UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL

DETERMINAÇÃO DA TRANSPIRAÇÃO EM PLANTAS DE NIM INDIANO (*Azadirachta indica* A. Juss) UTILIZANDO MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE FLUXO DE SEIVA

GUILHERME BARROS SEIXAS

Prof. Dr. JOSÉ HOLANDA CAMPELO JÚNIOR
Orientador

Cuiabá, MT
Agosto de 2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL

DETERMINAÇÃO DA TRANSPIRAÇÃO EM PLANTAS DE NIM INDIANO (*Azadirachta indica* A. Juss) UTILIZANDO MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE FLUXO DE SEIVA

GUILHERME BARROS SEIXAS

Dissertação apresentada ao programa de pós-graduação em Física Ambiental da Universidade Federal de Mato Grosso, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Física Ambiental.

Prof. Dr. JOSÉ HOLANDA CAMPELO JÚNIOR
Orientador

Cuiabá, MT
Agosto de 2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental

FOLHA DE APROVAÇÃO

TÍTULO: **DETERMINAÇÃO DA TRANSPIRAÇÃO DE PLANTAS DE NIM INDIANO (*Azadirachta indica* A. Juss) UTILIZANDO MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE FLUXO DE SEIVA**

AUTOR: **GUILHERME BARROS SEIXAS**

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 14 de agosto de 2009, pela comissão julgadora:

Prof. Dr. José Holanda Campelo Júnior - Orientador
Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária - UFMT

Prof. Dr. Marcelo Sacardi Biudes – Examinador Interno
Instituto de Física - UFMT

Profa. Dra. Carla Maria Abido Valentini - Examinadora Externa
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso - IFMT

FICHA CATALOGRÁFICA

S462d Seixas, Guilherme Barros

Determinação da transpiração em plantas de nim indiano (*Azadirachta indica* A. Juss) utilizando métodos de estimativa de fluxo de seiva / Guilherme Barros Seixas. – 2009.

xvii, 71f. : il. ; color. ; 30 cm.

"Orientador: Prof. Dr. José Holanda Campelo Júnior".

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Física, Pós-graduação em Física Ambiental, 2009.

Bibliografia: f. 64-71.

1. Nim indiano. 2. Nim indiano – Transpiração – Métodos. 3. Nim indiano – Fluxo de seiva. 4. Plantas medicinais. I. Título.

CDU – 633.88:53.083

Ficha elaborada por: Rosângela Aparecida Vicente Söhn – CRB-1/931

DEDICATÓRIA

A meu Deus, soberano e que está acima de tudo e todos. Poderoso nas batalhas!
A minha família: Silvia, Ester e Israel. Esposa, filha e filho, pela paciência, compreensão e incentivo. Sem esse apoio o presente trabalho não seria possível.
Aos meus pais que sempre investiram em minha educação.
A minha mãe pela herança da fé evangélica.

AGRADECIMENTOS

- Ao Prof.. Dr. José Holanda Campelo Júnior pelo exemplo de vida acadêmica e pela orientação científica valiosa;
- Ao Prof. Dr. José de Souza Nogueira pela dedicação e empenho em tornar esta pós-graduação verdadeiramente multidisciplinar;
- Ao Prof. Dr. Marcelo Sacardi Biudes pelo ensino na área de instrumentação e também pelo companheirismo;
- Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT);
- A amiga Soilce pelo companheirismo e auxílio técnico na secretaria da Pós-Graduação em Física Ambiental (UFMT);
- Aos meus amigos Flair, Osvaldo Borges, Higo, Osvaldo (FU) e "seu" Vicente pela ajuda na coleta de dados e incentivo permanente;
- Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso (IFMT), instituição educacional em que trabalho, pela oportunidade desta pós-graduação.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS ix

LISTA DE FIGURAS x

RESUMO xiv

ABSTRACT xvi

1 INTRODUÇÃO 1

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 4

2.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DO NIM 4
2.1.1 Aspectos botânicos, distribuição geográfica e ocorrência natural 4
2.1.2 Características dendrológicas e fenológicas 6
2.2 TRANSPIRAÇÃO DAS PLANTAS 7
2.3 EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA 8
2.4 LISÍMETROS 9
2.5 ESTIMATIVA DA TRANSPIRAÇÃO PELA MEDIDA DO FLUXO DE SEIVA 11
2.5.1 Medida da transpiração pelo método de balanço de calor no caule (BCC) 12
2.5.2 Medida da transpiração pelo método da sonda de dissipação térmica (SDT) ou método de Granier 16

3 MATERIAL E MÉTODOS 19

3.1 LOCALIZAÇÃO, CLIMA E SOLO 19
3.2 A UNIDADE EXPERIMENTAL 20
3.3 DADOS CLIMÁTICOS 21
3.4 INSTALAÇÃO E CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO 22
3.4.1 Área foliar 24
3.5 ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA 27
3.6 CÁLCULO DA TRANSPIRAÇÃO DIRETAMENTE A PARTIR DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA 31
3.7 MÉTODOS TÉRMICOS PARA ESTIMAR O FLUXO DE SEIVA 31
3.7.1 Método da sonda de dissipação térmica (Granier) 31
3.7.2 Método do balanço de calor no caule (BCC) 36
3.7.3 Sistema de energia elétrica para alimentação do “datalogger” e sensores. 40
3.8 ANÁLISE DOS DADOS 43
3.8.1 Estatística 43
3.8.2 Avaliação dos métodos utilizados 43

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 45

4.1 CARACTERIZAÇÃO METEOROLÓGICA NO PERÍODO EXPERIMENTAL 45
4.2 ÁREA FOLIAR 47
4.3 MEDIDAS DE TRANSPIRAÇÃO 49

4.3.1 Medidas lisimétricas 49
4.3.2 Estimativa da transpiração utilizando-se a evapotranspiração de referência. 52
4.3.3 Taxa de transpiração, radiação solar global, temperatura e umidade relativa. 55
4.3.4 Medidas de fluxo de seiva obtidas pelo método do balanço de calor no caule. 56
4.3.5 Medidas de fluxo de seiva obtidas pelo método da sonda de dissipação térmica (Granier). 59
4.3.6 Comparação do método da sonda de dissipação térmica (Granier) com o método do balanço de calor 61
5 CONCLUSÃO 63
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Critérios de interpretação do desempenho dos métodos de medida do fluxo de seiva em plantas de nim, pelo índice "c", segundo Camargo & Sentelhas (1997). 44

Tabela 2 - Área foliar de plantas de nim, cultivadas em lisímetros de nível do lençol freático constante, no período de 02/05/08 a 19/12/08, na Fazenda Experimental da UFMT, em Santo Antônio do Leverger – MT. 47

Tabela 3 – Altura média das plantas de nim no período de 02/05/08 a 19/12/08, na Fazenda Experimental da UFMT, em Santo Antônio do Leverger – MT.....48

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa com a localização da área de plantação de nim na Fazenda Experimental da UFMT, em Santo Antônio do Leverger - MT. 19

Figura 2 – Unidade Experimental: lisímetro (1,2,3), planta de nim (P1 a P9), tambor de armazenamento de água (TB1,TB2,TB3), tubo coletor de excesso (TCE), caixa de descarga (CXD), e abrigo (em alvenaria, coberto com telha de fibrocimento). 20

Figura 3 – Visão do fosso da unidade experimental: reservatórios de abastecimento (TB1,TB2 e TB3), com tubo de controle de excesso (TCE), registros de entrada e saída, e caixa de descarga com bóia (CXD) para controle do lençol freático. 21

Figura 4 – Visão da superfície do solo do lisímetro de nível de lençol freático constante: (A) sem impermeabilização (B) com impermeabilização, na Fazenda Experimental da UFMT, em Santo Antônio do Leverger – MT.....23

Figura 5 – Esquema da localização dos sensores de fluxo de seiva (métodos de Granier (G) e balanço de calor no caule (BCC)) instalados nas plantas de Nim (planta1 = P1, planta2 = P2, planta3 = P3) do Lisímetro 1, na Fazenda Experimental da UFMT, em Santo Antônio do Leverger – MT.....23

Figura 6 – Esquema utilizado para medição do comprimento (C) e da largura (L) de uma folha de nim (Azadirachta indica A. Juss.). 25

Figura 7 - Tela do Software SigmaScan Pro 5 apresentando a imagem digitalizada de uma folha de nim.(N), identificação(I), escalas de referência da imagem(E) e menu de opções do programa(M). 26

Figura 8 – Sensor de fluxo de seiva instalado no tronco de uma árvore, conforme GRANIER (1985), em que Ss é a sonda aquecida e Si a não-aquecida. 33

Figura 9 - Materiais para confecção dos sensores de dissipação térmica: fita isolante, cabo e fios elétricos flexíveis, caixa plástica, cola, silicone, pasta térmica e tubo metálico (A); fio de cobre e fio de constantan (Omega Eng. Inc.) (B); ferramentas (soldador, alicate, estilete), solda, agulhas hipodérmicas, espaguete e agulha montada com dissipador e termopar (C). 34

Figura 10 – Processo de confecção do sensor de dissipação térmica, construído artesanalmente: agulha hipodérmica (A), termopar tipo T (cobre e constantan) (B), fio de constantan introduzido na agulha e enrolado na parte externa formando elemento aquecedor (C, D), enchimento da base da agulha com cola tipo epóxi (E), sensor montado (F). 35

Figura 11 - Elementos componentes do sensor balanço de calor no caule: regulador para tensão CC estabilizada (A), resistência elétrica do aquecedor (B) e jaqueta contendo a termopilha (C). 36

Figura 12 – Esquema do sensor, dos elementos de medida e dos fluxos envolvidos no método do balanço de calor. 37

Figura 13 – Representação esquemática das ligações elétricas dos sensores de fluxo de seiva pelo método do balanço de calor. As junções de termopares ( ) estão indicadas e formam uma termopilha vertical (TV) e uma termopilha horizontal (TH), na jaqueta térmica. Os terminais das termopilhas (AH, BH e CH) vão para os canais do datalogger. 39

Figura 14 – Regulador ajustável de tensão CC: diagrama esquemático do circuito eletrônico. 40

Figura 15 – Processo de instalação de sensores de fluxo de seiva pelo método do balanço de calor, em Plantas de nim, destacando-se a fixação da termopilha (A), a proteção e isolamento térmico com borracha (B), vedação com fita adesiva (C), camada de espuma sintética (D), isolamento térmico com folhas de alumínio (E), cobertura final com manta térmica (F), na Fazenda Experimental da UFMT, em Santo Antônio do Leverger. 42

Figura 16 – Evolução diária dos valores médios de temperatura (T), radiação solar (Rg) e precipitação (Pt), no período de 02/05/08 a 19/12/08, na Fazenda Experimental da UFMT, em Santo Antônio do Leverger – MT. 45

Figura 17 – Evolução diária dos valores médios da evapotranspiração de referência (ETo) e umidade relativa do ar (UR), no período de 02/05/08 a 19/12/08, na Fazenda Experimental da UFMT, em Santo Antônio do Leverger – MT.....46

Figura 18 – Área foliar de plantas de nim, cultivadas em lisímetros de nível do lençol freático constante (Lisímetro 1= , Lisímetro 2= , Lisímetro 3=), no período de 02/05/08 a 19/12/08, na Fazenda Experimental da UFMT, em Santo Antônio do Leverger – MT. 48

Figura 19 – Transpiração de plantas de nim medida em lisímetros de nível do lençol freático constante (L1= , L2= , L3=) e Evapotranspiração de referência sobre gramado (ETo), no período de 03/05/08 a 27/11/08, na Fazenda Experimental da UFMT, em Santo Antônio do Leverger – MT. 49

Figura 20 – Transpiração acumulada de plantas de nim medida em lisímetros de nível do lençol freático constante (L1= , L2= , L3=), no período de 03/05 a 27/11, na Fazenda Experimental da UFMT, em Santo Antônio do Leverger – MT. 50

Figura 21 – Transpiração por unidade de área foliar de plantas de nim medida em lisímetros de nível do lençol freático constante (L1= , L2= , L3=)) no período de 03/05/08 a 27/11/08, na Fazenda Experimental da UFMT, em Santo Antônio do Leverger – MT. 51

Figura 22 – Relação entre a transpiração por unidade de área foliar de plantas de nim medida em lisímetros (L1 e L2) de nível do lençol freático constante, no período de 03/05/08 a 27/11/08, na Fazenda Experimental da UFMT, em Santo Antônio do Leverger – MT. 51

Figura 23 – Transpiração de plantas de nim, parametrizada pela área foliar e Evapotranspiração de referência sobre gramado, em lisímetros de nível do lençol freático constante (L1= , L2= , L3=), no período de 03/05/08 a 27/11/08, na Fazenda Experimental da UFMT, em Santo Antônio do Leverger – MT. 52

Figura 24 – Relação da transpiração, determinada pelo método parametrizado e a transpiração medida em lisímetro de nível do lençol freático constante, no período de 03/05/08 a 27/11/08, na Fazenda Experimental da UFMT, em Santo Antônio do Leverger – MT.....54

Figura 25 – Curso da radiação global incidente (Rg), densidade de Fluxo de seiva obtido pelo método de Granier (FS), umidade relativa (UR) e temperatura (T), em dois dias consecutivos (DJ=189 e DJ=190). O primeiro, parcialmente nublado e o segundo, com céu claro, na Fazenda Experimental da UFMT, em Santo Antônio do Leverger – MT.....56

Figura 26 –Fluxo de seiva medido em plantas de nim pelo método do balanço de calor no caule ( ) e transpiração medida em lisímetro de nível do lençol freático constante (Lisímetro 1=), no período de 07/06/2008 a 21/06/2008 (planta 2) e 21/06/2008 a 03/07/2008 (planta 3), na Fazenda Experimental da UFMT, em Santo Antônio do Leverger – MT. 57

Figura 27 – Relação dos valores de fluxo de seiva, determinada pelo método do balanço de calor no caule e transpiração medida em lisímetro de nível do lençol freático constante, na Fazenda Experimental da UFMT, em Santo Antônio do Leverger – MT. 58

Figura 28 –Fluxo de seiva medido em plantas de nim pelo método de Granier (planta 1= , planta 3=) e transpiração medida em lisímetro de nível do lençol freático constante (Lisímetro 1=), no período de 03/07/2008 a 19/07/2008, na Fazenda Experimental da UFMT, em Santo Antônio do Leverger – MT. 59

Figura 29 – Relação dos valores de fluxo de seiva, determinada pelo método de Granier e transpiração medida em lisímetro de nível do lençol freático constante, no período de 03/07/2008 a 19/07/2008, na Fazenda Experimental da UFMT, em Santo Antônio do Leverger – MT. 60

Figura 30 – Fluxo de seiva na planta 3 do lisímetro 1, determinado pelo método do balanço de calor (—•—) e pelo método de Granier (—▫—), no período de 03/07/2008 a 19/07/2008, na Fazenda Experimental da UFMT, em Santo Antônio do Leverger – MT. 61

Figura 31 – Relação dos valores de fluxo de seiva na planta 3 do lisímetro 1, determinada pelo método do balanço de calor e pelo método de Granier, no período de 03/07/2008 a 19/07/2008, na Fazenda Experimental da UFMT, em Santo Antônio do Leverger – MT. 62

RESUMO

SEIXAS, G. B. **DETERMINAÇÃO DA TRANSPIRAÇÃO EM PLANTAS DE NIM INDIANO (*Azadirachta indica* A. Juss) UTILIZANDO MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE FLUXO DE SEIVA.** Cuiabá, 2009. 71 f. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental), Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso.

O consumo de água de plantas de nim cultivadas em lisímetros foi avaliado sob condições de cerrado. O experimento objetivou estudar a transpiração máxima diária de nim e foi realizado na Fazenda Experimental da UFMT, em Santo Antônio do Leverger – MT, em 2008, por meio de quatro métodos: a) lisímetro de nível constante de lençol freático; b) transpiração parametrizada pela evapotranspiração de referência e área foliar; c) fluxo de seiva com o método do balanço de calor no caule; e d) fluxo de seiva com o método da sonda de dissipação térmica ou método de Granier. As medidas lisimétricas foram feitas em nove plantas, sendo três em cada lisímetro. A área foliar total nos lisímetros variou de 0,18 m^2 a 8,181 m^2 durante o experimento. O consumo de água medido através dos lisímetros variou entre 0,027 L dia^{-1} e 17,293 L dia^{-1}, com média de 4,831 L dia^{-1}. A demanda atmosférica, representada pela evapotranspiração de referência, foi determinada com dados obtidos na estação agrometeorológica, situada ao lado da unidade experimental. A transpiração das plantas de nim aumentou com o incremento da área foliar e respondeu linearmente à evapotranspiração de referência. Ao comparar-se a transpiração parametrizada e as medidas lisimétricas do consumo de água, verificou-se subestimativas de 28%, 13,5% e 29,5% em relação aos lisímetros 1, 2 e 3, respectivamente. A transpiração pelo fluxo de seiva foi medida nas plantas do lisímetro 1, pelo método de balanço de calor e pelo método de Granier. Os dois métodos térmicos foram comparados com a medida da transpiração pelo método lisimétrico. A transpiração obtida a partir de medidas de fluxo de seiva com o

método do balanço de calor, superestimou os valores encontrados no lisímetro em 18%. A transpiração obtida com o método de Granier subestimou os valores encontrados no lisímetro em 25%. Na avaliação dos métodos de estimativa de fluxo de seiva, foi encontrado um desempenho muito bom quando o método de Granier foi comparado ao do balanço de calor. Os resultados do estudo indicaram que a transpiração das plantas de nim foi influenciada pelas variáveis ambientais e pode ser determinada pela estimativa do fluxo de seiva obtida pelo método do balanço de calor no caule e pelo método de Granier.

Palavras-Chave: Granier, balanço de calor, consumo de água

ABSTRACT

SEIXAS, G. B. **Transpiration estimate of Neem trees (*Azadirachta indica* A. Juss) using sap flow methods.** 2009. 71 f. Dissertation (Master's degree in Environmental Physics) - Institute of Physics, Federal University of Mato Grosso, Cuiabá, 2009.

.

There are many methods to measure of water consumption by the plants with peculiar limitations, mainly regarding the perennial species. The reliability level of the daily measures could be made by the estimates of the daily transpiration of the plants in the field conditions. Studies of the maximum daily transpiration of neem *(Azadirachta indica* A. Juss,*)* in the Brasilian savanna conditions, Fazenda Experimental of the UFMT, from Santo Antônio do Leverger – MT, in 2008, were analyzed by four methods: a) lysimeter; b) parametrized transpiration for the reference evapotranspiration; c) heat balance and d) Granier method. The measures lysimeters were made in nine trees being three in which lysimeter. The transpiration by the sap flow was measured in a lysimeter by heat balance and Granier´s method. Two mensurement direct methods of transpiration were compared with the transpiration estimate by lysimetric method. The leaf area variation was 0,18 to 18,181 m² and the lysimeters measures presented variations from 0,027 to 17,293 L dia^{-1}, with an average of 4,831 L dia^{-1}. The atmospheric demand indicated by the reference evapotranspiration was determined from the data obtained in agrometeorological station beside the experiment. The neem plants transpiration increased as the leaf area increased and showed a linear response with the reference evapotranspiration. The parametrized transpiration estimates was compared with

lysimetric mensures of de water consumption and underestimated the value find by the lysimeter 1 in 28%, lysimeter 2 in 13,5% and lysimeter 3 in 29,5%. The transpiration obtained with the sap flow heat balance method superestimated the value find by the lysimeter in 18%. The transpiration obtained with the Granier method underestimated the value find by the lysimeter in 25%. In the evaluation of the sap flow methods, it was found a good agreement when the Granier´s method was compared to the heat balance method. The results of this study indicate that neem plants transpiration was influenced from environmental variables and Granier´s sap flow method and heat balance method are suitable to estimate the transpiration in neem trees.

Keywords: Granier, heat balance, water consuption

1 INTRODUÇÃO

O nim (*Azadirachta indica* A. Juss.), assim como o mogno e cedro, é uma planta arbórea pertencente a família Meliaceae. A sua origem está localizada na região sul e sudeste da Ásia. Hoje, árvores de nim também ocorrem em áreas tropicais e subtropicais da África, América e Austrália. O nim, também chamado nim indiano, por ser facilmente encontrado em diversas regiões da Índia, é um planta sempre verde, ou decídua, de crescimento rápido, podendo atingir 25 metros de altura.

Durante os últimos 20 anos o nim tem sido introduzido em muitos países não somente para produção de boa madeira para a indústria moveleira, mas também para produção de postes, de biomassa para geração de energia, e também para a arborização de vias urbanas e reflorestamento. Seus frutos, sementes, óleo, folhas, casca do caule e raízes têm os mais variados usos na área farmacológica. Várias substâncias são extraídas do óleo de nim, sendo o azadiractin o princípio ativo predominante e largamente utilizado na preparação de vários produtos cosméticos, farmacêuticos e inseticidas.

O nim foi introduzido no Brasil a partir de 1993, sendo os primeiros plantios, em nível experimental, estabelecidos na região do cerrado do estado de Goiás. Ele é tolerante a temperaturas elevadas de curta duração e também a períodos de seca. Contudo, não tolera geadas.

Nas regiões norte e nordeste do Brasil, a espécie vem sendo plantada em pequena escala em condições pluviométricas com médias anuais que vão desde 600 mm até 2200 mm.

O crescimento do interesse de produtores rurais e pesquisadores pelo cultivo do nim no Brasil tem sido promovido, em especial, pela característica bioinseticida dessa planta.

A não agressão ao meio ambiente tem sido um importante requisito para sustentar negócios no mercado internacional de alimentos. Nesse contexto, a

produção de alimentos orgânicos, sem resíduos químicos, tem modificado o comportamento dos agricultores quanto ao uso indiscriminado de agrotóxicos.

Aliado a isso, o aumento de resistência das pragas aos diversos tipos de pesticidas tem estimulado os agricultores na busca por novas opções para controle de pragas e doenças na agricultura. Então, o potencial do nim como inseticida natural, surge como uma importante alternativa.

Por isso, com a expansão do cultivo do nim para regiões que possibilitam maior produtividade e rentabilidade econômica, a produção passa a ser cada vez mais dependente da complementação hídrica, procurando-se evitar a ocorrência de deficiência hídrica severa em fases fenológicas críticas da planta.

Nesse contexto, a irrigação é um fator decisivo para se obter alta produtividade e qualidade da fitomassa produzida, obrigando os produtores a adotarem esta prática para garantir sua competitividade. Por outro lado, verifica-se a necessidade de implantação de medidas que venham a racionalizar o uso de água na agricultura.

O Centro-Oeste, mais especificamente o Cerrado, possui uma estação seca e uma estação chuvosa bem definida, o que promove características específicas na fenologia e na produção de fitomassa das plantas em cada estação.

Uma alternativa a essa realidade é o uso de sistemas de irrigação, os quais criam condições de controle do ritmo biológico de crescimento e desenvolvimento das plantas, e poderiam estimular o crescimento do cultivo do nim indiano como fonte de renda em Mato Grosso. Contudo, determinar o volume de água a ser aplicado em cada planta é um problema recorrente no planejamento e manejo da irrigação. A solução, então, é conhecer o consumo e a necessidade de água das plantas de nim por meio da avaliação da transpiração e da umidade do solo.

A transpiração das plantas é regulada pelas características biológicas e de vários parâmetros ambientais como a radiação solar, temperatura e umidade do ar, velocidade do vento, área foliar das plantas, quantidade de água no solo, entre outros.

Alguns métodos térmicos, já desenvolvidos e testados, são capazes de determinar diretamente a quantidade de água consumida por uma planta lenhosa, como é caso do nim.

