

**NELSON LUIZ PUGLIESI**

**CAPACIDADE DE RETENÇÃO E FREQUÊNCIA DE APLICAÇÃO  
DE SOLUÇÃO NUTRITIVA AO SISTEMA RADICULAR DA  
ALFACE EM CULTIVO HIDROPÔNICO (NFT)**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, para obtenção do título de “*Magister Scientiae*”.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2003

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e  
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

Pugliesi, Nelson Luiz, 1972-

P978c                      Capacidade de retenção e frequência de aplicação de  
2003                      solução nutritiva ao sistema radicular da alface em cultivo  
hidropônico (NFT) / Nelson Luiz Pugliesi. – Viçosa :                      UFV,  
2003.  
83p. : il.

Orientador: Sérgio Zolnier

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de                      Viçosa

1. Alface - Hidroponia. 2. Alface - Raízes - Crescimen-  
to - Modelos matemáticos. 3. Sistema Dinâmico de Con-  
trole do Fluxo Laminar de Nutrientes - Técnica - Simula-  
ção por computador. 4. Alface - Evapotranspiração em  
casa de vegetação. 5. Alface - Crescimento. 6. Alface -  
Cultivo em ambiente protegido. I. Universidade Federal de  
Viçosa. II. Título.

CDD 19.ed. 635.5285

20.ed. 635.5285

CDD

NELSON LUIZ PUGLIESI

**CAPACIDADE DE RETENÇÃO E FREQUÊNCIA DE APLICAÇÃO  
DE SOLUÇÃO NUTRITIVA AO SISTEMA RADICULAR DA  
ALFACE EM CULTIVO HIDROPÔNICO (NFT)**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, para obtenção do título de “*Magister Scientiae*”.

**Aprovada:** 11 de agosto de 2003.

---

Everardo Chartuni Mantovani  
(Conselheiro)

---

José Maria Nogueira da Costa  
(Conselheiro)

---

Aristides Ribeiro

---

Hermínia Emília Prieto Martinez

---

Sérgio Zolnier  
(Orientador)

A meu Pai.  
Ao neném que aí vem.  
DEDICO!

## AGRADECIMENTOS

Ao meu pai pelo apoio e companheirismo.

À minha mãe pelo carinho de uma vida.

À Dani pela minha infância inesquecível.

À Mai, por seu amor, sua dedicação em todos os momentos e sua existência, luz que me guia e esperança de um mundo melhor iminente.

À Capes pelo financiamento.

À UFV em especial ao programa de Pós-Graduação em Meteorologia pela oportunidade de realização do curso.

Ao Professor Sérgio Zolnier pela sua dedicação e sinceridade.

A meus conselheiros e à Professora Hermínia pela colaboração.

Aos colegas, Catalunha, Robson e Takeshi pela força na montagem e coletas dos dados.

Aos amigos funcionários e técnicos da UFV, em especial do Departamento de Engenharia Agrícola pelo apoio na realização deste trabalho.

Aos amigos do Daime, especialmente Pedro, Tatiana, Felipe, Cacá e Meubles, por seus primores, luz e disciplina.

Aos novos amigos, Cléia e Dayan, pelos bons momentos.

Aos eternos irmãos pelo mundo, Pelifê, Paty, Marcelera, Gabilette, Lucas, Mireille, Celine, Glau, Tutu, Lídia, Márcia, Marcelinho, e Johnathan pelos momentos maravilhosos e pelas sugestões.

A DEUS.

## **BIOGRAFIA**

NELSON LUIZ PUGLIESI - filho de Nelson Santos Pugliesi e Teresinha Cristina Camargo Pugliesi, irmão de Daniella Camargo Pugliesi, nasceu em São Paulo, Capital, em 08 de novembro de 1972.

Técnico em mecânica pela Escola Técnica Federal de São Paulo, tendo concluído o curso em 1993.

Em 1994 ingressou no curso de Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa, tendo sido concluído em março de 2001.

Em abril de 2001 iniciou o curso de pós-graduação em Meteorologia Agrícola, ainda na Universidade Federal de Viçosa, submetendo-se à defesa em agosto de 2003.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	vii
RESUMO .....	ixx
ABSTRACT .....	xi
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA .....	4
2.1. Interação Água-Planta-Atmosfera	4
2.2. Qualidade da Água	5
2.3. Aplicação de Solução Nutritiva	6
2.4. Estimativa da Evapotranspiração	7
2.5. Modelagens	9
2.6. Métodos de Controle da Irrigação	10
3. MATERIAL E MÉTODOS .....	13
3.1. Local do Experimento	13
3.2. Clima	14
3.3. Cultura: Semeadura, Transplântio e Manejo	14
3.4. Casa-de-Vegetação	15
3.5. Sistema Hidropônico	16
3.6. Solução Nutritiva	17
3.7. Sistema de Aquisição de Dados Meteorológicos	18
3.8. Coleta das Amostras	20
3.9. Pesagens e Determinação da Solução Retida	20
3.10. Graus-Dia e Graus-Dia Acumulados	22
3.11. Estimativa da Evapotranspiração	23
3.12. Frequência de Aplicação de Solução Nutritiva	26

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	28
4.1. Retenção de Água na Espuma Fenólica	28
4.2. Modelagem da Água Retida nas Raízes	28
4.3. Retenção Total de Água no Sistema Radicular	32
4.4. Estimativa da Evapotranspiração	34
4.5. Acionamentos do Conjunto Moto-Bomba	35
4.6. Evapotranspiração Total Estimada da Cultura	48
4.7. Consumo de Energia do Sistema Proposto	49
5. CONCLUSÕES.....	51
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	52
APÊNDICE A - Normais climatológicas estação do INMET - Viçosa.....	59
APÊNDICE B - Dados climáticos da estação climatológica UFV.....	60
APÊNDICE C - Simulação do regime de acionamentos .....	62

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Casa-de-vegetação utilizada no experimento. ....	15
Figura 3.2. Sistema de Fluxo Laminar de Nutrientes (NFT). ....	16
Figura 3.3. Placas de aquisição de dados .....	18
Figura 3.4. Anemômetro de fio quente, piranômetro Eppley, termo-higrômetro, piranômetro de silício e sensor quântico. ....	19
Figura 3.7. Separação e enxugamento das raízes externas à espuma. ....	21
Figura 3.8. Medidor de área foliar e paquímetro usados .....	25
Figura 4.1. Capacidade de retenção de água das raízes externas à espuma fenólica das cultivares de alface estudadas.....	30
Figura 4.2. Aspecto à época da colheita: do caule, espuma fenólica, e raízes....	31
Figura 4.3. Capacidade de retenção de água no sistema radicular de três cultivares de alface em função do estágio de desenvolvimento .....	32
Figura 4.4. Evapotranspiração diurna total .....	34
Figura 4.5. Regime diário de acionamentos - Great Lakes.....	37
Figura 4.6. Regime diário de acionamentos - Grand Rapids. ....	38

Figura 4.7. Regime diário de acionamentos - Regina.....	39
Figura 4.8. Comparação entre estratégias de acionamentos do sistema .....	40
Figura 4.9. Variáveis ambientais instantâneas e regime de acionamentos do sistema nos dias 8 e 9 após o transplântio - Grand Rapids.....	42
Figura 4.10. Variáveis ambientais instantâneas e regime de acionamentos do sistema nos dias 8 e 13 após o transplântio - Grand Rapids.....	43
Figura 4.11. Variáveis ambientais instantâneas e regime de acionamentos do sistema nos dias 13 e 14 após o transplântio - Grand Rapids.....	46
Figura 4.12. Variáveis ambientais instantâneas e regime de acionamentos do sistema nos dias 11 e 22 após o transplântio - Grand Rapids.....	47
Figura 4.13. Evapotranspiração total estimada ao longo do ciclo da cultura, e dados climáticos diários observados.....	49

## RESUMO

PUGLIESI, Nelson Luiz. M.S. Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2003.  
**Capacidade de Retenção e Frequência de Aplicação de Solução Nutritiva ao Sistema Radicular da Alface em Cultivo Hidropônico (NFT).** Orientador: Sérgio Zolnier. Conselheiros: Everardo Chartuni Mantovani e José Maria Nogueira da Costa.

O experimento foi conduzido em casa-de-vegetação não climatizada, na área experimental da Meteorologia Agrícola, da Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, em 2002. O sistema hidropônico utilizado foi do tipo NFT, técnica do fluxo laminar de nutrientes. Foram estudadas três cultivares de alface (*Lactuca sativa* L.). A semeadura foi em 19 de abril, o transplante para as bancadas definitivas em 10 de maio, e a colheita final foi 29 dias após o transplante, foi observado um total de 438,18°C graus-dia acumulados (GDac) ao final do cultivo. Os objetivos deste trabalho foram: a) determinar experimentalmente uma equação de regressão para a retenção de solução nutritiva nas raízes para as três variedades de alface estudadas, e b) simular o regime de acionamentos do conjunto moto-bomba controlado por um sistema dinâmico que estima, em tempo real, o balanço hídrico em função das variáveis climáticas e da água disponível no sistema radicular da alface. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, com três tratamentos (cultivares), e duas repetições (bancadas de cultivo). Foram efetuadas seis amostragens em intervalos de cinco dias. Foram pesados sistemas radiculares, espumas fenólicas e água retida no sistema radicular. A capacidade de retenção de água no sistema

radicular foi modelada por meio de uma equação expolinear, usando como termo independente GDac. A capacidade de retenção de água pela espuma fenólica não apresentou variação significativa entre variedades, sendo igual a 6,0 g planta<sup>-1</sup>. Em contrapartida, a capacidade de retenção de água pelas raízes externas à espuma fenólica apresentou variação que pôde ser expressa na forma de equações expolineares, com R<sup>2</sup><sub>aj</sub> de 95,8%, 99,7% e 98,8%, para as cultivares Regina, Grand Rapids e Great Lakes, respectivamente. Nos primeiros dias após o transplântio a capacidade de retenção de água do sistema radicular foi igual à da espuma fenólica (6,0 g planta<sup>-1</sup>). Resultados obtidos na simulação do regime de acionamentos do sistema permitem dizer que, de forma geral, sistemas hidropônicos temporizados manejados conforme indicações encontradas na literatura, especialmente os regimes com intervalos entre irrigações de 30 minutos ou menos, superestimam a demanda evapotranspirométrica, além de serem insensíveis ao desenvolvimento radicular da cultura e às condições climáticas. A simulação indicou ainda a redução no consumo de energia elétrica do sistema dinâmico de pelo menos 64 % quando comparado ao consumo no sistema temporizado.

## ABSTRACT

PUGLIESI, Nelson Luiz, M.S., Universidade Federal de Viçosa, August 2003.  
**Water Retention Capacity and Frequency of Delivering the Nutrient Solution to Roots of Hydroponic Lettuce in a NFT System.** Adviser: Sérgio Zolnier. Committee members: Everardo Chartuni Mantovani and José Maria Nogueira da Costa.

The experiment was carried out in a greenhouse without environmental controls, at the agricultural meteorology experimental station, which is part of the Agricultural Engineering Department at the Federal University of Viçosa, Minas Gerais State, Brazil. Lettuce (*Lactuca sativa* L.) cultivars were grown in a NFT hydroponic system. Sowing took place on April 19<sup>th</sup>, the transplantation to definitive benches was made on May 10<sup>th</sup>, 2002, and the last harvest was made 29 days after transplantation. A total of 438 °C accumulated degree-days (GDac) were observed at the end of cultivation. The objectives of this work were as follows: a) to determine experimentally a regression equation for the retention of the nutritive solution in the roots for the three varieties studied, and b) to simulate the operating rate of the motor pump set controlled by a dynamic system which estimates, in actual time, the hydric balance in function of the climatic variables and available water in the lettuce root system. The experimental design was entirely randomized, with three treatments (cultivars) and two repetitions (growing benches). Six samples were randomly selected within five days intervals. The root system, the phenolic foams and the water retained in the foam and on the surface of the roots were weighed. The water retention capacity in the

root system was modelled by means of an exponential equation, using GDac as independent variable. The water retention capacity of the phenolic foam did not show a significant variation among varieties, being equal to  $6.0 \text{ g plant}^{-1}$ . On the other hand, the capacity of water retention of the roots on the outside of the phenolic foam showed a variation that can be expressed in the form of exponential equations, with  $R^2_{aj}$  of 95.8, 99.7 and 98.8%, for the cultivars Regina, Grand Rapids and Great Lakes, respectively. In the first days after transplantation the water retention capacity of the radicular system was equal to that of the phenolic foam ( $6.0 \text{ g plant}^{-1}$ ). Results obtained in the simulation of the operation rate of the system leads to the conclusion that, in a general manner, timerized hydroponic systems managed in accordance with the recommendations found in the literature, particularly those with 30 minutes of interval between irrigations or less overestimate the evapotranspiration demand, besides being insensitive to root development and climatic conditions. The simulation also indicated a potential reduction of the electricity consumption for the dynamic system of, at least, 64% when compared to the consumption in the timerized system.

## 1. INTRODUÇÃO

Devido à crescente concorrência na produção de hortaliças, os empresários do setor têm sido impulsionados a oferecer produtos de qualidade superior a preços competitivos. Além disto, para consolidarem-se neste ramo de atividade precisam dispor de oferta regular a reduzidos custos de produção (ALBERONI, 1998). Assim, os horticultores mais “tecnificados” vêm progressivamente implantando sistemas hidropônicos, uma vez que estes, além de apresentarem as vantagens mencionadas, fornecem produtos com melhor aspecto físico além de, no caso de sistemas fechados, permitirem grande eficiência de consumo dos insumos agrícolas utilizados, como nutrientes, energia e água, visto que a solução aquosa contendo os nutrientes necessários à cultura é recirculada periodicamente e não é descartada.

No Brasil o cultivo hidropônico é bastante recente, apesar do rápido crescimento ocorrido nos últimos anos (FAQUIN e FURLANI, 1999). De acordo com estes autores, e com base em informações obtidas junto a produtores da região da Grande São Paulo o número de instalações hidropônicas neste estado teve uma expansão de aproximadamente dez unidades em 1996 para mais de trezentas unidades em 2002, sendo hoje difícil estimar o número exato de instalações existentes. Deste total, a alface é a cultura mais popular, representando atualmente a maioria das hortaliças produzidas neste sistema. A alface destaca-se também no âmbito da pesquisa, por ser uma cultura de ciclo bastante curto, permitindo respostas rápidas aos pesquisadores. Por outro lado,

apresenta exigências nutricionais bem determinadas e pouco variáveis quanto à concentração requerida de nutrientes ao longo do cultivo, podendo ser considerada uma cultura de fácil manejo.

Dentre os sistemas hidropônicos mais empregados destaca-se o sistema NFT (“Nutrient Film Technique”), ou “técnica do fluxo laminar de nutrientes”, que consiste em circular periodicamente uma lâmina de solução nutritiva pela superfície do sistema radicular da cultura, preenchendo com solução nutritiva os interstícios radiculares (RESH, 2001). Quantidade suficiente de solução nutritiva fica desta forma retida na superfície do sistema radicular, suprimindo a demanda da planta por água e nutrientes até que o conjunto moto-bomba seja acionado novamente, renovando o estoque de água e nutrientes disponíveis à cultura.

O controle temporizado do acionamento do sistema tem como principal vantagem a redução da mão-de-obra, além de evitar descontinuidade da aplicação devido a erro operacional. Contudo, é impossível determinar uma frequência única que seja apropriada a quaisquer condições climáticas e principalmente para qualquer idade da cultura, uma vez que este sistema é insensível às mudanças climáticas e ao desenvolvimento da cultura; desta forma, os controladores temporizados para acionamento de sistemas de irrigação, ora subestimam, ora superestimam a demanda por água.

Esta insensibilidade torna os sistemas temporizados pouco eficientes no que diz respeito ao uso racional de energia e à manutenção do sistema como um todo, uma vez que este, evidentemente, tem maior desgaste quando sua utilização é excessiva; além disto, em situações críticas, em que a demanda por água é subestimada, o desenvolvimento da cultura pode ser comprometido de forma irreversível.

Desta forma, torna-se um problema recorrente nos métodos de cultivo hidropônicos a determinação do intervalo adequado entre eventos de aplicação de solução nutritiva e a duração de cada um destes eventos. Diversos estudos têm sido realizados para equacionar este problema no Brasil e em vários países para a otimização do uso de água e nutrientes.

Em sistemas de cultivo convencionais, a capacidade de retenção de água disponível à cultura é determinada principalmente pela porosidade do solo ou tipo de substrato utilizado. Em contraste, no cultivo hidropônico, o sistema radicular fica exposto e a capacidade de retenção de água varia principalmente em função da idade da cultura, sendo uma característica dinâmica de importante determinação.

Muitos sistemas propõem soluções para a estimativa do momento exato para a aplicação de solução nutritiva em sistemas hidropônicos, porém estes, são geralmente importados, dispendiosos para o produtor, e de complexidade limitante ao operador comum.

Tendo em vista propor soluções para estes e outros problemas relacionados à frequência de aplicação de soluções nutritivas aos sistemas hidropônicos, em especial do tipo NFT, foi desenvolvido o presente trabalho, o qual teve como principais objetivos: a) modelar a capacidade de retenção de solução nutritiva na superfície do sistema radicular da alface cultivada em sistema hidropônico NFT; b) a estimativa dos intervalos entre acionamentos do sistema com base na evapotranspiração, calculada pela equação de Penman-Monteith, e pela modelagem da capacidade de retenção de água no sistema radicular de três cultivares de alface.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. Interação Água-Planta-Atmosfera

A interação água-planta-atmosfera é um dos componentes mais importantes dos modelos de crescimento, devido à grande dependência das plantas às condições ambientais e ao fato da água servir como meio de transporte para os principais solutos nas plantas (JONES e TARDIEU, 1998). Outro aspecto a ser considerado diz respeito à importância da água nas culturas hortícolas, uma vez que estas, são geralmente comercializadas considerando-se seu peso, tamanho e período após colheita. Portanto, sendo a água, o principal componente destes produtos, existe grande vantagem mercadológica em se assegurar que esta quantidade de água seja otimizada nos tecidos celulares das plantas, isto pode ser alcançado com um preciso controle das irrigações, especialmente em sistemas de cultivo hidropônicos (RESH, 2001).

As folhas de hortaliças, como a alface, são órgãos que não armazenam quantidades expressivas de carboidratos, o que reduz o seu potencial de armazenamento de água intercelular, tornando-as muito suscetíveis à desidratação (FINGER e VIEIRA, 2002). De forma geral, uma maneira de se reduzir os efeitos nocivos desta desidratação pós-colheita em produtos hortícolas é garantindo-se que estes apresentem teores elevados de água no momento da colheita. As técnicas hidropônicas de cultivo, quando corretamente aplicadas,

constituem uma ferramenta poderosa a fim de otimizar a absorção de água e nutrientes pelas plantas (TAIZ e ZEIGER, 1998).

FINGER e VIEIRA (2002) recomendam para a conservação da turgência da alface no período pós-colheita a manutenção desta em condições ideais de umidade e temperatura; e citando SALUNKHE e DESAY (1984), os autores recomendam para o armazenamento desta hortaliça, temperaturas entre 0 e 1 °C, com umidade relativa do ar em torno de 95%.

Segundo PEREIRA e MARTINEZ (1999), a irrigação deve ser feita, geralmente, quando ocorrer perda da ordem de 75 a 85% da água disponível no substrato. Os autores relatam quatro aspectos de importância prioritária para a otimização do fornecimento de água em sistemas hidropônicos, sendo estes: a qualidade da água, a quantidade de água aplicada por irrigação, o momento em que esta irrigação deve ser efetuada e a forma de aplicação da lâmina irrigada.

## 2.2. Qualidade da Água

Quanto à qualidade da água para hidroponia, algumas análises básicas são indicadas, a fim de se determinar o seu pH, e sua condutividade elétrica (CE) inicial. Além da análise microbiológica, a fim de avaliar a presença de patógenos coliformes, em caso de resultado positivo é necessária a desinfecção da água antes da preparação da solução nutritiva, os métodos destinados a esta desinfecção geralmente são caros, podendo inviabilizar o cultivo hidropônico.

Nos casos em que a CE estiver relativamente alta, acima de 0,5 mS.cm<sup>-1</sup>, é recomendada uma análise química mais detalhada da água, a fim de se determinar seu teor de sais, inclusive alguns nutrientes (principalmente micronutrientes), que muitas vezes aparecem dissolvidos na água disponível, podendo inclusive não ser necessária sua adição para preparo da solução nutritiva (FOLEGATTI, 1999; BENOIT, 1992).]

Em casos extremos, pode ser necessária a deionização da água antes da preparação da solução nutritiva, sobretudo quando o interesse é o estudo de nutrição mineral. Além do mais, a CE elevada dificulta a absorção de água pelas

plantas, podendo comprometer estudos de consumo de solução pela cultura (MARTINEZ e BARBOSA, 1999).

### **2.3. Aplicação de Solução Nutritiva**

No que diz respeito ao momento em que a solução nutritiva deve ser aplicada, este deverá ser determinado pela demanda evapotranspirativa e pela capacidade de retenção do sistema radicular (FURLANI et al., 1999; MARTINEZ & BARBOSA, 1999).

Usualmente, o controle do acionamento do sistema é feito por meio de temporizadores conjugados a relés elétricos (“Timers”), que ativam o conjunto moto-bomba em períodos pré-determinados. O tempo de acionamento do sistema, assim como os intervalos entre estes acionamentos, dependem geralmente das especificações do temporizador disponível, e da prática e discernimento do operador do sistema, variando entre 10 a 15 minutos o tempo de acionamento e 15 a 30 minutos o intervalo entre estes acionamentos (FURLANI et al., 1999; MARTINEZ e BARBOSA, 1999).

O uso de substratos inertes em cultivos hidropônicos tem como grande vantagem o aumento da capacidade de retenção de água disponível à cultura. DRZAL et al. (1999) estudaram a capacidade de retenção de água em musgo e turfa. Neste trabalho a capacidade de retenção de água foi estimada em 12,8 e 10,4 % do volume total destes substratos respectivamente.

O intervalo ideal entre eventos de irrigação em hidroponia está intimamente relacionado ao sistema de cultivo, à região, ao tipo de cobertura, às espécies e variedades cultivadas, variando principalmente em função dos fatores climáticos reinantes, não havendo regra geral (FURLANI et al., 1999). Assim, o intervalo ideal seria aquele estimado com base na aquisição de dados climáticos em tempo real e, além disto, fosse parametrizado para as condições de cultivo particulares (MORAES & FURLANI, 1999), levando em conta a estimativa da capacidade de retenção de solução nutritiva na superfície do sistema radicular.

## 2.4. Estimativa da Evapotranspiração

O modelo de Penman-Monteith tem sido usado preferencialmente por diversos pesquisadores para estimar a evapotranspiração em casas-de-vegetação (ALLEN et al., 1997). O referido modelo, por ser baseado em princípios físicos bem conhecidos, permite o ajuste de seus parâmetros com elevado índice de acerto, e vem demonstrando coerência com estudos de ecofisiologia de plantas (POTAFOS, 1987; TAIZ e ZEIGER, 1998). Uma das limitações para aplicação deste método no passado estava relacionada com a ausência de dados meteorológicos consistentes em tempo real. Com o desenvolvimento da microeletrônica, os instrumentos meteorológicos tiveram uma acentuada redução de custo e melhora expressiva no que diz respeito à exatidão das medições. Esses instrumentos podem ser conectados a uma placa de aquisição de dados, previamente instalada em um computador, permitindo assim, o monitoramento do ambiente físico na casa-de-vegetação. Com os dados meteorológicos coletados pelo computador é possível fazer excelentes estimativas de evapotranspiração em curtos intervalos de tempo, permitindo o manejo mais eficiente da aplicação de água em tempo real (ZOLNIER et al., 2001).

O método de Penman-Monteith pode ser parametrizado com auxílio de sistemas de aquisição de dados para a estimativa do balanço energético na cultura e a medição a campo da evapotranspiração real. A equação de Penman-Monteith é expressa por:

$$LE = \frac{\Delta(R_n - F) + \rho_{ar} c_{par} DPV_{ar}/r_h}{\Delta + \gamma (1 + r_c/r_h)} \quad (2.1)$$

em que:

LE = evapotranspiração expressa em termos de fluxo de calor latente,  $W m^{-2}$ ;

$(R_n - F)$  = energia disponível à superfície,  $W m^{-2}$ ;

$R_n$  = saldo de radiação à superfície,  $W m^{-2}$ ;

F = fluxo de calor sensível da solução nutritiva,  $W m^{-2}$ ;

$\Delta \cong$  variação da pressão de saturação do vapor d'água com respeito à temperatura do ar, sendo avaliada por meio da temperatura de bulbo seco do ar, Pa °C<sup>-1</sup>;

$\rho_{\text{ar}}$  = densidade absoluta do ar, kg m<sup>-3</sup>;

$c_{\text{par}}$  = calor específico do ar à pressão constante, J kg<sup>-1</sup>°C<sup>-1</sup>;

$DPV_{\text{ar}}$  = déficit de pressão de vapor d'água do ar, Pa;

$r_h$  = resistência aerodinâmica ao processo convectivo de transferência de calor sensível, s m<sup>-1</sup>;

$\gamma$  = coeficiente psicrométrico, Pa °C<sup>-1</sup>;

$r_c$  = resistência da cultura, s m<sup>-1</sup>.

Em dissertação de mestrado, LYRA (2002) parametrizou a equação de Penman-Monteith para condições diurnas similares às que serão estudadas no presente trabalho (durante o outono). O autor propõe o uso da resistência da cultura ao processo de difusão de vapor em função de um índice de área foliar de referência ( $IAF_r$ ), calculado quando do fechamento do dossel da cultura, o que tornou a estimativa da evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ) sensivelmente mais precisa ao longo do período de cultivo, sobretudo quando esta estimativa precisa ser feita de forma dinâmica ao longo do período de cultivo.

LYRA constatou que nos primeiros dias após o transplante a acurácia de suas estimativas ficaram ligeiramente comprometidas percentualmente, porém a magnitude do erro durante o período mais crítico foi inferior a uma lâmina equivalente a 0,030 mm h<sup>-1</sup>, o que representa cerca de 1,8 g evapotranspiradas por planta em uma hora, considerando-se que a  $ET_c$  estimada para este período em seu trabalho variou na faixa de 4,5 a 8,5 g planta<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>, o erro aproximado foi de 42 a 22%, no entanto este fato não deve causar problemas para o desenvolvimento da cultura, uma vez que este erro atua superestimando a evapotranspiração, ou seja, a  $ET_c$  estimada será maior que a  $ET_c$  real, conferindo segurança ao método.

LYRA observa ainda, que a parametrização feita para a resistência da cultura ao processo de difusão de vapor apresentou tendência de subestimar a

$ET_c$  no início e no final da tarde, sugerindo a necessidade de estudos mais aprofundados para a determinação desta resistência nestes períodos do dia, novamente no entanto este fato não deve causar grandes problemas pois o período em que este erro atua é muito curto e nele a  $ET_c$  é naturalmente baixa devido à pouca insolação.

## 2.5. Modelagens

MATHIEU et al. (1999) discutem algumas das principais linhas de desenvolvimento de modelos para estimar a necessidade de reposição de nutrientes em plantas cultivadas. Os autores apresentam três grandes grupos de modelos mecanísticos desenvolvidos com esta finalidade, o modelo de Michaelis-Menten, o modelo da ‘taxa de adição relativa de nutrientes’ e o modelo da ‘demanda nutricional da planta’. Nestes modelos, algumas aproximações empíricas foram aplicadas. Os próprios autores, no entanto, chamam a atenção ao fato de que o fluxo de nutrientes é mais importante ao desenvolvimento vegetal do que a concentração de nutrientes em si, que pode variar grandemente sem causar danos significativos às culturas (MATHIEU et al. 1999 citando INGESTAD e LUND, 1979; HELLGREN e INGESTAD, 1996; MANKIN e FYNN, 1996).

HOOGENBOOM (1999) identifica dois grupos principais de modelos de crescimento de raízes, sendo que o principal deles objetiva estudar a geometria radicular e suas funções, como a capacidade de retenção de água no sistema radicular. Adicionalmente, o segundo grupo estuda melhor as interações das raízes com a parte aérea das plantas, simplificando alguns aspectos funcionais do sistema radicular, atendo-se mais a aspectos gerais da cultura. Portanto, é importante delinear claramente quais os objetivos que se pretende alcançar com a modelagem desejada.

Diversas peculiaridades devem ser consideradas na modelagem do crescimento de raízes de plantas, destas, os aspectos físico-químicos do solo são consideradas as de maior dificuldade de serem simuladas, sendo muito

importante para a simulação do desenvolvimento de plantas cultivadas em solo, no entanto, estes aspectos não são pertinentes a sistemas hidropônicos (HOOGENBOOM, 1999), uma vez que nestes sistemas o substrato (quando utilizado) é inerte, e os nutrientes estão diluídos homogeneamente na solução de cultivo. Sendo mais importante em hidroponia a modelagem da capacidade de retenção de solução no sistema radicular.

## **2.6. Métodos de Controle da Irrigação**

Enquanto métodos para a estimativa do momento ideal de aplicação da irrigação, utilizando conceitos teóricos, vêm sendo desenvolvidos com a aplicação de modelos matemáticos sofisticados, baseados na estimativa do balanço hídrico da cultura, também é possível encontrar técnicas extremamente simples, como a “Folha-mágica” descrita por SGANZERLA (1997), a qual tem como elemento sensível um tipo de raquete, feita com tela plástica, que recebe água na mesma proporção que a cultura. Quando o elemento sensível recebe um determinado volume de água, este desloca-se verticalmente para baixo, desligando o sistema de irrigação. Com a perda de água pela evaporação, o elemento sensível volta à posição original, acionando novamente o conjunto moto-bomba. É importante notar que o sistema descrito por SGANZERLA, apesar de muito simples e eficaz, precisa ser regulado periodicamente, uma vez que é insensível ao desenvolvimento da cultura (PEREIRA e MARTINEZ, 1999).

Outro método interessante de controle de irrigação foi desenvolvido na Universidade de Kentucky, sendo baseado no princípio do movimento da água por capilaridade em materiais porosos. Neste experimento, BUXTON e JIA (1999) construíram uma bancada, coberta por um tecido poroso cuja extremidade inferior permaneceu mergulhada em solução nutritiva, o reservatório em que este material ficava mergulhado era constantemente preenchido com o auxílio de uma válvula solenóide ligado a um sensor de nível. As plantas foram dispostas sobre o

tecido poroso, de forma que a água foi reposta automaticamente à medida que era utilizada pelas plantas.

O uso de substratos ou materiais porosos (p. e. espuma fenólica) pode ser importante nos primeiros dias após o transplante, uma vez que o sistema radicular nesta fase da cultura é pouco desenvolvido e não apresenta capacidade de retenção de solução nutritiva em quantidade suficiente para suprir suas necessidades hídricas entre as irrigações. No entanto, à medida que as raízes vão se desenvolvendo, a espuma deforma-se e perde parte de sua capacidade de retenção (MARTINEZ & BARBOSA, 1999).

