



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA**

**IVENS BARBOZA LEÃO**

**CONSTRUÇÃO, CALIBRAÇÃO E ANÁLISE DE FUNCIONAMENTO DE  
LISÍMETROS DE PESAGEM CULTIVADOS COM CANA-DE-AÇÚCAR  
(Saccharum spp)**

**MACEIÓ-AL.  
2011**

IVENS BARBOZA LEÃO

**CONSTRUÇÃO, CALIBRAÇÃO E ANÁLISE DE FUNCIONAMENTO DE  
LISÍMETROS DE PESAGEM CULTIVADOS COM CANA-DE-AÇÚCAR  
(*Saccharum spp*)**

Dissertação apresentada a Universidade Federal de Alagoas, para a obtenção do título de Mestre em Meteorologia, Área de concentração Processos de Superfície Terrestres.

Orientador: Profº Dr. Manoel da Rocha Toledo Filho

MACEIÓ-AL.  
2011

**Catálogo na fonte**  
**Universidade Federal de Alagoas**  
**Biblioteca Central**  
**Divisão de Tratamento Técnico**

**Bibliotecária Responsável: Helena Cristina Pimentel do Vale**

- L437c      Leão, Ivens Barboza.  
              Construção, calibração e análise de funcionamento de lisímetros de passagem cultivados com cana-de-açúcar (*Saccharum* spp) / Ivens Barboza Leão. – 2011. 71 f. : il. grafs., tabs.
- Orientador: Manoel da Rocha Toledo Filho.  
Dissertação (mestrado em Meteorologia : Processos de Superfície Terrestre) – Universidade Federal de Alagoas. Instituto de Ciências Atmosféricas. Maceió, 2011.
- Bibliografia: f. 67-71.
1. Evaporação (Meteorologia). 2. Cana-de-açúcar – Evapotranspiração. 3. Lisímetro. 4. Célula de carga. I. Título.

CDU: 551.573



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS  
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

## CERTIFICADO DE APRESENTAÇÃO

N.º de ordem: MET-UFAL-MS-083.

**“CONSTRUÇÃO, CALIBRAÇÃO E ANÁLISE DE FUNCIONAMENTO DE  
LISÍMETROS DE PESAGEM CULTIVADOS COM CANA-DE-AÇÚCAR  
(*Saccharum spp.*)”**

*Ivens Barboza Leão*

Dissertação submetida ao colegiado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Alagoas - UFAL, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Meteorologia.

Aprovado pela Banca Examinadora composta por:

*Manoel Toledo*

Prof. Dr. Manoel da Rocha Toledo Filho  
(Orientador)

*Márcio Aurélio Lins dos Santos*

Prof. Dr. Márcio Aurélio Lins dos Santos  
(Membro interno)

*José Valdemir Tenório da Costa*

Prof. Dr. José Valdemir Tenório da Costa  
(Membro externo – Usina Coruripe S/A)

Fevereiro /2011

Aos meus pais **Ilson Barboza Leão**  
e **Maria de Fátima Duarte**  
**Barboza** pela educação, amor e  
dedicação que sempre tiveram  
comigo.

Dedico

## AGRADECIMENTOS

À DEUS que me conduziu por toda essa caminhada, mesmo diante de todas as tempestades, obrigado Senhor Jesus por tudo que alcancei.

À Universidade Federal de Alagoas, Instituto de Ciências Atmosféricas pela oportunidade oferecida pela realização do curso.

Ao CNPq pela aprovação do projeto, intitulado: Determinação do Coeficiente de Cultura (Kc) da Cana-de-Áçúcar (*Saccharum SSP*), no edital Universal (2007), coordenado pelo Prof. Dr<sup>o</sup> Márcio Aurélio Lins dos Santos.

Aos professores do Instituto de Ciências Atmosféricas, em especial ao Prof. Dr. Manoel da Rocha Toledo Filho pela orientação e apoio, ao Prof<sup>o</sup> Dr. Ricardo Amorim pela amizade.

Ao Prof<sup>o</sup> Dr<sup>o</sup> Márcio Aurélio Lins dos Santos, Diretor do campus Arapiraca, pela co-orientação, parceria e amizade. Aos Bolsistas do campus UFAL- Arapiraca, Paulo Ferreira, Daniella Pereira, Míriam Paula.

A Usina Coruripe pela disponibilidade da área, assistência técnica, mão-de-obra e oportunidade da realização do experimento e apoio. Ao Eng<sup>o</sup> Agrônomo Dr<sup>o</sup> José Valdemir Costa, Coordenador do Departamento de Mecanização, Nutrição e Desenvolvimento e ao Técnico Agrícola Eraldo Pereira, Supervisor de Pesquisa e Desenvolvimento Agrícola, meus agradecimentos.

Aos meus pais Ison Barboza Leão e Maria de Fátima, aos meus irmãos Ison Junior, Ielson Leão, José Neto e Ilza Fernanda e a toda minha família pelo apoio, amor, e compreensão.

À Gabriela Azevedo pelo amor, carinho e paciência nos momentos difíceis desta caminhada.

Aos meus Amigos do curso de Pós-graduação em Meteorologia: Fernanda Casagrande, Diogo Brauner, Gabriel Brito, Alessandro Oliveira, Paulo e Deodato.

À Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de Alagoas (FAPEAL), pela concessão da bolsa de estudo.

À todos que de alguma maneira contribuíram para realização desse trabalho.

## RESUMO

O uso de lisímetros de pesagem serve como uma ferramenta padrão em estudos de perda de água das culturas agrícolas, pois tais equipamentos medem diretamente a evapotranspiração de culturas agrônômicas que cobrem ou não totalmente o solo. Este trabalho teve o objetivo de construir, calibrar e analisar o funcionamento de dois lisímetros de pesagem com área de 2,7 m<sup>2</sup>, instalados na Usina Coruripe litoral sul de Alagoas. Cada construção consiste de caixa interna de aço galvanizado instalado sobre uma estrutura de alvenaria (caixa externa) com paredes 20 cm. Sobre essa estrutura foram instalados duas bases de cantoneiras soldada e reforçada com barras no sentido transversal para fixação das 3 células de cargas. Após esse procedimento os lisímetros foram preenchidos com solo e interligados ao datalog. A calibração do sistema foi obtida com adição e retirada de massas-padrão previamente conhecidas. A análise de funcionamento foi realizada utilizando três formas para a obtenção da evapotranspiração, a primeira  $ET_{c1}$  - diferença de massa do conjunto solo-caixa no início do dia (0 h) e a massa obtida no final do dia (24 h) foi considerada como padrão conforme Champeche 2002, a segunda  $ET_{c2}$  - consiste no somatório de todas as diferenças de massa calculadas em cada intervalo de integração ao longo de um dia, descontando apenas os valores de precipitações e irrigações, a terceira  $ET_{c3}$  - diferença de massa do conjunto solo-caixa do período de (06:00 às 19:30 h). Com base nos resultados, verificou-se que os lisímetros construídos apresentaram boa performance, detectando as variações de massa ao longo de um dia, inclusive dias com precipitações. Os lisímetros obtiveram um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,9962 e 0,9999 na calibração, estando ambos aptos para a determinação da evapotranspiração. A forma para determinação da evapotranspiração  $ET_{c2}$  somatório da diferença de massa ao longo de todo dia, apresentou excelente coeficiente de determinação quando comparados com a diferença de massas ao final do dia ( $ET_{c1}$ ), podendo ser utilizada para determinar a evapotranspiração. A evapotranspiração da cana-de-açúcar determinada na fase



final intermediária do seu ciclo obtida pela forma padrão  $ET_{c1}$  apresentou valores menores do que a estimada pelo  $ET_o-PM$ .

**Palavras-chave:** Evapotranspiração. Lisimetria. Célula de Carga.

## ABSTRACT

The weighing lysimeters are used like a standard tool on agricultural crops water losses, because such equipments directly measure the agronomic crops evapotranspiration which cover or not fully the soil. This work aimed to build, calibrate and analyze the functioning of two weighing lysimeters with an area of 2,7 m<sup>2</sup>, installed in Coruripe plant, on the south coast of Alagoas. Each build consisted in a internal cavity in galvanized steel installed above a masonry structure (internal cavity) with walls 20 cm thick. On this structure were installed two bases of angles welded and reinforced with rods in the cross direction for setting the 3 loading cells. After this procedure the lysimeters were filled with soil and interconnected to the datalog. The calibration of the system was obtained with the addition and removal of mass-pattern previously known. The analysis of operation was carried out using three forms for obtaining the evapotranspiration, The first  $ET_{C_1}$  - difference in mass of the whole soil-box at the beginning of the day (0 h) and the mass obtained at the end of the day (24 h) was considered as the standard as Champeche (2002); The second  $ET_{C_2}$  - consists of the sum of all the mass differences calculated in each interval of integration over a day, discounting only the values of precipitation and irrigation; The third  $ET_{C_3}$  - difference in mass of the whole soil-box of the period (06:00 am the 7:30 pm - hours). On the basis of the results, it was found that the lysimeters constructed showed a good performance, detecting changes in mass over a day, including days with precipitation. The lysimeters were a coefficient of determination ( $R^2$ ) of 0.9962 and 0.9999 for calibration, who are both suitable for the determination of the evapotranspiration. The form for the determination of the evapotranspiration  $ET_{C_2}$ , sum of the difference in mass throughout the entire day, presented an excellent coefficient of determination when compared with the difference in masses at the end of the day ( $ET_{C_1}$ ), which can be used to determine evapotranspiration. The

evapotranspiration of sugar-cane determined in the final stages of its intermediate cycle obtained by standard form  $ET_{c1}$  values were lower than that estimated by  $ET_{o-PM}$ .