A determinação da transpiração em plantas de nim pode ser feita com medidas de fluxo de seiva, baseadas em métodos térmicos, entre os quais estão o de balanço de calor no caule e o da sonda de dissipação térmica. Estes métodos podem ser aplicados diretamente no campo sem alterar as condições fisiológicas e microclimáticas da planta. Contudo, as pesquisas sobre fluxo de seiva, utilizando métodos térmicos, têm sido desenvolvidas com sensores importados e de alto custo. Daí a importância de iniciativas no sentido de dominar o processo de fabricação de sondas/sensores de dissipação térmica, viabilizando seu uso na pesquisa regional.

Considerando a carência de informações sobre as relações hídricas das plantas de nim, o presente trabalho objetivou: determinar a transpiração de plantas de nim por meio do método da lisimetria; verificar a influência das variáveis ambientais na transpiração destas plantas; determinar a transpiração por meio do método de balanço de calor no caule; determinar a transpiração por meio do método da sonda de dissipação térmica (Granier); avaliar o desempenho dos métodos de dissipação térmica na estimativa de fluxo de seiva.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DO NIM

2.1.1 Aspectos botânicos, distribuição geográfica e ocorrência natural

O nim indiano *(Azadirachta indica* A. Juss.) é uma espécie de valor econômico, de uso múltiplo e, assim como o mogno, pertencente à família Meliaceae. Esta espécie é originária das regiões áridas do subcontinente indiano e zonas secas do Sul e Sudeste da Ásia.

Por ser originário de clima tropical, o nim pode se adaptar ao clima subtropical e crescer em locais com altitude entre 50 metros e 100 metros, bem como se desenvolver em locais com altitude de até 1.500 metros (MARTINEZ, 2002). Segundo este autor, o nim é resistente à seca, cresce em diferentes tipos de solos, porém, desenvolve-se melhor em solos arenosos, não ácidos.

O nim desenvolve-se bem em temperaturas entre 20 ºC e 32 ºC e em regiões com precipitação pluviométrica anual de 130 mm, considerada suficiente para seu desenvolvimento e crescimento (GRUBER, 1992). O nim tem grande capacidade de adaptação, podendo se desenvolver em regiões com temperatura que varia entre 8 °C e 40 °C e com solos profundos (LAREDO, 2003). Para este autor, quanto mais quente for à região, mais rápido será o crescimento do nim.

Em regiões áridas e semi-áridas, com precipitação anual de 500 mm ou inferior, o nim pode crescer sem irrigação, porém não suporta solo encharcado e ácido (BRARDWAI & CHAND, 1995).

Devido a isso, esta meliácea vem sendo cultivada em diversos países da Ásia, África, Austrália, América do Sul e Central (SINGHAL, 2000). Na Índia, o nim é usado há séculos, principalmente, como planta medicinal. As sementes do nim produzem uma substância oleaginosa que é utilizada na fabricação de medicamentos de uso humano, como: creme para pele, xampus, sabonetes e creme dental (BUZA et al., 2001).

O extrato dessa meliácea possui alto poder inseticida, podendo alcançar até 90% de sucesso no controle agroecológico de pragas, favorecendo a sustentabilidade econômica dos plantios. As folhas do nim também são utilizadas por veterinários na ração animal, como vermífugo (NEVES et al., 1996). Estes produtos, quando comparados aos extratos de fumo e de timbós, são considerados biodegradáveis e de baixa toxicidade ao homem e ao ambiente, daí serem utilizados na agricultura orgânica (MAIA, 2005).

Martinez (2002) relata que as primeiras pesquisas do nim como inseticida foram realizadas no Brasil em 1986, pelo Instituto Agronômico do Paraná - IAPAR, em Londrina-PR. Para tanto, foram utilizadas sementes oriundas das Filipinas, as quais foram introduzidas em outros municípios brasileiros.

A madeira do nim, por sua vez, apresenta características semelhantes às de mogno, sendo empregada amplamente na fabricação de compensados, móveis em geral, construção de embarcações e na construção civil e rural (BUZA et al., 2001). A madeira do nim tem a vantagem de não ser suscetível ao ataque de cupins, devido ser rica em tanino (NEVES et al.,1996).

Por apresentar alta capacidade de crescimento e não exigir solos com alta fertilidade, o nim tem sido indicado para reflorestamento em áreas degradadas (MISHRA, 1995). Devido ao seu uso múltiplo, esta meliácea está sendo introduzida extensivamente nas regiões áridas da Índia e da África, por meio de programas de reflorestamento. Além destas regiões está sendo cultivado nos Estados Unidos, nas ilhas do Caribe, América Central e América do Sul (GRUBER, 1992; RANGEL & SANTANA, 1997; MARTINEZ, 2002).

No Brasil, o nim vem sendo cultivado em alguns estados e, em geral, tem sido utilizado pelos agricultores no combate a diversas pragas e doenças que atacam plantas e animais.

No Pará, esta espécie está sendo cultivada em sistemas agroflorestais estabelecidos em áreas de agricultura familiar (OHASHI et al., 2002).

O extrato de nim vem sendo obtido de suas folhas e sementes. Esta meliácea enquadra-se num grande conjunto de espécies arbóreas ou arbustivas de uso múltiplo, pois fornece produtos não-madeireiros e madeireiros, bem como proporciona benefícios ambientais seja na forma de florestas ou por meio de plantios agroflorestais (MAIA, 2005). Considerando a larga aplicação do nim, o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA tem fomentado sua exploração e comercialização no Brasil (RAMOS, 2002).

2.1.2 Características dendrológicas e fenológicas

O nim indiano é uma espécie de crescimento rápido, e em condições favoráveis o nim, cresce de 4 m a 7 m de altura nos primeiros cinco anos, e de 5 m a 11 m durante os cinco anos seguintes (MARTINEZ, 2002). O nim produz uma madeira avermelhada, dura (a densidade da madeira varia entre 0,56 g/cm³ a 0,85 g/cm³) e resistente ao ataque de cupins e ao apodrecimento por fungos. O cerne da madeira do nim é muito rico em tanino e sais inorgânicos de cálcio, potássio e ferro (NEVES et al., 1996). Normalmente, o nim apresenta fuste reto e, aos oito anos de idade, apresenta diâmetro entre 25 cm a 30 cm. O sistema radicular do nim atinge uma profundidade de 15 m, tendo a capacidade de extrair nutrientes do solo, podendo resistir longos períodos de seca. Assim, quando cultivado o nim apresenta boa performance em termos vegetativo e reprodutivo (RANGEL & SANTANA, 1997). As folhas são verde-escuras, compostas, imparipenadas e aglomeradas com freqüência nos extremos dos ramos simples e sem estípulas (NEVES, 2003).

Segundo Falesi et al. (2000), esta espécie inicia o processo de floração, a partir de dois a três anos de idade. As flores são esbranquiçadas e aromáticas, com estames crescentes reunidas em inflorescências densas, com 25 cm de comprimento, encontrando-se tanto flores masculinas como hermafroditas, na mesma planta (SODEPAZ, 2006).

O fruto de nim é uma baga ovalada com 1,5 a 2,0 cm de comprimento e, quando maduro, apresenta polpa amarelada doce e comestível e casca (tegumento)

branca dura contendo um óleo marrom no interior (NEVES, 2003). Para Abreu Júnior (1998), a produção de frutos do nim, em algumas plantas, tem inicio aos dois anos de idade, porém para a produção comercial só ocorre após o terceiro ano.

2.2 TRANSPIRAÇÃO DAS PLANTAS

O suprimento de água para uma cultura resulta de interações que se estabelecem ao longo do sistema solo-planta-atmosfera. As influências recíprocas entre esses componentes básicos tornam o sistema dinâmico e fortemente interligado, de tal forma que a condição hídrica da cultura dependerá sempre da combinação desses três segmentos. A medida em que o solo seca, torna-se mais difícil às plantas absorver água, porque aumenta a força de retenção e diminui a disponibilidade de água no solo às plantas. Entretanto, quanto maior for a demanda evaporativa da atmosfera mais elevada será a necessidade de fluxo de água no sistema solo-planta-atmosfera (SANTOS & CARLESSO, 1998).

Neste contexto, a transpiração consiste na vaporização da água líquida contida nos tecidos da planta e da remoção do vapor para a atmosfera. As culturas perdem predominantemente água através dos estômatos. A água e os nutrientes são absorvidos pelas raízes e transportados através da planta. A vaporização ocorre no interior da folha, nos espaços intercelulares, e a troca de vapor com a atmosfera é controlada pela abertura estomatal. A maioria da água absorvida é perdida pela transpiração, sendo utilizada uma pequena fração no interior da planta (REICHARDT & TIMM, 2004).

A taxa de perda de água pelas folhas é afetada por interação entre fatores do ambiente e da própria planta. Os fatores do ambiente não atuam somente de forma direta sobre a perda de água, mas também podem exercer sua ação indiretamente através do efeito controlador sobre o comportamento estomático, como acontece com a luz, a umidade do ar, o vento, as condições hídricas e térmicas do solo.

Dentre os fatores ambientais, tem-se verificado, sob boa disponibilidade hídrica do solo, que a umidade relativa é importante para o mecanismo estomático e consequentemente à transpiração, visto que os gradientes de pressão de vapor entre folha e ar representam a força motriz para o fluxo de vapor.

Existem numerosas observações de que a condutância estomática diminui em resposta a um aumento do déficit de pressão de vapor entre a folha e o ar, e que a resposta está relacionada à taxa de transpiração foliar (SCHULZE, 1993, YONG et al., 1997).

Sinclair & Allen (1982), verificaram que para ampla faixa de déficit de pressão de vapor, aconteciam os máximos de transpiração, indicando que a planta limita a transpiração das folhas à máxima taxa que o sistema radicular pode suprir de água às folhas.

Sarmiento et al. (1985), concluíram que a transpiração das espécies lenhosas depende mais das condições atmosféricas do que da disponibilidade de água no solo.

Meinzer et al. (1999), estudando a regulação da transpiração em quatro espécies arbóreas sempre-verdes, em um cerrado sensu strictu do Distrito Federal, observaram um rígido controle da transpiração, via um controle estomático pronunciado, levando à limitações no fluxo de seiva, tanto na estação seca como na estação chuvosa.

Silva & Lemos Filho (2001), avaliaram as relações hídricas em função da demanda evaporativa do ar em cinco espécies arbóreas, concluindo que, para as espécies estudadas, os valores de condutância estomática apresentaram decréscimo nos horários de maior demanda evaporativa do ar.

Angelocci et al. (2004), trabalhando com lima ácida 'Tahiti' irrigada, relataram que o decréscimo na condutância foliar e transpiração a partir de maio até outubro foi uma conseqüência dos efeitos da temperatura do ar e do déficit de pressão de vapor, concluindo que, mesmo sob condições de boa disponibilidade de água no solo, as trocas gasosas foram limitadas pela regulação estomática decorrentes da baixa umidade do ar.

2.3 EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA

A evapotranspiração de referência (ETo) é um processo de perda de água para a atmosfera através de uma superfície natural, padrão, sem restrições hídricas às necessidades da evaporação e da transpiração. A ETo em condições normais depende

principalmente do suprimento de energia, aliado aos fatores climáticos (SMITH et al, 1991).

Doorenbos & Pruitt (1977), determinaram que a "grama" seria a cultura de referência e definiram a evapotranspiração de referência como sendo aquela que ocorre em uma superfície extensa de gramíneas, com oito a quinze centímetros de altura, uniforme, de crescimento ativo, sombreando totalmente o solo, sem restrição de água para as plantas.

Smith et al. (1991), apresentaram condições bem específicas para a ETo. Consideraram que a ETo é a taxa de evapotranspiração que ocorre na cultura hipotética de referência com altura de 12 cm, resistência do dossel vegetativo de 69 s m^{-1}, albedo de 23%, em fase de pleno desenvolvimento vegetativo e sem restrições de água.

Campelo Júnior (1985), descreveu a evapotranspiração potencial ou de referência como uma medida da demanda hídrica atmosférica, representando o efeito das condições climáticas sobre as necessidades hídricas das culturas, uma vez que o efeito do estádio da planta é obtido considerando-se principalmente a área foliar.

Allen et al. (1989) obtiveram uma equação simplificada que é denominada equação FAO Penman-Monteith, que necessita dos mesmos dados climáticos que a equação clássica de Penman, facilitando sua aplicação.

A utilização do método de Penman-Monteith em inúmeros trabalhos de pesquisa tem evidenciado sua confiabilidade e resultados superiores aos demais métodos, podendo ser utilizado para a estimativa da evapotranspiração para diversos intervalos de tempo.

2.4 LISÍMETROS

Os lisímetros vêm sendo utilizados há cerca de 300 anos (Aboukhaled et al., 1986) e, sem dúvida alguma, continuam sendo considerados, até o presente, como a principal ferramenta para estudos de evapotranspiração. O conhecimento da quantidade de água consumida durante o ciclo de uma determinada cultura, permite adequar o manejo do sistema de irrigação, evitando excessos e déficits.

O lisímetro é um tanque ou tambor que pode ser construído de diversos materiais, preenchido com solo ou substrato, onde se cultiva a planta em estudo, podendo apresentar uma superfície nua ou coberta por vegetação transpirante.

Os lisímetros podem apresentar diversos formatos e tamanhos sendo classificados de acordo com a maneira como são feitas as medições. Assim, podem ser de pesagem, de drenagem, de lençol freático constante e de flutuação.

Silva et al. (1999) classificam os tipos de lisímetro em categorias:

- Não-pesáveis, com lençol freático de nível constante;

- Não-pesáveis, com drenagem livre;

- Pesáveis, em que a variação de massa do sistema é determinada por um mecanismo de pesagem.

Para Silva et al. (2003), a forma e área dos lisímetros devem ser definidas a partir do tipo de cultura a ser utilizada, principalmente em função do sistema radicular.

O uso de lisímetros é comum para culturas de pequeno porte e de ciclo anual. O sistema radicular destas plantas é mais superficial, permitindo o uso de lisímetros de menor tamanho e de fácil manejo.

Aboukhaled et al. (1982) orientam sobre as condições de projeto de lisímetros:

- O lisímetro deve ser grande e profundo, para evitar efeito de “limite” e restrição de desenvolvimento das raízes;
- As condições físicas dentro do lisímetro devem ser comparáveis com as de fora;
- A altura da planta, a densidade e o arranjo devem ser similares, dentro e fora do lisímetro.

Os lisímetros permitem determinar diretamente a evapotranspiração. Podem ser usados para determinar a evapotranspiração de uma cultura, a evaporação do solo ou a transpiração da planta (CAMPELO JÚNIOR, 2000). Este tanque ou tambor possui um sistema de drenagem que permite medir a água que percola (ABOUKHALED et al., 1982; KHAN et al. 1993; REICHARDT & TIMM, 2004).

Diversos autores consideram os lisímetros de pesagem como sendo o melhor equipamento disponível para medir, de forma acurada, a evapotranspiração das

culturas, entre eles Aboukhaled et al. (1982). Os lisímetros de pesagem são os mais precisos para cálculos de evapotranspiração em períodos menores que um dia, os quais determinam diretamente a evapotranspiração (ET) pelo balanço de massa de água, ao contrário de outros tipos de lisímetros, que a determinam indiretamente, pelo balanço de volume.

No Brasil, Silva et al. (1999) e Faria et al. (2006) calibraram e testaram lisímetros de pesagem sobre células de carga. Esses autores encontraram boa concordância entre variações de massa e leituras dos sinais das células de carga, indicando a alta precisão dos dispositivos utilizados.

O lisímetro de lençol freático constante, de uso mais difundido no Brasil, é o método mais utilizado para determinação do valor de evapotranspiração máxima (ETM). Para este tipo de lisímetro, é mantido constante o nível freático na parte inferior do tanque. Ocorrendo a evapotranspiração, a água do nível freático se desloca para a zona radicular por capilaridade. O decréscimo do nível freático, causado por este deslocamento, é compensado automaticamente por um dispositivo de alimentação, sendo que a quantidade de água necessária para repor seu nível é medida em um reservatório de abastecimento (VILLA NOVA & REICHARDT, 1989).

Allen et al. (1991) afirmaram que, quando as medidas do lisímetro diferem das estimativas feitas por modelos com forte base física, como o de Penman-Monteith FAO 56, é possível que o dispositivo lisimétrico não esteja representando as condições ambientais de estudo.

2.5 ESTIMATIVA DA TRANSPIRAÇÃO PELA MEDIDA DO FLUXO DE SEIVA

Os métodos de medidas do fluxo de seiva só permitem conhecer um dos componentes da evapotranspiração, a transpiração, mas permite acompanhar o funcionamento hídrico das plantas no seu meio ambiente natural e em condições não perturbadas, durante períodos prolongados (dias a meses). Em relação aos métodos micrometeorológicos, apresentam a vantagem de poder aplicar a vários níveis (do ramo à planta inteira) e de não requererem parcelas uniformes.

A estimativa da transpiração de espécies arbóreas em coberturas vegetais no campo tem sido feita, preferencialmente nos últimos anos, pelo uso de métodos de fornecimento de calor ao caule, por uma das seguintes três técnicas: “pulso de calor” (MARSHALL, 1958), “balanço de calor” (SAKURATANI, 1981) e “sonda de dissipação térmica” (GRANIER, 1985).

2.5.1 Medida da transpiração pelo método de balanço de calor no caule (BCC)

O método de balanço de calor no caule consiste no balanço de energia de um segmento do caule ou tronco o qual é aquecido por um aquecedor elétrico de forma constante. O calor transmitido pelo aquecedor é subtraído pelas perdas, por condução axial e radial. O saldo desse balanço é o calor transportado por convecção pela seiva no xilema. O fluxo volumétrico de seiva está associado ao calor transportado convectivamente (CERMAK et al., 1973; SAKURATANI, 1981).

A primeira versão do método de balanço de calor foi proposta por Cermak et al. (1973) e procurava manter constante a temperatura interna de um sensor, através de um sistema eletrônico relativamente complexo que variava a potência aplicada (calor transmitido) ao segmento do caule de acordo com a taxa de transpiração.

Visando tornar o método mais simples para construção e com menor custo Sakuratani (1981) desenvolveu uma nova versão do sensor. A principal alteração proposta foi da aplicação de uma potência constante, o que retira o sistema eletrônico, tornando apenas necessário um sistema de corrente constante para alimentação dos sensores de fluxo.

Baker & Van Bavel (1987) aplicando algumas modificações às equações do método, diminuíram o número de canais analógicos necessários às medidas de fluxo de seiva. A desvantagem dessa modificação está na limitação da avaliação do desempenho dos sensores através da verificação da variação das temperaturas envolvidas no cálculo de fluxo. Contudo, atualmente esta é a forma mais usada pelos pesquisadores.

O método de balanço de calor no caule destaca-se, entre os outros métodos de determinação de fluxo de seiva, por apresentar algumas características importantes, dentre elas, a de ser um método absoluto, dispensando procedimentos de calibração e

baixo custo de produção (ANGELOCCI, 1995). Entretanto, se não forem tomadas algumas precauções no momento de sua instalação na árvore, o método de balanço de calor no caule pode fornecer erros nas medidas, como a manutenção de uma potência de entrada constante, a retirada da casca morta da árvore e a determinação da condutividade térmica da cortiça usada no sensor (GRIME & SINCLAIR, 1999). O gradiente de temperatura depende de um bom contato térmico entre o caule e o termopar (WEIBEL & DE VOS, 1994; HAM & HEILMAN, 1990).

A potência também é uma fonte de erro, como foi constatado por Weibel & De Vos (1994) os quais afirmaram terem encontrado dificuldades em manter de forma constante a potência de entrada do sistema. Uma alternativa é a instalação de um sistema eletrônico de regulação de tensão. Também em função da magnitude da potência de entrada, esta pode fornecer um aquecimento excessivo e matar a planta estudada. Outra observação encontrada nesse trabalho foi que o sensor deve ser instalado a uma altura de 30 cm da superfície do solo para minimizar possíveis influências na temperatura do fluxo de seiva devido à condução da energia térmica estocada no solo.

O sensor depende de um tempo para entrar em equilíbrio térmico com o caule, dependendo da espécie de planta. Weibel & De Vos (1994) trabalhando com macieiras, observaram que, quando o intervalo de tempo de medida é menor que uma hora, são detectados erros consideráveis na medida de fluxo de seiva pelo método de balanço de calor. Quando esses intervalos são maiores que 24 horas o erro é de 4%, enquanto que a curto intervalo de tempo (30 min) esses erros podem chegar até 20%.

A inadequada instalação dos termopares que medem a variação de temperatura no caule pode ser uma fonte de erro deste método. Em alguns casos, os termopares utilizados para medir o gradiente de temperatura axial são introduzidos no tronco, no interior de um pequeno tubo (sonda). Nesse caso a fixação dos termopares de forma adequada é dificultosa.

Apesar da existência de sensores comerciais de balanço de calor no caule, por diversos motivos, como preço e o tamanho do aquecedor, necessário para ajustar ao segmento do caule, muitos pesquisadores preferem construir seu próprio sensor, podendo haver desconsideração de certos cuidados preconizados na confecção do

mesmo. Por esse motivo alguns erros são introduzidos ao método, como a superestimativa ou subestimativa dos valores de fluxo de seiva .

No momento, este método ainda é considerado apenas como uma ferramenta nas pesquisas e sua aplicabilidade tem sido testada em várias espécies de planta. Muitas pesquisas estão sendo realizadas com o objetivo de avaliar seu desempenho em condições de campo para aperfeiçoar o método e melhorar a exatidão das medidas em plantas que ainda não foram estudadas.

Trejo-Chandia (1997) e Smith & Allen (1996) comparando os valores de fluxo de seiva com lisímetros de pesagem, afirmam que mesmo tomando todas as precauções, normalmente estima-se uma margem de erro abaixo de 10%.

Ham & Heilman (1990) trabalhando com girassol, compararam os resultados obtidos com o sensor de balanço de calor aos resultados obtidos com balança de pesagem, obtendo resultados satisfatórios com o sensor de fluxo de seiva, com uma superestimativa nas primeiras horas do dia no momento em que a seiva começa a movimentar.

Herzog et al. (1997) trabalhando com plantas de diâmetro do caule até 18 mm, realizaram uma comparação entre duas formas de fornecimento de energia térmica ao sensor: a variável, com aquecimento interno do caule segundo Cermak et al. (1973) e a constante, com aquecimento externo do caule proposto por Sakuratani (1981). Os resultados foram satisfatórios com esta última forma, desde que a área do caule seja isolada termicamente, e não somente a área do sensor propriamente dita.

Baker & Nieber (1989) e Shackel et al. (1992) trabalhando com plantas em condições de campo, observaram distorções nas medidas de fluxo de seiva comparadas com lisímetros. Entretanto, esses erros foram atribuídos à medida do aquecimento da seiva durante sua passagem pelo sensor, o que foi corrigida com a colocação de uma proteção adjacente ao corpo do sensor, com a finalidade de se evitar a incidência de radiação solar direta sobre ele, mas que permitisse a circulação de ar e manutenção do equilíbrio térmico do sensor com o ambiente. Esses autores também observaram que quando os sensores são instalados em plantas que mantém o sombreamento do sensor em horários mais quentes do dia, os erros de medida são expressivamente minimizados. A instalação de um sensor sem aquecimento com o objetivo de monitorar os erros de medida causados pelo ambiente, também foi um

aspecto interessante deste trabalho. Assim, foi possível quantificar a influência ambiental sobre os sensores através do cômputo dos erros de medida para diversas condições micrometeorológicas. Os resultados de fluxo de seiva obtidos pelos citados autores, foram comparados com balança eletrônica de pesagem, verificando que o desempenho do método esteve próximo do ideal.