PILAU et al. (2002), estudando os efeitos do intervalo entre irrigações na produção e nas variáveis fisiológicas da alface hidropônica, em Santa Maria, testaram dois intervalos entre irrigações em sistema NFT, de 15 e 30 minutos. Os autores relataram a elevação da resistência estomática e a diminuição da taxa de transpiração quando aumentado o intervalo entre irrigações. Entretanto, neste trabalho os autores não encontraram diferenças significativas na produção de fitomassa (seca ou fresca). Assim, no caso do estudo em questão, o intervalo de 30 minutos entre acionamentos do sistema foi mais eficiente no uso de água e de energia elétrica (redução de 28,3%), sendo, portanto, mais viável.

FERNANDES et al. (2002), estudando a produtividade da alface com aplicação de duas formulações diferentes de solução nutritiva durante o outono, na cidade de Viçosa, para as cultivares Regina, Great Lakes e Babá de Verão, em sistema hidropônico, encontraram para as variedades citadas valores médios de matéria fresca da raiz na faixa de 13,61 g planta<sup>-1</sup> (cv. Great Lakes) a 26,94 g planta<sup>-1</sup> (cv. Regina) aos 34 DAT, estes resultados, bastante contrastantes sugerem a grande importância do estudo do comportamento da produtividade entre cultivares.

Diversos estudos vêm indicando que o desenvolvimento da alface também é severamente influenciado pelas condições ambientais. Como exemplos desta influência, YURI et al. (2002), citam que temperaturas acima de 20°C podem estimular o florescimento, implicando no pendoamento da alface, este efeito é agravado em dias longos e acelerado à medida que a temperatura média

diária aumenta, variando na faixa de 21,1 a 26,6°C. Este fenômeno é minimizado quando as temperaturas noturnas são baixas, em torno de 7 °C (SANDERS, 2003).

GRAAF (1981), estudando a evapotranspiração noturna em ambientes protegidos para alface, observou que, na maior parte do ciclo da cultura, a evapotranspiração noturna não ultrapassou 15% dos valores encontrados ao longo de todo o dia. O autor observa também, que à medida que a cultura se desenvolve, esta proporção cai ainda mais, sendo que ao final do cultivo a evapotranspiração noturna foi inferior a 10% dos valores encontrados ao longo das 24 horas.

ANDRADE JÚNIOR e KLAR. (1997), analisando os efeitos de quatro níveis de irrigação baseados na evaporação do Tanque Classe A (ECA) de 25, 50, 75 e 100% aplicados por gotejamento em alface cultivado sob ambiente protegido obteve resposta quadrática na curva de produtividade sendo esta maximizada quando aplicada uma lâmina de irrigação equivalente a 75% da evaporação do Tanque Classe A. Nas condições edafoclimáticas de seu experimento esta lâmina de irrigação foi equivalente a 161,74 mm aplicados do transplântio à colheita, equivalente ao consumo de 10,06 L de água por planta. Neste trabalho o autor pôde indicar ainda que a eficiência do uso da água (EUA), decresceu linearmente com o aumento da lâmina aplicada.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

Para cumprimento dos objetivos deste trabalho as atividades nele desenvolvidas foram divididas em etapas, sendo a primeira experimental e a segunda de tratamento dos dados, simulações de manejo e análises.

A etapa experimental teve como objetivos principais: a modelagem da capacidade de retenção de solução nutritiva na superfície do sistema radicular da cultura, e a coleta dos dados climáticos usados na simulação.

#### 3.1. Local do Experimento

O estudo experimental foi conduzido sob condições de casa-de-vegetação não-climatizada, na área experimental da Meteorologia Agrícola, pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, na cidade de Viçosa, Minas Gerais, no ano de 2002. As coordenadas geográficas de Viçosa são: 20° 45' 45" S de latitude e 45° 52' 04" W de longitude; a altitude do local é de 690 m.

### 3.2. Clima

O clima da região é temperado quente – mesotérmico; o verão apresenta-se chuvoso, quente e úmido com temperatura média no mês mais quente (fevereiro) superior a 22° C e umidade relativa média superior a 80 %; em contraste, o inverno costuma ser mais seco e frio, com temperatura média do mês mais frio (julho) próxima dos 15° C, e umidade relativa média em torno de 76 % no mês mais seco (setembro). No mês de julho observa-se acentuado declínio da umidade relativa do ar (normais climatológicas para Viçosa, Apêndice 1). A classificação climática da região é Cwa, de acordo com a metodologia de Köppen.

Durante o período da experimentação, uma série de fenômenos meteorológicos foram observados, dentre eles destaca-se a entrada na região de 3 massas de ar características de frentes-frias, precedidas da redução abrupta da pressão atmosférica (Apêndice 2), seguidas de dias frios de baixa insolação e alta umidade relativa. Estes fenômenos tiveram importância fundamental nas análises da simulação apresentadas nos Resultados e Discussões.

### 3.3. Cultura: Semeadura, Transplântio e Manejo

Foram usadas as cultivares de alface Regina (lisa), Great Lakes e Grand Rapids (crespas). As sementes foram semeadas em 19 de abril de 2002, caracterizando o cultivo na estação do outono; 22 dias após a semeadura (10 de maio) as mudas foram transplantadas para a bancada de cultivo definitivo, onde permaneceram por 29 dias, sendo feita a colheita em 7 de junho de 2002.

A semeadura foi realizada em cubos de espuma fenólica com dimensões de 2 x 2 x 2 cm, os quais foram levados a uma bancada construída com a finalidade de suportar as plântulas na fase de formação das mudas. Durante o período de produção das mudas foi circulada uma solução nutritiva com CE de 1,0 dS m<sup>-1</sup>. As irrigações foram intermitentes, e tiveram duração de 10 minutos, sendo que o intervalo entre elas foi de 50 minutos.

O transplante foi feito no dia 10 de maio, ao final da tarde, de modo a minimizar o estresse ocasionado em função das inevitáveis perdas de sistema radicular. Após o transplante, foi utilizada solução nutritiva proposta por FURLANI (1998), conforme será visto mais detalhadamente no item 2.5 deste capítulo; o regime de irrigações adotado a partir de então passou a ser de 10 minutos de acionamento e 20 minutos para descanso e drenagem do sistema.

### 3.4. Casa-de-Vegetação

A casa-de-vegetação utilizada para realização do experimento (Fig. 3.1), tem área útil de cultivo de aproximadamente 100 m<sup>2</sup>, apresentando 15m de comprimento por 7 m de largura; é do tipo arco; não-climatizada; coberta por filme de polietileno de 150 µm de espessura, aditivado com proteção anti-ultravioleta (anti-UV); a estrutura da cobertura é confeccionada em arcos de aço galvanizado e os pilares são de concreto armado.

O fechamento lateral é de tela branca de 1 mm de malha (tipo clarite), a fim de dificultar a entrada de insetos e outros animais no ambiente de cultivo. O piso da casa-de-vegetação foi totalmente coberto por uma camada de brita número zero de 5 cm de espessura, o que contribuiu para melhor assepsia e redução do crescimento de plantas invasoras no interior da instalação.



**Figura 3.1. Casa-de-vegetação utilizada no experimento.**

### 3.5. Sistema Hidropônico

O sistema hidropônico utilizado foi do tipo NFT (“Nutrient Film Technique”), ou técnica do filme nutriente (Figura 3.2); esta técnica consiste em circular periodicamente uma lâmina de solução nutritiva pela superfície do sistema radicular da cultura, preenchendo com solução nutritiva os interstícios radiculares.

Quantidade suficiente de solução nutritiva fica desta forma retida na superfície do sistema radicular, suprindo a demanda da planta por água e nutrientes até que o conjunto moto-bomba seja acionado novamente, renovando o estoque de água e nutrientes disponível à cultura. Os acionamentos do conjunto moto-bomba são controlados por meio de um temporizador conjugado a um relé eletromecânico (“Timer”), que ativa o sistema em períodos pré-programados.

As bancadas de cultivo foram manejadas de maneira independente, sendo que cada bancada constituiu uma repetição do experimento. Com o intuito de minimizar a influência da retirada das amostras das bancadas de cultivo foram implementadas também bancadas com plantas destinadas à reposição das amostras colhidas, estas bancadas tiveram os mesmos tratos dados às bancadas amostrais.

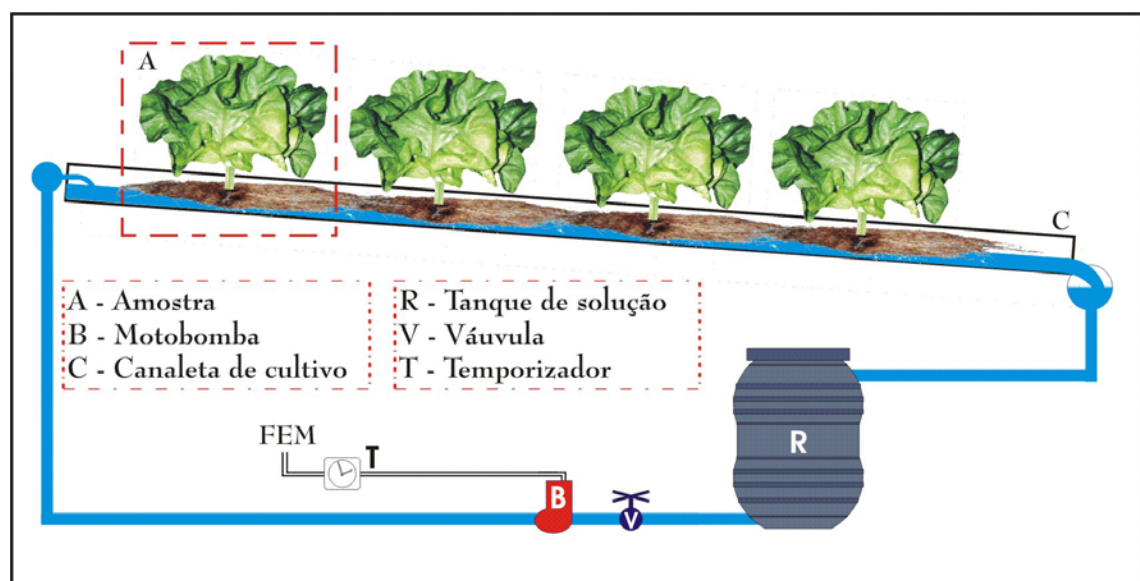


Figura 3.2. Sistema de Fluxo Laminar de Nutrientes (NFT).

### 3.6. Solução Nutritiva

Foi usado um reservatório com capacidade de 100 L para armazenamento da solução nutritiva em cada bancada de crescimento contendo 120 plantas, ou seja, aproximadamente  $0,83 \text{ L planta}^{-1}$ , esta razão é considerada pequena para a cultura da alface, porém, os problemas e riscos de se trabalhar com uma baixa razão de solução-planta foram superados com ajustes periódicos do pH e da CE, além do preenchimento diário dos tanques de solução.

A solução nutritiva assim como as soluções de ajuste utilizadas foram propostas por FURLANI (1998), para alface, considerou-se as necessidades nutricionais da cultura conforme Quadro 3.1. A solução utilizada para nutrição das mudas (antes do transplântio) tem a mesma formulação da solução final utilizada, a CE, foi mantida na faixa de 0,7 a  $1,0 \text{ dS m}^{-1}$ . Após o transplântio, a CE foi sendo gradativamente elevada até obter-se uma condutividade elétrica na faixa de 1,5 a  $1,7 \text{ dS m}^{-1}$ . O pH da solução nutritiva foi mantido na faixa de 6,0 a 6,5 durante o experimento.

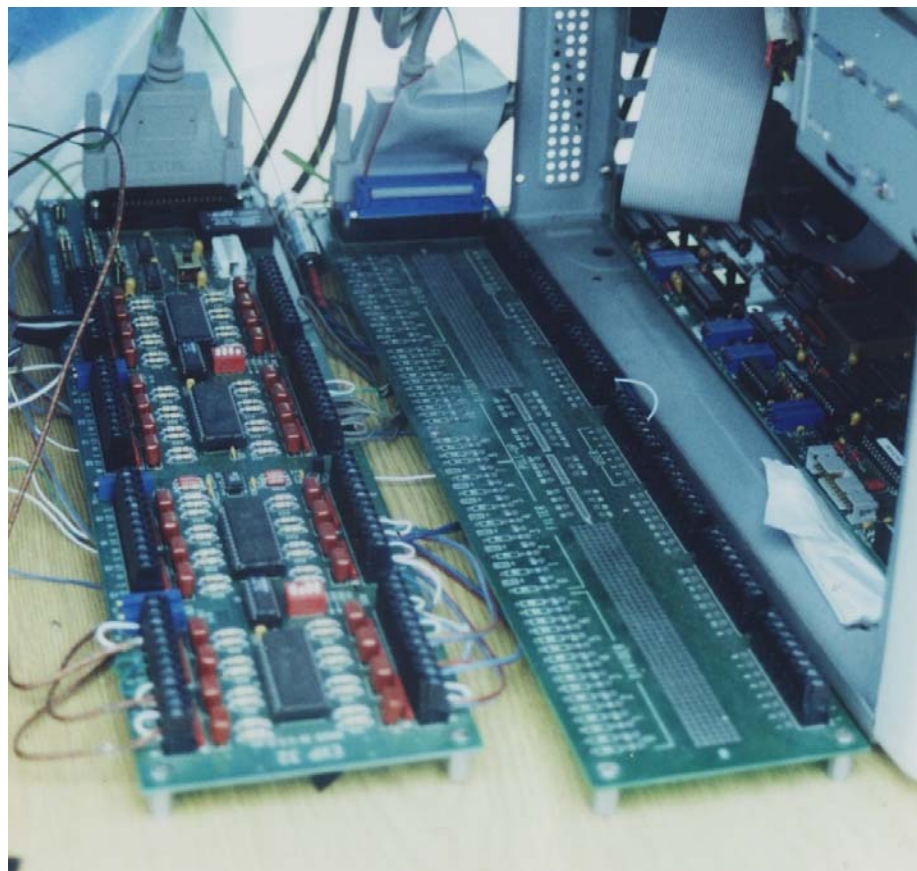
**Quadro 3.1. Concentração de nutrientes para o cultivo hidropônico de alface (g/1000 L). Fonte: FURLANI, 1998.**

Nutriente	[ ] em g/1000L
N-NO <sub>3</sub>	174
N-NH <sub>4</sub>	24
P	39
K	183
Ca	142
Mg	38
S-SO <sub>4</sub>	52
B	0,3
Cu	0,02
Fé	2,0
Mn	0,4
Mo	0,06
Zn	0,06
Si	14

O ajuste do pH e da CE foi feito diariamente, ao final da tarde, quando os tanques eram preenchidos com água “pura” até o nível de 100L; no entanto, nos últimos dias do ciclo da cultura este ajuste passou a ser feito duas vezes ao dia, principalmente nos dias de maior demanda evapotranspirativa, isto ocorreu em virtude da baixa razão solução-planta utilizada no experimento.

### 3.7. Sistema de Aquisição de Dados Meteorológicos

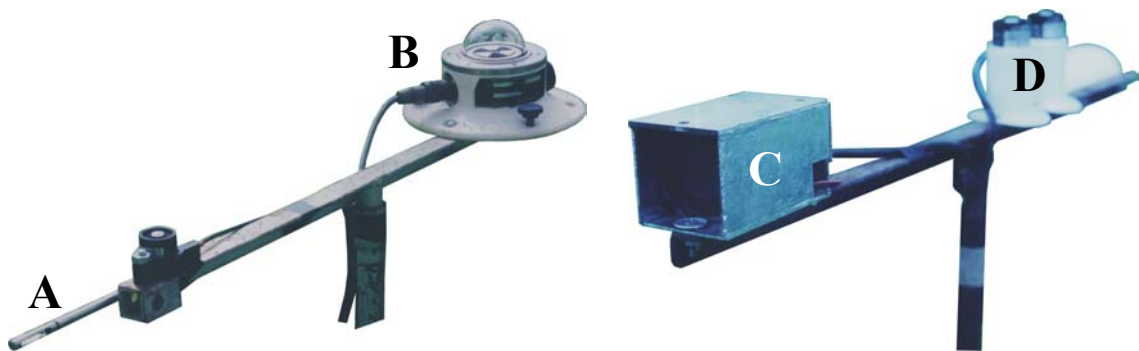
Para a coleta dos dados, foi usado um sistema automático de aquisição de dados meteorológicos, o qual teve como plataforma um computador Pentium 133 MHz, acoplado em seu barramento ISA a uma placa externa de aquisição de dados de 16 canais de entrada analógicos e resolução de 16 bits (CYDAS 1602HR, CYBERRESEARCH, Brandford, CT). Os canais analógicos, por sua vez, foram conectados aos sensores responsáveis pelo monitoramento do ambiente físico (Figura 3.3).



**Figura 3.3. Placas de aquisição de dados, modelo CYDAS 1602HR, fabricante CYBERRESEARCH.**

Os principais dados coletados para o desenvolvimento deste trabalho foram a radiação solar incidente no dossel, a velocidade do ar interno nas proximidades das plantas, a temperatura e a umidade relativa do ar interno à casa-de-vegetação, os quais foram usados no modelo de Penman-Monteith para a estimativa da evapotranspiração. No entanto, outros instrumentos foram instalados para o monitoramento do ambiente de cultivo.

A densidade do fluxo de radiação solar foi medida por meio de um piranômetro Eppley, instalado 50 cm acima da cultura. A temperatura e a umidade relativa do ar foram medidas por meio de um instrumento que combina dois sensores independentes, sendo um para temperatura e outro para umidade relativa do ar (Modelo HMW21YB, VAISALA, Woburn, MA). A velocidade do vento foi medida utilizando-se um anemômetro de fio quente (Modelo FMA-903-I, OMEGA, Stanford, CT) (Figura 3.4).



**Figura 3.4. Anemômetro de fio quente (A), piranômetro Eppley (B), termo-higrômetro aspirado Vaissala (C), piranômetro de silício e sensor quântico (D).**

Os dados ambientais coletados foram armazenados em intervalos de 1 minuto, sendo que cada dado correspondeu a uma média de 5 medições em intervalos de 1 segundo obtidos no período de 55 a 59 segundos dentro de cada minuto; totalizando cerca de 1440 dados diários de cada variável ambiental.

### 3.8. Coleta das Amostras

O delineamento experimental empregado foi o inteiramente casualizado, com três tratamentos (cultivares), e duas repetições (plantas dispostas nas bancadas de cultivo). Foram efetuadas seis amostragens, em intervalos de cinco dias entre cada uma delas.



**Figura 3.5. Amostra.**

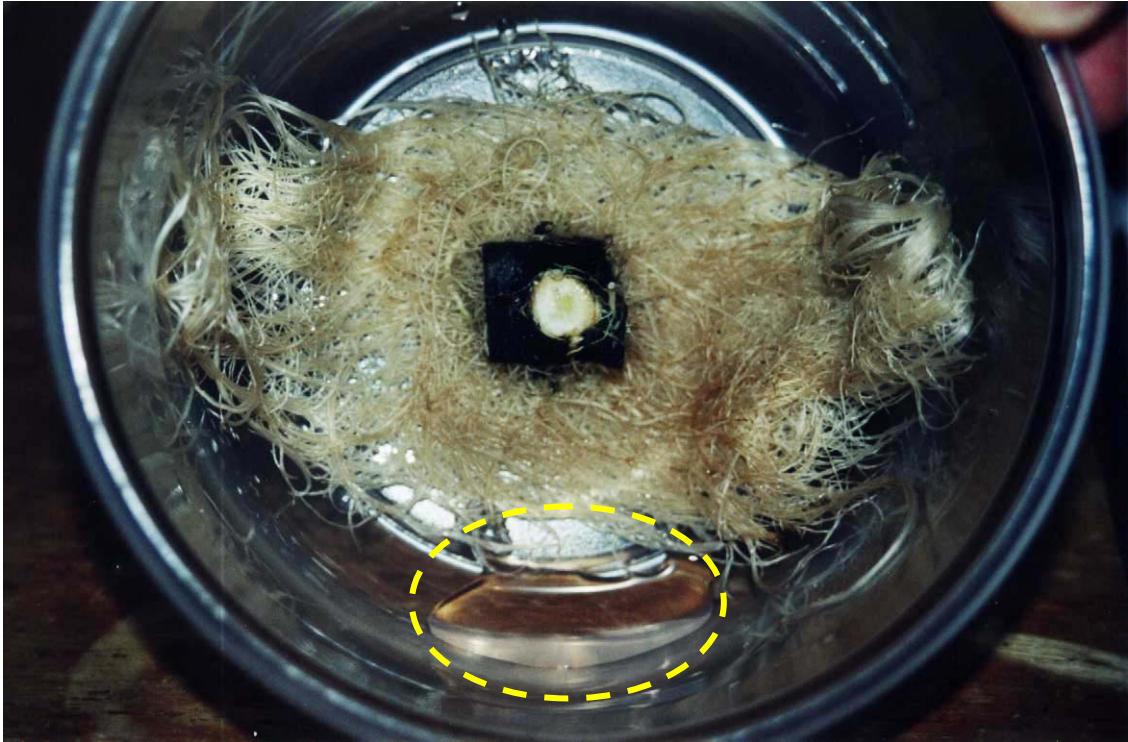
Foram coletadas, completamente ao acaso, 5 amostras de cada repetição (bancadas de cultivo). No local de onde foram coletadas as amostras foram colocadas novas plantas, provenientes das bancadas de reposição, isto foi feito a fim de minimizar as alterações no ambiente de cultivo; as plantas provenientes das bancadas de reposição não foram consideradas no sorteio das amostras subsequentes.

As amostras (Figuras 3.2 e 3.5) foram coletadas 20 minutos após o término da última irrigação do dia, programada para as 19 horas. Optou-se por fazer as coletas no período noturno a fim de minimizar as perdas de água ocasionadas em virtude da evapotranspiração. As plantas foram cuidadosamente retiradas das canaletas de crescimento, a fim de não se perder quantidades excessivas de solução nutritiva retida em seu sistema radicular; sendo imediatamente dispostas em recipientes plásticos limpos e secos, os quais foram previamente pesados a fim de se determinar seu peso vazio.

### 3.9. Pesagens e Determinação da Solução Retida

Depois de coletadas, as amostras foram identificadas e levadas à balança para que fosse pesada sua matéria fresca total, em seguida estas amostras foram desmembradas em parte aérea (folhas e caule) e sistema radicular (raízes, espuma fenólica e água); a parte aérea foi dividida em folhas e caule, pesados individualmente e reservados em sacos plásticos. O sistema radicular (Figura 3.6) foi pesado e em seguida as raízes externas e a espuma fenólica foram separadas e enxugadas (Figuras 3.7), a espuma foi pesada e reservada separadamente. Após

serem enxugadas com papel toalha as raízes externas à espuma fenólica foram novamente pesadas a fim de determinar por diferença de pesagens a quantidade de solução que estava retida em sua superfície.



**Figura 3.6.** Sistema radicular e solução retida na superfície.



**Figura 3.7.** Separação (A) e enxugamento (B) das raízes externas à espuma fenólica.

O sistema radicular, e as outras partes da amostra, foram reservados em sacos individuais e levados à estufa a 70°C por 72 horas, após o qual foi determinada a matéria seca de cada parte da amostra coletada.

### 3.10. Graus-Dia e Graus-Dia Acumulados

Segundo WANG (1960), citado por JONES (1992), o conceito de graus-dia vêm sendo usado em estudos fenológicos de culturas em substituição ao tempo cronológico a mais de 200 anos. Os modelos empregados neste trabalho utilizaram como variável independente os graus-dia acumulados a partir do transplântio, o qual foi calculado com base na equação descrita por JONES (1992):

$$GD = (\bar{T} - T_b) \quad (3.1)$$

$$GD_{ac} = \sum_{i=1}^n (\bar{T}_i - T_b) \quad (3.2)$$

em que:

$\bar{T}_i$  = temperatura média do dia  $i$ , °C;

$T_b$  = temperatura basal da cultura em questão, °C;

$i$  = dia em questão.

Para o cálculo do GD, SCAIFE et al. (1987) recomendam a utilização de 3,5°C, para a temperatura basal da cultura da alface.

### 3.11. Estimativa da Evapotranspiração

A estimativa da evapotranspiração da cultura foi obtida pelo modelo de PENMAN (1948), modificado por MONTEITH (1965), conhecido como modelo de Penman-Monteith, no entanto, o fluxo de calor sensível ( $R_n - F$ ) resultante do aquecimento ou resfriamento da solução nutritiva representa apenas uma pequena parcela da energia disponível à superfície. Em contrapartida, o saldo de radiação incidente à superfície ( $R_n$ ) foi medido, assim, a Equação de Penman-Monteith, (Equação 2.1) do presente trabalho pôde ser simplificada como:

$$LE = \frac{\Delta(R_n) + \rho_{ar} c_{par} DPV_{ar}/r_h}{\Delta + \gamma(1 + r_c/r_h)} \quad (3.3)$$

em que seus parâmetros estão descritos na Equação 2.1 da Revisão de Literatura deste trabalho.

Como pode ser observado, a utilização do modelo de Penman-Monteith requer dados de: radiação solar, velocidade do ar, temperatura e umidade relativa do ar, obtidos pelo sistema de aquisição de dados descrito anteriormente. Além disto, o modelo requer a determinação da resistência da cultura e da resistência aerodinâmica ao transporte de calor sensível, as quais foram parametrizadas por LYRA (2002).

No presente trabalho, o estudo da evapotranspiração foi concentrado nos períodos de insolação, uma vez que as parametrizações utilizadas para a equação de Penman-Monteith têm validade apenas no período diurno, sendo inconsistentes para a estimativa da  $ET_c$  noturna.

Para a estimativa da evapotranspiração durante o cultivo após o transplântio, a resistência da cultura foi parametrizada com relação à variação do índice de área foliar (IAF), segundo proposta de LYRA, expressa por:

$$r_c = r_{cr} \frac{IAF_r}{IAF} \quad (3.4)$$

em que;

$r_c$  = resistência da cultura, associada ao valor do IAF em questão,  $s\ m^{-1}$ ;

$r_{cr}$  = resistência da cultura de referência, associada ao valor do  $IAF_r$ ,  $s\ m^{-1}$ ;

IAF = índice de área foliar em questão, estimado por meio de modelos de crescimento, adimensional;

$IAF_r$  = índice de área foliar de referência, medido após o fechamento do dossel, porém antes do período de formação de cabeça, adimensional.

O índice de área foliar é expresso pela equação:

$$IAF = \frac{16 \cdot AF_t}{A} \quad (3.5)$$

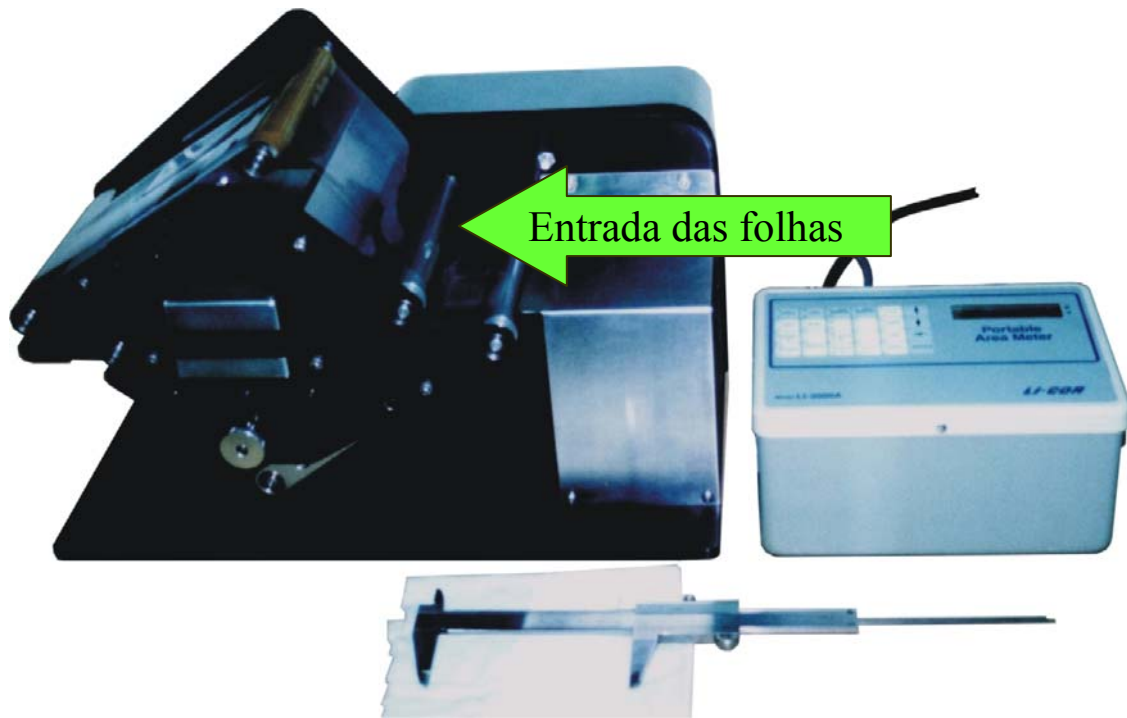
em que;

IAF = índice de área foliar em questão, estimado por meio de modelos de crescimento, adimensional;

$AF_t$  = área foliar total de uma planta média,  $m^2$ ;

$A = 1\ m^2$ .

A área foliar (AF) foi medida para cada folha individualmente com uso de um medidor de área foliar de mesa (LI-COR Inc., Lincoln), a área foliar total de cada planta ( $AF_t$ ) foi obtida da somatória das áreas das folhas a ela correspondentes (Figura 3.8).



**Figura 3.8. Medidor de área foliar (LI-COR) e paquímetro usado para a medição do comprimento e da largura foliar.**

Os parâmetros ( $r_c$ , e  $r_h$ ) da Equação 3.3 foram determinados experimentalmente por LYRA (2002) para os cultivares de alface a serem utilizados no presente estudo. O autor encontrou para  $r_{cr}$  os valores de 88 ( $\pm 1$ ), 103 ( $\pm 11$ ) e 105 ( $\pm 14$ )  $s\ m^{-1}$ , os quais estiveram associados aos valores de  $IAF_r$  de 2,40 ( $\pm 0,02$ ), 2,87 ( $\pm 0,06$ ) e 3,91 ( $\pm 0,49$ ) para os cultivares Grand Rapids, Great Lakes e Regina, respectivamente. Para estimativa do IAF foi utilizado o modelo de crescimento exponencial.

