^{**} significativo ao nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F.

^{ns} não significativo ao nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F.

As alterações que acompanham a inundação ou a submergência do solo afetam significativamente a produtividade das culturas. Estas mudanças eletroquímicas servem de partida para o deslocamento do processo de redução resultante da diminuição do oxigênio, levando às alterações significativas no potencial redox, no pH e na condutividade elétrica (VELLOSO; LEAL JUNIOR; OLIVEIRA, 1993).

2.3.2.1 pH do solo submetidos ao encharcamento

O pH do solo nas parcelas experimentais se manteve neutro ou próximo da neutralidade, com seu valores médios apresentado na Figura 31. As parcelas que foram submetidas ao primeiro período de inundação, denominado P1, apresentaram maiores valores de pH medidos, já que ocorreu aos 47 dias após o plantio, sendo que o calcário aplicado para a correção do solo dos vasos, no momento do seu preenchimento, encontrava-se em seu estágio inicial de reação como o solo. É uma situação diferente das encontradas nas áreas que tradicionalmente são alagadas, onde normalmente os valores de pH caracterizam-se ácidos. De acordo Medeiros; Do; Gianluppi (2004)

em estudo feito em solos de cinco áreas de várzeas no estado de Roraima obteve média de alumínio trocável de $3,26 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e os todos os solos apresentaram-se ácidos em todos os horizontes com média de pH 4,8.

Os valores médios de pH, próximos a neutralidade, podem ter ocorrido devido à calagem feita no solo no momento do plantio da cana-de-açúcar, que sob condição de inundação; ocasionou as reações químicas liberando as bases e neutralizando a acidez do solo. Camargo; Santos e Rossiello (1993) afirma que associados às alterações do potencial de oxiredução (E_H), verificam-se aumentos no pH de solos ácidos devido à sua redução, enquanto que em solos alcalinos, observa-se o decréscimo do pH devido à acumulação mais intensa de CO_2 , fazendo com que a maioria dos solos inundados se encontrem em valores próximos à neutralidade.

Figura 31 – Potencial médio de hidrogênio nas parcelas experimentais submetidas aos diferentes tratamentos

Médias seguidas da mesma letra, entre os tratamentos, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Os valores médios de pH nos períodos que ocorreram as inundações das parcelas experimentais apresentaram valores médios de 7,09, 6,84 e 6,75 para 67, 210 e 305 DAP, respectivamente, como é apresentado na Figura 32. Observa-se que ao longo do ciclo cultural da cana-de-açúcar o poder corretivo do calcário foi decrescendo, uma vez que as condições de encharcamento aceleram as reações de neutralização, propiciando um ambiente favorável para as plantas se desenvolverem e extrair os nutrientes necessários ao seu desenvolvimento, tendendo a condição inicial. Além disso, aos 150 DAP adicionou-se material orgânico (5 kg de esterco) nas

parcelas e essa condição segundo Tibau (1984) é uma fonte de prótons H^+ e ácidos orgânicos, o que se reflete no pH do solo. Segundo Luz; Ferreira e Bezerra (2002) os solos brasileiros em sua maioria, são ácidos. As principais causas da acidez são a lavagem do perfil do solo pelas águas da chuva, a retirada do cálcio e magnésio pelo cultivo intensivo, a erosão que remove a camada mais superficial do solo, que possui maiores teores de bases, e a adubação com fertilizantes com radicais ácidos, como o sulfato de amônio e o nitrato de amônio.

Figura 32 – Potencial médio de hidrogênio nas parcelas experimentais submetidas aos diferentes períodos de inundação ao longo do ciclo cultural da cana

Médias seguidas da mesma letra, entre os períodos, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Nos dias de avaliação dentro dos períodos ao quais as plantas estiveram submetidas ao encharcamento, os valores médios de pH diferenciaram apenas no dois primeiros dias como apresentado na Figura 33, mantendo-se iguais no restante dos dias avaliados, mas apresentando um tendência de redução a partir do oitavo dia de inundação. Moraes e Dynia (1992) observaram que a inundação provocou o aumento do pH da solução do solo e que este valor diminuiu após a drenagem. Em solos ácidos, o aumento do pH, após a submergência, depende não somente da relação do íon OH^- e do consumo do íon H^+ , mas também da relação de íons H^+ consumidos/elétrons consumidos. Para o aumento do pH, duas condições são necessárias: um processo de redução bem desenvolvido e a presença suficiente de ferro reduzido. A explicação provável é de que substâncias, tais como compostos ferrosos (Fe^{2+}), sulfeto e amônia, formadas

sob condições reduzidas, são mais básicas do que quando sob condições oxidadas. O decréscimo no pH de solos alcalinos, após a submersão, pode ser explicado por várias alterações químicas e biológicas. A decomposição da matéria orgânica produz CO_2 , o qual reage com H_2O para formar ácido carbônico, que se dissocia em íons H^+ e HCO_3^- .

Figura 33 – Potencial médio de hidrogênio ao longo dos sucessivos dias de avaliação

Médias seguidas da mesma letra, entre os dias, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

Os valores médios de pH para interação Tratamentos*Dias são apresentados nas Figuras 34, 35 e 36. Confrontando os valores médios de pH encontrados nas parcelas para o primeiro período de inundação (P1) (Figura 34), observa-se que os valores de pH não diferiram entre os tratamentos para os dias em avaliação. Quando é feita a comparação dos valores médios de pH dos tratamentos ao longo dos dias de avaliação, observa-se que no primeiro dia de avaliação os valores médios de pH são inferiores aos demais dias, sendo que em alguns tratamentos ocorre diferença estatística, caso do tratamento P1V2, em que o primeiro dia diferiu do quinto e sexto dia de avaliação.

Figura 34 – Potencial médio de hidrogênio nas parcelas experimentais submetidas aos diferentes tratamentos (período x velocidade) ao longo dos dias de avaliação para os tratamentos P1V1, P1V2, P1V3, P1V4 e P1V5

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, sendo que as letras minúsculas comparam as médias dos tratamentos nos diferentes dias de avaliação e as maiúsculas comparam as médias dos dias de avaliação dentro de cada tratamento.

No segundo período de inundação (P2) das parcelas experimentais o valores médios do pH se mostraram mais estável (Figura 35) onde os tratamentos não diferiram entre si, como também os valores médios pH dos tratamentos não apresentaram diferença ao longo dos dias de avaliação.

Figura 35 – Potencial médio de hidrogênio nas parcelas experimentais submetidas aos diferentes tratamentos (período x velocidade) ao longo dos dias de avaliação para os tratamentos P2V1, P2V2, P2V3, P2V4 e P2V5

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, sendo que as letras minúsculas comparam as médias dos tratamentos nos diferentes dias de avaliação e as maiúsculas comparam as médias dos dias de avaliação dentro de cada tratamento.

As parcelas que foram inundadas no terceiro período (P3) apresentaram valores médios de pH iguais para as diferentes velocidades de rebaixamento do NF, como também não diferiram ao longo dos dias de avaliação (Figura 36).

Figura 36 – Potencial médio de hidrogênio nas parcelas experimentais submetidas aos diferentes tratamentos (período x velocidade) ao longo dos dias de avaliação para os tratamentos P3V1, P3V2, P3V3, P3V4 e P3V5

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, sendo que as letras minúsculas comparam as médias dos tratamentos nos diferentes dias de avaliação e as maiúsculas comparam as médias dos dias de avaliação dentro de cada tratamento.

Os valores médios de pH para os três períodos que a cultura sofreu o estresse pela inundação são apresentados na Figura 37. As parcelas inundadas aos 67 dias após o plantio apresentaram valores de pH no solo superiores aos demais períodos 210 e 305, exceto o primeiro dia. Observando os valores de pH nos diferentes dias de avaliação, o primeiro período de inundação apresentou valores médios de pH maiores que nos demais períodos (210 e 305).

Figura 37 – Potencial médio de hidrogênio nas parcelas experimentais nos diferentes de períodos encharcamento submetidas a diferentes velocidades de rebaixamento do NF ao longo dos dias de avaliação

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, sendo que as letras minúsculas comparam as médias dos períodos nos diferentes dias de avaliação e as maiúsculas comparam as médias dos dias de avaliação dentro de cada período.

2.3.2.2 Potencial de oxiredução do solo submetido ao encharcamento

O potencial médio de oxiredução no solo das parcelas experimentais as quais foram submetidas aos tratamentos encontra-se na Figura 38. Os tratamentos apresentaram valores bastante diferenciados em função da absorção dos íons do solo pela planta e também pela adição de matéria orgânica às parcelas experimentais aos 150 DAP, observados nos valores médios obtidos nas leituras feitas nos tratamentos P2 e P3. Os valores obtidos nas leituras variaram entre 357,60 mV (extremo superior) para o primeiro período de inundação acontecido aos 67 dias após a inundação das parcelas e -59,2 mV (extremo inferior), segundo período de inundação das parcelas. Observa que o terceiro período apresentou valores intermediários entre 166,14 mV (extremo superior) e -14,22 mV (extremo inferior), sendo que os valores negativos foram obtidos nas parcelas que estiveram submetidas a uma menor velocidade rebaixamento. Calheiros et al. (2000) trabalhando em um solo Podzólico Vermelho-Amarelo abrupto, a moderado e espesso, textura arenosa, unidade Serrinha (Arenic Abruptic Paleudalt), ácido, de média fertilidade,

retirado de uma várzea, cultivado com trigo e sob a condição de encharcamento encontrou um decréscimo do potencial oxiredução, partindo de uma condição inicial 100 mV e, após alcançar um ponto mínimo de -400 mV, com 5,5 h de excesso umidade, elevando-se gradativamente, atingindo um ponto intermediário de -240 mV, após 12,5 h. A intensidade de decréscimo do potencial de oxiredução, após a inundação, está relacionada ao seu valor inicial, pH inicial, ao conteúdo de matéria orgânica, à temperatura e à quantidade de receptores de elétrons (agentes oxidantes) existentes no solo (PONNAMPERUMA, 1972).

Figura 38 – Potencial médio de oxiredução nas parcelas experimentais submetidas aos diferentes tratamentos

Médias seguidas da mesma letra, entre os tratamentos, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Os valores médios do potencial de oxiredução obtidos nos distintos períodos de inundação são apresentados na Figura 39. As condições presentes nos diferentes períodos avaliados caracterizam as leituras. Aos 67 DAP o solo das parcelas encontrava-se com um baixo teor de matéria orgânica e plantas em um estágio inicial de desenvolvimento e também submetido a uma condição de calagem. No segundo período de inundação, 210 DAP, o solo tinha recebido uma adubação orgânica na quantidade de 5 kg por parcela e o calcário estava em franco processo de neutralização, uma vez que as parcelas estavam submetidas a irrigação no período anterior a inundação. O valor médio do potencial de oxiredução encontrado aos 305 dias voltou a aumentar, atingindo valores de 63,47 mV, possivelmente, em função da decomposição da material orgânica

e redução do pH do solo, pois segundo Sidiras e Pavan (1985) teores mais elevados de matéria orgânica amenizam o efeito da acidificação, como mostra a Figura 32. De acordo Abreu e Lopes (1988) fatores como teor de matéria orgânica, temperatura e a quantidade de receptores de elétrons existentes no solo influenciam o decréscimo do potencial oxiredução após a inundação do solo.

Figura 39 – Potencial médio de oxiredução nas parcelas experimentais submetidas aos diferentes períodos de inundação ao longo do ciclo cultural da cana-de-açúcar

Médias seguidas da mesma letra, entre os períodos, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

O potencial médio de oxiredução do solo referente às velocidades de rebaixamento do NF nas parcelas experimentais é apresentado na Figura 40. As velocidades de rebaixamento não influenciaram nos valores médios do potencial de oxiredução, apresentando valores médios variando entre 190,85 e 65,93 mV, apresentando uma tendência visível de decréscimo a medida que se tinha maior umidade do solo, ou seja, nas menores velocidades de rebaixamento. Os valores, apesar de apresentarem-se bastantes diferentes, da ordem de 65,5%, não apresentaram significância quando se fez a regressão nos valores obtidos; a causa seria o alto valor do coeficiente de variação dos dados analisados. Segundo Farrell et al. (1991) embora simples, a medida do potencial de oxiredução na solução do solo, através de medidas de potencial de eletrodo, encontra-se sujeita a incertezas, sendo as principais referentes ao fato de que os eletrodos de platina, utilizados na determinação do potencial "redox", respondem a mais de uma semi-

reação "redox". Este eletrodo pode ser freqüentemente contaminado por uma cobertura de óxidos e outras impurezas e o limite de detecção pode não ser suficiente para captar a transferência de elétrons entre as concentrações das espécies "redox", geralmente muito baixas. Um outro erro passível de ocorrer, dá-se sobre o potencial de junção, cujo valor difere bastante da solução usada para aferir o eletrodo de platina.

Figura 40 – Potencial médio de oxiredução nas parcelas experimentais submetidas às diferentes velocidades de rebaixamento do NF

Os potenciais médios de oxiredução ao longo dos dias de avaliação são apresentados na Figura 41. Observa-se um aumento nos valores médios à medida que reduz o teor de umidade na profundidade de leitura. Apresentando valores de 37,38 mV no segundo dia, 121,90 mV no quarto dia, 203,39 mV no oitavo dia e chegando 298,61 mV no ultimo dia de avaliação o efeito do estado de redução do solo sobre as plantas é descrito por Tian-Yen (1985) da seguinte forma: oxidado, apresentando $E_H > 400$ mV com predomínio de O_2 e materiais na forma oxidada, considerado benéfico para culturas de sequeiro; fracamente reduzido, apresentando faixa de E_H entre 200 a 400 mV e as reações com O_2 , NO^{3-} e Mn^{4+} na forma reduzida, com crescimento normal do arroz inundado; Moderadamente reduzido, apresentando faixa de E_H entre -100 a 200 mV e as reações com Fe^{3+} na forma reduzida e presença de substâncias orgânicas redutoras, com efeito maléfico para culturas de sequeiro; Fortemente reduzido, apresentando $E_H < -100$ com predomínio de CO_2 e H^+ reduzido, apresentando fitotoxidez no arroz pelas substâncias reduzidas. Enquadrando os

valores de potencial de oxiredução obtidos nas parcelas inundadas ao longo do ciclo da cultura nos três períodos de inundação e submetidas as cinco velocidades de rebaixamento do NF nas faixas de valores sugerida por Tian-Yen (1985) pode-se dizer que o solo encontrava-se com fraca a moderada redução, estando as plantas submetidas a condições que ocasionaria o crescimento normal e/ou efeitos maléfico para culturas de sequeiro, respectivamente.

Figura 41 – Potencial médio de oxiredução ao longo dos sucessivos dias de avaliação
Médias seguidas da mesma letra, entre os dias, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

Os valores médios de potencial de oxiredução resultante da interação Tratamentos*Dias são apresentados nas Figuras 42, 43 e 44. A Figura 42 apresenta os valores médios de potenciais de oxiredução dos tratamentos compreendidos no primeiro período de estresse das plantas, no qual os tratamentos não apresentaram diferença entre si para o potencial de oxiredução do solo ao longo dos dias de avaliação. No entanto o potencial de oxiredução ao longo dos dias de avaliação dentro de cada tratamento oscilou com picos no terceiro e nono dias após a inundação.

Figura 42 – Potencial médio de oxiredução nas parcelas experimentais submetidas aos diferentes tratamentos (período x velocidade) ao longo dos dias de avaliação para os tratamentos P1V1, P1V2, P1V3, P1V4 e P1V5

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, sendo que as letras minúsculas comparam as médias dos tratamentos nos diferentes dias de avaliação e as maiúsculas comparam as médias dos dias de avaliação dentro de cada tratamento.

A Figura 43 apresenta os valores médios de potenciais de oxiredução dos tratamentos compreendido no segundo período de estresse das plantas, onde havia uma condição edafológica de grande quantidade de matéria orgânica e plantas no seu estágio pleno desenvolvimento. Nesta situação os tratamentos não apresentaram diferenças entre si, em sua grande maioria. No entanto quando analisa os valores de cada tratamento ao longo dos dias percebe-se que a velocidade de

rebaixamento do NF interfere na grandeza dos valores médios dos potenciais de oxiredução, uma vez que velocidade de rebaixamento é sinônimo de umidade do solo condicionando um meio dielétrico, e conseqüentemente, as leituras de potencial.

Figura 43 – Potencial médio de oxiredução nas parcelas experimentais submetidas aos diferentes tratamentos (período x velocidade) ao longo dos dias de avaliação para os tratamentos P2V1, P2V2, P2V3, P2V4 e P2V5

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, sendo que as letras minúsculas comparam as médias dos tratamentos nos diferentes dias de avaliação e as maiúsculas comparam as médias dos dias de avaliação dentro de cada tratamento.

A Figura 44 apresenta os valores médios de potenciais de oxiredução dos tratamentos compreendido no terceiro período de estresse das plantas. Os tratamentos continuam apresentar valores de potenciais de oxiredução estatisticamente iguais com igual oscilação dos seus valores ao longo dos dias de avaliação, relacionando os maiores valores lidos ao menor teor de umidade.

Figura 44 – Potencial médio de oxiredução nas parcelas experimentais submetidas aos diferentes tratamentos (período x velocidade) ao longo dos dias de avaliação para os tratamentos P3V1, P3V2, P3V3, P3V4 e P3V5

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, sendo que as letras minúsculas comparam as médias dos tratamentos nos diferentes dias de avaliação e as maiúsculas comparam as médias dos dias de avaliação dentro de cada tratamento.

Os valores médios de potencial de oxiredução resultados da interação Períodos*Dias são apresentados na Figura 45. Apresentam-se diferentes entre os períodos de avaliação e oscilando entre os dias de leituras, diferindo no início da inundação e igualando nas leituras finais da avaliação.

Figura 45 – Potencial médio de oxiredução nas parcelas experimentais nos diferentes de períodos encharcamento submetidas a diferentes velocidades de rebaixamento do NF ao longo dos dias de avaliação

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, sendo que as letras minúsculas comparam as médias dos períodos nos diferentes dias de avaliação e as maiúsculas comparam as médias dos dias de avaliação dentro de cada período.

2.3.3 Parâmetro de troca gasosa

2.3.3.1 Oxigênio dissolvido na solução do solo submetido ao encharcamento

A principal consequência do encharcamento do solo é a diminuição da concentração de oxigênio, o que dificulta a respiração radicular e acarreta outros problemas, como: parada do processo ativo de absorção de nutrientes (o qual depende da respiração) e ocorrência de respiração anaeróbia pela planta e pelos microrganismos do solo, causando acúmulo de substâncias tóxicas como metano, etileno e gás sulfídrico (PIRES; SOPRANO; CASSOL, 2002).

Os resultados da análise de variância para valores médios de oxigênio dissolvido na solução do solo, amostrado em poços de observação instalados na parcelas experimentais, são apresentados na Tabela 17. Dentre as causas de variação que compõe a tabela da análise de variância apresentaram significância para os tratamentos, períodos, dias, interação tratamentos*dias e interação períodos*dias. As causas de variação que apresentaram significância serão analisadas na sequência.

Tabela 17 – Resultados dos quadrados médios da análise de variância do oxigênio dissolvido (OD), medidos nas parcelas submetidas ao encharcamento com o rebaixamento do NF a uma profundidade de 0,30 m em 3, 6, 9, 12 e 15 dias nos períodos de 67, 210 e 305 DAP

Causas de variação	GL	QM
Tratamentos	14	7,32 ^{**}
Períodos	2	13,85 ^{**}
Velocidades	4	2,80 ^{ns}
Dias	8	18,89 ^{**}
Tratamentos*Dias	120	5,18 ^{**}
Períodos*Dias	16	12,94 ^{**}
Blocos	3	7,95 ^{ns}
Resíduo	402	3,24
Total	539	
CV (%)		58,00
Média geral		3,12

^{**} significativo ao nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F.

^{ns} significativo ao nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F.

Os teores médios de oxigênio dissolvido nos poços de observação presente nas parcelas no qual foram aplicados os tratamentos são apresentados Figura 46. Os tratamentos não apresentaram diferença entre si para os teores de oxigênio dissolvido, apresentando valores médios variando entre 2,44 mg L⁻¹, para a combinação do estresse devido ao rebaixamento de 0,30 m em 3 dias ocorrido ao 67 DAP, e 3,79 mg L⁻¹, combinando o rebaixamento de 0,30 m em 6 dias no período de 305 DAP. Os valores médios apresentaram um coeficiente de variação elevado de 58, com uma variação de 35,62 % entre valores médios extremos, sendo assim o teste de média perdeu a sensibilidade.

Na legislação federal, a Resolução nº 20 DO CONAMA, são impostos os limites mínimos de oxigênio dissolvido de 6, 5, 4, 2, 6, 4, 5 e 3 mg L⁻¹, para as águas classe 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 respectivamente.

Figura 46 – Teor médio de oxigênio dissolvido nos poços de observação das parcelas experimentais submetidas aos diferentes tratamentos

Médias seguidas da mesma letra, entre os tratamentos, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Os valores médios de oxigênio dissolvido nos diferentes períodos de avaliação são apresentados na Figura 47, onde se observa teores médios obtidos aos 305 DAP de $3,38 \text{ mg L}^{-1}$, diferentes dos teores médios resultante das leituras feitas aos 67 DAP, com valor médio de $2,82 \text{ mg L}^{-1}$, e que ocorreu um aumento nos valores médios ao longo dos períodos de avaliação. As condições climáticas nos diferentes períodos foram distintas; chama-se atenção para temperatura, aos 65 DAP, temperaturas do ar entre 20 e 35°C , aos 210 DAP, temperatura entre variando entre 10 e 25°C e aos 305 DAP, temperatura variando entre 12 e 33°C . As leituras foram feitas no horário mais quente do dia com objetivo de caracterizar uma condição extrema. Após essa caracterização pode-se dizer que a distribuição dos teores médios de oxigênio dissolvido na solução do solo foi influenciada pela temperatura, pois segundo Fiorucci e Benedetti Filho (2005) é o fator mais importante que a no controle da solubilidade do O_2 na água. Como a solubilidade dos gases em água diminui com a elevação da temperatura, a quantidade de oxigênio que se dissolve a 0°C ($14,2 \text{ mg L}^{-1}$) é mais do que o dobro da que se dissolve a 35°C ($7,0 \text{ mg L}^{-1}$). Deste modo, águas de rios ou lagos aquecidos artificialmente como resultado de poluição térmica contêm menos OD. A presença de fertilizante no solo resultante da calagem, fosfatagem e adubação de cobertura, com nitrogênio e potássio, podem ter influenciado nos menores teores de oxigênio dissolvido, pois segundo Fiorucci e Benedetti Filho (2005) embora insignificante quando comparada à temperatura, a salinidade também influencia na capacidade da água em dissolver

oxigênio. O aumento da salinidade diminui a solubilidade do O_2 na água. Assim, a quantidade de minerais ou a presença de elevadas concentrações de sais dissolvidos na água em decorrência de atividades potencialmente poluidoras podem, mesmo que em pequena intensidade, influenciar o teor de OD na água. Desta forma, a salinidade é a principal causa do menor valor de OD nas águas salgadas, em relação ao mesmo valor em águas doces em condições idênticas de temperatura e pressão atmosférica.

Figura 47 – Teor médio de oxigênio dissolvido nos poços de observação nas parcelas experimentais submetidas aos diferentes períodos de inundação ao longo do ciclo cultural da cana

Médias seguidas da mesma letra, entre os períodos, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Os teores médios de oxigênios dissolvidos ao longo dos dias de avaliação são apresentados na Figura 48, estando as leituras numa faixa de 4,4 e 2,5 mg L⁻¹, acontecendo uma redução e estabilização nos valores médios das leituras com o decorrer dos dias de avaliação ou profundidade do nível freático. De acordo Fiorucci e Benedetti Filho (2005) o consumo de oxigênio, em condições naturais, é compensado pelo oxigênio produzido na fotossíntese e pelo “reabastecimento” de oxigênio com a aeração da água através do fluxo da água em cursos d’água e rios pouco profundos. Porém, a água estagnada ou a que está situada próxima ao fundo está, com frequência, quase completamente sem oxigênio, devido à sua reação com a matéria orgânica

e à falta de qualquer mecanismo que possibilite sua reposição com rapidez, já que a difusão, possível forma de reposição de O_2 , é um processo lento.

Figura 48 – Teor médio de oxigênio dissolvido nos poços de observação nas parcelas experimentais ao longo dos sucessivos dias de avaliação

Médias seguidas da mesma letra, entre os dias, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Os valores médios de oxigênio dissolvido resultante da interação Tratamentos*Dias são apresentados nas Figuras 49, 50 e 51. A Figura 49 e apresenta os valores médios de oxigênio dissolvidos obtidos nas parcelas que continha as plantas que estiveram submetidas a inundação e posterior rebaixamento com velocidades de 3, 6, 9, 12 e 15 dias aplicadas aos 67 DAP, observa-se que os tratamentos não diferiram entre si nos diferentes dias de avaliação, assim como as leituras dos tratamentos na sua grande maioria não apresentaram diferença durante os dias avaliados, exceto o tratamento P1V4 (Figura 49d) que apresentou teores médios de $8,55 \text{ mg L}^{-1}$ no primeiro dia de avaliação diferindo dos dias três com $2,45 \text{ mg L}^{-1}$, sete com $1,98 \text{ mg L}^{-1}$, oito com $2,80 \text{ mg L}^{-1}$ e nove com $2,15 \text{ mg L}^{-1}$. Os baixos valores obtidos caracterizam águas estagnadas ou com uma baixa velocidade de escoamento, no entanto o sistema radicular necessita de oxigenação, através da circulação da água, mesmo que essa seja num sistema fechado, a exemplo da hidroponia, que segundo Kehdi (2009) tem o objetivo estimular o crescimento da planta controlando as quantidades de água, de sais minerais e, o mais importante, de oxigênio dissolvido, acessíveis às plantas. Essa "oxigenação" da zona radicular é primordial, e um das condições essenciais para o processo de crescimento das plantas. A falta de oxigênio inibe a formação e o crescimento das raízes e reduz a percentagem de raízes, a massa radicular e o comprimento das raízes. Além disso,

é em presença do oxigênio que são transportados os elementos nutritivos da planta, sob a forma de moléculas. Quando a respiração aeróbica cessa nas raízes, os níveis de energia caem rapidamente, reduzindo a absorção e transporte de íons (KOZLOWSKI, 1997). Assim, o alagamento ou o encharcamento do solo pode causar redução imediata nas trocas gasosas entre a planta e o meio ambiente (ARMSTRONG et al. 1994; LIAO; LIN, 2001). Entretanto, sistemas radiculares privados de oxigênio são pouco eficientes em suprir nutrientes minerais para si mesmos e para a parte aérea (LIAO; LIN, 2001).

Figura 49 – Teor médio de oxigênio dissolvido nos poços de observação nas parcelas experimentais submetidas aos diferentes tratamentos (período x velocidade) ao longo dos dias de avaliação para os tratamentos P1V1, P1V2, P1V3, P1V4 e P1V5

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, sendo que as letras minúsculas comparam as médias dos tratamentos nos diferentes dias de avaliação e as maiúsculas comparam as médias dos dias de avaliação dentro de cada tratamento.

A intenção de avaliar-se o teor de oxigênio dissolvido foi de relacionar os teores obtidos com a condição de alagamento das parcelas. Uma vez que segundo Janzem; Schulz e Lamon (2008) o consumo de oxigênio para a decomposição da matéria orgânica e a respiração realizada pelo ecossistema aquático colaboram para a diminuição da quantidade de oxigênio dissolvido na água. As parcelas experimentais além de submetida a inundação a partir dos 150 DAP fez se necessário a deposição de um volume de material orgânico, de forma a melhora as condições experimentais. Era de se esperar que nos inícios das inundações, ou seja, nos primeiros dias do estresse, quando a o NF freático esteve em contato com material orgânico o teor de oxigênio dissolvido reduzisse, no entanto não ocorreu. Sendo assim o material orgânico não influenciou na concentração de oxigênio dissolvido nas camadas iniciais do perfil das parcelas, já que no primeiro dia quando o NF estava diretamente em contato com o material orgânico os teores de oxigênio dissolvido atingiu o maior valor, $4,41 \text{ mg L}^{-1}$, como pode ser visto na Figura 48.