Outra restrição ao uso do método de balanço de calor no caule para medida de fluxo de seiva é o tempo que o sensor pode permanecer instalado no caule em condições de campo. Devido ao isolamento térmico do segmento do caule envolvido, a água transpirada através da epiderme condensa e acumula-se naquele setor do caule sob o sensor. Isto pode afetar certas características físicas previamente estabelecidas, como a condutividade calorífica do fluxímetro e o calor específico do segmento, o que em conseqüência pode prejudicar a medida. Por outro lado, criam-se condições favoráveis para a infestação e desenvolvimento de fungos e insetos, que podem danificar tanto o sensor como a própria planta, além de interferir na medida. Em período chuvoso, o tempo de permanência do sensor no campo diminui consideravelmente. Esta inconveniência pode limitar as análises dos dados, por exemplo, caso ela tenha que ser relacionada com medidas meteorológicas, já que para isso é desejável contar com dados contínuos por um período grande de tempo (ROJAS, 2003).

A irregularidade do tronco de algumas espécies de plantas pode causar uma limitação ao método de balanço de calor no caule, sendo necessário a instalação do sensor em ramos primários selecionados. O tempo gasto na confecção e o tedioso trabalho que ela representa devem ser levados em consideração, caso se queira construí-lo (MARIN et al., 2001).

Em plantas lenhosas, desde que sejam tomadas as devidas precauções para se evitar as fontes de erro, o método de balanço de calor caulinar tem se mostrado eficiente na determinação de fluxo de seiva, e valores integrados para períodos maiores ou iguais a 24 h representam a transpiração diária, desde que as condições de disponibilidade de água no solo sejam capazes de suprir as necessidades hídricas da planta (STEINBERG et al., 1989; GUTIÉRREZ et al., 1994).

2.5.2 Medida da transpiração pelo método da sonda de dissipação térmica (SDT) ou método de Granier

O método de Granier (sonda de dissipação térmica) consiste em fornecimento de calor, por meio de uma fonte regulável de energia elétrica e de potência constante no interior do caule, pelo uso de uma sonda e relaciona o transporte convectivo deste calor com o fluxo de seiva. Para isto são necessárias duas sondas com junção de termopar de cobre e constantan, verificando a diferença de temperatura do caule no ponto do aquecimento e outro abaixo, e assim obter uma temperatura diferencial, sendo esta dependente da velocidade de seiva (Granier, 1985; Granier, 1987). De acordo com Rojas (2003), no período de um dia, a máxima diferença de temperatura entre os dois pontos de medida significa que o fluxo de seiva é mínimo ou nulo, enquanto que a mínima diferença significa uma taxa máxima de fluxo de seiva através dessa área de transporte.

A grande vantagem do método de Granier é a facilidade de confecção e instalação do sensor, quando comparado com outros métodos térmicos (BRAUN, 1997).

Granier (1985) propôs uma relação entre a densidade de fluxo de seiva u (10^{-6} m s^{-1}) e um fator k característico de cada espécie vegetal. Trabalhando com três espécies lenhosas (*Pseudotsuga menziesii, Pinus nigra* e *Quercus pedunculata*) este autor encontrou a seguinte relação:

$$k = \frac{(\Delta T_m - \Delta T)}{\Delta T} \quad = \quad 0{,}0206\ U^{0{,}8124} \qquad R^2 = 0{,}96 \qquad (1)$$

sendo, ΔT_m (ºC) a diferença máxima de temperatura entre os dois pontos de medida, que normalmente acontece durante a madrugada e ΔT (ºC) a diferença de temperatura real.

Essa relação é transformada na Equação 2, para se ter o fluxo de seiva F (m^3 s^{-1}) em qualquer espécie lenhosa, conforme recomendação do introdutor do método:

$$F = 118{,}99 \cdot 10^{-6} \cdot k^{1{,}231} \; SA \qquad (2)$$

em que, SA é a área do lenho condutor da seiva bruta, dada em m^2, normalmente considerada a área ocupada pelo xilema e k calcula-se através da Equação 1 a partir das medidas térmicas registradas através do sensor.

Outros autores como Cabibel & Do (1991), utilizando 4 espécies de plantas e Köstner et al. (1998), utilizando 6 espécies de plantas, encontraram relações muito próximas a de Granier. Por esta razão, os autores preferem utilizar a equação original de Granier como padrão para qualquer planta lenhosa.

Essa técnica também é passível de erros de medida, sendo uma delas a existência do gradiente natural térmico no caule, quando o sensor é instalado muito próximo do solo (CABIBEL & DO, 1991; LUNDBLAD et al., 2001). Rojas et al. (2003), citado por Karasawa (2004), observaram uma sub-estimativa acima de 50% no fluxo de seiva em cafeeiro do cultivar Mundo Novo Apuatã de 6 anos de idade em Piracicaba e segundo eles, a principal causa foi a influência do gradiente natural térmico.

Outra fonte de erro é representada pelas variações espaciais da densidade de fluxo de seiva no tronco, que exige a adequada instalação da sonda (LU et al., 2000).

A posição de inserção da sonda em relação aos pontos cardeais também é importante, pois o próprio Granier (1987) observou diferença entre os valores de fluxo de seiva avaliado com três sensores orientados sob angulação de 120° entre si ao redor do caule a 1 m do solo. Instalando quatro sensores, um em cada ponto cardeal e a duas alturas, a 1,5 m e 8,5 m do solo em *Pinus pinaster* de 25 anos, Loustau et al. (1998) observaram que em dia ensolarado, os sensores mais baixos apresentaram respostas diferenciadas, ao passo que os mais altos não.

Outra fonte de erro é o valor da área efetiva do xilema exigida na equação de calibração, determinada por técnica destrutiva da planta amostrada, ou por retirada invasiva de amostra do caule (GRANIER, 1985; GRANIER, 1987; CABIBEL & DO, 1991).

Outro aspecto ligado à área efetiva do xilema é a profundidade na qual a sonda é instalada. Clearwater et al. (1999) verificaram subestimativa de cerca de 50 % no fluxo de seiva quando a metade da sonda com comprimento de 0,02 m localizava-se fora do xilema condutor.

Mais uma fonte de erro pode ser o valor da potência dissipada recomendada para o método. Rojas et al. (2003), citado por Karasawa (2004), realizaram um estudo em Portugal, no caule de oliveira jovem com diâmetro de 0,048 m, utilizando sondas de 0,02 m de comprimento, ora aplicando 0,24 W e ora aplicando 0,16 W de potência, concluíram que a confiabilidade da estimativa não foi comprometida. Afirmam ainda, que a estabilidade do valor da potência é mais importante do que a grandeza em si.

Outra variável que pode introduzir erros é a distância entre sondas, pois estas devem estar separadas suficientemente para que a temperatura da sonda aquecida não interfira no valor da temperatura da sonda sem aquecimento, considerada como sonda de referência. Para tanto, quanto maior a distância entre elas, esta interferência certamente será menor, mas por outro lado, aumentando-se a distância entre elas pode-se cometer erro devido ao gradiente natural térmico (DELGADO-ROJAS, 2004). Granier (1985), na sua proposta original, recomenda a distância de 0,05 m, ao passo que Tournebize & Boistard (1998) trabalharam com distância de 0,02 m em arbusto tropical (*Gliricidia sepium*) com 0,04 m de diâmetro. Já outros autores relatam que a distância adequada seria de 0,08 m a 0,10 m entre as sondas aquecidas e a de referência (CABIBEL & DO, 1991; BRAUN, 1997).

Dauzat et al. (2001), usaram o método em estudo com cafeeiros na Costa Rica, porém eles não utilizaram a equação universal de Granier e sim uma calibração própria obtida a campo, cortando o cafeeiro e colocando o mesmo imediatamente em um vaso contendo água e obtendo a correlação com o volume da água consumida.

No Brasil alguns estudos recentes foram realizados por Rojas et al. (2004) e Karasawa et al. (2004), citados por Karasawa (2006), trabalhando com cafeeiro em formação, concluíram que utilizando a equação universal de Granier (1985), a transpiração observada foi apenas de 60% quando comparado com o método lisimétrico.

David et al. (1997), comparando o método de dissipação de calor em cultura de eucalipto com o método de Penman-Monteith, quando as condições hídricas do solo eram ótimas, observaram uma tendência similar de variação. Entretanto, à medida que o solo vai secando, a evapotranspiração pelo método de Penman-Monteith passa a ser proporcionalmente superior ao método de Granier.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 LOCALIZAÇÃO, CLIMA E SOLO

O trabalho foi desenvolvido no período de 02 de maio a 19 dezembro de 2008, na Fazenda Experimental da Universidade Federal de Mato Grosso - UFMT, no município de Santo Antônio do Leverger, estado de Mato Grosso, nas seguintes coordenadas geográficas: 15°47'11" de latitude sul, 56°04'47" de longitude oeste e altitude de 140 metros (Figura 1)

Figura 1 - Mapa com a localização do município de Santo Antônio do Leverger - MT.

A área utilizada no experimento foi de 600 m^2 (20x30m) e localizada junto à estação agrometeorológica da Fazenda Experimental.

O clima da região é Aw de acordo com a classificação de Koppen. O regime de chuvas é bem definido, apresentando um período seco e um chuvoso. A precipitação média anual é de 1320 mm ano^{-1}. A temperatura média mensal varia de 22 ^oC a 27 ^oC.

O solo da área experimental foi classificado como PLANOSSOLO HÁPLICO Eutrófico gleissólico.

3.2 A UNIDADE EXPERIMENTAL

A unidade experimental foi constituída de uma área de 0,6 ha, onde estavam instalados três lisímetros de lençol freático constante (Figura 2).

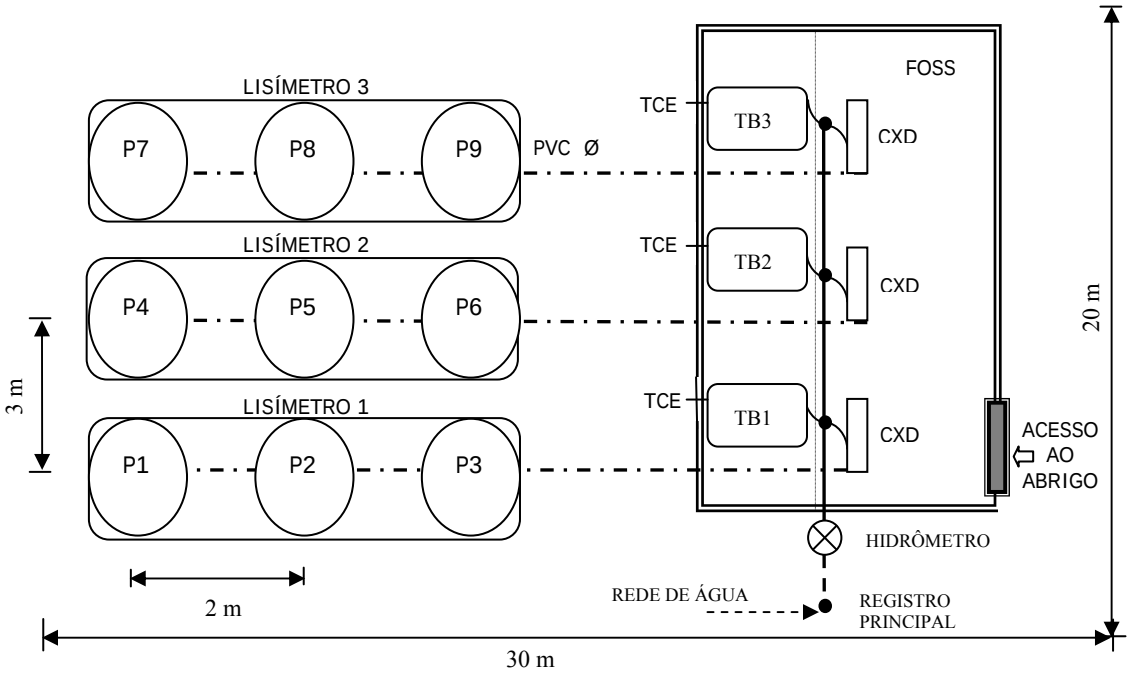

Figura 2 – Unidade experimental: lisímetro (1, 2, 3), planta de nim (P1 a P9), tambor de armazenamento de água (TB1, TB2, TB3), tubo coletor de excesso (TCE), caixa de descarga (CXD), e abrigo (em alvenaria, coberto com telha de fibrocimento).

Os lisímetros foram construídos com tambores plásticos de diâmetro igual a 55 cm, capacidade para 90 litros e interligados por tubo de PVC de 20 mm. Cada

lisímetro correspondeu a um conjunto de três tambores plásticos interligados e cada tambor continha uma planta de nim.

A alimentação dos lisímetros foi realizada com água proveniente do sistema de água canalizada da própria Fazenda Experimental e comandada através do registro principal. O consumo de água pelos lisímetros foi medido por um hidrômetro localizado junto ao registro principal.

Caixas plásticas tipo descarga foram alimentadas com água proveniente de tambores plásticos auxiliares, capacidade para 50 litros, com o objetivo de manter o nível do lençol freático a 0,50 m abaixo da superfície do solo (Figura 3).

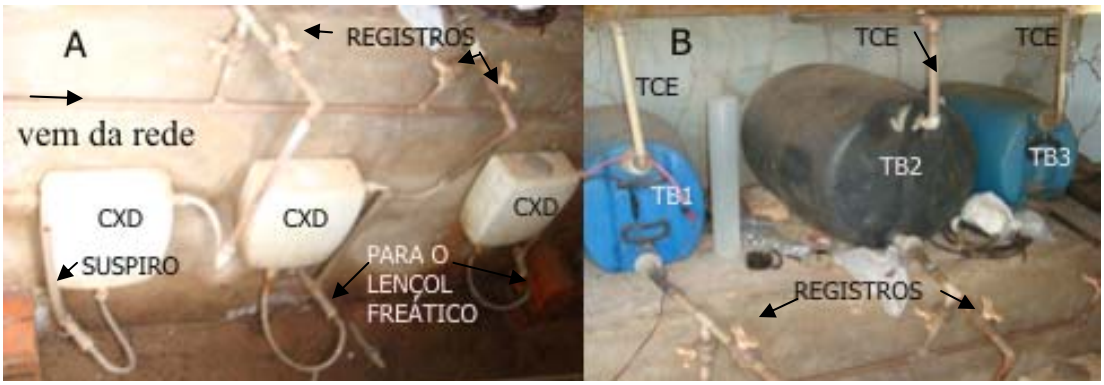

Figura 3 – Visão do fosso da unidade experimental: reservatórios de abastecimento (TB1, TB2 e TB3), com tubo de controle de excesso (TCE), registros de entrada e saída, e caixa de descarga com bóia (CXD) para controle do lençol freático.

3.3 DADOS CLIMÁTICOS

As condições meteorológicas do local foram acompanhadas diariamente, através das observações de rotina obtidas na Estação Agroclimatológica Padre Ricardo Remetter, pertencente ao Sistema INMET (Registro 83364), localizada ao lado da unidade experimental. Dessa forma, foram obtidos os dados referentes aos elementos meteorológicos como a temperatura do ar, umidade relativa, precipitação, velocidade do vento, radiação incidente (global) e evaporação do Tanque "Classe A".

Visando a obtenção de dados automáticos e em escala inferior a um dia, foram instalados a 50 m da unidade experimental, um piranômetro (LI-200,

Campbell Sci, Inc., USA) para medir a radiação solar global e um psicrômetro de termopar para medidas de temperatura do ar e umidade relativa (instalados a 2,5m e 2,8 m da superfície do solo, respectivamente).

Os dados produzidos por sinais e pulsos elétricos dos transdutores foram processados e armazenados por um datalogger (CR 10X, Campbell Scientific, Inc., Ogden, Utah), com médias de 15 minutos.

3.4 INSTALAÇÃO E CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO

Foram utilizadas nove plantas de nim, de um ano e meio de idade, que se encontravam em lisímetros de lençol freático constante, sob espaçamento 3 x 2 m, em funcionamento. Em 02/05/2008 , todas as plantas foram podadas e assumiram, aproximadamente, a mesma altura e forma elipsoidal de copa.

O preparo do solo compreendeu a limpeza manual da superfície no interior de cada lisímetro, retirando-se as ervas daninhas. Na área externa aos lisímetros foram realizadas capinas manuais para controle de plantas invasoras. A limpeza da bordadura da unidade experimental foi realizada, uma vez a cada bimestre, por roçadora tratorizada.

O crescimento de cada planta foi acompanhado ao longo do experimento, por amostragem da área foliar e altura.

A contagem de todas as folhas de cada planta de nim foi realizada quinzenalmente. Foi, também, realizada medida da altura da planta, e do maior e menor diâmetro da copa.

Os lisímetros receberam uma folha de isopor para minimizar as trocas de calor entre o solo do lisímetro e o ambiente. A folha de isopor foi recortada na forma circular, com as dimensões da superfície (“boca do tambor”) e fixada com fita adesiva. Em seguida, cada lisímetro recebeu cobertura plástica para impedir a infiltração de água nos períodos de chuva e também, impedir a evaporação da água do solo. A fixação desta cobertura se deu por uma fina corda de nylon envolvendo a “boca do tambor”. Os lisímetros receberam ainda, uma cobertura de papel alumínio, fixada com fita adesiva, com o objetivo de minimizar os efeitos da radiação solar

incidente sobre o solo. Na Figura 4, é possível ver os lisímetros, antes e depois da vedação.

Figura 4 – Visão da superfície do solo do lisímetro de nível de lençol freático constante: (A) sem impermeabilização (B) com impermeabilização, na Fazenda Experimental da UFMT, em Santo Antônio do Leverger – MT.

Nas plantas que se encontravam no lisímetro 1 foram instalados os sensores de fluxo de seiva, sendo nas plantas 1 e 3 os sensores de Granier e nas plantas 2 e 3 os de balanço de calor no caule (Figura 5).

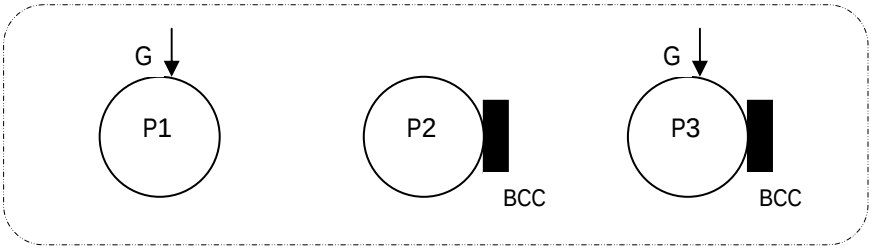

Figura 5 – Esquema da localização dos sensores de fluxo de seiva (métodos de Granier (G) e balanço de calor no caule (BCC)) instalados nas plantas de Nim (planta1 = P1, planta2 = P2, planta3 = P3) do Lisímetro 1, na Fazenda Experimental da UFMT, em Santo Antônio do Leverger – MT.

O domínio da técnica de confecção dos sensores e a disponibilidade dos materiais para construção das primeiras unidades influenciaram o período em que cada um foi instalado. O método do balanço de calor no caule foi o primeiro a ser implementado devido a disponibilidade dos materiais para sua construção. Para a

construção deste tipo de sensor o item mais difícil de ser encontrado no mercado local é a resistência elétrica que produz calor no interior da jaqueta térmica. Esta resistência deve ser isolada eletricamente e acondicionada em lâmina de material isolante e flexível, para envolver o perímetro externo do caule totalmente e de maneira a aderir ao máximo ao caule da planta, proporcionando eficiente transferência de calor. Como não há demanda considerável, o mercado nacional não se interessa pela fabricação deste tipo de produto. Aliado a isto, para cada diâmetro do caule da planta de interesse, está associado um tamanho de jaqueta térmica e por conseguinte, de resistência elétrica. Como o Laboratório de instrumentação do programa de Pós-Graduação em Física Ambiental da UFMT dispunha de duas resistências flexíveis e para caules de pequenos diâmetros (até 60 mm) resolveu-se construir artesanalmente as jaquetas térmicas o que evitou a necessidade de importação.

A instalação dos sensores de balanço de calor no caule e de Granier ficou limitada às plantas do lisímetro 1, em função da reduzida disponibilidade de materiais para confecção de jaquetas e sondas. Os três lisímetros foram utilizados no acompanhamento da evolução da área foliar e altura das plantas de nim e medida da transpiração.

3.4.1 Área foliar

A área foliar foi obtida por método não destrutivo, através do produto do valor da área foliar média (AFm) pelo número de folhas de cada planta de nim.

A área foliar média foi determinada através de medidas de comprimento (C) e maior largura (L) em 90 folhas, de diferentes tamanhos, e de um fator de correção (Fc), previamente determinado, entre a área foliar medida e o produto dessas duas medidas das folhas (Equação 3).

$$AFm = Fc.L.C \tag{3}$$

O fator de correção foi obtido através de uma equação de regressão linear, que correlacionou a área foliar de 27 folhas, de diferentes tamanhos, retiradas

aleatoriamente, com o produto das medidas do maior comprimento (C) e da maior largura (L) das folhas da amostra (Figura 6). Nesse caso, a área de cada folha foi obtida através do processamento de fotografia digital.

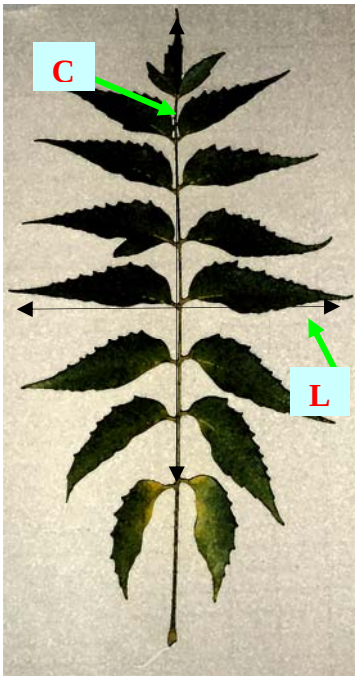

Figura 6 – Esquema utilizado para medição do comprimento (C) e da largura (L) de uma folha de nim.

Para a digitalização das imagens, as folhas foram colocadas, uma de cada vez, sobre papel branco e identificadas. Em seguida, foram fotografadas com máquina digital (Sony Cyber-shot / DSC-T20) e as imagens obtidas foram submetidas ao programa Sigma Scan Pro v.5.0 (JANDEL SCIENTIFIC, 1991), obtendo-se, assim, a área de cada folha da amostra (Figura 7).

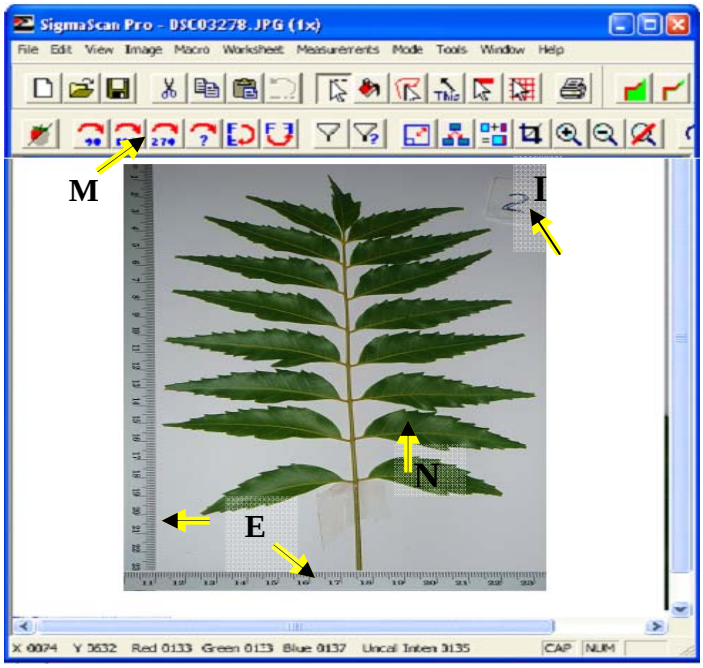

Figura 7 - Tela do Software SigmaScan Pro 5 apresentando a imagem digitalizada de uma folha de nim (N), identificação (I), escalas de referência da imagem (E) e menu de opções do programa (M).