**Key words:** Evapotranspiration. Lysimetry. loading cell.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Localização da Usina Coruripe – Alagoas	33
Figura 2	Disposição, distribuição e medidas dos lisímetros na área experimental da Fazenda Capiatã, Usina Coruripe – AL	35
Figura 3	Croqui da área do experimental com o plantio da cana-de-açúcar com a disposição dos seis lisímetros, variedades plantada em cada parcela e em cada lisímetro	35
Figura 4	Separação do solo em camadas e escavação completa	36
Figura 5	Caixa externa e Caixa exrtena com acesso a caixa de visita	37
Figura 6	Cantoneiras para fixação das células de cargas	38
Figura 7	Instalação do suporte e das células de cargas	38
Figura 8	Caixa interna e Instalação do lisímetro	39
Figura 9	Manta de poliéster e camada de brita	40
Figura 10	Preenchimento do lisímetro com solo e compactação	40
Figura 11	Datalogger utilizado para armazenamento dos dados	41
Figura 12	Performance do lisímetro 1 no dia 162	45
Figura 13	Performance do lisímetro 2 no dia 162	46
Figura 14	Elementos do clima observados no dia 162	47
Figura 15	Velocidade média do vento no dia 162	48
Figura 16	Performance do lisímetro 1 e dia com ocorrência de precipitação (dia 154)	49
Figura 17	Precipitação ocorrida no dia 154	49
Figura 18	Elementos do clima observados no dia 154	50
Figura 19	Velocidade média do vento no dia 154	51
Figura 20	Performance do lisímetro 2 em dia de ocorrência de precipitação (dia 124)	52
Figura 21	Precipitação ocorrida no dia 124	52
Figura 22	Elementos do clima observados no dia 124	53
Figura 23	Velocidade média do vento no dia 124	54
Figura 24	Resultado da calibração do lisímetro de pesagem 1	55
Figura 25	Resultado da calibração do lisímetro 2	56
Figura 26	Elementos do clima observados durante a calibração	57
Figura 27	Variação da evapotranspiração medida no lisímetro 1 em condições típicas de funcionamento, cultivado com cana-de-açúcar, medida pela três formas (Etc <sub>1</sub> , Etc <sub>2</sub> , Etc <sub>3</sub> )	58
Figura 28	Variação da evapotranspiração medida no lisímetro 2 em condições típicas de funcionamento, cultivado com cana-de-açúcar, medida pela três formas (Etc <sub>1</sub> , Etc <sub>2</sub> , Etc <sub>3</sub> )	58
Figura 29	Variação da umidade relativa do ar e velocidade do vento no dia 06/10/2010	59
Figura 30	Variação da velocidade do vento no dia 06/10/2010 em Coruripe-AL	60

Figura 31	Valores de evapotranspiração medido no lisímetro 1 pelo método de valores de massa inicial e final ( $ET_c1$ ) comparado pelo método de somatório negativo de massa ( $ET_c2$ )	61
Figura 32	Valores de evapotranspiração medidos no lisímetro 1 pelo método de valores de massa inicial e final ( $ET_c1$ ) comparado com o método valores de massa de 06:00 a 19:30h ( $ET_c3$ )	61
Figura 33	Valores de evapotranspiração medidos no lisímetro 2) pelo método de valores de massa inicial e final ( $ET_c1$ ) comparado pelo método de somatório negativo de massa ( $ET_c2$ )	62
Figura 34	Valores de evapotranspiração medidos no lisímetro 2 pelo método de valores de massa inicial e final ( $ET_c1$ ) comparado com o método valores de massa de 06:00 a 19:30h ( $ET_c3$ )	63
Figura 35	Variação da evapotranspiração medida no lisímetro 1 em condições típicas de funcionamento, cultivado com cana-de-açúcar, comparado com o método estimado de Penman-Monteith	64
Figura 36	Variação da evapotranspiração medida no lisímetro 2 em condições típicas de funcionamento, cultivado com cana-de-açúcar, comparado com o método estimado de Penman-Monteith.	65

## LISTA DE ABREVIATURAS e SÍMBOLOS

**CONAB** – Companhia Nacional de Abastecimento.

**PIB**- Produto Interno Bruto.

**DIEESE** – Departamento Intersindical de Estatísticas e Estudos Econômicos.

**ET<sub>o</sub>** – Evapotranspiração Potencial.

**ET<sub>p</sub>** - Evapotranspiração Referência.

**ET<sub>r</sub>** - Evapotranspiração real

**ET<sub>c</sub>** – Evapotranspiração da Cultura.

**b** = (N/12) (fator de ajuste do comprimento do dia).

**N**: máxima insolação diária.

**I**: índice de calor.

**T<sub>m</sub>**: Temperatura média diária.

**T<sub>min</sub>** = temperatura mínima do ar

**T<sub>max</sub>** = temperatura máxima do ar.

**T<sub>med</sub>**= Temperatura média diária do ar a 2m de altura.

**R<sub>a</sub>** = radiação solar no topo da atmosfera.

**G** = Densidade de fluxo de calor no solo.

**U<sub>2</sub>** = Velocidade do vento média diária a 2m de altura.

**e<sub>s</sub>** = Pressão de saturação do vapor média diária.

**e<sub>a</sub>** = Pressão atual de vapor média diária.

**s** = Declividade da curva de pressão de vapor no ponto de T<sub>med</sub>.

**γ** = é a constante psicrométrica (0,063 kPa/ °C).

## SÚMARIO

	Pag.
<b>INTRODUÇÃO</b>	14
<b>1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	16
<b>1.1 Cana-de-açúcar</b>	16
1.1.1 Necessidade hídrica da cana-de-açúcar	17
<b>1.2 Evapotranspiração</b>	18
<b>1.3 Métodos de determinação da evapotranspiração</b>	22
1.3.1 Métodos Indiretos	22
1.3.2 Método Direto	29
<b>2 MATERIAL E MÉTODOS</b>	33
<b>2.1 Descrição da Área Experimental</b>	33
<b>2.2 Construção e instalação dos lisímetros</b>	36
2.2.1 Escavação dos lisímetros	36
2.2.2 Estrutura das caixas externas	37
2.2.3 Instalação das Células de cargas	38
2.2.4 Construção das caixas internas	39
2.2.5 Preenchimento dos lisímetros com solo	39
<b>2.3 Instrumentação</b>	41
<b>2.4 Calibração</b>	41
<b>2.5 Análise de funcionamento</b>	43
<b>3 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	45
<b>3.1 Construção</b>	45
3.1.1 Performance	45
<b>3.2 Calibração</b>	54
<b>3.3 Análise de Funcionamento</b>	57
<b>4 CONCLUSÕES</b>	66
<b>REFERÊNCIAS</b>	67

## INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, com uma área cultivada superior a sete milhões de hectares e uma produção na safra 2009/2010 de 612.211,20 mil toneladas (cana colhida) que são destinados principalmente à fabricação de açúcar e álcool (CONAB, 2009). O Estado de São Paulo continua sendo o maior produtor com 54 % da área colhida, seguido por Minas Gerais com 8%, Paraná com 7,5%, Goiás com 7,4%, Alagoas com 5,74%, Mato Grosso do Sul com 4,2% e Pernambuco com 4,1%.

A demanda crescente no mercado interno e externo por combustíveis renováveis, especialmente o etanol, atrai novos investimentos para a formação de novas áreas de cultivo de cana-de-açúcar para indústria, com destaque para o nordeste brasileiro em especial o Estado de Alagoas com uma área 447 mil hectares de cana colhida na safra 2009/2010 (CONAB, 2009), representando a cultura com maior expressão econômica no Estado.

A cana-de-açúcar é uma das culturas com maior consumo de água, apresentando uma alta demanda evapotranspirativa ao longo do seu ciclo. Em Alagoas mesmo sendo cultivada em regiões considerada úmidas (Litoral, Tabuleiros Costeiros e Zona da Mata), sofre déficit hídrico em determinadas fase do cultivo por essas regiões apresentarem distribuição da precipitação irregular.

Os rendimentos das atividades agrícolas são determinados, a princípios, pelas características edafoclimáticas da região, tais como: temperatura, precipitação pluvial, fertilidade do solo. Esses são fatores ambientais que exercem maiores influências sobre as culturas entre elas a cana-de-açúcar. O conhecimento dos



fatores que limitam os rendimentos de um cultivo é fundamental para que novos incrementos sejam conseguidos.

A precipitação pluviométrica é o principal fator limitante das produtividades agrícolas no Nordeste brasileiro, que devido à irregularidade chuvas causa deficiências de água no solo. Tal problema pode ser solucionado com o manejo adequado de irrigação e a determinação da real necessidade hídrica das plantas, são fatores essenciais para a economia de água nos projetos de irrigação, visto que a mesma é um recurso natural um tanto escasso.

Na determinação da necessidade hídrica das plantas quase sempre são utilizados equações que estimam a  $ET_0$  a partir de dados meteorológicos, esses métodos indiretos muitas vezes superestimam os resultados, levando ao produtor a perdas nos custos de produção e ambiental com o desperdício de água.

Como método padrão para a determinação da evapotranspiração, os lisímetros equipados com mecanismos de pesagem por células de carga são os mais modernos, permitindo a realização de medidas automatizadas com células de carga instaladas sob a caixa impermeável acopladas a um sistema de aquisição de dados, fornecendo resultados mais confiáveis, e possibilitam a obtenção de medidas em escala horária, representando grande vantagem em relação aos demais tipos de lisímetros.

Este trabalho tem como objetivos (a) Construção de dois lisímetros de pesagem, baseados em células de cargas e sistema de redução de massa, (b) Calibração dos lisímetros cultivados com cana-de-açúcar, por adição e retirada de massas em condições de campo, (c) Analisar o funcionamento dos lisímetros.

## **1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **1.1 Cana-de-açúcar**

A cana-de-açúcar é uma das principais culturas agrícolas do Brasil, tendo uma grande importância sócio-econômica, visto que pode ser atribuída a múltipla utilização como matéria prima na indústria sucroalcooleira para a produção de etanol, açúcar e também atuando como fonte de energia, para a geração de bioeletricidade (DALRI; CRUZ, 2008).

Segundo a CONAB, (2009) a área de cana colhida destinada à atividade sucroalcooleira, na safra (2009/2010), está estimada em 7.531 mil hectares, distribuída em todos Estados produtores. A maior concentração está em: São Paulo – 4.101,4 mil ha; Paraná – 590,1 mil ha; Minas Gerais – 587,1 mil ha; Goiás – 520,3 mil ha e Alagoas – 448 mil ha. A produtividade média brasileira está estimada em 81.293 kg/hectare, 0,4% maior que a da safra 2008/2009, mostrando um certo equilíbrio nas duas safras. O centro-sul puxa as médias para cima devido às condições de produção, tamanho de lavoura, tipo de solo, topografia e tecnologia aplicada.

A previsão do total de cana moída é de 612.211,20 mil toneladas, volume superior em 7,1% ao colhido na safra 2008/2009. Do total da cana esmagada, 276.007,1 mil toneladas (45,08%) foram destinadas à produção de açúcar, produzindo 34.636,9 mil toneladas e 336.204,1 mil toneladas (54,9992%) destinadas à produção de álcool, gerando um volume total de 25.866,06 milhões de litros de

álcool, deste total, 7.652,3 milhões de litros são de álcool anidro e 18.213,76 bilhões de litros são de álcool hidratado (CONAB, 2009).

O setor sucroalcooleiro é de grande relevância no contexto sócio-econômico do País, visto que a cultura da cana-de-açúcar é uma das mais importantes espécies agrícolas exploradas no Brasil. Cerca de R\$ 40 bilhões por ano é movimentado pelo mercado sucroalcooleiro, com faturamentos diretos e indiretos, o que corresponde a 2,35% do PIB brasileiro. É, também, um dos setores que mais empregam no país, com mais de 3,6 milhões de empregos diretos e indiretos, e reúne mais de 72.000 agricultores (DIEESE, 2007).