A resistência aerodinâmica,  $r_h$ , foi estimada considerando-se o regime de transferência de calor sensível predominante nas proximidades das plantas. Para velocidades do vento acima de  $0,1\ ms^{-1}$  (condição normalmente observadas em casas-de-vegetação não climatizadas com telas laterais), a resistência ao processo convectivo de transferência de calor sensível pode ser obtida segundo CHAPMAN (1984) e INCROPERA e DE WITT (1996) por:

$$r_h = \frac{\{L/(\alpha u_\infty)\}^{1/2} Pr^{1/6}}{1,328\ IAF} \quad (3.5)$$

em que:

$r_h$  = resistência ao processo convectivo de transferência de calor sensível,  $s\ m^{-1}$ ;

$L$  = comprimento característico da folha, m;

$\alpha$  = difusividade térmica, aproximadamente  $22,3 \times 10^{-6}\ m^2\ s^{-1}$ ;

$u_\infty$  = velocidade do vento dentro da casa-de-vegetação na altura do dossel,  $m\ s^{-1}$ ;

$Pr$  = número de Prandtl, aproximadamente 0,705, adimensional;

IAF = índice de área foliar, adimensional.

O comprimento característico da folha foi calculado pela média entre a largura máxima e o comprimento máximo da folha em questão, conforme segue:

$$L = \frac{L_c + L_l}{2} \quad (3.5)$$

em que:

$L$  = comprimento característico da folha, m;

$L_c$  = comprimento máximo da folha em questão, m;

$L_l$  = largura máxima da folha em questão, m.

### 3.12. Frequência de Aplicação de Solução Nutritiva

O estudo teórico objetiva a avaliação de diferentes estratégias de acionamento do conjunto moto-bomba responsáveis pela circulação da solução nutritiva em hidroponia. Para tanto, procurou-se primeiramente estudar e avaliar o método convencional temporizado. Posteriormente foi avaliada a possibilidade de aumento no intervalo entre acionamentos do sistema e a conseqüente redução no número de acionamentos diários, com base no estudo do balanço hídrico calculado pela estimativa da evapotranspiração e da dinâmica da capacidade de retenção de água no sistema radicular.

O balanço hídrico foi implementado com base na estimativa de evapotranspiração, após o período de drenagem, calculada pelo método de

Penman-Monteith, e no uso de 25, 50, 75 e 100% da água retida no sistema radicular. A taxa de evapotranspiração foi integrada em intervalos de 1 minuto a partir do término do período de drenagem até a totalização da depleção de água desejada.

Depois de computado o número de eventos de aplicação de água para atender às depleções de 25, 50, 75 e 100% do total retido, foram realizadas comparações entre a técnica convencional de circulação da solução por meio de temporizador e as estratégias de manejo propostas.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **4.1. Retenção de Água na Espuma Fenólica**

Nos primeiros dias após o transplântio, devido ao pequeno desenvolvimento das raízes externas, apenas a água retida na espuma fenólica contribuiu para o desenvolvimento da cultura. Esta água, retida nos poros da espuma fenólica pode ser considerada constante nos primeiros dias após o transplântio sendo igual a 6 gramas de solução retida por planta. No entanto, com o crescimento das raízes, a espuma fenólica sofre um processo de degradação, o qual é compensada pelo aumento na capacidade de retenção nas raízes externas.

Assim, até que a capacidade de retenção nas raízes externas se igualasse à capacidade de retenção na espuma, a capacidade de retenção total do sistema radicular (espuma fenólica com raízes) ficou praticamente constante e igual à capacidade de retenção inicial da espuma fenólica, conforme será descrito no item 4.3 deste trabalho.

### **4.2. Modelagem da Água Retida nas Raízes**

Para estimativa da capacidade de retenção de água na superfície das raízes externas à espuma fenólica foi utilizado o modelo expolinear, o qual foi ajustado em função da variável independente “graus-dia”, acumulado a partir do transplântio (GDac). A análise de regressão foi realizada com base na aplicação

de logaritmos neperianos aos modelos propostos, conforme sugerido por TEI et al. (1996) a fim de melhorar o ajuste dos modelos.

A equação ajustada para o modelo expolinear de retenção de água na superfície do sistema radicular externo à espuma fenólica é dada por:

$$\ln(\text{RET}_{\text{calc}}) = \ln(\text{Cm} / r) + \ln\{ \ln[ 1 + \exp(r (x - t_p)) ] \} \quad (4.1)$$

em que:

$\text{RET}_{\text{calc}}$  = capacidade de retenção modelada das raízes externas; g planta<sup>-1</sup>;

$x$  = instante em graus-dia acumulados ( $GD_{ac}$ ), °C;

$\text{Cm}$  = taxa máxima de crescimento absoluto, g de matéria seca m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>;

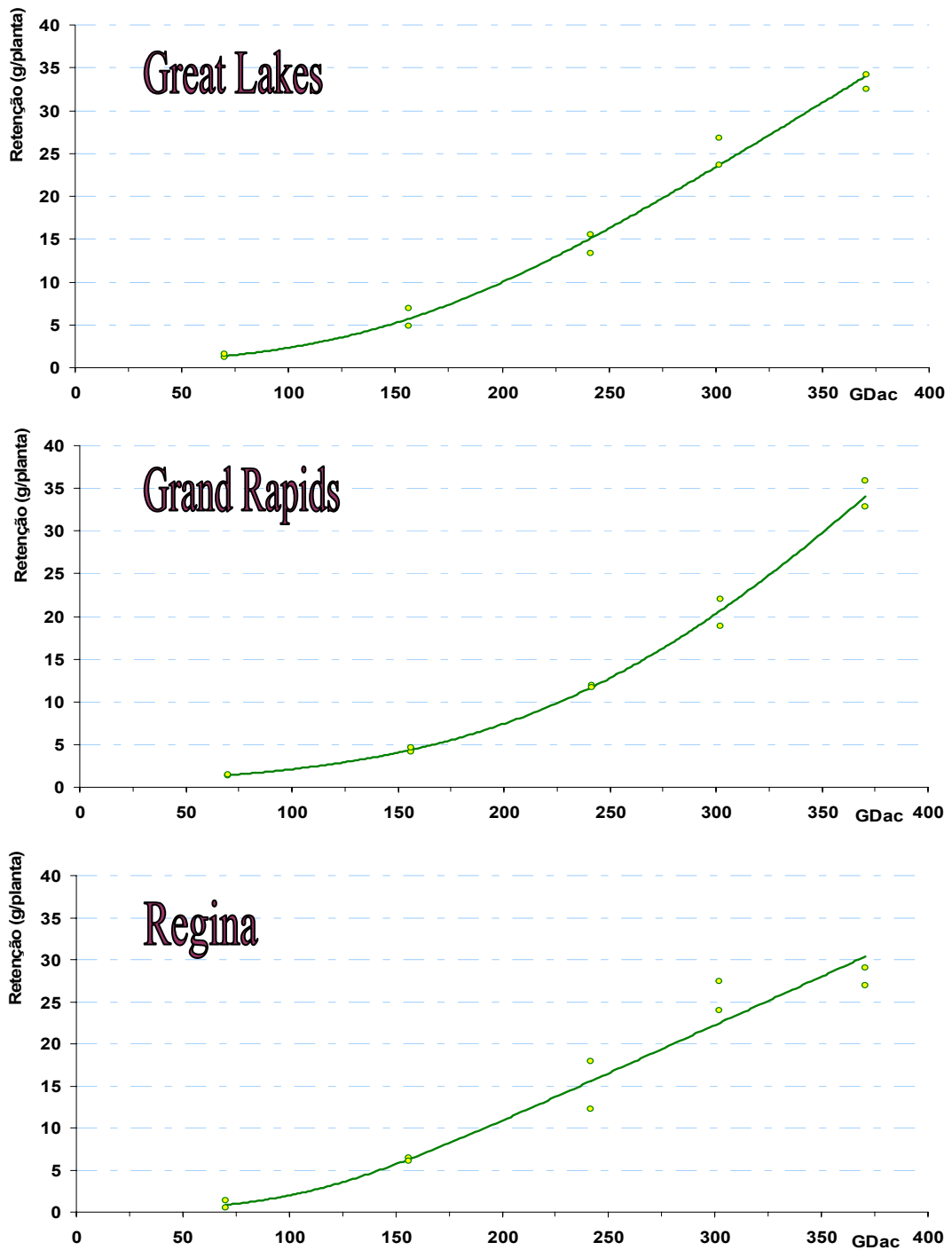
$r$  = taxa máxima de crescimento relativo, g g<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>;

$t_p$  = tempo perdido, ou tempo para que o sistema radicular chegue à sua taxa máxima de crescimento relativo, GD.

O quadro abaixo explicita os parâmetros ajustados para a Equação 4.1, da capacidade de retenção.

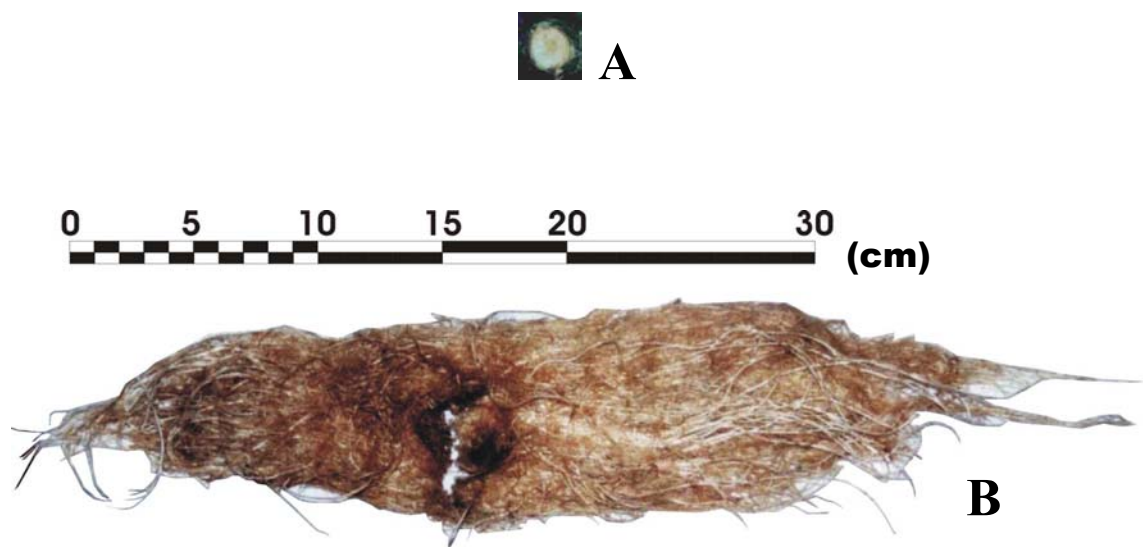
**Quadro 4.1. Parâmetros da equação de capacidade de retenção de solução nutritiva na superfície do sistema radicular.**

Cultivar	Cm (g.m <sup>-2</sup> .d <sup>-1</sup> )	r (g.g <sup>-1</sup> .d <sup>-1</sup> )	t <sub>p</sub> (GD)	R <sub>aj</sub> <sup>2</sup>
Great Lakes	0,1553 (+- 0,026)	0,0201 (+-0,0027)	151,84 (+-24,39)	0,988
Grand Rapids	0,2521 (+- 0,043)	0,0141 (+-0,0008)	256,81 (+-23,74)	0,997
Regina	0,1150 (+- 0,026)	0,0342 (+-0,0117)	106,75 (+-28,39)	0,958



**Figura 4.1.** Capacidade de retenção de água ( $\text{g planta}^{-1}$ ) na superfície das raízes externas à espuma fenólica para três cultivares de alface, como variável do estágio de crescimento (graus dia). Em Viçosa, Minas Gerais, entre 10 de maio e 7 de junho de 2002.

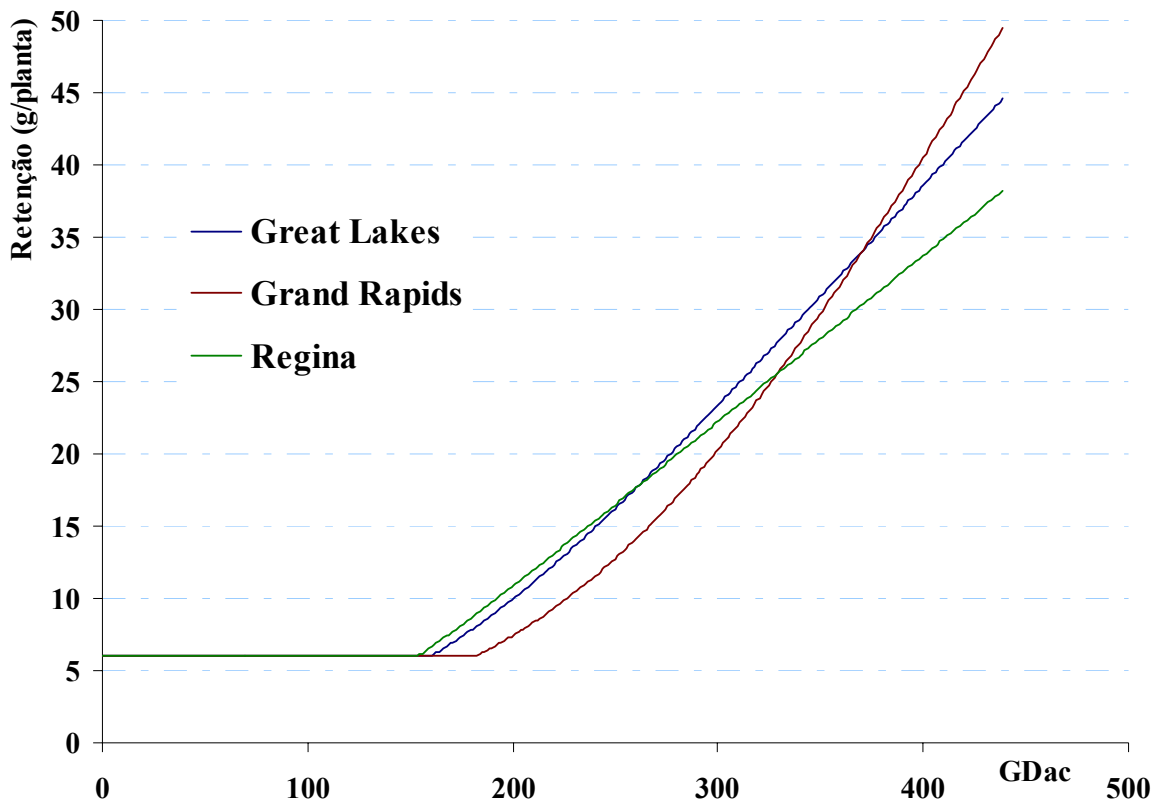
A análise da regressão expolinear demonstrou que o modelo foi capaz de simular com boa segurança a capacidade de retenção de solução nutritiva para todas as cultivares de alface no período estudado. Os valores obtidos para os coeficientes de determinação ajustados estiveram acima de 95,8%, indicando que seus parâmetros têm significado fisiológico coerente. No entanto, conforme pode ser observado, apesar de terem sido realizadas seis amostragens, apenas cinco primeiras foram consideradas na modelagem, esta decisão foi tomada com base no alto grau de entrelaçamento das raízes coletadas (Figura 4.2.) com as raízes das plantas vizinhas, que acarretou em grande perda de solução nutritiva no instante da coleta das amostras.



**Figura 4.2.** Aspecto à época da colheita na 6<sup>a</sup> amostragem (29 DAT): do caule e espuma fenólica (A), e das raízes externas (B).

### 4.3. Retenção Total de Água no Sistema Radicular

Agrupando-se a retenção de água na espuma fenólica à retenção de água na superfície das raízes externas à espuma (Figura 4.2), obteve-se como resultado, curvas nas quais a retenção apresenta-se constante e igual à retenção na espuma nos primeiros dias após o transplante. Isso ocorreu porque à medida que as raízes foram se desenvolvendo, a espuma decompôs-se e perdeu parte de sua capacidade de retenção, em contrapartida, as raízes externas desenvolveram-se superando a perda na capacidade de retenção por parte da espuma fenólica (Figura 4.3).



**Figura 4.3.** Capacidade de retenção de água no sistema radicular de três cultivares de alface em função do estágio de desenvolvimento (graus dia). Em Viçosa, Minas Gerais, entre 10 de maio e 7 de junho de 2002.

Para efeito da estimativa do momento dos acionamentos foi aplicada uma condicionante na equação usada nas simulações de acionamentos do sistema, de modo que, quando a capacidade de retenção calculada pelo modelo exponencial for menor ou igual à capacidade de retenção na espuma fenólica, a capacidade de retenção considerada pelo sistema será igual à capacidade de retenção na espuma fenólica. Assim, considerando-se a capacidade de retenção de água na espuma fenólica no início do cultivo após o transplântio igual a  $6,0 \text{ g planta}^{-1}$ , tem-se que:

$$\text{se } RET_{\text{calc}} \geq 6,0 \text{ g planta}^{-1} \quad \rightarrow \quad RET = RET_{\text{calc}};$$

$$\text{senão } RET = 6,0 \text{ g planta}^{-1}.$$

em que:

$RET$  = capacidade de retenção total do sistema radicular usada nas simulações,  $\text{g planta}^{-1}$ ;

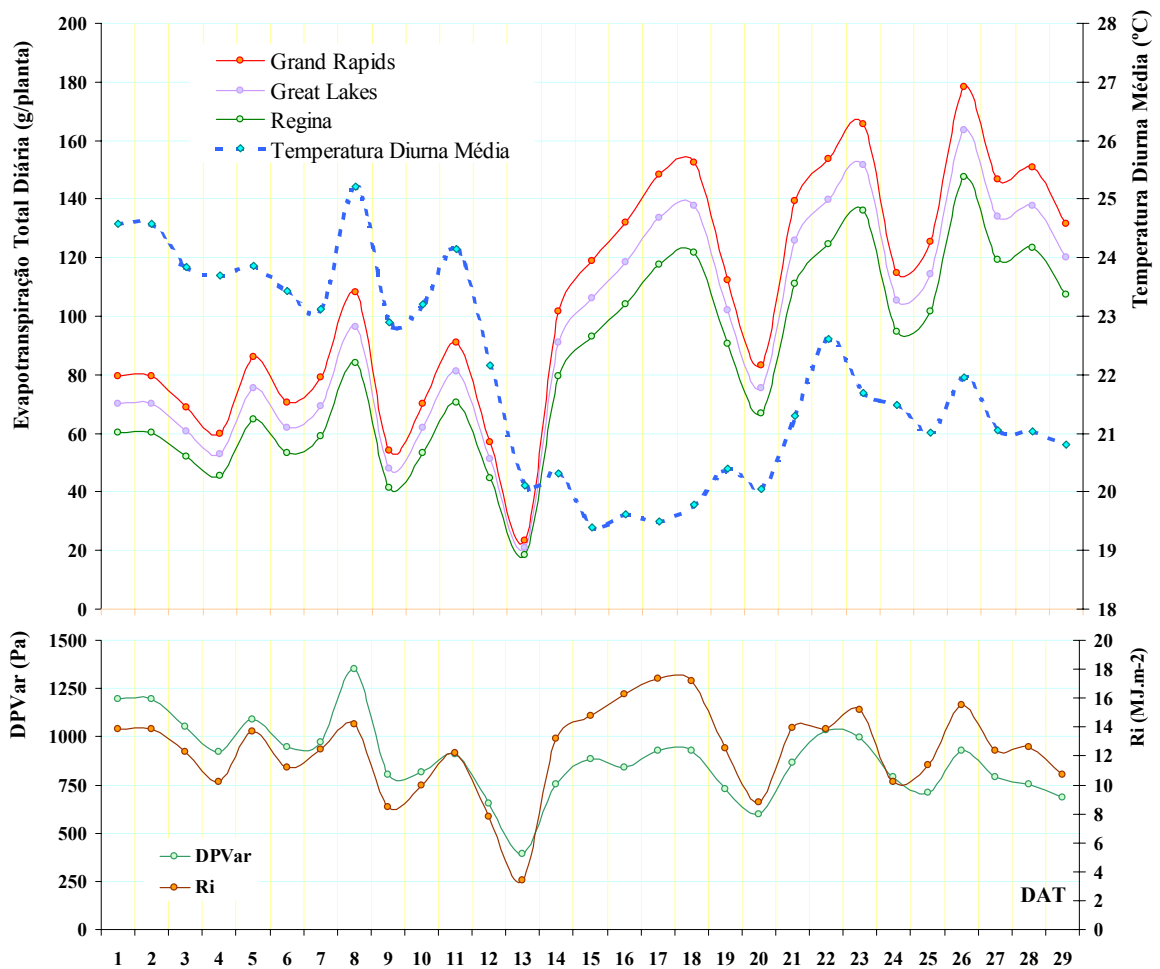
$RET_{\text{calc}}$  = capacidade de retenção modelada das raízes externas,  $\text{g planta}^{-1}$ ;

Analisando-se as curvas de crescimento das três cultivares nota-se que a variedade Grand Rapids obteve a fase exponencial mais longa no modelo, o que explica a maior capacidade de retenção ao final do ciclo, uma vez que a declividade da curva durante a fase linear foi maior quando comparada com as curvas das outras cultivares (Figura 4.3). Note no Quadro 4.1 que o tempo perdido ( $t_p$ ) encontrado para a variedade Grand Rapids ( $256,81 \text{ GD}_{\text{ac}}$ ) foi sensivelmente maior quando comparado às variedades Great Lakes e Regina, ( $151,84$  e  $106,75 \text{ GD}_{\text{ac}}$  respectivamente), isto explica a maior duração da fase exponencial na cultivar Grand Rapids.

#### 4.4. Estimativa da Evapotranspiração

No desenvolvimento deste trabalho a análise da evapotranspiração concentrou-se apenas no período diurno, uma vez que além deste ser o período de maior demanda evapotranspirativa, a equação de Penman-Monteith usada foi parametrizada apenas para períodos de insolação, sendo inconsistente para períodos noturnos. Assim, o estudo da demanda evapotranspirativa durante o período noturno é um importante trabalho a ser realizado no futuro, porém estudos realizados nesta área indicam que estes são pouco significativos ao longo do período de cultivo.

A Figura 4.4 apresenta os resultados obtidos na simulação da evapotranspiração diária total acumulada durante o período diurno.



**Figura 4.4. Evapotranspiração diurna total estimada para três cultivares de alface nas condições ambientais observadas após o transplante, em Viçosa, entre 10 de maio e 7 de junho de 2002.**

Dentre as cultivares estudadas a que apresentou maior demanda evapotranspirativa foi a cultivar Grand Rapids, seguida pela Great Lakes, sendo a cultivar Regina a de menor demanda evapotranspirativa (Figura 4.4).

Ainda pela Figura 4.4, pode-se observar tendência de aumento da evapotranspiração para as três cultivares estudadas, sendo esta atribuída ao aumento da área foliar e à redução da resistência da cultura à difusão do vapor d'água no modelo estudado. Esta tendência não pode ser atribuída a fatores ambientais, como se pode perceber pelas variáveis climáticas obtidas, uma vez que houve neste período diminuição na radiação incidente ( $R_i$ ) e no déficit de pressão de vapor do ar (DPVar).

É importante notar que trabalhos recentes estudando os efeitos de diferentes intervalos entre irrigações em hidroponia (PILAU et al., 2002), sugerem que ao se aumentar o tempo entre os acionamentos dos sistemas hidropônicos a resistência estomática tende a aumentar, acarretando assim diminuição da transpiração nestes períodos. Os resultados aqui expressos para a evapotranspiração não levam em conta a redução da evapotranspiração devido ao efeito mencionado, visto que esta redução é difícil de ser estimada em tempo real, no entanto, isto não prejudicaria a cultura, visto que a demanda hídrica desta será no máximo igual àquela estimada pelo modelo.

#### **4.5. Acionamentos do Conjunto Moto-Bomba**

Foram avaliadas quatro estratégias de manejo no acionamento do sistema em função da porcentagem do uso da água retida no sistema radicular, para as depleções de 25, 50, 75 e 100% da água retida.

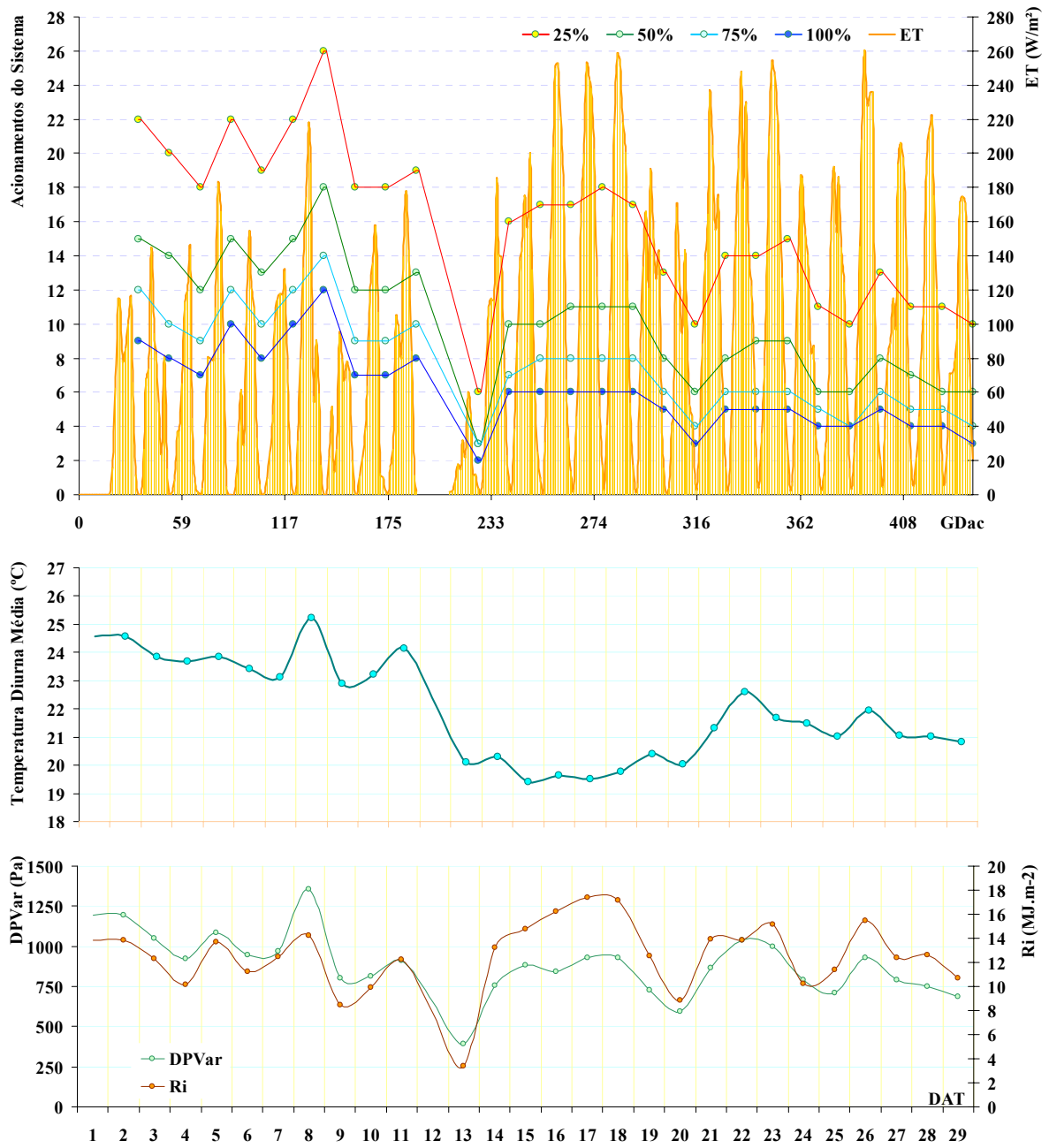
Nas Figuras 4,5, 4,6 e 4,7, são apresentados os resultados obtidos nas simulações para as cultivares Great Lakes, Grand Rapids e Regina respectivamente. Nelas fica clara a relevância da estimativa da capacidade de retenção de solução nutritiva ao longo do desenvolvimento da cultura em sistemas NFT.

É notável a tendência decrescente do número de acionamentos diários do fluxo de nutrientes. Em contrapartida, a evapotranspiração estimada aumentou sensivelmente. Seria esperado efeito inverso, não fosse a ampliação expressiva na capacidade de retenção de solução ao longo do cultivo. Com base nestas observações, é possível afirmar que, nos primeiros dias após o transplante a frequência de aplicação da irrigação em sistemas NFT geralmente deve ser maior do que no fim, ainda que a evapotranspiração seja crescente. Devido a isto, a frequência apropriada de aplicação de nutrientes em sistemas NFT apresentou tendência decrescente ao longo do período de cultivo.

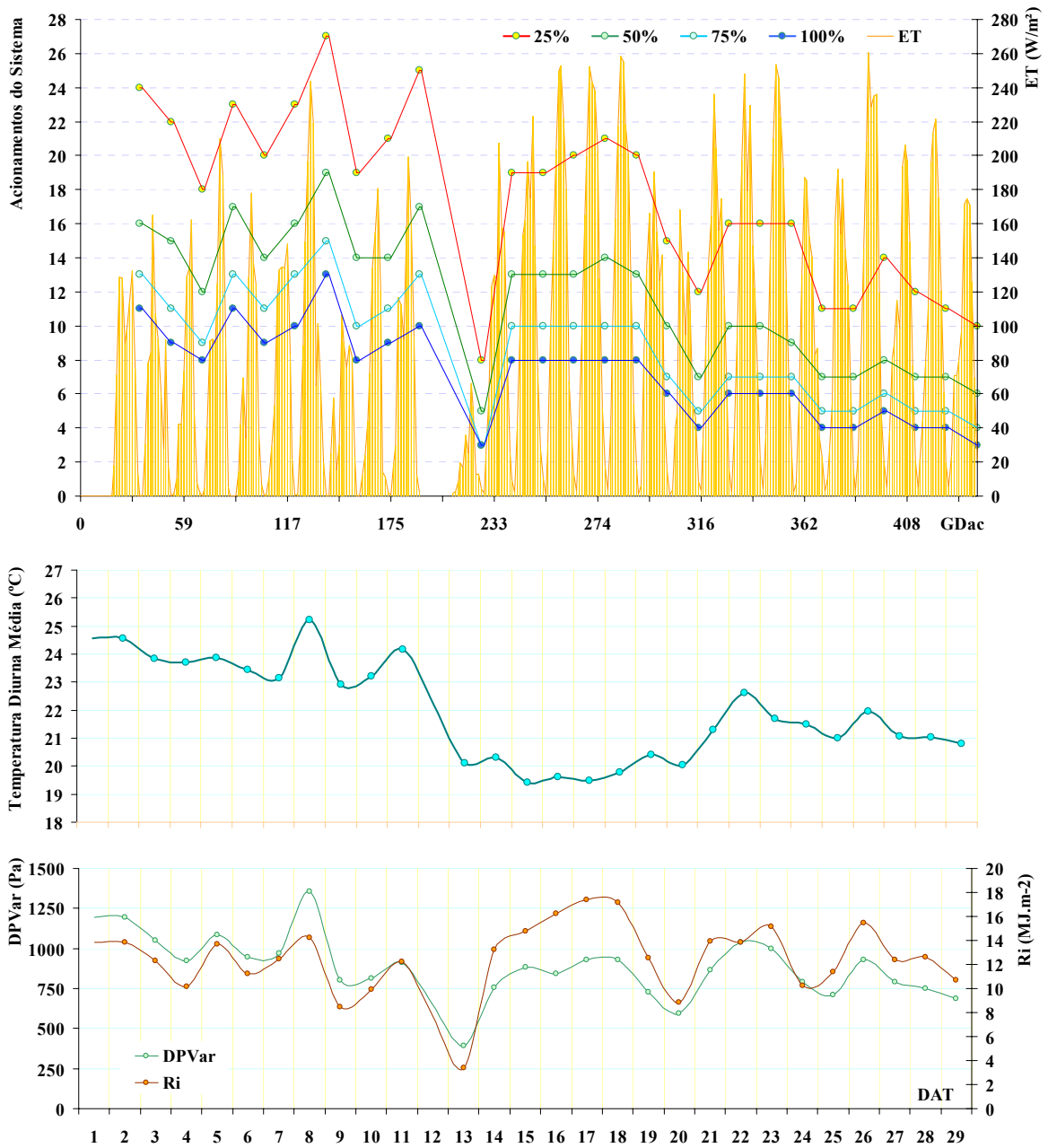
No entanto, é preciso lembrar que o estudo aqui apresentado é baseado em simulações e estimativas, sendo necessários testes no sistema a campo a fim de avaliar-se o desenvolvimento do sistema radicular quando este estiver sujeito a diferentes condições de fluxo de nutrientes, apesar disto, há motivos para acreditar que com o sistema operando, o desenvolvimento radicular pode inclusive ser maior que o modelado, em virtude de mecanismos fisiológicos de ajuste da planta à condição de frequência reduzida de aplicação de nutrientes.