Monteiro et al. (2005) relata que a área foliar de uma planta depende do número e tamanho das folhas, bem como seu tempo de permanência na planta. Na avaliação do crescimento de comunidades vegetais emprega-se a área de terreno disponível às plantas como base para expressar a área foliar; assim, a área foliar por unidade de área do terreno define o índice de área foliar (IAF), que representa sua capacidade em explorar o espaço disponível.

O IAF é a relação funcional existente entre a área foliar e a área do terreno ocupada pela cultura, e a importância da área foliar é amplamente conhecida por ser um parâmetro indicativo de produtividade, pois o processo fotossintético depende da interceptação da energia luminosa e sua conversão em energia química (FAVARIN et al., 2002).

A área foliar de cada lisímetro, no presente estudo, foi determinada quinzenalmente e correspondeu à soma da área foliar de cada planta que se encontrava no lisímetro.

O IAF foi calculado através da razão entre a área foliar de cada lisímetro e a área total da sua superfície.

3.5 ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA

A estimativa da evapotranspiração de referência foi feita com os dados dos elementos meteorológicos obtidos na estação meteorológica do sistema INMET, localizada próxima da área experimental. Para o cálculo da ETo foi utilizado o modelo de Penman-Monteith, parametrizada por Allen et al. (1998), descrito de acordo com a Equação 4:

$$ETo = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma^*}(R_n - G)\frac{1}{\lambda} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma^*}\frac{900}{(Tmed + 273)}U2(e_s - e_a) \quad (4)$$

sendo, *Rn* e *G* o saldo de radiação total e a densidade de fluxo de calor no solo, respectivamente (MJ.m-2.d-1), *Tmed,* a temperatura média diária (°*C*), U_2 a velocidade média do vento medida a 2 m de altura do solo (ms^{-1}), λ, o calor latente de evaporação da água (MJ kg-1), γ*, o coeficiente psicrométrico modificado (kPa^oC^{-1}), Δ, a declividade da curva de pressão de vapor, dada por:

$$\Delta = \frac{4098\, e_s}{(Tmed + 237{,}3)^2} \quad (5)$$

em que *Tmed* é a temperatura média do ar (°*C*), obtida pela média compensada:

$$Tmed = \frac{T12 + T\,máx + T\,min + 2T24}{2} \quad (6)$$

sendo T_{12}, a temperatura medida às 12 horas GMT, T_{24} a temperatura medida às 24 *horas* GMT, *Tmáx,* a temperatura máxima do dia e *Tmin*, a temperatura mínima do dia, todos em *ºC*. A pressão de saturação de vapor foi encontrada pela equação:

$$e_S = \frac{\exp[(16{,}78\, T_{med} - 117)]}{(T_{med} + 237{,}3)} \quad (7)$$

Para o cálculo do déficit de pressão de vapor (e_s - e_a), a pressão real de vapor atual e_a (kPa), foi calculada pela equação:

$$e_a = \frac{e_S UR}{100} \quad (8)$$

em que *UR é a* umidade relativa do ar (%).

$$UR = \frac{UR_{12} + UR_{18} + 2UR_{24}}{4} \quad (9)$$

em que: UR_{12} =Umidade relativa do ar 12 horas GMT (%); UR_{18} =Umidade relativa do ar 18 horas GMT (%); UR_{24} =Umidade relativa do ar 24 horas GMT (%).

γ = constante psicrométrica (kPa $^oC^{-1}$)

A constante psicrométrica é calculada de acordo com a equação:

$$\gamma = \frac{C_p P}{\varepsilon \lambda} \quad (10)$$

em que, C_p = Calor específico do ar à pressão constante ($C_p = 1{,}01 \cdot 10^{-3}$ MJ kg^{-1} $^oC^{-1}$)

ε = razão do peso molecular da água pelo ar ($\varepsilon = 0{,}622$)

P = Pressão atmosférica (kPa)

$$P = \frac{P_a}{10} \quad (11)$$

Pa = Pressão atmosférica (mbar)

$$P_a = \frac{(P_{a12} + P_{a18} + P_{a24})}{3} \quad (12)$$

Pa_{12} = Pressão atmosférica 12 horas GMT

Pa_{18} = Pressão atmosférica 18 horas GMT

Pa_{24} = Pressão atmosférica 24 horas GMT

Encontra-se o calor latente de evaporação da água pela equação:

$$\lambda = 2{,}501 - 2{,}361.10^{-3} Tmed \quad (13)$$

e a constante psicrométrica modificada, pela equação:

$$\lambda = \lambda\left(1 + 0,34U\right) \quad (14)$$

Como a estação meteorológica não dispunha da velocidade do vento medida a 2 m de altura e sim a 10 *m*; estimou-se a velocidade do vento a 2 m por meio da equação:

$$U_2 = U_{10}\left[\frac{\ln\left(\frac{Z_2 - d}{Z_0}\right)}{\ln\left(\frac{10 - d}{Z_0}\right)}\right] \quad (15)$$

sendo Z_0 o comprimento de rugosidade equivalente dado por 0,01476 m ($Z_0 = 0,123h_c$), d o deslocamento do plano zero do perfil de vento igual 0,08 m (d = 0,67 h_c), em que h_c é a altura da cultura de referência (grama = 0,12 m) em relação ao solo.

R_n = Radiação líquida (saldo de radiação) (MJ m^{-2} d^{-1})

A radiação líquida é calculada de acordo com a equação:

$R_n = BOC + BOL$ (16)

BOL = Balanço de ondas longas (MJ m^{-2} d^{-1})

$BOL = - (1/2) \cdot \sigma \cdot (T^4_{maxk} + T^4_{mink}) \cdot (a_1 - 0,139 \cdot (e_a)^{0.5}) \cdot (a_n \cdot R_s/R_{so} + b_n)$ (17)

$T_{máxk}$ = Temperatura máxima diária do ar (°)

$T_{máxk} = T_{máx} + 273$ (18)

T_{mink} = Temperatura mínima diária do ar (°)

$T_{mink} = T_{min} + 273$ (19)

σ = Constante de Stefan-Boltzmann (4,903 · 10^{-9} MJ m^{-2} d^{-1} K^{-4})

$a_1 = 0,26 + 0,1 \cdot e^{-[0,0154 \cdot (J-180)]_2}$ (20)

se $R_s / R_{so} > 0,7$ $a_n = 1,126$ $b_n = -0,07$

se $R_s / R_{so} < 0,7$ $a_n = 1,017$ $b_n = -0,06$

BOC= Balanço de radiação de ondas curtas (MJ m^{-2} d^{-1})

$BOC = (1-\alpha) \cdot R_s$ (21)

α = albedo (reflectância) = 0,25

R_s = Valores calculado de radiação solar global ou radiação de ondas curtas

$(MJ\ m^{-2}\ d^{-1})$

O valor de R_s é calculado de acordo com a equação:

$$R_s = Ra.(a + b \cdot n/N) \quad (22)$$

a, b = coeficientes empíricos dependentes da localidade.

Para Santo Antônio do Leverger segundo Campelo Júnior (1998): a = 0,2088 e b assume os seguintes valores em função dos meses do ano: janeiro = 0,4308; fevereiro = 0,4362; março = 0,4020; abril = 0,3296; maio = 0,2903; junho = 0,2908; julho = 0,2895; agosto = 0,3065; setembro = 0,3767; outubro = 0,4288; novembro = 0,4349; e dezembro = 0,4251.

n = Número de horas de brilho solar diário (horas)

N = Duração máxima de brilho solar diário (horas)

$$N = 24 \cdot w_S/\pi \quad (23)$$

R_{so} = Radiação de ondas curtas em céu claro $(MJ\ m^{-2}\ d^{-1})$

$$R_{so} = 0,75 \cdot R_a \quad (24)$$

R_a = Radiação extraterrestre $(MJ\ m^{-2}\ d^{-1})$

$$R_a = (1440/\pi) \cdot G_{sc} \cdot dr \cdot [(w_s) \cdot sen(\Phi) \cdot sen(\delta) + cos(\Phi) \cdot cos(\delta) \cdot sen(w_s)] \quad (25)$$

G_{sc} = Constante solar $(0,08202\ MJ\ m^{-2}\ d^{-1})$

dr = distância relativa da terra ao sol

$$dr = 1 + 0,033 \cdot cos(2 \cdot \pi \cdot J/365) \quad (26)$$

w_s= ângulo horário do por do sol (radianos)

$$w_s = 0,0145 + arcos[-tan(\Phi) \cdot tan(\delta)] \quad (27)$$

Φ = Latitude (radianos)

δ = Declinação solar média do enésimo dia do ano (radianos)

$\delta = 0.4093 \cdot sen \cdot (2 \cdot \pi \cdot (284+J)/365)$, em que, J = número do dia juliano (28)

3.6 CÁLCULO DA TRANSPIRAÇÃO DIRETAMENTE A PARTIR DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA

Villa Nova et al. (1999) verificaram que a transpiração pode ser estimada a partir da evapotranspiração de referência sobre gramado (Equação 29).

$$T_M = \frac{ET_0 AF}{2,88} \quad (29)$$

em que:

T_M = Transpiração estimada a partir da evapotranspiração de referência (L dia^{-1});

ET_0 = Evapotranspiração de referência (mm dia^{-1});

AF = Área foliar da planta (m^2);

O ajuste $\left(\frac{AF}{2,88}\right)$ corresponde à adoção da aproximação de que a perda de água por unidade de área foliar é igual na árvore e na cobertura padrão definida pela FAO, cujo índice de área foliar é 2,88. Dessa maneira, o valor assim calculado, a partir de ET_0, representa o volume de água transpirada e pode contribuir para avaliar a transpiração da planta frente às variáveis ambientais.

Assim, este procedimento foi adotado no presente trabalho e seu desempenho foi comparado com a transpiração medida em lisímetros de lençol freático constante.

3.7 MÉTODOS TÉRMICOS PARA ESTIMAR O FLUXO DE SEIVA

3.7.1 Método da sonda de dissipação térmica (Granier)

O método da sonda de dissipação térmica ou método de Granier (Granier, 1985) consiste na determinação da densidade de transporte convectivo de massa (seiva) a partir da taxa de dissipação de calor ocasionado pelo transporte (ROJAS, 2003). Para utilização do método, duas sondas são inseridas radialmente no troco e separadas de uma distância de 5 a 15 cm (GRANIER, 1987). No presente trabalho, as sondas foram construídas utilizando-se agulhas hipodérmicas de 20 mm de comprimento e 2 mm de espessura. Cada agulha recebeu um termopar tipo T (cobre-constantan) em seu interior, sendo que a junção (ponta) ficou localizada no centro (Figura 8). Os materiais utilizados (Figura 9), foram adquiridos no mercado local, de

baixo custo e facilmente encontrados. A única exceção foi o fio de constantan que, devido a espessura requerida ser muita fina (< 0,5 mm), não foi encontrado no mercado nacional.

Na sonda superior foi montado um elemento aquecedor formado por um fio de constantan, de elevada resistividade elétrica (49.10^{-8} Ω m), enrolado em torno da agulha, formando espiras. O aquecimento, por efeito Joule, com dissipação continua, foi idealizado para uma potência de 0,2 W. A sonda inferior foi construída apenas com termopar em seu interior, medindo a temperatura do tecido lenhoso e funcionando como uma sonda de referência. Os terminais de constantan foram ligados entre si, promovendo a união entre as duas sondas. Os terminais de cobre foram utilizados para medir a diferença de temperatura entre as duas sondas.

A diferença de temperatura das duas sondas foi influenciada pelo efeito da dissipação de calor do fluxo de seiva na vizinhança da sonda aquecida.

Um tubo de alumínio (Granier, 1992), de comprimento igual ao da sonda, foi previamente inserido no local. O interior do tubo de alumínio foi preenchido com pasta térmica, antes da inserção da sonda.

Para determinação do fluxo de seiva, foi utilizada a equação de calibração proposta por Granier (1985), Granier (1987):

$$F = 118{,}99.10^{-6}.k^{1{,}231}.Ax \qquad (30)$$

sendo F o fluxo em m^3; Ax a área média da secção transversal do caule no local de inserção das sondas (m^2), e k é o índice de fluxo (Lundblad et al., 2001), componente relacionado com a temperatura, dada pela seguinte equação:

$$k = \frac{(\Delta TM - \Delta T)}{\Delta T} \qquad (31)$$

em que ΔTM é a diferença máxima de temperatura entre as duas junções (°C) e ΔT a diferença de temperatura atual (°C).

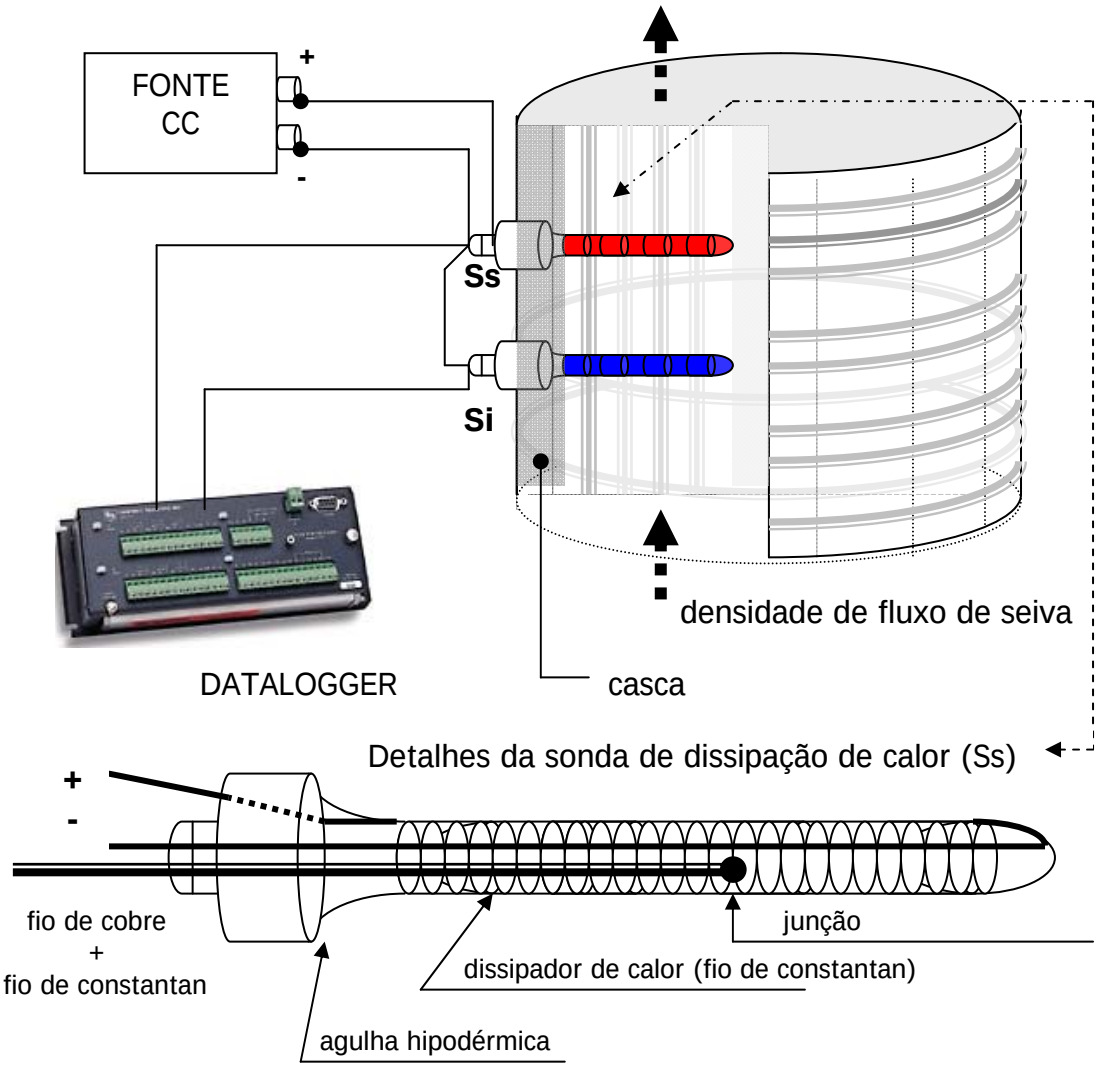

Figura 8 – Sensor de fluxo de seiva instalado no tronco de uma árvore, conforme GRANIER (1985), em que **Ss** é a sonda aquecida e **Si** a não-aquecida.

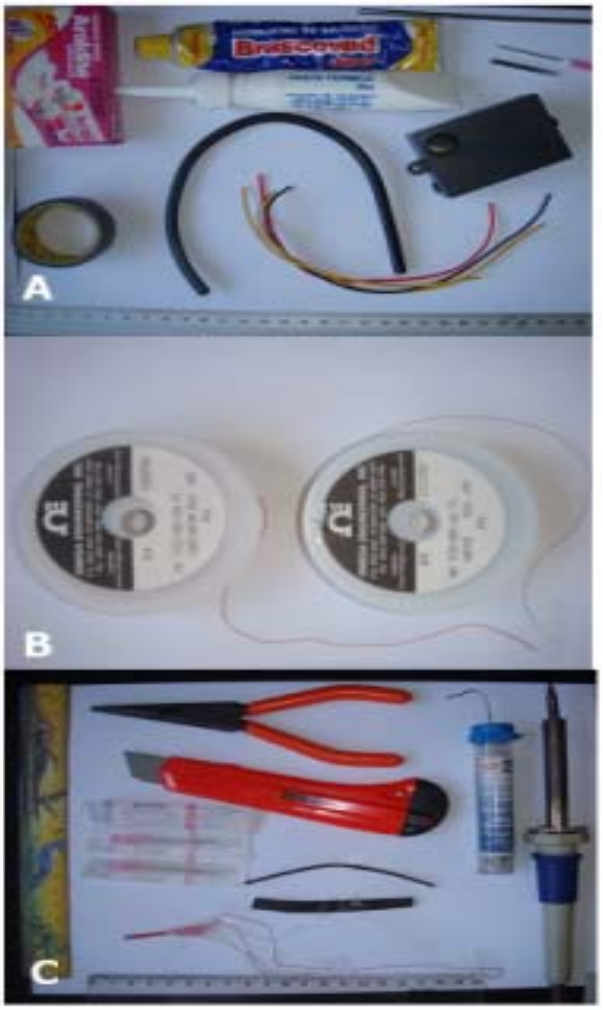

Figura 9 - Materiais para confecção dos sensores de dissipação térmica: fita isolante, cabo e fios elétricos flexíveis, caixa plástica, cola, silicone, pasta térmica e tubo metálico (A); fio de cobre e fio de constantan (Omega Eng. Inc.) (B); ferramentas (soldador, alicate, estilete), solda, agulhas hipodérmicas, espaguete e agulha montada com dissipador e termopar (C).

No Laboratório de instrumentação – Física Ambiental – UFMT, foram construídas sondas de dissipação térmica 2 e 3 cm de comprimento utilizando-se termopares de cobre -“constantan” , inseridos em agulhas de diâmetro igual a 1,2 mm e 1,6 mm, preenchidas com resina para fixação (Figura 10).

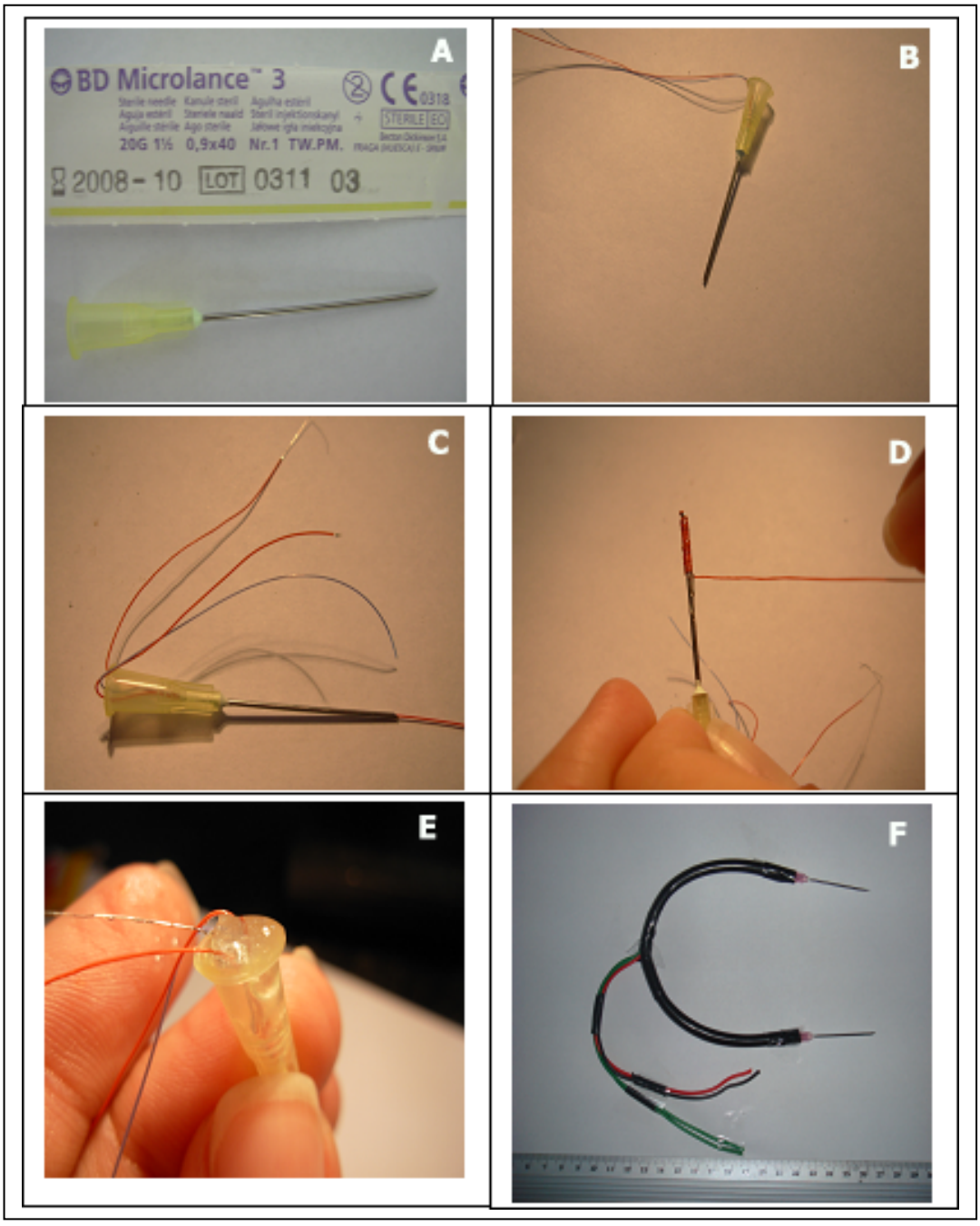

Figura 10 – Processo de confecção do sensor de dissipação térmica, construído artesanalmente: agulha hipodérmica (A), termopar tipo T (cobre e constantan) (B), fio de constantan introduzido na agulha e enrolado na parte externa formando elemento aquecedor (C, D), enchimento da base da agulha com cola tipo epóxi (E), sensor montado (F).

3.7.2 Método do balanço de calor no caule (BCC)

Para a determinação do fluxo de seiva nas plantas estudadas, foram utilizados sensores construídos no Laboratório de instrumentação do bloco de Pós-Graduação em Física Ambiental (Figura 11). Os sensores foram conectados a um sistema de aquisição de dados Campbell Sci., mod. CR10X. As leituras foram realizadas a cada segundo, sendo as médias armazenadas a cada 10 minutos.