#### 1.1.1 Necessidade hídrica da cana-de-açúcar

A necessidade hídrica da cana-de-açúcar varia com o estágio vegetativo em que a cultura se encontra e a cultivar utilizada (AUDE, 1993) sendo, portanto função da área foliar, estágio fisiológico e densidade radicular. Segundo Doorenbos e Kassam (1979), a necessidade hídrica da cana-de-açúcar é de 1500 a 2500 mm por ciclo vegetativo e o manejo da irrigação deve ser feito de acordo com as tensões de água no solo, recomendadas para cada período do ciclo fenológico.

O déficit hídrico afeta vários aspectos do crescimento vegetal; os efeitos mais óbvios do estresse hídrico se referem à redução do tamanho das plantas, de sua área foliar e da produtividade da cultura (TAIZ; ZEIGER, 2002). O grau de injúria causado pelo déficit hídrico depende consideravelmente do estágio fenológico em que ele ocorre na planta e da duração do estresse. Conforme Farias et al. (2008), o crescimento vegetal depende da divisão celular, do crescimento e da diferenciação

celular e todos esses processos são afetados por déficits hídricos, mas não necessariamente na mesma proporção.

Na cana-de-açúcar durante a fase inicial, brotação e estabelecimento, quando ocorre o enraizamento e o crescimento inicial da planta é importante que não haja déficit hídrico para que não ocorra falha na brotação ou até morte das soqueiras. O mesmo acontecendo com o período de crescimento vegetativo, fase em que ocorre o desenvolvimento das folhas, surgimento de brotos e alongamentos dos colmos, estresse hídrico nessa fase atrapalha o perfilhamento da planta (GOUVÊA, 2008).

Wiefenfeld, (2000) relata um decréscimo na produtividade da cana quando submetida a um déficit hídrico na fase de crescimento. Mas quando esse déficit ocorre na maturação é benéfica, pois provocar desidratação forçando a cana a transformar todos os açúcares em sacarose.

Vários autores relatam que a suplementação da irrigação no início do estágio de crescimento é muito importante, confirmando que o estágio de estabelecimento mais o estágio vegetativo para a cana-de-açúcar é o mais sensível a deficiências hídricas (SANTOS, 2005).

## **1.2 Evapotranspiração**

A evaporação é um fenômeno de natureza física no qual as moléculas de água passam do estado líquido para o estado gasoso. Ocorrem nas superfícies líquidas de reservatórios, lagos e rios, na superfície úmida (solos e plantas) (REICHARDT, 1985).

O processo físico da evaporação é função principalmente da temperatura e umidade do ar, sendo influenciada ainda pela pressão atmosférica, velocidade média do vento na região, sólidos solúveis, umidade e natureza do solo.

Porto e Filho, (2000) relatam que os métodos de obtenção da evaporação potencial são divididos em dois grupos: Diretos (Evaporímetros, Atmômetros, Evapógrafo de Balança), Indiretos (Método de Penmam, Método do Balanço hídrico, Método das formulas Empíricas).

A transpiração é um processo biofísico, que consiste na eliminação de água pela vegetação por meio de processos metabólicos necessários ao crescimento e desenvolvimento das plantas, através das suas folhas (estômatos e cutícula) (REICHARDT; TIMM, 2004).

A transpiração potencial é uma função do clima e da fisiologia da planta, ocorrendo sob uma taxa ilimitada de alimentação de água na zona de raízes. A transpiração real, sob condições limitadas de água, depende da habilidade da planta em extrair a umidade do solo parcialmente saturado com capacidade limitada de transferir água.

Evapotranspiração é o processo simultâneo de transferência de água para a atmosfera por evaporação da água do solo, superfícies livres de água e água retida pelas plantas e pela transpiração das plantas (BURMAN et al., 1983).

Segundo Raudkivi (1979), a evapotranspiração assume papel importante no ciclo hidrológico, sendo responsável pelo retorno à atmosfera de aproximadamente 70% da precipitação anual na superfície terrestre, representando assim uma parcela significativa nos estudos de balanço hídrico e nos projetos de recursos hídricos. Informações quantitativas deste processo podem ser utilizadas na resolução de

numerosos problemas que envolvem o manejo da água. Santos (2005) em trabalho realizado na Usina Coruripe com cana-de-açúcar utilizou a Eto para analisar a viabilidade de irrigação suplementar no primeiro estágio de desenvolvimento da cana-de-açúcar. Para o planejamento de áreas agrícolas irrigadas, quanto para a previsão de cheias ou a construção de reservatórios, são requeridos dados confiáveis de evapotranspiração (MORAES, 2007 Apud FELTRIN, 2009).

Para conhecimento mais aprofundado das condições hídricas de uma região, se faz necessário o conhecimento dos diferentes conceitos de evapotranspiração:

- **Evapotranspiração de Referência ( $ET_o$ )** - De acordo com Freitas (2005) a evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ) é a máxima evapotranspiração que ocorreria se o solo dispusesse de suprimento de água suficiente e a plantação em questão tivesse no auge da quantidade de folhas. Define-se a  $ET_o$  como sendo a quantidade de água que seria utilizada por uma extensa superfície vegetada com grama, com altura entre 8 e 15 cm, em crescimento ativo, cobrindo totalmente a superfície do solo, com área foliar constante, com ampla área de bordadura e sem restrição hídrica de água no solo. É limitada pelo balanço vertical de energia. A  $ET_o$  é um valor de referência, pois caracteriza a perda de água da bacia como se toda a vegetação fosse um gramado de uma espécie vegetal padronizada. Portanto, é um índice que depende das características particulares da transpiração da cultura plantada na região estudada, levando em conta apenas o clima, o tipo de solo, e as superfícies livres de água na bacia.

O estudo da evapotranspiração referência é, portanto, de importância fundamental na avaliação das necessidades de água para a agricultura em projetos de irrigação.

- **Evapotranspiração Real ( $ET_r$ )** – Segundo Sentelhas (1998), A evapotranspiração real corresponde à quantidade de água transferida para a atmosfera por evaporação e transpiração, nas condições reais (existentes) de fatores atmosféricos e umidade do solo. A evapotranspiração real é igual ou menor que a evapotranspiração potencial. Sendo assim,  $ET_R \leq ET_o$ . A taxa de evapotranspiração potencial é função das condições meteorológicas e a evapotranspiração real é influenciada pela disponibilidade de água no solo e pela demanda evaporativa da atmosfera. A evapotranspiração máxima de uma cultura depende da demanda evaporativa do ar que é determinada pela radiação solar, velocidade do vento, umidade e temperatura do ar (MATZENAUER, 1992).

- **Evapotranspiração da Cultura ( $ET_c$ )** – conforme Freitas (2005) a evapotranspiração da cultura, é a evapotranspiração que ocorre numa cultura qualquer em uma fase fenológica de desenvolvimento sem restrição hídrica e com ampla bordadura. É a evapotranspiração “potencial” para uma determinada cultura e está relacionada à  $ET_o$  através da seguinte expressão:

$$ET_c = ET_o * Kc$$

em que  $Kc$  é o coeficiente de cultura, variando com o tipo de planta e fase fenológica de desenvolvimento.

Em análise quantitativa, a evapotranspiração tem sua determinação baseada em métodos diretos (lisímetros) e métodos indiretos. Os métodos mais empregados na estimativa da ETp são os indiretos e se baseiam em dados meteorológicos, muitas vezes não disponíveis próximo ao local de estudo. Por outro lado, os métodos diretos de estimativa, como os lisímetros de pesagem, proporcionam resultados mais confiáveis (CARVALHO et al., 2006).

### 1.3 Métodos de Determinação da Evapotranspiração

#### 1.3.1 Métodos Indiretos

- **Thornthwaite**

Thornthwaite (1948), a partir da correlação entre dados de evapotranspiração medida e temperatura do ar, elaborou o seguinte método empírico:

$$ET_p = b \cdot (Tm)^a \quad (1)$$

Onde:

$$a = (67.5 \cdot 10^{-8} \cdot I^3) - (7.71 \cdot 10^{-6} \cdot I^2) + (0.01791 \cdot I) + 0.492 \quad (2)$$

$$I = \sum_1^{12} \left( \frac{Tm_i}{5} \right)^{1.514} \quad (3)$$



$b = (N/12)$  (fator de ajuste do comprimento do dia);

$ET_p$  = Evapotranspiração potencial (mm/mês);

$N$ : máxima insolação diária, função da latitude e do mês;

$I$ : índice de calor;

$T_m$ : Temperatura média diária.

- **Método Tanque classe A**

Segundo Doorenbos e Pruitt (1975), a evapotranspiração potencial pode ser obtida multiplicando o valor da altura de evaporação obtida no tanque Classe A, por um fator de proporcionalidade, denominado coeficiente de tanque ( $K_p$ ) que depende do valor da velocidade do vento e umidade relativa observadas no período, assim como das condições de exposição do tanque.

$$ET_p = K_p * ECA \quad (4)$$

sendo  $K_p$  (o coeficiente de tanque) obtido de uma tabela ou através da relação:

$$K_p = 0,482 + 0,024 \ln(B) - 0,000376 U + 0,0045 UR \quad (5)$$

em que  $B$  é a bordadura (m),  $U$  a velocidade do vento (km/dia) e  $UR$  a umidade relativa média diária ,em %.

$$ECA = L_1 - L_2 + P - H \quad (6)$$

em que  $L_1$  é a leitura anterior,  $L_2$  leitura atual,  $P$  a precipitação (mm) e  $H$  o excesso.

- **Método Hargreaves e Samani**

Método empírico, desenvolvido para a região de clima seco. Baseia-se na temperatura média do ar e na amplitude térmica. Tem como vantagem a sua aplicabilidade em climas áridos e semi-áridos, como no nordeste do Brasil. A desvantagem é sua limitação de uso para condições de clima úmido, apresentando super-estimativa.

$$ETP = 0,0023 * Ra * (Tm + 17,8) * (Tmax - Tmin)^{0,5} \quad (7)$$

Sendo: **Ra** = radiação solar no topo da atmosfera (mm dia-1);

**Tm** = temperatura média do ar (°C);

**Tmax** = temperatura máxima do ar (°C)

**Tmin** = temperatura mínima do ar (°C)

- **Método de Penman-Monteith**

Monteith desenvolveu, com base na equação de Penman, uma equação que inclui a resistência aerodinâmica e a resistência ao fluxo de vapor pela folha. A equação combinada com os termos de resistência aerodinâmica e da superfície passou a ser chamado de equação de Penman-Monteith.