Os baixos teores de oxigênio dissolvido na solução do solo, além da não circulação da água, podem ter ocorrido em função das altas temperaturas presente no ambiente e pela demanda deste pelo sistema radicular das plantas, pois segundo Crawford e Brändle (1996) sob inundação, a respiração aeróbica das plantas e microorganismos reduz rapidamente a concentração de oxigênio na solução do solo, levando, assim, a formação de um ambiente hipóxico ou anóxico. Sendo assim, a tolerância da cultura explorada a condição de alagamento, seja temporária ou por períodos duradouros tem uma importância em regiões propícias a tais eventos. De acordo com Kozłowski (1984) dependendo da espécie em questão e da duração da inundação, tanto a germinação das sementes quanto o crescimento das plantas podem ser comprometidos. Assim, o conhecimento das vias de adaptação a essas condições é essencial, uma vez que o encharcamento permanente ou temporário pode ocorrer em muitas regiões. Algumas plantas morrem rapidamente durante o encharcamento enquanto outras são capazes de sobreviver nestas condições (COSTA et al., 2006).

Os teores médios de oxigênio dissolvido referente aos tratamentos avaliados no segundo período de inundação das parcelas são apresentados na Figura 50. Os tratamentos não apresentaram diferenças entre si para os diferentes dias de avaliação, assim como os valores das leituras ao longo dos dias dentro de cada tratamento se mostraram iguais.

Figura 50 – Teor médio de oxigênio dissolvido nos poços de observação nas parcelas experimentais submetidas aos diferentes tratamentos (período x velocidade) ao longo dos dias de avaliação para os tratamentos P2V1, P2V2, P2V3, P2V4 e P2V5

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, sendo que as letras minúsculas comparam as médias dos tratamentos nos diferentes dias de avaliação e as maiúsculas comparam as médias dos dias de avaliação dentro de cada tratamento.

Os teores médios de oxigênio dissolvido referente aos tratamentos avaliados no terceiro período de inundação das parcelas são apresentados na Figura 51. Os valores obtidos nas leituras dos diferentes tratamentos ao longo dos dias de avaliação não apresentaram diferenças, assim como os teores de oxigênio dissolvido em cada tratamento ao longo dos dias de avaliação.

Figura 51 – Teor médio de oxigênio dissolvido nos poços de observação nas parcelas experimentais submetidas aos diferentes tratamentos (período x velocidade) ao longo dos dias de avaliação para os tratamentos P3V1, P3V2, P3V3, P3V4 e P3V5

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, sendo que as letras minúsculas comparam as médias dos tratamentos nos diferentes dias de avaliação e as maiúsculas comparam as médias dos dias de avaliação dentro de cada tratamento.

A Figura 52 apresenta a comparação entre os teores médios de oxigênio dissolvido resultante da interação Períodos*Dias. Com exceção do primeiro dia de inundação aos 67 DAP, todas as leituras, entre períodos e dentro de cada período para os dias de avaliação, para o teor médio de oxigênio dissolvido foram iguais.

Figura 52 – Teor médio de oxigênio dissolvido nos poços de observação nas parcelas experimentais nos diferentes de períodos encharcamento submetidas a diferentes velocidades de rebaixamento do NF ao longo dos dias de avaliação

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, sendo que as letras minúsculas comparam as médias dos períodos nos diferentes dias de avaliação e as maiúsculas comparam as médias dos dias de avaliação dentro de cada período.

2.3.4 Radiação fotossinteticamente ativa (PAR) no interior da casa de vegetação

A extensão do ciclo de uma cultura pode ser subdividida, de maneira simplificada, em três fases fenologicamente distintas: 1ª) ocorre o domínio do solo nas interações com a radiação eletromagnética – é a fase que envolve o plantio, a germinação e o desenvolvimento inicial, em que a cultura recobre pouca porcentagem da superfície do solo; 2ª) ocorre o domínio da cobertura verde nas interações da cultura com a radiação eletromagnética – neste ponto já se pode considerar formado o dossel ou “telhado” da lavoura; na segunda metade desta fase já ocorre o florescimento e a formação dos grãos; e 3ª) sobrevêm a maturação e a senescência – dá-se, então, o secamento e a queda acentuada das folhas, voltando a expor grande porcentagem do solo e, assim, ocorre o domínio conjugado da vegetação seca e do solo exposto (FORMAGGIO, 1989).

O uso de casa de vegetação é responsável por alterações nas variáveis climáticas no seu interior, sendo seus efeitos ainda pouco conhecidos. A radiação solar é uma das principais

variáveis que sofre alteração pelo uso de coberturas plásticas. A avaliação feita dentro da casa de vegetação, onde se encontrava o experimento, apresentou diferenças significativas entres os valores médios da radiação fotossinteticamente ativa (PAR) para os tratamentos, as posições, os horários, os dias, assim como nas interações tratamentos*dias e tratamentos*posições; os resultados da análise de variância são apresentados na Tabela 18.

A faixa do espectro considerada como Radiação Fotossinteticamente Ativa (PAR) ocupa a região que vai de 400 a 700 nm. Mas os processos fotobiológicos dependem do espectro que vai do ultravioleta (200-400 nm) ao infravermelho (740-1600 nm). a faixa compreendida entre 720 e 610nm como frequência que gera forte atividade fotossintética, sendo absorvida pelos pigmentos clorofilas e carotenóides. A faixa entre 610 e 510 nm como uma região espectral de baixo efeito fotossintético e a zona que vai de 510 a 400 nm como a região mais fortemente absorvida pelos pigmentos clorofila e carotenóides, o que resulta em grande atividade fotossintética (TAIZ; ZEIGER, 2004).

Tabela 18 – Análise de variância para a radiação fotossinteticamente ativa (PAR) no interior da casa de vegetação

Causas de variação	G.L.	QM
Tratamentos	3	635223,24 ^{**}
Posições	1	249172,58 ^{**}
Horários	2	2972604,05 ^{**}
Dias	1	4013195,25 ^{**}
Repetições	3	8033,32 ^{ns}
Tratamentos*Horários	6	105484,68 ^{**}
Tratamentos*Dias	3	111890,92 ^{**}
Tratamentos*Posições	3	7340,02 ^{ns}
Resíduo	145	25972,11
Total	167	

^{**} significativo ao nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F.

^{ns} significativo ao nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F.

Os tratamentos propostos apresentaram valores médios de radiação PAR de 514 e 231 mmol m⁻² s⁻¹ fora e dentro do ambiente protegido, respectivamente, correspondendo a uma diferença potencial de 55%. Beckmann; Duarte e Paula (2006) observaram que a radiação solar global interna representou 76% da radiação solar global externa, obtendo-se uma transmitância da cobertura plástica que variou de 63 a 93%. Também, em trabalho realizado por Reisser et al. (2003) foi observado que em estufa com tela antiafídea ao seu redor e com uma cobertura de

polietileno transparente de baixa densidade a redução de radiação fotossinteticamente ativa foi da ordem de 33% quando comparada com a incidente no lado de fora da estufa. A radiação PAR no interior do ambiente foi igual nas três secções da casa de vegetação. A Figura 53 apresenta os valores médios de radiação PAR dos tratamentos. Segundo Seeman (1979); Martin; Novoa e Gomes (1982) e Kurata (1990) a densidade de fluxo da radiação solar no interior da estufa é menor que a verificada externamente, devido a reflexão e à absorção do material da cobertura plástica. A reflexão é determinada pelas condições da superfície da cobertura (período de utilização, deposição de poeiras, etc.) e pelo ângulo de incidência da radiação solar sobre a cobertura (SEEMAN, 1979; MONTERO; CASTILLA; GUTIERREZ DE RAVÉ, 1985; KURATA, 1990). Scarascia-Mugnozza et al. (2004) verificaram que a transmissividade da PAR de quatro filmes plásticos biodegradáveis diminuiu de 80 para 67%, aproximadamente, no período de exposição de 140 dias. Segundo Kittas; Baille e Giaglaras. (1999), pequenas diferenças na transmissividade do material de cobertura à radiação solar podem ter efeito significativo no crescimento e no desenvolvimento das culturas. Cockshull; Graves e Cave (1992) constataram que o aumento de 1% da RFA proporcionou um acréscimo de aproximadamente 1% na produtividade do tomateiro.

Figura 53 – Valores médios de radiação PAR para as diferentes secções

Valores médios seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

Para Reisser Jr. et al. (2003) as alterações morfológicas que ocorrem nas plantas cultivadas em estufas plásticas, típicas de plantas de sombra, é que contribuem para que estas mantenham os mesmos níveis de produção de biomassa em ambientes com redução de radiação. Outro efeito benéfico que influencia a produtividade é o aumento da eficiência de uso de radiação pelas plantas cultivadas nestes ambientes (RADIN et al., 2003).

Os valores médios de radiação PAR de 266,65 e 346,97 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ nas duas posições, em sentido vertical, inferior e superior, respectivamente, são apresentados na Figura 54. A interceptação da radiação ao longo do dossel da cultura justifica esses valores distintos.

Figura 54 – Valores médios de radiação PAR em posições verticais ao longo do dossel
Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

Takeda (1999), em experimento realizado com vasos empilhados atribuiu o gradiente negativo de produção que se estabeleceu da porção mais alta das colunas de vasos empilhados para os vasos dispostos nas porções mais baixas, à reduzida oferta de Radiação Fotossinteticamente Ativa nas camadas inferiores.

Os valores médios de PAR foram 259, 552 e 110 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ para os horários 8:00, 12:00 e 16:00 horas, respectivamente (Figura 55). A radiação ao longo do dia apresenta intensidade diferenciada, com expressão nos valores obtidos. Tendência semelhante foi encontrada por Miranda (2005) onde a radiação fotossinteticamente ativa (PAR) variou entre 645,66 $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (1º dia às 12 horas) a 87,66 $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (2º dia às 16 horas) porém às 18 horas de todos os dias, a PAR era nula, visto não haver mais radiação.

Faria Jr. e Lima (2000) colocam que essencialmente, todos os processos fisiológicos dependem da quantidade e qualidade da luz. A intensidade de radiação solar dentro de um ambiente protegido varia com a latitude, com a estação do ano, horário do dia, presença ou não de nuvens e transmitância da cobertura. A disposição e o formato da casa vegetação podem ter influenciado nos valores medidos no ambiente interno. Grodzky; Brenner e Scotti (1991) observaram maior taxa de assimilação da radiação solar no início do dia em modelo tipo arco quando comparado ao modelo capela (duas águas).

Figura 55 – Valores médios de radiação PAR para os diferentes horários
Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

Nos dois dias que se seguiram os valores médios da PAR apresentaram-se diferentes estatisticamente (Figura 56). A diferença de intensidade de radiação foi devida a condições climáticas presentes nos distintos dias. O segundo dia apresentou-se nublado pela manhã e chuvoso no período vespertino. Melo Junior (2003) em suas avaliações observou que uma mudança nas condições climáticas acaba por interferir na coleta de dados no decorrer do tempo. Para ele ficou perceptível que a diferença entre valores foi devido a problemas climáticos, onde a radiação fotossinteticamente ativa (PAR) no dia para o período compreendido entre 12 e 14 horas, em destaque, teve uma queda brusca devido ao tempo ter nublado. Em dias de céu limpo, 45% da radiação global interna corresponderam à radiação difusa, ao passo que externamente foi de 24%, o que evidenciou o efeito dispersante da cobertura plástica. Esse incremento no percentual da

radiação difusa dentro das estufas é um fenômeno importante a ser considerado, uma vez que a radiação difusa pode ter melhor aproveitamento pelas plantas. Estudos constataram que os valores de eficiência do uso da radiação em ambiente protegido, têm sido maiores do que os encontrados no campo, justamente por causa do aumento da radiação difusa (SINCLAIR; SHIRAIWA; HAMMER, 1992). Melo Junior (2003) fazendo leitura de PAR em dois dias distintos obteve uma máxima taxa de transpiração foliar diária, acompanhada de uma variação alta na taxa de radiação fotossinteticamente ativa (PAR) dentro do período de estudo. Os valores da taxa de transpiração foliar máxima foram às 11:00 e às 14:00 horas. Nestes pontos de máxima taxa de transpiração foliar diária a radiação fotossinteticamente ativa (PAR) foi de $1383,33 \mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$ para o primeiro dia e de $1630 \mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$ para o segundo dia.

Figura 56 – Valores médios de radiação PAR para os diferentes dias
Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

Os valores médios de PAR obtidos nos horários de 8:00 e das 16:00 horas foram de 462,62 e 183,41 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 205,53 e 80,18 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 201,29 e 85,80 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 166,29 e 88,86 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, fora e nas secções: entrada, meio e fundo da casa de vegetação, respectivamente, apresentando diferença em relação ao valor 895,73 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ obtido as 12:00 horas na leitura feita no ambiente externo. Para as leituras nas secções ao longo do dia, nos diferentes horários, os valores médios de PAR apresentam diferença estatística apenas para as 12:00 horas, no ambiente interno à casa de vegetação; no entanto no ambiente externo os valores da PAR diferiu nos três horários de avaliação (Figura 57). O fato de se ter dentro do ambiente uma igualdade de valores

de PAR comprova que a radiação incidente no dossel foi a mesma para todas as parcelas. Monteith (1977) Considera-se que, em plantas sadias adequadamente supridas de água e nutrientes, a fotossíntese líquida e a produção de fitomassa sejam proporcionais à quantidade de PAR absorvida pelo dossel. Aikman (1989) constatou que o aumento da radiação difusa, dentro de um ambiente protegido, promoveu maior uniformidade da radiação no interior do dossel, fazendo com que as folhas inferiores e interiores aumentassem a eficiência de interceptação e o uso da radiação. Com isso, maior eficiência de uso da radiação pode ocorrer em função do aumento da contribuição relativa das folhas sombreadas, para o acúmulo de biomassa da cultura, o qual cresce à medida que aumenta a fração difusa.

Figura 57 – Valores médios de radiação PAR para tratamentos nos diferentes horários. Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, sendo que as letras minúsculas comparam médias entre os tratamentos e as maiúsculas comparam médias entre horários.

Na Figura 58 são apresentados os valores de PAR para o desdobramento dos tratamentos para os diferentes dias. Para o ambiente interno à casa de vegetação nos dias que se seguiram os valores médios da PAR nos tratamentos não diferiram em um mesmo dia, com exceção do ambiente externo no primeiro dia. No entanto, quando confrontamos os valores médios da PAR entre os dias para as seções, percebe-se que os valores diferem estatisticamente para todos os tratamentos.

Melo Junior (2003) observou em leituras de PAR em dois dias, um no inverno e outro na primavera, em horário compreendido entre às 7:00 e 8:00 horas para ambos os dias avaliados, que

a radiação fotossinteticamente ativa (PAR) variou de 0 a $186,56 \mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$ e 0 a $348,57 \mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$ no inverno e primavera, respectivamente, assim como um decréscimo abrupto da PAR por volta das 17 horas para os dois períodos avaliados. O valor de máxima taxa de PAR para os dois dias em questão foram na ordem de $1665,56 \mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$ às 13 horas para o primeiro dia (inverno) e de $1737,78 \mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$ às 10 horas para o segundo dia (primavera).

Figura 58 – Valores médios de radiação PAR para seções nos diferentes dias

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, sendo que as letras minúsculas comparam médias entre os tratamentos e as maiúsculas comparam médias entre os dias.

Os valores médios da PAR para o desdobramento dos tratamentos para as posições verticais das medidas são apresentados na Figura 59. Observa-se que tanto no interior da casa de vegetação como no ambiente externo, fora da casa de vegetação, os valores médios da PAR não diferiram para ambas as posições. No entanto, os valores se mostraram diferentes quando medidos nos distintos ambientes, em função da interceptação da radiação pela cobertura plástica. A eficiência de conversão decresce gradualmente com o aumento do fluxo de radiação solar acima do ótimo, podendo ocorrer saturação das folhas superiores. Entretanto, o nível de radiação em que ocorre a saturação nas folhas localizadas no interior do dossel é muito mais elevado, pois a incidência de radiação é menor, e muitas das folhas podem não chegar à saturação (RUSSELL; JARVIS; MONTEITH, 1989). Sinclair e Horie (1989) verificaram que, em baixo IAF, a eficiência de uso da radiação é baixa, pois a maioria das folhas está sujeita à saturação fotossintética por radiação. Como a fração de área foliar sombreada aumenta com o decorrer do ciclo da cultura, aumenta

também a eficiência de uso da radiação. No entanto, em geral, folhas que crescem em menor disponibilidade de radiação têm maior superfície e são mais finas do que folhas que crescem expostas ao sol. Estas são mais espessas, pois formam células paliçádicas maiores ou mais camadas dessas células (BOARDMAN, 1977). Outro fator que pode estar envolvido na diferença entre os índices de área foliar, em ambiente protegido e a campo, é a umidade relativa do ar (UR). Em ambiente protegido a UR é maior. Com isso, o potencial da água na folha tende a ser maior, o que pode explicar a maior área foliar nesse ambiente (GISLEROD; MORTENSEN, 1991).

Figura 59 – Valores médios de radiação PAR para seções nas diferentes posições
Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, sendo que as letras minúsculas comparam médias entre os tratamentos e as maiúsculas comparam médias entre as posições.

2.3.5 Potencial de água na folha

2.3.5.1 Resultado da metodologia de coleta de folhas para determinação do potencial de água na folha da cana-de-açúcar

As temperaturas mantiveram-se próximas, nos horários que foram feitas as avaliações (10:00 e as 14:00 horas), e para os dias que se seguiram. A umidade relativa do ar variou em função dos horários, decrescendo ao longo do dia. Nos dias subsequentes houve um declínio da umidade relativa, no horário das 10:00 horas, do segundo dia em relação ao primeiro, e se manteve estável para o horário das 14:00 horas. Supõe-se que no segundo dia para o horário das

10:00 horas apresentava-se uma pressão de vapor atual menor que a do primeiro dia. O potencial de água no solo encontrava-se, para os dias em estudo, no limiar da capacidade de campo, não exercendo restrição à absorção de água pelas plantas. No estudo do potencial de água na folha é necessário que os valores das variáveis ambientais (temperatura, umidade relativa, pressão de vapor atual, radiação, etc) no decorrer dos dias de avaliação apresentem valores próximos e constantes, de forma a reduzir as interferências dessas variáveis e destacar os valores dos potenciais inerentes aos tratamentos aplicados. Houve diferença estatística significativa entre os tratamentos propostos e para as seguintes causas de variações (dias, interação tratamentos*horários e horários*dias) apresentadas na Tabela 19.

Tabela 19 – Resultado da análise de variância para potencial de água na folha (bar) na cultivar de cana-de-açúcar SP803280

Causas de variação	GL	QM
Tratamentos	2	57,67 ^{**}
Horários	1	3,61 ^{ns}
Dias	1	110,25 ^{**}
Repetições	2	4,48 ^{ns}
Tratamentos*Horários	2	10,54 ^{**}
Tratamentos*Dias	2	4,77 ^{ns}
Horários*Dias	1	64,53 ^{**}
Resíduo	24	2,39
Total	35	
CV (%)	15,48	
Média geral	10,00	

^{**} significativo ao nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F.

^{ns} não significativo ao nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F.

As médias das leituras dos tratamentos apresentadas na Tabela 20 foram iguais para os tratamentos FN e FP, no entanto apresentaram-se diferentes em relação ao tratamento FSP, indicando que se pode usar metade da lâmina foliar, em duas leituras no mesmo dia, desde que se protejam as folhas com papel alumínio, entre as leituras. O isolamento proporcionado apenas pelas nervuras das folhas coletadas não foram suficiente, a ponto de permite que a parte intacta continuasse suas funções fisiológicas da mesma forma se estas encontrassem nas mesmas condições que uma folha intacta.

Tabela 20 – Potencial de água na folha (bar) nos tratamentos folhas sem proteção (FSP), folhas protegidas (FP) e folhas com nervura (FN) na cultivar de cana-de-açúcar SP803280

Tratamentos	bar
FSP	7,56 b
FP	10,62 a
FN	11,81 a

Médias seguidas da mesma letra na vertical não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

Nos dois horários os quais foram feitas as leituras não apresentaram diferença estatística entre as médias medidas (Tabela 21), possivelmente em função das condições hídricas do solo e das variáveis ambientais no interior do ambiente (Tabela 9). Mesmo com as temperaturas e umidade variando entre os horários, os valores mantiveram-se próximos.

Tabela 21 – Potencial de água na folha (bar) nos horários 10:00 e 14:00 horas na cultivar de cana-de-açúcar SP803280

Tratamentos	bar
10	9,68 a
14	10,31 a

Médias seguidas da mesma letra na vertical não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

Nos dias que ocorreram as avaliações as variáveis climáticas: temperatura e umidade relativa do ambiente (Tabela 9), encontrou-se valores de temperatura diferentes para os dois horários e dias que ocorreram as avaliações e valores diferentes de umidade relativa para o horário da 10:00 horas, podendo ser o motivo da significância quando comparadas as médias de potencial de água na folhas entre os dias (Tabela 22).

Tabela 22 – Potencial médio de água na folha (bar) nos dias 1 (10/12/08) e 2 (11/12/08)

Tratamentos	bar
10/12/08	8,24 a
11/12/09	11,74 b

Médias seguidas da mesma letra na vertical não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

As médias dos valores das leituras dos potenciais de água nas folhas dos tratamentos nos diferentes dias e realizadas nos dois horários são apresentadas na Tabela 23. Estas apresentaram diferenças dos tratamentos FP e FSP em relação ao tratamento FN para o horário das 10:00 horas e diferença dos tratamentos FN e FP em relação ao tratamento FSP para o horário das 14:00 horas.

Os valores de potenciais de água na folha para cada um dos tratamentos não se mostraram diferentes entre os horários.

Tabela 23 – Potencial médio de água na folha (bar) nos tratamentos folhas sem proteção (FSP), folhas protegidas (FP) e folhas com nervura (FN) nos dois horários 10:00 e 14:00 horas

Tratamentos	10:00	14:00
FN	12,35 aA	11,27 aA
FP	9,30 bA	11,93 aA
FSP	7,38 bA	7,73 bA

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, sendo que as letras minúsculas comparam médias nas colunas e as maiúsculas nas linhas.

Os valores médios dos potenciais de água nas folhas da cana-de-açúcar para os horários 10:00 e 14:00 horas nos dois dias subsequentes de avaliação são apresentados na Tabela 24. Observa-se que apenas para o horário das 10 horas não ocorreu diferença entre os valores de potenciais de água nas folhas entre os dias de avaliação, apresentando valores médios de 9,27 e 10,09 bar, para os dias 10 e 11 de dezembro de 2008, respectivamente. No entanto as diferenças entre os valores médios 9,27 e 7,22 bar, para o primeiro dia de avaliação, ou valores 10,09 e 13,4 bar, para o segundo dia de avaliação, aparecem tanto para os diferentes horários nos diferentes dias como para o horário das 14:00 horas entre os dias. Destaca-se a influência da temperatura, uma vez que a umidade relativa para esse horário nos dias das avaliações era a mesma como é apresentada na Tabela 9.

Tabela 24 – Potencial médio de água na folha (bar) nos dois horários 10:00 e 14:00 horas para os dois dias de avaliações

Horários	10/12/08	11/12/08
10:00	9,27 aA	10,09 bA
14:00	7,22 bA	13,40 aB

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, sendo que as letras minúsculas comparam médias nas colunas e as maiúsculas nas linhas.

É possível utilizar uma mesma folha da cana-de-açúcar para determinar o potencial de água na folha, no entanto há a necessidade de proteger a fração foliar destacada com um papel alumínio, de forma a conservar os aspectos fisiológicos na parte assimétrica à retirada para a primeira leitura.

2.3.5.2 Potencial de água nas folhas da cana de açúcar Cultivar RB 867515 submetidas à inundação e a irrigação.

As leituras dos potenciais médios de água nas folhas dessa cultivar, sob a condição de encharcamento, não apresentaram diferença; no entanto, as leituras médias, nos diferentes dias e horários, apresentaram significância com pode ser visto na Tabela 25.

Tabela 25 – Resultado da análise de variância para potencial de água na folha (bar) na cultivar de cana-de-açúcar RB 867515 sobre encharcamento entre 67 e 82 dias após o plantio

Causas de variação	GL	QM
Tratamentos	11	441,67 ^{**}
Repetições	3	37,40 ^{ns}
Períodos	1	4617,23 ^{**}
Velocidades	5	26,29 ^{ns}
Horários	1	6467,98 ^{**}
Dias	4	567,11 ^{**}
Períodos*Dias	4	116,54 ^{**}
Períodos*Horários	1	147,28 ^{**}
Horários*Dias	4	49,42 ^{ns}
Resíduo	443	33,89 ^{ns}
Total	454	
CV (%)	28,88	
Média geral	12,25	

^{**} significativo ao nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F.

^{ns} significativo ao nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F.

Os potenciais médios de água na folhas para os diferentes tratamentos são apresentados Figura 60. Os tratamentos referentes ao primeiro período de avaliação apresentaram valores médios de potenciais de água nas folhas semelhantes, em torno de 9,47 bar. Os tratamentos do segundo período apresentaram valores de potencial de água na folha 16,81 e 13,64 bar nas parcelas submetidas a irrigação, testemunha (T), e as que sofreram o rebaixamento do NF de 0,30 m em 6 dias, respectivamente. Os dois períodos de avaliação apresentaram grandezas de potenciais de água nas folhas diferentes, em função das épocas de avaliação, durante o ciclo, e em relação aos estádios fenológicos das plantas como pode observado na Figura 60, podendo as plantas ter sido afetadas pela condição de reduzida radiação fotossinteticamente ativa, em função do ambiente protegido, pois segundo Bono et al. (2001) e Bergonci e Pereira (2002), em estudo de milho, a baixa radiação

fotossinteticamente ativa ocasionou baixos níveis de condutância foliar e conseqüente altos potenciais de água na folha.

Figura 60 – Potenciais médios de água nas folhas cana-de-açúcar submetidos à irrigação e ao encharcamento

Médias seguidas da mesma letra na vertical não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

Na Figura 61 são apresentados os valores médios de potencial de água na folha enfocando as parcelas irrigadas e as submetidas à diferentes velocidades de rebaixamento do NF. Os valores médios de potencial de água nas folhas encontrados apresentaram semelhantes, quando analisado por regressão, apresentando valores de 12,79 e 12,81 bar, para plantas testemunha e para as plantas que estiveram submetidas a velocidade de rebaixamento de 0,30 m em 15 dias, respectivamente (Figura 61). A presença do excesso de umidade no sistema radicular das plantas ou a condição de aeração do mesmo, devido ao controle da umidade nas parcelas testemunha, não interferiu na diferenciação dos valores médios dos potenciais de água na folhas para tais condições. A disponibilidade hídrica nas parcelas submetidas à irrigação encontrava-se numa tensão recomenda para a cultura da cana-de-açúcar, ou seja, inferior a 50 kPa. De acordo com Couto e Sans (2005), a irrigação deve ser realizada antes que a umidade do solo alcance teores abaixo do valor mínimo necessário para a obtenção de uma boa produtividade agrícola. Este valor limite corresponde ao potencial matricial crítico do solo (Ψ_c), ou seja, valor abaixo do qual a planta começa a perder em produtividade devido ao esforço que a mesma tem de realizar para absorver a água do solo contra os esforços de adsorção e capilaridade da água no solo. A este

potencial matricial, corresponde uma umidade denominada umidade crítica (UC), situada entre os valores de umidade correspondente à capacidade máxima de retenção de água no solo, denominada capacidade de campo (CC), e acima da qual o líquido percola ao aquífero, e à umidade remanescente quando ocorre a murcha da planta, denominado ponto de murcha permanente (PM). O potencial matricial crítico (Ψ_c), que varia de cultura para cultura, com o clima, a natureza do solo, o método de irrigação empregado, dentre outros fatores, é obtido experimentalmente. Para o caso da cana de açúcar de -80 a -150 kPa, conforme Vieira (1995).