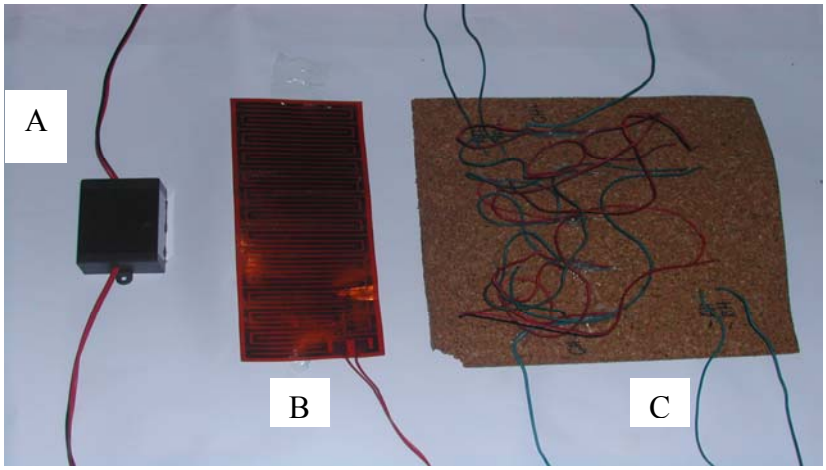

Figura 11 - Elementos componentes do sensor balanço de calor no caule: regulador para tensão CC estabilizada (A), resistência elétrica do aquecedor (B) e jaqueta contendo a termopilha (C).

O fluxo de seiva foi calculado segundo a teoria apresentada por Sakuratani (1981), aperfeiçoada por Baker & Van Bavel (1987). Uma seção do caule foi isolada termicamente do ambiente, de modo a receber apenas o calor fornecido pelo elemento aquecedor do sensor ajustado à superfície do caule. O calor fornecido a taxa constante (P_{in}) ao volume amostrado pode ser repartido em diferentes fluxos de calor (Figura 12):

$$P_{in} = Q_r + Q_v + Q_s + Q_f \qquad (32)$$

em que: Q_r é o fluxo de calor radial; Q_v o calor transportado axialmente, correspondendo ao fluxo de calor transportado acima do elemento aquecedor (Q_c) e abaixo (Q_b) do elemento aquecedor; Q_s o calor armazenado por unidade de tempo na seção aquecida; Q_f o calor transportado por convecção pela seiva da planta. Todos os fluxos de calor são expressos em watts (W).

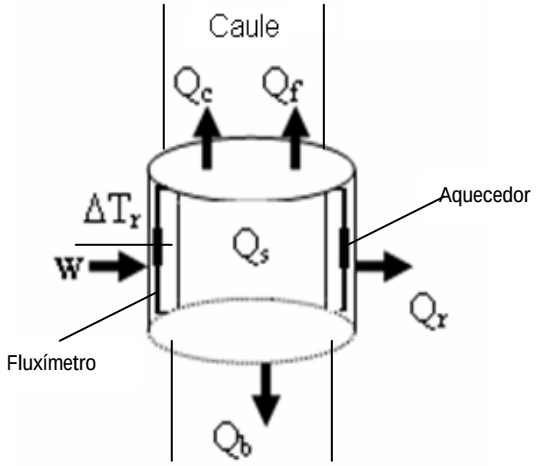

Figura 12 – Esquema do sensor, dos elementos de medida e dos fluxos envolvidos no método do balanço de calor.

A potência aplicada pelo elemento aquecedor é calculada pela seguinte expressão:

$$P_{in} = \frac{V^2}{R} \tag{33}$$

em que: V(volt) é a tensão fornecida e R(Ω) a resistência do elemento aquecedor.

O fluxo radial de calor foi calculado como:

$$Q_r = K_{Sh} \Delta T_r \tag{34}$$

em que: K_{sh} (W K^{-1}) é a condutividade térmica do substrato de cortiça que envolve o elemento aquecedor, em ambas as faces da qual estão fixadas junções de pares termoelétricos, formando uma termopilha (fluxímetro). O fluxo de calor através da termopilha gera uma diferença de temperatura ΔT_r, proporcional ao fluxo, que pode ser determinada pela força eletromotriz gerada na termopilha.

Os valores de K_{sh} são considerados constantes em 24h, sendo que os mesmos são calculados em condições de fluxo de seiva nulo ou muito próximo de nulo, geralmente ocorrendo no final da madrugada, sob boas condições de água no solo, conforme recomendação da literatura. No caso em que $Q_f \cong 0$, é possível isolar o valor de Q_r na Equação (32) e substituindo na Equação (34), estimar o valor K_{sh}, medindo-se a ΔT_r. Quando a planta está transpirando em condições ótimas de água no solo, esta continua absorvendo água algumas horas após o início do período noturno, para repor o que foi perdido durante o dia. Porém, segundo Grime et al.

(1995), em plantas que estão sofrendo estresse hídrico a reposição de água pode não cessar.

O fluxo de calor transportado axialmente Q_v é calculado como:

$$Q_v = A K_{st} \left(\frac{\Delta T_c + \Delta T_b}{\Delta z} \right) \quad (35)$$

em que: A é a área da seção transversal do caule aquecido; K_{st} a condutividade térmica do caule, cujo valor é de determinação difícil, mas que, de maneira geral, é adotado como igual a 0,52 W m^{-1} K^{-1} para espécies herbácias e 0,42 W m^{-1} K^{-1} para espécies lenhosas (STEINBERG et al., 1989). Esse valor sofre variações em função da redução do conteúdo de água no caule da planta durante o processo de transpiração. Apesar das variações que ocorrem no valor de K_{st} ao longo de um dia ou quando a planta sofre estresse hídrico, sabe-se que o reflexo nos valores de fluxo de seiva são insignificantes, pois em períodos diurnos, quando o fluxo de seiva se eleva, os fluxos axiais de calor são desprezíveis, quando comparados aos fluxos radiais e convectivos; $\frac{(\Delta T_C + \Delta T_b)}{\Delta z}$ é a soma dos gradientes de temperatura superior e inferior do segmento de caule aquecido, sendo Δz a distância entre dois pares de junções fixados acima e abaixo da jaqueta térmica.

O fluxo de calor transportado convectivamente pela seiva da planta Q_f é estimado como termo residual da Equação 32 e está relacionado ao fluxo de seiva F, pela equação:

$$Q_f = FC_p \Delta T_{seiva} \quad (36)$$

em que: Cp é o calor específico da seiva, considerado igual ao da água pura (4,186 KJ Kg^{-1} K^{-1}); ΔT_{seiva} é a diferença de temperatura da seiva, entre os limites superior e inferior do segmento aquecido, calculada como:

$$\Delta T_{seiva} = \frac{(\Delta T_c + \Delta T_b)}{2} \quad (37)$$

O fluxo de seiva (F) é calculado, portanto, como:

$$F = \frac{Q_f}{C_p \Delta T_{seiva}} \quad (38)$$

O calor armazenado no caule das plantas (Q_s) foi desprezado, considerado-se que as plantas eram jovens e de diâmetros inferiores a 55 mm (WEIBEL & VOS, 1994; GRIME et al., 1995).

Na confecção dos sensores, cada junção do termopar, tipo T, foi formada pela união da ponta de um fio de cobre com um fio de constantan (Figura 13). Os terminais da resistência elétrica foram ligados à saída de um regulador de tensão contínua, construído com componentes eletrônicos de fácil aquisição (Figura 14).

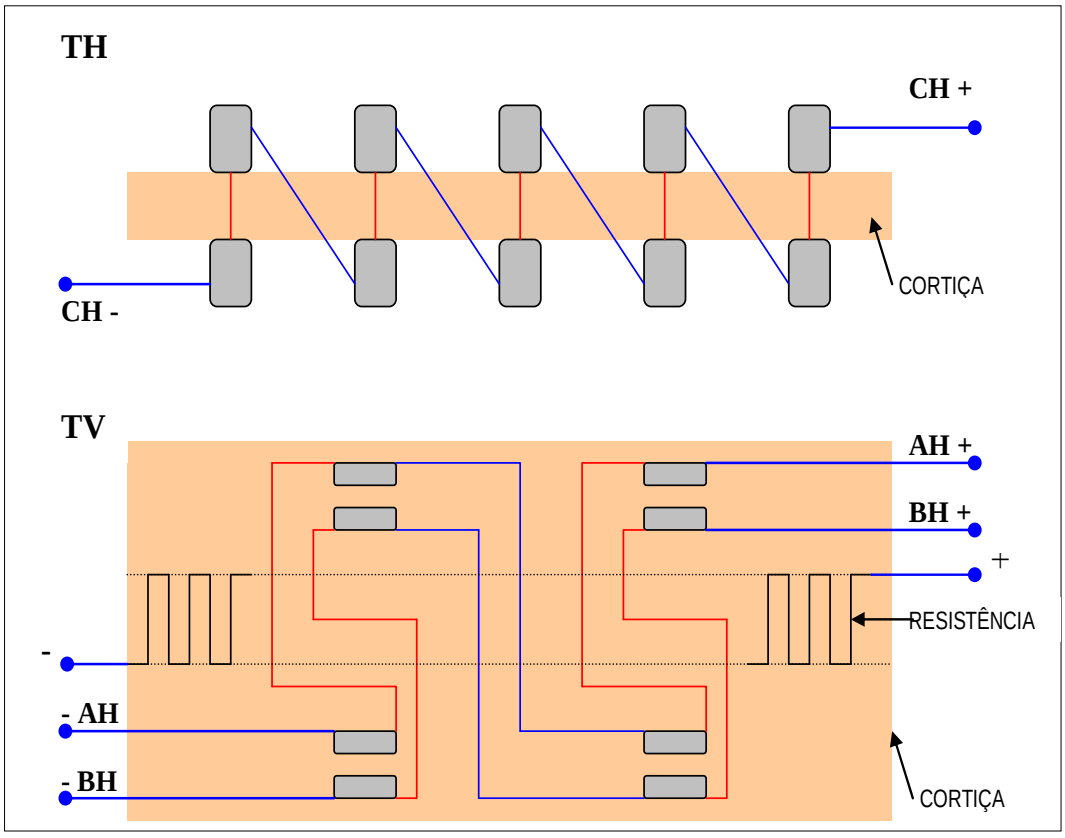

Figura 13 – Representação esquemática das ligações elétricas dos sensores de fluxo de seiva pelo método do balanço de calor. As junções de termopares (▭) estão indicadas e formam uma termopilha vertical (TV) e uma termopilha horizontal (TH), na jaqueta térmica. Os terminais das termopilhas (AH, BH e CH) vão para os canais do datalogger.

3.7.3 Sistema de energia elétrica para alimentação do “datalogger” e sensores.

Para atendimento dos requisitos de energia elétrica, necessários para o desenvolvimento do experimento, foram utilizadas duas fontes: uma de corrente alternada (CA, 127V), e outra de corrente contínua (CC, 12V). A fonte CA foi obtida a partir de um ramal do sistema elétrico que atende a estação meteorológica Ricardo Remeter. A fonte CC foi obtida através de bateria automotiva de 12V – 60Ah.

Inicialmente, foi testada a opção de fornecimento de energia somente através de bateria automotiva. Esta opção se mostrou inviável, visto que a bateria não suportou períodos superiores a três semanas de trabalho ininterrupto e sem recarga. A causa da descarga mais rápida foi relacionada à contínua dissipação de energia pelos elementos aquecedores dos sensores.

O “datalogger” foi, então, alimentado por bateria automotiva e os elementos dissipadores de calor dos sensores foram alimentados a partir de reguladores de tensão (Figura 14), baseado no circuito integrado LM317T, de baixo custo e encontrado facilmente nas lojas de componentes eletrônicos.

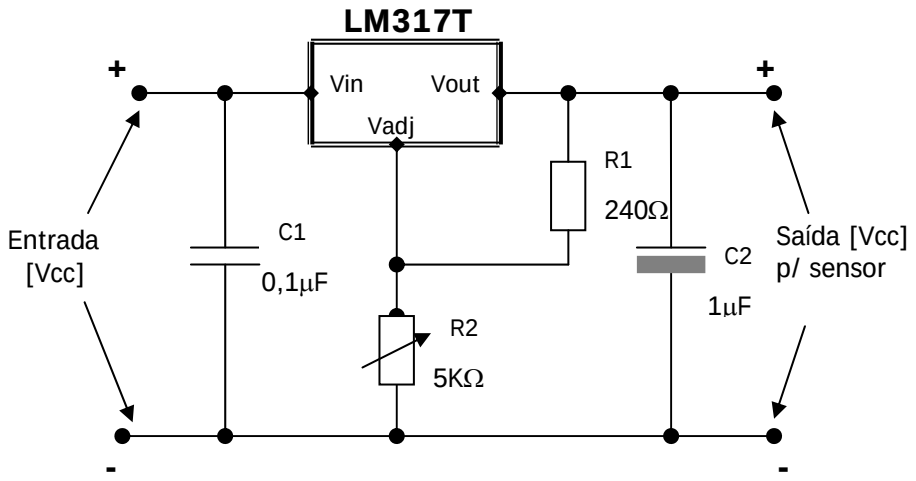

Figura 14 – Regulador ajustável de tensão CC: diagrama esquemático do circuito eletrônico.

Uma fonte CC estabilizada, obtida de microcomputadores em desuso (sucata), foi alimentada por uma tomada CA, próxima à unidade experimental. Aos terminais de saída (5V/12V) desta fonte CC foram instalados os reguladores de tensão.

A tensão foi regulada de acordo com a resistência elétrica do elemento aquecedor de cada sensor. A potência elétrica dissipada foi mantida próxima de 0,2 W para o método de Granier e 1,6 W para o método de balanço de calor no caule.

Previamente à instalação propriamente dita dos sensores, foi realizada a limpeza e atenuação de irregularidades nas superfícies dos segmentos dos caules das plantas (2 e 3) de nim escolhidas para aplicar o método do balanço de calor. Utilizando-se uma lixa fina foram eliminadas pequenas deformações do caule e da casca do tronco. Com isso, promoveu-se a melhoria do contato entre o corpo do sensor e o caule. Weibel & De Vos (1994), destacam a importância desse procedimento para obtenção de medidas de qualidade.

Na instalação dos sensores de fluxo de seiva pelo método do balanço de calor no caule (Figura 15), o isolamento térmico da jaqueta é fundamental. Para isso, foram empregados materiais como borracha (câmara de pneu), espuma sintética, folhas de alumínio e manta térmica, em camadas sucessivas, amarradas com barbante e vedadas com fita adesiva e silicone.

Gutiérrez et al. (1994), realizaram uma proteção adicional sobre os sensores, valendo-se de uma estrutura em forma de cone revestida de papel alumínio, evitando, assim, a entrada de água da chuva no sistema pela parte superior do sensor.

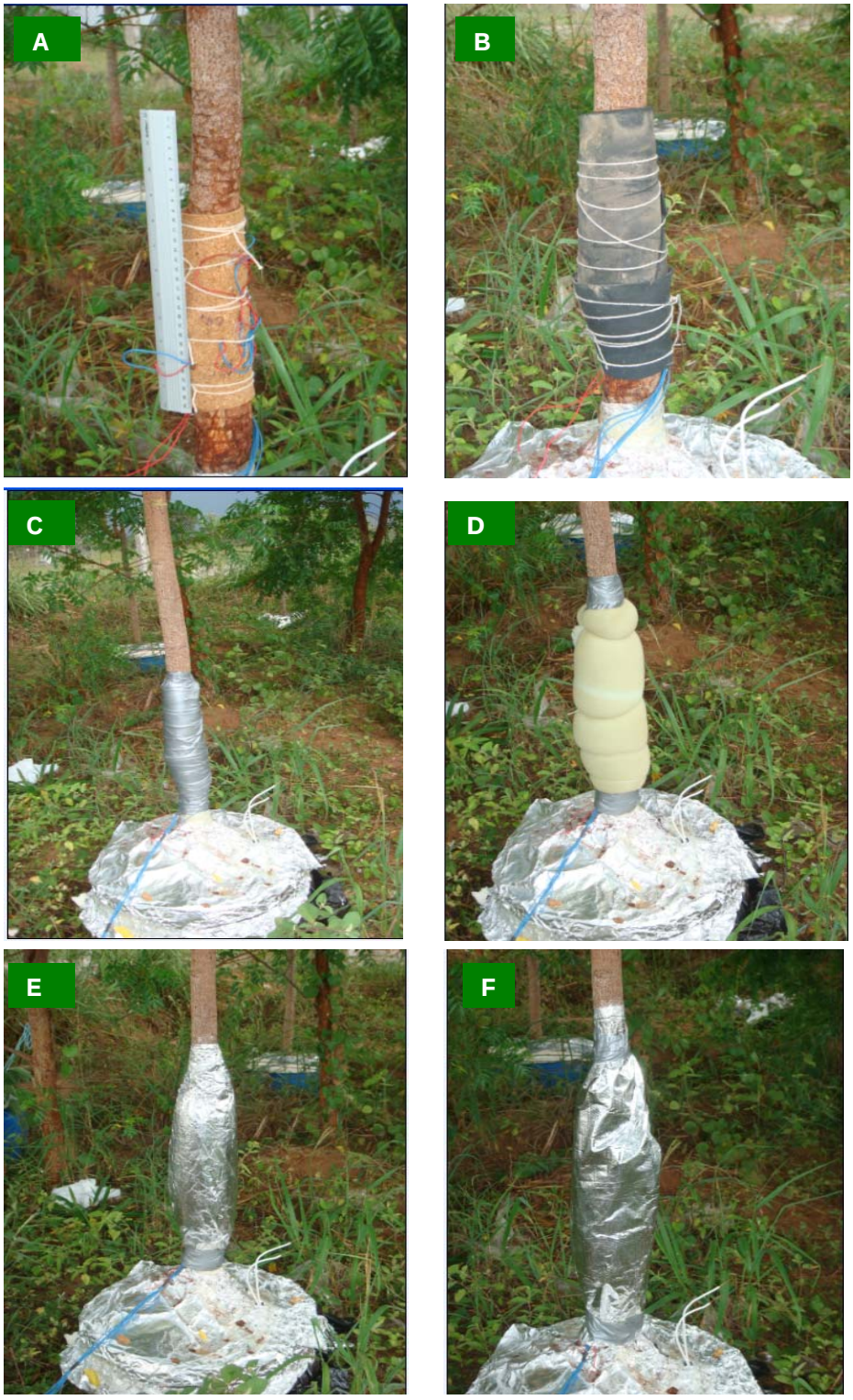

Figura 15 – Processo de instalação de sensores de fluxo de seiva pelo método do balanço de calor no caule, em Plantas de nim, destacando-se a fixação da termopilha (A), a proteção e isolamento térmico com borracha (B), vedação com fita adesiva (C), camada de espuma sintética (D), isolamento térmico com folhas de alumínio (E), cobertura final com manta térmica (F), na Fazenda Experimental da UFMT, em Santo Antônio do Leverger.

3.8 ANÁLISE DOS DADOS

3.8.1 Estatística

Para os dados de área foliar e altura das plantas de nim, foram verificadas a dispersão em torno da média por meio do cálculo do desvio padrão e do coeficiente de variação (VIEIRA, 1998).

Os dados referentes à transpiração das plantas de nim nos lisímetros foram submetidos ao teste F para análise de variância e quando significativos ao nível de 5%, foram submetidos ao teste de Tukey para comparação das médias obtidas em cada um dos parâmetros (SOKAL & ROHLF, 1969).

A relação entre os valores de fluxo de seiva, determinada pelo método do balanço de calor no caule ou pelo método de Granier, e transpiração medida em lisímetro de nível do lençol freático constante foi realizada por meio de regressão linear simples.

3.8.2 Avaliação dos métodos utilizados

O desempenho dos métodos foi avaliado através do índice "*c*" de CAMARGO & SENTELHAS (1997). Este índice foi obtido pelo produto dos índices de precisão "r" e de exatidão "d", sendo expresso por :

$$c = r \cdot d. \tag{39}$$

e interpretado segundo critérios específicos (Tabela 1). O índice de concordância "d" de Willmott (1981,1982) foi encontrado utilizando-se a equação:

$$d = 1 - \left[\frac{\sum (Pi - Oi)^2}{\sum \left(\left| Pi - \overline{O} \right| + \left| Oi - \overline{O} \right| \right)^2} \right] \tag{40}$$

em que Pi é o valor estimado e Oi é o valor observado, e $\overline{O}$ é a média dos valores observados.

Tabela 1- Critérios de interpretação do desempenho dos métodos de medida do fluxo de seiva em plantas de nim, pelo índice "c", segundo Camargo & Sentelhas (1997).

Valor de "c"	**Desempenho**
> 0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito Bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Mau
≤ 0,4	Péssimo

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO METEOROLÓGICA NO PERÍODO EXPERIMENTAL

No período avaliado, entre os meses de maio e dezembro de 2008, as condições meteorológicas em que as observações foram realizadas apresentaram variações típicas da região (CAMPELO JÚNIOR, 1998). Durante o período estudado, a radiação solar incidente (Rg) variou de 6,40 a 20,48 MJ m^{-2} dia^{-1}, com média de 15,30 MJ m^{-2} dia^{-1}. Os valores médios diários de temperatura variaram de 15,0 ºC a 32,9 ºC. A precipitação acumulada, registrada durante o período experimental, foi de 712,9 mm, o que correspondeu a 46,74 % do total acumulado anual. Na Figura 16 é possível observar períodos definidos de seca e chuva. No período compreendido entre os meses de maio e setembro ocorreram apenas três eventos com precipitação superior a 10 mm dia^{-1}.

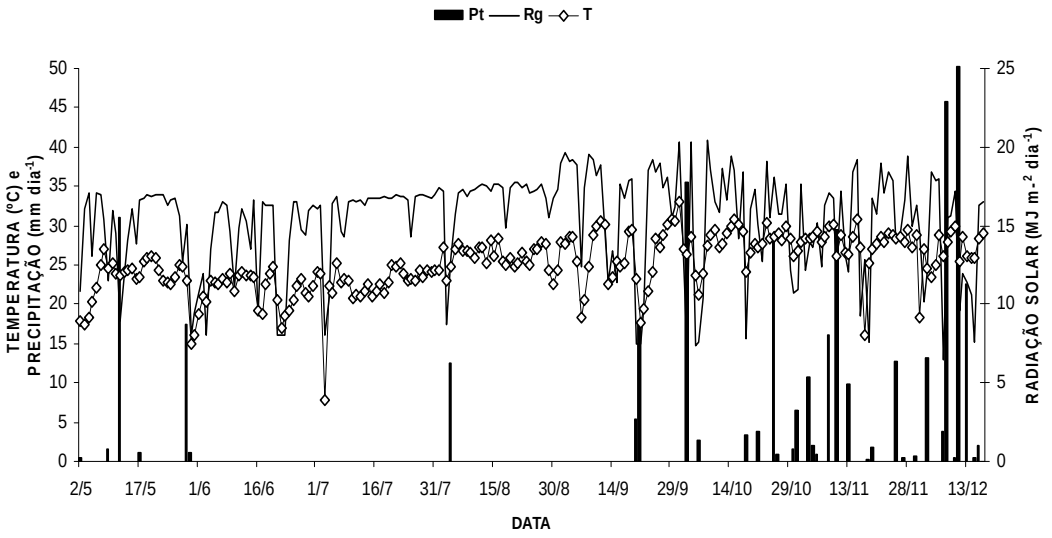

Figura 16 – Evolução diária dos valores médios de temperatura (T), radiação solar (Rg) e precipitação (Pt), no período de 02/05/08 a 19/12/08, na Fazenda Experimental da UFMT, em Santo Antônio do Leverger – MT.