Segundo as parametrizações propostas pelo boletim FAO-56 (Allen; Pereira; Raes, 1998), a equação original de Penman-Monteith assume a seguinte forma para a evapotranspiração de referência:

$$ET_o = \frac{s}{s + \gamma^*} * (Rn - G) * \frac{1}{\lambda} + \frac{\gamma}{(s + \gamma^*)} * U_2 (e_s - e_a) \quad (8)$$

Sendo:

**ET<sub>o</sub>** = Evapotranspiração de referência (mm d<sup>-1</sup>);

**R<sub>n</sub>** = Radiação líquida total do gramado (MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>);

**G** = Densidade de fluxo de calor no solo (MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>);

**T<sub>med</sub>** = Temperatura média diária do ar a 2m de altura (°C);

**U<sub>2</sub>** = Velocidade do vento média diária a 2m de altura (m s<sup>-1</sup>);

**e<sub>s</sub>** = Pressão de saturação do vapor média diária (kPa);

**e<sub>a</sub>** = Pressão atual de vapor média diária (kPa);

**s** = Declividade da curva de pressão de vapor no ponto de T<sub>med</sub> (kPa °C<sup>-1</sup>);

**γ** = é a constante psicrométrica (0,063 kPa/ °C).

A temperatura média diária (**T<sub>med</sub>**) deve ser calculada em função das temperaturas máxima (**T<sub>max</sub>**) e mínima (**T<sub>min</sub>**) diárias como:

$$T_{med} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \quad (9)$$

Mesmo em situações em que medidas horárias (ou mais freqüentes) sejam disponíveis. Essa regra serve também para as escalas de tempo maiores que um dia. Para decêndios ou meses utiliza-se a soma dos valores médios diários dividindo-se pelo número de dias do período.

A declividade da curva da pressão de vapor (**s**) em função da temperatura no ponto de **Tmed** é definida como:

$$s = \frac{4098 \left[ 0,6108 \exp \left( \frac{0,6108 T_{med}}{T_{med} + 237,3} \right) \right]}{(T_{med} + 237,3)^2} \quad (10)$$

A média diária do déficit de saturação de vapor d'água no ar (**e<sub>s</sub>-e<sub>a</sub>**), é calculada a partir das temperaturas máxima (**Tmax**) e mínima (**Tmin**), e das umidades relativa máxima (**URmax**) e mínima (**URmin**) diárias, ou seja:

$$e_s = \frac{e^\circ(T_{max}) + e^\circ(T_{min})}{2} \quad (11)$$

$$e_a = \frac{e^\circ(T_{min})UR_{max} + e^\circ(T_{max})UR_{min}}{200} \quad (12)$$

$$e^a(T) = 0,6108 \exp\left[\frac{17,27 T}{T + 237,3}\right] \quad (13)$$

Sendo que na eq. (9), substitui-se  $T$  por  $T_{\max}$  ou  $T_{\min}$ , para se obter  $e^\circ(T_{\max})$  e  $e^\circ(T_{\min})$ .

O fluxo de calor no solo ( $G$ ) quase sempre é desprezado por apresentar um valor muito pequeno em relação a  $R_n$  na escala diária. Para períodos de 10 dias o boletim FAO-56 também recomenda  $G = 0$ . Na escala mensal, o seu cálculo deve obedecer a seguinte expressão:

$$G_{mês,i} = 0,07 (T_{mês,i+1} - T_{mês,i-1}) \quad (14)$$

Caso a  $T_{mês,i+1}$  seja desconhecido, utiliza-se a seguinte equação:

$$G_{mês,i} = 0,14 (T_{mês,i} - T_{mês,i-1}) \quad (15)$$

em que:

$T_{mês,i}$  = Média mensal da temperatura do ar para o mês  $i$  ( $^{\circ}\text{C}$ );

$T_{mês,i-1}$  = Média mensal da temperatura do ar do mês anterior a  $i$  ( $^{\circ}\text{C}$ );

$T_{mês,i+1}$  = Média mensal da temperatura do ar do mês posterior a  $i$  ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Medidas rotineiras do saldo de radiação ( $R_n$ ) tem se mostrado problemática em virtude da fragilidade do sensor, que inclui uma cúpula de plástico que se polimeriza com os raios solares e se fragmenta, causando erros sistemáticos nas medidas. Esse instrumento requer inspeção e troca freqüente dessa cúpula. Em postos agrometeorológicos a medida de  $R_n$  não é rotineira e o boletim FAO recomenda que este elemento seja estimado pelas seguintes equações:

$$R_n = 0,77 R_s - (0,34 - 0,14\sqrt{e_a}) 4,903 \cdot 10^{-9} \left( \frac{T_{max,k^4} + T_{min,k^4}}{2} \right) \left( 1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right) \quad (16)$$

$$R_s = R_a \left( a + b \frac{n}{N} \right) \quad (17)$$

$$R_{so} = R_a (a + b) \quad (18)$$

$$R_a = 37,586 \cdot d_r (w_s \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \sin w_s) \quad (19)$$

$$d_r = 1 + 0,033 \cos \left( \frac{2\pi J}{365} \right) \quad (20)$$

$$\delta = 0,4093 \sin \left( \frac{2\pi J}{365} - 1,405 \right) \quad (21)$$

$$w_s = \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (22)$$

$$N = \frac{24w_s}{\pi} \quad (23)$$

em que  $\mathbf{a} = 0,26$  e  $\mathbf{b} = 0,51$  são coeficientes locais (OMETTO, 1981);  $\mathbf{n}$  é o número de horas de brilho solar medido por heliógrafo;  $\varnothing$  é a latitude local;  $\mathbf{J}$  é o dia Juliano;  $T_{\max,k}$  e  $T_{\min,k}$  representam as temperaturas máxima e mínima absolutas.

Segundo Quaglia (2005), o método de Penmam – Monteith é referência padrão para validar os métodos empíricos de estimativas de  $ET_o$ , especialmente para regiões de clima seco e quente.

### 1.3.2 Método Direto

- **Lisimetria**

Os lisímetros consistem de tanques contendo solo representativo da área de interesse e são utilizados, sobretudo para medir os componentes do balanço de água no sistema solo-planta-atmosfera, sob tratos culturais e condições climáticas específicas (FARIA, CAMPECHE; CHIBANA , 2006).

O lisímetro é um tanque 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, filme plástico ou por outro isolante de vapor d'água. Ele pode ser usado para determinação da evapotranspiração de uma cultura, a evaporação do solo ou a transpiração da planta. (ABOUKHALED et al., 1982; HOWELL et al., 1991; WRIGHT, 1991; GREBET, 1991; KHAN et al. 1993; REICHARDT E TIMM, 2004).

Lisímetros têm sido utilizados por mais de três séculos para estudos das relações entre água, solo e plantas. Inicialmente os lisímetros foram desenvolvidos para quantificação e qualificação da água do solo percolada em estudos hidrológicos. Thornthwaite et al. (1946) foi o primeiro pesquisador a usar esse equipamento para medidas de evapotranspiração em condições de campo (GREBET; CUENCA, 1991).

O maior lisímetro do mundo foi construído, com 29 m<sup>2</sup> de área por 0,96 m de profundidade, como descreveram Pruitt e Angus (1960) e posteriormente por Pruitt e Lourence (1985). Esse equipamento permitiu o desenvolvimento de modelos que descrevem a saída da água para a atmosfera, bem como testes da teoria dos transportes atmosféricos. A partir desta época, diversos pesquisadores relataram em seus trabalhos uma infinidade de tipos e tamanhos de lisímetros de pesagem, desde o chamado micro lisímetro, com pouco quilogramas até lisímetros com algumas dezenas de toneladas de massa.

Para Silva (1996), os lisímetros existentes podem ser organizados em dois grupos: os lisímetros de pesagem e os lisímetros que empregam outros princípios físicos na estimativa do uso da água na área estudada. Os primeiros quantificam a evapotranspiração diretamente através do balanço de massa de água, enquanto que os últimos quantificam a evapotranspiração indiretamente, por meio do balanço volumétrico.

Os lisímetros pesáveis são subdivididos conforme o princípio de pesagem, sendo agrupados em: mecânicos, eletrônicos, hidráulicos e flutuantes. O lisímetro flutuante consiste em um reservatório preenchido com solo que flutua em um fluido de alta densidade, geralmente ZnCl<sub>2</sub>, e as variações de leitura são feitas segundo o



princípio de Arquimedes (McMILLAN; PAUL, 1961; ABOUKHALED, 1982 Apud SANTOS, 2004).

Nos lisímetros de pesagem mecânica são usadas plataformas ou mesmo guindastes para medir a variação de massa do tanque. Nos lisímetros de pesagem eletrônica a mudança de massa é medida por travesseiros de tensão ou células de carga que se deformam dentro do regime elástico a que foram planejadas. Esta deformação, embora pequena, é suficiente para gerar um sinal de saída linear e compatível a carga aplicada. O uso de dispositivos microeletrônicos, que permitem a automação das medidas lisimétricas, podem registrar valores em escala de tempo reduzida com precisão de 0,01 mm (PEREIRA; VILLA NOVA; SEDIYAMA, 1997).

Howell et al. (1995) afirmaram que lisímetros podem apresentar diversas formas e sistemas de medidas, porém os que usam mecanismos de pesagem são considerados os mais precisos e sensíveis para a determinação direta da evapotranspiração, pelo balanço de massa de água.

Aboukhaled et al., (1982) e Howell et al. (1991) consideram lisímetros de pesagem como sendo o melhor equipamento disponível para medir com acurácia a evapotranspiração de referência e de culturas, como também para calibração de modelos.

Nos últimos anos, o desenvolvimento da eletrônica disponibilizou sensores mais precisos, robustos e baratos, incluindo-se as células de carga, que podem ser usadas para construção de lisímetros de pesagem de alta precisão, além de sistemas de aquisição e armazenamento de dados, que facilitam consideravelmente a operação contínua dos lisímetros em trabalhos de monitoramento (FARIA; CAMPECHE; CHIBANA, 2006).

Segundo Viana (2000), o lisímetro de pesagem é um equipamento composto por uma caixa com paredes impermeáveis, preenchido por solo, onde uma balança ou célula de carga realiza medições relativas à variação de peso. Suas medições podem ser afetadas por fatores do ambiente, tais como o efeito da advecção (oásis), as dimensões do lisímetro, a umidade do solo em seu interior, a espessura de suas paredes e a distância entre elas, a altura de suas bordas e diferenças de densidade entre a vegetação de dentro e de fora do lisímetro (MIRANDA; YODER; SOUSA, 1999). Dessa maneira, a evapotranspiração obtida com a utilização deste equipamento está sujeita a imperfeições. Portanto, certos cuidados devem ser adotados, desde o seu projeto até sua manutenção, para que os mesmos sejam capazes de fornecer dados condizentes com a realidade.

Para a obtenção de leituras confiáveis os lisímetros devem, preferencialmente, ser calibrados no próprio local e após a sua instalação, por adição e retirada de massa de quantidades previamente conhecidas. Para Campeche (2002) a calibração tem por finalidade estabelecer a relação entre o sinal elétrico de saída da célula de carga (geralmente expresso em mV) e a massa do sistema, além da verificação da linearidade e histerese da célula de carga.