As interações das planta com seu meio, em especial no que diz respeito ao seu desenvolvimento são importantes fatores a serem mais bem compreendidos. Neste sentido, a modelagem do crescimento de raízes e a relação entre o crescimento radicular e o aumento do índice de área foliar sob condições particulares são ferramentas imprescindíveis na aplicação do sistema proposto, devendo ser consideradas.

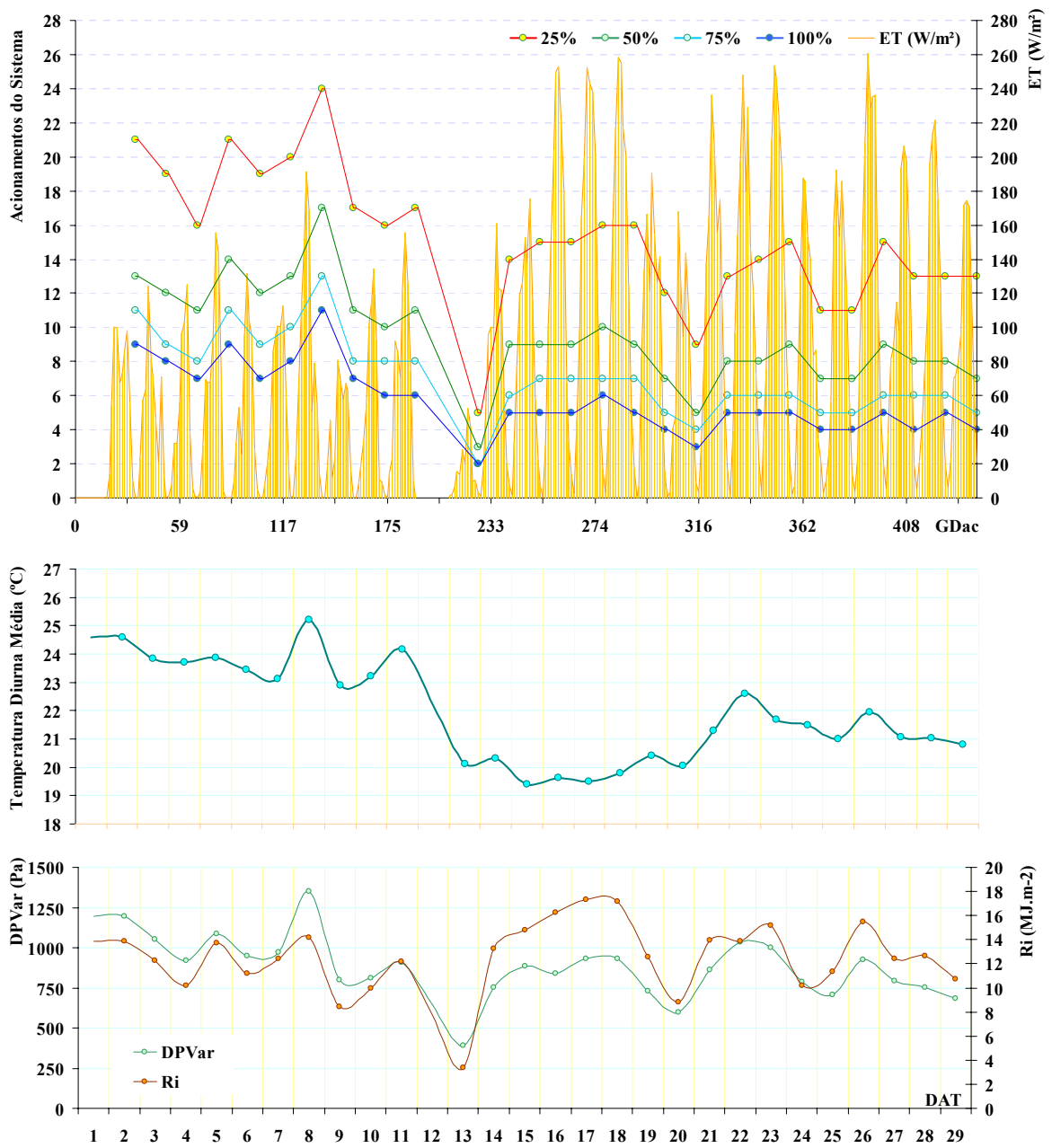
É importante lembrar ainda, que devido à redução no número de acionamentos do sistema proposto em relação ao sistema temporizado, a solução nutritiva sob as novas condições teria maior tendência de anaerobiose, por outro lado, a solução retida no sistema radicular será mais bem aproveitada pelas plantas, expondo mais as raízes ao ar e facilitando a oxigenação destas.



**Figura 4.5. Regime diário de acionamentos durante o período estudado para a cultivar Great Lakes.**

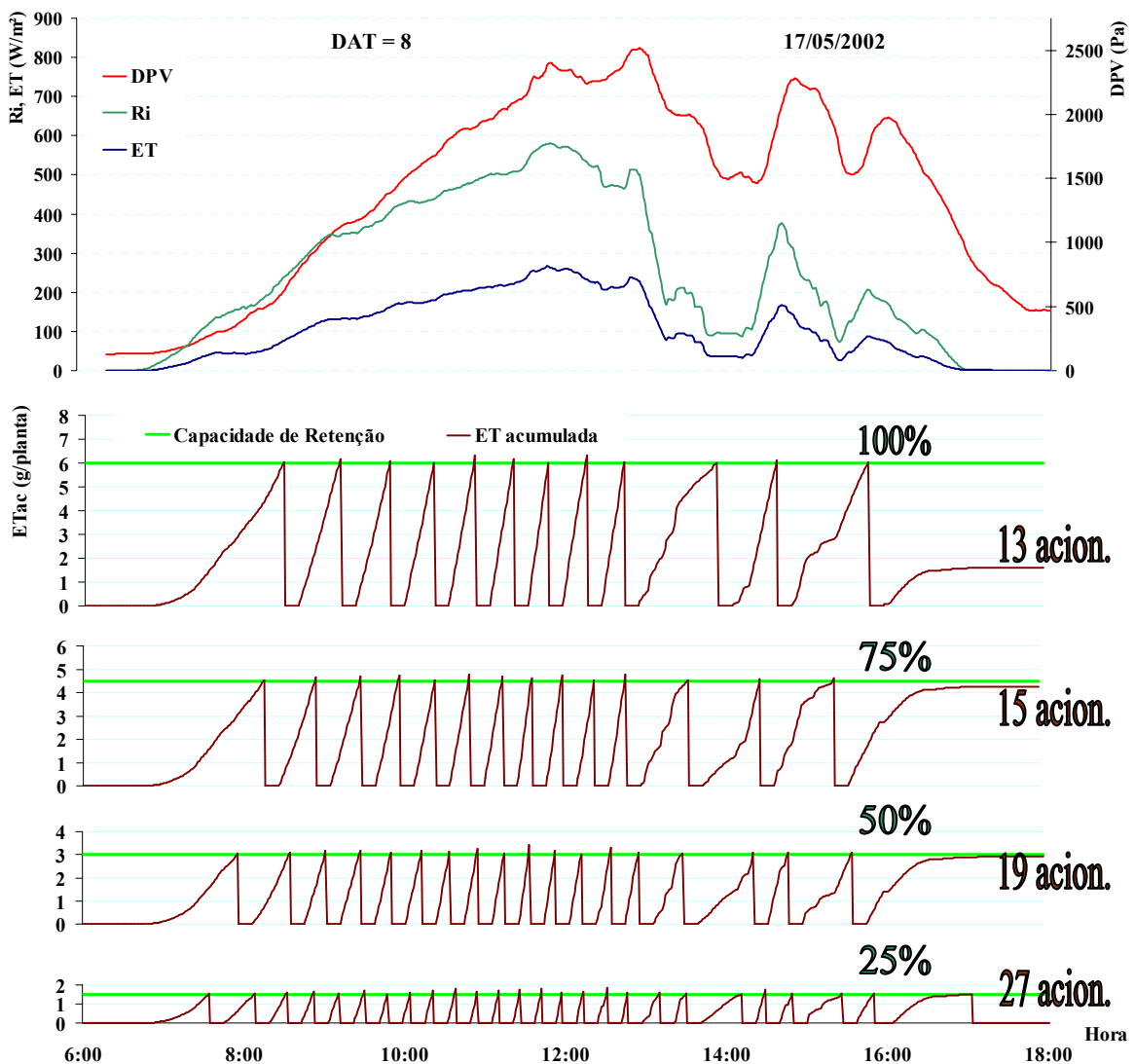


**Figura 4.6. Regime diário de acionamentos durante o período estudado para a cultivar Grand Rapids.**



**Figura 4.7. Regime diário de acionamentos durante o período estudado para a cultivar Regina.**

Na Figura 4.8, é apresentada uma comparação entre o regime de acionamentos para cada uma das depleções propostas (25, 50, 75 e 100%) para a variedade Grand Rapids no caso particular do oitavo dia após o transplante (8<sup>o</sup> DAT), nesta figura pode-se notar variação significativa com relação ao número de acionamentos entre as depleções estudadas, principalmente entre as depleções de 25 e 50%, quando o número de acionamentos passa de 27 para 19 respectivamente.



**Figura 4.8. Comparação entre estratégias de acionamentos do sistema aos 8 DAT para a cultivar Grand Rapids (considerando o consumo de 25, 50, 75 e 100% da capacidade de retenção).**

Ainda pela Figura 4.8 é possível notar a importância da estimativa em tempo real da demanda hídrica da cultura, observe-se que aproximadamente às 12:40 horas ocorreu maior presença de nebulosidade, declinando drasticamente a radiação incidente ( $R_i$ ) acarretando em maior intervalo entre as irrigações subsequentes. Passada a nebulosidade que ocasionou o distúrbio, a demanda evapotranspirativa voltou a níveis próximos aos anteriores, reduzindo novamente o intervalo entre as irrigações.

Comparando os resultados obtidos no 8º DAT com os do 9º DAT (Figura 4.9), pode-se observar que devido à presença de maior nebulosidade ocasionada pela entrada de uma frente fria na região do experimento no dia 18 de maio, o modelo respondeu com uma redução significativa no número de acionamentos passando de 13 acionamentos no 8º dia para apenas 8 acionamentos no 9º DAT, ainda que nesta idade do cultivo o sistema radicular apresentasse pequeno desenvolvimento, não apresentando variação na capacidade de retenção de um dia para o outro.

Semelhantemente ao efeito observado entre os dias 8 e 9 após o transplante, entre o 13º e 14º DAT (Figura 4.10), devido à estiagem ocorrida após a passagem da frente fria, a radiação incidente ( $R_i$ ) e o déficit de pressão de vapor (DPV) apresentaram elevação em sua intensidade, aumentando desta maneira a evapotranspiração da cultura, juntando-se a isto o aumento na capacidade de retenção, que passou de  $10,2 \text{ g.planta}^{-1}$  no 13º DAT para  $11,8 \text{ g.planta}^{-1}$  no 14º DAT, observou-se uma grande variação no número de acionamentos entre estes dias, passando de apenas 3 acionamentos no 13º DAT para 8 acionamentos no 14º DAT.

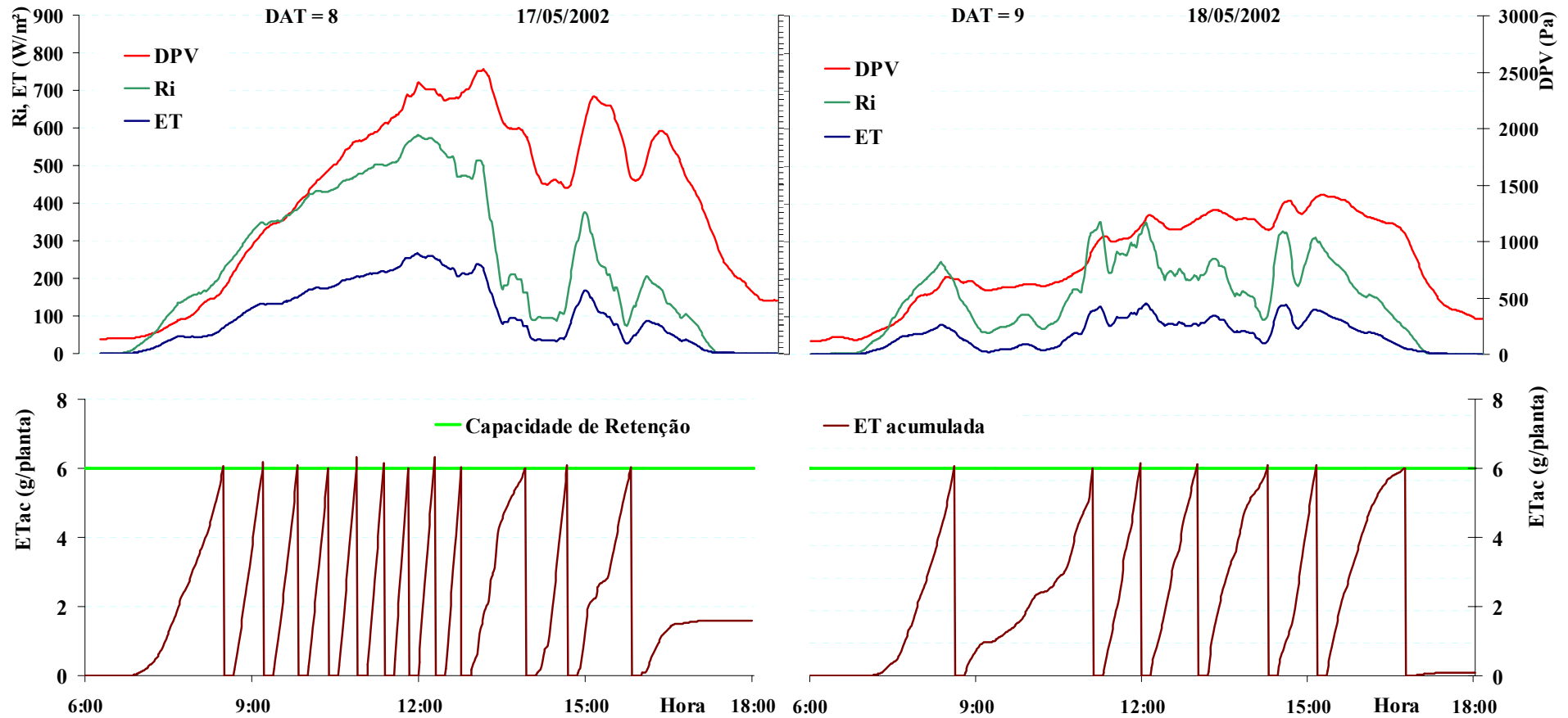


Figura 4.9. Variáveis ambientais instantâneas e regime de acionamentos do sistema nos dias 8 e 9 após o transplante, para a cultivar Grand Rapids, considerando o consumo de toda a água retida.

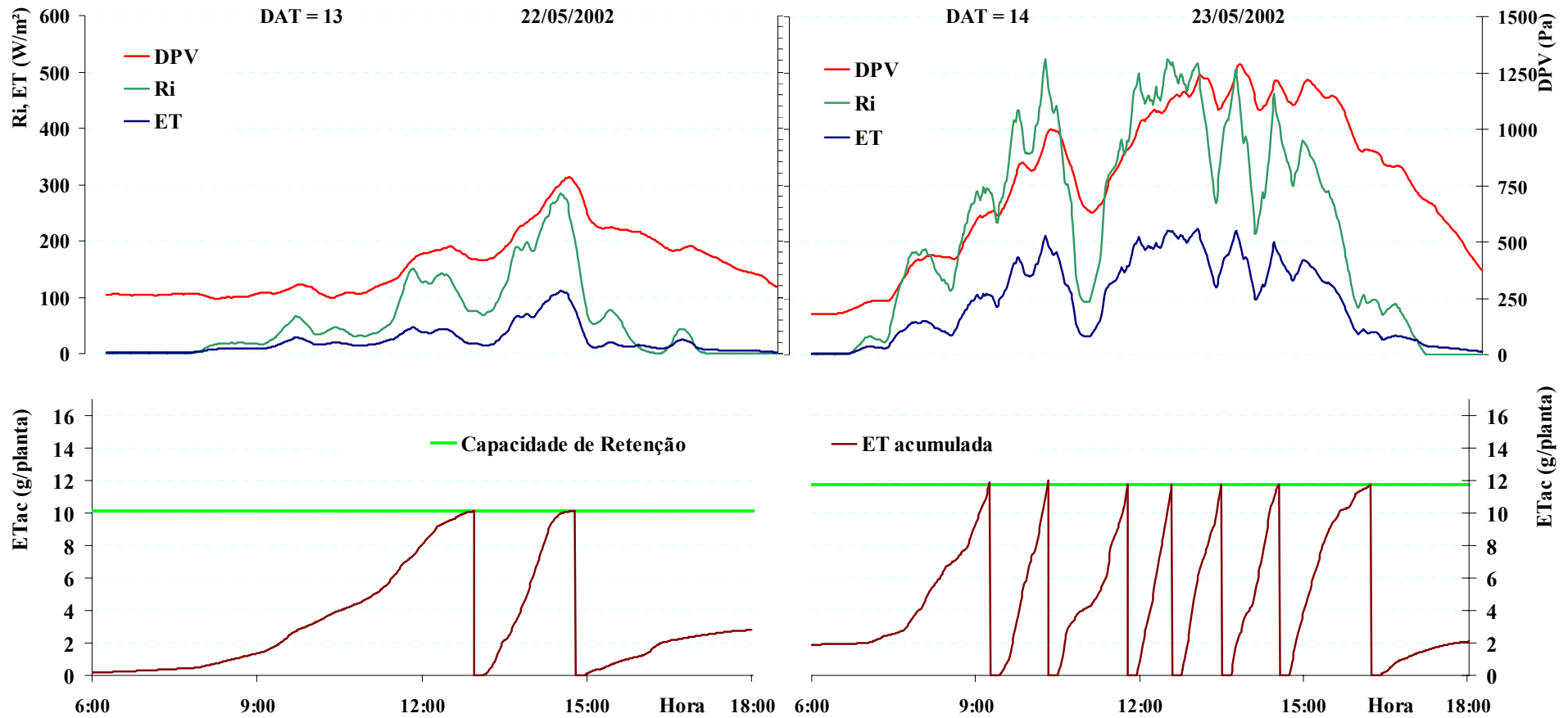


Figura 4.10. Variáveis ambientais instantâneas e regime de acionamentos do sistema nos dias 8 e 13 após o transplântio, para a cultivar Grand Rapids, considerando o consumo de toda a água retida.

Em uma análise geral do regime de acionamentos para todo o período estudado, observa-se que o sistema operou com maior intensidade no 8º DAT, justamente o dia anterior à chegada da frente fria, em contrapartida, o dia de menor funcionamento do sistema coincidiu com o último dia da presença da frente na região, ocorrendo no 13º DAT (Figura 4.11). Além do clima, outro importante fator contribuinte deste efeito é a capacidade de retenção de água que apresentou grande incremento entre estes dias, passando de 6 g planta<sup>-1</sup> no 8º DAT para mais de 10 g planta<sup>-1</sup> no 13º DAT.

O efeito do aumento na capacidade de retenção de água no sistema radicular é melhor observado quando isolado do clima. Na Figura 4.12, é apresentada a resposta do sistema nos dias 11 e 22 após o transplantio, nestes dias as integrais da radiação solar incidente estiveram muito próximas (em torno de 13 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>) enquanto que a capacidade de retenção passou de 6 g planta<sup>-1</sup> para 28 g planta<sup>-1</sup>. Nestes dias (11 e 22 DAT) foram observados 10 e 6 acionamentos respectivamente, ainda que a evapotranspiração tenha aumentado muito entre estes dias, evidenciando a importância da modelagem da capacidade de retenção de solução no sistema radicular em sistemas hidropônicos NFT sem uso de substrato.

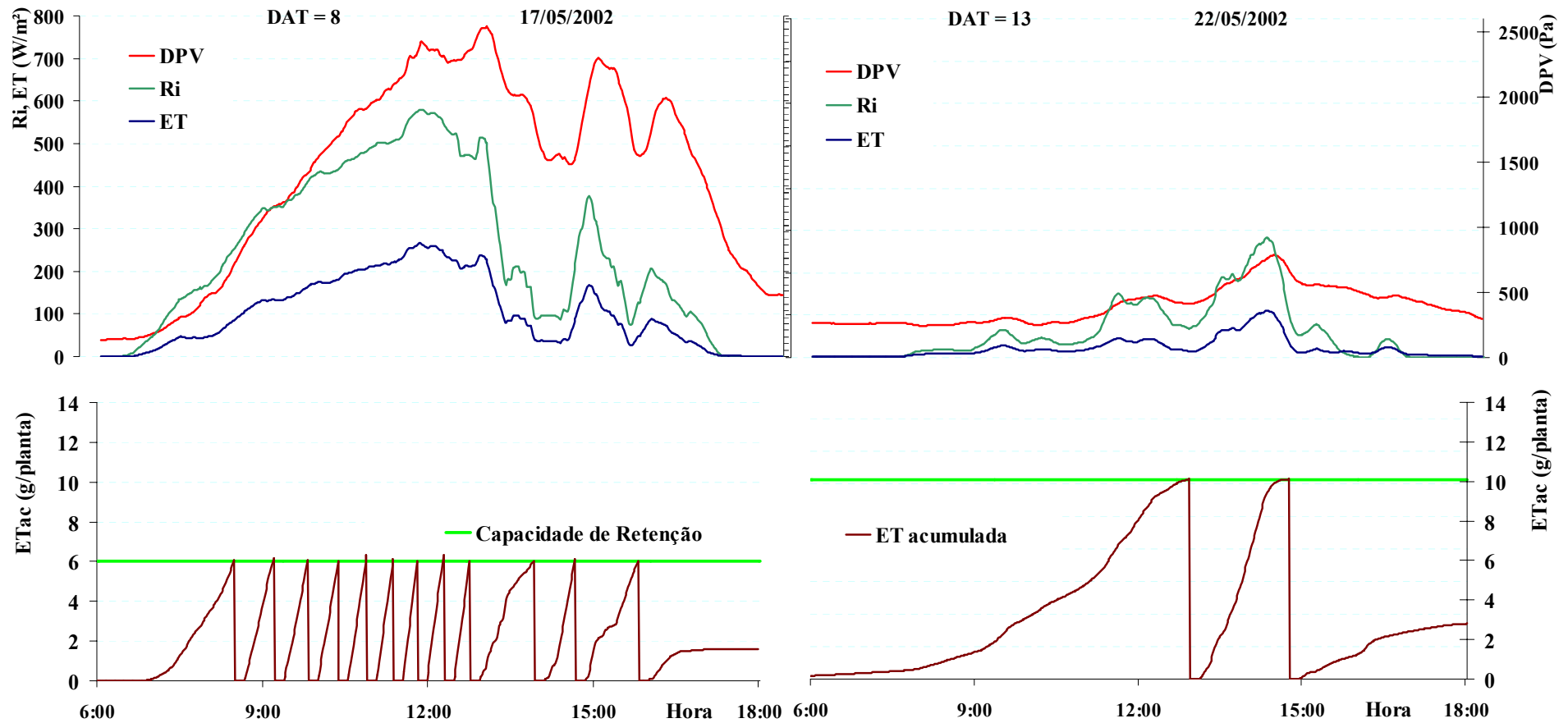


Figura 4.11. Variáveis ambientais instantâneas e regime de acionamentos do sistema nos dias 13 e 14 após o transplante, para a cultivar Grand Rapids, considerando o consumo de toda a água retida.

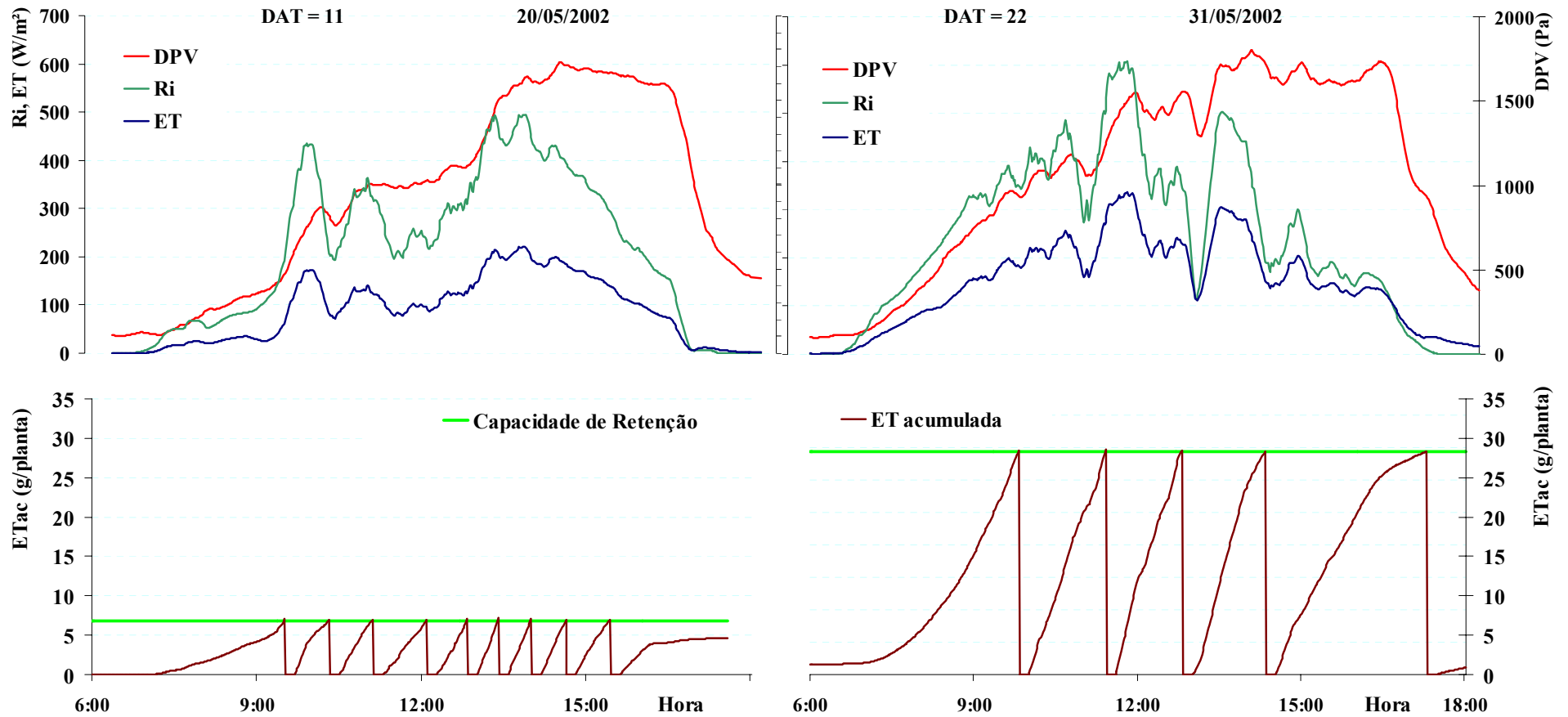


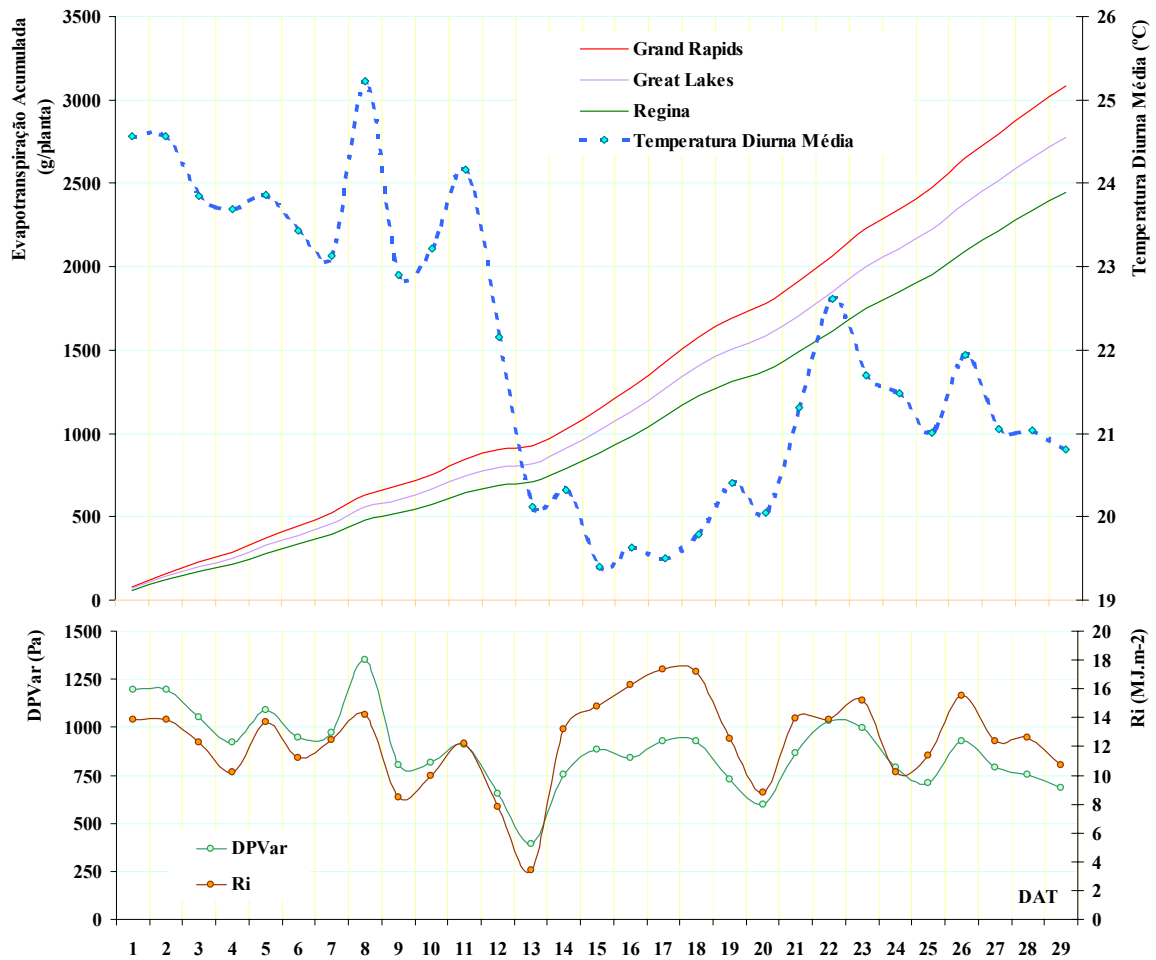
Figura 4.12. Variáveis ambientais instantâneas e regime de acionamentos do sistema nos dias 11 e 22 após o transplante, para a cultivar Grand Rapids, considerando o consumo de toda a água retida.