Figura 61 – Potenciais médios de água nas folhas da cana-de-açúcar nas parcelas irrigadas e nas que sofreram as velocidades de rebaixamento do NF

As médias não diferiram estatisticamente quando submetidas a análise de regressão a 5% de probabilidade

Os potenciais médios de água nas folhas para os diferentes períodos são apresentados na Figura 62. Os valores médios de potenciais de água nas folhas 9,09 e 15,42 bar encontrados nos períodos em que foram submetido o estresse as parcelas experimentais com início aos 67 e 215 DAP, respectivamente, apresentou-se em função das diferentes condições climáticas presente no momento das avaliações. Segundo Hopkins (1999) a transpiração das plantas tende a aumentar quando o gradiente de pressão de vapor entre a folha e o ar atmosférico se eleva. Esse gradiente é calculado em função da temperatura e da umidade relativa do ar, que também pode aumentar quando ocorre o secamento do solo. Para auxiliar a interpretação de resultados, Cleary e Zaerr (1992) citam os seguintes valores de potencial da água na folha: valores até -8 bar são ideais para

o crescimento; de -9 a -12 bar o estresse limita alguns processos de crescimento resultando em menores altura e diâmetro; de -13 a -20 bar ocorre o fechamento acentuado dos estômatos, redução da fotossíntese, sendo que a maioria das culturas sofre estresse e reduz a produção; de -20 a -40 bar forte declínio do crescimento, com o agravamento do déficit há redução no vigor e na capacidade da planta de recuperação quando re-hidratada; de -40 a -50 bar há um estresse muito acentuado e de ocorrência rara em cultivos comerciais.

Figura 62 – Potencial médio de água nas folhas da cana-de-açúcar nos dois períodos de avaliação ao longo do ciclo cultural

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

Os potenciais médios de água na folha para os dois horários nos quais foram feitas as avaliações são apresentados na Figura 63. Os seus valores médios apresentaram-se diferentes estatisticamente para os horários de 10:00 e 14:00 horas. Em função das variáveis ambientais que se alteram ao longo do dia. Bergonci e Pereira (2002) obtiveram em milho irrigado e sem irrigação e avaliados as 9:00 horas nos meses de outubro a novembro que os valores de potenciais de água na folha se mantiveram elevado nos dois primeiros dias após a suspensão da irrigação com valor próximo de -10 bar, entre os dias 3 e 4 após a suspensão da irrigação, a queda do potencial da água na folha foi acentuada e os valor médio caiu a -17 bar, chegando a -29 bar aos 9 dias após a suspensão da irrigação.

O potencial da água da folha é bom indicador do estado hídrico da planta, um parâmetro altamente dinâmico, que é grandemente influenciado pelo microclima dentro do continuum solo-planta-atmosfera e pelas condições atmosféricas reinantes (SLATYER, 1969)

Figura 63 – Potencial médio de água nas folhas da cana-de-açúcar nos dois horários de avaliação ao longo dos quinze dias que as plantas estiveram submetidas aos tratamentos. Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Ao longo dos quinze dias de avaliações, nos cinco dias que aconteceram as medidas de potenciais de água nas folhas da cana-de-açúcar, os valores desses potenciais nos diferentes dias de avaliação diferiram estatisticamente (Figura 64). Houve um aumento crescente dos potenciais ao longo dos dias avaliações, de forma que o primeiro dia diferencia dos demais, o segundo e o terceiro não apresentaram diferença entre si, assim como o quarto e quinto. No entanto, os valores de potenciais de água na folha para o quarto e quinto dia diferiram dos valores do segundo e terceiro dias de avaliação. Se relacionar esse aumento do potencial de água nas folhas com o como rebaixamento do NF, há um indício de redução da umidade e aumento nos valores de potenciais do solo. No entanto, nesse período de avaliação das plantas quanto ao potencial de água na folhas o potencial de água do solo variou entre $0,55 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, solo encharcado, até um teor de $0,32 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, nas parcelas que foram somente irrigadas, tendo como base um teor de umidade de saturação de $0,3882 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e o teor de umidade na capacidade de campo em $0,28 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ para um potencial de água no solo 8 kPa. Sendo assim, podemos considerar que a variação de potencial

de água na folhas ao longo dos dias de avaliação deveu-se as variáveis ambientais presente no interior do ambiente e o estado fisiológico das plantas e a condição de inundação das parcelas avaliadas, pois segundo Bradford e Yang (1981) o fechamento dos estômatos ocorre devido a redução da permeabilidade das raízes, causada pela respiração anaeróbia, que aumenta a resistência a absorção de água, ocasionando a aumento no potencial da água na folha e o murchamento.

Figura 64 – Potencial médio de água nas folhas da cana-de-açúcar nos cinco dias de avaliação ao longo dos quinze dias que as plantas estiveram submetidas aos tratamentos
Médias seguidas da mesma letra na vertical não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

O estudo aconteceu em um ambiente complexo onde estiveram envolvidas condições experimentais tais como: umidade do solo favoráveis e em excesso, alta temperaturas do ar e do solo, alta umidade relativa, em função das lâminas d'água exposta dentro dos reservatórios, baixo nível de radiação fotossinteticamente ativa, devido o experimento ter sido conduzido em um ambiente protegido, e necessário fazer relações entre os vários parâmetros, de forma a entender os resultados obtidos.

Segundo Bergonci e Pereira (2002) o potencial da água na folha cana-de-açúcar reflete, na verdade, o quanto de água está disponível no solo sendo sua recuperação prontamente estabelecida quando água é adicionada. Embora as plantas tivessem sofrido déficit hídrico acentuado com potenciais foliares alcançando valores de -20 a -25 bar, após serem reidratadas tiveram recuperação rápida e com potenciais próximos e até maiores do que as submetidas à

capacidade de campo. A diferença ocorrida entre as reidratadas após 7 e 8 dias em relação às que permaneceram na capacidade de campo, deveu-se provavelmente à menor área foliar das primeiras (devido à senescência induzida pelo déficit), as quais consumiam menos água do que as segundas. Comprovando o estudo Giorio; Sorrentino e D'andria (1999), que em plantas de oliveira, observaram correlação entre a condutância estomática e o potencial da água na folha e a umidade volumétrica do solo. Segundo Torrecillas et al. (1995), observou-se acentuada queda do potencial da água na folha a partir de uma redução de 65% do conteúdo volumétrico máximo de água no solo.

Sadras e Milroy (1996) mostram que o limiar de fração de água disponível para as plantas, conceituada como a quantidade de água existente no solo a partir da qual a condutância diminui comparada com um valor de referência (fração de água disponível igual a um), varia para diferentes espécies, é maior para o potencial da água na folha e expansão foliar do que para a condutância estomática e trocas gasosas, e que há variação intraespecífica dependendo das condições experimentais como o tipo de solo e demanda evaporativa principalmente.

Os potenciais médios de água nas folhas para os dois períodos desdobrados para os dois horários de avaliação são apresentados na Figura 65.

Figura 65 – Potencial médio de água nas folhas da cana-de-açúcar nos dois períodos de avaliação ao longo do ciclo da cultura

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, sendo que as letras minúsculas comparam médias entre os períodos e as maiúsculas comparam médias entre os horários.

Os potenciais médios de água na folha nos dois períodos que aconteceram as avaliações para os horários coincidentes apresentaram-se semelhantes com valores médios de 5,68 e 10,95 bar para o horário das 10:00 e 12,13 e 19,68 bar para o horário das 14:00 horas. A diferença entre os resultados se mostrou quando comparadas as médias de potenciais de água na folha da cana-de-açúcar entre os horários no mesmo período (Figura 65).

Jones (1992) mostra que em plantas sem restrição hídrica, a condutância estomática pode aumentar com a diminuição do potencial da água na folha, resultante de uma maior taxa de transpiração à medida que a abertura estomática aumenta. O decréscimo na disponibilidade de água no solo ocasiona queda no potencial da água na folha, ou aumento considerando o módulo do potencial de água, diminuindo a turgidez celular, a condutância estomática (SHALHEVET, 1993) e a transpiração (RAY; SINCLAIR, 1997).

A Figura 66 apresenta os valores médios de potencial de água na folhas da cana-de-açúcar nos dois períodos de avaliação, destacando os valores de potenciais, durante os cinco dias que foram feitas as leituras ao longo dos quinze dias que as plantas estiveram sobre a condição de inundação das parcelas.

Figura 66 – Potencial médio de água nas folhas da cana-de-açúcar nos dois períodos de avaliação nos cinco dias de leituras ao longo dos quinze dias que as plantas estiveram sobre inundação

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, sendo que as letras minúsculas comparam médias entre os períodos e as maiúsculas comparam médias entre as velocidades.

Os potenciais médios de água nas folhas para os dois períodos (67 e 210 dias após o plantio) apresentaram-se crescentes diferindo os valores para todos os dias que foram feitas as avaliações.

Os potenciais médios de água na folha em cada um dos períodos durante as cinco avaliações apresentaram-se diferentes. A diferença estatística se expressa quando se compara os valores dos potenciais conseguidos com as leituras aos 3 com 6, 12 e 15 dias após a inundação ou quando se compara os potenciais obtidos com as leituras ao 9 com 12 e 15 dias após a inundação, isso para o primeiro período.

No segundo período, os valores médios de potenciais de água na folhas não diferiram para as três leituras iniciais (3, 6 e 9 dias após a inundação) apresentando diferença estatística entre as leituras feitas aos 3 e 6 com as leituras feitas aos 12 e 15 dias após à inundação, sendo que as leituras desses últimos dois dias também apresentaram diferenças estatísticas entre si (Figura 66).

Os potenciais médios de água nas folhas da cana-de-açúcar nos dois horários e para os diferentes dias de avaliação são apresentados na Figura 67. Os valores de potenciais apresentaram-se diferentes entres os horários para todos os cinco dias avaliados. No horário das 10 horas apenas os potenciais de água na folha aos 12 e 15 dias após a inundação diferiram dos demais e entre si. Para o horário das 14:00 horas apenas os potenciais de água nas folhas ao 12 e 15 dias após a inundação apresentaram valores que se diferenciaram estatisticamente dos demais.

Figura 67 – Potencial médio de água nas folhas da cana-de-açúcar nos dois horários de avaliação nos cinco dias de leituras ao longo dos quinze dias que as plantas estiveram sobre inundação

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, sendo que as letras minúsculas comparam médias entre os horários e as maiúsculas comparam médias entre as velocidades.

O principal efeito da inundação do solo nas plantas, em decorrência da falta de oxigênio no sistema radicular, é que esta passa, a gastar energia degradando suas reservas de forma a sustentar seu metabolismo. No entanto, se o estresse advindo dessa condição for rápido e gradativo as plantas não apresentaram restrição estomática, podendo torna-se até benéfico, uma vez que, segundo Farquhar & Sharkey (1982) o fechamento dos estômatos objetiva minimizar a perda de água, atuando como um mecanismo de defesa ao dessecamento, contudo, simultaneamente limita a assimilação de CO₂. Sabe-se que o estresse hídrico por déficit influencia na condutância, com encontrado por Bergonci e Pereira (2002) onde a relação entre a condutância foliar e o potencial da água na folha mostra que a partir de um potencial de aproximadamente -13 bar a condutância diminui, tornando-se nula com potencial em torno de -17 a -20 bar. No entanto para uma condição de excesso de umidade cogita que a condutância seria máxima quando a planta se encontrasse em uma condição de capacidade de campo ou próxima desta, seja tendendo a saturação ou ao déficit, após o rebaixamento, onde plantas exibissem uma vigorosa área foliar e as condições ambientais favorecessem a uma evapotranspiração máxima. No entanto a velocidade com que acontece essa retirada do excesso de umidade do sistema radicular pode ser manejada, de forma, a aproveitar a disponibilidade hídrica, em função da cultura a ser explorada e da disponibilidade de recurso para implantação de um sistema eficiente de drenagem.

2.3.6 Nutrição das plantas devido ao encharcamento

Segundo as faixas de teores adequados de macronutrientes para a cana-de-açúcar apresentado por Van Raij et al. (1997) os teores médios de nitrogênio e fósforo nas folhas da cana-de-açúcar aos 315 dias após o plantio encontravam-se abaixo da faixa adequada recomendada para a cultura. Segundo Shigaki et al. (2004) o decréscimo observado aos 330 DAP reflete o efeito da diluição do teor de N na biomassa, imposta pelo crescimento da cultura e também pela progressiva queda no poder absorptivo do sistema radicular, conforme aumenta a idade da cultura, o que nesta época de coleta já era esperado, porque de maneira geral segundo Camargo; Santos e Zonta (1999) a concentração do fósforo, do silício e molibdênio solúveis em água aumentam quando o solo é submerso. Este aumento na disponibilidade dos nutrientes devido à desorção dos mesmos aumenta a disponibilidade deles para as culturas. Resultados semelhantes foram encontrados por Calheiros (2000) que trabalhando com trigo (*Triticum*) em a análise foliar, revelou tendência ao decréscimo gradativo dos teores de nitrogênio e fósforo, com a intensidade

de inundação periódica. Um decréscimo da retirada de fósforo pelo trigo sob encharcamento foi encontrado por Labanauska et al. (1975). Trought e Drew (1980) chamam a atenção para o seguinte aspecto nutricional que ocorre em plantas sensíveis submetidas ao encharcamento, quando raízes do trigo foram submersas: a retirada de fósforo foi quase completamente paralisada, a despeito do crescimento das plantas continuarem mais lentamente; após 2 dias, foram diagnosticados decréscimo do conteúdo de fósforo nas folhas velhas e acréscimo nas jovens e, após 2 semanas, mais de 80% do fósforo tinham sido translocado das folhas velhas para as jovens.

Os teores médios de potássio e cálcio nas folhas das plantas amostradas apresentaram-se dentro das faixas adequadas à cana-de-açúcar. Magalhães et al. (2007) estudando a influência do cálcio na tolerância do milho ao encharcamento do solo afirmam que o encharcamento do solo reduziu o crescimento e o rendimento das plantas, independente da presença do cálcio. O teor de cálcio presente no solo provavelmente foi suficiente para garantir o crescimento e o rendimento das plantas, em condições de campo. Esse fato pode ter contribuído para que os tratamentos alagados não apresentassem diferenças significativas entre as variáveis avaliadas. Contrário, para o potássio, ao que afirmam Glinski e Stepniewski (1986) que a anoxia causa decréscimo no conteúdo de potássio em todas as partes da planta. Apontam, ainda, que a deficiência em potássio é o sintoma mais sensível ao encharcamento, visto primeiro e mais distintamente que no caso dos outros íons. Semelhante ao encontrado por Calheiros et al. (2000) em trigo onde encharcamento inibiu completamente a sua absorção, com o deslocamento do nutriente das folhas velhas para as jovens, perceptível após dois dias de encharcamento; já o teor de Ca, para uma das cultivares de trigo estudada, apresentou tendência de elevação gradativa com a hipoxia, demonstrando a importância da característica genética e do melhoramento vegetal, na exploração de culturas em ambientes com a presença de estresse. Letey et al. (1961) afirmam que o conteúdo de cálcio, assim como o do magnésio, parece ser menos afetado pela anoxia que o nitrogênio, potássio e fósforo e que em diferentes culturas, a redução no acúmulo causado pela limitação de oxigênio no solo é na ordem de $K > P > (Ca + Mg)$. De acordo com Trought e Drew (1980) o trigo não manifesta qualquer tendência ao deslocamento desses dois elementos das folhas velhas para as novas. Os teores médios de magnésio e enxofre na grande maioria dos tratamentos encontravam-se abaixo da faixa adequada, no entanto os tratamentos P2V1, P2V3 e P2V4 apresentavam teores de magnésio adequados; já para o enxofre, as folhas dos tratamentos P1V3, P1V4, P1V5 e P2V1 possuíam um teor médio desse nutriente dentro da faixa adequada para cultura (Tabela 26).

Tabela 26 – Teores médios dos macronutrientes nas folhas da cana-de-açúcar aos 315 dias após o plantio na qual as parcelas sofreram estresse por encharcamento

Tratamentos	N	P	K	Ca	Mg	S
	g kg ⁻¹					
Testemunha	9,19	1,15	11,99	2,32	0,63	1,40
P1V1	9,75	1,07	11,31	3,15	0,77	1,24
P1V2	9,96	1,12	12,84	2,58	0,83	1,34
P1V3	9,36	1,06	12,75	3,33	0,80	1,58
P1V4	10,11	1,12	10,29	2,88	0,67	1,73
P1V5	9,71	1,08	12,58	3,60	0,83	1,59
P2V1	9,89	1,05	12,67	2,85	1,10	1,68
P2V2	10,92	1,16	12,33	2,80	0,90	1,25
P2V3	11,92	1,16	12,58	2,50	1,00	1,21
P2V4	12,95	1,09	12,75	2,77	1,00	1,19
P2V5	11,20	1,18	12,24	2,15	0,77	1,03
P3V1	10,66	1,11	12,50	2,60	0,83	1,18
P3V2	10,08	1,19	12,41	2,83	0,90	1,13
P3V3	10,69	1,13	12,16	2,72	0,80	1,18
P3V4	8,98	1,10	10,88	2,90	0,73	1,61
P3V5	11,85	1,06	11,31	3,02	0,83	1,36

Calheiros et al. (2000) em suas análises foliares em trigo observou tendência ao decréscimo gradativo dos teores de enxofre nos tratamentos com elevação e manutenção do NF a 0,15 m; aplicados em períodos progressivos de adaptação induzida nos períodos de 15 e 7 dias indicando que mesmo a nível de 2 e 4 h para aplicação do teste de adaptação à hipoxia até a maturação fisiológica da cultura ou com intervalo entre as períodos progressivos de adaptação induzida, de 7 dias, respectivamente, foram suficientes para limitar sua presença na folha. Para os nutrientes que se encontravam abaixo dos teores recomendados para a cultura, uma explicação seria segundo Cruciani e Minami (1981) que com a inundação há ainda uma interrupção da absorção de nutrientes até que as raízes morrem.

Van Raij et al. (1997) afirmam que teores menores que os limites mínimos indicados por eles devem ser tomados como indício de possível deficiência, e não como uma certeza.

Em decorrência da condição de encharcamento do solo, constata-se o aumento do conteúdo de eletrólitos na solução do solo, conduzindo à liberação de cátions presentes nos sítios de troca da matriz coloidal. Deste modo, alguns íons, macro e micronutrientes como o potássio, o amônio, o zinco e o cobre aumentam a sua concentração no meio e, conseqüentemente, a sua absorção pelas culturas, podendo, em alguns casos de excesso, atingir níveis de toxidez a culturas como o arroz irrigado (CAMARGO, 1992). No entanto Moraes e Dynia (1992) chamam a atenção

para cobre e zinco liberados na a solução do solo podendo ser fixados com o sulfeto de forma insolúvel com uma diminuição na disponibilidade de cobre com o decréscimo aparente da solubilidade após a inundação.

Os teores dos micronutrientes nas folhas da cana-de-açúcar são apresentados na Tabela 27. As faixas de teores adequados de micronutrientes na cana-de-açúcar são bem amplas. Para os teores dos micronutrientes obtidos na avaliação aos 315 dias após o plantio apenas o ferro, o manganês e o zinco se encontravam na faixa adequada. O boro e o cobre apresentaram-se com teores abaixo da faixa recomendada. O ferro, para Calheiros et al. (2000), apresentou exatamente teor esperado, em resposta ao encharcamento, ou seja, embora discreto, um acréscimo gradativo do teor com o grau de intensidade de inundações. Segundo Crawford e Braendle (1996) esta diagnose é importante, pois um acúmulo excessivo causado pelo encharcamento pode trazer danos ao tecido, através da produção de radicais ativos; já os teores de boro e cobre encontravam-se com valores inferiores aos adequados recomendados para a cana-de-açúcar segundo Van Raij et al. (1997).

Tabela 27 – Teores médios dos micronutrientes nas folhas da cana-de-açúcar aos 315 dias após o plantio na qual as parcelas sofreram estresse por encharcamento

Tratamentos	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	mg kg ⁻¹				
Testemunha	1,87	2,03	57,13	34,80	11,30
P1V1	3,07	2,30	56,67	41,07	9,23
P1V2	1,79	1,80	55,33	38,37	9,27
P1V3	2,69	1,97	68,60	64,03	13,03
P1V4	2,61	2,33	59,40	62,80	12,47
P1V5	3,52	2,03	74,37	65,43	13,60
P2V1	3,44	2,30	67,30	49,63	13,60
P2V2	5,15	2,23	70,47	39,01	13,60
P2V3	3,29	2,77	60,53	37,03	12,83
P2V4	2,24	2,13	70,97	55,97	13,00
P2V5	3,44	2,77	51,73	29,20	11,10
P3V1	2,84	2,00	68,33	34,13	10,57
P3V2	3,44	2,67	69,53	50,03	9,67
P3V3	2,47	2,37	64,73	36,03	9,37
P3V4	3,89	1,50	60,10	36,03	10,57
P3V5	3,21	2,90	62,60	58,80	8,77

Os teores de macronutrientes na folha da cana de açúcar aos 315 dias após o plantio para os diferentes tratamentos não deferiram estatisticamente, na sua grande maioria, com exceção do

nutriente magnésio como pode ser visto na Tabela 28. Já quando se avaliou os teores de macronutrientes das folhas das plantas de cana-de-açúcar dentro dos períodos nos quais houve estresse pelo encharcamento de suas parcelas observou-se que os nutrientes cálcio e magnésio diferiram significativamente. As demais causas de variação, importantes na interpretação dos teores de macronutrientes na planta, velocidade do rebaixamento de NF e a interação velocidade*períodos não diferiram estatisticamente.

Tabela 28 – Resultado da análise de variância para análise foliar (macronutrientes) feita na cultivar de cana-de-açúcar RB 867515 sob encharcamento aos 315 DAP

Causas de variação	GL	N	P	K	Ca	Mg	S
		QM					
Tratamentos	15	3,61 ^{ns}	0,006 ^{ns}	1,710 ^{ns}	0,391 ^{ns}	0,045 ^{**}	0,14 ^{ns}
Períodos	2	9,66 ^{ns}	0,006 ^{ns}	1,912 ^{ns}	0,937 ^{**}	0,124 ^{**}	0,23 ^{ns}
Velocidades	4	0,94 ^{ns}	0,007 ^{ns}	2,191 ^{ns}	0,040 ^{ns}	0,017 ^{ns}	0,09 ^{ns}
Velocidades*Períodos	8	3,25 ^{ns}	0,005 ^{ns}	1,627 ^{ns}	0,380 ^{ns}	0,028 ^{ns}	0,16 ^{ns}
Blocos	2	85,54 ^{**}	0,050 ^{**}	4,477 ^{ns}	0,556 ^{ns}	0,004 ^{ns}	0,16 ^{ns}
Resíduo	30	4,92	0,011	2,370	0,201	0,020	0,09
Total	47						
CV(%)		21,22	9,60	12,72	15,92	16,76	21,58
Média geral		10,45	1,11	12,10	2,81	0,84	1,36

^{**} significativo ao nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F.

^{ns} não significativo ao nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F.

A apresentação da análise de variância para os teores de micronutrientes na folhas da cana-de-açúcar é feita na Tabela 29. Avaliando os micronutrientes nas folhas da cana-de-açúcar sobre inundação, apenas o nutriente manganês apresentou diferença significativa de seus teores nos tratamentos. Calheiros et al. (2000), em suas condições experimentais, observaram que os teores de manganês, zinco, boro e cobre apresentaram uma resposta negativa nítida quanto à intensidade de encharcamento. Glinski e Stepiewski (1986) que afirmam que, dentre todos os micronutrientes, somente o manganês apresenta tendência geral em decrescer seu teor nas folhas e elevá-lo nas raízes. No entanto Camargo; Santos e Zonta (1999) afirmam que o zinco decresce sua concentração após o alagamento; relaciona essa redução à precipitação do $Zn(OH)_2$ como resultado do aumento do pH; precipitação do $ZnCO_3$ devido à acumulação do CO_2 , resultado da decomposição da matéria orgânica e precipitação do ZnS sob condições altamente reduzidas. O manganês, juntamente com o zinco, diferiu estatisticamente quando se avaliaram os teores destes nos diferentes períodos de estresse submetido às plantas. Os valores dos teores de micronutrientes nas diferentes velocidades de rebaixamentos não diferiram estatisticamente.

Na Tabela 29 a interação velocidades*períodos se mostrou significativa para o nutriente manganês, provavelmente devido à significância dos períodos de estresse, já que a para as velocidades de rebaixamentos os teores desse micronutriente não apresentaram significância.

Tabela 29 – Resultado da análise de variância para análise foliar (micronutrientes) feita na cultivar de cana-de-açúcar RB 867515 sob encharcamento aos 315 DAP

Causas de variação	GL	B	CU	Fe	Mn	Zn
		QM				
Tratamentos	15	2,04 ^{ns}	0,43 ^{ns}	130,85 ^{ns}	447,19 ^{**}	9,55 ^{ns}
Períodos	2	2,27 ^{ns}	0,47 ^{ns}	18,20 ^{ns}	693,22 ^{**}	34,88 ^{**}
Velocidades	4	0,73 ^{ns}	0,41 ^{ns}	6,96 ^{ns}	198,82 ^{ns}	2,09 ^{ns}
Velocidades*Períodos	8	2,33 ^{ns}	0,47 ^{ns}	220,53 ^{ns}	517,60 ^{**}	8,13 ^{ns}
Blocos	2	6,09 ^{ns}	0,08 ^{ns}	76,16 ^{ns}	53,66 ^{ns}	36,31 ^{**}
Resíduo	30	2,92	0,47	117,07	149,51	8,93
Total	47					
CV(%)		55,88	30,28	17,00	26,71	26,27
Média geral		3,06	2,26	63,61	45,77	11,37

^{**} significativo ao nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F.

^{ns} não significativo ao nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F.

Figura 68 – Teor médio de magnésio nas folhas da cana-de-açúcar para os diferentes tratamentos, sobre encharcamento e sob irrigação

Médias seguidas da mesma letra, entre os tratamentos, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade e quando comparadas com a testemunha (T) médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade

Os teores médios de magnésio nas folhas da cana-de-açúcar em análise feita aos 315 dias após o plantio são apresentados na Figura 68. Entre os tratamentos que sofreram o estresse por

encharcamento do solo de suas parcelas apenas os tratamentos, P1V4 e P2V1, diferenciaram-se entre si. As parcelas que foram conduzidas como testemunhas apresentaram um teor médio do nutriente magnésio nas folhas diferenciando significativamente da maioria dos tratamentos que foram submetidos a inundação, com exceção tratamento P1V4 (Figura 68).

Os teores médios do micronutriente manganês nas folhas da cana-de-açúcar para os diferentes tratamentos são apresentados na Figura 69. Apesar da significância identificada na análise de variância, fazendo uso do teste F, quando submetido os valores médios dos teores manganês dos diferentes tratamentos ao teste Tukey a 5% de probabilidade não se comprovou essa significância, como mostra a Figura 69.

Figura 69 – Teor médio de manganês nas folhas da cana-de-açúcar para os diferentes tratamentos, sobre encharcamento e sob irrigação

Médias seguidas da mesma letra, entre os tratamentos, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade e quando comparadas com a testemunha (T) médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade

A Figura 70 apresenta os teores médios de cálcio nas folhas da cana-de-açúcar aos 315 DAP submetidas a diferentes tratamentos em períodos distintos do seu ciclo. As parcelas irrigadas (T) apresentaram valores médios para o teor de cálcio nas suas folhas semelhantes aos teores do nutriente nas parcelas que sofreram o encharcamento nos períodos de 210 e 305 DAP, diferindo estatisticamente apenas dos teores obtidos nas parcelas que sofreram o encharcamento aos 67 DAP.