Bonfim et al. (2004) relata que a calibração de lisimétricos é uma prática de muita relevância, devendo ser realizada não somente durante a instalação desses equipamentos, mas a cada nova pesquisa em utilizando-os.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Descrição da área experimental

O trabalho foi conduzido na Usina Coruripe, situada na faixa litorânea Sul de Alagoas, com coordenadas geográficas 09° 56' de latitude Sul; 36° 05' de longitude Oeste, a uma altitude média de 75 m acima do nível do mar no município de Coruripe – AL (Figura 1). A temperatura média é 24 °C, com máxima de 32 °C e mínima de 21 °C, com oscilação de Umidade Relativa do Ar entre 95% máxima e 65 % mínima. Segundo a classificação de Koppen, o clima local é do tipo 'As', isto é, clima tropical chuvoso com verão seco.



Figura 1. Localização da Usina Coruripe – Alagoas. Fonte: Usina Coruripe, 2010.

A estação chuvosa começa no outono e se estende até a primavera. A precipitação pluviométrica média é de 1.413,60 mm anuais, sendo os meses de maio a julho os mais chuvosos e outubro a dezembro os mais secos. O solo da área de estudo é um solo classificado como Argissolo Amarelo Distrófico fragipânico, textura arenosa/argilosa.

Os lisímetros foram instalados numa área de irrigação de gotejamento subsuperficial (para manter a condição de cultivo da cana-de-açúcar irrigada), sendo a área do experimento de 1.100,00 m<sup>2</sup> (50,00 x 22,00 m), numa área experimental na Fazenda Capiatã da Usina Coruripe.

Conforme demonstra a figura 2, na área foram instalados dois lisímetros de pesagem (objeto de estudo desse trabalho) e quatro lisímetros de drenagem (projeto que visa determinar o Kc da cana-de-açúcar, pelo monitoramento do consumo de água de duas variedades de cana-de-açúcar) (Figura 3), as duas variedades de cana-de-açúcar estão entre as mais cultivadas no Estado de Alagoas, (RB86-7515 e RB92-579) pois ambas possuem alta produção agrícola aliado ao alto teor de sacarose, além de obter resposta excelente em solos de baixa fertilidade com boa disponibilidade hídrica.

Os dois lisímetros de pesagem possuem as mesmas dimensões, sendo a caixa interna de 1,50 m x 1,80 m x 1,20 m e caixa externa de 1,60 m x 1,90 m x 2,30m largura, comprimento e profundidade, respectivamente (Figura 2).

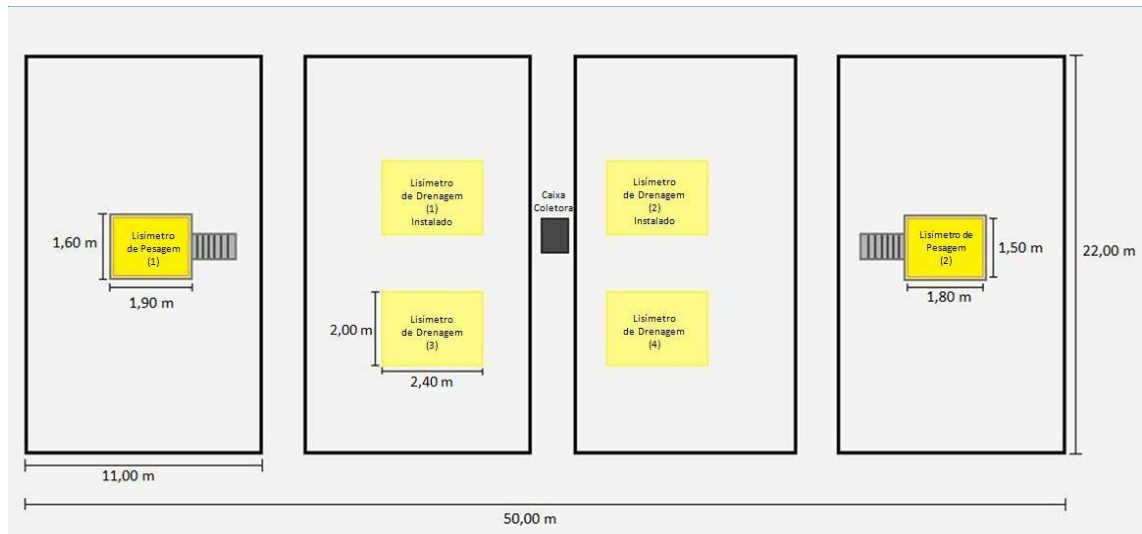


Figura 2. Disposição, distribuição e medidas dos lisímetros na área experimental da Fazenda Capiatã, Usina Coruipe – AL, área total do experimento de 1.100,00 m<sup>2</sup>.



Figura 3. Croqui da área do experimental com o plantio da cana-de-açúcar com a disposição dos seis lisímetros, variedades plantada em cada parcela e em cada lisímetro.

## 2.2 Construção e Instalação dos Lisímetros

### 2.2.1 Escavação dos lisímetros

A escavação foi feita manualmente tomando-se o cuidado de separar o solo em quatro camadas de 0,20 m (Figura 4a), as quatro camadas de solo foram identificadas (0–0,20m; 0,20–0,40m; 0,40–0,60m e 0,60–0,80m) e armazenadas no próprio local, o acondicionamento foram feito em sacolão de naylo “Big Bag”. Após a profundidade 0,80 m não foi necessário separar as camadas, a escavação continuou até a profundidade de 2,30 m (Figura 4b), fato esse devido à estrutura de acesso as células de carga. É importante salientar que a metodologia utilizada na escavação, separação e acondicionamento do solo foi recomendada por Champeche (2002), sendo necessária para reconstituição das condições iniciais do solo.



Figura 4 – Separação do solo em camadas (a) e escavação completa (b).

### 2.2.2 Estrutura das caixas externas

Para a construção de cada lisímetro de pesagem com célula de carga foi construída uma caixa externa (Figura 5a) com uma estrutura de concreto armado (caixa externa) com espessura de 0,20 m para sustentação do solo circundante e uma abertura (Figura 5b) possibilitando o acesso ao tanque de drenagem e as células de cargas (caixa de visita) e também para viabilizar a manutenção dos lisímetro, cada caixa externa dos lisímetros tem as seguintes dimensões 1,60 x 1,90 x 2,30 metros de largura, comprimento e profundidade, respectivamente.

As bases de sustentação (sapatas) foram construídas com concreto armado (0,20 x 0,20 x 0,80 m) colocada em cada canto interno da caixa externa.

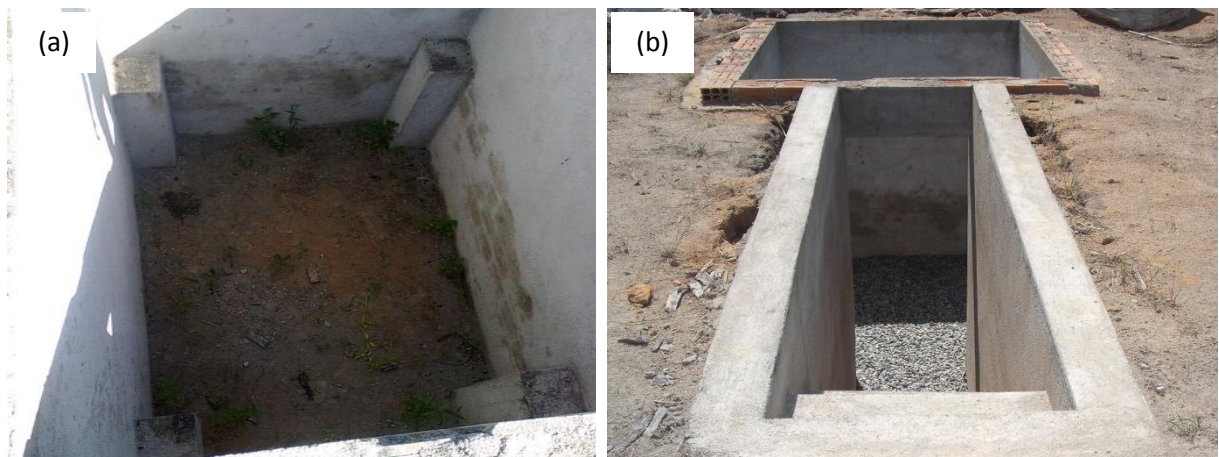


Figura 5. Caixa externa (a) e Caixa externa com acesso a caixa de visita (b).



### 2.2.3 Instalação das Células de Cargas

Para a fixação das células de cargas foram utilizadas duas bases de cantoneiras soldada e reforçada com barras no sentido transversal (Figura 6), entre as duas bases (suporte) foram colocadas três células de carga (figura 7), formando um ângulo de 120°, a célula de carga utilizada é da marca ALPHA, modelo Z com capacidade de medida de até 2 toneladas, com sensibilidade de aproximadamente 6.000 divisões ou 0,3 Kg.



Figura 6. Cantoneiras para fixação das células de cargas.



Figura 7. Instalação do suporte e das células de cargas.



#### 2.2.4 Estrutura das Caixas Internas

O material utilizado na confecção das caixas internas (Figura 8) foi chapa ferro galvanizado coberta com tinta impermeável (cor alaranjada) e depois emborrachada, para dar maior sustentação a caixa foi amarrada externamente com um vergalhão de 3/4", cada caixa tem as seguintes dimensões 1,50 x 1,80 x 1,20 metros de largura, comprimento e profundidade, respectivamente.



Figura 8. Caixa interna e instalação do lisímetro.

#### 2.2.5 Preenchimento do lisímetro com solo

Antes do preenchimento do lisímetro com solo, foi colocada uma manta de poliéster (Figura 9a), para facilitar a drenagem de água no sistema. Após a manta foi adicionada uma camada de aproximadamente 0,1 m de brita nº 1 (Figura 9b), depois preenchido com solo previamente separado nas suas camadas.