#### 4.6. Evapotranspiração Total Estimada da Cultura

Comparativamente com sistemas a campo o cultivo de hortaliças em sistema hidropônico apresenta economia notável de uso de água, e apesar de não ter sido o objetivo principal deste trabalho, foi possível estimar o consumo total de água evapotranspirada ao longo do cultivo (Figura 4.13).

A cultivar que apresentou maior evapotranspiração acumulada foi a cultivar Grand Rapids (3092 g planta<sup>-1</sup>), seguida pelas cultivares Great Lakes e Regina, com 2775 e 2450 g planta<sup>-1</sup>, respectivamente. Se somarmos a estes valores o peso fresco médio das alfaces colhidas (350 g), e considerando que deste peso, cerca de 90% é referente à água, podemos dizer que o consumo para o cultivo desde o transplântio ficou abaixo de 3500 g planta<sup>-1</sup>.

Em experimento com alface em ambiente protegido, plantadas em solo, utilizando sistema de irrigação por gotejamento manejado com Tanque Classe A, ANDRADE JÚNIOR e KLAR (1997), constataram que para a produtividade máxima nas condições edafoclimáticas de seu experimento seria necessária a aplicação de uma lâmina d'água equivalente a de 10,06 L de água por planta. Mesmo em sistema de gotejamento, um dos mais eficientes em termos de consumo de água atualmente empregados, os valores encontrados por estes autores representam cerca de um terço do consumo estimado neste trabalho, isto significa dizer que em sistema hidropônico fechado, com a mesma disponibilidade de água seria possível triplicar a área de cultivo.



**Figura 4.13. Evapotranspiração total estimada ao longo do ciclo da cultura (do transplântio à colheita), e dados climáticos diários observados.**

#### 4.7. Consumo de Energia do Sistema Proposto

Comparando-se o consumo de energia elétrica em sistemas temporizados com a estimativa do consumo durante a simulação do sistema proposto, observa-se que este apresenta a possibilidade de considerável economia energética, mesmo quando considerado apenas 50% do uso da água retida no sistema radicular. O Quadro 4.2 apresenta a estimativa do consumo comparado entre os dois sistemas.

O regime de acionamentos usado nas comparações foi o sistema utilizado durante o experimento, ou seja, 10 minutos de acionamento por 20 minutos de drenagem (Quadro 4.2).

**Quadro 4.2. Regime de funcionamento do sistema temporizado convencional (“Timer”) com intervalos de 20 minutos entre acionamentos.**

Tempo de Cada Acionamento	10 minutos
Dias do Transplântio à Colheita	29 dias
Nº Diário de Acionamentos do Sistema Temporizado	25 acionamentos
Nº Total de Acionamentos do Sistema Temporizado	725 acionamentos
Tempo Total de Funcionamento do Sistema Temporizado	120,8 horas

Pode-se dizer, com base no estudo da simulação apresentada, que, quando considerado o uso de 75% da capacidade de retenção de solução nutritiva, os sistemas baseados em balanço hídrico possibilitam a economia de pelo menos 64,7% da energia consumida em sistemas temporizados convencionais. Este fato torna os sistemas baseados em balanço hídrico uma promissora técnica a ser desenvolvida para sistemas hidropônicos.

**Quadro 4.3. Redução no consumo do sistema proposto comparado ao sistema temporizado para as três cultivares estudadas. Com ciclo da cultura de 29 dias.**

Uso da Água Retida	Nº Total de Acionamentos do Sistema	Tempo Total de Funcionamento (horas)	Redução
<b>Grand Rapids</b>			
25%	514	85,7	29,1%
50%	340	56,7	53,1%
75%	256	42,7	64,7%
100%	210	35,0	71,0%
<b>Great Lakes</b>			
25%	477	79,5	34,2%
50%	324	54,0	55,3%
75%	256	42,7	64,7%
100%	215	35,8	70,3%
<b>Regina</b>			
25%	460	76,7	36,6%
50%	306	51,0	57,8%
75%	241	40,2	66,8%
100%	204	34,0	71,9%

## 5. CONCLUSÕES

As cultivares que apresentaram maior capacidade de retenção de solução nutritiva também foram as que tiveram a maior demanda evapotranspirométrica, indicando uma possível auto-regulação por parte da cultura.

O sistema testado na simulação apresentou bons resultados e demonstrou-se eficiente tanto em questão de conservação da energia elétrica quanto na redução do desgaste dos equipamentos empregados.

É possível aumentar consideravelmente o intervalo entre irrigações usualmente empregados em sistemas hidropônicos NFT. Sendo que, para sistemas temporizados em cultivos de inverno o intervalo entre acionamentos do sistema pode variar de 20 a 30 minutos até o décimo dia de cultivo, a partir de então o intervalo entre acionamentos pode ser de até 40 minutos.

No estudo da simulação aplicada neste trabalho em função das condições ambientais para ela consideradas, destaca-se a economia de energia do sistema proposto, em torno de 65 % quando comparada à energia utilizada em sistemas convencionais temporizados.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERONI, R.B. **Hidroponia**: Como instalar e manejar o plantio de hortaliças dispensando o uso do solo. São Paulo: Nobel, 1998. 102p.

ALLEN, R.G.; SMITH, M.; PEREIRA, L.S.; PRUITT, W.O. Proposed revision to the FAO procedure for estimating crop water requirements. **Acta Horticulturae**. v.449, 1997, p. 17-33.

ANDRADE JÚNIOR, A.S.; KLAR, A.E. Manejo da Irrigação da Cultura da Alface (*Lactuca sativa* L.) Através do Tanque Classe A. **Sci. Agric.** Piracicaba. 54p. 31-38. 1997.

BENOIT, F. **Practical Guide for Simple Culture Techniques**. Sint-Katelijne-Waver: European Vegetable R & D Centre. Belgium, 1992. 72p.

BRISSON, N.; GARY, C.; JUSTES, E.; ROCHE, R.; MARY, B.; RIPOCHE, D.; ZIMMER, D.; SIERRA, J.; BERTUZZI, P.; BURGER, P.; BUSSIÈRE, F.; CABIDOCHÉ, Y.M.; CELLIER, P.; DEBAEKE, P.; GAUDILLÈRE, J.P.; HENAULT, C.; MARAUX, F.; SEGUIN, B.; SINOQUET, H. An overview of the crop model STICS. **European Journal of Agronomy**. v. 18. p. 309-332. 2003.

- BUXTON, J.W.; JIA, W. A Controlled Water Table Irrigation System for Hydroponic Lettuce Production. **Acta Horticulturae**. 481: 281-287. 1999.
- CHAPMAN, A. J. **Heat Transfer**. 4 ed. New York: Macmillan Publishing Company, 1984. 608p.
- DRZAL, M.S.; FONTENO, W.C.; CASSEL, D.K. Pore Fraction Analysis: A New Tool for Substrate Testing, **Acta Horticulturae**. 481: 43-54. 1999.
- FAQUIN, V.; FURLANI, P.R. Cultivo de Hortaliças de Folhas em Hidroponia em Ambiente Protegido. In: Cultivo Protegido de Hortaliças em Solo e Hidroponia. **Informe Agropecuário**, v.20 (200/201), p. 99-104. Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, 1999.
- FERNANDES, A.A.; MARTINEZ, H.E.P.; PEREIRA, P.R.G.; FONSECA, M.C.M. Produtividade, acúmulo de nitrato e estado nutricional de cultivares de alface, em hidroponia, em função de fontes de nutrientes. **Horticultura Brasileira**. Brasília, v. 20, n. 2, p. 195-200, junho 2002.
- FINGER, F.L.; VIEIRA, G. Controle da perda pós-colheita de água em produtos hortícolas. Caderno Didático 19 – UFV. Editora UFV. Viçosa, Minas Gerais. 29p. 2002.
- FOLEGATTI, M.V. **Fertirrigação: citrus, flores e hortaliças**. Ed. Agropecuária. Guaíba, RS. 460p. 1999.
- FURLANI, P.R. **Instruções para o cultivo de hortaliças de folhas pela técnica de Hidroponia – NFT**. Boletim Técnico - IAC 168. Campinas. 30p. 1998.

- FURLANI, P.R.; SILVEIRA L.C.P.; BOLONHEZI, D.; FAQUIN, V. Estruturas para o Cultivo Hidropônico. In: Cultivo Protegido de Hortaliças em Solo e Hidroponia. **Informe Agropecuário**, v.20 (200/201), p. 72-80. Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, 1999.
- GRAAF, R.; ENDE, J. Transpiration and evapotranspiration of the glasshouse crops. **Acta Horticulturae**. v.119, p. 147-158, 1981.
- HELLGREN, O.; INGESTAD, T. A comparison between methods used to control nutrient supply. **J. Exp. Bot.** v.47: 1996. p. 117-122.
- HOOGENBOOM, G. Modeling Root Growth and Impact on Plant Development. **Acta Hort.** v.507: 1999. p. 241-251.
- INCROPERA, F.P.; DE WITT, D.P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 4. ed. New York: John Wiley & Sons, NY, 1996.
- INGESTAD, T.; LUND, A. Nitrogen stress in birch seedlings: I Growth technique and growth. *Physiol. Plant.* v.45: 1979. p. 137-148.
- JONES, H.G. **Plants and Microclimate: A quantitative approach to environmental plant physiology.** 2<sup>a</sup>ed. Cambridge University Press, 1992, 428p.
- JONES, H.G.; TARDIEU, F. Modeling Water Relations of Horticultural Crops: A Review. **Scientia Horticulturae**. v.74: 1998. p.21-46.
- LYRA, G.B. Estimativa da evapotranspiração e análise de crescimento para alface (*Lactuca sativa* L.) cultivada em sistema hidropônico em condições de casa-de-vegetação. **Dissertação de Mestrado.** UFV, Viçosa. 2002. 91p.

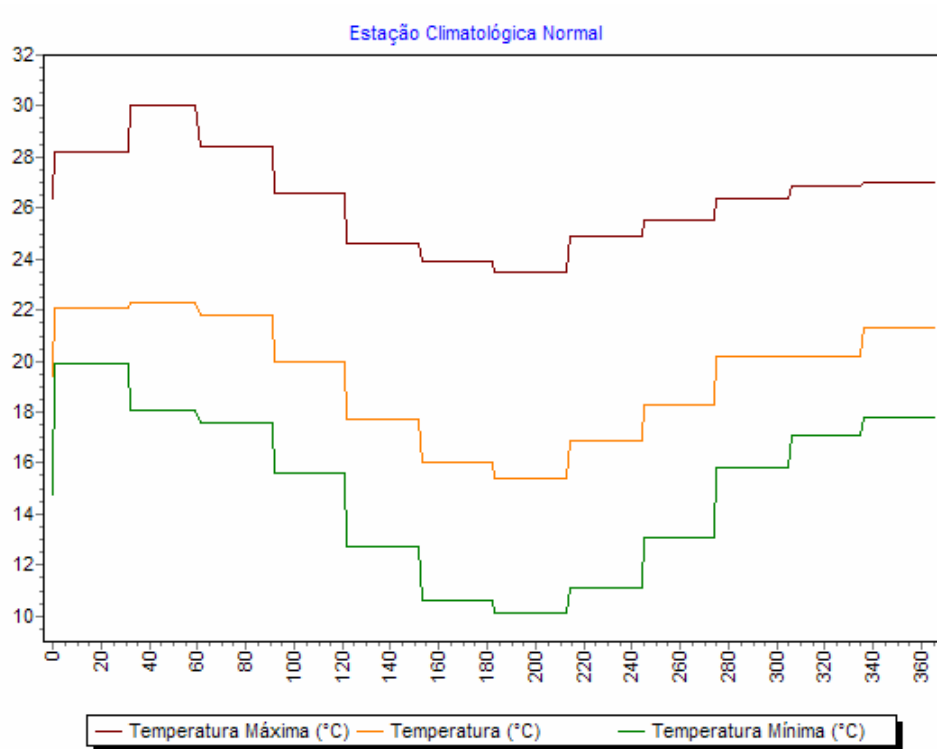
- MANKIN, K.R.; FYNN, R.P. Modelling individual nutrient uptake by plants: relating demand to microclimate, **Agric. Syst.** 50: 1996. p. 101-114.
- MARTINEZ, H.E.P. BARBOSA, J.G. O uso do cultivo hidropônico de plantas em pesquisa. **Caderno Didático** n.1. Editora UFV. 1999. 49p.
- MARTINEZ, H.E.P.; SILVA FILHO, J.B. **Introdução ao Cultivo Hidropônico de Plantas.** Viçosa, 1997. 52p.
- MARTINEZ, H.E.P. BARBOSA, J.G. Substratos para Hidroponia. In: Cultivo Protegido de Hortaliças em Solo e Hidroponia. **Informe Agropecuário**, v.20 (200/201), p. 81-89. Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais. Belo Horizonte, Minas Gerais, 1999.
- MARTINEZ, H.E.P. BARBOSA, J.G. O uso de substratos em cultivos hidropônicos. **Caderno Didático** n.42. Editora UFV. 2001. 49p.
- MATHIEU, J.; ALBRIGHT, L.; KURATA, K.; GOTO, E. A Discussion of Nutrient Uptake Equations in Hydroponic Culture and Their Use in Computer Simulation. **Acta Hort.** v.507: 1999. p. 205-213.
- MONTEITH, J.L. Evaporation and environment. **Symposia of the Society for Experimental Biology**, v.19, p. 205-234, 1965.
- MORAES, C.A.G.; FURLANI, P.R. Cultivo de hortaliças de frutos em hidroponia em ambiente protegido. **Informe Agropecuário**, v.20 (200/201), p. 105-113. Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais. Belo Horizonte, Minas Gerais, 1999.
- PEREIRA, P.R.G.; MARTINEZ, H.E.P. Produção de Mudanças para o Cultivo de Hortaliças em Solo e Hidroponia. In: Cultivo Protegido de Hortaliças em

- Solo e Hidroponia. **Informe Agropecuário**, v.20 (200/201), p. 24-31. Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais. Belo Horizonte, Minas Gerais, 1999.
- PILAU, F.G.; MEDEIROS, S.L.P.; MANFRON, P.A.; BIANCHI, C.; CARON, B.O.; BONNECARRÈRE, R. Influência do intervalo entre irrigações na produção e nas variáveis fisiológicas da alface hidropônica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 10, n.2, p. 237-244, 2002.
- POTAFOS. **Ecofisiologia da produção agrícola**. Editado por P.R.C. Castro, S.O. Ferreira e T. Yamada. Piracicaba – Associação Brasileira para Pesquisa do Potassa e do Fósforo, 1987. 249p.
- RESH, H.M. **Hydroponic Food Production: A Definitive Guidebook for the Advancer Home Gardener and the Commercial Hydroponic Grower**. 6ª edição, Santa Barbara, Califórnia: Woodbridge Press, 2001. 567p.
- SANDERS, D.C. Lettuce Production: Disponível em: <http://www.ces.ncsu.edu/depts/hort/hil/hil-11.html>. Consultado em maio de 2003.
- SCAIFE, A.; COX, E.F.; MORRIS, G.E.L. The relationship between shoot weight, plant density and time during the propagation of four vegetable species. **Annals of Botany**, v.59, p.325-334, 1987.
- SGANZERLA, E. **Nova Agricultura: A Fascinante Arte de Cultivar com os Plásticos**. 6. ed. Guaíba: Agropecuária. Rio. Grande do Sul. 1997. 341 p.
- TAIZ, L; ZEIGER, E. **Plant Physiology**. Sunderland, Massachusetts. 2.ed. Sinauer Associates. 1998. 791p.

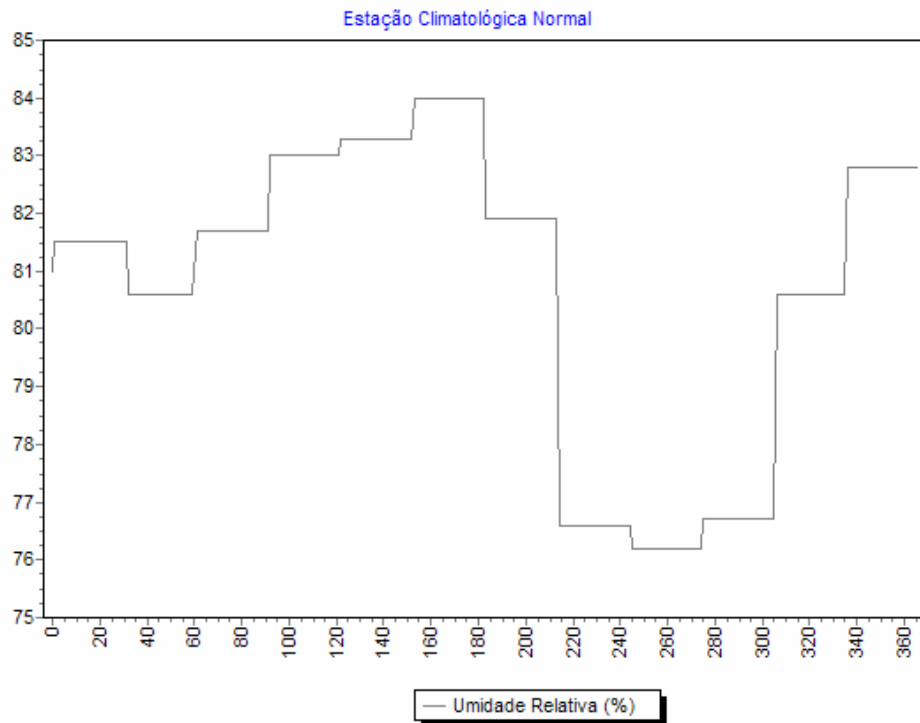
- YURI, J.E.; SOUZA, R.J.; FREITAS, S.A.C.; RODRIGUES JÚNIOR, J.C.; MOTA, J.H. Comportamento de cultivares de alface tipo americana em Boa Esperança. *Horticultura Brasileira*, Brasília, v. 20, p. 229-232, junho, 2002.
- ZOLNIER, S.; GATES, R.S.; BUXTON, J.W.; MACH, C. Psychrometric and ventilation constraints for vapor pressure deficit control. **Computers and Electronics in Agriculture**, 26: 2000. 343-359
- ZOLNIER, S., GATES, R.S., ANDERSON R.G., NOKES, S.E. and DUNCAN, G.A. Non-Water-Stressed Baseline as a Tool for Dynamic Control of a Misting System for Propagation of Poinsettias. **Transactions of the ASAE**. v.44(1). p.137-147. 2001.

## APÊNDICES

**- APÊNDICE A -  
NORMAIS CLIMATOLÓGICAS DA ESTAÇÃO DO INMET  
VIÇOSA - MG**

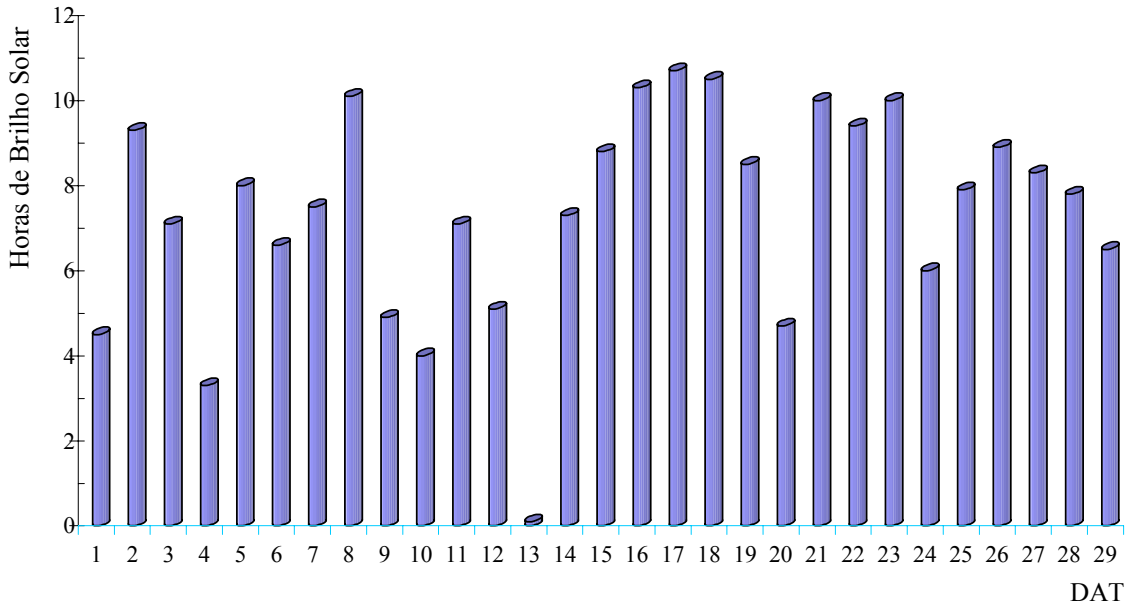


**Figura A.1. Temperatura, normais mensais para Viçosa.**

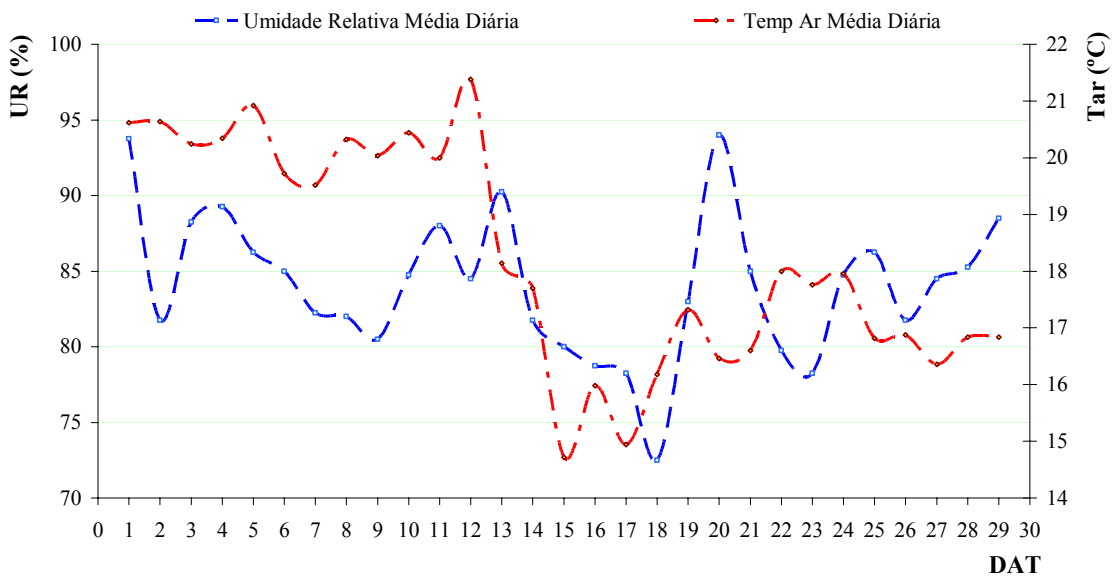


**Figura A.2. Umidade relativa, normais mensais para Viçosa.**

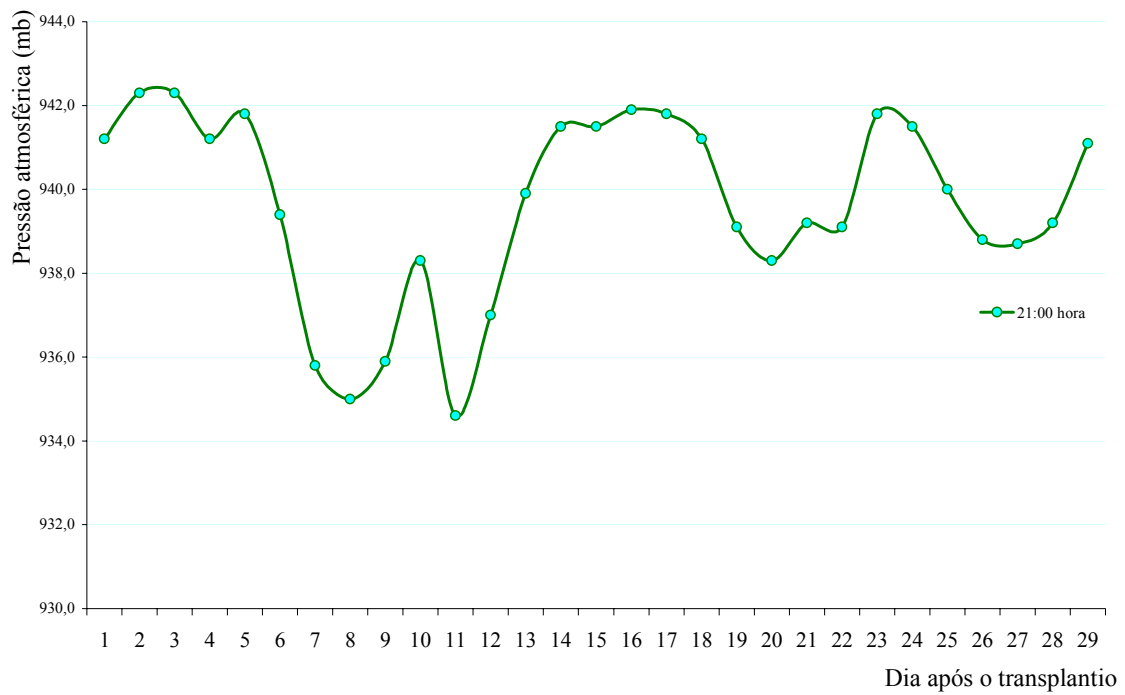
**- APÊNDICE B -  
ANÁLISE DOS DADOS CLIMÁTICOS DA ESTAÇÃO  
CLIMATOLÓGICA DA UFV DURANTE A EXPERIMENTAÇÃO**



**Figura B.1. Brilho solar observado durante o período da experimentação na estação climatológica da UFV.**



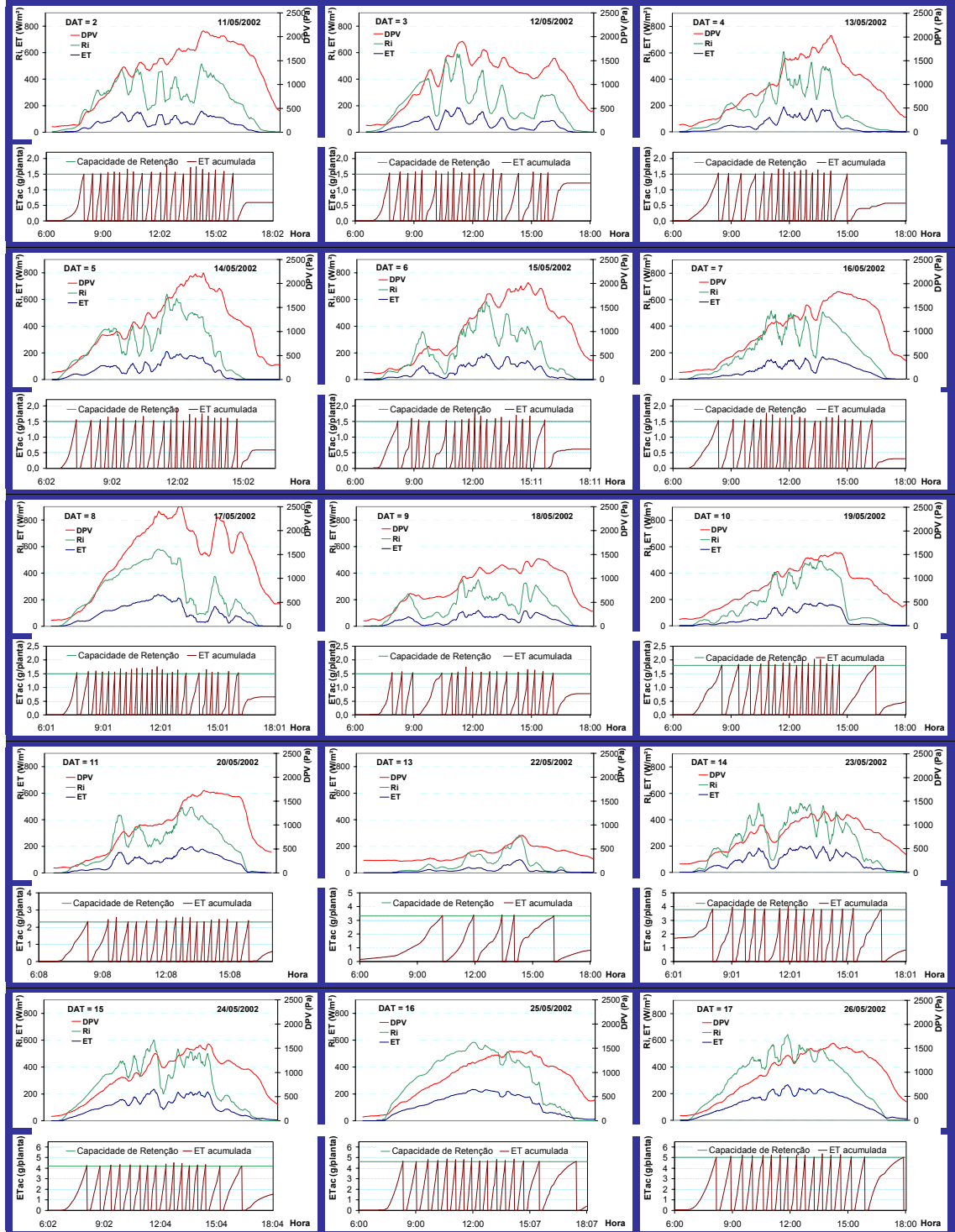
**Figura B.2. Temperatura diária média observada durante o período da experimentação na estação climatológica da UFV.**