O papel do cálcio na tolerância ao encharcamento do solo, tomando-se como base aqueles trabalhos que relacionaram a maior tolerância à baixa pressão de oxigênio com o metabolismo de parede celular; visto que esse íon atua como elemento estrutural, conferindo maior resistência à parede celular (DAMARTY; MORUAN; THELLIER, 1984; GRANT et al., 1973).

Figura 70 – Teor médio de cálcio nas folhas da cana-de-açúcar para os diferentes períodos de encharcamento e quando submetidas somente à irrigação (T)

Médias seguidas da mesma letra, entre os três períodos, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade e quando comparadas, os períodos com a testemunha, médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade

Os teores médios de magnésio nas folhas da cana-de-açúcar amostradas aos 315 DAP podem ser visualizados na Figura 71. O teor do nutriente magnésio presente nas folhas das plantas submetidas ao encharcamento aos 210 DAP apresentou-se diferentes dos outros períodos que sofreu o estresse, 67 e 305 DAP, com teores semelhantes, assim como diferentes dos teores encontrados nas folhas das plantas que receberam irrigação.

Os teores médios do nutriente manganês quando as plantas foram submetidas à inundação nos três períodos (67, 210 e 305 DAP) ou quando estas receberam irrigação (T) são apresentadas na Figura 72. Observa-se que o teor médio de manganês nas folhas das plantas de cana-de-açúcar que receberam irrigação, testemunha (T), não diferenciou das plantas que sofreram o estresse do encharcamento. No entanto o teor médio de manganês obtido na avaliação referente ao período que se iniciou aos 67 DAP apresentou-se maior e diferindo estatisticamente entre os demais períodos de estresse (Figura 72).

Figura 71 – Teor médio de magnésio nas folhas da cana-de-açúcar para os diferentes períodos de encharcamento e quando submetidas somente à irrigação (T)

Médias seguidas da mesma letra, entre os três períodos, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade e quando comparadas, os períodos com a testemunha, médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade

Figura 72 – Teor médio de manganês nas folhas da cana-de-açúcar para os diferentes períodos de encharcamento e quando submetidas somente à irrigação (T)

Médias seguidas da mesma letra, entre os três períodos, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade e quando comparadas, os períodos com a testemunha, médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade

Os teores do micronutriente zinco nas folhas da cana-de-açúcar submetidas aos diferentes períodos de estresse são apresentados na Figura 73. Para o período de 305 DAP o teor de zinco

nas folhas das plantas foi menor e diferindo estatisticamente dos demais períodos em que as plantas sofreram estresse, diferindo também em relação aos teores médios nas folhas das plantas que estiveram submetidas à irrigação. Labanauskas et al. (1975) e Calheiros et al. (2000) encontraram uma tendência de decréscimo com a hipoxia, no entanto, não encontrou relação com o encharcamento, para esse nutriente. Para estes últimos autores a condição de hipoxia ocasiona uma maior adaptação do seu sistema radicular merecendo uma adubação diferenciada em função da tolerância da cultura ou cultivar manejada, e que também a adubação foliar executada não atingiu o objetivo proposto ou, se contribuiu, o fez de forma insuficiente para suprir as deficiências nutricionais das plantas, prejudicadas pelo comprometimento da via radicular.

Figura 73 – Teor médio de zinco nas folhas da cana-de-açúcar para os diferentes períodos de encharcamento e quando submetidas somente à irrigação (T)

Médias seguidas da mesma letra, entre os três períodos, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade e quando comparadas, os períodos com a testemunha, médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade

O encharcamento do solo nos diferentes períodos, ao longo do ciclo cultural (67, 210 e 305 DAP), aplicando as diferentes velocidades de rebaixamento de 0,30 m em 3, 6, 9, 12 e 15 dias e levando em consideração condições experimentais, tais como: ambiente protegido, confinamento do sistema radicular, altas temperaturas do solo, de maneira geral não interferiu no desenvolvimento da cultura, uma vez que os teores nutricionais obtidos aos 315 DAP para a

maioria dos nutrientes se encontram dentro da faixa adequada. Em conformidade com o que afirma Camargo; Santos e Zonta (1999) que diz que em termos de nutrição de plantas, verificam-se efeitos benéficos, proporcionados pelas alterações no sistema, tais como aumento na disponibilidade de fósforo, ferro e manganês e efeitos maléficos como a diminuição da disponibilidade de zinco, cobre, aumento excessivo de Fe^{2+} e formação de H_2S e ácidos orgânicos.

2.3.7 Parâmetros biométricos relativo ao desenvolvimento das plantas

Na maioria dos estudos tem-se, até o presente, pesquisado os efeitos de deficiência ou ausência temporária do oxigênio no solo sem a verificação simultânea de fatores que podem interferir na capacidade das plantas de resistir ao estresse anoxítico. Entre tais fatores destacam-se o tempo de duração do estresse e o estágio de desenvolvimento das plantas, além da cultivar e das condições ambientais (BOLTON; ERICKSON, 1970). Glinski e Stepniewski (1986) afirmam que a tolerância das plantas ao encharcamento é função, dentre outros, do estágio cultural em que foi implantada a hipoxia. Calheiros et al. (2000) comprovou que os parâmetros biométricos apresentaram gradiente negativo com a intensidade de hipoxia.

As Tabelas 30, 31 e 32 apresentam a análise de variância para os parâmetros: altura dos colmos, número de folhas nos colmos, diâmetros dos colmos, números de entrenós, área foliar, índice de área foliar, incremento de crescimento e número de perfilhos. A altura média dos colmos, o número de folha nos colmos, a área foliar e o índice de área foliar mostraram - se diferentes entre os tratamentos e entre os períodos. Já os diâmetros de colmos, o incremento de crescimento e o número de perfilhos só diferenciaram-se para os períodos. A cronologia temporal das avaliações (períodos avaliados) demonstra o desenvolvimento vegetativo das plantas, natural de qualquer vegetal que expresse sua produção na forma de biomassa. Sendo assim podemos concluir que as velocidades de rebaixamento dos níveis freáticos nas parcelas que continham as plantas não influenciaram no desenvolvimento destas ao longo do seu ciclo cultural. No entanto Calheiros et al. (2000) chama atenção que para uma maior frequência e severidade do estresse, esses tornaram-se bastante prejudiciais às plantas; segundo esses autores os mesmos acarretaram redução em todos os parâmetros biométricos. O perfeito entendimento sobre este processo pode ser a chave do sucesso na seleção de um manejo do NF mais adequado.

Tabela 30 – Resultados dos quadrados médios da análise de variância da altura média dos colmos e do número de folhas nos colmos nas parcelas com os tratamentos P1V1, P1V2, P1V3, P1V4, P1V5, P2V1, P2V2, P2V3, P2V4, P2V5, P3V1, P3V2, P3V3, P3V4, P3V5 ao longo do ciclo cultural da cana-de-açúcar

Causas de variação	GL	Altura média dos colmos	Número de folha nos colmos
		-----QM-----	-----
Tratamentos	15	0,14 ^{**}	29,10 ^{**}
Blocos	3	0,45 ^{**}	110,98 ^{**}
Períodos	7	36,33 ^{**}	1417,27 ^{**}
Tratamentos*Períodos	105	0,01 ^{ns}	10,81 ^{ns}
Resíduo	381	0,02	10,59
Total	511		
CV (%)		11,77	18,07
Média geral		1,19	18,0

^{**} significativo ao nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F.

^{ns} não significativo ao nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F.

Tabela 31 – Resultados dos quadrados médios da análise de variância dos diâmetros dos colmos, área foliar e índice de área foliar e do número de folhas nos colmos nas parcelas com os tratamentos P1V1, P1V2, P1V3, P1V4, P1V5, P2V1, P2V2, P2V3, P2V4, P2V5, P3V1, P3V2, P3V3, P3V4, P3V5 ao longo do ciclo cultural da cana-de-açúcar

Causas de variação	GL	Diâmetros colmos	Área foliar	Índice de área foliar
		-----QM-----	-----	-----
Tratamentos	15	0,000017 ^{ns}	0,08 ^{**}	1,26 ^{**}
Blocos	3	0,000034 ^{**}	0,63 ^{**}	15,75 ^{**}
Períodos	6	0,000064 ^{**}	3,09 ^{**}	76,32 ^{**}
Tratamentos*Períodos	90	0,000012 ^{ns}	0,02 ^{ns}	0,46 ^{ns}
Resíduo	333	0,000011	0,02	0,47
Total	447			
CV (%)		12,71	22,32	20,66
Média geral		0,0266	0,67	3,31

^{**} significativo ao nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F.

^{ns} não significativo ao nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F.

Tabela 32 – Resultados dos quadrados médios da análise de variância do incremento de crescimento, números de perfilhos nas parcelas com os tratamentos P1V1, P1V2, P1V3, P1V4, P1V5, P2V1, P2V2, P2V3, P2V4, P2V5, P3V1, P3V2, P3V3, P3V4, P3V5 ao longo do ciclo cultural da cana-de-açúcar

Causas de variação	GL	Incremento de crescimento	GL	Número de perfilhos
		QM		QM
Tratamentos	15	0,0000076 ^{ns}	15	2,25 ^{ns}
Blocos	3	0,0000219 ^{ns}	3	7,31 ^{**}
Períodos	5	0,0007473 ^{**}	8	21,55 ^{**}
Tratamentos*Períodos	75	0,0000122 ^{ns}	120	1,15 ^{ns}
Resíduo	285	0,0000104	429	1,43
Total	383		575	
CV (%)		35,06		52
Média geral		0,0092		2,3

^{**} significativo ao nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F.

^{ns} não significativo ao nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F.

2.3.7.1 Alturas dos colmos

Considerando a última avaliação obteve uma altura média dos colmos de 2,24 m (Figura 75), ao longo do ciclo, nos diferentes períodos avaliados, percebem-se diferenças significativas no acréscimo do desenvolvimento médio das plantas, exceto nos períodos de 90 e 120 dias após o plantio, podendo ter causas variadas: temperaturas do ambiente, umidade do solo devido ao estresse proporcionado pela inundação às parcelas relativa ao primeiro período e/ou fertilidade do solo. As temperaturas para o meses de janeiro e fevereiro são apresentadas na Figura 74; pode-se observar que ocorreu temperatura variando entre 18 e 37 °C. Segundo Fauconier e Bassereau (1975), o crescimento da cana-de-açúcar está relacionado com a temperatura ambiente; a temperatura de crescimento máximo para a cana está entre 30 e 34 °C, enquanto que abaixo de 25 °C e acima de 38 °C o crescimento é muito lento. Marchiori (2004) afirma que a temperatura noturna influi mais no crescimento que a diurna. Quando as noites são frias, o desenvolvimento é lento e há maior concentração de sacarose.

Figura 74 – Temperatura diárias para os meses de janeiro e meados de fevereiro

Para a umidade do solo proporcionada pelo manejo da irrigação pode-se considerar que a mesma não influenciou, já que esta foi controlada em função de um dado potencial matricial crítico inferior ao recomendado para cultura; segundo Pizarro (1990), uma vez que sobre condição de tensão a reserva hídrica do solo é menor. Considerando-se que a disponibilidade de água no solo é o principal fator responsável pela maior elongação dos entrenós, pode-se dizer que a cana-de-açúcar encontrou condições ambientais favoráveis para seu desenvolvimento. No entanto, a igualdade entre os valores médios de altura das plantas aos 90 e 120 DAP podem ter ocorrido em função do estresse provocado pelo encharcamento, pois as alturas das plantas estressadas contribuíram com seus valores na obtenção da média para esses períodos.

Para a fertilidade do solo, a fase de 90 a 120 DAP constituiu uma transição no planejamento da adubação da cultura, uma vez que foi feita uma cobertura aos 40 DAP e a próxima aconteceu aos 110 DAP, podendo isso ter provocado uma redução no desenvolvimento das plantas, com uma pequena descontinuidade crescimento médio das plantas.

Os valores da altura média dos colmos colhidos se apresentaram inferiores aos da última avaliação ocorrido aos 300 DAP. Durante a colheita procurou-se colher todos os colmos, já nas avaliações fez-se as medidas apenas dos três maiores, conseqüentemente os valores médios das alturas dos colmos colhidos foram bastante inferior aos avaliados.

Figura 75 – Altura média dos colmos da cana-de-açúcar em oito períodos de avaliações. Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Entre as parcelas avaliadas alguns tratamentos apresentaram-se diferenças significativas quanto aos valores médios de alturas de colmo. O tratamento que apresentou menor altura média dos colmos foi o P2V1 com 1,06 m, e o que apresentou o maior valor foi P1V3 com 1,26 m, com uma diferença média de 0,20 m que corresponde uma variação de 15,87% (Figura 76). No entanto, nas parcelas colhidas, as massas verdes dos colmos entre os tratamentos não diferiram significativamente como é apresentado na Tabela 38. Rossiello (1987), Souza (1995) e Silva (2000), trabalhando em condições hídricas mais favoráveis ao crescimento vegetal, verificaram valores superiores a 2,00 m de altura no final do ciclo da cultura.

Figura 76 – Altura média final dos colmos da cana-de-açúcar submetidos aos diferentes tratamentos. Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Calheiros et al. (2000) encontrou uma tendência de acréscimo da altura de plantas de trigo quando estas foram submetida a aplicação de períodos progressivos de adaptação induzida, ou seja, uma equivalência a uma menor velocidade de rebaixamento de 0,30 m de forma progressiva, mantendo as parcelas em uma condição favorável de umidade.

Espécies nativas quando submetida a inundação normalmente não apresentam sintomas, como clorose nas folhas, devido ao estresse. Calbo; Moraes e Calbo (1998), trabalhando com buriti, *Mauritia vinifera* Mart., verificaram que a inundação não afetou aumento na altura da parte aérea das plantas de carnaúba. Andrade et al. (1999) estudando o genipapo, *Genipa americana* L., submetida à inundação por 60 dias, assim como a carnaúba, não apresentou diferenças na altura da parte aérea, além de não apresentar também modificações morfológicas não desenvolveram estruturas que pudessem facilitar a aeração das raízes, como pneumatóforos, raízes adventícias próximas à superfície do solo ou lenticelas hipertrofiadas.

2.3.7.1.1 Incremento de crescimento dos colmos (IC)

As plantas atingiram seu máximo desenvolvimento aos 120 e se mantendo até 150 DAP (fevereiro a março), após essa fase o alongamento dos entrenós desenvolveu-se cada vez menos como podemos observar na Figura 77; diferente de Silva (2005) que avaliando cinco cultivares em cultivo de cana soca revelaram que para a cultivar RB855113 as épocas que mais tiveram incremento foram aos 150 e 200 DAC apresentando valores superiores as demais, no entanto os valores de incremento de crescimento não foram significantes para as outras cultivares estudadas; para estas a época que apresentou maior incremento de crescimento foi aos 200 DAC, e nesta época as cultivares que apresentaram maior incremento de crescimento, ou seja, maior alongação do colmo foram as RB845210, RB845197 e RB855536. Oliveira et al. (2004) também constataram que o período de maior alongação do colmo coincidiu com as épocas de maiores valores de IAF. A essas taxas máximas podemos associar ao adequado suprimento de nutrientes e água. Oliveira et al. (2005), que estudando o crescimento de cultivares de cana-de-açúcar no Paraná, atribuem o efeito na redução da taxa de alongação ao aumento do auto-sombreamento durante o período de maturação. Suguitani (2001) observou que houve maior incremento em altura de planta nos períodos de temperaturas altas e maior precipitação, ocorrendo entre novembro e abril. Na situação experimental a irrigação supriu a necessidades hídricas das plantas.

Figura 77 – Incremento de crescimento médio dos colmos da cana-de-açúcar nas parcelas em seis períodos de avaliação

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Segundo Cruciani e Minami (1981) a tolerância da planta é maior durante a estação mais fria, especialmente se entrar em dormência. Ao contrario, em ambiente mais quente a demanda de oxigênio é maior e qualquer déficit de suprimento é prejudicial.

2.3.7.2 Número de folhas na parcela

Ao longo das avaliações, o número de folhas aumentou até os 215 DAP, período ao qual a planta expressa todo seu potencial vegetativo; a partir deste período entra na fase de maturação e o número de folhas diminui naturalmente (Figura 78). A cana-de-ano (12 meses), plantada em setembro-outubro, tem seu desenvolvimento máximo de novembro a abril, diminuindo após devido às condições climáticas adversas do período de inverno no Centro-Sul; a fase de maior desenvolvimento, ocorre na primeira metade do grande período. Ramesh (2000) relata que, passada a fase de intenso crescimento, a cultura diminui o gasto de energia para produção de folhas verdes.

Machado et al. (1982) descreveram as fases da cana-de-açúcar de ano da seguinte forma: 1 - Fase de crescimento lento, entre o plantio e 100 dias após (março-julho); 2 - Fase de crescimento rápido, entre 100 e 250 dias após o plantio, correspondendo a 75% do máximo acumulado (julho-

dezembro); 3 - 250 dias após o plantio (dezembro), o crescimento foliar foi novamente lento, estabilizando-se ao redor dos 300 dias após o plantio (fevereiro).

Figura 78 – Número médio de folhas nos colmos da cana-de-açúcar em oito períodos de avaliação

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

A Figura 79 apresenta o número médio de folhas nos tratamentos por parcela e observa-se que com exceção do tratamento P2V4, os demais não apresentaram diferença estatística entre si. O tratamento P1V5 foi o que apresentou maior número médio de folhas com 19,4 folhas, considerando que este tratamento era representado por quatro parcelas e que foram avaliados em média quatro colmos. Oliveira et al. (2007) em um experimento com cana de ano e meio avaliando a cultivar RB72454, progenitora da cultivar em estudo nesse trabalho, conseguiu aos 231 DAP um número médio de aproximadamente dez folhas, no entanto ao 377 DAP suas plantas apresentavam um número médio de folha em torno de 6 folhas por perfilhos. Considerando os diferentes planejamentos de plantio e a utilização de cultivares distintas, embora com características semelhantes, assim como a condição de vaso, as plantas avaliadas nesse trabalho apresentaram números de folhas condizentes com um cultivo de campo encontrado pelo autor.

Figura 79 – Número médio de folhas nos colmos da cana-de-açúcar submetidos aos diferentes tratamentos

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

2.3.7.3 Diâmetro dos colmos

Os valores médios dos diâmetros dos colmos nas diferentes avaliações são apresentados na Figura 80. A variação no diâmetro dos colmos se dá devido à entrada de novos colmos entre as avaliações, que deixa o estado de perfilho e passam a serem avaliados como colmos em desenvolvimento, e também devido a possíveis erros de leituras, uma vez que mesmo seguindo uma metodologia as condições de avaliação favorecem uma distorção nos valores entre as leituras. Os maiores diâmetros médios dos colmos ocorreu aos 120 DAP e permaneceu até aos 150 DAP. As condições as quais o experimento foi conduzido favorecem os valores médios obtidos, pois segundo Ferraz (1983), a disponibilidade hídrica é relevante na maximização de ganhos de produtividade, o que conseqüentemente para cana-de-açúcar, passa por melhor crescimento da cultura e maior diâmetro de colmo. No entanto morfológicamente, o início do processo parece estar ligado ao papel dos fitohormônios, destacando-se o etileno (SCHAFFER et al., 1992) induzindo à epinastia foliar, ao crescimento de raízes adventícias, à hipertrofia dos caules e à produção de aerênquima em certas espécies de plantas (BRADFORD; YANG, 1981; KAWASE, 1981). Oliveira et al., (2004), adotando sistema convencional e utilizando 20 kg ha⁻¹ de N, 100 kg ha⁻¹ de K₂O e 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅, encontrou valores médios de diâmetros de colmos igual a 0,0319 m na cultivar RB72454, progenitora da RB867515, para cultivo de 18 meses.

Figura 80 – Diâmetros médio dos colmos da cana-de-açúcar em sete períodos de avaliação. Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

O desenvolvimento das plantas para diâmetro médio de colmo apresentou uma aparente estabilização a partir dos 120 DAP até a colheita, aos 340 DAP (Figura 80).

2.3.7.4 Número de perfilhos nas parcelas

A contagem dos números de perfilhos nas parcelas, nos períodos de avaliados, é apresentada na Figura 81. Nas avaliações os números de perfilhos até 120 DAP manteve-se próximo de 3, indicando que teve um brotação inicial uniforme, podendo se dizer que esses perfilhos foram os que se transformaram em colmos, responsável pela produção do experimento. Segundo Câmara (1993), é o perfilhamento que permitirá o estabelecimento da cultura em condições de campo e fornecerá às touceiras o número de colmos adequados à produção. O número de colmos influencia sobre o IAF ao longo do ciclo, ou seja, maior área foliar ativa com maior produtividade biológica da cultura. Segundo Shigaki et al. (2004) a fotossíntese da cultura depende diretamente do IAF. Sendo a fotossíntese o processo responsável pelo fornecimento de energia necessária ao crescimento e desenvolvimento da planta, pode-se dizer que quanto maior o IAF e quanto mais tempo a área foliar permanecer ativa, maior será a produtividade biológica da cultura. A partir dos 120 DAP ocorre uma redução do número de perfilhos nas parcelas possivelmente devido ao estresse submetido às plantas com a inundação, assim como as condições ambientais presentes,

pois de acordo com Suguitani (2001) o perfilhamento varia de acordo com a variedade, condições ambientais e nível de manejo adotado. Para Machado (1987) a mortalidade dos colmos coincide com o período em que a área foliar aumenta rapidamente, sugerindo que, além da competição por água e nutrientes, o sombreamento é um dos fatores mais importantes na determinação número de perfilhos. Beard e Martin (1970) estudando a *Agrostis palustris* Huds. uma tolerante forrageira, após 60 dias de continua submersão resultou em apenas 49% de sobrevivência sob água a temperatura de 20°C. Contudo após os 215 DAP observou que uma retomada no perfilhamento das parcelas possivelmente devido às condições proporcionada pelo material orgânico adicionado as parcelas aos 150 DAP.

Figura 81 – Número de perfilhos nas parcelas em nove períodos de avaliação
Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

O número de perfilhos contabilizados nas parcelas ficou abaixo dos encontrados por Ido (2003) que trabalhando em Rizotron, encontrou número máximo de perfilhos, 33, e cita que são valores altos, comprovando a característica varietal de excelente brotação e que quando ocorreu estabilização do número de perfilhos até a colheita foram de 13 perfilhos. O número reduzido de perfilhos pode ter sido ocasionado pela condição de vaso, espaço reduzido dos lisímetros quando comparado aos plantios em campo, e pelo estresse por excesso de umidade submetido às parcelas. Uma vez que, segundo Câmara (1993), a partir do ponto de máximo perfilhamento, a competição entre perfilhos pelos fatores de crescimento (luz, espaço, água e nutrientes) torna-se elevada de

maneira que se constata a redução do perfilhamento através da diminuição e paralisação desse processo, além da morte dos perfilhos mais jovens. Os colmos que sobreviveram a forte competição da fase de perfilhamento intenso continuam seus processos de crescimento e desenvolvimento, acumulando cada vez mais sacarose em seus internódios, à medida que estes vão amadurecendo.

2.3.7.5 Área foliar das parcelas

A forma das folhas é característica de cada cultivar trabalhada por melhoramento genético. Objetivando-se a determinação da área foliar de forma não destrutiva fez-se necessário a determinação do fator de forma para a cultivar em estudo de forma a minimizar o erro.

A determinação do fator de forma das folhas da cultivar RB867515 foi obtida através da média das relações entre a área foliar conseguida em um integrador foliar e a conseguida fazendo comprimento versus largura, para dois períodos de avaliação aos 67 DAP e aos 215 DAP. Os resultados das avaliações são apresentados nas Tabelas 33, 34, 35 e 36. Os fatores conseguidos nos distintos períodos foram 0,66 e 0,56.

Tabela 33 – Área da folha da cana-de-açúcar cultivar RB 867515 medida no integrador foliar LICOR aos 67 dias após o plantio

Tratamentos	Áreas medidas no integrador de folhas					Área (cm ²)
P3V1	131,27	121,12	121,64	121,53	124,00	122,39
P3V2	148,71	149,50	152,63	151,82	144,32	150,01
P3V3	126,77	125,90	128,74	128,57	127,95	127,82
P3V4	140,01	140,97	137,89	139,59	142,76	140,19
P3V5	122,48	135,16	129,48	134,73	131,36	131,86

Tabela 34 – Dimensões e área da folha da cana-de-açúcar cultivar RB 867515 aos 67 dias após o plantio

Tratamentos	C	L	Área (cm ²)
P3V1	87	2,3	200,10
P3V2	87	2,8	243,60
P3V3	74	2,2	162,80
P3V4	90	2,5	225,00
P3V5	90	2,2	198,00

$$f = \frac{AI1 + AI2 + AI3 + AI4 + AI5}{AC1 + AC2 + AC3 + AC4 + AC5} = \frac{122,39 + 150,01 + 127,82 + 140,19 + 131,86}{200,10 + 243,60 + 162,80 + 225,00 + 198,00} = 0,66$$

Tabela 35 – Área da folha da cana-de-açúcar cultivar RB 867515 medida no integrador foliar LICOR aos 215 dias após o plantio

Tratamentos	Áreas medidas no integrador de folhas					Área (cm ²)
P1V1	325,82	328,45	326,42	325,76	326,14	326,13
P1V2	195,87	196,46	197,08	196,56	196,79	196,60
P1V3	246,82	245,87	244,94	247,50	245,91	246,20
P1V4	286,76	286,69	287,61	287,81	287,21	287,19
P1V5	228,66	227,10	226,85	227,14	225,24	227,03

Tabela 36 – Dimensões e área da folha da cana-de-açúcar cultivar RB 867515 aos 215 dias após o plantio

Tratamentos	C	L	Área (cm ²)
P1V1	138	3,6	496,80
P1V2	115	3,2	368,00
P1V3	143	3,4	486,20
P1V4	139	3,3	458,70
P1V5	147	3,4	499,80

$$f = \frac{AI1 + AI2 + AI3 + AI4 + AI5}{AC1 + AC2 + AC3 + AC4 + AC5} = \frac{326,13 + 196,60 + 246,20 + 287,19 + 227,03}{496,80 + 368,00 + 486,20 + 458,70 + 499,80} = 0,56$$

Os períodos de 120 e 215 DAP destacaram-se por apresentar áreas foliares de 0,90 e 0,87 m², respectivamente (Figura 84). Após os 90 DAP a área foliar ficou entre 0,6 e 0,9 m²; isso ocorre pela capacidade de renovação das plantas, pois cada colmo produz uma nova folha a cada 10 dias aproximadamente (GLASZIOU et al. 1965), e devido a senescência e queda das folhas mais velhas, observa-se o número praticamente constante, de 8 a 10 folhas por colmo, após o fechamento do dossel (MACHADO, 1981). Cock (2001) comenta: conforme o local, o número total de folhas funcionais expandidas por colmo, normalmente, varia entre 6 a 13, sendo que em cultura bem desenvolvida o número de folhas é regulado pelo sombreamento. Após a adubação orgânica feita aos 150 DAP percebe-se uma recuperação da área foliar, explicado pelo maior número de perfilhos surgidos e a transformação deste em colmos que entraram nas avaliações subsequentes. No final do ciclo, aos 315 DAP, a área foliar volta a reduzir-se, uma vez que a

irrigação foi suspensa e as plantas se encontravam na fase de maturação. Segundo Brunini (1997), esse período seco no final do ciclo é importante para favorecer o acúmulo de sacarose nos colmos e para diminuir o risco de florescimento.