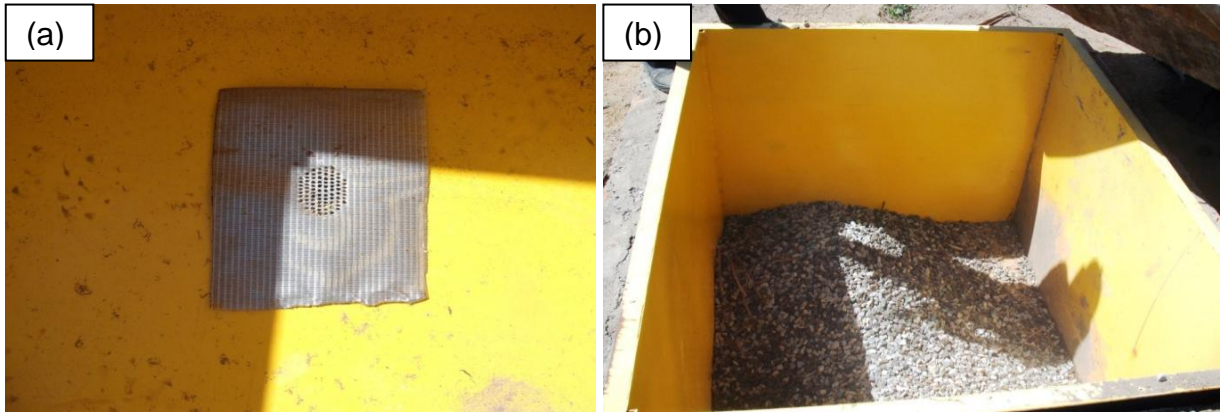


Figura 9. Manta de poliéster (a) e camada de brita (b).

A partir desse ponto, foram adicionadas as camadas de solos na ordem inversa da sua retirada (Figura 10a). A cada camada completada e após colocar todo o solo, o mesmo recebeu compactação para promover uma maior acomodação deste solo dentro da caixa interna (Figura 10b). Esse procedimento foi similar para os dois lisímetros. É importante salientar que tal procedimento foi feito com intuito de retornar as condições iniciais do solo.

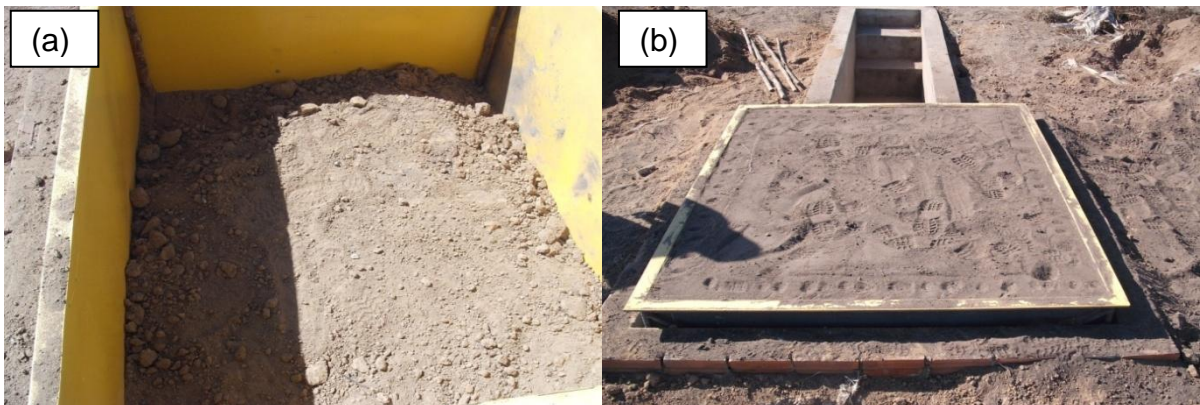


Figura 10. Preenchimento do lisímetro com solo e compactação.

### 2.3 Instrumentação

Os lisímetros foram interligados a dois datalogger (CR23X, Campbell Sci) (Figura 11) para armazenar os dados. O datalogger fazia leituras a cada 3 segundos e programado para armazenar suas médias a cada 60 minutos, gerando 24 pontos diários por lisímetro.



Figura 11. Datalogger utilizado para armazenamento dos dados.

### 2.4 Calibração

A calibração dos lisímetros foi realizada utilizando-se, como massas-padrão, 40 sacos plásticos contendo, cada um 3 kg de areia, os quais foram pesados em uma balança eletrônica de precisão Apollo – Plenna – capacidade de 5 kg e graduação de 1 g, ref: MEA – 06884. Sendo as dimensões internas dos lisímetros de 1,50 m por 1,80 m (área interna de 2,7 m<sup>2</sup>), cada 3 kg adicionado a sua superfície correspondiam a uma lâmina d'água de 1,11 mm, enquanto os 120 kg correspondiam a uma lâmina total de 44,4 mm d'água.

O ensaio de calibração dos dois lisímetros foi realizado em 05/07/2010 das 07:00 às 09:00 hs da manhã, a fim de evitar alta temperatura e turbulência por vento. Iniciou-se com a obtenção da leitura de voltagem em cada lisímetro descarregado (sem as massas-padrão), não foi possível cobrir a superfície do lisímetro com lona plástica, a fim de diminuir evapotranspiração, pois o mesmo já se encontrava com a cultura em pleno desenvolvimento; então sobre o lisímetro foram colocados e retirados os sacos plásticos em series de 6 kg (correspondendo a 2,22 mm), em intervalos de 1 mim para a estabilização da leitura do datalogger, ao qual estava conectado as células de carga. A cada massa adicionada, um sinal elétrico (mV), proveniente da célula de carga, era registrado no datalogger. Após a colocação de todos os sacos, o procedimento inverso foi realizado, ou seja, foi retirado no mesmo intervalo de tempo, gerando assim 20 pontos no carregamento e 20 pontos no descarregamento, totalizando 40 pontos para a confecção da curva de calibração do sistema.

Os dados referentes às massas-padrão aplicadas e às respectivas leituras das células de cargas foram submetidos à análise estatística de regressão.

O metodologia utilizada na calibração foi apresentada por Campeche (2002) e Cruz (2005), sendo a única alteração o fato do lisímetro já se encontrar com a cultura em pleno desenvolvimento.

Quanto a sensibilidade do sistema, o datalogger foi programado para detectar variação de massa a partir de 1 kg. Os lisímetros foram construídos com três células de cargas com capacidade de 2000 kg cada, portanto com uma capacidade total de 6000 kg correspondendo a um sinal de 20 mV.

## 2.5 Análise de Funcionamento

A análise de funcionamento dos lisímetros foi realizada pelo período de um mês de 01/10/2010 a 31/10/2010, sendo adotadas três formas distintas para o cálculo de evapotranspiração diária.

A primeira forma consiste na medida direta da diferença de massa do conjunto solo-caixa no início do dia (0 h) e a massa obtida no final do dia (24 h). Essa forma foi adotada por Allen e Fischer (1991); Campheche (2002).

$$ET_{c1} = \frac{M_{24:00 \text{ dia atual}} - M_{24:00 \text{ dia anterior}}}{A \cdot \Delta T} \quad 24$$

A segunda forma foi utilizada por Campheche (2002) consiste no somatório de todas as diferenças de massa calculadas em cada intervalo de integração ao longo de um dia, descontando apenas os valores de precipitações e irrigações.

$$ET_{c2} = \frac{\sum_{i=1}^{24} (M_i - M_{i-1})}{A \cdot \Delta T} \quad 25$$

Em que:

$ET_{c2}$  = Evapotranspiração da cultura mm dia<sup>-1</sup>;

$M_i - M_{i-1}$  = diferença entre a massa atual e massa no tempo i-1.

$i$  = 60 min (1h).

$A$  = área do lisímetro (2,7 m<sup>2</sup>).

$\Delta T$  = Período de tempo (1h).

A terceira forma foi adotada por Cruz (2005) em trabalho de instalação, calibração e funcionamento de lisímetro de pesagem em Seropédica – RJ. Segundo o autor, todas as leituras do lisímetro devem ser analisadas diariamente para que a ocorrência de chuva irrigação ou drenagem do volume de solo sejam identificadas e desconsideradas do cálculo da  $ET_c$ . Adotando o período de 06:00h às 19:30h (diurno) como sendo o período em que ocorre a maior percentagem de radiação solar líquida positiva.

$$ET_{c3} = \frac{(M_{06:00 \text{ dia atual}} - M_{19:30 \text{ dia atual}})}{A \cdot \Delta T} \quad 26$$

Na análise do funcionamento dos lisímetros, foi adotado a primeira forma  $ET_{c1}$  (diferença de massa do conjunto solo-caixa no início do dia (0 h) e a massa obtida no final do dia (24 h)) como padrão, conforme metodologia utilizada por Medeiros; Sentelhas; Lima (2003). Os valores de  $ET_{c1}$  foram comparados com os valores de  $ET_{c2}$  e  $ET_{c3}$ .

O forma considerada padrão  $ET_{c1}$  foi comparada a  $ET_o$ -PM (Evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith) estimada pelo laboratório de Agrometeorologia e Radiometria – LARAS da Universidade Federal de Alagoas – UFAL, cujos os dados climáticos necessários foram coletados em estação solarimétrica e meteorológica localizada na Usina Coruripe nas Coordenadas Geográficas: Lat. 10° 01' 29,158" S; Long. 35° 16' 24,863" W; Alt. 108.76 m.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Construção

##### 3.1.1 Performance

A performance dos lisímetros são demonstradas nas figuras 12 e 13, ilustrando o funcionamento em um dia normal (Dia Juliano 162) sem chuva, para os dois lisímetros. Observa-se para os dois equipamentos que existe uma variação decrescente de massa do sistema ao longo do dia.

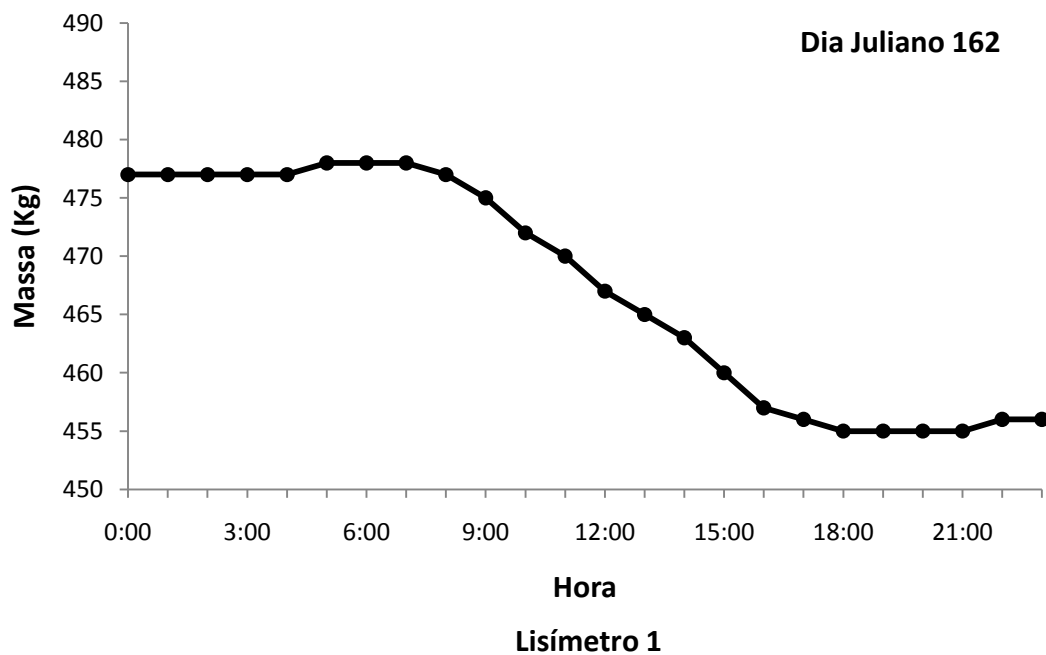


Figura 12 – Performance do Lisímetro 1 no dia 162.