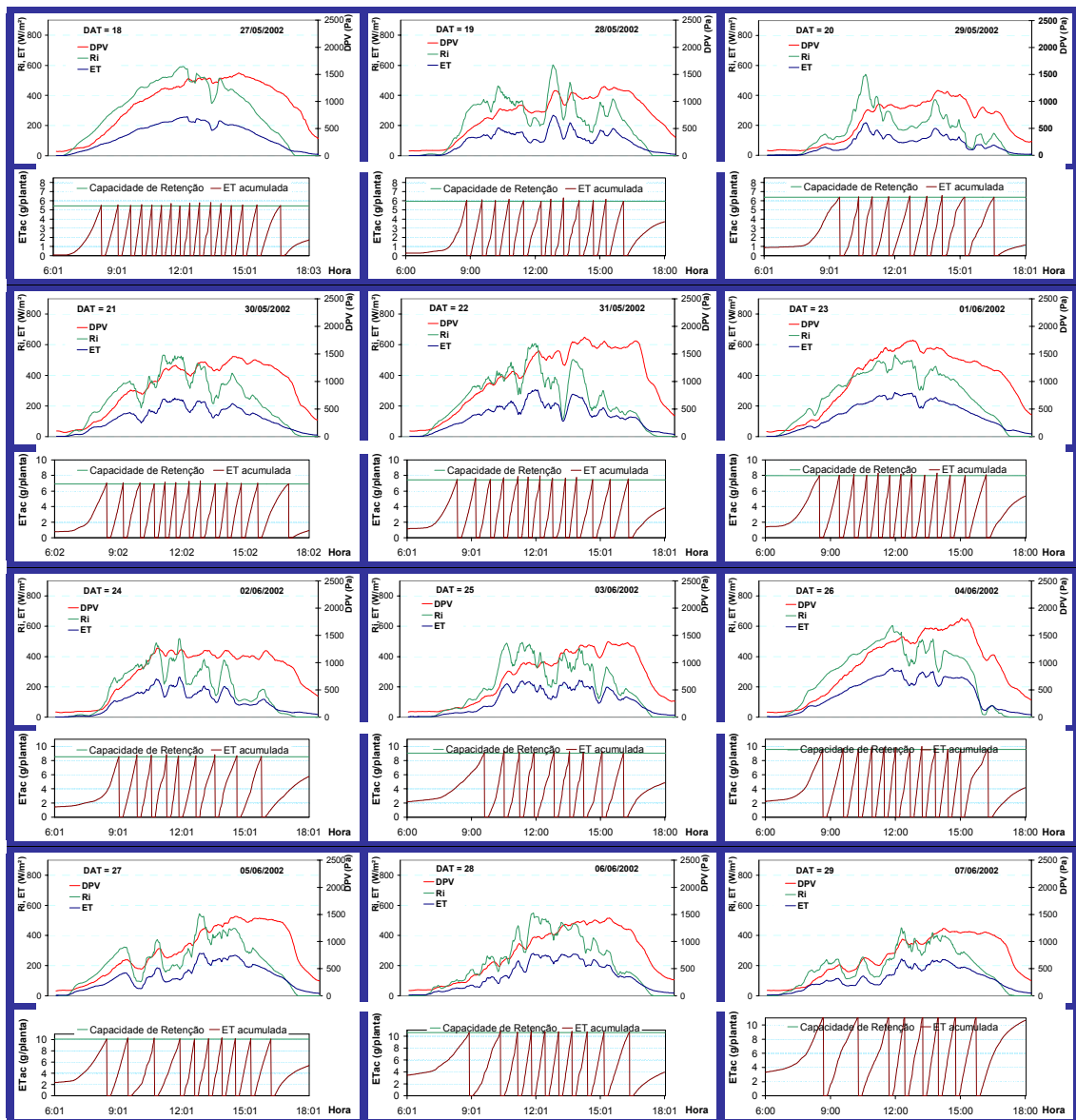


**Figura B.3. Pressão Atmosférica Local na estação da UFV, durante a experimentação.**

## - APÊNDICE C - SIMULAÇÃO DO REGIME DE ACIONAMENTOS DO SISTEMA

**Figura C.1. Continua na página seguinte...**





**Figura C.1. Dados climáticos diários observados durante a experimentação, e regime simulado de acionamentos do sistema, para a cultivar Great Lakes, considerando o consumo de 25% da capacidade de armazenamento estimada.**

**Em que:**

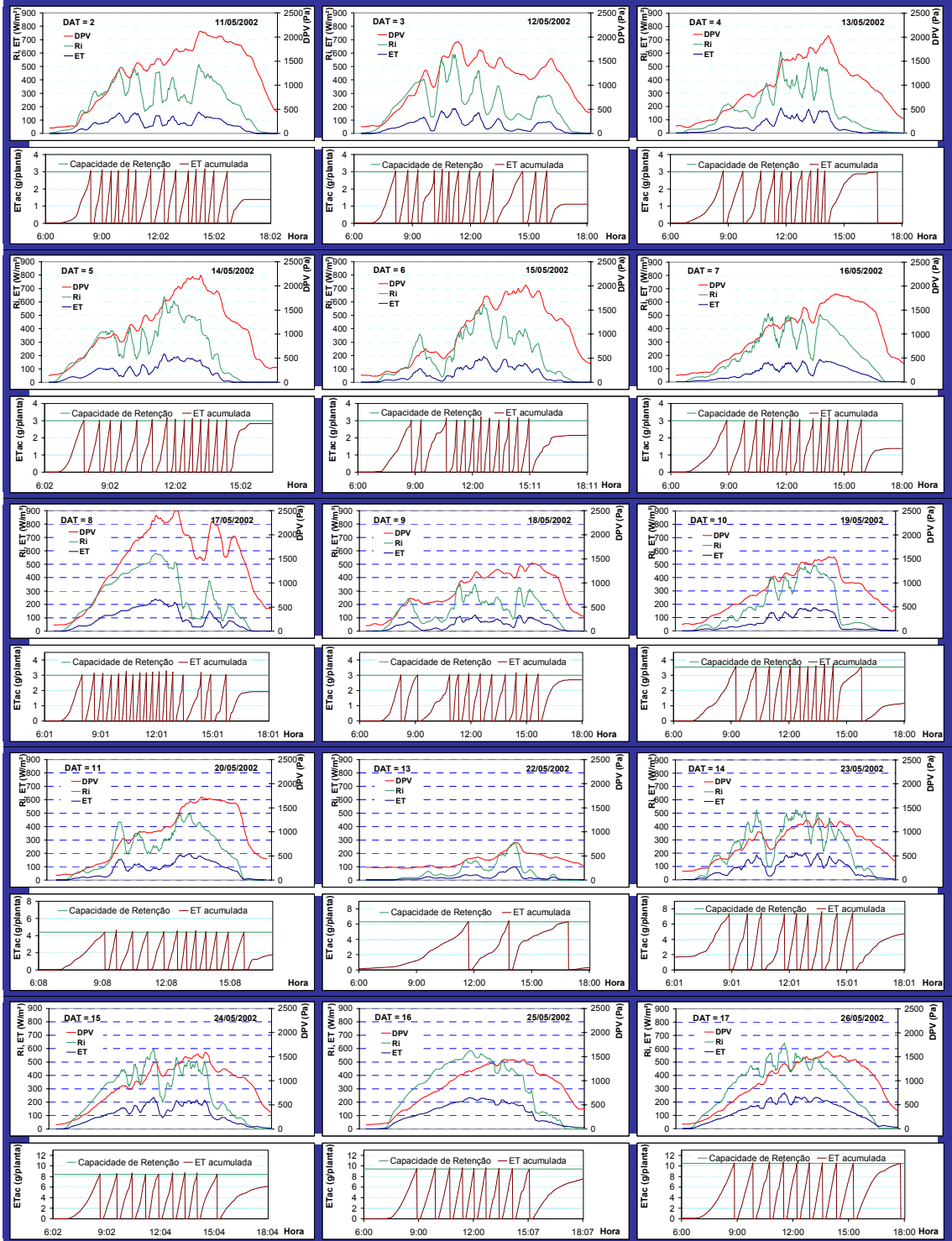
**Ri = Radiação solar incidente no dossel,  $W/m^2$ ;**

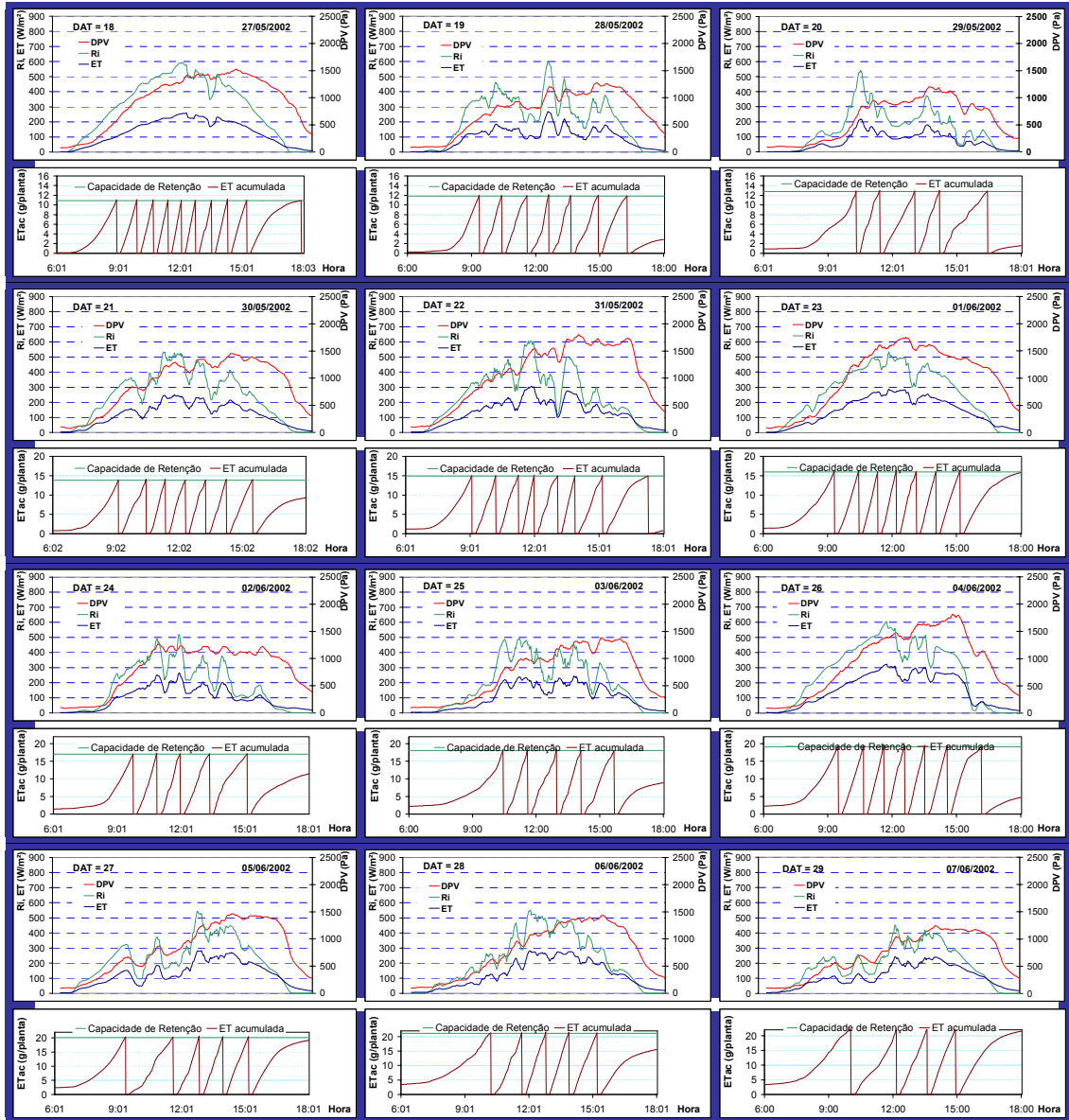
**ET = evapotranspiração instantânea da cultura,  $W/m^2$ ;**

**ETac = evapotranspiração acumulada da cultura, g/planta;**

**DPV = déficit de pressão de vapor do ar, Pa.**

Figura C.2. Continua na página seguinte...





**Figura C.2. Dados climáticos diários observados durante a experimentação, e regime simulado de acionamentos do sistema, para a cultivar Great Lakes, considerando o consumo de 50% da capacidade de armazenamento estimada.**

**Em que:**

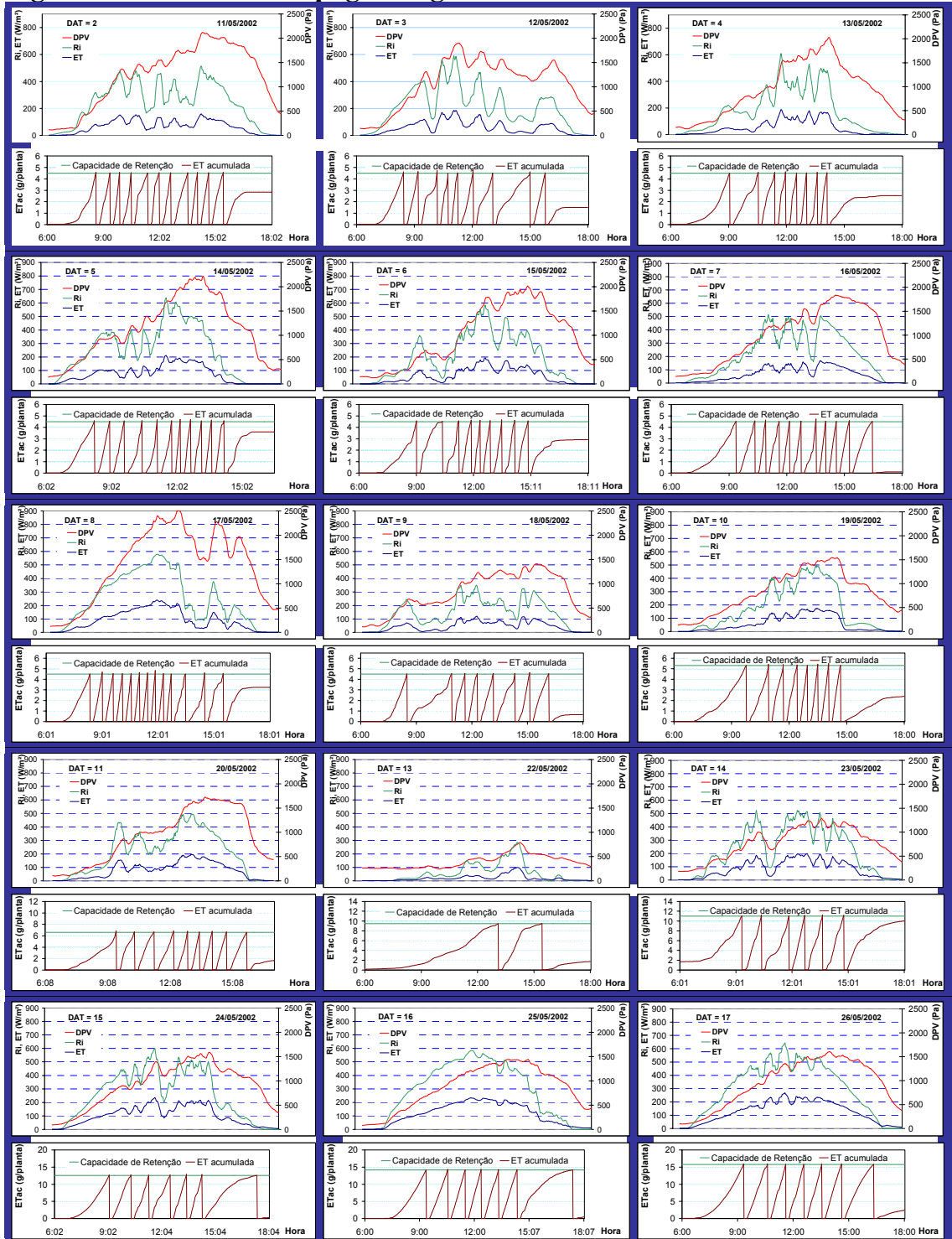
**Ri = Radiação solar incidente no dossel,  $W/m^2$ ;**

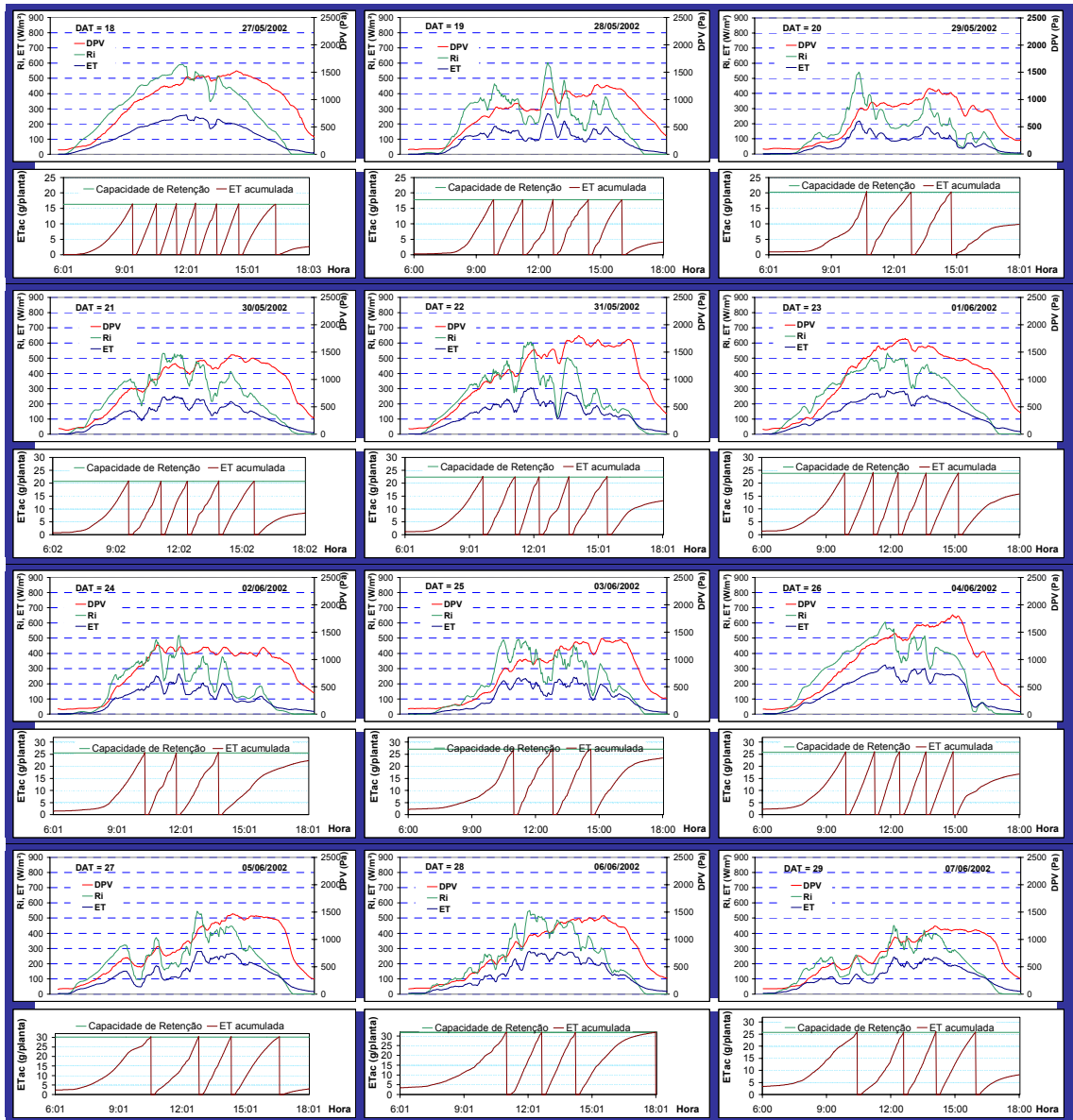
**ET = evapotranspiração instantânea da cultura,  $W/m^2$ ;**

**ETac = evapotranspiração acumulada da cultura, g/planta;**

**DPV = déficit de pressão de vapor do ar, Pa.**

Figura C.3. Continua na página seguinte...





**Figura C.3. Dados climáticos diários observados durante a experimentação, e regime simulado de acionamentos do sistema, para a cultivar Great Lakes, considerando o consumo de 75% da capacidade de armazenamento estimada.**

**Em que:**

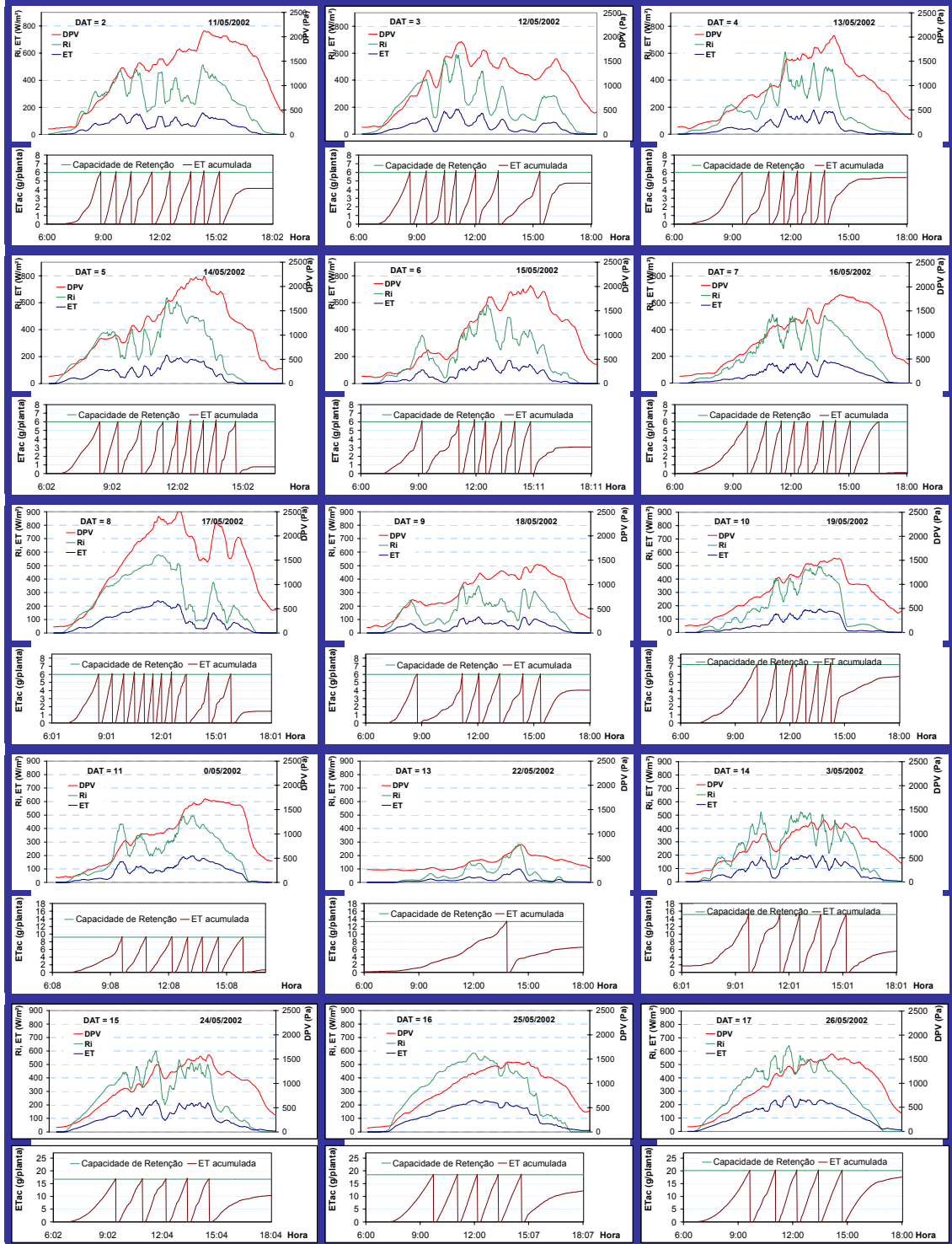
**Ri = Radiação solar incidente no dossel,  $W/m^2$ ;**

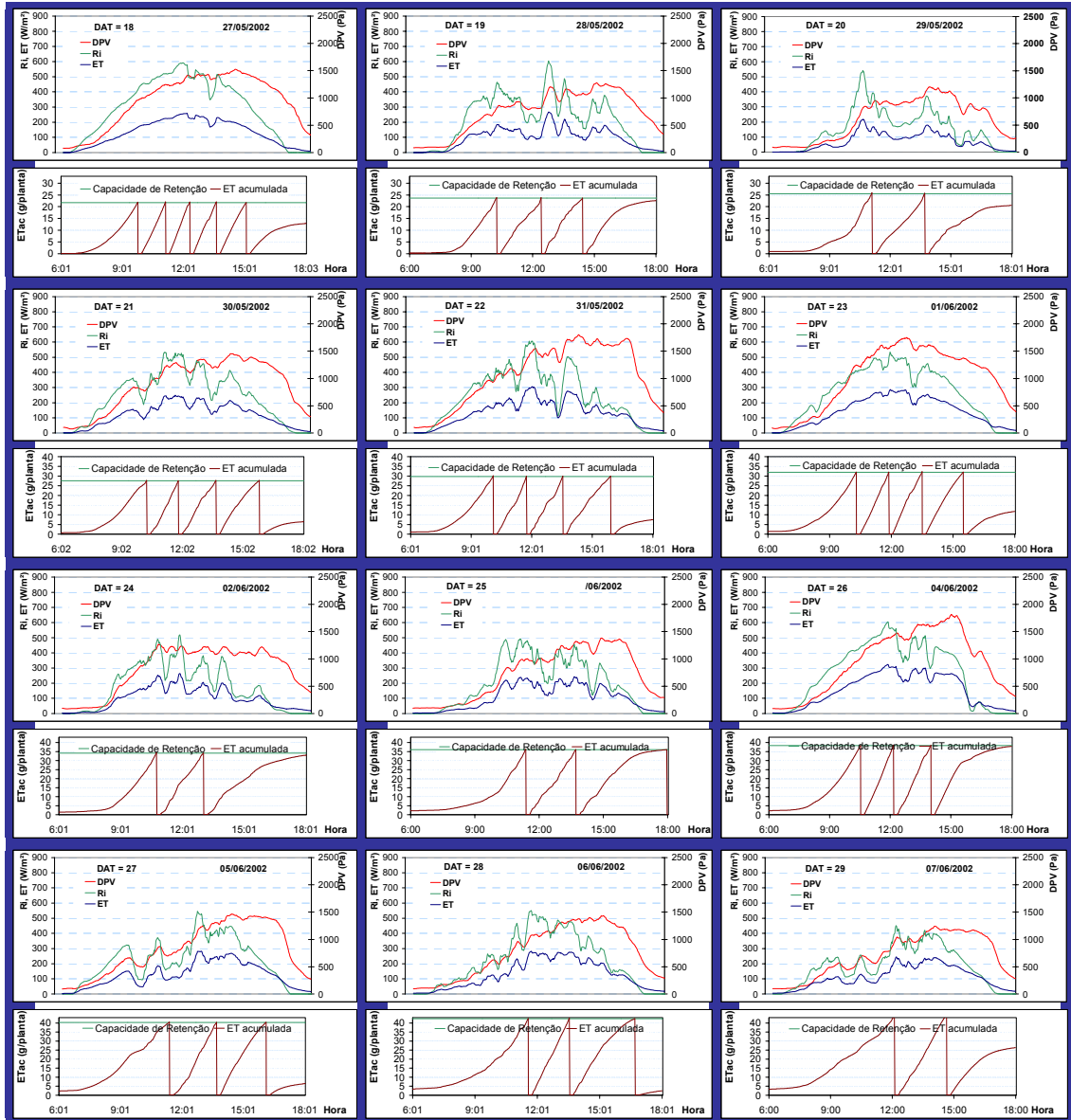
**ET = evapotranspiração instantânea da cultura,  $W/m^2$ ;**

**ETac = evapotranspiração acumulada da cultura, g/planta;**

**DPV = déficit de pressão de vapor do ar, Pa.**

Figura C.4. Continua na página seguinte...