Figura 82 – Área foliar nas parcelas em sete períodos de avaliação
Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Os tratamentos mantiveram uma área foliar variando entre 0,56 a 0,74 m², para os tratamentos P2V4 e o P2V5, respectivamente, como é apresentado na Figura 83. Santos e Lyra (2000) observaram na cultivar “SP4311”, em avaliações com intervalos médios de 15 dias e sob condição de plantio não irrigado, valores médios máximos de área foliar variando entre 0,53 m² e 0,44 m², para dois diferentes anos; já Oliveira et. al., (2007), para a cultivar RB72454, obteve área foliar média máxima de aproximadamente 0,80 m². Shigaki et al. (2004), em condição de sequeiro, para as cultivares RB 765418 e RB 835486, verificaram que manteve-se a área foliar total praticamente constante até os 180 DAP, enquanto que para a variedade RB 72454 houve um incremento desse parâmetro nessa época. Dos 180 aos 240 DAP, houve um ligeiro decréscimo para a variedade RB 835486 e acréscimo para as variedades RB 72454 e RB 765418. Já dos 240 aos 330 DAP, observou-se um comportamento contrário, havendo decréscimo deste parâmetro para as variedades RB 72454 e RB 765418, e acréscimo para a RB 835486. Esses resultados diferem dos encontrados por Rossiello (1987) e Silva (2000), que verificaram ao longo do ciclo um aumento acentuado da área foliar total até os 240 DAP e um ligeiro declínio na última coleta,

porém as condições hídricas encontradas durante o desenvolvimento dos trabalhos destes autores favorecerem o crescimento vegetal e conseqüentemente a expansão foliar.

Figura 83 – Área foliar média dos tratamentos

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Para as plantas que não sofreram estresse devido ao encharcamento, representado pela testemunha (T), estas parcelas apresentaram um valor médio de área foliar de $0,70 \text{ m}^2$, não diferindo da maioria dos tratamentos propostos e avaliados. Beltrão et al., (1997) em experimento com algodão observou que a área foliar foi sensivelmente reduzida quando o estresse anoxítico ocorreu na fase de floração, independente do tempo de duração do estresse.

2.3.7.6 Índice de área foliar

O índice de área foliar mostra a capacidade do dossel de interceptar a radiação solar incidente por unidade de superfície cultivada (SOUZA, 1995) e representa a capacidade que a comunidade vegetal tem de utilizar o espaço disponível (SHIGAKI et al. 2004).

Verificou-se que a ocorrência dos maiores índices de área foliar ocorreu no período de 120 DAP (janeiro) e aos 215 DAP (abril) (Figura 84). Machado et al. (1982) e Ido (2003), que apontam o maior crescimento da parte área de cana-de-açúcar nos meses de janeiro a março, devido às adequadas condições de temperatura e precipitação pluviométrica. Acresce-se a isso o fato de a área foliar fotossinteticamente ativa já ter se estabilizado, aliado à disponibilidade hídrica térmica e luminosa. Após estes períodos as plantas diminuíram o número de folhas e à área foliar por parcelas, estando este índice condicionado a área foliar e conseqüentemente ao manejo aplicado às parcelas, para o experimento em questão, o parcelamento da adubação de nitrogênio e potássio e a aplicação de matéria orgânica, na forma de esterco de bovino aos 150 DAP, que proporcionou um maior vigor vegetativo, assim com um maior emissão de perfilho,

contribuindo para se ter valores de IAF 4,2 aos 215 DAP. Formaggio (1989) afirma que há uma tendência temporal parabólica do IAF durante o ciclo das culturas anuais, com valores baixos no início, atingindo um pico e, em seguida, valores baixos novamente. Evidentemente, fatores: como a data de plantio, cultivares, densidade de plantio, espaçamento, precipitação, pragas, doenças, entre outros, interferem no desenvolvimento da cultura e esta interferência é bem evidenciada através do IAF, o que torna este um dos principais indicadores do vigor da vegetação agrícola. Após os 215 DAP as plantas se encontravam na fase de maior senescência destas folhas e segundo Gomide e Gomide (1999), esta redução no número de folhas e AF seriam em razão da idade avançada das folhas, aliada ao aumento da atividade respiratória para a sua manutenção. Nesse sentido, Machado et al. (1982) relatam que o IAF ideal estaria em torno de 4,0, o que seria suficiente para interceptar aproximadamente 95% da radiação solar incidente. Larcher (2000) relata que este índice (4,0) corresponderia a quatro camadas de folhas. Nas culturas, em geral, da fase inicial de seu crescimento até o estágio de completa interceptação da radiação pelas folhas, a taxa de produção de fotossintetizados aumenta até um valor máximo em função do IAF. Quanto mais rapidamente a cultura atingir o IAF máximo e quanto mais tempo a área foliar permanecer ativa, maior será a produtividade da cultura.

Figura 84 – Índice de área foliar nas parcelas em sete períodos de avaliação
Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Como os valores de IAF são relacionados com a área foliar média, os tratamentos que apresentaram os valores extremos foram a testemunha (T) com valores médios de 3,54 e o P2V4 com valores médios de 2,85 (Figura 85). Com exceção ao tratamento P2V4, os outros tratamentos não apresentaram diferença estatística significativa entre si. A causa do menor índice para o tratamento P2V4 pode ser relacionando a dano provocado por cochonilha (*Saccharicoccus sacchari*). Segundo Asrar; Kanemasu e Yoshida (1985), o IAF é um importante parâmetro do dossel vegetal. A magnitude e a duração do IAF estão fortemente relacionadas com a capacidade do dossel em interceptar radiação fotossinteticamente ativa; portanto, o IAF está correlacionado com a fotossíntese do dossel e com o acúmulo de matéria seca, em situações onde não predominam o estresse (água, doenças, pragas, etc.). Segundo Watson (1952), o IAF pode ser considerado como principal responsável pelas diferenças na produção biológica das culturas.

Figura 85 – Índice de área foliar médio dos tratamentos

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

2.3.8 Produtividade e seus componentes

Os resultados da análise de variância obtida com os valores médios de fitomassa dos colmos colhidos nas parcelas experimentais são apresentados nas Tabelas 37 e 38. Observa-se que as causas de variação experimentais da análise de variância quando analisada separadamente, os parâmetros massa verde dos ponteiros (MVP) e massa seca dos ponteiros (MSP) apresentaram diferença significativas para os períodos (67, 215 e 305 DAP) e para os tratamentos formados da combinação velocidade – período; já a massa verde dos colmos (MVC), a massa seca dos colmos

(MSC), massa verde total (MVT) e massa seca total (MST) apresentaram diferença significativa apenas para a interação entre velocidade e períodos.

Tabela 37 – Resultados dos quadrados médios da análise de variância da massa verde dos colmos (MVC), massa seca dos colmos (MSC), massa verde dos ponteiros (MVP) e massa seca dos ponteiros (MSP) nas parcelas com os tratamentos P1V1, P1V2, P1V3, P1V4, P1V5, P2V1, P2V2, P2V3, P2V4, P2V5, P3V1, P3V2, P3V3, P3V4 e P3V5

Causas de variação	GL	MVC	MSC	MVP	MSP
		QM			
Períodos	2	0,035 ^{ns}	0,006 ^{ns}	1,02 ^{**}	0,042 ^{**}
Velocidades	4	0,118 ^{ns}	0,012 ^{ns}	0,07 ^{ns}	0,005 ^{ns}
Velocidades*Períodos	8	0,879 ^{**}	0,071 ^{**}	0,23 ^{ns}	0,013 ^{ns}
Blocos	3	2,902 ^{**}	0,210 ^{**}	0,17 ^{ns}	0,009 ^{ns}
Tratamentos	15	0,512 ^{ns}	0,042 ^{ns}	0,31 ^{**}	0,015 ^{**}
Resíduo	45	0,375	0,031	0,11	0,007
Total	63				

^{**} significativo ao nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F.

^{ns} não significativo ao nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F.

Calheiros et al. (2000) verificaram que os valores de massa seca em trigo que apresentaram-se significativos à severidade do estresse e se mostraram inversamente proporcional às alturas das plantas apontando para um estiolamento nas plantas que sofreram a adaptação induzida. Nos tratamentos que foram submetidos ao maior rigor de estresse, a altura e a massa seca atingiram o menor valor, traduzindo uma nítida limitação no desenvolvimento.

Tabela 38 – Resultados dos quadrados médios da análise de variância da massa verde total (MVT), massa seca total (MST) e volume de colmos colhidos (VCC) nas parcelas com os tratamentos P1V1, P1V2, P1V3, P1V4, P1V5, P2V1, P2V2, P2V3, P2V4, P2V5, P3V1, P3V2, P3V3, P3V4 e P3V5

Causas de variação	GL	MVT	MST	VCC
		QM		
Períodos	2	0,68 ^{ns}	0,016 ^{ns}	0,00000078 ^{ns}
Velocidades	4	0,03 ^{ns}	0,005 ^{ns}	0,00000004 ^{ns}
Velocidades*Períodos	8	1,16 ^{**}	0,088 ^{**}	0,00000088 ^{**}
Blocos	3	4,13 ^{**}	0,294 ^{**}	0,00000186 ^{**}
Tratamentos	15	0,78 ^{ns}	0,054 ^{ns}	0,00000059 ^{ns}
Resíduo	45	0,42	0,033	0,00000039
Total	63			

^{**} significativo ao nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F.

^{ns} não significativo ao nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F.

2.3.8.1 Massa verde dos colmos (MVC)

Os valores médios extremos de massa verde dos colmos para as causas de variação que não apresentaram significância, na análise de variância, são os seguintes: 3,34 kg para a testemunha, 3,55 kg para o período de 67 DAP, 3,67 kg para a velocidade três dias para rebaixar 0,30 m e 4,07 kg para o tratamento P3V1. A massa verde dos colmos apresentou significância para interação velocidade*período (Tabela 37); no entanto, fazendo o desdobramento e comparando as médias pelo teste Tukey observou-se que a diferença não se expressa (Figura 86). Podemos afirmar, que para tal condição experimental, o encharcamento das parcelas com posterior rebaixamento de 0,30 m em 3, 6, 9, 12 e 15 dias (velocidade) nos diferentes períodos (67, 210 e 305 DAP), que representam as fases de transição do ciclo cultural da cana-de-açúcar, não interferiram na produção de massa verde dos colmos com valores médios variando entre 2,96 a 4,07 kg por parcela.

Figura 86 – Massa verde média dos colmos obtidos nas parcelas considerando a interação velocidade*período

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, sendo que as letras minúsculas comparam médias entre as velocidades e as maiúsculas comparam médias entre os períodos.

Sá (2005), estudando soja, sobre condição de encharcamento, não encontrou diferenças significativas entre os cultivares em relação à massa de folhas, de ramos e total, indicando que os efeitos da inundação do solo no desenvolvimento da parte aérea dos genótipos analisados foram semelhantes. No entanto, a saturação hídrica do solo por um período de 72h ocasionou prejuízos significativos ao desenvolvimento da parte aérea das plantas de soja, massa de folhas e de ramos.

Cruciani e Minami (1981) estudando a inundação (5 e 10 dias somente de excesso de água) em cana-de-açúcar comprovou que o peso total do colmo, como a altura da planta, ou seja, o crescimento da parte aérea, não foram afetados pelo excesso de água, comentando que os tratamentos não tenham sido intensos, dando tempo para a recuperação rápida da planta. Estes mesmos autores chamam a atenção para as condições ambientais (alta temperatura e umidade) e sugere que em tais condições, as plantas mantêm-se em um estado permanente de vegetação.

2.3.8.2 Massa seca dos colmos (MSC)

Os extremos de massa seca dos colmos para as causas de variações que não apresentaram significância na análise de variância são os seguintes: 0,99 kg para a testemunha, 1,05 kg para o período de 67 DAP, 1,08 kg para a velocidade de rebaixamento de três dias para rebaixar 0,30 m e 1,20 kg para o tratamento P3V1 (Figura 87).

Figura 87 – Massa seca média dos colmos obtidos nas parcelas considerando a interação velocidade*período

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, sendo que as letras minúsculas comparam médias entre as velocidades e as maiúsculas comparam médias entre os períodos.

A massa seca dos colmos obtida da massa verde dos colmos, também não apresentou diferença significativa para o desdobramento da interação velocidade*período. Os valores extremos médios obtidos com o rebaixamento de 0,30 m em 3, 6, 9, 12 e 15 dias nos períodos 67, 215 e 305 DAP foram 1,2; 1,1; 1,16; 1,08 e 1,11 kg, respectivamente (Figura 87).

2.3.8.3 Massa verde dos ponteiros (MVP)

A massa verde média dos ponteiros para a causa de variação velocidade não apresentou significância na análise de variância e o valor extremo obtido entre as diferentes velocidades de rebaixamento foi de 1,22 kg, sendo que a plantas da testemunha contribuíram com uma massa 0,79 kg. A massa verde dos ponteiros está diretamente relacionada ao vigor vegetativo das plantas, números de folhas abertas e as presentes no cartucho e conseqüentemente a área foliar. A Figura 88a apresenta as médias de MVP evidenciando e comparando os valores médios obtido da testemunha, plantas que não sofreram inundação das suas parcelas, com os valores médios de MVP obtidos em cada período, nos quais as plantas sofreram o estresse de ter em seu sistema radicular o excesso de umidade. A Figura 88b apresenta os valores médios de massa verde dos ponteiros para os diferentes tratamentos resultantes da combinação entre o rebaixamento de 0,30 m em 3, 6, 9, 12 e 15 dias e os períodos que ocorreu o estresse por excesso de água no sistema radicular das plantas. Observa-se que os valores médios de massa verde dos ponteiros sobressaíram para as parcelas que teve sua inundação provocada aos 210 e 305 DAP, diferindo dos valores médios de massa verde das parcelas que sofreu o estresse aos 67 e das parcelas que continham plantas da testemunha. Evidenciando os valores médios da massa verde dos ponteiros para os tratamentos formados, observamos que o P2V4 com 1,64 kg diferiu-se significativamente dos valores médios encontrados nas parcelas com plantas testemunha e como os tratamentos P1V1 e P1V4, com 0,79; 0,70 e 0,76 kg, respectivamente. Mas na grande maioria dos tratamentos a massa verde dos ponteiros mostrou valores médios semelhantes estatisticamente. Os efeitos da inundação do solo na parte aérea das plantas são geralmente atribuídos à inibição da expansão foliar e à redução do número de folhas, relacionada com abscisão foliar (WADMAN; ANDEL, 1985; KOZLOWSKI, 1984).

Figura 88 – a) Massa verde média dos ponteiros obtidos nas parcelas considerando os períodos; b) Massa verde média dos ponteiros obtidos nas parcelas considerando os diferentes tratamentos

Médias seguidas da mesma letra, entre os períodos e os tratamentos, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade e quando comparadas, os tratamentos com a testemunha, médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade

O fato de que as temperaturas, ar e solo, mantiveram-se altas na implantação dos tratamentos, relativo ao primeiro período de estresse, chegando aos extremos de 34 e 45 °C, respectivamente, tornou esse período ainda mais severo para as plantas, por essa ocorrência justamente no estágio de intensa atividade metabólica, contando com um sistema radicular pouco efetivo, tendo ainda que satisfazer a uma demanda evapotranspirométrica mais elevada. Esse mesmo efeito foi obtido por Calheiros et al. (2000) trabalhando com trigo também sob a condição encharcamento. Baseado nas considerações de Calheiros et al. (2000) dentre uma gama de possibilidades infere-se que, com o aumento da evapotranspiração, o sistema radicular, já estaria fortemente afetado pela inundação das parcelas, limitado pelo NF a 0,30 m de profundidade, não conseguiu suprir a planta, de forma conveniente, o que foi agravado ainda mais pela temperatura. No entanto o rebaixamento do NF após os 0,30 m ocorreu de forma gradativa, considerada por Calheiros et al. (2000) uma opção de indução adaptativa, talvez a mais prática e efetiva estratégia, indução do sistema radicular à adaptação morfológica proporcionalmente com a velocidade do aumento da demanda evapotranspirométrica, ao invés de curtos e intermitentes períodos hipóxicos, como o empregado por estes autores e por Paula (2008). Em decorrência do discutido anteriormente, já que as condições experimentais favoreciam uma adaptação morfológica aos estresses pelo encharcamento, podemos chamar atenção para o efeito das altas temperaturas ocorridas durante o primeiro período que submeteu o estresse as plantas.

2.3.8.4 Massa seca dos ponteiros (MSP)

Os valores extremos de massa seca média dos ponteiros para a causa de variação velocidade de rebaixamento (sem significância) foi de 0,32 kg, sendo que a plantas da testemunha contribuíram com uma massa seca de 0,23 kg. Os valores médios de massa seca dos ponteiros obtidos nas parcelas com as plantas testemunha e nos diferentes períodos de avaliação são apresentados na Figura 89a. A Figura 89b apresenta os valores médios de massa seca dos ponteiros para os diferentes tratamentos. Considerando a desidratação do material colhido podemos perceber mais uma vez que os valores médios de massa seca dos ponteiros para os períodos 210 e 305 DAP são semelhantes e que diferencia dos valores obtidos com as plantas presentes nas parcelas que sofreram a inundação no período de 67 DAP, assim como a massa seca do ponteiro das plantas que estiveram submetidas apenas a irrigação. Para representar os valores extremos médios de massa verde dos ponteiros temos o tratamento P2V4 com 0,42 kg e média das plantas da testemunha com 0,23 kg. Segundo Pizarro (1978) as espécies vegetais apresentam diferente tolerância ao excesso de umidade no seu sistema radicular. Para a condição de inundação das parcelas experimental Sá (2005) comprovou que massa seca total da parte aérea das plantas de soja decresceu linearmente com o prolongamento da inundação do solo.

Figura 89 – a) Massa seca média dos ponteiros obtidos nas parcelas considerando os períodos; b) Massa seca média dos ponteiros obtidos nas parcelas considerando os diferentes tratamentos

Médias seguidas da mesma letra, entre os períodos e os tratamentos, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade e quando comparadas, os tratamentos com a testemunha, médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade

Severino et al., (2004) em um experimento que submetia a mamoneira ao encharcamento aos 34 dias após a emergência por períodos de encharcamento de: 0, 3, 4, 6, 8 e 10 dias observou redução massa seca da parte aérea. Os sintomas desenvolvidos pela planta são os mesmos

descritos na literatura para outras espécies (PIRES et al., 2002; DAVANSO et al., 2002; MARSCHNER, 1995), porém, noutras plantas as adaptações são suficientes para mantê-las vivas e até mesmo produzirem, como observado na soja por PIRES et al. (2002) e em algodão por Almeida et al. (1992) e Beltrão et al. (1997).

2.3.8.5 Massa verde total (MVT)

Os valores médios extremos de massa verde total para as causas de variações que não apresentaram significância, na análise de variância, são os seguintes: 4,13 kg para a testemunha, 3,78 kg para o período de 305 DAP, 4,68 kg para a velocidade três dias para rebaixar 0,30 m e 5,57 kg para o tratamento P3V1. A massa verde total não apresentou diferença significativa para o desdobramento da interação velocidade*período (Figura 90).

Figura 90 – Massa verde total média obtida nas parcelas considerando a interação velocidade*período

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, sendo que as letras minúsculas comparam médias entre as velocidades e as maiúsculas comparam médias entre os períodos.

Mesmo não apresentando diferença estatística observa-se que para os períodos 215 e 305 DAP ocorreu maior variação na massa verde total em função do rebaixamento de 0,30 m em 3, 6,

9, 12 e 15. Para o período de 215 DAP as maiores massas verdes totais ocorreram nas parcelas que tiveram o rebaixamento mais lento; já no período 305 DAP obteve a maior massa verde total para o rebaixamento dos 0,30 m em 3 dias. A massa verde total expressa a fitomassa das plantas considerando as partes que são de interesse comercial, o colmos, e também a parte aérea, os ponteiros, que é deixado na área no momento da colheita, constituindo material que entra na ciclagem dos nutrientes.

O efeito positivo da presença de palhada sobre a produtividade da cana-de-açúcar foi relatado por Wood (1991) em relação a solos com boa taxa de drenagem, ou em regiões com precipitação pluvial insuficiente ou irregular. Ball-Coelho et al. (1993) observaram que a manutenção da palhada sobre o solo causou aumentos de 43% na produção de matéria seca da cana-de-açúcar.

2.3.8.6 Massa seca total (MST)

Os extremos de massa seca total para as causas de variações que não apresentaram significância na análise de variância são os seguintes: 1,22 kg para a testemunha, 1,36 kg para o período de 305 DAP, 1,37 kg para a velocidade de rebaixamento de nove dias para rebaixar 0,30m e 1,57 kg para o tratamento P3V1. A Figura 91 apresenta os valores médios de massa seca total para o desdobramento da interação velocidade*período. Não ocorreu diferença estatística dessas massas nos diferentes períodos e sobre diferentes velocidades de rebaixamento do NF. No entanto Glinski e Stepniewski (1986) afirmam que dependendo do estágio do desenvolvimento, o estresse anoxítico causa profundas alterações bioquímicas e químicas nas plantas, que se refletem na produção biológica, na partição dos assimilados, e, conseqüentemente, na produção econômica.

As cultivares de cana-de-açúcar destinada à produção de açúcar e álcool, são normalmente utilizadas para a produção de forragens, pois praticamente não existe melhoramento genético para esse objetivo. A cana-de-açúcar é um importante recurso forrageiro utilizado na maioria das unidades de produção familiares, por apresenta a máxima produção de MS e percentagem de sacarose no período de entre safra de forragens de inverno e verão ou período seco, e de maior adaptabilidade na maioria das regiões (KERPEL et al., 2003).

Figura 91 – Massa seca total média obtida nas parcelas considerando a interação velocidade*período

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, sendo que as letras minúsculas comparam médias entre as velocidades e as maiúsculas comparam médias entre os períodos.

2.3.9 Índices fisiológicos

Segundo Silva et al. (2005) o crescimento das plantas depende da conversão da energia luminosa em energia química, cuja intensidade é proporcional a interceptação capturada da luz pelo dossel da cultura. A cana-de-açúcar, por ser uma planta C4, é altamente eficiente fotossinteticamente, e daí a importância das estimativas dos índices de crescimento, tais como, taxa de crescimento absoluto (TCA), taxa de crescimento relativo (TCR), taxa de assimilação líquida (TAL), razão de área foliar (RAF), área foliar específica (AFE) e taxa de crescimento da cultura (TCC) para melhor compreensão do desenvolvimento desta cultura. As Tabelas 39 e 40 apresentam esses índices para a condição experimental desenvolvida. Observa-se que a condição de inundação das parcelas proporcionada pelas diferentes velocidades de rebaixamento do NF com o objetivo de ocasionar estresse às plantas em diferentes períodos do ciclo cultural não interferiu nos valores médios da taxa de crescimento absoluto, taxa de assimilação líquida e na taxa de crescimento da cultura, pois estes não apresentaram diferença significativa para as causas

de variação da condição experimental. No entanto para a razão de área foliar, taxa de crescimento relativo, e área foliar específica ocorreu diferença significativa entre os tratamentos.

Tabela 39 – Resultados dos quadrados médios da análise de variância da taxa de crescimento absoluto (TCA), taxa de crescimento relativo (TCR), taxa de assimilação líquida (TAL) nas parcelas com os tratamentos P1V1, P1V2, P1V3, P1V4, P1V5, P2V1, P2V2, P2V3, P2V4, P2V5, P3V1, P3V2, P3V3, P3V4 e P3V5

Causas de variação	GL	TCA	TCR	TAL
		QM		
Períodos	2	0,0000003 ^{ns}	0,000004 ^{**}	0,000001 ^{ns}
Velocidades	4	0,0000003 ^{ns}	0,000002 ^{ns}	0,000002 ^{ns}
Velocidades*Períodos	8	0,0000012 ^{ns}	0,000001 ^{ns}	0,000004 ^{ns}
Blocos	3	0,0000048 ^{**}	0,000002 ^{ns}	0,000017 ^{**}
Tratamentos	15	0,0000009 ^{ns}	0,000002 ^{ns}	0,000003 ^{ns}
Resíduo	45	0,0000006	0,000001	0,000003
Total	63			

^{**} significativo ao nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F.

^{ns} não significativo ao nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F.

Os valores médios extremos para a TCA que não apresentaram significância na análise de variância podem ser caracterizados da seguinte forma: 0,0016 kg dia⁻¹ para a testemunha, 0,0024 kg dia⁻¹ para o período de 210 DAP, 0,0025 kg dia⁻¹ para a velocidade nove dias para rebaixar 0,30 m e 0,0031 kg dia⁻¹ para o tratamento P3V1.

Os valores médios extremos para a TAL que não apresentaram significância na análise de variância podem ser caracterizados da seguinte forma: 0,0036 kg m⁻² dia⁻¹ para a testemunha, 0,0051 kg m⁻² dia⁻¹ para o período de 210 DAP, 0,0053 kg m⁻² dia⁻¹ para a velocidade nove dias para rebaixar 0,30 m e 0,0059 kg m⁻² dia⁻¹ para o tratamento P1V1.

Os valores médios extremos para a TCR que não apresentaram significância na análise de variância podem ser caracterizados da seguinte forma: 0,0036 m m⁻¹ dia⁻¹ para a testemunha, 0,0053 m m⁻¹ dia⁻¹ para a velocidade 3 e 9 dias para rebaixar 0,30 m e 0,006 kg dia⁻¹ para o tratamento P2V3.

Tabela 40 – Resultados dos quadrados médios da análise de variância da razão de área foliar (RAF), área foliar específica (AFE), taxa de crescimento da cultura (TCC) nas parcelas com os tratamentos P1V1, P1V2, P1V3, P1V4, P1V5, P2V1, P2V2, P2V3, P2V4, P2V5, P3V1, P3V2, P3V3, P3V4 e P3V5

Causas de variação	GL	RAF	AFE	TCC
		-----	QM -----	
Períodos	2	0,05 ^{**}	6,07 ^{**}	0,0002 ^{ns}
Velocidades	4	0,01 ^{ns}	1,14 ^{ns}	0,0004 ^{ns}
Velocidades*Períodos	8	0,01 ^{ns}	0,45 ^{ns}	0,0014 ^{ns}
Blocos	3	0,02 ^{ns}	0,97 ^{ns}	0,0053 ^{**}
Tratamentos	15	0,01 ^{ns}	1,37 ^{**}	0,0009 ^{ns}
Resíduo	45	0,01	0,67	0,0007
Total	63			

^{**} significativo ao nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F.

^{ns} não significativo ao nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F.

Os valores médios extremos para a RAF que não apresentaram significância na análise de variância podem ser caracterizado da seguinte forma: 0,54 m² kg⁻¹ para a testemunha, 0,62 m² kg⁻¹ para a velocidade 3 dias para rebaixar 0,30 m e 0,69 m² kg⁻¹ para o tratamento P2V1.

Os valores médios extremos para a AFE que não apresentaram significância na análise de variância podem ser caracterizados da seguinte forma: 2,97 m² kg⁻¹ para a testemunha, 3,29 m² kg⁻¹ para a velocidade 3 dias para rebaixar 0,30 m.

Os valores médios extremos que representam a TCC para as diferentes causas de variação que compõem a tabela da análise de variância se expressam da seguinte forma: 0,054 kg m⁻² dia⁻¹ para a testemunha, 0,070 kg m⁻² dia⁻¹ para o período de 210 DAP, 0,073 kg m⁻² dia⁻¹ para a velocidade 9 e 15 dias para rebaixar 0,30 m e 0,089 kg m⁻² dia⁻¹ para o tratamento P2V5.