Com o céu nublado e ocorrência de precipitação, espera-se que a radiação solar global tenha queda abrupta, acompanhada de queda na temperatura do ar. Contudo, verificou-se no período de estudo, que Rg apresentou variabilidade sazonal. Considerando os valores médios mensais de Rg, para o período experimental, é possível verificar que a maior média (16,72 MJ m^{-2} dia^{-1}) ocorreu no mês de agosto, em pleno período seco, e a menor média (13,13 MJ m^{-2} dia^{-1}) ocorreu no mês de dezembro, no período chuvoso.

A umidade relativa do ar apresentou sazonalidade, sendo que para valores médios mensais, os meses de maio, junho e dezembro apresentaram-se com o ar mais úmido, atingindo valores acima de 77%. Os menores valores diários foram observados em agosto (35,5%), e setembro (34,5%) (Figura 17). Os menores valores de umidade relativa do ar na estação seca estão relacionados com a menor disponibilidade de água no solo, o que reduz a evapotranspiração e promove aumento no fluxo de calor sensível (WRIGHT et al., 1996).

A evapotranspiração de referência (ETo) média apresentou maior valor em Outubro (3,59 mm dia^{-1}) e menor em junho (2,55 mm dia^{-1}). No final do mês de setembro ocorreram precipitações que marcaram o ínicio do período chuvoso e a conseqüente elevação da ETo.

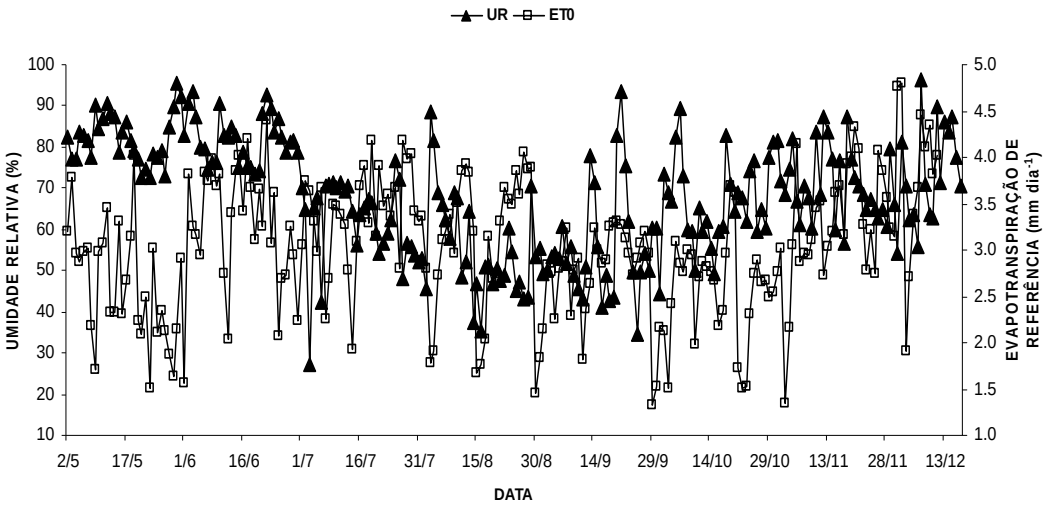

Figura 17 – Evolução diária dos valores médios da evapotranspiração de referência (ETo) e umidade relativa do ar (UR), no período de 02/05/08 a 19/12/08, na Fazenda Experimental da UFMT, em Santo Antônio do Leverger – MT.

4.2 ÁREA FOLIAR

Os valores da área foliar foram obtidos com base na descrição do item 5.4.1 por meio da relação obtida entre os dados de área foliar (*AF*) do processamento da imagem de cada folha e do produto do maior comprimento (*C*) e da maior largura (*L*). A soma da área foliar de cada planta que estava no lisímetro forneceu a área foliar total do lisímetro (Tabela 2).

A área foliar total em cada lisímetro, durante todo experimento, teve uma variação de 0,192 a 6,429 m^2 no lisímetro 1, e 0,534 a 8,181 m^2 no lisímetro 2 e 0,180 a 7,122 m^2 no lisímetro 3. As plantas do lisímetro 2 apresentaram maior área foliar. Isso provavelmente ocorreu por que as plantas estavam situadas entre as duas linhas laterais do conjunto de lisímetros. Esta configuração proporcionou uma melhor condição de hidratação e expansão foliar ao lisímetro 2, devido à proteção lateral à incidência tanto do vento quanto da radiação solar.

Tabela 2 - Área foliar de plantas de nim, cultivadas em lisímetros de nível do lençol freático constante, no período de 02/05/08 a 19/12/08, na Fazenda Experimental da UFMT, em Santo Antônio do Leverger – MT.

	Média nos lisímetros (m^2)											
Lisímetro	**17/5**	**21/6**	**3/7**	**16/7**	**28/7**	**15/8**	**22/9**	**6/10**	**30/10**	**15/11**	**27/11**	**17/12**
1	0,77	1,35	1,31	2,03	2,63	3,58	3,46	4,06	5,90	6,00	3,81	3,10
2	0,59	0,95	1,04	2,15	2,54	2,99	4,92	6,45	7,05	8,18	6,98	2,74
3	0,36	0,90	1,36	2,33	2,98	3,88	4,73	5,40	6,41	6,97	5,56	2,89
Média	0,57	1,07	1,24	2,17	2,72	3,48	4,37	5,30	6,46	7,05	5,45	2,91
CV (%)	29,27	18,91	11,31	5,66	7,06	10,55	14,78	18,42	7,31	12,68	23,79	5,11

No período de observação, verificou-se progressiva elevação da área foliar, sendo que do mês de maio à meados de setembro a evolução foi praticamente linear e a queda de folhas pronunciou-se na segunda semana de novembro (Figura 18). É possível que esta queda de folhas tenha ocorrido por senescência, pois com o crescimento e desenvolvimento das plantas pode ocorrer aumento no sombreamento das folhas inferiores, com redução da área foliar a partir de certo período (BENINCASA, 2003).

Gruber (1992) e Laredo (2003) afirmam que o nim tem preferência por ambientes de temperatura elevada (acima de 20ºC) e quanto mais quente for a região, mais rápido será seu crescimento.

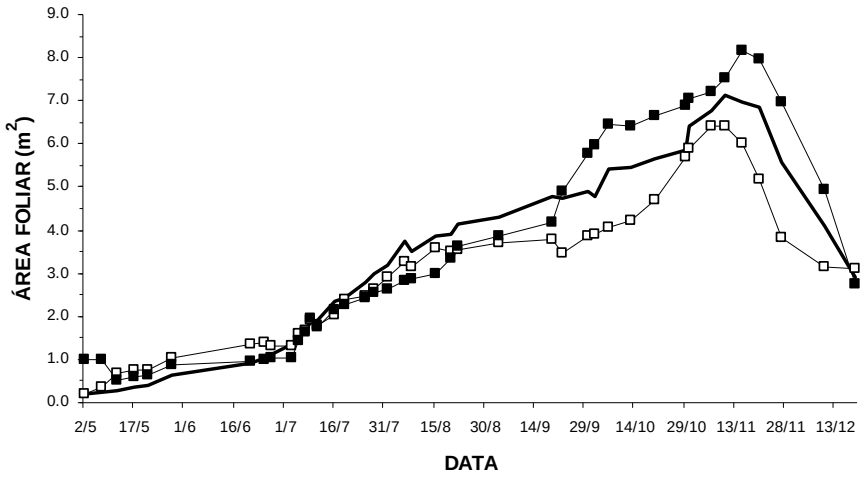

Figura 18 – Área foliar de plantas de nim, cultivadas em lisímetros de nível do lençol freático constante (Lisímetro 1=⊟, Lisímetro 2=■, Lisímetro 3=—), no período de 02/05/08 a 19/12/08, na Fazenda Experimental da UFMT, em Santo Antônio do Leverger – MT.

Lima (1998) avaliou altura de plantas de nim no semi-árido brasileiro e observou que para um espaçamento 3x2 m a altura no primeiro ano era de 2,21 m e no segundo ano de 2,36 m. Estes valores indicam maior aptidão do cerrado mato-grossense para o plantio dessa espécie arbórea, pois, para as mesmas condições de idade e espaçamento, mesmo tendo sido podada no início do experimento, as plantas de nim atingiram mais de 2 m de altura (Tabela 3).

Tabela 3 – Altura média das plantas de nim no período de 02/05/08 a 19/12/08, na Fazenda Experimental da UFMT, em Santo Antônio do Leverger – MT.

	Altura média (m)											
Lisímetro	**17/5**	**21/6**	**3/7**	**16/7**	**28/7**	**15/8**	**22/9**	**6/10**	**30/10**	**15/11**	**27/11**	**17/12**
L1	1,50	1,49	1,57	1,65	1,70	1,90	2,20	2,27	2,43	1,93	1,95	2,11
L2	1,57	1,59	1,69	1,82	1,91	2,04	2,42	2,55	2,70	2,84	2,86	3,00
L3	0,91	1,18	1,26	1,32	1,44	1,59	2,04	2,14	2,33	2,35	2,43	2,49
Média	1,32	1,42	1,51	1,60	1,68	1,84	2,22	2,32	2,49	2,37	2,41	2,53
CV (%)	27,18	15,38	14,67	15,84	14,15	12,49	8,66	9,23	7,69	19,20	18,95	17,57

4.3 MEDIDAS DE TRANSPIRAÇÃO

4.3.1 Medidas lisimétricas

No período experimental, a medida da transpiração das plantas de nim, através de lisímetros, revelou que o consumo diário de água no lisímetro 1, variou de 0,083 a 13,54 L d^{-1} (DJ 123 e 247), com média 4,41 L d^{-1}; no lisimetro 2 a variação foi de 0,027 a 17,293 L d^{-1} (DJ 136 e 247), com média 6,565 L d^{-1} e no lisimetro 3 ocorreu variação de 0,100 a 10,293 L d^{-1} (DJ 149 e 311), com média 3,520 L d^{-1} (Figura 19).

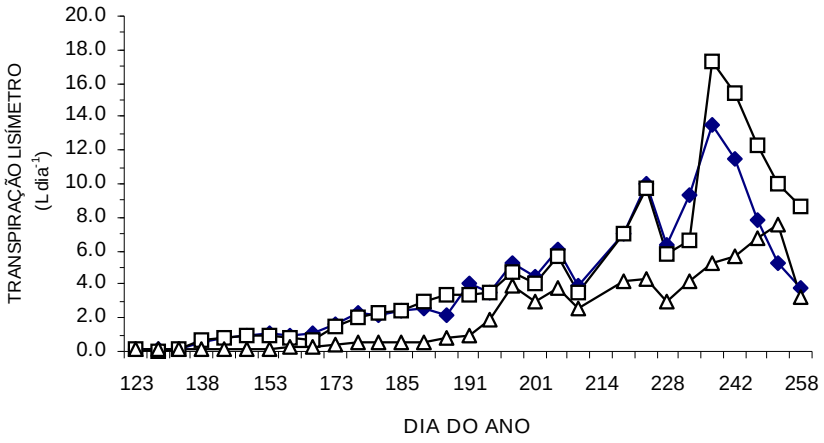

Figura 19 – Transpiração de plantas de nim medida em lisímetros de nível do lençol freático constante (L1= —◆—, L2= —□—, L3= —△—), no período de 03/05/08 a 27/11/08, na Fazenda Experimental da UFMT, em Santo Antônio do Leverger – MT.

A transpiração acumulada apresentada da Figura 20 permite verificar que os valores de transpiração nas plantas do lisímetro 2 apresentaram maior consumo de água, que pode ser atribuído à maior área foliar das plantas. Como explicado no item 6.2, a posição intermediária desse lisímetro, em relação aos outros dois, facilitou o desempenho das plantas no processo transpiratório por estarem protegidas do vento e da radiação solar de incidência lateral.

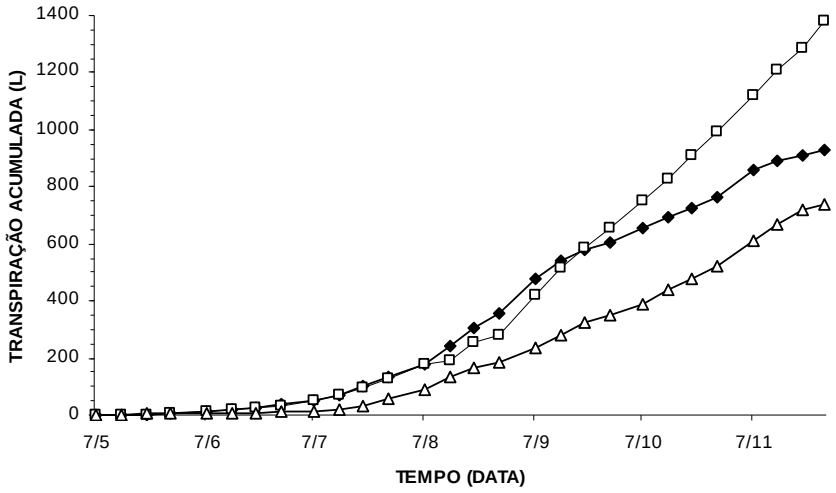

Figura 20 – Transpiração acumulada de plantas de nim medida em lisímetros de nível do lençol freático constante (L1= —◆— , L2= —□— , L3= —△—), no período de 03/05/08 a 27/11/08, na Fazenda Experimental da UFMT, em Santo Antônio do Leverger – MT.

O lisímetro 3 apresentou redução do número de folhas de uma das plantas do lisímetro. Essa queda das folhas, ocorrida no mês de junho, não teve motivo aparente, já que as outras plantas do lisímetro não apresentaram o fenômeno e a planta em questão recuperou-se nos meses subseqüentes.

Os valores de transpiração medida nos lisímetros foram divididos pela respectiva área foliar de cada lisímetro para verificar a evolução da transpiração.

Observando-se os dados dos lisímetros (Figura 21), é possível verificar que as taxas de transpiração foram semelhantes ao longo de todo o período. Observando o comportamento da transpiração das plantas no lisímetro 3, é possível verificar, também, que estas transpiram proporcionalmente menos, em relação às plantas dos outros dois, apesar da normalização da transpiração feita pela área foliar das plantas que se encontravam no lisímetro.

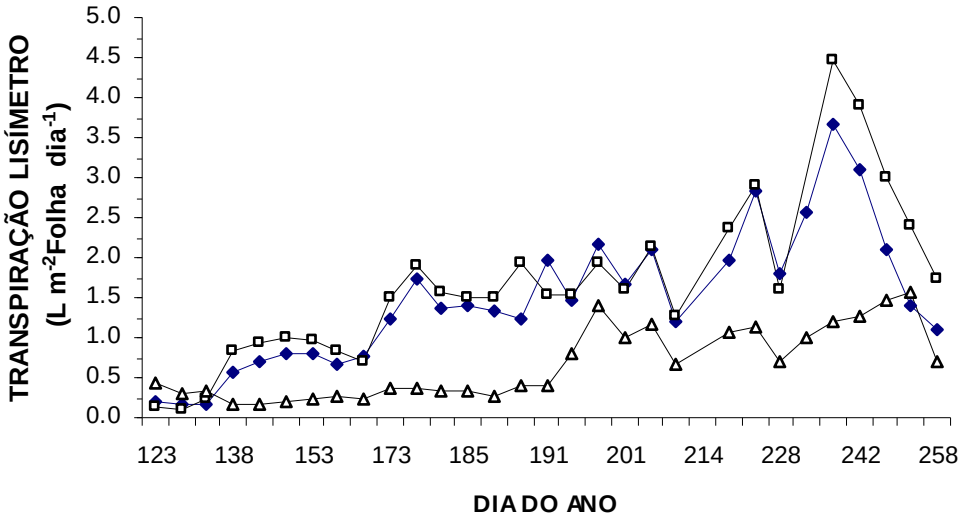

Figura 21 – Transpiração por unidade de área foliar de plantas de nim medida em lisímetros de nível do lençol freático constante (L1= —◆—, L2=—□—, L3=—△—)) no período de 03/05/08 a 27/11/08, na Fazenda Experimental da UFMT, em Santo Antônio do Leverger – MT.

A correlação entre os valores de transpiração por unidade de área foliar pode ser observada na Figura 22. Os resultados obtidos nas Figuras 21 e 22 indicam que, nas condições do presente estudo, quando se comparou a transpiração de diferentes plantas de nim sob as mesmas condições atmosféricas e com plena disponibilidade de água no solo, as diferenças observadas foram proporcionais à área foliar das plantas.

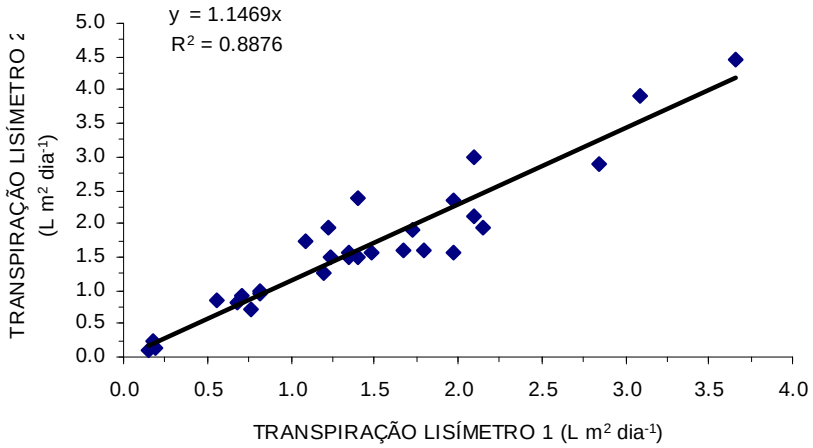

Figura 22– Relação entre a transpiração por unidade de área foliar de plantas de nim medida em lisímetros (L1 e L2) de nível do lençol freático constante, no período de 03/05/08 a 27/11/08, na Fazenda Experimental da UFMT, em Santo Antônio do Leverger – MT.

Estes resultados permitiram utilizar a área foliar das três plantas de cada lisímetro para determinar a transpiração de cada um deles.

4.3.2 Estimativa da transpiração utilizando-se a evapotranspiração de referência.

Ao longo do experimento é possível constatar o intenso crescimento das plantas (Figura 18) e a evolução da transpiração (Figura 19). Ocorreram, também, variações na transpiração devido a oscilações dos elementos meteorológicos entre os dias ao longo do estudo. Espera-se que para uma mesma condição de demanda atmosférica, plantas com maior área foliar transpirem proporcionalmente mais.

O efeito das condições atmosféricas sobre as necessidades hídricas das plantas de nim foi dimensionado pelo método proposto por Villa Nova et al. (1999).

Ao observar a evolução da transpiração das plantas de nim, em cada lisímetro, e ao longo do experimento (Figura 23), é possível verificar que as taxas de transpiração foram semelhantes sob as mesmas condições atmosféricas. As diferenças observadas foram proporcionais à área foliar das plantas.

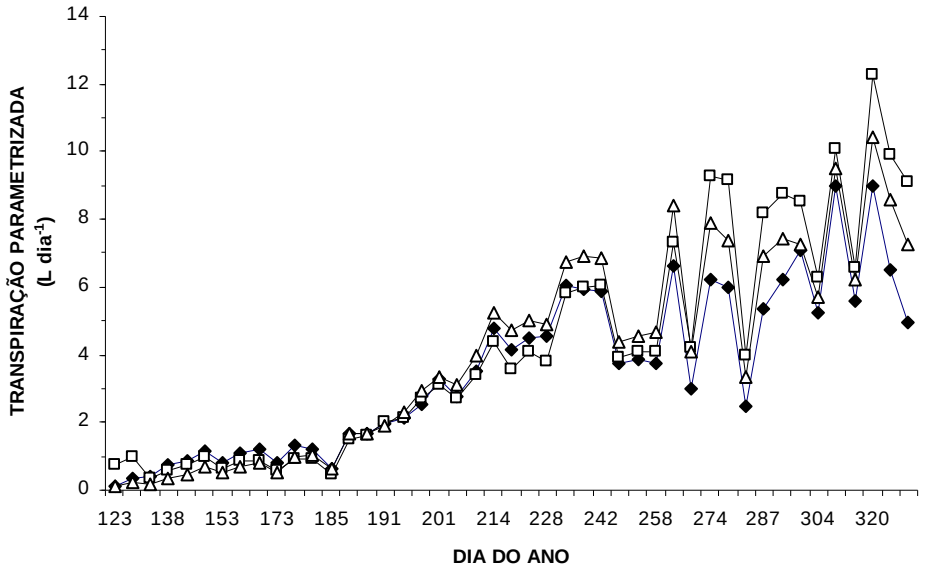

Figura 23 – Transpiração de plantas de nim, parametrizada pela área foliar e Evapotranspiração de referência sobre gramado, em lisímetros de nível do lençol freático constante (L1= —◆—, L2= —□—, L3= —△—), no período de 03/05/08 a 27/11/08, na Fazenda Experimental da UFMT, em Santo Antônio do Leverger – MT.

Comparando-se as estimativas de transpiração pelo método parametrizado e as medidas lisimétricas, foi possível verificar que o método parametrizado explicou 72%, 86,5%, e 70,5% da transpiração nos lisímetros 1, 2 e 3, respectivamente. Na comparação entre os dois métodos houve subestimativa em relação ao método lisimétrico em 28%, 13,5% e 29,5% da transpiração nos lisímetros 1, 2 e 3 respectivamente (Figura 24).

É possível que a transpiração, potencializada pela localização e maior área foliar do lisímetro 2, já discutida anteriormente, explique a maior correlação e consequente menor subestimativa apresentada nesta comparação. Os resultados aqui apresentados, também indicam que a transpiração no lisímetro 3, por sua menor correlação, parece estar menos acoplada às variações da demanda atmosférica. É possível que bolhas de ar na tubulação, entupimentos intermitentes e pequenos vazamentos de água tenham promovido falhas no sistema de manutenção do nível do lençol freático no lisímetro, como verificado por Curi (2000), em experimento sobre a necessidade de água da cultura do feijão, nas condições de Santo Antônio do Leverger – MT.

O bom desempenho do método parametrizado pode ser visualizado pela pequena dispersão dos pontos em relação à reta 1:1, que resultou em coeficiente de correlação superior a 0,7 (Figura 24). Pereira et al. (2006), estudando a transpiração em pomares, empregando o método parametrizado, correlacionaram o fluxo de seiva estimado pelo método do pulso de calor e a transpiração parametrizada pela evapotranspiração e área foliar, obtendo importante correlação, indicada pelos coeficientes de determinação: $R^2 = 0,94$ (macieiras), $R^2 = 0,51$ (videira), $R^2 = 0,83$ (oliveira), $R^2 = 0,96$ (walnut). As plantas de kiwi foram exceção, não apresentando correlação, pois, de acordo com os pesquisadores, as folhas de kiwi continuam a transpirar a taxas elevadas, sob condições de advecção noturna.