Em lisimetria variação decrescente de massa no sistema é ocasionado pela perda de água, ou seja, evapotranspiração. Quando a variação de massa é

crescente, houve entrada de água no sistema, ocasionado por precipitação ou irrigação.

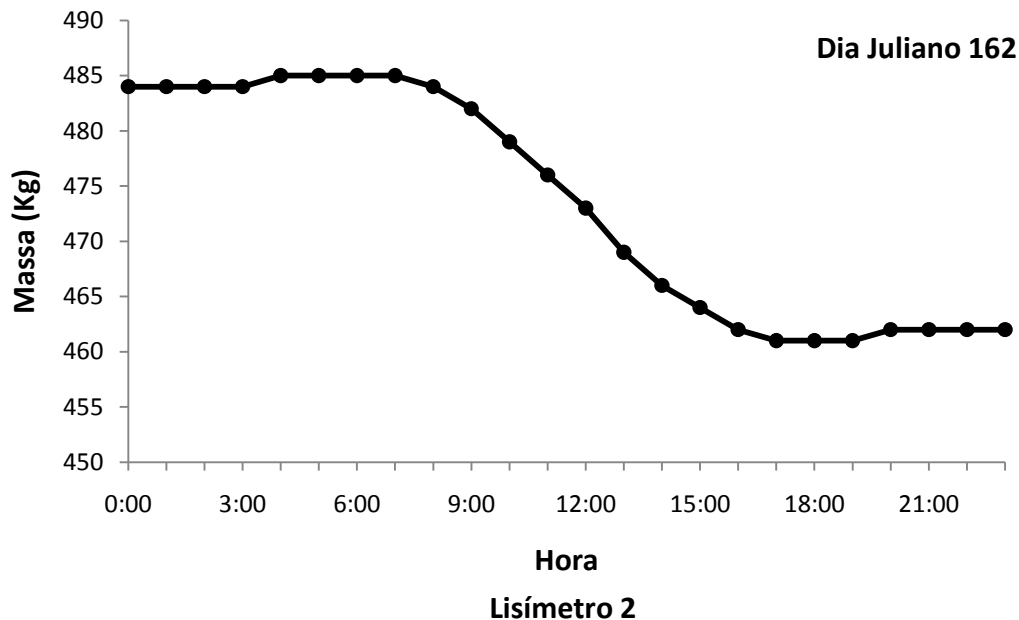


Figura 13 – Performance do Lisímetro 2 no dia 162.

Em ambos os lisímetros (Dia Juliano 162) a quantidade de água que sai do sistema (evapotranspiração) é maior no período entre 08:00 h e 15:00 h, resultado de um saldo positivo de radiação ( $R_n$ ) nesse período, ocasionando perda de água. Resultado semelhante foi obtido por Miranda; Yorder; Sousa (1999), em trabalho com lisímetro de pesagem observou a variação decrescente de massa a partir do início do dia, estendendo-se até o fim da tarde, já durante a noite há pouca variação de massa, indicando saldo negativo ocorrendo pouca perdas de água.

Em experimento com cana-de-açúcar Leão et. al, (2007), demonstra que a energia resultante das trocas verticais de energia radiante (saldo de radiação) sobre a cultura é utilizada principalmente na mudança de estado físico da água (fluxo de



calor latente). Conforme pode ser observado na figura 14, com o aumento da temperatura a umidade do ar baixa, favorecendo o aumento da evapotranspiração, conforme detectado na variação de massa dos dois lisímetros.

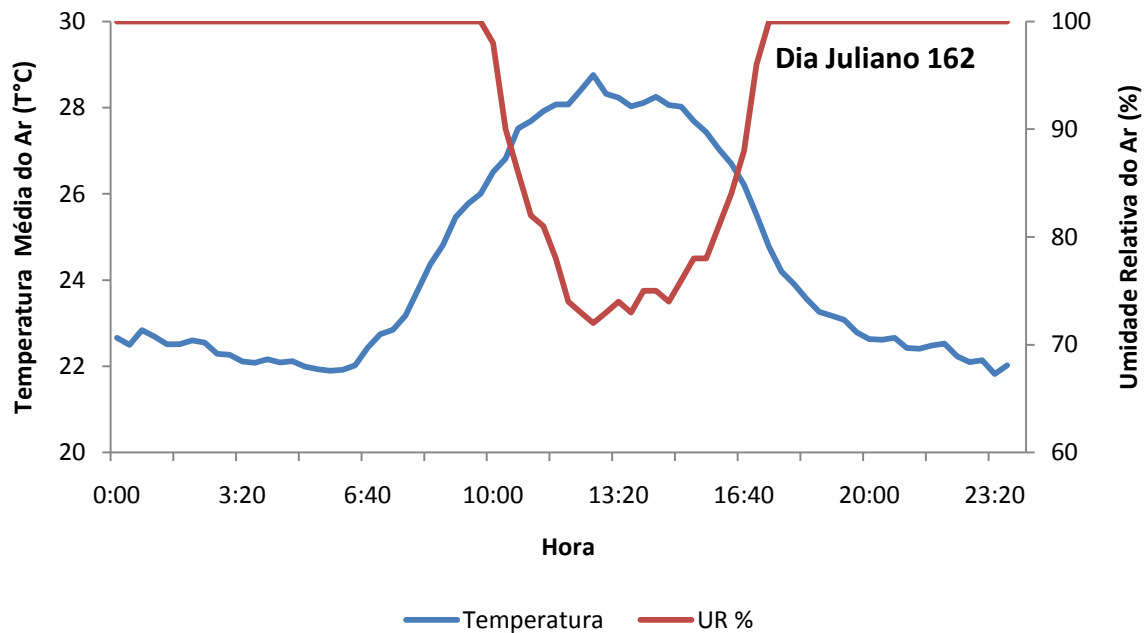


Figura 14 – Elementos de clima observados no dia 162.

Segundo Pereira et. al, (2002) rajadas de vento provocadas por turbilhonamentos resultam em variações intermitentes na massa do lisímetro (pressão dinâmica), gerando acréscimos e decréscimos alternados. Uma alternativa é diminuir a frequência das medidas, filtrando variações bruscas conforme pode ser observado na Figura 15, velocidade média do vento próxima de 2 m/s.

Durante o período noturno apesar da evapotranspiração ser pequena ou nula, ela não deve ser desprezada no somatório da evapotranspiração diária, pois além do saldo de radiação a evapotranspiração é influenciada pelas condições aerodinâmicas do ar e da energia acumulada pelo sistema.

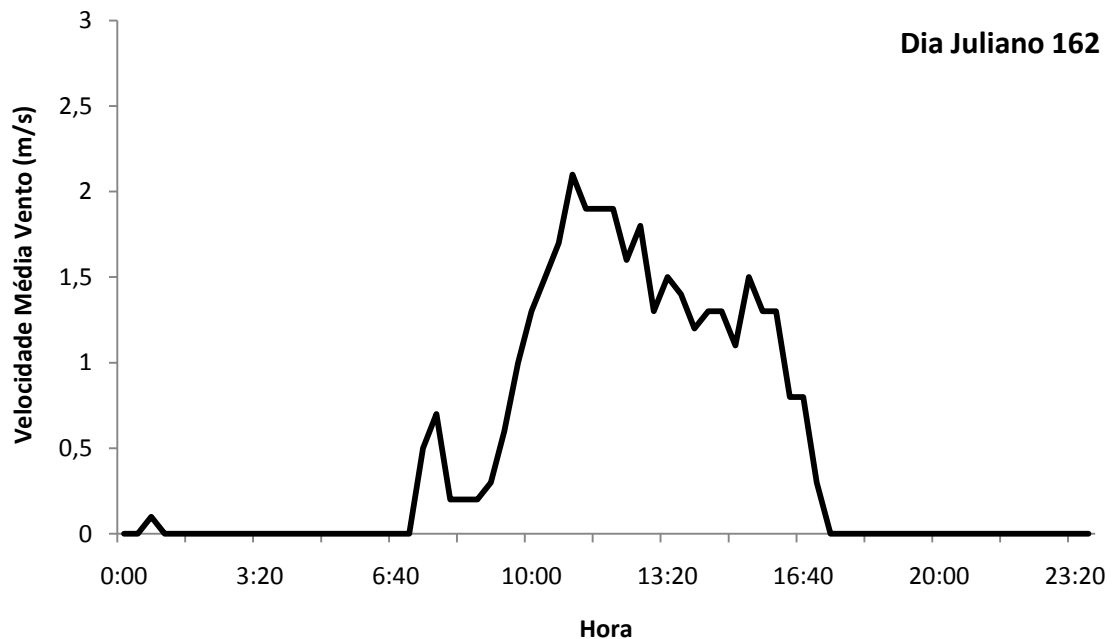


Figura 15 – Velocidade média do vento (m/s) no dia 162.

Na figura 16 é apresentado a performance do lisímetro 1 em uma situação com ocorrência de precipitação contínua, registrado na estação meteorológica (Figura 17). Há uma variação de massa crescente ao longo da madrugada até as 14:00 hs , quando a variação de massa é crescente, significa que houve entrada de água, devido à precipitação ou irrigação no sistema.

Dias com ocorrência de chuvas são fonte de erros para a determinação da evapotranspiração, principalmente com chuva contínua ao longo do dia, como se observa na Figura 17 a impossibilidade de determinar a evapotranspiração, pois o lisímetro apresenta variação crescente de massa ao longo do dia.