2.3.9.1 Razão de área foliar (RAF)

A RAF é a área foliar útil para a fotossíntese. Benincasa (2003) considera a RAF como uma componente morfofisiológica, pois é a razão entre área responsável pela interceptação de energia luminosa e CO₂ e matéria seca total, resultado da fotossíntese. Os valores médios para a razão de área foliar das plantas avaliadas são apresentados na Figura 92. O encharcamento ocasionado aos 210 DAP proporcionou um valor de RAF de 0,63 m² kg⁻¹, diferindo estatisticamente apenas do valor médio 0,53 m² kg⁻¹ obtido quando o encharcamento ocorreu aos 305 DAP; observa-se uma tendência de redução no valor médio da RAF à medida em que as plantas se aproximam do

período da colheita; Rossetto e Nakagawa (2001) e Silva et al. (2005) constataram, em seus estudos, queda para este índice fisiológico, à medida que a planta se desenvolve, e a potencialidade de produção de assimilação decresce.

Figura 92 – Razão de área foliar obtida nas parcelas considerando os períodos

Médias seguidas da mesma letra, entre os três períodos, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade e quando comparadas, os períodos com a testemunha, médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade

De acordo com Rodrigues (1982), a RAF é uma medida relativa do aparelho assimilador, ou seja, ela representa a dimensão relativa do aparelho fotossintético, sendo bastante apropriada a avaliação dos efeitos genotípicos, climáticos e de comunidades vegetais.

2.3.9.2 Taxa de crescimento relativo (TCR)

Na Figura 93 podemos observar que as plantas testemunhas diferenciaram apenas das plantas das parcelas que sofreram o estresse por encharcamento, aos 210 DAP; sendo o excesso de umidade no seu sistema radicular benéfico, proporcionando maior taxa de crescimento relativo da área foliar (TCR) destas plantas. Entre as plantas que sofreram o encharcamento, e posterior rebaixamento de 0,30 m em 3, 6, 9, 12 e 15 nos períodos 67, 215 e 305 DAP, os valores encontrados de TCR apresentaram-se semelhantes, 0,0049, 0,0053 e 0,0044 m m⁻¹ dia⁻¹, respectivamente; a diferença expressou-se entre as plantas estressadas aos 210 DAP (0,0053 m m⁻¹ dia⁻¹) e a testemunha (0,0036 m m⁻¹ dia⁻¹), submetida apenas a irrigação. Aos 305 DAP observa-

se uma leve redução, embora não significativa, que provavelmente chegaria ser diferente na época da colheita, pois segundo Gava et al. 2001 a TCR diminuiu à medida que a planta cresce, devido, entre outros fatores, ao aumento de competição intra-específica pelos principais fatores ambientais responsáveis pelo crescimento vegetal, tais como: água, luz, nutrientes, difusão de CO₂ dentro do estande.

Figura 93 – Taxa de crescimento relativo obtido nas parcelas considerando os períodos. Médias seguidas da mesma letra, entre os três períodos, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade e quando comparadas, os períodos com a testemunha, médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade.

Silva et al. (2005) afirmam que essa diminuição contínua da TCR pode ser explicada pela elevação da atividade respiratória e pelo autosombreamento, cuja importância aumenta com a idade da planta. Segundo Milthorpe e Moorby (1974) na fase final da cultura, o crescimento se torna negativo em função da morte das folhas e gemas. Por tal motivo, o incremento da AF é uma medida estratégica para maximizar a superfície da folha, refletindo a área disponível para a absorção de luz por unidade de fotoassimilado investido (MARAÑON; GRUBB 1993). Dessa forma, e concordando com Antúñez; Retamosa e Villar (2001), Pinzón-Torres e Schiavinato (2008) trabalhando com *Myroxylon peruiferum* obteve um maior TCR que atribuiu ao incremento da AF, evidenciado pelas variações na RAF. A TCR pode estar associada com a TAL, no sentido de refletir a taxa fotossintética na quantidade de AF disponível para a interceptação de luz e na alocação da biomassa foliar (LAMBERS; CHAPIN; PONS, 1998), mas alguns autores

(LAMBERS; POORTER, 1992, WRIGHT; WESTOBY, 2000), comentam que há pouca ou nenhuma relação entre TCR e TAL e que é de se esperar que as variações da TCR ocorram principalmente em função das diferenças na AFE.

2.3.9.3 Área foliar específica (AFE)

A AFE relaciona a superfície com a matéria seca das folhas expressando o potencial fotossintético das plantas nas parcelas inundadas. Os valores médios de AFE obtidos nas parcelas experimentais para os diferentes períodos em que ocorreu o encharcamento são apresentados na Figura 94. A área foliar específica para os diferentes níveis de estresse (rebaixamento de 0,30 m em 3, 6, 9, 12 e 15 nos períodos de 67, 215 e 305 DAP) apresentou diferença significativa entre os períodos 67 e 305 DAP, com valores $3,28$ e $2,18 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$, respectivamente. Benincasa (2003) apresenta valores variando de 12 a $2,30 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ para sorgo granífero sob a condição de baixa radiação.

Figura 94 – Área foliar específica obtida nas parcelas considerando os períodos

Médias seguidas da mesma letra, entre os três períodos, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade e quando comparadas, os períodos com a testemunha, médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade

O ambiente protegido, condição experimental necessária para o estudo proposto, interferiu na intensidade de radiação que chegou ao topo das folhas, como discutido no item 2.3.4. Wang et al. (1994) observaram que as alterações nos parâmetros relacionados à morfologia foliar (AFE e

RAF) com o aumento de idade das plantas destacando a capacidade de adaptação das folhas às condições variáveis de radiação ao longo do desenvolvimento das plantas. Segundo Grotkopp e Rejmánek (2007), uma alta AFE permite maior eficiência na captura da energia solar e é a partir da fotossíntese, em condições nutricionais ótimas, que a capacidade competitiva se evidencia.

Silva et al. (2005) encontrou valores decrescentes com o desenvolvimento da cultura, mostrando que a cultura da cana-de-açúcar transloca suas reservas das folhas para outras partes da planta, principalmente nos colmos, comportamento esse observado também por Aguiar Netto; Rodrigues e Nascimento Júnior (1999), na cultura da batata sob diversas lâminas de irrigação. Considerando que a área foliar é um componente anatômico de uma espécie vegetal, pois está relacionado à composição interna (número ou tamanho das células do mesófilo foliar), verifica-se que na verdade o inverso da AFE reflete a espessura das folhas (BENINCASA, 2003). Para Rodrigues (1990) em seus estudos pareceu lógico que no início do desenvolvimento vegetativo os valores da AFE sejam maiores, caindo a seguir e tornando-se constante posteriormente.

Calheiros (2000) considera que há fortes evidências de que o manejo adequado do lençol freático pode ser a melhor estratégia para a exploração de culturas mesófitas em terras baixas, proporcionando às plantas maiores chances de sobrevivência, quando da ocorrência de um evento hipóxico temporal como, por exemplo, uma enchente resultante de uma chuva à montante.

2.3.10 Índice de maturação

Com o uso do sistema de pagamento pelo teor de sacarose, mais precisamente pelo teor de açúcares totais recuperáveis (ATR/Mg de cana-de-açúcar colhida), há necessidade do produtor conciliar a alta produtividade da cana como o elevado teor de sacarose na época de colheita representado pelo °Brix, que deve ser superior a 18 % e se apresentar uniformemente ao longo dos colmos.

O princípio fundamental básico do início da maturação é a redução do crescimento por idade fisiológica ou por fatores ambientais como deficiência hídrica e/ou térmica. A variedade também é um fator importante para se determinar previamente a época de maior maturação (PEREIRA; SEGATO, 2006). Segundo Câmara (1993) as variedades são ainda classificadas como ricas, médias e pobres no acúmulo de sacarose.

Os valores médios de Brix para a determinação do índice de maturação da cana-de-açúcar são apresentados na Tabela 41. Dentre as causas de variação, o Brix apresentou significância para as três diferentes posições, para a interação velocidades*períodos, para os três diferentes colmos avaliados e para os tratamentos compostos pela velocidade de rebaixamento de 0,30 m em 3, 6, 9, 12 e 15 dias. As demais causas não expressaram significância, contudo os valores médios de Brix obtidos no caldo extraído foram 19,9 (testemunha), 19,71 nas plantas que sofreram o estresse aos 67 DAP e 20,36 nas parcelas que sofreram rebaixamento de 0,30 m em 9 dias.

Tabela 41 – Resultados dos quadrados médios da análise de variância do Brix em diferentes posições dos colmos, para determinação do índice de maturação, para os tratamentos P1V1, P1V2, P1V3, P1V4, P1V5, P2V1, P2V2, P2V3, P2V4, P2V5, P3V1, P3V2, P3V3, P3V4 e P3V5

Causas de variação	GL	QM
Períodos	2	3,68 ^{ns}
Velocidade	4	10,22 ^{ns}
Posições	2	230,98 ^{**}
Velocidades*Períodos	8	32,32 ^{**}
Períodos*Posições	4	3,86 ^{ns}
Velocidades*Posições	8	3,02 ^{ns}
Colmos	2	94,85 ^{**}
Bloco	1	11,75 ^{ns}
Tratamento	15	21,89 ^{**}
Resíduo	262	8,20
Total	278	

^{**} significativo ao nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F.

^{ns} não significativo ao nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F.

Os valores médios obtidos da análise do caldo extraído em três posições diferentes do colmo são apresentados na Figura 95. Segundo do Pereira e Segato (2006) o acúmulo de sacarose se dá da base para o ápice da planta e quando o conteúdo de açúcar é uniforme em toda a longitude do colmo, diz-se que a cana chegou ao estado de maturação completa. Os valores médios de Brix encontrados para a base, meio e ponta foram 21,07, 19,74 e 17,81, respectivamente, diferindo estatisticamente entre si. Marques; Marques e Tasso Junior (2001) afirmam que quando os valores médios de Brix obtidos na porção mediana do colmo excederem a 18, com posterior confirmação em laboratório, pode proceder-se a colheita. A diferença entre os valores médios de Brix da base e ponta chegou a 18,5 %. Mendes; Ferraz e Pelá (2007) para a mesma cultivar e sob a condição de

temperaturas elevadas, com chuvas no verão e seca no inverno, o °Brix foi determinados aos 230, 290, 370 e 387 DAE, com o caldo coletado do terceiro colmo a partir da base, e encontraram os seguintes valores 23, 26, 26, 26, respectivamente, sendo que para os últimos períodos os valores de Brix na ponta foram 26 e 24, respectivamente.

Figura 95 – Valores médios de Brix obtido em diferentes posições dos colmos

Médias seguidas da mesma letra, entre os três períodos, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade e quando comparadas, os períodos com a testemunha, médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade

O desdobramento da interação velocidade*períodos apresentou valores médios de Brix que podem ser visualizados na Figura 96. Os valores médios extremos foram 21,48 e 16,37 para o estresse das plantas aos 305 DAP e para as velocidades de rebaixamento de 0,30 m em 9 e 12 dias após a inundação das parcelas, respectivamente. Se comparados com os valores recomendados por Marques; Marques e Tasso Junior (2001) as parcelas que sofreram inundação aos 305 DAP e submetida a velocidade rebaixamento de 0,30 em 12 dias ainda não se encontravam maduras.

Considerando o desenvolvimento dos colmos os valores médios de Brix encontrados no caldo dos três diferentes colmos avaliados são apresentados na Figura 97. Os valores médios de Brix encontrados no colmo 1 e 2, 19,96 e 20,29, respectivamente, cronologicamente mais velhos, diferiram do valor do Brix do terceiro colmo, 18,24, que se encontravam em pleno desenvolvimento.

Figura 96 – Valores médios de Brix obtido em diferentes posições dos colmos considerando a interação velocidade*período

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, sendo que as letras minúsculas comparam médias entre as velocidades e as maiúsculas comparam médias entre os períodos.

Figura 97 – Valores médios de Brix obtido em considerando o desenvolvimento dos colmos amostrados

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

Os tratamentos na sua grande maioria não apresentaram diferença estatística significativa para os valores médios de Brix, a exceção foram os tratamentos P1V1, P1V4, P2V3 P2V4, P3V3, P3V5 e testemunha quando comparados com o tratamento P3V4 (Figura 98). Os valores médios

de Brix obtidos variou entre 21,72 e 16,37, com uma diferença de 24,6 % entre esses valores extremos.

Figura 98 – Valores médios de Brix obtido considerando os diferentes tratamentos

Médias seguidas da mesma letra, entre os três períodos, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

A relação entre os valores médios Brix da base com a ponta expressa o índice de maturação, e os valores obtidos dessa relação quando analisados estatisticamente, considerando as causas de variações experimentais, obteve significância apenas para os colmos, como é apresentado na Tabela 42. Para as demais causas de variação que não apresentaram significância obteve valores médios extremos de índice de maturação de 0,89 nas plantas testemunhas, 0,87 para o período 305 DAP, 0,88 para a velocidade de rebaixamento 0,30 m em 6 dias e 0,96 para o tratamento P3V2.

Tabela 42 – Resultados dos quadrados médios da análise de variância do índice de maturação dos colmos nos tratamentos P1V1, P1V2, P1V3, P1V4, P1V5, P2V1, P2V2, P2V3, P2V4, P2V5, P3V1, P3V2, P3V3, P3V4 e P3V5

Causas de variação	GL	QM
Períodos	2	0,02026 ^{ns}
Velocidades	4	0,01988 ^{ns}
Velocidade*Períodos	8	0,02308 ^{ns}
Colmos	2	0,15157 ^{**}
Bloco	1	0,00003 ^{ns}
Tratamento	15	0,02185 ^{ns}
Resíduo	76	0,02323
Total	92	

^{**} significativo ao nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F.

^{ns} não significativo ao nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F.

A Figura 99 apresenta os valores médios do índice de maturação obtidos do caldo dos colmos na ocasião da colheita.

Figura 99 – Índice de maturação obtido nas parcelas considerando o desenvolvimento dos colmos amostrados

Médias seguidas da mesma letra, entre os três períodos, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade e quando comparadas, os períodos com a testemunha, médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade

Os colmos cronologicamente mais velhos apresentaram valores de índice de maturação com diferença significativa em relação ao terceiro colmo que ainda se encontravam na sua fase

vegetativa. Os valores médios obtidos foram 0,86, 0,90 e 0,76 para o primeiro, segundo e terceiro colmos, respectivamente, Figura 99. Mendes; Ferraz e Pelá (2007) encontraram 0,83 e 0,92 de índice de maturação aos 370 e 387 DAE, respectivamente.

2.3.11 Parâmetros de qualidade

Analizando estatisticamente os valores obtidos para os parâmetros de qualidade: Porcentagem em massa de sólidos solúveis no caldo (Brix), Porcentagem de massa de sacarose aparente no caldo (Pol) e açúcar teórico recuperável (ATR) estes apresentaram significância no quadro de análise de variância para as causas de variação: interação velocidade*período e para os tratamentos; já a fibra apresentou significância para os períodos; os demais: açúcar redutor da cana (ARC) e rendimento de açúcar teórico (RAT) não apresentou significância (Tabelas 43 e 44).

Tabela 43 – Resultados dos quadrados médios da análise de variância do Brix, Pol e açúcar redutor da cana (ARC) nas parcelas com os tratamentos P1V1, P1V2, P1V3, P1V4, P1V5, P2V1, P2V2, P2V3, P2V4, P2V5, P3V1, P3V2, P3V3, P3V4 e P3V5

Causas de variação	GL	°Brix	Pol	ARC
		-----	QM -----	-----
Períodos	2	0,716 ^{ns}	0,48 ^{ns}	0,002 ^{ns}
Velocidades	4	0,590 ^{ns}	0,69 ^{ns}	0,002 ^{ns}
Velocidades*Períodos	8	0,708 ^{**}	0,84 ^{**}	0,001 ^{ns}
Blocos	3	0,550 ^{ns}	0,71 ^{ns}	0,002 ^{ns}
Tratamentos	15	0,659 ^{**}	0,72 ^{**}	0,002 ^{ns}
Resíduo	45	0,305	0,33	0,001 ^{ns}
Total	63			

^{**} significativo ao nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F.

^{ns} não significativo ao nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F.

Os valores médios extremos que representam o ARC para as diferentes causas de variação que compõe a tabela da análise de variância e que não apresentou significância se expressam da seguinte forma: 0,47 para a testemunha, 0,49 para o período de 67 DAP, 0,49 para a velocidade 9 e 12 dias para rebaixar 0,30 m e 0,51 para o tratamento P1V1 e P3V4. Paula (2008) obteve valores médios de ARC de 0,53 e o como maior valor de ARC, 0,65 para uma condição de NF a uma profundidade de 0,50 m por um período de 4 dias aos 270 DAP. Leite (2005) afirma que a concentração de ARC no caldo da cana-de-açúcar é menor em condições de limitação hídrica,

como é o caso do tratamento P1V1, e que em situações que apresentem maiores disponibilidades hídricas favoreceram uma maior concentração de sacarose, visto que a produção de ambas é antagônica.

Os valores médios extremos que representam o RAT para as diferentes causas de variação que compõe a análise de variância, Tabela 44, e que não apresentou significância se expressam da seguinte forma: 0,51 kg parcela⁻¹ para a testemunha, 0,54 kg parcela⁻¹ para o período de 67 DAP, 0,55 kg parcela⁻¹ para a velocidade 3 dias para rebaixar 0,30 m e 0,61 kg parcela⁻¹ para o tratamento P3V1.

Tabela 44 – Resultados dos quadrados médios da análise de variância da Fibra, açúcar teórico recuperável (ATR) e RAT nas parcelas com os tratamentos P1V1, P1V2, P1V3, P1V4, P1V5, P2V1, P2V2, P2V3, P2V4, P2V5, P3V1, P3V2, P3V3, P3V4 e P3V5

Causas de variação	GL	Fibra	ATR	RAT
		QM		
Períodos	2	1,01 ^{**}	44,95 ^{ns}	0,0023 ^{ns}
Velocidades	4	0,30 ^{ns}	58,47 ^{ns}	0,0029 ^{ns}
Velocidades*Períodos	8	0,25 ^{ns}	71,88 ^{**}	0,0169 ^{ns}
Blocos	3	1,75 ^{**}	58,77 ^{ns}	0,0573 ^{**}
Tratamentos	15	0,35 ^{ns}	62,29 ^{**}	0,0102 ^{ns}
Resíduo	45	0,20	28,06	0,0082
Total	63			

^{**} significativo ao nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F.

^{ns} não significativo ao nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F.

2.3.11.1 Porcentagem de sólidos solúveis (° Brix)

Os valores médios extremos que representam o Brix para as diferentes causas de variação que compõe a tabela da análise de variância e que não apresentou significância se expressam da seguinte forma: 17,49 para a testemunha, 17,37 para o período de 67 DAP, 17,48 para a velocidade 9 dias para rebaixar 0,30 m. Os valores médios de Brix para interação velocidade*período são apresentados na Figura 100. As plantas que sofreram estresse pelo encharcamento no período de 305 DAP sob uma velocidade rebaixamento de 0,30 m em 12 dias apresentou valor médio de 16,03 % de Brix, inferior e significativamente diferente dos demais períodos e velocidades, enquanto que o encharcamento aos 67 DAP para a mesma velocidade de rebaixamento apresentou valor médio de 17,7 % de Brix. No entanto, seria inconsistente dizer que

alagamentos de 10 dias, e justifica os baixos valores as condições em que foi conduzido o experimento (alta temperatura e umidade do solo), as plantas mantiveram-se em estado permanente de vegetação. A cana necessita de um período de frio ou de seca para iniciar a maturação, o que não aconteceu com o experimento. Contrário de Paula (2008), que também testando a sensibilidade da cana-de-açúcar sob diferentes níveis freáticos (tratamentos com inundação de 4 e 8 dias de duração, a uma profundidade 0,25 e 0,50 m, aplicado aos 3, 6 e 9 meses após o plantio e com NF estacionário a 0,40 e 0,60 m durante todo o ciclo), não encontrou diferenças entre seus tratamentos, no entanto, obteve valores médios superiores de Brix (%) 18,99.

Figura 101 – Brix médio obtido nas parcelas considerando os diferentes tratamentos

Médias seguidas da mesma letra, entre os três períodos, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade e quando comparadas, os períodos com a testemunha, médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade

Pela semelhança dos valores médios de Brix obtido do caldo das plantas submetidas às condições experimentais pode-se afirmar que a maior severidade de inundação do sistema radicular, nos períodos de transição do ciclo cultural da cana-de-açúcar e posterior rebaixamento do NF de 0,30 m em 3, 6, 9, 12 e 15 dias, não afetou a porcentagem de sólidos solúveis presente no caldo da cana-de-açúcar.

2.3.11.2 Porcentagem em massa de sacarose aparente (Pol)

Representa o quanto de sacarose está presente nos sólidos solúveis do caldo. Os valores médios extremos que representam o pol para as diferentes causas de variação que compõe a tabela da análise de variância e que não apresentou significância se expressam da seguinte forma: 15,67 para a testemunha, 15,50 para o período de 67 DAP, 15,70 para a velocidade 9 dias para rebaixar 0,30 m (Figura 102). Paula (2008) obteve valores médios extremos de pol de 18,45 para uma condição do NF estacionado a 0,60 m durante todo o ciclo, o que caracterizou uma condição hídrica ideal.

Figura 102 – Pol médio obtido nas parcelas considerando a interação velocidade*período. Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, sendo que as letras minúsculas comparam médias entre as velocidades e as maiúsculas comparam médias entre os períodos.

Os valores médios de pol no caldo obtido das plantas evidenciando a interação dos períodos de estresses e das velocidades de rebaixamento de 0,30 m em 3, 6, 9, 12 e 15 dias são apresentados na Figura 102. O estresse do encharcamento aos 305 DAP para a velocidade de rebaixamento de 0,30 em 12 dias apresentou o menor valor médio de pol (14,18) diferindo, para

mesma velocidade, dos valores obtidos nas plantas que sofreram o encharcamento aos 67 DAP, com valor de 15,79, obtendo um acréscimo de 10,20 %.

Observa-se uma tendência, mesmos os valores não apresentando significância, de obter maiores valores de pol para as velocidades de rebaixamento 6 e 9 dias após a inundação para diferentes períodos. Paula (2008) observou que o tempo de 8 dias foi o que obteve melhores resultados, independente do estágio de aplicação dos tratamentos e profundidade do NF aplicado.

Os valores médios de pol para os tratamentos são apresentados na Figura 103. Os valores médios extremos obtidos foram de 15,92 e 14,18 para os tratamentos P3V3 e P3V4, respectivamente, representando uma diferença de 10,89 %. Os tratamentos restantes não diferiram entre si. Paula (2008) para suas condições experimentais obteve valor médio de 17,01 % de pol.

Figura 103 – Pol médio obtido nas parcelas considerando os diferentes tratamentos

Médias seguidas da mesma letra, entre os três períodos, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade e quando comparadas, os períodos com a testemunha, médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade

2.3.11.3 Açúcar teórico recuperável (ATR)

Os valores médios extremos que representam a ATR para as diferentes causas de variação que compõe a tabela da análise de variância e que não apresentou significância se expressam da seguinte forma: 153,59 kg Mg⁻¹ cana⁻¹ para a testemunha, 153,79 kg Mg⁻¹ cana⁻¹ para a velocidade

9 dias para rebaixar 0,30 m. Paula (2008) conseguiu as maiores concentrações de ATR nos tratamentos com níveis freáticos constantes a 60 e 40 cm durante todo o ciclo da cultura, 150,09 e 150,04, respectivamente.

Na Figura 104 são apresentados os valores médios de ATR para o desdobramento da interação velocidade*período. Como o pol e componente do ATR os valores obtidos tem características semelhantes, o encharcamento aos 305 DAP para a velocidade de rebaixamento de 0,30 em 12 dias apresentou o menor valor médio de ATR, 139,67 kg Mg⁻¹, assim como os valores obtidos das plantas que sofreram o encharcamento aos 67 DAP teve um acréscimo na ATR de 9,7 %. Mais uma vez destaca-se que o maior valor da componente em estudo, ATR, foi obtido para o rebaixamento de 0,30 m efetuado aos 9 dias após a inundação das parcelas.

Figura 104 – Açúcar teórico recuperável obtido nas parcelas considerando a interação velocidade*período

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, sendo que as letras minúsculas comparam médias entre as velocidades e as maiúsculas comparam médias entre os períodos.

Paula (2008) obteve-se a maior concentração de ATR com o tempo de 8 dias de duração de aplicação dos tratamentos independente da profundidade e do estágio de desenvolvimento da cultura. Para suas condições experimentais, mesmo a interação entre NF e estágio de

desenvolvimento apresentando significância na análise de variância, o desdobramento dos valores médios comparados por Tukey não diferiram significativamente evidenciando que os níveis freáticos aplicados e os diferentes estádios de desenvolvimento não causaram estresses para o acúmulo de ATR, tendo este sido influenciado apenas pelo tempo de duração dos tratamentos.

A Figura 105 apresenta os valores médios de ATR para os tratamentos propostos em função dos três períodos de encharcamento das parcelas e das cinco velocidades (3, 6, 9, 12 e 15 dias) de rebaixamento do NF a uma profundidade de 0,30 m. Obteve-se como o menor valor médio de ATR, 139,67 kg Mg⁻¹ para o tratamento P3V4 e destacando-se o tratamento P3V3 apresentando o maior valor médio de ATR de 155,70 kg Mg⁻¹. Essa redução do ATR devido ao rebaixamento do NF foi quantificado por Glaz e Gilbert (2006) avaliando cana-de-açúcar em lisímetros com diferentes níveis freáticos verificaram que a cada 1 cm de rebaixamento do NF a uma profundidade além dos 0,44 m, incrementou-se 0,04 a 0,38 kg de ATR m⁻².

Figura 105 – Açúcar teórico recuperável obtido nas parcelas considerando os diferentes tratamentos

Médias seguidas da mesma letra, entre os três períodos, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade e quando comparadas, os períodos com a testemunha, médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade

Gilbert et al. (2008) observaram que a inundação completa e níveis freáticos variando entre 11 a 18 cm abaixo da superfície do solo, durante o ciclo da cana-planta e cana-soca não tiveram influencia no acúmulo de açúcar. No entanto Glaz et al. (2002) observaram que profundidades

menores que 15 cm reduziu em 25% o acúmulo de açúcar, quando comparado com NF a 38 cm de profundidade. A respeito dessa contradição a qual chegaram os autores acima mencionados Paula (2008) chama a atenção para as diferentes respostas em função das variedades estudadas.

2.3.11.4 Fibra

Os valores médios extremos que representam a fibra para as diferentes causas de variação que compõe a tabela da análise de variância (Tabela 44) e que não apresentou significância se expressam da seguinte forma: 12,9 % para a testemunha, 12,94 % para a velocidade 9 dias para rebaixar 0,30 m e 13,19 % para o tratamento P3V3.

Figura 106 – Fibra da cana obtida nas parcelas considerando os períodos

Médias seguidas da mesma letra, entre os três períodos, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade e quando comparadas, os períodos com a testemunha, médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade

Paula (2008) em cultivo de cana-planta para condições de maior disponibilidade hídrica no início do ciclo obteve uma maior porcentagem de fibra, 11,45 %. No entanto, quando a inundação ocorreu no estágio final do ciclo cultural houve uma redução na porcentagem de fibra acumulada nesse estágio de desenvolvimento, independente da profundidade e tempo de duração das inundações, com valor de 10,19 %.

O parâmetro fibra mostrou significância na análise de variância para a causa de variação período (Tabela 44). No entanto, quando se comparou as médias dos períodos entre si, utilizando o teste Tukey, ou comparando os valores médios de fibra obtidos das plantas submetidas aos períodos de estresse com a média das plantas que esteve submetida somente à irrigação, utilizando o teste Dunnett, observou-se que a significância desapareceu, uma vez que, tais testes são menos rigorosos que o teste F, utilizado na análise de variância (Figura 106). O maior valor médio obtido entre os períodos e a testemunha foi de 12,97 %. Paula (2008) encontrou diferença entre os valores médios de fibra, 10,9 % e 10,7 % quando o estresse ocorreu aos 90 e 180 DAP, respectivamente, em relação ao valor médio de fibra de 10,3% obtido quando o estresse ocorreu aos 270 DAP.