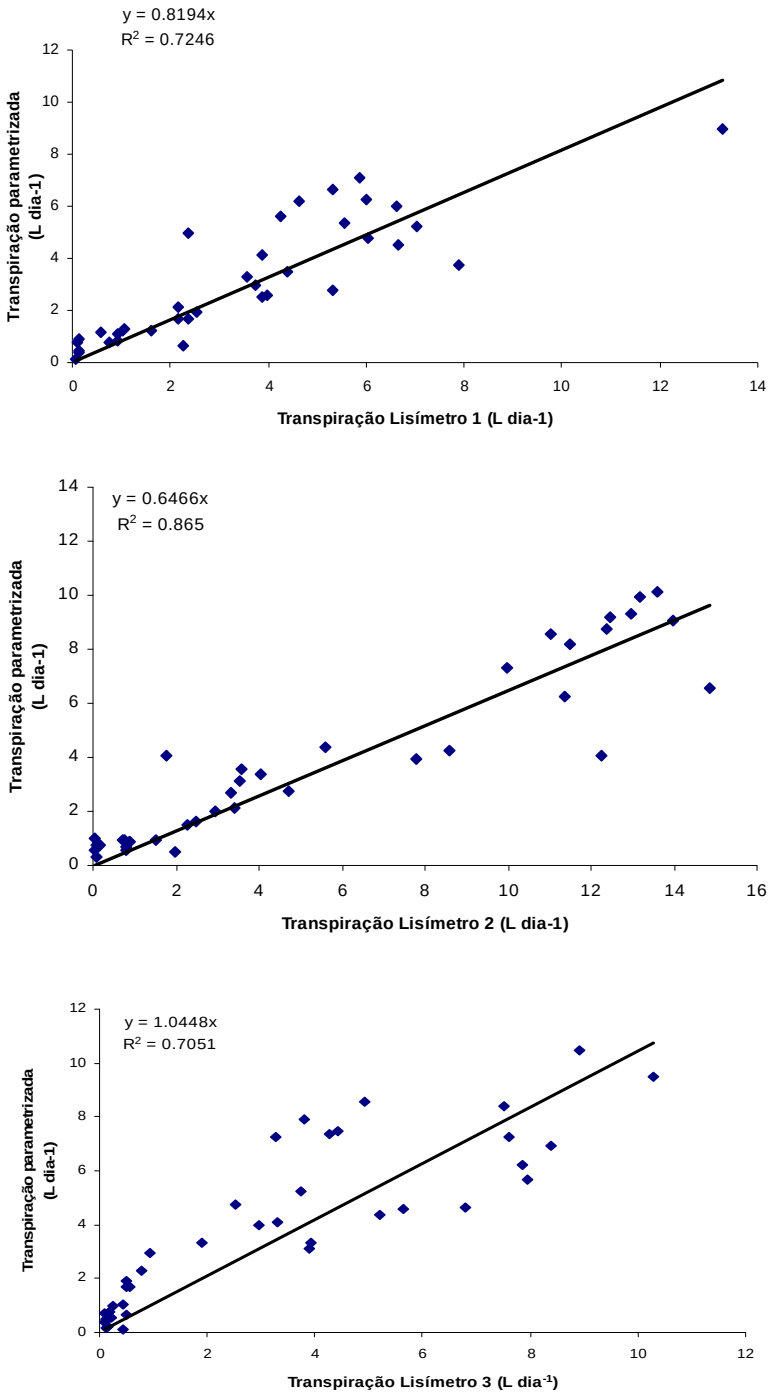

Figura 24 – Relação da transpiração, determinada pelo método parametrizado e a transpiração medida em lisímetro de nível do lençol freático constante, no período de 03/05/08 a 27/11/08, na Fazenda Experimental da UFMT, em Santo Antônio do Leverger – MT.

4.3.3 Taxa de transpiração, radiação solar global, temperatura e umidade relativa.

A variação da densidade de fluxo de seiva em função de variáveis ambientais, como: radiação solar global, temperatura e umidade relativa do ar, apresentou comportamento semelhante, ao longo do período experimental. Ao observarmos a Figura 25, é possível verificar o comportamento da densidade de fluxo de seiva medida pela sonda de dissipação térmica (Método de Granier) para dois dias consecutivos e com diferentes coberturas do céu. O primeiro dia apresenta-se com céu parcialmente nublado, especialmente a partir das 9 horas da manhã, sendo possível perceber o curso irregular da radiação solar quando comparado com a evolução no dia seguinte (céu claro). A planta parece transpirar de forma defasada em relação à radiação solar. Há um tempo de atraso (delay) na resposta dinâmica da planta. É possível observar, também, o mesmo comportamento na temperatura e umidade em relação a radiação solar. O controle do fechamento estomático parece ser evidente, pois como esta planta de nim estava sempre bem suprida de água, característica do lisímetro de nível de lençol freático constante, era de se esperar que havendo demanda atmosférica, a planta viesse demonstrar altas taxas de transpiração, sempre. Contudo, a umidade relativa do ar, e por conseguinte o déficit de pressão de vapor (DPV), além da radiação solar, são fatores que podem promover o controle estomático da planta. Apesar de mecanismo complexo, o controle estomático tem sido observado em muitas espécies e por diferentes autores (MARIN et al., 2008; MEINZER et al., 1999; SILVA & LEMOS FILHO, 2001).

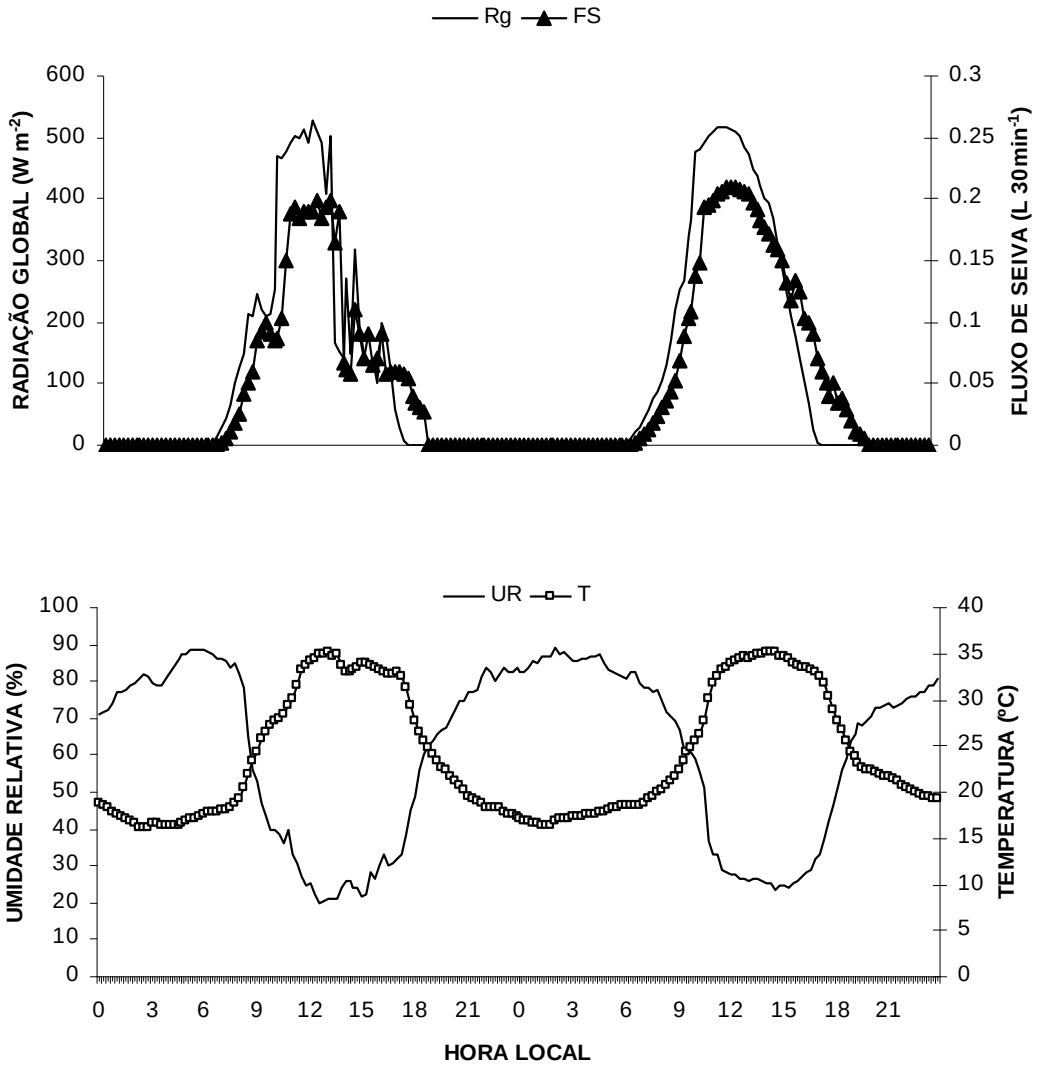

Figura 25 – Curso da radiação global incidente (Rg), densidade de Fluxo de seiva obtido pelo método de Granier (FS), umidade relativa (UR) e temperatura (T), em dois dias consecutivos (DJ=189 e DJ=190). O primeiro, parcialmente nublado e o segundo, com céu claro, na Fazenda Experimental da UFMT, em Santo Antônio do Leverger – MT.

4.3.4 Medidas de fluxo de seiva obtidas pelo método do balanço de calor no caule.

Os valores de fluxo de seiva determinados pelo método do balanço de calor no caule, acumulados a cada intervalo de medida de consumo de água na planta 2 do lisímetro 1, no período de 07/06/2008 a 21/06/2008, variaram entre 0,15 L dia^{-1} e 0,83 L dia^{-1}, com média de 0,43 L dia^{-1}.

A transpiração medida pelo método lisimétrico para o mesmo período e planta, variou de 0,28 L dia^{-1} a 0,35 L dia^{-1}.

Na Figura 26 é possível observar a evolução da transpiração obtida pelas medidas lisimétricas e a obtida pelo fluxo de seiva com o método do balanço de calor. Os dados medidos através do fluxo de seiva sempre se apresentaram mais elevados para o período. Enquanto as medidas no lisímetro indicaram um consumo médio de 5,19 L, as medidas de fluxo de seiva indicaram 6,45L.

Quando foi realizada a mesma comparação entre valores de transpiração obtidas com medidas lisimétricas e os valores de fluxo de seiva obtidos pelo método do balanço de calor aplicado na planta 3 do lisímetro 1, no período de 21/06/2008 a 14/09/2008, verificou-se o mesmo comportamento. Os valores de fluxo de seiva variaram entre 0,33 L dia^{-1} e 7,49 L dia^{-1}, com média de 3,06 L dia^{-1}.

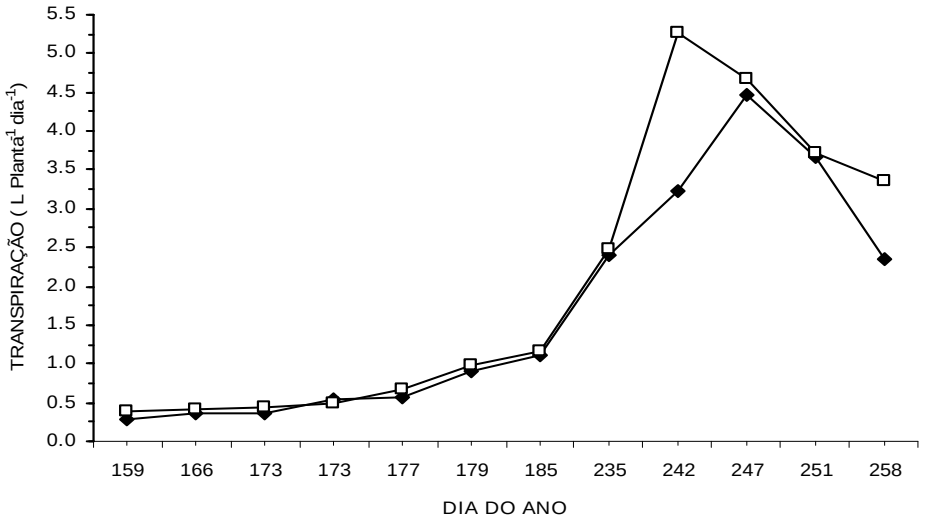

Figura 26 –Fluxo de seiva medido em plantas de nim pelo método do balanço de calor no caule (—□—) e transpiração medida em lisímetro de nível do lençol freático constante (Lisímetro 1= —◆—), no período de 07/06/2008 a 21/06/2008 (planta 2) e 21/06/2008 a 03/07/2008 (planta 3), na Fazenda Experimental da UFMT, em Santo Antônio do Leverger – MT.

A transpiração pelo método lisimétrico para o mesmo período e planta do lisímetro 1, variou de 0,53 L dia^{-1} a 4,46 L dia^{-1}.

Na Figura 27 é possível observar a superestimativa do fluxo de seiva em relação às medidas lisimétricas. Enquanto o lisímetro indicou um consumo médio de 89,82 L, o fluxo de seiva indicou 113,25 L.

A superestimativa observada entre os valores de fluxo de seiva e os dos lisímetros pode ser explicada por eventuais problemas ocorridos nas medidas dos

fluxos verticais de calor, como a dificuldade de obter um contato adequado dos termopares com o tronco da planta de nim e a dificuldade de obter isolamento térmico em relação ambiente, reduzindo a representatividade dos gradientes de temperatura superior e inferior da seção aquecida.

Weibel & Vos (1994), estudando transpiração em macieiras, através do método de balanço de calor no caule, verificaram erros de 25% em função do mau contato entre o sensor comercial e o tronco.

Comparando-se as medidas de fluxo de seiva com as medidas lisimétricas, foi possível verificar que o método térmico explicou 90% da transpiração. Na comparação dos dois métodos houve superestimativa em relação ao método lisimétrico em 18% (Figura 27).

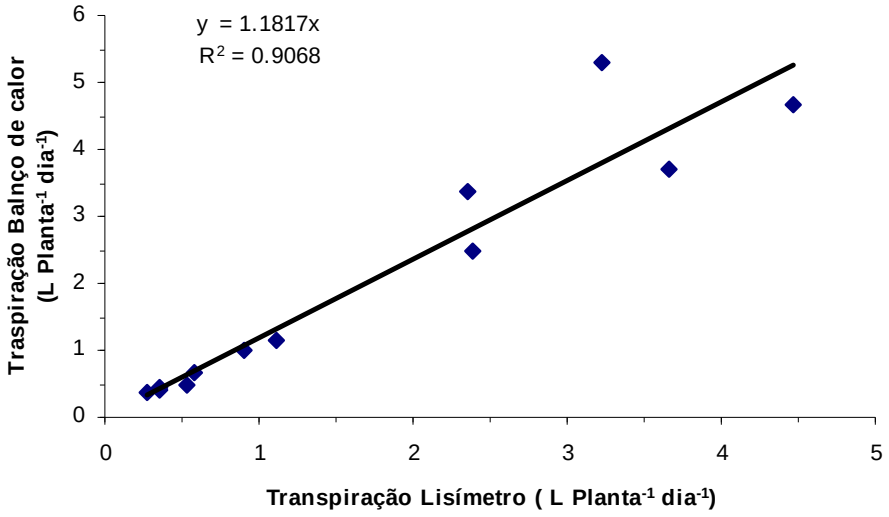

Figura 27 – Relação dos valores de Fluxo de seiva, determinada pelo método do balanço de calor no caule e transpiração medida em lisímetro de nível do lençol freático constante, na Fazenda Experimental da UFMT, em Santo Antônio do Leverger – MT.

Trejo-Chandia (1997), comparando medidas de fluxo de seiva com o método do balanço de calor e medidas da transpiração pelo método gravimétrico, verificou que o método do balanço de calor indicou fluxo transpiratório com diferença média de 8,1% para plantas de tomate, 13,6% para milho e 13,3% para limoeiro, em uma escala de 10 horas, superestimando os dados obtidos através do fluxo de seiva e aqueles obtidos por medidas gravimétricas.

4.3.5 Medidas de fluxo de seiva obtidas pelo método da sonda de dissipação térmica (Granier).

Os valores de fluxo de seiva determinados pelo de Granier, acumulados a cada intervalo de medida de consumo de água na planta 1 do lisímetro 1, no período de 03/07/2008 a 19/07/2008, variaram entre 0,06 L dia^{-1} e 0,76 L dia^{-1}, com média de 0,34 L dia^{-1}.

A transpiração medida pelo método lisimétrico para o mesmo período e planta, variou de 0,11 L dia^{-1} a 0,93 L dia^{-1}.

Na Figura 28 é possível observar a evolução da transpiração obtida pelas medidas lisimétricas e a obtida pelo fluxo de seiva com o método de Granier. Os dados medidos através do fluxo de seiva sempre se apresentaram menores para o período. Enquanto as medidas no lisímetro indicaram um consumo médio de 7,39 L, as medidas de fluxo de seiva indicaram 5,79 L.

Quando foi realizada a mesma comparação entre valores de transpiração obtidas com medidas lisimétricas e os valores de fluxo de seiva obtidos pelo método de Granier aplicado na planta 3 do lisímetro 1, no período de 03/07/2008 a 19/07/2008, verificou-se o mesmo comportamento. Os valores de fluxo de seiva variaram entre 0,30 L dia^{-1} e 2,30 L dia^{-1}, com média de 0,93 L dia^{-1}.

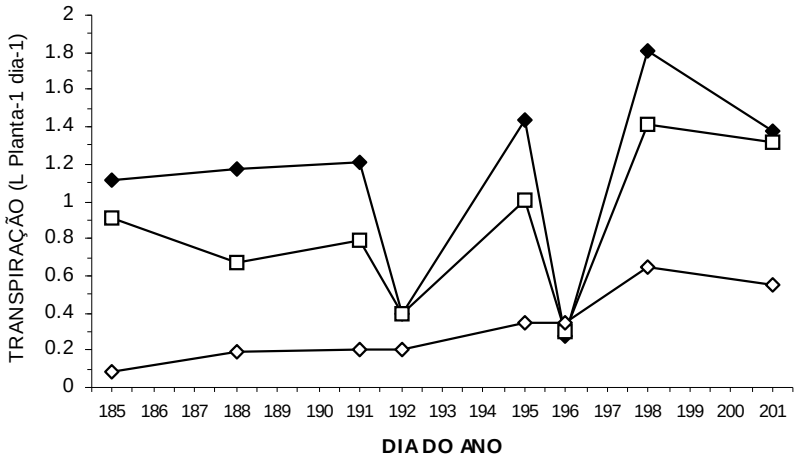

Figura 28 –Fluxo de seiva medido em plantas de nim pelo método de Granier (planta 1=—△—, planta 3=—□—) e transpiração medida em lisímetro de nível do lençol freático constante (Lisímetro 1=—◆—), no período de 03/07/2008 a 19/07/2008, na Fazenda Experimental da UFMT, em Santo Antônio do Leverger – MT.

A transpiração pelo método lisimétrico para o mesmo período e planta do lisímetro 1, variou de 1,11 L.dia^{-1} a 1,8 L.dia^{-1}. Enquanto o lisímetro indicou um consumo médio de 20,99 L o fluxo de seiva indicou 15,78 L

Comparando-se as medidas de fluxo de seiva pelo método de Granier com as medidas lisimétricas, foi possível verificar que o método térmico explicou 91% da transpiração. Na comparação dos dois métodos houve subestimativa em relação ao método lisimétrico em 25% (Figura 29).

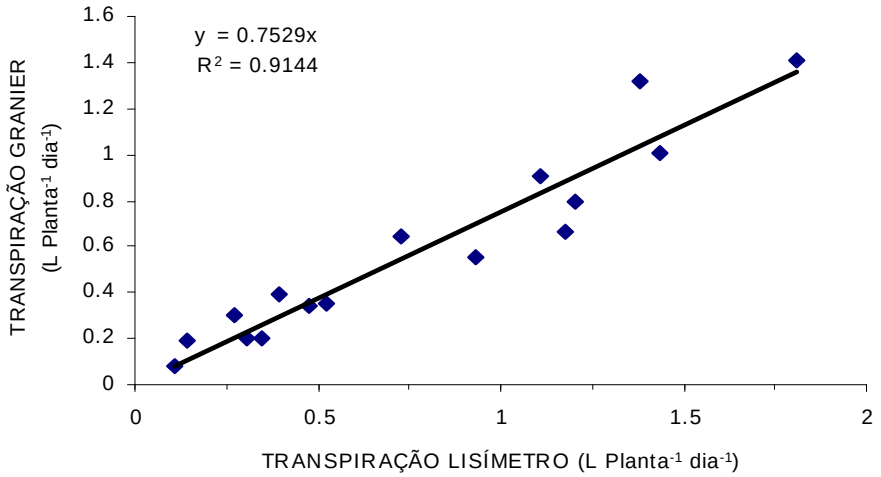

Figura 29 – Relação dos valores de Fluxo de seiva, determinada pelo método de Granier e transpiração medida em lisímetro de nível do lençol freático constante, no período de 03/07/2008 a 19/07/2008, na Fazenda Experimental da UFMT, em Santo Antônio do Leverger – MT.

A subestimativa observada entre os valores de fluxo de seiva e os dos lisímetros pode ser explicada por eventuais problemas ocorridos nas medidas de diferença de temperatura entre a sonda aquecida e a não aquecida, como a dificuldade de obter um contato adequado das sondas que contém os termopares com a área do xilema condutor da planta de nim e a dificuldade de obter isolamento térmico para minimizar a influência do gradiente térmico natural entre o solo e o ponto de inserção das sondas.

Ludbland et al. (2001), avaliando os métodos do balanço de calor e o método de Granier em plantas de pinheiro, concluíram que utilizar o método de Granier sem compensação para gradientes natural de temperatura pode causar erros maiores que 30%.

No Brasil alguns estudos realizados por Delgado-Rojas et al. (2004) e Karasawa et al. (2004), trabalhando com cafeeiro em formação, concluíram que utilizando a equação universal de Granier (1985), a transpiração observada foi apenas de 60 % quando comparada com o método lisimétrico.

Lu & Chacko (1998), estudando a transpiração de plantas de manga, apresentaram resultados que subestimou em menos que 10% a transpiração indicada pelo fluxo de seiva com o método de Granier em relação à transpiração medida pelo método gravimétrico.

4.3.6 Comparação do método da sonda de dissipação térmica (Granier) com o método do balanço de calor

Na Figura 30 é possível observar a evolução da transpiração obtida pelo fluxo de seiva com o método do balanço de calor e a obtida pelo fluxo de seiva com o método de Granier. Os dados medidos através do fluxo de seiva com o balanço de calor sempre se apresentaram mais elevados para o período.

Na comparação das medidas de fluxo de seiva pelos dois métodos térmicos, assumiu-se como referência o método do balanço de calor, por este não requerer calibração, dependendo apenas de parâmetros físicos (MARIN et al., 2008).

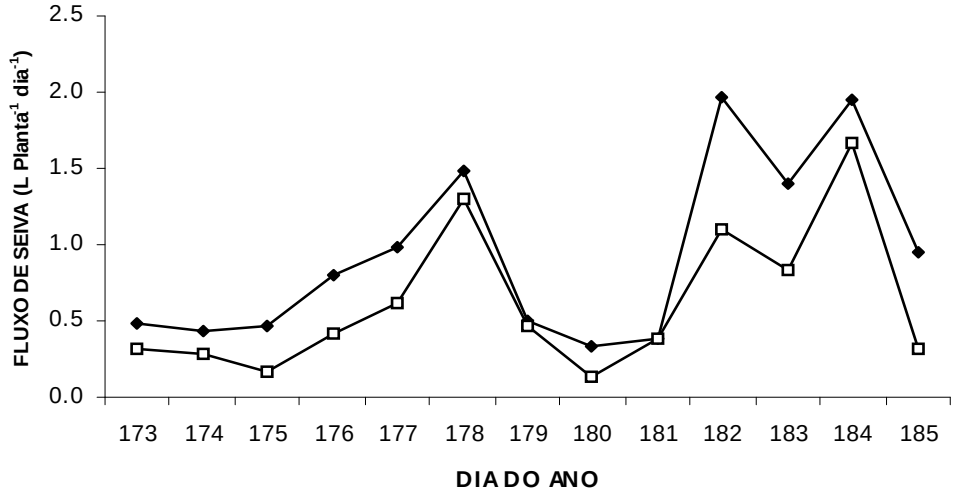

Figura 30 – Fluxo de seiva na planta 3 do lisímetro 1, determinado pelo método do balanço de calor (—+—) e pelo método de Granier (—□—), no período de 03/07/2008 a 19/07/2008, na Fazenda Experimental da UFMT, em Santo Antônio do Leverger – MT.