**Figura C.4. Dados climáticos diários observados durante a experimentação, e regime simulado de acionamentos do sistema, para a cultivar Great Lakes, considerando o consumo de 100% da capacidade de armazenamento estimada.**

**Em que:**

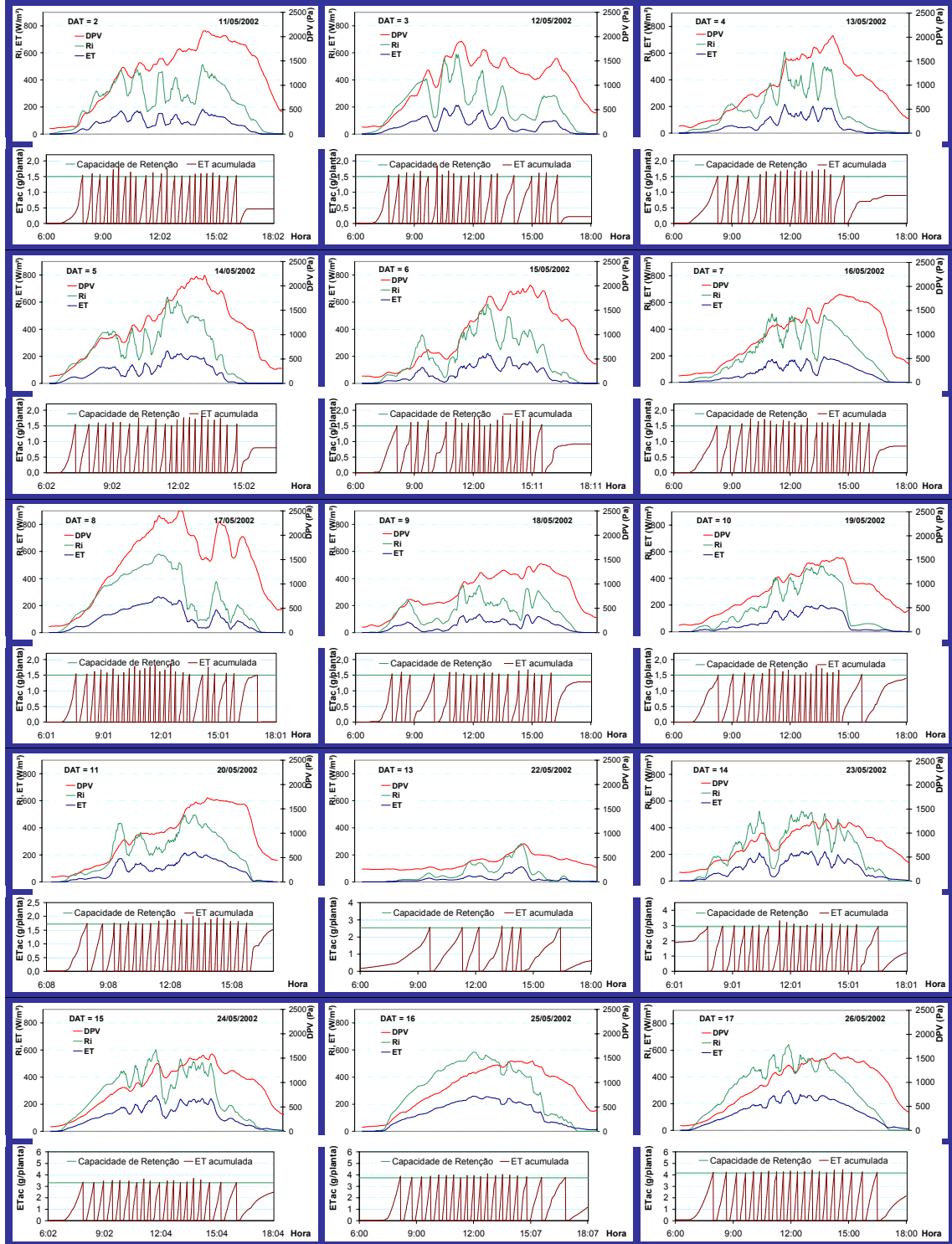
**Ri = Radiação solar incidente no dossel,  $W/m^2$ ;**

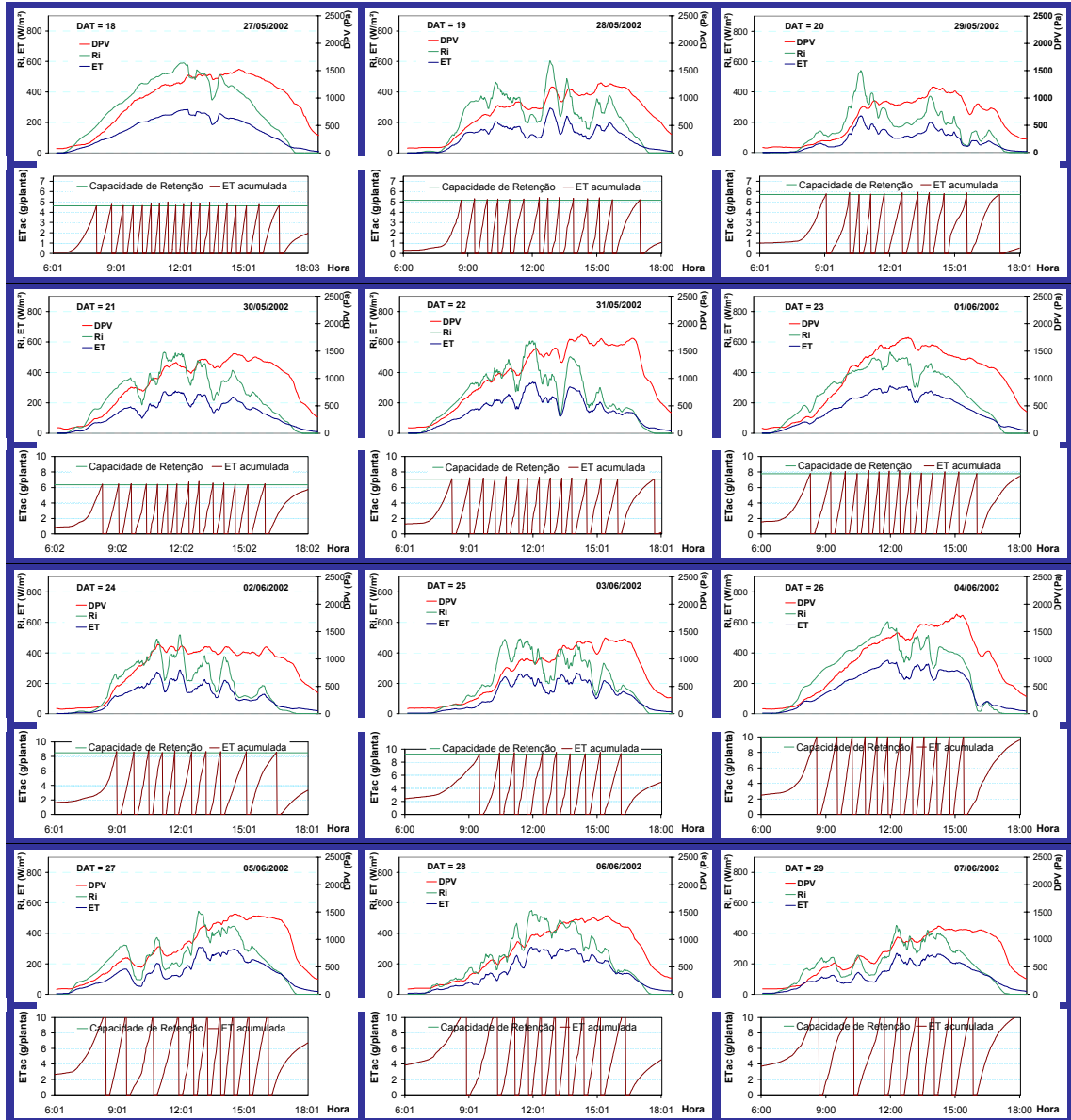
**ET = evapotranspiração instantânea da cultura,  $W/m^2$ ;**

**ETac = evapotranspiração acumulada da cultura, g/planta;**

**DPV = déficit de pressão de vapor do ar, Pa.**

Figura C.5. Continua na página seguinte...





**Figura C.5. Dados climáticos diários observados durante a experimentação, e regime simulado de acionamentos do sistema, para a cultivar Grand Rapids, considerando o consumo de 25% da capacidade de armazenamento estimada.**

**Em que:**

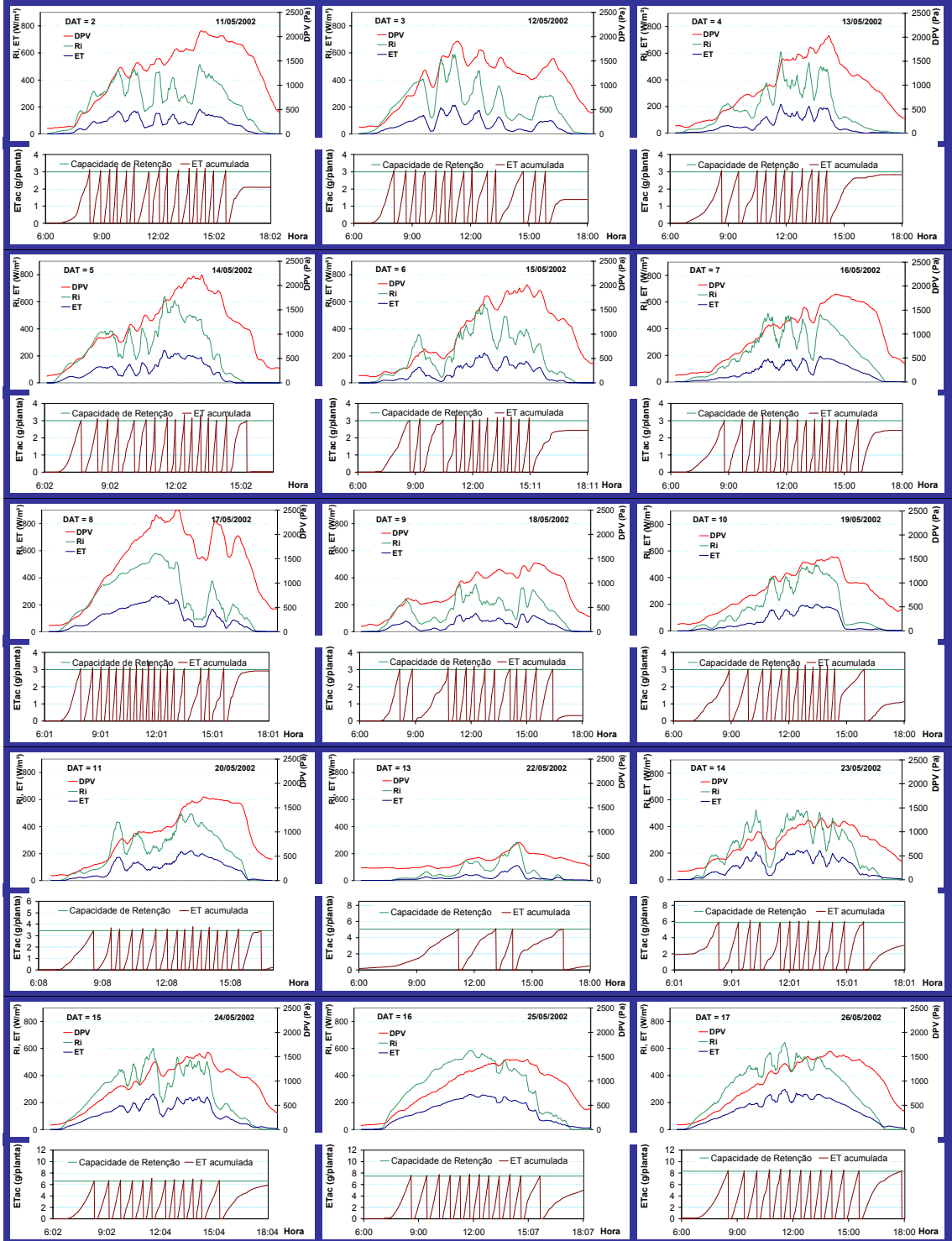
**Ri = Radiação solar incidente no dossel,  $W/m^2$ ;**

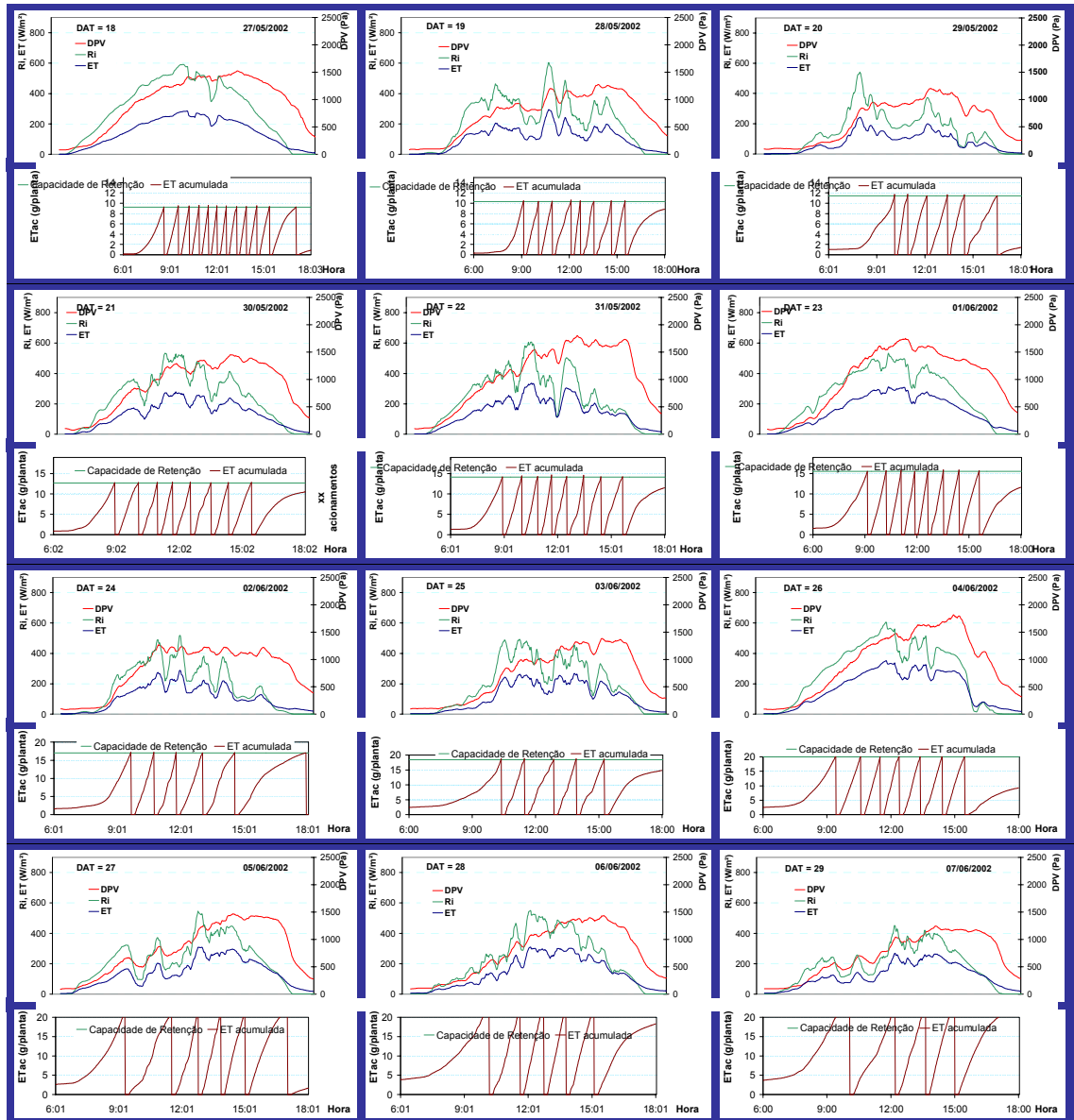
**ET = evapotranspiração instantânea da cultura,  $W/m^2$ ;**

**ETac = evapotranspiração acumulada da cultura, g/planta;**

**DPV = déficit de pressão de vapor do ar, Pa.**

Figura C.6. Continua na página seguinte...





**Figura C.6. Dados climáticos diários observados durante a experimentação, e regime simulado de acionamentos do sistema, para a cultivar Grand Rapids, considerando o consumo de 50% da capacidade de armazenamento estimada.**

**Em que:**

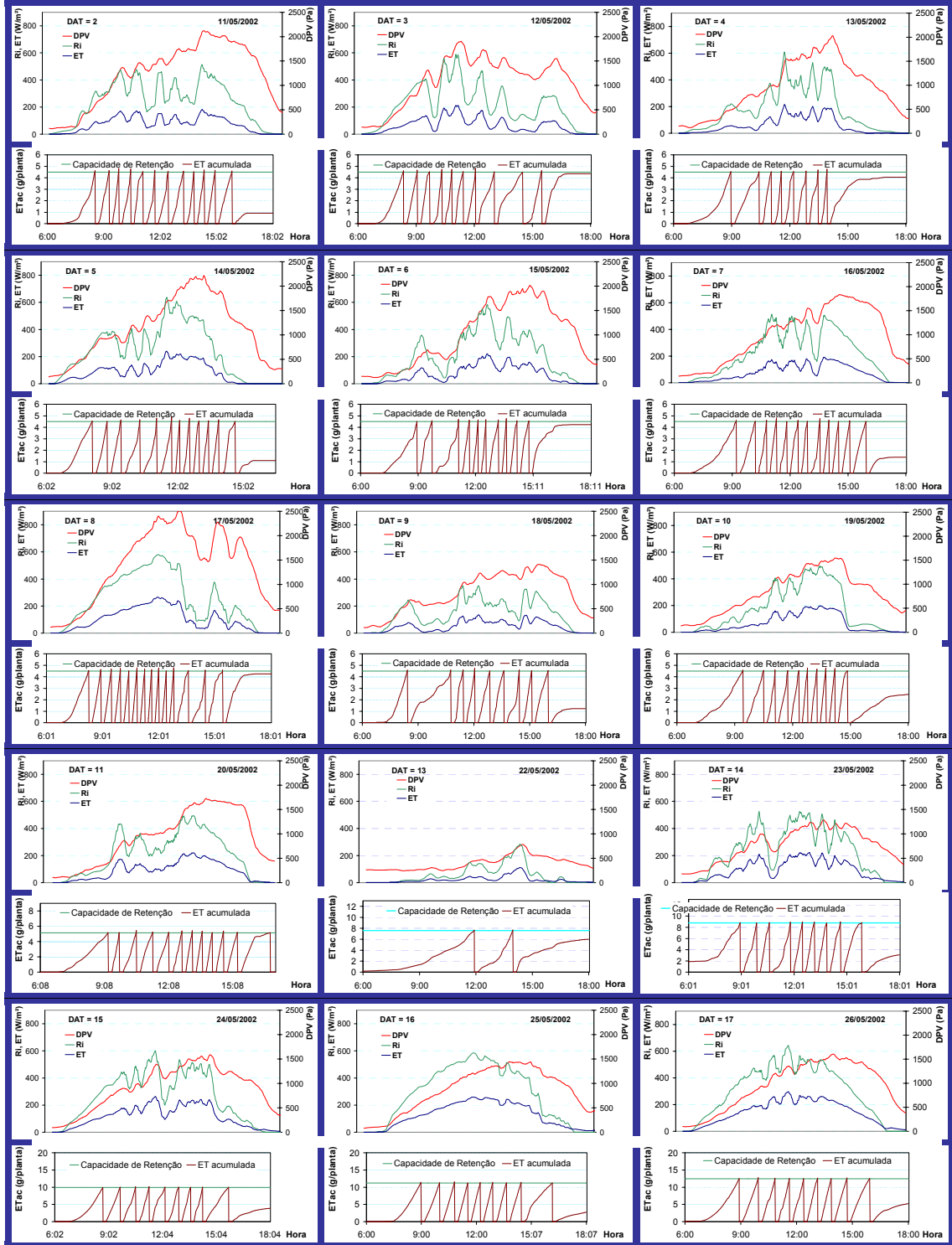
**Ri = Radiação solar incidente no dossel,  $W/m^2$ ;**

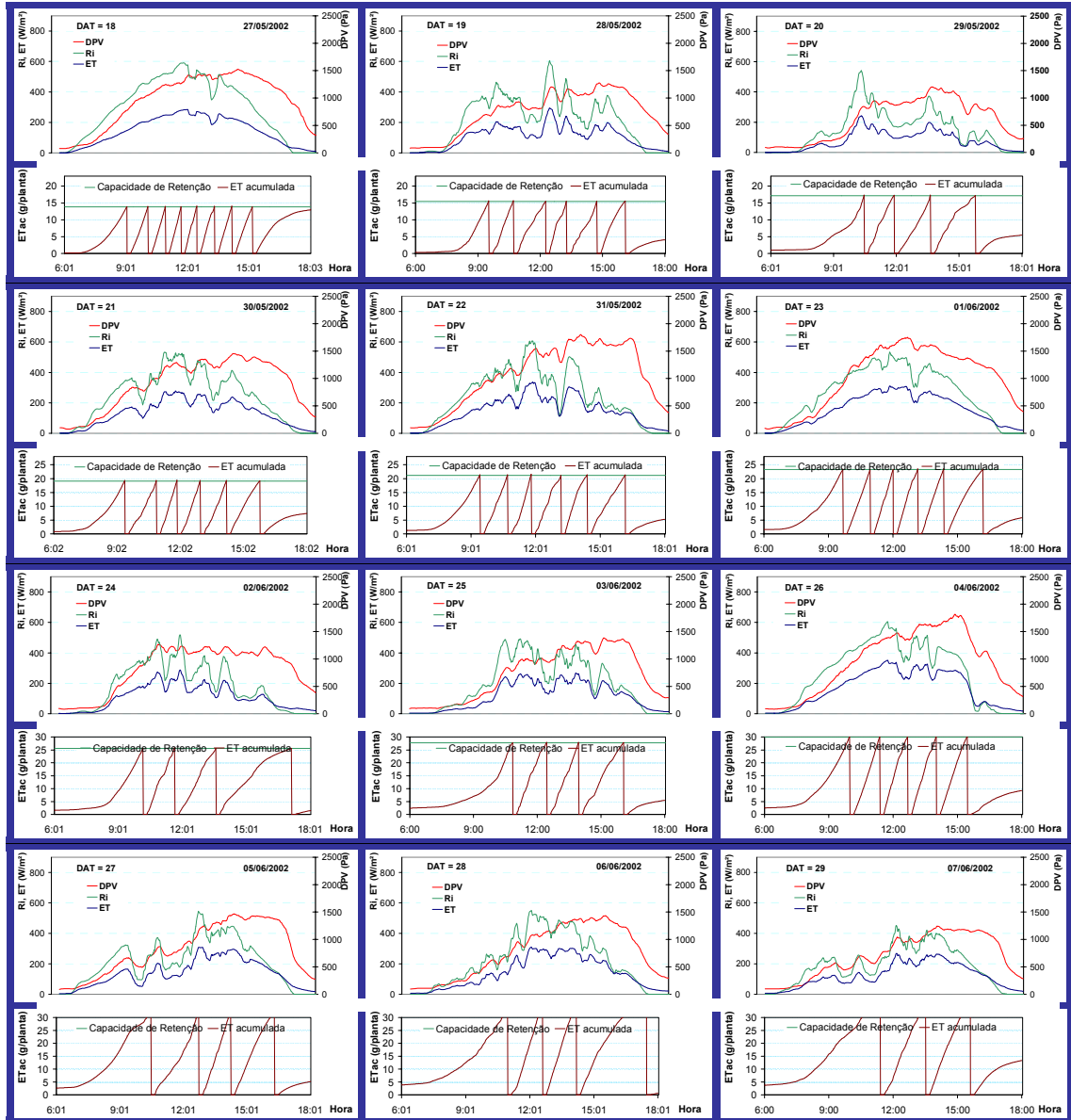
**ET = evapotranspiração instantânea da cultura,  $W/m^2$ ;**

**ETac = evapotranspiração acumulada da cultura, g/planta;**

**DPV = déficit de pressão de vapor do ar, Pa.**

Figura C.7. Continua na página seguinte...





**Figura C.7. Dados climáticos diários observados durante a experimentação, e regime simulado de acionamentos do sistema, para a cultivar Grand Rapids, considerando o consumo de 75% da capacidade de armazenamento estimada.**

**Em que:**

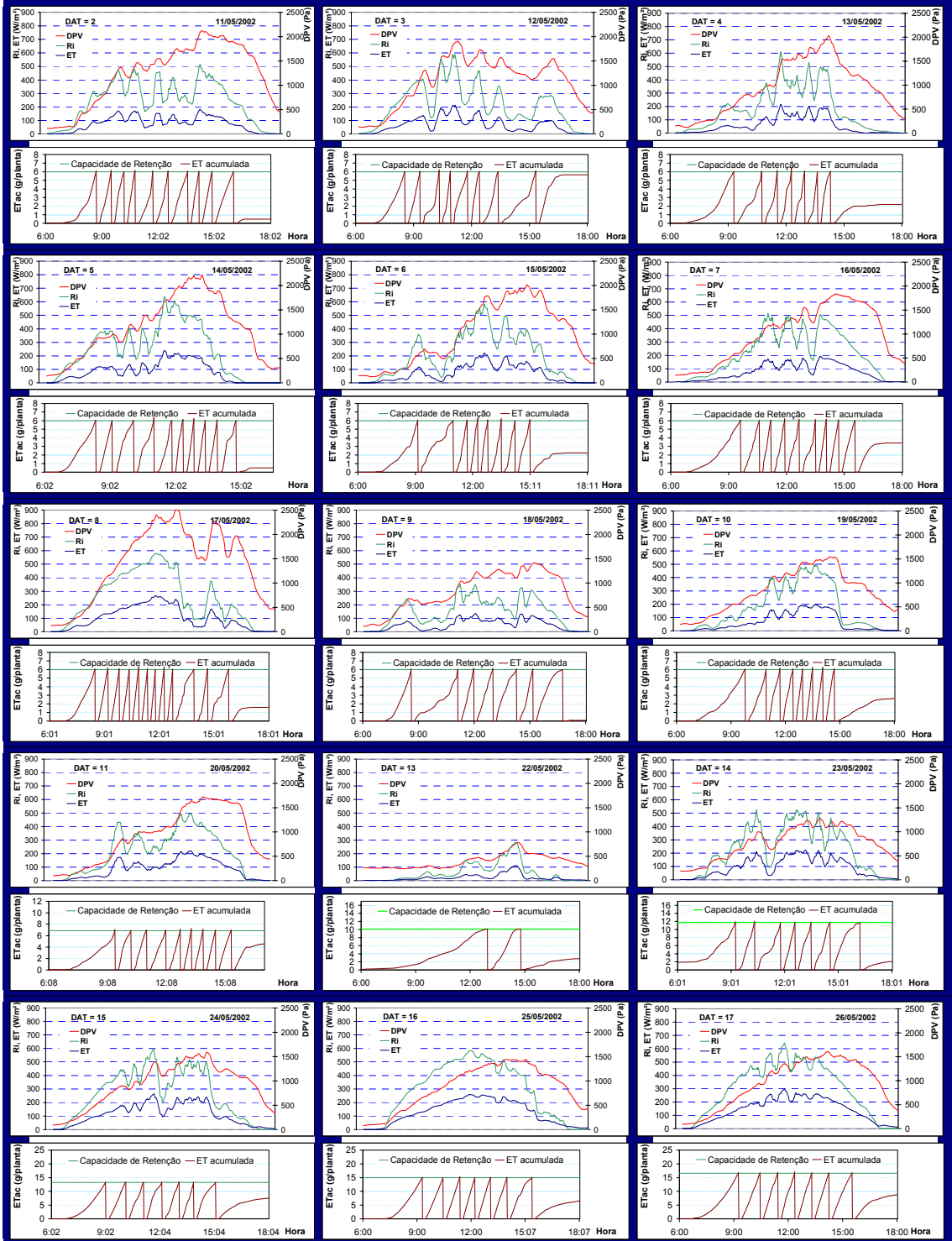
**Ri = Radiação solar incidente no dossel,  $W/m^2$ ;**

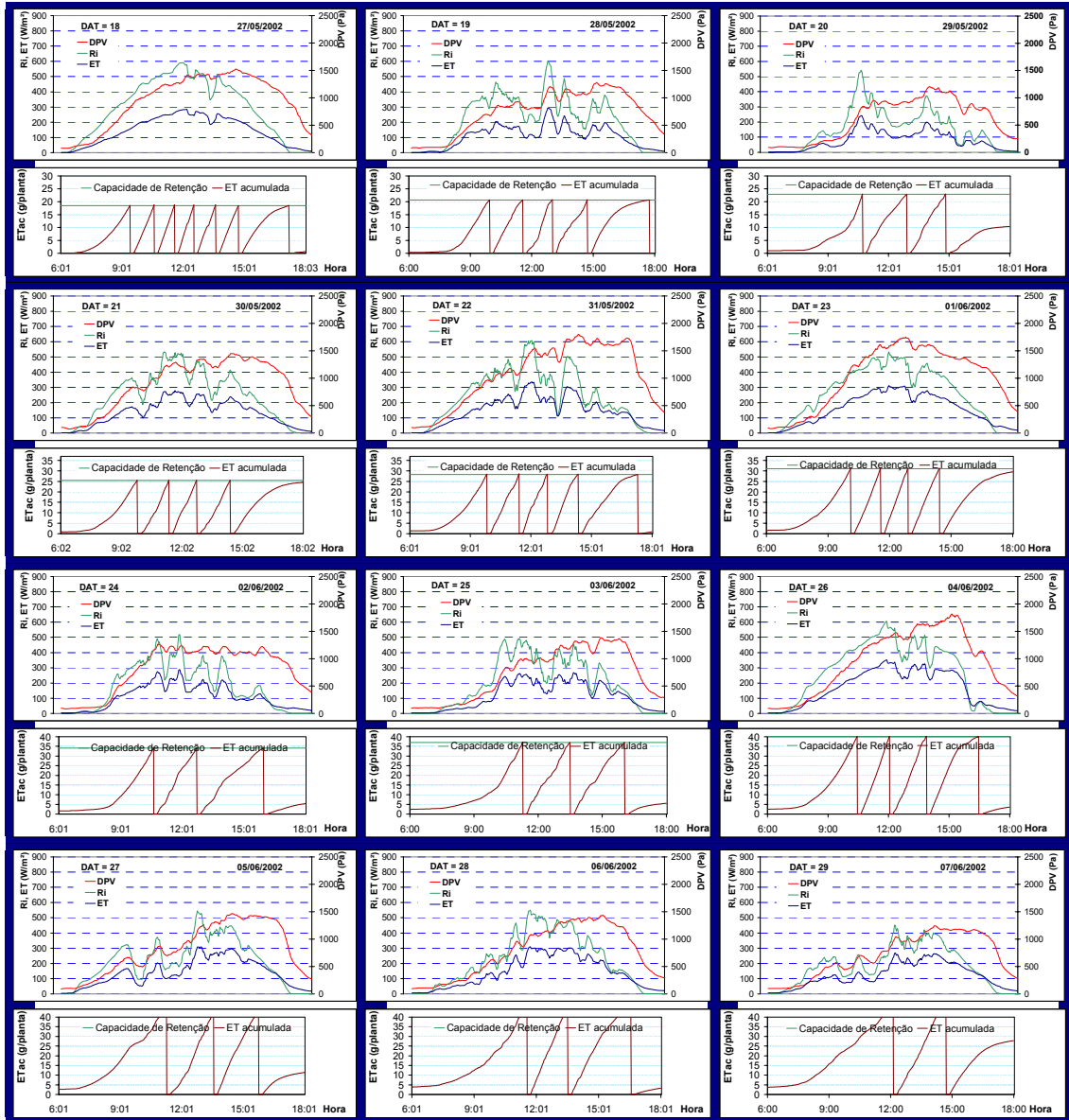
**ET = evapotranspiração instantânea da cultura,  $W/m^2$ ;**

**ETac = evapotranspiração acumulada da cultura, g/planta;**

**DPV = déficit de pressão de vapor do ar, Pa.**

Figura C.8. Continua na página seguinte...