3 CONCLUSÕES

Durante os estádios de desenvolvimento constatou-se que os tratamentos P2V1 e P1V3 apresentaram o menor e o maior valor de altura de colmos, respectivamente. O incremento de crescimento dos colmos não apresentou diferença entre os tratamentos e teve seu maior valor aos 120 DAP. Constatou-se que no período que as parcelas apresentaram o maior número de folhas foi o período que se contou o menor número de perfilhos. As parcelas apresentaram sua maior área foliar aos 120 DAP e o tratamento P2V4 apresentou o menor valor de área foliar, diferindo da grande maioria dos tratamentos. O IAF, sendo derivado da área foliar, apresentou as mesmas grandezas.

A produtividade e seus componentes expressos em valores médios de massa verde de colmos, massa seca dos colmos, massa verde dos ponteiros, massa seca dos ponteiros, massa verde total e massa seca total não foram afetados pelas velocidades de rebaixamento de 0,30 m em 3, 6, 9, 12 e 15 dias, não se diferenciaram entre si e nem em relação a testemunha. A massa verde e seca dos ponteiros nos períodos de inundação 210 e 305 DAP foram semelhantes e superiores, diferindo dos valores obtidos com as plantas presente nas parcelas que sofreram a inundação no período de 67 DAP e nas parcelas que continham a testemunha.

Entre os índices fisiológicos, a condição de inundação das parcelas proporcionada pelas diferentes velocidades de rebaixamento do NF não interferiu nos valores médios da taxa de crescimento absoluto, taxa de assimilação líquida e na taxa de crescimento da cultura; já a razão de área foliar, a taxa de crescimento relativo, e área foliar específica apresentaram diferenças significativas para os períodos; a razão de área foliar para os períodos 67 e 210 DAP em relação aos valores obtidos aos 305 DAP; a taxa de crescimento apresentou-se com valores médios iguais nos períodos que ocorreram as inundações, no entanto foram superiores e diferentes do valor obtido das testemunhas e a área foliar específica apresentou diferença entre os períodos 67 e 305 DAP.

Os parâmetros de qualidade AR, RAT e fibra não foram influenciados pela severidade das inundações nos diferentes períodos. Os menores valores de Brix, ATR e Pol foram obtidos quando a inundação ocorreu aos 305 DAP sob uma velocidade de rebaixamento de 0,30 m em 12 dias. O maior valor de ATR, foi obtido para o rebaixamento de 0,30 m efetuado aos 9 dias após a inundação. O tratamento P3V3 apresentou o maior valor médio de ATR.

As condições de encharcamento evidenciaram o decréscimo do pH ao longo do ciclo cultural expresso nos valores obtidos nas avaliações, durante os três períodos de inundação. O primeiro dia de avaliação apresentou valores médios de pH inferiores aos demais dias. As parcelas inundadas aos 67 dias após o plantio apresentaram valores de pH no solo superiores aos demais períodos 210 e 305. As parcelas submetidas às velocidades de rebaixamento não apresentaram diferença nos valores de pH encontrados. O potencial de oxiredução parece estar condicionado a condições edáficas do ambiente. As parcelas submetidas às velocidades de rebaixamento apresentaram valores médios de potenciais de oxiredução semelhantes. Os valores médios de potenciais de oxiredução aumentaram na medida em que reduziu-se o teor de umidade do solo. Os valores médios de oxigênio dissolvido aumentaram ao longo dos períodos de avaliação e uma redução e ocorreu estabilização nos valores médios das leituras com o decorrer dos dias de avaliação.

Para a determinação do potencial de água na folha em experimentos onde se tem uma limitação de material é possível utilizar uma mesma folha da cana-de-açúcar para determinar o potencial de água na folha, no entanto há a necessidade de proteger o local da fração foliar destacada com um papel alumínio, de forma a conservar os aspectos fisiológicos na parte assimétrica à retirada para a primeira leitura.

A avaliação apresentou grandezas de potenciais de água nas folhas diferentes, em função das épocas de avaliação, durante o ciclo, e em relações aos estádios fenológicos das plantas. Os valores médios de potencial de água na folhas não se apresentaram diferentes estatisticamente entre as parcelas submetidas à inundação, assim como, quando comparados as parcelas sob irrigação.

Nos períodos os quais as parcelas foram submetidas à inundação, observou-se que os teores de cálcio, magnésio, zinco e manganês nas folhas das plantas de cana-de-açúcar diferiram significativamente. No entanto, a severidade das cinco velocidades de rebaixamento não refletiu nos teores dos macronutrientes e micronutrientes na folhas das plantas. O teor do nutriente magnésio presente nas folhas da cana-de-açúcar submetidas ao encharcamento aos 210 DAP apresentou-se diferente dos outros períodos em que ocorreu o estresse, 67 e 305 DAP; assim como, os menores teores zinco aos 305 DAP diferiram dos demais períodos. As parcelas que foram conduzidas como testemunhas apresentaram um teor médio do nutriente magnésio nas folhas inferior aos demais tratamentos.

REFERÊNCIAS

- ABREU, C.A.; LOPES, A.S. Alterações físico-químicas e químicas dos solos inundados. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 13, n. 152, p. 14-21, 1988.
- AIKMAN, D.P. Potential increase in photosynthetic efficiency from the redistribution of solar radiation in a crop. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 40, n. 217, p. 855-864, 1989.
- ANDRADE, A.C.S.; RAMOS, F.N.; SOUZA, A.F.; LOUREIRO, M.B.; BASTOS, R. Flooding effects in seedlings of *Cytherexylum myrianthum* Cham. and *Genipaamericana* L.: responses of two neotropical lowland tree species. **Revista Brasileira de Botânica**, São Paulo, v. 22, p. 281-285, 1999.
- AGUIAR NETTO, A.O.; RODRIGUES, J.D.; NASCIMENTO JÚNIOR, N.A. Análise de crescimento na cultura da batata (*Solanum tuberosum* ssp *Tuberosum*) submetida a diferentes lâminas de irrigação: razão tubérculo- parte aérea, área foliar específica, razão de área foliar e razão de massa foliar. **Irriga**, Botucatu, v. 4, n. 1 p. 13-24, 1999.
- ALMEIDA, O.A.; BELTRÃO, N.E.M.; GUERRA, H.O.C. Crescimento, desenvolvimento e produção do algodoeiro herbáceo em condições de anoxia no meio edáfico. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 27, n. 9, p. 1259-1272, 1992.
- ANTÚNEZ, I.; RETAMOSA, E.C.; VILLAR, R.. Relative growth rate in phylogenetically related deciduous and evergreen woody species. **Oecologia**, Heidelberg, v. 128, p. 172-180, 2001.
- ARMSTRONG, W.; BRÄNDLE, R.; JACKSON, M. B. Mechanisms of flood tolerance in plants. **Acta Botanica Neerlandica**, Amsterdam, v. 43, p. 307-358, 1994.
- ASRAR, G.; KANEMASU, E.T.; YOSHIDA, M. Estimates of Leaf Area Index from spectral reflectance of wheat under different cultural practices and solar angle. **Remote Sensing of Environment**, Cleveland, v. 17, n. 1, p. 1-11, 1985.
- BACCHI, O.O.S. Botânica da cana-de-açúcar. In: ORLANDO FILHO, J. (Coord.). **Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil**. Piracicaba: IAA/PLANALSUCAR, 1983. v. 2, p. 25-37.
- BACCHI, O.O.S. **Ecofisiologia da cana-de-açúcar**. Piracicaba: IAA/Planalsucar, 1985. 20 p.

BALL-COELHO, B.; TIESSEN, H.; STEWART, J.W.B.; SALCEDO, I.H.; SAMPAIO, E.V.S.B. Residue management effects on sugarcane yield and soil properties in Northeastern Brazil. **Agronomy Journal**, Madison, v. 85, p. 1004-1008, 1993.

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

BARBIERI, V.; VILLA NOVA, N.A. Climatologia e a cana-de-açúcar. In: PLANALSUCAR – Coordenadoria Regional Sul - COSUL. **Climatologia**, Araras, v. 3, n. 1, p. 1-22, 1977.

BARNES, A.C. The sugar cane. London: Leonard Hill. In: _____ **Propagation of the cane**. New York: Interscience, 1964. p. 210-234.

BEARD, J.B.; MARTIN, D.P. Influence of water temperature on submersion tolerance of four grasses. **Agronomy Journal**, Madison. v. 62, n. 2, p. 257-259, 1970.

BECKMANN, M.Z.; DUARTE, G.R.B.; PAULA, V.A.; MENDEZ, M.E.G.; PEIL, R.M.N. Radiação solar em ambiente protegido cultivado com tomateiro nas estações verão-outono do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, p. 86-92, 2006.

BELTRÁN, J.M. **Drenaje Agrícola**. Madrid: Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación. Cidade; Instituto Nacional de Reforma y Desarrollo Agrario, 1986. 239 p. (Manual Técnico, 5).

BELTRÃO, N.E.M.; AZEVEDO, D.M.P.; NÓBREGA, L.B. SANTOS, J.W. Modificações no crescimento e desenvolvimento do algodoeiro herbáceo sob saturação hídrica do substrato em casa de vegetação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 32, n. 7, p. 701-708, 1997.

BENICASA, M.M.P. Fisiologia de culturas adaptadas as condições de várzeas. In: SIMPÓSIO NACIONAL SOBRE O APROVEITAMENTO DE VÁRZEAS, 1., 1984, Jaboticabal. **Anais...** Jaboticabal: FCAV, 1984. p. 131-139.

BENINCASA, M.M.P. **Análise de crescimento de plantas**: noções básicas. 2. ed. Jaboticabal: FUNEP, 2003. 41 p.

BERNARDES, M.S.; CÂMARA, G.M.S. **Cultura da cana-de-açúcar**. Piracicaba: ESALQ, Departamento de Produção Vegetal, 2001. 20 p.

BERGONCI, J.I.; PEREIRA, P.G. Comportamento do potencial da água na folha e da condutância estomática do milho em função da fração de água disponível no solo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 10, n. 2, p. 229-235, 2002.

BLACKMAN, G.E. The application of the concepts of growth analysis to the assessment of productivity. In: ECKARDT, F.E. (Ed.). **Functioning of terrestrial ecosystems at the primary production level**. Paris: UNESCO, 1968. p. 243-59.

BECKMANN, M.Z.; DUARTE, G.R.B.; PAULA, V.A. Radiação solar em ambiente protegido cultivado com tomateiro nas estações verão-outono do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 1, p. 86-92, 2006.

BOARDMAN, N. K. Comparative photosynthesis of sun and shade plants. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 28, p. 355-377, 1977.

BOLTON, E.F.; ERICKSON, A.E. Ethanol concentration in tomato plants during soil flooding. **Agronomy Journal**, Madison, v. 62, p. 220-229, 1970.

BONO, L.; BERGAMASCHI, H.; ROSA, L.M.G.; FRANÇA, S.; RADIN, B.; SANTOS, A.O.; BERGONCI, J.I. Alterações no padrão de resposta à luz da condutância estomática do milho causadas pelo déficit hídrico. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n. 1, p. 27-34, 2001.

BRADFORD, K.J.; YANG, S.F. Physiological responses of plants to waterlogging. **HortScience**, Alexandria, v. 16, n. 1, p. 25-30, Feb. 1981.

BRUNINI, O. **Curso de agrometeorologia da cana-de-açúcar – Temperatura do solo e Desenvolvimento Vegetal**. Campinas: IAC, 1997. p. 55. (Boletim técnico-agrometeorológico).

CALBO, M.E.R.; MORAES, J.P.V.; CALBO, A.G. Crescimento, condutância estomática, fotossíntese e porosidade do buriti sob inundação. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Campinas, v. 10, p. 51-58, 1998.

CALHEIROS, R.O.; CRUCIANI, D.E.; ARRUDA, F.B.; VOLTAN, R.B.Q.; SAKAI, E.; PIRES, R.C.M. Efeito do manejo do lençol freático na adaptação fisiomorfológica de duas espécies de trigo ao encharcamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 4, n. 2, p. 194-202, 2000.

CAMACHO, M.J.; ASSIS, F.N.; MARTINS, S.R.; MENDEZ, M.E.G. Avaliação de elementos meteorológicos em estufa plástica em Pelotas, RS. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 3, p. 19-24, 1995.

CÂMARA, G.M.S. Ecofisiologia da cultura da cana-de-açúcar. In: CÂMARA, G.M.S., OLIVEIRA, E.A.M (Ed.). **Produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: FEALQ, 1993. p. 31-64.

CAMARGO, F.A.O. **Caracterização da ação fitotóxica de ácidos orgânicos voláteis sobre a cultura do arroz**. 1992. 126 p. Dissertação (Mestrado na área de Agronomia) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Itaguaí, 1992.

CAMARGO, O.A.; ALLEONI, L.R.F.; CASAGRANDE, J.C. Reações dos Micronutrientes e Elementos Tóxicos no Solo. In: EVARISTO E.; CRUZ, M.C.P.da ; VAN RAIJ, B.; ABREU, C.A.de. (ORG.). **Micronutrientes e elementos tóxicos na agricultura**. 2. ed. Ribeirão Preto: Legis Summa, CNPq/FAPESP/POTAFOS, 2001. cap. 5. p. 89-124.

CAMARGO, F.A.O., SANTOS, G.A., ROSSIELLO, R.O.P. Produção de ácidos orgânicos voláteis pela planta de arroz sob condições anaeróbias. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 17, n. 3, p. 337-342, 1993.

CAMARGO, F.A.O., SANTOS, G.A., ZONTA, E. Alterações eletroquímicas em solos inundados. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 29, n. 1, p. 171-180, 1999.

CAMARGO, P.N. Fisiologia da cana-de-açúcar. Piracicaba: ESALQ/USP, Departamento de Agricultura e Horticultura, 1970. 38 p. (mimeografado)

CARTER, C.E.; WRATTEN, F.T.; MAC DANIEL, V.; HALVERSON, B. Hydraulic conductivity measured electronically in an auger hole. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 27, n. 5, p. 1400-1404, 1984.

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

CASTRO, P. R. C. Maturadores químicos em cana-de-açúcar. **Revista Saccharum**, Piracicaba, v. 1, p. 12-16, 1999.

CASTRO, P.R.C. Utilização de reguladores vegetais no sistema de produção da cana-de-açúcar. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE FISILOGIA DA CANA-DE-AÇÚCAR, 1., 2000, Piracicaba. **Trabalhos...** Piracicaba, STAB, 2001. 1 CD-ROM.

CESNIK, R.; MIOCQUE, J. **Melhoramento da cana-de-açúcar**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica. 2004. 304 p.

CHRISTOFFOLETI, P.J. **Aspectos fisiológicos da brotação, perfilhamento e florescimento da cana-de-açúcar**. Piracicaba: ESALQ/USP, 1986. 80 p.

CLEARY, B.; ZAERR, J. **Guidelines for measuring plant moisture stress with a pressure pump**. Corvallis: PMS Instruments, 1992. 22 p.

COCK, J.H. Sugarcane growth and development. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE FISILOGIA DA CANA-DE-AÇÚCAR, 1., 2000, Piracicaba. **Trabalhos...** Piracicaba: STAB, 2001. 1 CD-ROM.

COCKSHULL, K. E.; GRAVES, C. J.; CAVE, C. R. J. The influence of shading on yield of glasshouse tomatoes. **Journal of Horticultural Science**, London , v. 67, p. 11-24, 1992.

COELHO, E.F.; FILHO, J.C.; CARVALHO, J.P. de; CUPERTINO, J.L.; CAMPOS, D.G. Drenagem de várzeas. Belo Horizonte, **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 13, n.151, p.23-35, 1988.

CONSELHO DOS PRODUTORES DE CANA-DE-AÇÚCAR, AÇÚCAR E ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Manual de instruções**. 4. ed. Piracicaba, 2003. 115 p.

CONSELHO DOS PRODUTORES DE CANA, AÇÚCAR E ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CONSECANA 2006. Disponível em:
<<http://www.unica.com.br/files/consecana/normaseprecos.pdf>> Acesso em: 12 nov. 2007.

COSTA, A.M.; GOBBI, E.L.; DEMUNER, V.G.; HEBLING, S.A. O efeito da inundação do solo sobre o crescimento inicial de *Schizolobium parahyba* (Vell.) S.F. Blake, guapuruvu. **Natureza on line**, Santa Teresa, v. 4, n. 1, p. 7-13, 2006.

COUTO, L.; SANS, L.M.A. **Características físico-hídricas e disponibilidade de água no solo**. Sete Lagoas: EMBRAPA, 2002. 8 p. (Circular Técnica, 21)

CRAWFORD, R.M.M.; BRAENDLE, R. Oxygen deprivation stress in a changing environment. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 47, n. 295, p. 145-149, 1996.

CRUCIANI, D.E. **Caracterização de coeficientes de drenagem com base nos parâmetros de produção das culturas**. 1981a. 99 p. Tese (Livre-Docência) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1981.

CRUCIANI, D.E. Caracterização agrônômica de coeficientes de drenagem para elaboração de projetos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE HIDROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS, 4., 1981b, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: ABRH, 1981b, p. 500-514.

CRUCIANI, D.E. Caracterização agrônômica do coeficiente de drenagem para elaboração de projetos com a cultura do milho (*Zea mays* L.). **ITEM. Irrigação e Tecnologia Moderna**, Brasília, v. 22, n. 22, p. 28-31, set. 1985.

CRUCIANI, D.E.; MINAMI, K. Efeitos das inundações periódicas sobre a produção de cana-de-açúcar. **Brasil Açucareiro**, Rio de Janeiro, v. 97, n. 2, p. 57-61, 1981.

CRUCIANI, D.E.; MINAMI, K. Susceptibilidade do pimentão (*Capsicum annum* L.) a inundações temporárias do sistema radicular. **Anais da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**, Piracicaba, v. 39, n. 3, p.137-150, 1982.

CURI, N.; RESENDE, M.; SANTANA, D. P. Solos de várzeas de Minas Gerais. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 13, n. 152, p. 3-10, 1988.

DAMARTY, M.; MORUAN, C.; THELLIER, M. Calcium and Cell. **Plant Cell Environmental**, Oxford, v. 7, p. 441-448, 1984.

DAVANSO, V.M.; SOUZA, L.A.; MEDRI, M.E.; PIMENTA, J.A.; BIANCHINI, E. Photosynthesis, growth and development of *Tabebuia avellanedae* Lor. Ex. Griseb (Bignoniaceae) in flooded soil. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Curitiba, v. 45, n. 3, p. 375-384, Set. 2002.

DAVIES, W.J.; ZHANG, J. Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 42, p. 55-76, 1991.

DELGADO-ROJAS, J.S.; BARBIERI V. Modelo agrometeorológico de estimativa da produtividade da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 7, n. 1, p. 67-73, 1999.

DIAS, F.L.F.; ROSSETO, R. Adubação e calagem da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S.V.; PINTO, A.S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J.C.M. **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba, 2006. 415 p.

DILLEWIJN, C.V. **Botany of sugarcane**. Waltham: Chronica Botanica, 1952. 371p.

DOOREMBOS, J.; KASSAM, A.H. **Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos**. Roma: FAO, 1979. 212 p. (FAO. Riego y Drenaje, 33).

FARIAS, J.R.B.; BERGAMASCHI, H.; MARTINS, S.R.; BERLATO, M.A. Efeito da cobertura plástica de estufa sobre a radiação solar. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 1, p. 31-36, 1993.

FARIA JUNIOR, M. J. A.; LIMA, A. M. Uso de Sombreamento em Estufa Coberta com Polietileno e com ventilação natural: efeitos sobre variáveis climáticas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 29., 2000. Fortaleza. **Anais...**Fortaleza: SBEA, 2000. p. 424-428.

FARQUHAR, G.D.; SHARKEY, T.D. Stomatal conductance and photosynthesis. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 33, p. 317-345, 1982.

FARRELL, R.E., SWERHONE, G.D.W, KESSEL, C. Construction and evaluation of a reference electrode assembly for use in monitoring in situ soil redox potentials. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 22, p. 1059-1068, 1991.

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

FERRAZ, E.C. Fisiologia da cultura do arroz. In: SIMPÓSIO SOBRE A CULTURA DO ARROZ DE SEQUEIRO. 1., 1983, Jaboticabal-SP. **Anais...** Piracicaba: Instituto da Potassa & Fosfato, 1983. p. 26-30.

FERREIRA, P.A. **Drenagem**. Brasília: ABEAS, 1987. 86p. (Modulo 11).

FIORUCCI, A.R.; BENEDETTI FILHO, E. A importância do oxigênio dissolvido em ecossistemas aquáticos. **Química Nova na Escola**, São Paulo, n. 22, p. 1-7, Nov. 2005. Disponível em:

<<http://www.google.com.br/search?hl=pt-BR&q=oxigenio+dissolvido+pdf&btnG=Pesquisa+Google&meta=&aq=o&oq=>>>. acesso em: 24 jul. 2009.

FNP CONSULTORIA E COMÉRCIO. **Agrianual 2009**: anuário da agricultura brasileira. São Paulo: Argos Comunicação. 2009. 497 p.

FORMAGGIO, A.R. **Características agronômicas e espectrais para sensoriamento remoto de trigo e feijão**. 1989. 161 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1989.

GAVA, G.J.C.; TRIVELIN, P.C.; OLIVEIRA, M.W.; PENATTI, C.P. Crescimento e acúmulo de nitrogênio em cana-de-açúcar cultivada em solo coberto com palhada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 11, p. 1347-1354, 2001.

GHELLER, A.C.A. **Técnica para o controle da podridão abacaxi em cana-de-açúcar e modelo para a estimativa de perdas**. 1995. 115 p. Dissertação (Mestrado na área de Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.

GILBERT, R.A.; RAINBOLT, C.R.; MORRIS, D.R.; MCCRAY, J.M. Sugarcane growth and yield responses to a 3-month summer flood. **Agricultural and Water Management**, Amsterdam, v. 95, n. 3, p. 283-291, 2008.

GIORIO, P.; SORRENTINO, G.; d'ANDRIA, R. Stomatal behaviour, leaf water status and photosynthetic response in field-grown olive trees under water deficit. **Environmental and Experimental Botany**, Oxford, v. 42, n. 2, p. 95-104, 1999.

GISLEROD, H.R.; MORTENSEN, L.M. Air humidity and nutrient concentration affect nutrient uptake and growth of some greenhouse plants. **Acta Horticulturae**, Wageningen, n. 294, p. 141-146, 1991.

GLASZIOU, K.T.; BULL, T.A.; HATCH, M.D.; WHITEMAN, P.C. Physiology of sugar cane. VII. Effects of temperature, photoperiod duration, and diurnal and seasonal temperature changes on growth and ripening. **Australian Journal of Biological Sciences**, East Melbourne, v.18, p.53-66, 1965.

GLAZ, B.; EDME, S.J.; MILLER, J.D.; MILLIGAN, S.B.; HOLDER, D.G. Sugarcane cultivar response to high summer water tables in the Everglades. **Agronomy Journal**, Madison, v. 94, n. 3, p. 624-629, 2002.

GLAZ, B.; GILBERT, R.A. Sugarcane response to water table, periodic flood, and foliar nitrogen on organic soil. **Agronomy Journal**, Madison, v. 98, n. 3, p. 616-621, 2006.

GLINSKI, J.; STEPNIIEWSKI, W. **Soil aeration and its role for plants**. Boca Raton: CRC Press, 1986. 228 p.

GOMIDE, C.A.M.; GOMIDE, J.A. Análise de crescimento de cultivares de *Panicum maximum* Jacq. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 28, p. 675-680, 1999.

GRANT, G. T.; MORRIS, D. A.; REES, P. J. P.; SMITH, K. A. Biological interactions between polysaccharides and divalent cations: The eggbox model. **FEBS Letters**, Amsterdam, v. 32, n.1, p. 195-198, 1973.

GRODZKY, L.; BRENNER, N.L.; SCOTTI, C.A. Estudo do ambiente em estufas plásticas na região de Curitiba, Paraná. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 9, n. 1, p. 39, 1991.

HERMANN, E.R.; CÂMARA, G.M.S Um método simples para estimar a área foliar da cana-de-açúcar. **STAB. Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 17, n. 5, p. 32-34, 1999.

HOPKINS, W.G. **Introduction to Plant Physiology**. New York: J. Wiley, 1999. 512 p.

HUMBERT, R.P., R.P. Planting of sugar cane. In: HUMBET, R.P. **The growing of sugar cane. Amsterdam:Elsevier**, 1968. p. 103-130.

IDO, O.T. **Desenvolvimento radicial e caulinar, de três variedades de cana-de-açúcar, em Rizotron, em dois substratos**. 2003. 141 p. Tese (Doutorado na área de Fitotecnia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

INFORZATO, R.; ALVAREZ, R. Distribuição do sistema radicular da cana-de-açúcar var. CO 290, em solo tipo terra-roxa legítima. **Bragantia**, Campinas, v. 16, p. 1-13, 1957.

INMAN-BAMBER, N.G. Sugarcane water stress criteria for irrigation and drying off. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 89, n. 1, p. 102-122, 2004.

JANZEN, J.G.; SCHULZ, H.E.; LAMON, A.W. Medidas de oxigênio dissolvido na superfície da água. **Engenharia sanitária e ambiental**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 3, p. 278-283, 2008,

JONES, H.G. **Plant and Microclimate**: a quantitative approach to environmental plant physiology. 2nd. ed. Cambridge: University Press, 1992. 428 p.

KAWASE, M. Anatomical and morphological adaptation of plants to waterlogging. **HortScience**, Alexandria, v. 16, n. 1, p. 8-12, 1981.

KEHDI, N. Hidropônica ou solo, a grande questão? Pergunte a um especialista. Disponível em: <http://www.eurohydro.com/pdf/articles/p_hydroponics.pdf>. Acesso em: 27 jul. 2009.

KERPEL, L.A.; QUADROS, V.J.; BURATTI, J.V.; ABREU, F.B.; SILVA, J.A.G.; FIORIN, C.A. Avaliação de matéria seca e sacarose da ponteira de cana-de-açúcar em três cultivares e quatro densidades de plantio. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTIFICA, 17., ENCONTRO DE PÓS-GRADUAÇÃO, 10., 2008. Pelotas. **Anais...** Pelotas: Universidade Federal de Pelotas, 2008. p. 424-428.

KITTAS, C.; BAILLE, A.; GIAGLARAS, P. Influence of covering material and shading on the spectral distribution of light in greenhouse. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Lahore, v. 73, p. 341-51, 1999.

KLAMT, E.; KAMPF, N.; SCHNEIDER, P. **Solos de várzeas no Estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Faculdade de Agronomia da UFRGS, 1985. 44 p.

KORNDORFER, G.H.; PRIMAVESI, O.; DEUBER, R. **Crescimento e distribuição do sistema radicular da cana-de-açúcar em solo LVA**. Piracicaba: Copersucar, 1989. 82 p. (Boletim Técnico, 47)

KOZLOWSKI, T.T. Water supply and leaf shedding. In: KOZLOWSKI, T.T. (Ed.). **Water deficit and plant growth**. New York: Academic Press, 1976. cap.4 p. 191-233.

KOZLOWSKI, T.T. Responses of woody plants to flooding. In: KOZLOWSKI, T.T. (Ed.). **Flooding and Plant Growth**. San Diego: Academic Press, 1984. p. 129-159.

KOZLOWSKI, T. T. Responses of woody plants to flooding and salinity. **Tree Physiology**, v.1, 1997. Disponível em: < <http://www.heronpublishing.com/tp/monograph/kozlowski.pdf> >. Acesso em: 27 jul. 2005.

KURATA, K. Role of reflection in light transmissivity of greenhouses. **Agriculture and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 52, p. 319-331, 1990.