Comparando-se as medidas de fluxo de seiva pelo método de Granier com as medidas de fluxo de seiva com o método do balanço de calor, foi possível verificar que o método do balanço de calor explicou 82,9% da transpiração obtida pelo fluxo de seiva com o método de Granier. Na comparação dos dois métodos houve subestimativa em relação ao método do balanço de calor em 31,9% (Figura 31).

Os valores da transpiração estimados pelo fluxo de seiva com o método de Granier, na escala diária, comparados com os valores da transpiração observados pelo fluxo de seiva com o método do balanço de calor, permitiu obter o índice de concordância "d" de Willmott, cujo valor foi igual a 0,859, e o índice de precisão "r", cujo valor foi igual a 0,911. O índice de confiança e desempenho "c" proposto por Camargo e Sentelhas (1997) foi igual a 0,782, classificado como "Muito bom".

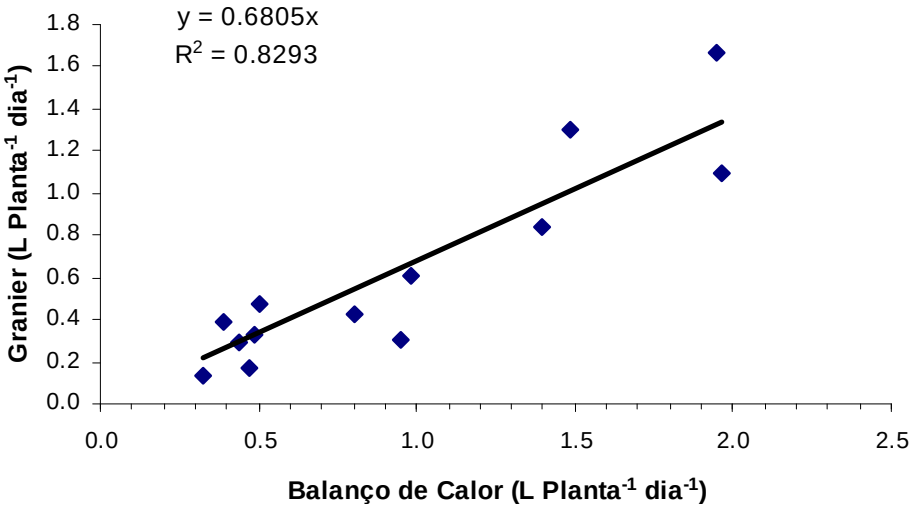

Figura 31 – Relação dos valores de Fluxo de seiva na planta 3 do lisímetro 1, determinada pelo método do balanço de calor e pelo método de Granier, no período de 03/07/2008 a 19/07/2008, na Fazenda Experimental da UFMT, em Santo Antônio do Leverger – MT.

5 CONCLUSÃO

Nas condições do experimento foi possível concluir que:

- O método do balanço de calor no caule superestimou em 18% as medidas lisimétricas da transpiração do nim.

- O método de Granier subestimou em 25% as medidas lisimétricas da transpiração do nim.

- A comparação entre os métodos térmicos, Granier e balanço de calor, de medida da transpiração pelo fluxo de seiva, demonstrou muito bom desempenho na quantificação da transpiração de plantas de nim.

- A transpiração em plantas de nim pode ser determinada pela estimativa do fluxo de seiva obtida pelo método do balanço de calor no caule e método de Granier.

- A transpiração estimada a partir de parametrização com o produto da área foliar da planta e evapotranspiração sobre gramado, revelou ser uma aproximação importante, e poderá ser utilizada como parâmetro no planejamento da irrigação localizada de plantas de Nim.

- As plantas de nim foram sensíveis às variáveis ambientais, promovendo controle na taxa de transpiração quando da variação na radiação solar global e e umidade relativa do ar. Contudo, o estudo de sensibilidade requer delineamento específico de experimento futuro, afim de estudar o complexo processo de controle estomático.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABOUKHALED, A.; ALFARO, A.; SMITH, M. **Lysimeters.** Rome: FAO. 1982, 68p. (FAO.Irrigation and Drainage Paper, 39).

ABOUKHALED, A.; ALFARO, J. F., SMITH, M. **Los lisimetros.** Roma : FAO, 1986. 60p. (Estudio FAO Riego y Drenaje, 24).

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration:** guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 300 p. (FAO – Irrigation and Drainage Paper, 56).

ALLEN, R. G., MARVIN, E. J., WRIGHT, J. L., BURMAN, R. D., Operational estimates of reference evapotranspiration. **Agronomy Journal**, v. 81, p. 650-662, 1989.

ALLEN, R. G.; PRUITT, W. O .; JENSEN, M. E. Environmental requirements of lysimeters. In: ALLEN, R. G.; HOWELL, T. A.; PRUITT, W. O. et al. (Ed.) **Lysimeter for evapotranspiration and environmental measurements**. New York: American Society of Civil Engineers, 1991. p. 170-181.

ANGELOCCI, L. R., **Determinação de fluxo de água nas fases líquida e de vapor em plantas**. Piracicaba: ESALQ, Departamento de Física e Meteorologia, 1995. 30p.

ANGELOCCI, L. R.; MARIN, F. R.; OLIVEIRA, R. F.; RIGHI, E. Z. Transpiration, leaf diffusive conductance, and atmospheric water demand relationship in an irrigated acid lime orchard. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Londrina, v. 16, p. 53-64, 2004.

BAKER, J. M.; VAN BAVEL, C. H. M. Measurement of mass flow of water in the stems of herbaceous plants. **Plant, Cell and Environment**, v.10, p.777-782, 1987.

BAKER, J. M., NIEBER, J. L. An analysis of the steady-state heat balance method for measuring sap flow in plants. **Agricultural Forestry Meteorology**, v. 48, p. 93-109, 1989.

BENINCASA, M. M. P. **Análise de crescimento de plantas, noções básicas**. 2 ed. Jaboticabal: FUNEP, 2003.41 p.

BRARDWAI, S. D.; CHAND, G. Storage of neem seeds: Potential and limitations for germplasm conservation. **The Indian Forester**, Índia, v. 121, n. 11, p. 1009-1011, 1995.

BRAUN, P. Sap flow measurements in fruit trees - Advantages and shortfalls of currently used systems. **Acta Horticulturae**, The Hague, n. 449, p. 267-272, 1997.

BUZA, A. G.; SILVA, O. F. **A importância da pesquisa no desenvolvimento da cadeia produtiva: o nim indiano (*Azadirachta indica* A. Juss) no município de Santa Isabel do Pará**. 2001. 34 f. monografia (Especialização em agricultura na Amazônia) - Universidade Federal Rural da Amazônia - UFRA, Belém, 2001.

CABIBEL, B.; DO, F. Mesures thermiques des flux de sève dans les troncs et lês racines et fonctionnement hydrique des arbres: I. Analyse théorique des ereurs sur la mesure des flux et validation des mesures en présence de gradients thermiques extérieurs. **Agronomie**, v.11, p.669-678, 1991.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

CAMPELO JÚNIOR, J. H. **Avaliação da capacidade de extração da água do solo pelo arroz de sequeiro (*Oriza sativa*) sob diferentes doses de nitrogênio.** Piracicaba: ESALQ, 1985. 127 p. Tese (Doutorado). ESALQ/USP, Piracicaba, 1985.

CAMPELO JÚNIOR, J. H. Relação sazonal entre radiação solar global e insolação no sudeste da Amazônia. **Revista Brasileira de Agrometeorologia,** Santa Maria, v. 6, n. 2, p. 193-199, 1998.

CAMPELO JÚNIOR, J. H. Estimativa da transpiração em seringueira. **Revista Brasileira de Agrometeorologia.** Santa Maria, v.8, n.1, p.35-42, 2000.

CERMAK, J., DEML, M., PENKA, M. A., A new method of sap flow rate determination in trees. **Biologia Plantarum**, v. 15, p. 171-178, 1973.

CLEARWATER, M. J.; MAINZER, F. C.; ANDRADE, J. L. Potential errors in measurement of no uniform sap flow using heat dissipation probes. **Tree Physiology**, Victoria, v. 19, p. 681-687, 1999.

CURI, S. Evapotranspiração e coeficientes de cultura do feijoeiro (Phaseolus vulgaris L.) em Santo Antônio do Leverger – MT. 2000. 75f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Mato Grosso – UFMT, Cuiabá, 2000.

DAUZAT, J.; RAPIDEL, B.; BERGER, A. Simulation of leaf transpiration and sap flow in virtual plants: model description and application to a coffee plantation in Costa Rica. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdan, v. 109, p. 143-160, 2001.

DAVID, T. S.; FERREIRA, M. I.; DAVID, J. S.; PEREIRA, J. S. Transpiration from a mature Eucalyptus globules plantation in Portugal during a spring-summer period of progressively higher water deficit. **Oecologia**, v.110, p.153-159, 1997.

DELGADO-ROJAS, J. S.; KARASAWA, S.; ANGELOCCI, L. R. Determinación de la transpiración del café (*Coffea arabica* L.) a través del método de sonda de disipación térmica. In: REUNIÓN ARGENTINA 5.; LATINOAMERICANA DE AGROMETEOROLOGIA, 9., 2004, La Plata. **Anais...** Buenos Aires: Asociación Argentina de Agrometeorologia, 2004. 1 CD-ROM.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **FAO: Guidelines for predicting crop water requirements**. (Irrigation and Drainage Paper, 24). Roma, 179 p. 1977.

FALESI, C. I.; FERREIRA, C. A. P.; CARVALHO, R. A. Análise Econômica da Produção do nim Indiano no Estado do Pará. Comunicado Técnico 43. 2000, p. 1-4.

FARIA, R. T.; CAMPECHE, F. S. M.; CHIBANA, E. Y. Construção e calibração de lisímetros de alta precisão. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.**, Campina Grande, v. 10, n. 1, 2006.

FAVARIN, J. L.; DOURADO NETO, D.; GARCIA Y GARCIA, A. et al. Equações para estimativa do índice de área foliar do cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.37, n.6, p.769-773, jun. 2002.

GRANIER, A. Une nouvelle methode pour la measure du flux de seve brute dans le tronc des arbres. **Annales des Sciences Forestieres**, v.42, p.193-200, 1985.

GRANIER, A. Mensure du flux de sève brute dans le tronc du douglas par une nouvelle méthode thermique. **Annales des Sciences Forestières**, Nancy, v.44, n.1, p. 1-14, 1987.

GRANIER, A., HUC, R.; COLIN, F. Transpiration and stomatal conductance of two rain forest species growing in plantations (*Simarouba amara* and *Goupia glabra*) in French Guyana. **Ann. Sci. For.,** v.49**,** p. 17–24, 1992.

GRIME, V. L.; MORISON, J. I. L; SIMMONDS, L. P. Sap flow Measurements from stem heat balance: a comparison of constant with variable power methods. **Agricultural and forest Meteorology**, v.74, p. 27-40, 1995.

GRIME, V. L.; SINCLAIR, F. L. Sources of errors in stem heat balance sap flow measurements. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.94, p.103-121, 1999.

GRUBER, A. K. **Biologia y ecologia del arbol de nim (*Azadirachta indica* A. Juss.). Extraccion, medicion, toxicidad y potencial de crear resistencia.** 1992. Ceiba, 33: 249-256.

GUTIÉRREZ, M. V., HARRINTON, R. A., MEINZER, F. C., FOWNES, J. C. The effect of environmentally induced stem temperature gradients on transpiration estimates from the heat balance method in two tropical woody species. **Tree Physiology**, v. 14, p. 179-190, 1994.

HAM, J. M.; HEILMAN, J. L. Dynamics of a heat balance stem flow gauge during high flow. **Agronomy Journal**, v.82, p.147-152, 1990.

HERZOG, K. M.; THUM, R.; SWEIFEL, R. HASLER, R. Heat balance measurements - to quantify sap flow in thin stems only. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.83, p.75-94, 1997.

KARASAWA, S.; DELGADO-ROJAS, J. S.; ANGELOCCI, L. R. Subestimação da transpiração do cafeeiro (*coffea arabica* L.) em formação pelo método de Granier. In: REUNIÓN ARGENTINA 5.; LATINOAMERICANA DE AGROMETEOROLO GIA, 9., 2004, La Plata. **Anais…** Buenos Aires: Asociación Argentina de Agrometeo rologia, 2004. 1 CD-ROM.

KARASAWA, S. **Evapotranspiração de cafezal semi-adensado irrigado por gotejamento e sua relação com a evapotranspiração de referência**. 2006. 97 p. Tese (Doutorado em Física do Ambiente Agrícola) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

KHAN, B. R. Design, construction and testing of lysimeter for study of evapotranspiration of different crops. **Agricultural Water Management,** Alexandria, v. 23, n.3, p.183-197, 1993.

KÖSTNER, B.; GRANIER, A.; CERMÁK, J. Sap flow measurements in forest stands: methods and uncertainties. **Annales Science Foresty**. v.55, p.13-27, 1998.

KRAMER, P. J.; BOYER J. S. Water relations of plants and soils. San Diego: Academic, 1995. 495p.

LAREDO, G. Planta gosta de altas temperaturas e chega a 11 metros de altura. Globo rural, Rio de Janeiro, n.213, 2003. Disponível em: http://revistagloboruralrural. globo.com/GloboRural/htm. Acesso em: 27 jan. 2007.

LIMA, P. C. F. Comportamento silvicultural de *Azadirachta indica* A. Juss. (Neem) no semi-árido brasileiro. **Boletim de pesquisa.** EMBRAPA/ CPATSA, n. 89, p.1-4, 1998.

LOUSTAU, D.; DOMEC, J. C.; BOSC, A. Interpreting the variations in xylem sap flux density within the trunk of maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.): Application of a model for calculating water flows at tree and stand levels. **Annales des Sciences Forestierès**, Versailles, v. 55, p. 29- 40, 1998.

LU, P.; CHACKO E. Evaluation of Granier's sap flux sensor in young mango trees. **Agronomie**, v.18, p.461-471, 1998.

LU, P.; MÜLLER, W. J.; CHACRO, E. K. Spatial variations in xylem sap flux density in the trunk of orchard-grown, mature mango trees under changing soil water conditions. **Tree Physiology**, v.20, p. 683-692, 2000.

LUNDBLAD M., LAGERGREN F. & LINDROTH A. Evaluation of heat balance and heat dissipation methods for sap flow measurements in pine and spruce. **Annals of Forest Science**, v.58, 625–638, 2001.

MAIA, E. L. Comportamento vegetativo de três espécies florestais sob estresse hídrico, com adubação orgânica em solos da região semi-árida nordestina/ Eleide Leite Maia.– Areia, PB: CCA/UFPB, 2005. 53 p.: il.

MARSHALL, D. C. Measurement of sap flow in conifers by heat transport. **Plant Physiology**, Washington, v. 33, n. 6, p. 385-396, 1958.

MARIN, F. R., ANGELOCCI, L. R., PEREIRA, A. R., VILLA NOVA, N. A., SENTELHAS, P. C., Sap flow and evapotranspiration in na irrigated citrus orchard. **Revista Brasileira de Agrometeorologia,** Santa Maria, SC, v. 9, n. 2, p. 219-226, 2001.

MARIN, F. R., RIBEIRO, R.V., ANGELOCCI, L. R., RIGHI, E.Z. Fluxo de seiva pelo método do balanço de calor: base teórica, qualidade das medidas e aspectos práticos. **Bragantia**, Campinas, v. 67, n. 1, p.1-14, 2008 .

MARTINEZ, S. S. O nim - *Azadirachta indica* - Natureza, Usos Múltiplos, Produção. Londrina, IAPAR, 142 p. 2002 (ed.)

MEINZER, F. C.; GOLDSTEIN.; FRANCO, A. C.; BUSTAMANTE, M.; IGLER, E.; JACKSON, P.; CALDAS, L.; RUNDEL, P. W. Atmospheric and hydraulic limitations on transpiration in Brazilian cerrado woody species. **Functional Ecology.** 13:273-282, 1999.

MISHRA, R. N. Neem improvement research at arid forest research institute, Jodhpur. **The Indian Forester**, Índia, v. 121, n. 11, p. 997-1002, 1995.

MONTEIRO, J. E. B. A.; SENTELHAS, P. C.; CHIAVEGATO, E. J. Estimação da área foliar do algodoeiro por meio de dimensões e massa das folhas. **Bragantia**, Campinas, v. 64, n.1, p.15-24, 2005.

NEVES, B. P.; NOGUEIRA, J. C. M. **Cultivo e utilização do nim indiano (*Azadirachta indica* A. Juss.)**. Goiânia: EMBRAPA/CNPAF, 1996. 32P.

OHASHI, S. T.; SILVA, J. N. M.; SILVA, M. E. C. E.; COSTA, M. S. S.; SARMENTO JÚNIOR, R. G.; SANTOS, E. B.; ALVES, M. Z. N.; PESSOA, A. M. C.; SILVA, T. C. O.;BITTENCOURT, P. R. G.; BARBOSA, T. C.; SANTOS, T. M. Manejo Integrado da Broca do Mogno *Hypsipyla grandella* Zeller (Lep. Pyralidae). In: POLTRONIERI, L. S.;TRINDADE, D. R. **Manejo integrado das principais pragas e doenças de cultivos amazônicos**.Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2002. 304p.

PEREIRA, A. R.; GREEN S.; VILLA NOVA, N. A. Penman–Monteith reference evapotranspiration adapted to estimate irrigated tree transpiration. **Agricultural Water Management**, Vol. 83, p. 153-161, 2006.

RAMOS, A. L. M. Reflorestamento e Sistemas Agroflorestais com nim. In: MARTINEZ, S. S. ed. **O nim- -** ***Azadirachta indica*** **– natureza, usos múltiplos, produção**. Londrina, IAPAR, 2002. p. 97-109.

RANGEL, M. S. A.; SANTANNA, S. A. C. de. Ocorrência de comportamento recalcitrante em sementes de nim (*Azadirachta indica* A. Juss). Aracaju: EMBRAPA: Centro de Pesquisa Agropecuária dos Tabuleiros Costeiros, 1997. 3p. (EMBRAPA. CPATC, Pesquisa em Andamento, 25).

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera:** conceitos, processos e aplicações. São Paulo, Manole, 2004. 478p.

ROJAS, J. S. D. **Avaliação do uso do fluxo de seiva e da variação do diâmetro do caule e de ramos na determinação das condições hídricas de citros, como base para o manejo de irrigação**. 2003. 110 f, Tese (Doutorado em Agronomia, Área de Concentração: Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

SAKURATANI, T. A heat balance method for measuring water flux in the stem of intact plants. **Journal of Agricultural Meteorology**, v.37, n.1, p.9-17, 1981.

SANTOS, R. F. ; CARLESSO, R. Déficit hídrico e os processos morfológicos e fisiológico das plantas. . **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 2, n. 3, p. 287-294, 1998.

SARMIENTO, G.; GOLDSTEIN, G.; MEINZER, F. Adaptative strategies of woody species in neotropical savanas. **Biological Review**, 60:315-355, 1985.

SHACKEL, K. A.; JOHNSON, R. S.; MEDAWAR, C. K. Substantial errors in estimates of sap flow using the heat balance technique on wood steam under field condictions. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v.117, n.2, p.351-356, 1992.

SCHULZE, E. D. Soil, water deficits and atmospheric humidity as environmental signals. In **Water deficits**: plant responses from cell to community. Smith, J. A.C. and Griffiths, H. BIOS Scientific Publisher, Oxford, United Kingdom, 98-125, 1993.

SINCLAIR, T. R.; ALLEN JUNIOR, L. H. Carbon dioxide and water vapour exchange of leaves on field-grown citrus trees. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 33, p. 1166-1175, 1982.

SINGHAL, N. Nim. Nova Delhi: INSDOC, 2000. 7p. Disponível em: <http://www.bioflorestal.com.br>. Acesso em jul, 2006.

SILVA, B. G.; LEMOS FILHO, J. P. Relações hídricas em espécies lenhosas no campus Pampulha/UFMG, Belo Horizonte, MG. **Revista Brasileira de Botânica**, São Paulo, v.24, n.4 (suplemento), p.519-525, dez., 2001.

SILVA, F. C.; FOLEGATTI, M. V.; MAGGIOTTO, S. R. Análise do funcionamento de um lisímetro de pesagem com célula de carga. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.7, n.1, p. 53-58, 1999.

SILVA, T. J. A.; MONTENEGRO, A. A.; RODRIGUES, J. J. V.; BONFIM, E. M. Aplicação de lisímetro de pesagem hidráulica na determinação da evapotranspiração de referência, em Petrolina – PE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 23, n. 3, p. 511-520, 2003.

SMITH, D. M.; ALLEN, S. J. Measurement of sap flow in plants stems. **Journal of Experimental Botany**, v.47, n.305, p.1833-1844, 1996.

SMITH M. **FAO: Report on the expert consultation on revision of FAO metodologies for crop water requeriments.** Roma, 45 p. 1991.

SODEPAZ–Solidaridad para el desarrollo Y La Paz http://www.sodepaz.org/nim/ (22 de abril de 2006).

SOKAL, R. R.; ROHLF, F. J**. Biometry: the principles and practice of statistic in biological research**. Ed. W. H. Freeman and Company, San Francisco, 395p., 1969.

STEINBERG, S.; BAVEL, C. H. M. VAN; CORNELIUS, H. M. A gauge to measure mass flow rate of sap in stems and trunks of wood plants. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v.114, n.3, p.466-472, 1989.

TORNEBIZE, R.; BOISTARD, S. Comparison of two sap flow methods for the estimation of tree transpiration. **Annales des Sciences Forestieres**, v.55, n.6, p.706-713, 1998.

TREJO-CHADIA, J. E. **Avaliação do método de balanço de calor na estimativa da transpiração em tomateiros, plantas de milho e mudas de limoeiro**. Piracicaba, 1997. 75p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

WEIBEL, F. P.; VOS, J. A. Transpiration measurements on apple trees with an improved stem heat balance method. **Plant and Soil**, v.166, p.203-219, 1994.

WILLMOTT, C. J. Some comments on the evaluation of model performance. **Bulletin American Meteorological Society**. Boston, v. 63. n. 11. p. 1309-1313, 1982.

WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, v. 2, p. 184-194, 1981.

WRIGHT, I.R.; NOBRE, C.A.; TOMASELLA, J.; ROCHA, H.R.; ROBERTS, J.M.; VERTAMATTI, E.; CULF, A.D.; ALVALÁ, R.C.; HODNETT, M.G.; UBARANA, V. Towards a GCM surface parameterization for Amazonia. In: GASH, J.H.C.; NOBRE, C.A.; ROBERTS, J.M.; VICTORIA, R.L. (Eds.) **Amazonian Deforestation and Climate**. New York: J. M. Wiley and Sons, 1996, p.473-504.

YONG, J. W. H.; WONG, S. C.; FARQUHAR, G. D. Stomatal responses to changes in vapour pressure difference between the leaf and air. **Plant, Cell and Environment,** 20: 1213-1216, 1997.

VIEIRA, S. **Introdução à bioestatística**. 3.ed. Rio de Janeiro : Campus, 1998, 216p.

VILLA NOVA, N. A.; REICHARDT, K. Evaporação e evapotranspiração. In: RAMOS, F. et al. **Engenharia Hidrológica.** Rio de Janeiro: ABRH/UFRJ, 1989. Cap. 3, p. 145-97.

VILLA NOVA, N. A.; ANGELOCCI, L. R.; VALANCOGNE, C.; PEREIRA, A. R.; SENTELHAS, P. C. Estimativa da transpiração máxima de macieiras em pomares irrigados pelo método da advecção-aridez adaptado. (compact disc) In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 11., 1999, **Anais**..., Florianópolis: SBA, 1999. (CD-Rom).