**Figura C.8. Dados climáticos diários observados durante a experimentação, e regime simulado de acionamentos do sistema, para a cultivar Grand Rapids, considerando o consumo de 100% da capacidade de armazenamento estimada.**

**Em que:**

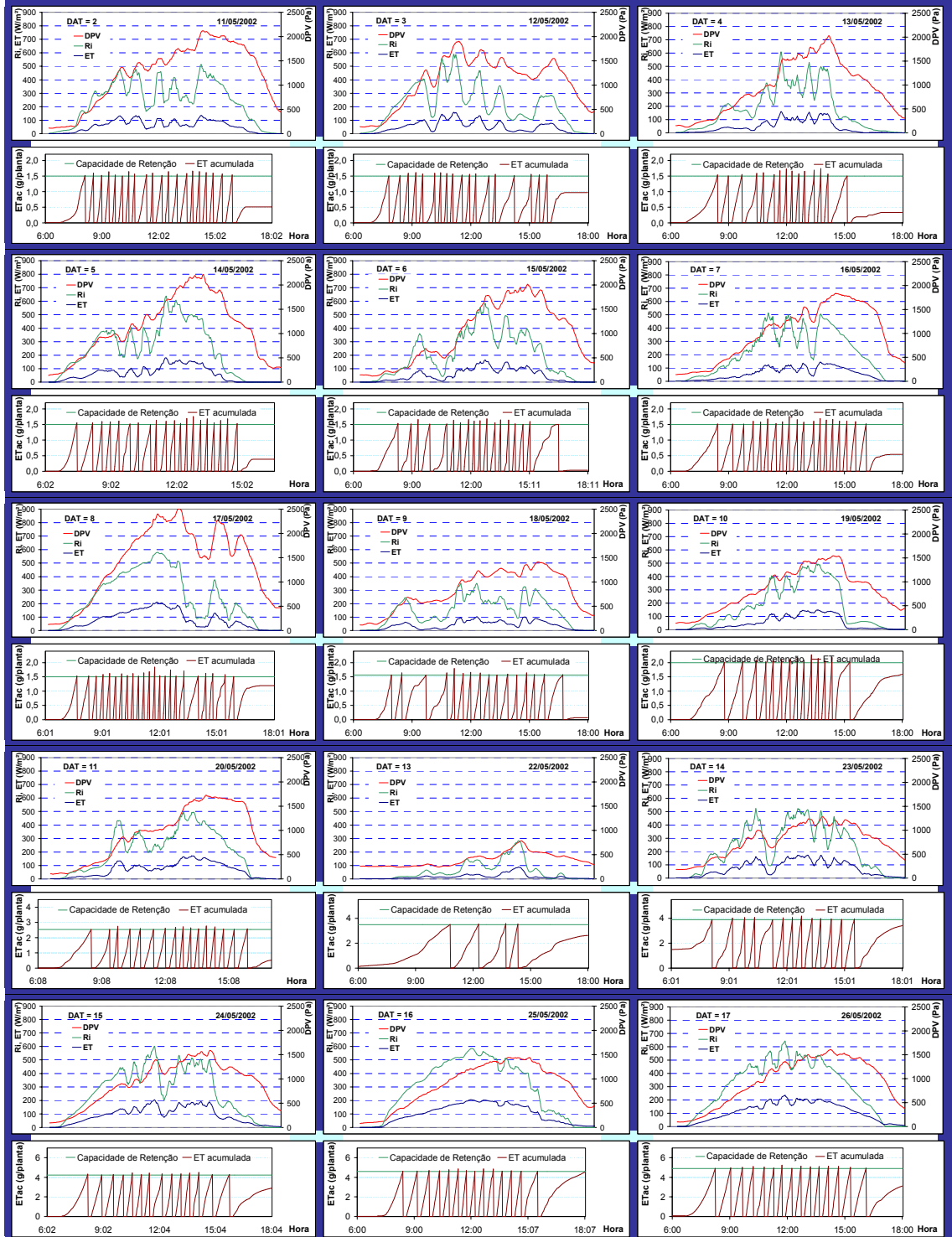
**Ri = Radiação solar incidente no dossel,  $W/m^2$ ;**

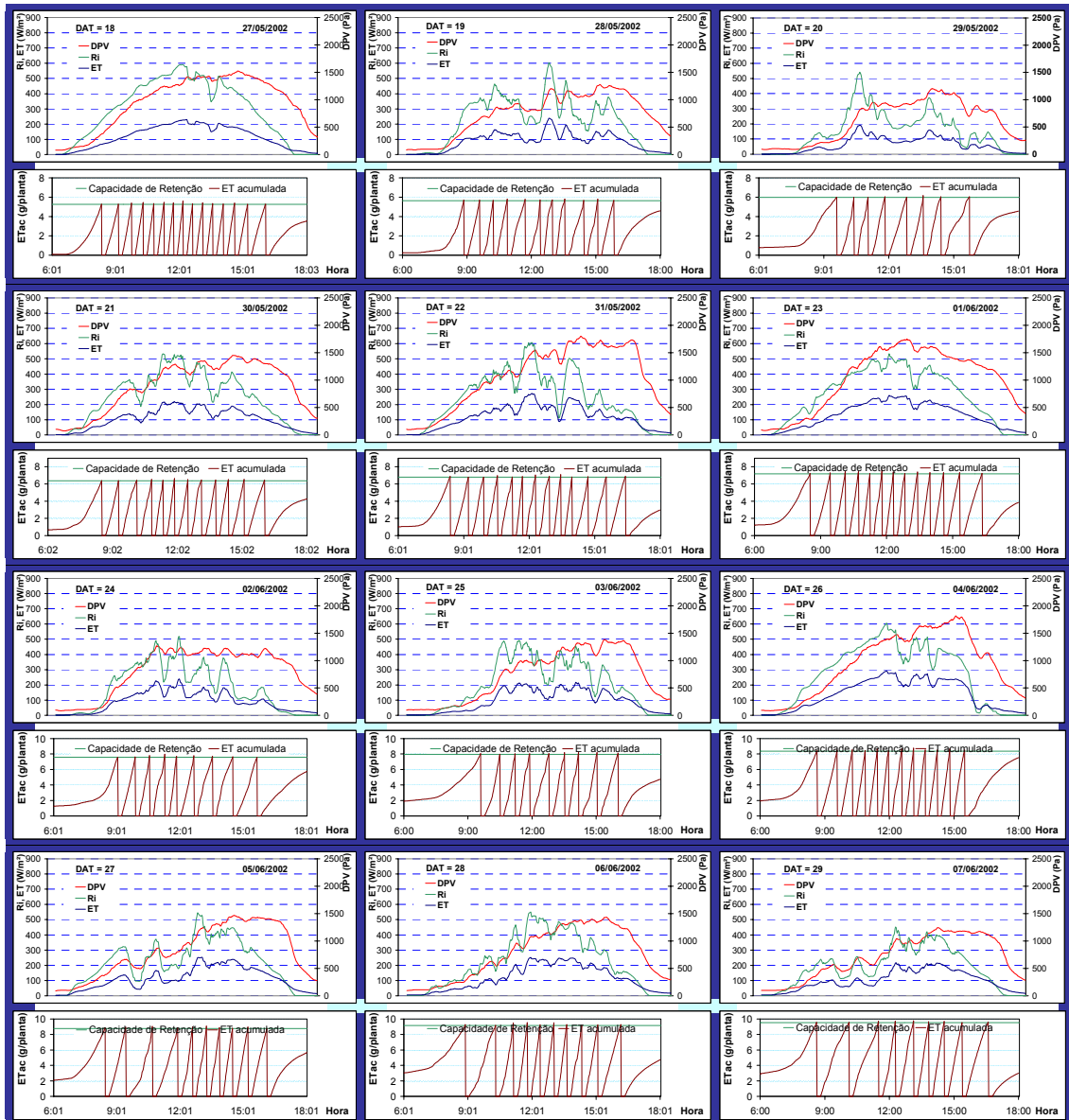
**ET = evapotranspiração instantânea da cultura,  $W/m^2$ ;**

**ETac = evapotranspiração acumulada da cultura, g/planta;**

**DPV = déficit de pressão de vapor do ar, Pa.**

Figura C.9. Continua na página seguinte...





**Figura C.9. Dados climáticos diários observados durante a experimentação, e regime simulado de acionamentos do sistema, para a cultivar Regina, considerando o consumo de 25% da capacidade de armazenamento estimada.**

**Em que:**

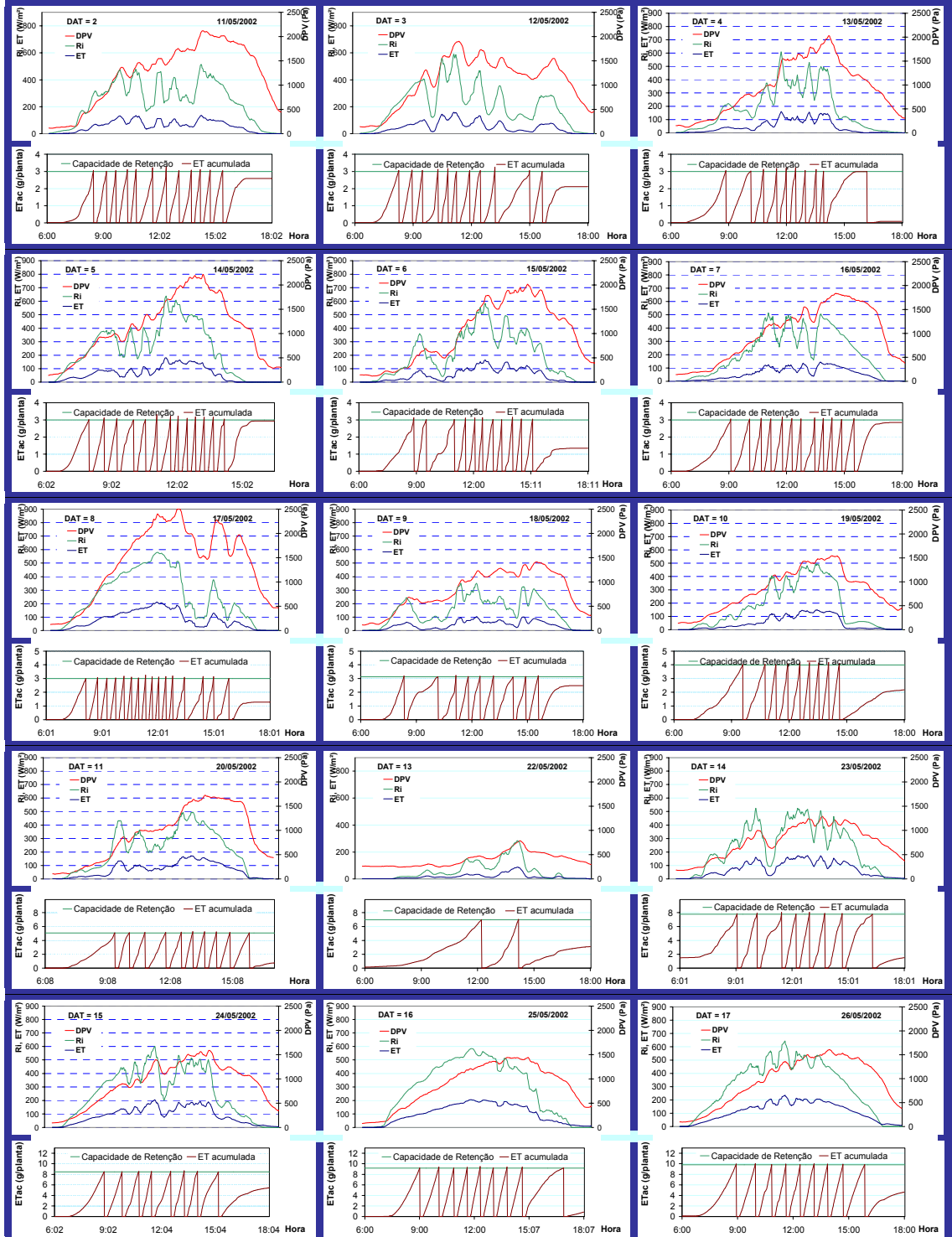
**Ri = Radiação solar incidente no dossel,  $W/m^2$ ;**

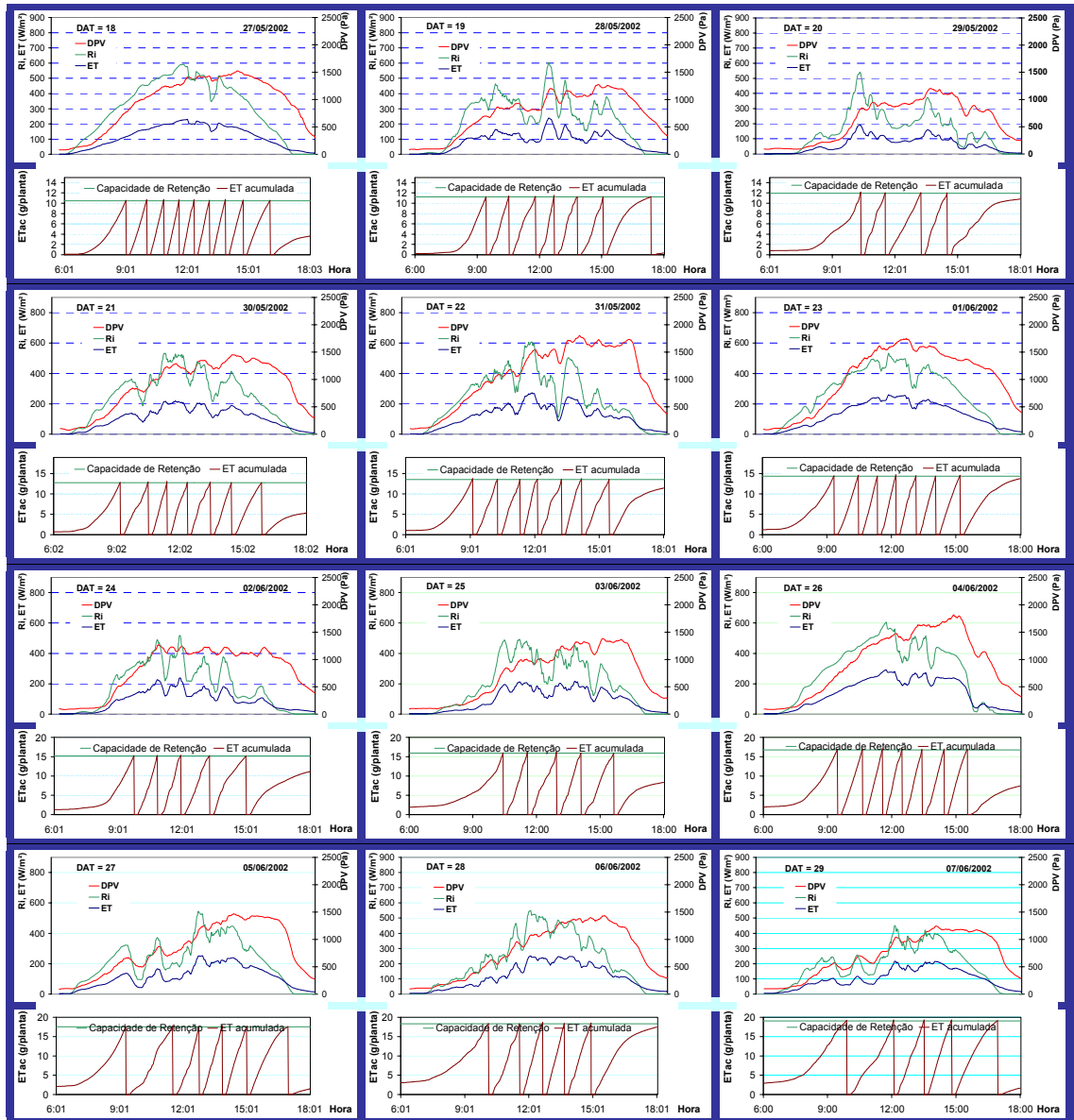
**ET = evapotranspiração instantânea da cultura,  $W/m^2$ ;**

**ETac = evapotranspiração acumulada da cultura, g/planta;**

**DPV = déficit de pressão de vapor do ar, Pa.**

Figura C.10. Continua na página seguinte...





**Figura C.10. Dados climáticos diários observados durante a experimentação, e regime simulado de acionamentos do sistema, para a cultivar Regina, considerando o consumo de 50% da capacidade de armazenamento estimada.**

**Em que:**

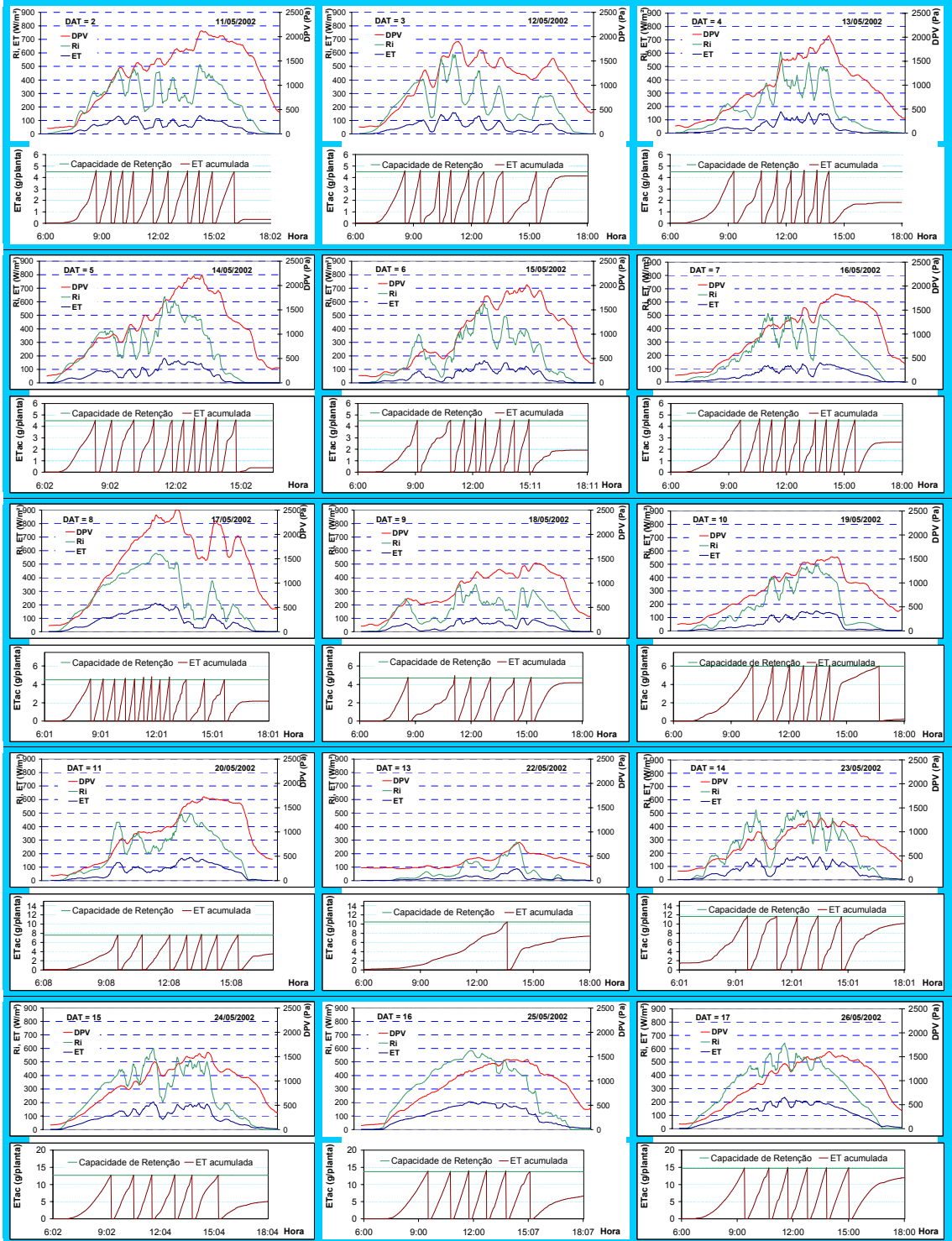
**Ri = Radiação solar incidente no dossel,  $W/m^2$ ;**

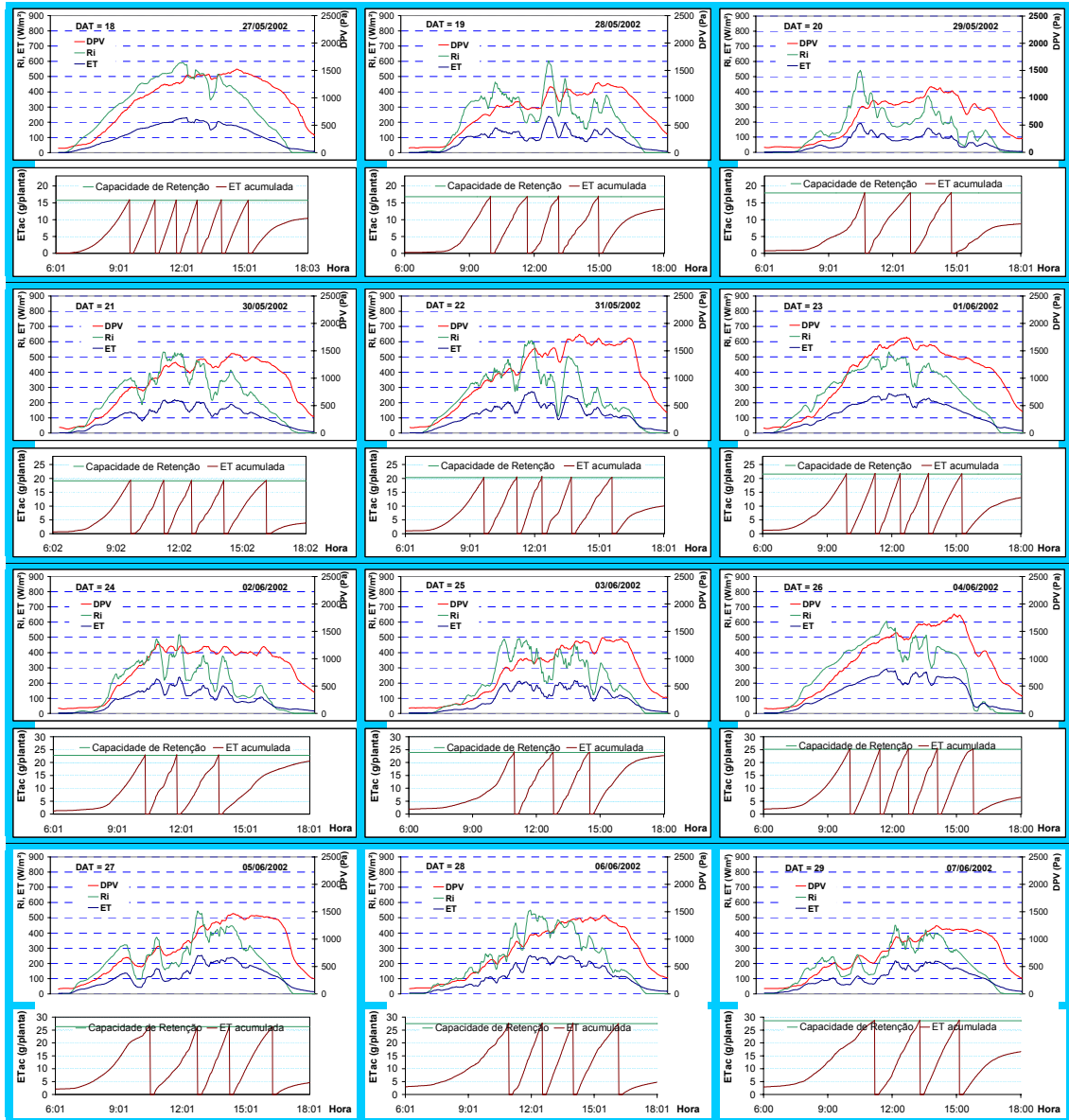
**ET = evapotranspiração instantânea da cultura,  $W/m^2$ ;**

**ETac = evapotranspiração acumulada da cultura, g/planta;**

**DPV = déficit de pressão de vapor do ar, Pa.**

Figura C.11. Continua na página seguinte...





**Figura C.11. Dados climáticos diários observados durante a experimentação, e regime simulado de acionamentos do sistema, para a cultivar Regina, considerando o consumo de 75% da capacidade de armazenamento estimada.**

**Em que:**

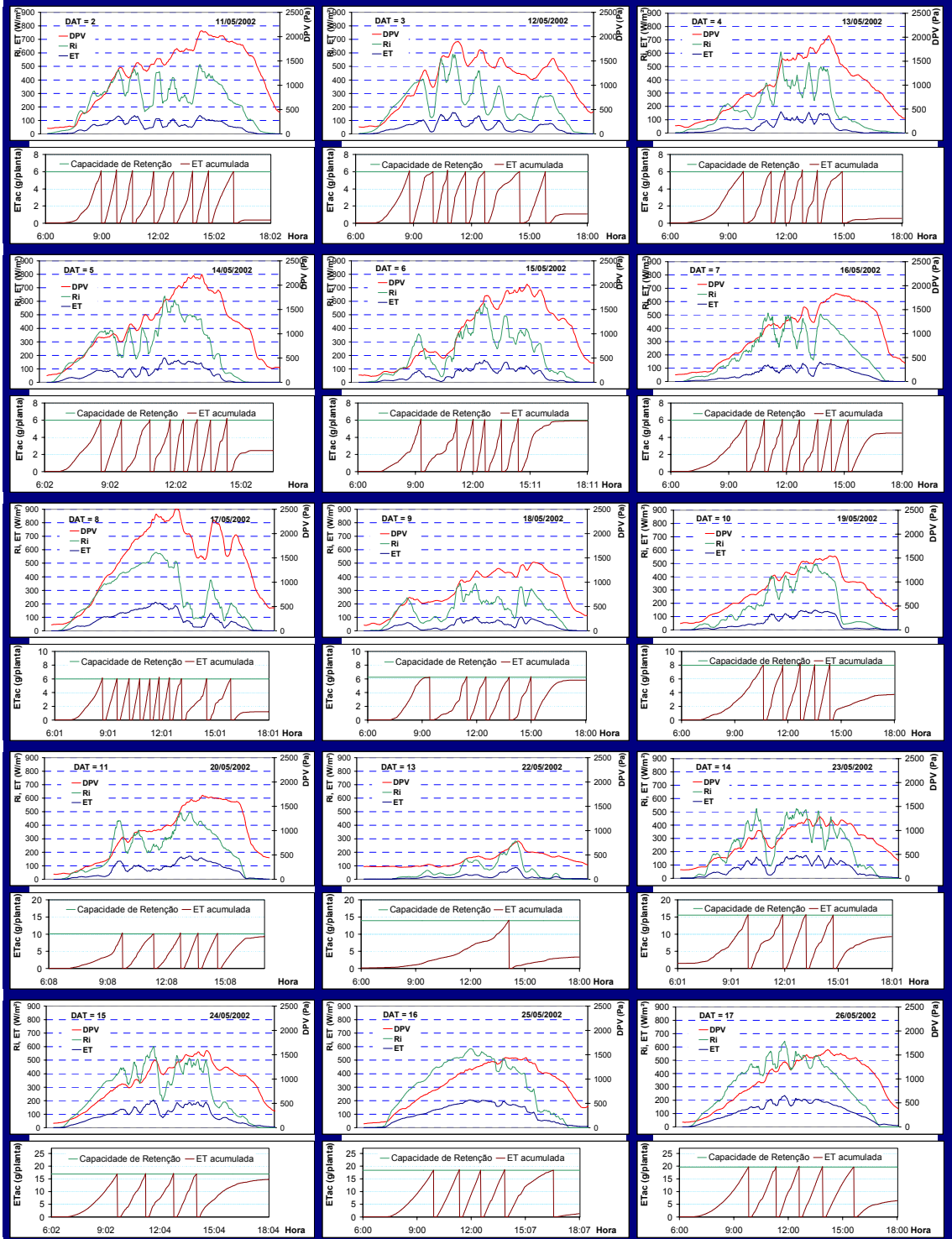
**Ri = Radiação solar incidente no dossel,  $W/m^2$ ;**

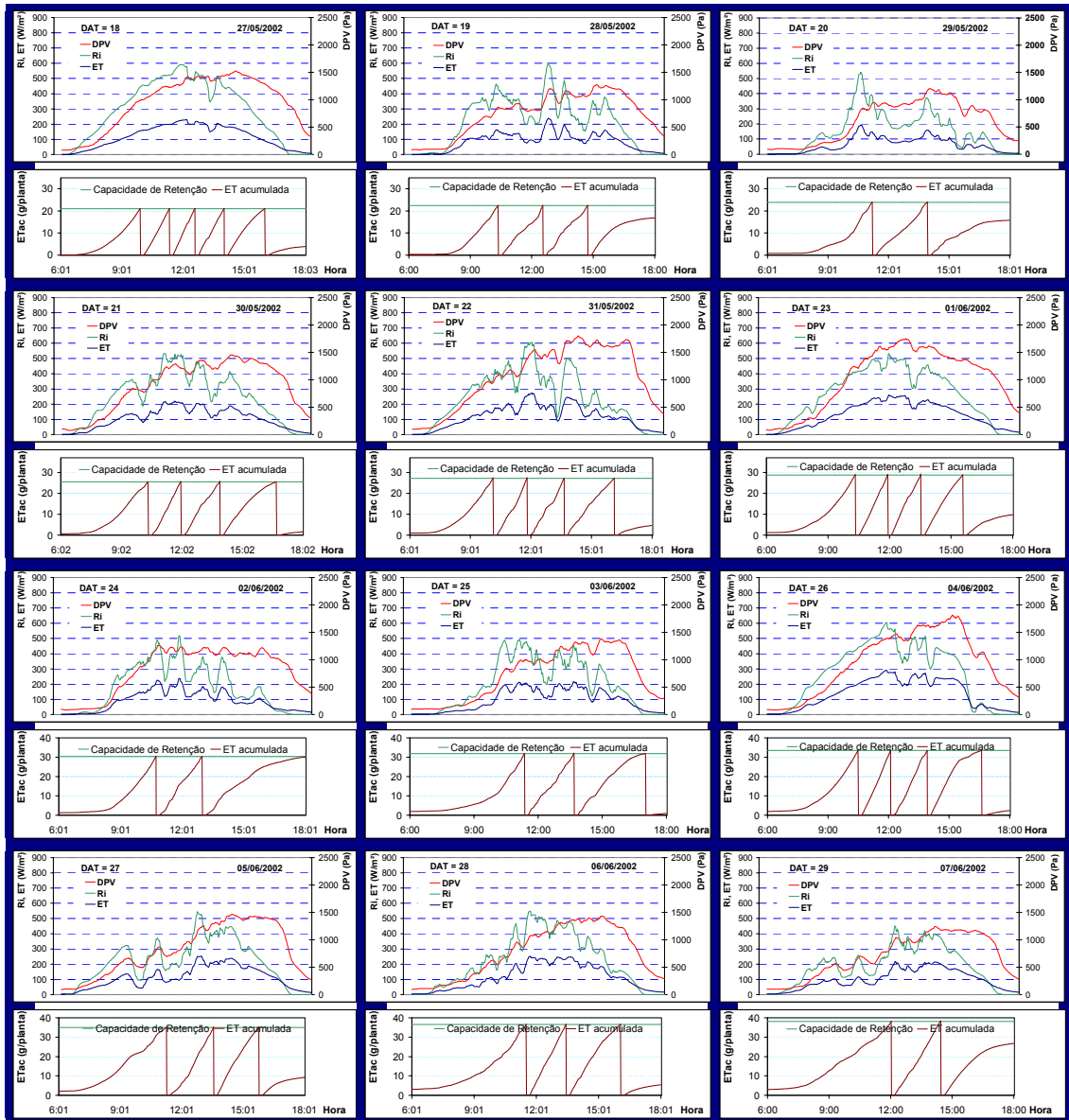
**ET = evapotranspiração instantânea da cultura,  $W/m^2$ ;**

**ETac = evapotranspiração acumulada da cultura, g/planta;**

**DPV = déficit de pressão de vapor do ar, Pa.**

Figura C.12. Continua na página seguinte...





**Figura C.12. Dados climáticos diários observados durante a experimentação, e regime simulado de acionamentos do sistema, para a cultivar Regina, considerando o consumo de 100% da capacidade de armazenamento estimada.**

**Em que:**

**Ri = Radiação solar incidente no dossel,  $W/m^2$ ;**

**ET = evapotranspiração instantânea da cultura,  $W/m^2$ ;**

**ETac = evapotranspiração acumulada da cultura, g/planta;**

**DPV = déficit de pressão de vapor do ar, Pa.**