LABANAUSKAS, C.K.; STOLZY, L.H.; LUXMOORE, R.J. Soil temperature and soil aeration effects on concentration and total amounts of nutrients in “Yecora” wheat grain. **Soil Science**, Baltimore. v. 120, n. 6, p. 450-454, 1975.

LAMBERS, H.; CHAPIN, F.S.; PONS, T.L. Plant physiological ecology. Hardcover: Springer-Verlag Publisher, 1998. 356 p.

LAMBERS, H.; POORTER, H. Inherent variation in growth rate between higher plants: a search for physiological causes and ecological consequences. **Advanced Ecology Research**, Lonsdale, v. 23, p. 187-261, 1992.

LANGE, O.L. Hitze- und Trockenresistenz der Flechten in Beziehung zu ihrer Verbreitung. **Flora**, Würzburg, v. 140, p. 39-97, 1953.

LARCHER, W. **Ecofisiologia Vegetal**. Trad. C.H.B.A. Prado. Rima, São Paulo. 2000. 531 p.

LEE, H.A. The distribution of the roots of sugar cane in the Soil in the hawaiian islands. **Plant Physiology**, Rockville, v. 1, n. 4, p. 363-378, Oct., 1926.

LEITE, G.H.P. **Maturação induzida, alterações fisiológicas, produtividade e qualidade tecnológica da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L).** 2005. 156 p. Dissertação (Mestrado na área de Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2005.

LEME FILHO, J.R.A. **Estudo comparativo dos métodos de determinação e de estimativa dos teores de fibra e de açúcares redutores em cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*).** 2005. 115p. Dissertação (Mestrado na área de Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

LETEY, J.; LUNT, O.R.; STOLZY, L.H.; SZUSKIEWCZ, T.E. Plant growth, water use and nutritional response to rhizosphere differentials of oxygen concentration. **Soil Science Society America Proceedings**, Madison, v. 25, n. 3, p. 183-186, 1961.

LETEY, J.; STOLZY, H.; BLANK, G. B. Effect of duration and timing of low soil oxygen content on shoot and root growth. **Agronomy Journal**, Madison, v. 54, p. 34-37, 1962.

LIAO, C. T.; LIN, C. H. Physiological adaptation of crop plants to flooding stress. **Proceedings of the National Science Council**, Taiper, v. 25, p. 148-157, 2001.

LIU, D.L.; KINGSTON, G.; BULL, T.A. A new technique for determining the thermal parameters of phonological development in sugarcane, including suboptimum and supraoptimum temperatures regimes. **Agricultural and Forest Meteorology**, Oxford, v. 90, p. 119-139, 1998.

LUCCHESI, A.A. Cana-de-açúcar (*Saccharum* SSP.). In: CASTRO, P.R.C.; KLUGE, R.A. (Coord.) **Ecofisiologia de culturas extrativistas: cana-de-açúcar; seringueira; dendezeiro e oliveira.** Cosmópolis: Stoller do Brasil, 2001.138 p.

LUZ, M.J.S.; FERREIRA, G.B.; BEZERRA, J.R.C. Saiba Como Adubar e Corrigir e Solo se sua Propriedade. Campina Grande: EMBRAPA, 2002. 7 p. (Comunicado Técnico,148)

MACHADO, E.C. **Um modelo matemático-fisiológico para simular o acúmulo de massa seca na cultura de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*).** 1981. 115 p. Dissertação (Mestrado na área de Biologia vegetal) – Instituto de Biologia/ Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1981.

- MACHADO E.C.; PEREIRA, A.R.; FAHAL, J.I.; ARRUDA, H.V.; CIONE, J. Índices biométricos de duas variedades de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 17, n. 9, p. 1323-1329, 1982.
- MACHADO, E.C. Fisiologia de produção de cana-de-açúcar. In: _____ **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, v. 1, cap. 1, p. 56-87, 1987.
- MAGALHÃES, A.C.N. Ecofisiologia da cana-de-açúcar: aspectos do metabolismo do carbono na planta. In: CASTRO, P.R.C.; FERREIRA, S.O.; YAMADA, T. (Ed.). **Ecofisiologia da produção agrícola**. Piracicaba: POTAFÓS, 1987. p. 113-118.
- MAGALHÃES, P.C.; FERRER, J.L.R.; ALVES, J.D.; VASCONCELLOS, C.A.; CANTÃO, F.R.O. influência do cálcio na tolerância do milho “saracura” BRS-4154 ao encharcamento do solo. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 6, n. 1, p. 40-49, 2007
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2 ed. Piracicaba: POTAFÓS, 1997. 319 p.
- MARAÑÓN, T.; GRUBB, J. Physiological basis and growth rate relationship in Mediterranean annuals. **Functional Ecology**, London, v. 7, p. 591-599, 1993.
- MARCHIORI, L.F.S. **Influência da época de plantio e corte na produtividade da cana-de-açúcar**. 2004. 284 p. Tese (Doutorado na área de Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.
- MARQUES, M.O.; MARQUES, T.A.; TASSO JUNIOR, L.C. **Tecnologia do açúcar. Produção e industrialização da cana-de-açúcar**. Jaboticabal: Funep, 2001. 166 p.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. San Diego: Academic Press, 1995. 889 p.
- MARTIN, E.C.; NOVOA, A.C.; GOMES, S.J. Estudio comparativo de las propiedades de diversos materiales utilizados como cubierta en cultivos protegidos. **Revista de Plásticos Modernos**, Madrid, v. 308, p. 185-189, 1982.

Mc DERMID, D.K. Sources of error in the estimation of stomatal conductance and transpiration from porometer data. **HortScience**, Alexandria, v. 25, n. 12, p. 1538-1548, 1990.

MEDEIROS, R.D.; DO Ó, W.C.R.; GIANLUPPI, D. **Características químicas e físico-hídricas de solos de várzeas em Roraima**. Boa Vista: Embrapa Roraima, 2004. 13 p. (Embrapa Roraima. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 3)

MELO JÚNIOR, A.S. **Dinâmica da remoção de nutrientes em alagados construídos com typha SP**. 2003. 312 p. Dissertação (Mestrado na área de Água e Solo) – Universidade de Campinas, Campinas, 2003.

MENDES, R.M.; FERRAZ, F.T.; PELÁ, A. Avaliação de cultivares de cana-de-açúcar para as condições de ipameri e região. In: SEMANA DE CIENCIAS AGRARIAS DE IPAMERI, 2., MOSTRA CIENTIFICA DA UEG DE IPAMERI - GO, 1., 2007, Ipameri. **Resumos...** Ipameri: UEG, 2007. Disponível em: http://www.prp.ueg.br/06v1/ctd/pesq/inic_cien/eventos/sic2007/flashsic2007/arquivos/resumos/resumo98.pdf. Acesso em: 18 jul. 2009.

MEYER, B.C.; ANDERSON D.B. **Introduction to plant ecology**. New Jersey, Princeton: Nostrand, 1960. 217 p

MILTHORPE, F.L.; MOORBY, J. **An introduction to crop physiology**. Crambridge: Cambridge University, 1974. 201 p.

MIRANDA, J.M.G. **Biometria, germinação e efeito do déficit hídrico no crescimento e trocas gasosas de senna martiana (benth.) Irwin & barneby (leguminosae-caesalpinioideae)**. 2005. 82 p. Dissertação (Mestrado na área de Biologia Vegetal) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2005.

MONTERO, J.I.; CASTILLA, N., GUTIERREZ de RAVÉ, E. Climate under plastic in the Almeria. **Acta Horticulturae**, Hague, v. 170, p. 227-234, 1985.

MONTEITH, J.L. Climate and the efficiency of crop production in Britain. **Proceedings of the Royal Society of London**, London, v. 281, p. 277-294, 1977.

MORAES, J.F.V., DYNIA, J.F. Alterações nas características químicas e físico-químicas de um solo gley pouco húmico sob inundação e após drenagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 27, n. 2, p. 223-235, 1992.

MUKHTAR, S.; BAKER, J.L.; KANWAR, R.S. Effect of short-term flooding and drainage on soil oxygenation. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, v. 39, n. 3, p. 915-920, 1996.

NICKELL, L.G. Ecophysiology of sugar cane. In: ALVIM, P.T.; KOZLOWSKI, T.T. (Ed.). **Ecophysiology of tropical crops**. Itabuna: CEPLAC, 1975. p. 1-52,

NOBEL, P.S. **Introduction to biophysical plant ecology**. San Francisco: Freeman, 1974. 480 p.

OLIVEIRA, R.A.; DAROS, E.; ZAMBON, J.L.C.; WEBER, H.; IDO, O.T.; ZUFFELLATO-RIBAS, K.C.; KOEHLER, H.S.; SILVA, D.K.T. Crescimento e desenvolvimento de três cultivares de cana-de-açúcar, em cana-planta, no estado do Paraná. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 5, n. 1/2, p. 87-94, 2004.

OLIVEIRA, R.A.; DAROS, E.; ZAMBON, J.L.C.; WEBER, H.; IDO, O.T.; ZUFFELLATO-RIBAS, K.C.; KOEHLER, H.S.; SILVA, D.K.T. Crescimento e desenvolvimento de três cultivares de cana-de-açúcar, em cana-planta, no estado do Paraná: taxas de crescimento. **Scientia Agrária**, Curitiba, v. 6, n. 1/2, p. 85-89, 2005.

OLIVEIRA, R.A.; DAROS, E.; ZAMBON, J.L.C.; WEBER, H.; IDO, O.T.; BESPALHOK-FILHO, J.C.; ZUFFELLATO-RIBAS, K.C.; SILVA, D.K.T. Área foliar em cana-de-açúcar e sua correlação com produção de biomassa. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 37, n. 2, p. 71-76, jun. 2007

ORTOLANI, A.A.; CAMARGO, M.B.P. Influência dos fatores climáticos na produção. In: CASTRO, P.R.C.; FERREIRA, S.O.; YAMADA, T. (Ed.). **Ecofisiologia da produção agrícola**. Piracicaba: Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fósforo, 1987. p. 71-79.

PATWARDHAN, A.S.; NIEBER, J.L.; MOORE, I.D. Oxygen, carbon dioxide, and water transfer in soils: Mechanisms and crop response. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, v. 31, n. 5, p. 1383- 1395, 1988.

PAULA, A.L. **Desenvolvimento e produtividade da cana-de-açúcar em ambiente protegido sob diferentes níveis freáticos**. 2008. 150 p. Tese (Doutorado na área de Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

PEDROSA, R.M.B.; DANTAS NETO, J.; SANTOS, J.S.; ALBUQUERQUE, W.G.; FARIAS, C.H.A.; AZEVEDO, H.M. Avaliação dos parâmetros dos colmos da cana-de-açúcar, segunda folha, submetida a níveis de irrigação e adubação. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, Campina Grande, v. 5, n. 1, p. 1-5, 2005.

PEREIRA, L.L.; SEGATO, S.V. Colheita da cana-de-açúcar: corte manual. In: SEGATO, S.V.; PINTO, A.S.; JENDIROBA, E.; NOBREGA, J.C.M. **Atualizações em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: CP 2, 2006. p. 318-332.

PINZÓN-TORRES, J.A.; SCHIAVINATO, M.A. Crescimento, eficiência fotossintética e eficiência do uso da água em quatro espécies de leguminosas arbóreas tropicais. **Hoehnea**, São Paulo, v. 35, n. 3, p. 395-404, 2008.

PIRES, J.L.F.; SOPRANO, E.; CASSOL, B. Adaptações morfofisiológicas da soja em solo inundado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 1, p. 41-50, Jan. 2002.

PIZARRO, F. **Drenaje Agrícola y recuperación de suelos salinos**. Madrid: Editorial Agrícola Española, 1978. 521 p.

PIZARRO, F. **Riegos localizados de alta frecuencia**: goteo, microaspersión y exudación. 2. ed. Madrid: Mundi-Prensa, 1990. p. 55-63.

PONNAMPERUMA, F.N. The chemistry of submerged soils. **Advances in Agronomy**, New York, v.24, p.29-96, 1972 .

PRADO, H. EXISTE O SOLO IDEAL, EXISTE? Revista Rural, 2005. Disponível em: <http://www.revistarural.com.br/edicoes/2005/artigos/rev93_canal.htm> Acesso em: 22 maio 2008

RADFORD, P.J. Growth analysis formulase – their use and abuse, **Crop Science**, Madison, v. 7, n. 3, p. 171-175, 1967.

RADIN, B.; BERGAMASCHI, H.; REISSER JR, C.; BARNI, N.A; MATZENAUER, R.; DIDONÉ, I.A; Eficiência de uso da radiação fotossinteticamente ativa pela cultura do tomateiro em diferentes ambientes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 9, p.1017-1023, 2003.

RAIJ, B.van; QUAGGIO, J.A. **Métodos de análise de solo para fins de fertilidade**. Campinas: Instituto Agrônômico, 1983. 31 p.

RAIJ, B.van.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2.ed. Campinas: Instituto Agrônômico Fundação IAC, 1997. 285 p. (Boletim técnico 100)

RAMESH, P. Effect of different levels of drought during the formative phase on growth parameters and its relationship with dry matter accumulation in sugarcane. **Journal of Agronomy and Crop Science**, Braunschweig, v. 185, p. 83-89, 2000.

RAY, J.D.; SINCLAIR, T.R. Stomatal closure of maize hibrids in response to drying soil. **Crop Science**, Madison, v. 37, p. 803-807, 1997.

REICHARDT, K. **Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera**. Campinas: Fundação Cargill, 1985. 466 p.

REISSER JUNIOR, C.; BERGAMASCHI, H.; RADIN, B.; BERGONCI, J.I. Alterações morfológicas do tomateiro em resposta à redução de radiação solar em ambiente de estufa plástica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 11, n. 1, p. 7- 14, 2003.

ROCHA, A.M.C. **Emergência, perfilhamento e produção da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) em função das épocas de plantio no Estado de São Paulo**. 1984. 138 p. Dissertação (Mestrado na área de Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1984.

ROCHECOUSTE, E. **Weed control in sugar cane**. Réduit: Mauritius Sugar Industry Research Institute, 1967. 117p.

RODRIGUES, J.D. **Análise de crescimento de plantas de soja (*Gycine max.* L. Merri) Submetidas à carências nutricionais**. 1982. 165 p. Dissertação (Mestrado na área de Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Rio Claro, 1982.

RODRIGUES, J.D. **Influencia de diferentes níveis de cálcio, sobre o desenvolvimento de plantas de estilosantes (*Stylosanthes guyanensis* (Aubl). SW. cv. Cook), em cultivo hidropônico.** 1990. 180 p. Tese (Livre-Docência) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Botucatu, 1990.

RODRIGUES, J.D. Fisiologia da cana-de-açúcar. Botucatu, 1995. 101 p. Instituto de Biociências, Campus Botucatu, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Disponível em: <<http://www.residenciaagronomica.ufpr.br/bibliografia/MATURAD.pdf>> Acesso em: 07 out. 2007.

RODRIGUES, T.J.D.; RODRIGUES, L.R.A.; REIS, R.A. Adaptação de plantas forrageiras às condições adversas. In: SIMPÓSIO SOBRE ECOSSISTEMA DE PASTAGENS, 2., 1993. Jaboticabal, 1993. **Anais...** Jaboticabal: FUNEP, 1993. p. 17-61.

ROSSETTO, C.A.V.; NAKAGAWA, J. Índices da análise de crescimento em função das condições de cultivo de aveia preta. **Revista de Agricultura**, Piracicaba, v. 76, n. 2, p. 245-265, 2001.

ROSSIELLO, R.O.P. 1987. **Bases fisiológicas da acumulação de nitrogênio e potássio em cana-de-açúcar (*Saccharum*, ssp, cv. NA 56-79) em resposta à adubação nitrogenada em Cambissolo. Piracicaba.** 1987. 172 p. Dissertação (Mestrado na área de Ciência do Solo) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1987.

ROSTRON, H. Radiant energy interception, root growth, dry matter production and the apparent yield potential of two sugarcane varieties. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 15., 1974, Durban. **Proceedings...** Durban: Hayne e Gibson, 1974. p. 1001-1010.

RUSSELL, M.B. Water and its relation to soils and crops. **Advances in Agronomy**, Newark, v. 11, p. 1-131, 1959

RUSSELL, G.; JARVIS, P.G.; MONTEITH, J.L. Absorption of radiation by canopies and stand growth. In: RUSSELL, G.; MARSHALL, B.; JARVIS, P.G. (Ed.). **Plant canopies: their growth, form and function.** Cambridge: Cambridge University Press: 1989. p. 21-39. (Society for Experimental Biology Seminar Series, 31).

SÁ, J.S. **Efeitos da velocidade de rebaixamento do nível freático na produtividade da soja (*Glycine max* (L.) Merrill) e da ervilha (*Pisum sativum* L.)**. 2001. 68 p. Dissertação (Mestrado na área de Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

SÁ, J.S.; CRUCIANI, D.E.; DUARTE, N.S. Índice Diário de estresse hídrico da cultura da ervilha. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 12., 2002, Uberlândia. **Trabalhos...**Uberlândia: ABID, 2002. 1 CD-ROM.

SÁ, J.S. **Influência do manejo do nível freático e doses de nitrogênio em culturas sob hipoxia no solo**. 2005. 168 p. Tese (Doutorado na área de Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

SADRAS, V.O.; MILROY, S.P. Soil-water thresholds for the responses of leaf expansion and gas exchange: A review. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 47, n. 2/3, p. 253-266, 1996.

SALIENDRA, N.Z.; MEINZER, F.C.; GRANTZ, D.A. Water potencial in sugarcane measured from leaf segments in a pressure chamber. **Journal Agronomy**, Madison, v. 82, Mar-Apr., p. 359-361, 1990.

SANTOS, A.J.B.; LYRA, R.F.F. Variação Anual da Área Foliar da Cana-De-Açúcar (*Saccharum Officinarum* L.), Na Região De Tabuleiros Costeiros De Alagoas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11., 2000. Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro : SBMET, 2000. p. 323-328.

SCARASCIA-MUGNOZZA, G.; SCHETTINI, E.; VOX, G. Effects of solar radiation on the radiometric properties of biodegradable films for agricultural applications. **Biosystems Engineering**, Cirencester , v. 87, n. 4, p. 479-87, 2004.

SCARDUA, R.O. **Clima e a irrigação na produção agro-industrial da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*)**. 1985. 122 p. Tese (Livre-Docência) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1985.

SCHAFFER, B; ANDERSEN, P.C.; PLETZ, R.C. Responses of fruits crops to flooding. In: JANICK, J. (Ed.). **Horticultural Reviews**, New York, v. 13, p. 257-313, 1992.

SCHILGAARDE, J.V. Nonsteady flow to drains In: SCHILFGAARDE, J.V. **Drainage for agriculture**. Madison: American Society of Agronomy, 1974. p. 245-270.

SCHILFGAARDE, J.V.; WILLIAMSOM, P.E. Studies of crops response to drainage growth chambers. **Transaction of the ASAE**. St Joseph, v. 8, p. 94-97, 1965.

SCHWAB, G.O.; MANSON, P.W.; LUTHIN, J.N.; REEVE, R.C.; EDMISTER, T.W. Engineering aspects of land drainage; drainage in humid areas. In: LUTHIN, J.L. **Drainage of a agricultural lands**. Wisconsin: American Society of Agronomy, 1977. p. 167-187.

SCOTT, H.D.; De ÂNGULO, J.; DANIELS, M.B.; WOOD, L.S. Food duration effects on soybean growth and yield. **Agronomy Journal**, Madison, v. 81, n. 2, p. 631-636, 1989.

SEEMANN, J. Greenhouse Climate. In: SEEMAN, J.; CHIRKOV, Y.I.; LOMAS, J.; PRIMAULT, B. **Agrometeorology**. Berlin Heidelberg, Germany: Springer-Verlag, 1979. p. 165-178.

SEVERINO, L.S.; LIMA, C.L.D.; BELTRÃO, N.E.M.; CARDOSO, G.D.; FARIAS, V.A. Mamoneira submetida a encharcamento do solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MAMONA: Energia e sustentabilidade, 1., 2004, Campina Grande. **Trabalhos...** Campina Grande: Embrapa Algodão, 2004. 1 CD-ROM.

SHALHEVET, J. Plants under salt and water stress. In: FOWDEN, L.; MANSFIELD, T.; STODDART, J. **Plant adaptation to environmental stress**. London: Champman e Hall, 1993. cap. 7, p. 133-154.

SHIGAKI, F.; FREITAS, N.; BERTO, A.; CEDDIA, M.B.; ZONTA, E.; LIMA, E. Influência do estresse hídrico nos parâmetros de crescimento, acúmulo de N e produtividade de diferentes variedades de cana-de-açúcar em Miracema – RJ. **Revista Universidade Rural Série Ciências da Vida**, Seropédica, v. 24, n. 1, p. 63-71, jan.- jun., 2004.

SIDIRAS, N.; PAVAN, M.A. Influencia do sistema de manejo de solo no seu nível de fertilidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 9, n. 3, p. 249-254, 1985.

SILVA, A.S. **O pro-várzeas em propriedades selecionadas do município de Curvelo-Mg**. 1982. 77 p. Dissertação (Mestrado na área de Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1982.

SILVA, D.K.T. **Crescimento de cultivares de cana-de-açúcar em primeira soca na região noroeste do Paraná na safra de 2002/2003**. 2005. 73 p. Dissertação (Mestrado na área de Produção Vegetal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

SILVA, D.K.T.; DAROS, E.; ZAMBON, J.C.; WEBER, H.; IDO, O.T.; ZUFFELLATO-RIBAS, K.C.; KOEHLER, H.; OLIVEIRA, R.A. Análise de crescimento em cultivares de cana-de-açúcar em cana-soca no noroeste do Paraná na safra de 2002/2003. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 6, n. 1-2, p. 47-53, 2005.

SILVA, L.A. **Efeitos de renovação do canavial com diferentes sistemas de colheita, sobre as propriedades químicas do solo, crescimento da cultura e acúmulo de nitrogênio em cana de primeira soca**. Seropédica, 2000. 151 p. Dissertação (Mestrado na área de Fitotecnia) – Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2000.

SINCLAIR, T.R.; HORIE, T. Leaf nitrogen, photosynthesis, and crop radiation use efficiency: a review. **Crop Science**, Madison, v. 29, p. 98-105, 1989.

SINCLAIR, T.R.; SHIRAIWA, T.; HAMMER, G.L. Variation in crop radiation-use efficiency with increased diffuse radiation. **Crop Science**, Madison, v. 32, p. 1281-1284, 1992.

SLATYER, R.O. Physiological significance of internal water relations to crop yield. In: EASTIN, J.D. (Ed.) **Physiological aspects of crop yield**. Madison: ASA, 1969. p. 53-83.

SMITH, K.A. The effects of waterlogging on root growth and on symbiotic nitrogen fixation by legumes In: ADAPTATION OF CHICKPEA AND PIGEONPEA TO ABIOTIC STRESSES. Patancheru, India, 1984. **Proceedings...** Patancheru: ICRISAT, 1987. p. 77-89. 1 CD-ROM.

SOUZA, D. **Influência da adubação nitrogenada sobre a área foliar e a acumulação de fitomassa em quatro variedades de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) irrigadas, no ciclo de primeira soca**. 1995. 59 p. Dissertação (Mestrado na área de Fitotecnia) – Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Itaguaí, 1995.

SOUZA, J.A.G. **Estudo do consumo de água pela cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*)**. 1976. 82 p. Dissertação (Mestrado na área de Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1976.

SUGUITANI, C. **Fenologia da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) sob efeito do fósforo**. 2001. 79 p. Dissertação (Mestrado na área de Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz,” Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719 p.

TAKEDA, F. Strawberry production in soilless culture systems. **Acta Horticulturae**, Leuven, v. 1, n. 481, p. 289-295, 1999.

TANIMOTO, T. The press method of cane analyses. **Hawaiian Planter's Recorder**, Honolulu, v.57, p.133-150, 1964.

TERAUCHI, T.; MATSUOKA, M. Ideal characteristics for the early growth of sugarcane. **Japanese Journal of Crop Science**, Tokio, v. 69, n. 3, p. 286-292, 2000.

TERAUCHI, T.; NAKAGAWA, H.; MATSUOKA, M.; NAKANO, H. Comparison of the early growth between sugarcane and sweet sorghum. **Japanese Journal of Crop Science**, Tokio, v. 68, n. 3, p. 414-418, 1999.

TARDIEU, F.; DAVIES, W.J. Stomatal response to abscisic acid is a function of current plant water status. **Plant Physiology**, Rockville, v. 98, n. 2, p. 540-545, 1992.

TIAN-YEN, Y. Soil and plants. In: TIAN-YEN, Y. **Physical chemistry of paddy soils**. Berlin: Springer-Verlag, 1985. p. 197-214.

TIBAU, A.O. **Matéria orgânica e fertilidade do solo**. 3.ed. São Paulo: Nobel, 1984. 220 p.

TOKESHI, H. Perfilamento e perdas pelo carvão da cana-de-açúcar. **STAB. Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 4, n. 5, p. 34-44, 1986.

TORRECILLAS, A.; GUILLAUME, C.; ALARCÓN, J.J.; RUIZ-SGNCHEZ, M.C. Water relations of two tomato species under water stress and recovery. **Plant Science**, Oxford, v. 105, n. 2, p. 169-176, 1995.

TROUGHT, M.C.T.; DREW, M.C. The development of waterlogging damage in wheat seedlings (*Triticum aestivum* L.). II Accumulation and redistribution of nutrients by the shoot. **Plant and Soil**, Hague, v. 56, n. 2, p. 187-199, 1980.

van GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n. 3, p. 892-898, 1980.

van WADMAN, S.H.; van ANDEL, O.M. Interdependence of growth, water relations and abscisic acid level in *Phaseolus vulgaris* during waterlogging. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen. v. 63, n. 2, p. 215-220, 1985.

VELLOSO, A.C.X.; LEAL, J.R.; OLIVEIRA, C. Processos redox em glei húmico do Estado do Rio de Janeiro: I. Avaliação do parâmetro PE+pH. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 17, n. 1, p. 23-26, 1993.

VIEIRA, D.B. **As Técnicas de Irrigação**. 2.ed. São Paulo. Globo, 1995. 263p.

VOESENEK, L.A.C.J.; SMAN, A.J.M.; VAN-DER HARREN, F.J.M.; BLOM, C.W.P.M. An amalgamation between hormone physiology and plant ecology: a review on flooding resistance and ethylene. **Journal of Plant Growth Regulation**. New York, v. 11, n. 3, p. 171-188, 1992. / Resumos em AGRIS Abstract on CD-ROM, 1993-94/

WADMAN S. van; ANDEL, O.M. van Interdependence of growth, water relations and abscisic acid level in *Phaseolus vulgaris* during waterlogging. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v. 63, n. 2, p. 215-220, Feb. 1985.

WANG, G.G.; QIAN, H.; KLINKA, K.. Growth of *Thuja plicata* seedlings along a light gradient. **Canadian Journal of Botany**, Guelph, v. 72, p. 1749-1747, 1994

WATSON. D.J. The physiological basis of variation in yield. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 4, p. 101-145, 1952.

WILLIAMSON, R.E.; SCHILFGAARDE, J. VAN. Studies of crop response to drainage: II. Lysimeters. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, v. 8, n. 1, p. 98-100, 1965.

WILLIAMSOM, R.E. Effects of soil gas composition and flooding on growth of (*Nicotiana tabacum*, L). **Agronomy Journal**, Madison, v. 62, p. 80-83, 1970.

WOOD, A.W. Management of crop residues following green harvesting of sugarcane in North Queensland. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 20, p. 69-85, 1991.

WRIGHT, I.J.; WESTOBY, M. Cross-species relationships between seedling relative growth rate, nitrogen productivity and root vs leaf function in 28 Australian woody species. **Functional Ecology**, London, v. 14, p. 97-107, 2000.