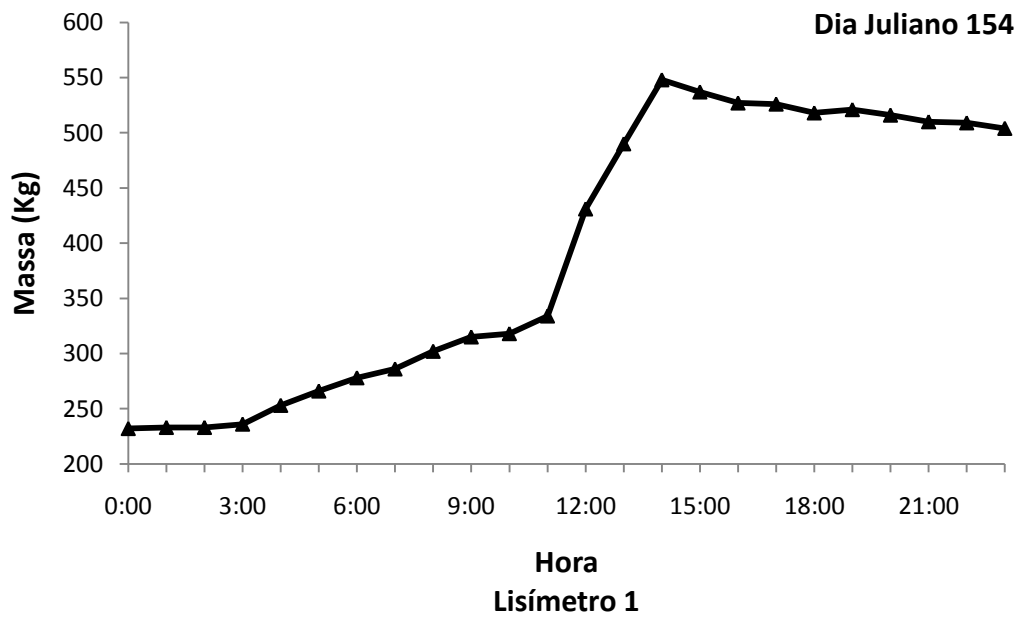


Figura 16 – Performance do Lisímetro 1 em dia com ocorrência de precipitação.

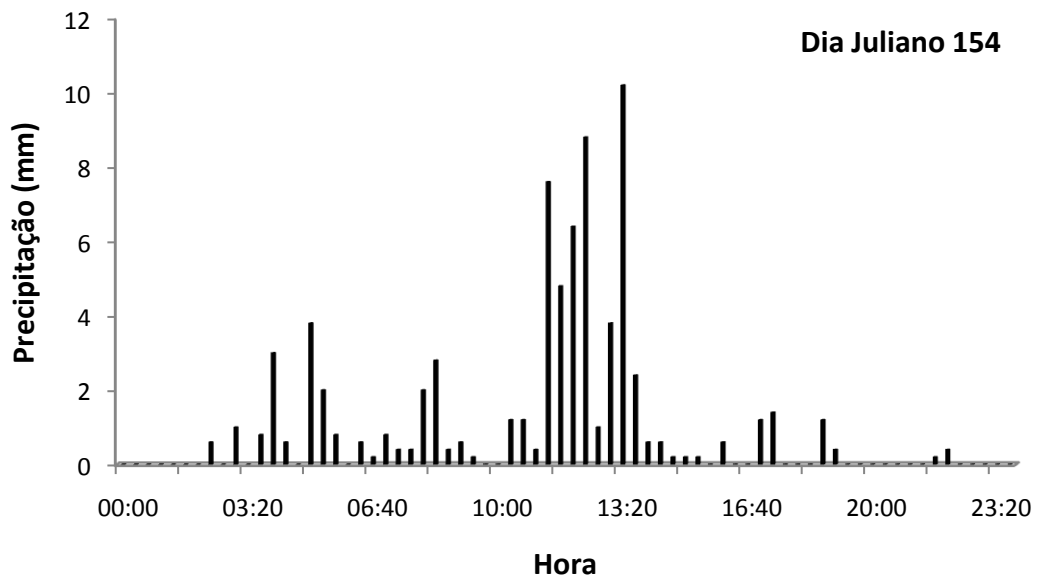


Figura 17 – Precipitação ocorrida no dia 154.

A Figura 18 demonstra a variação da temperatura e umidade relativa do ar ao longo do dia (154), não houve variação brusca de temperatura, a umidade relativa do ar encontrou-se no seu máximo ocasionado pela precipitação contínua ao longo do dia. Já a variação do vento (Figura 19) apresenta valores abaixo de  $3 \text{ m/s}^{-1}$ , como o intervalo de tempo armazenado pela estação foi de 20 em 20 minutos, há uma suavização das flutuações não sendo observado interferência direta da ação do vento na determinação evapotranspiração pelo lisímetro, como constatado também por Pereira et. al, (2002).

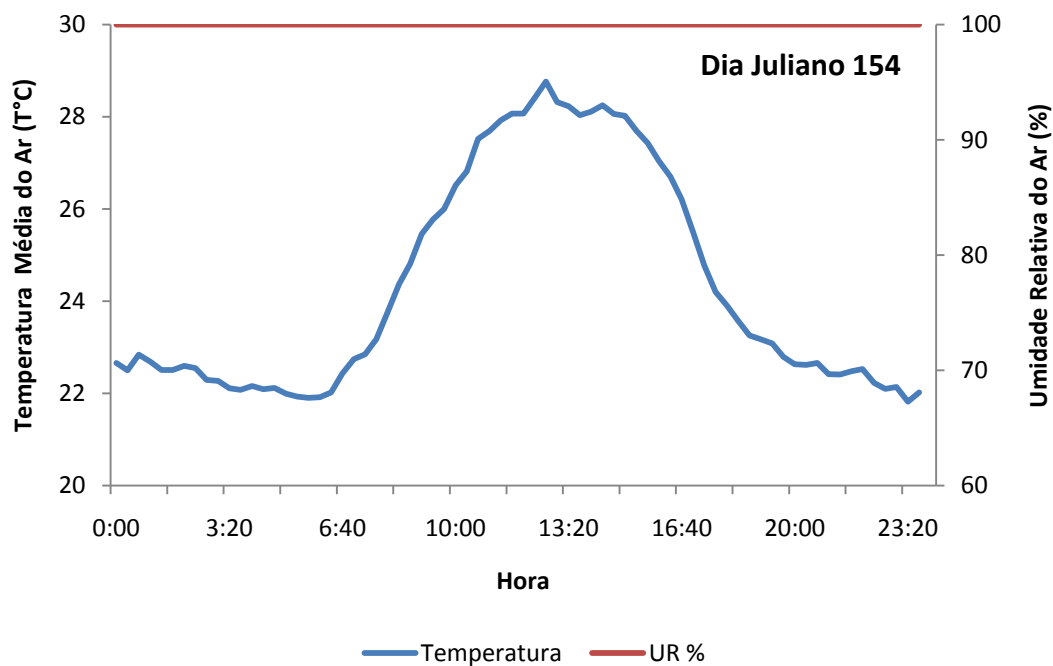


Figura 18 – Elementos do clima observados no dia 154.

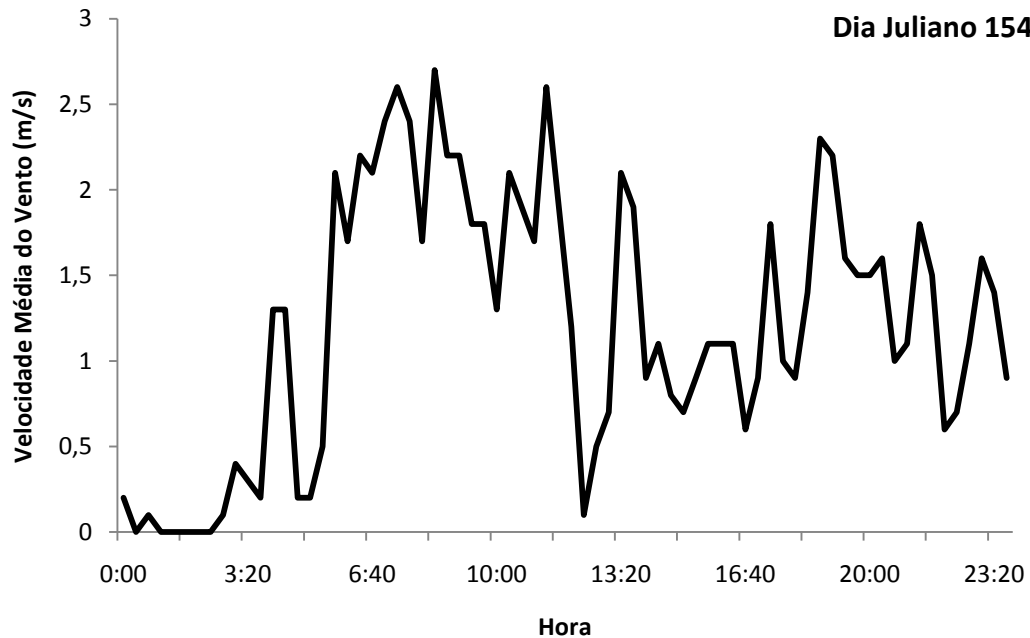


Figura 19 – Velocidade média do vento no dia 154.

A Figura 20 apresenta a performance do lisímetro 2, nota-se que a ocorrência da precipitação dar-se na madrugada, não mais acontecendo durante o dia (Figura 21), possibilitando a utilização dos dados para o cálculo da evapotranspiração em termos que os mesmos não foram prejudicados na extração dos valores diários (considerando a variação entre 06:00h e 00:00h).

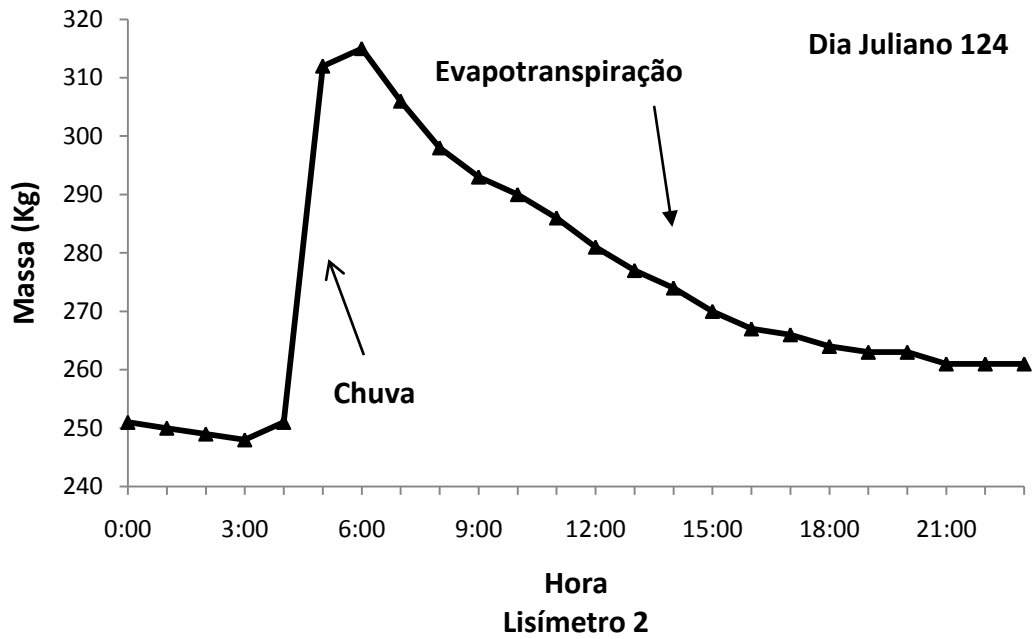


Figura 20 – Performance do Lisímetro 2 em dia de ocorrência de precipitação

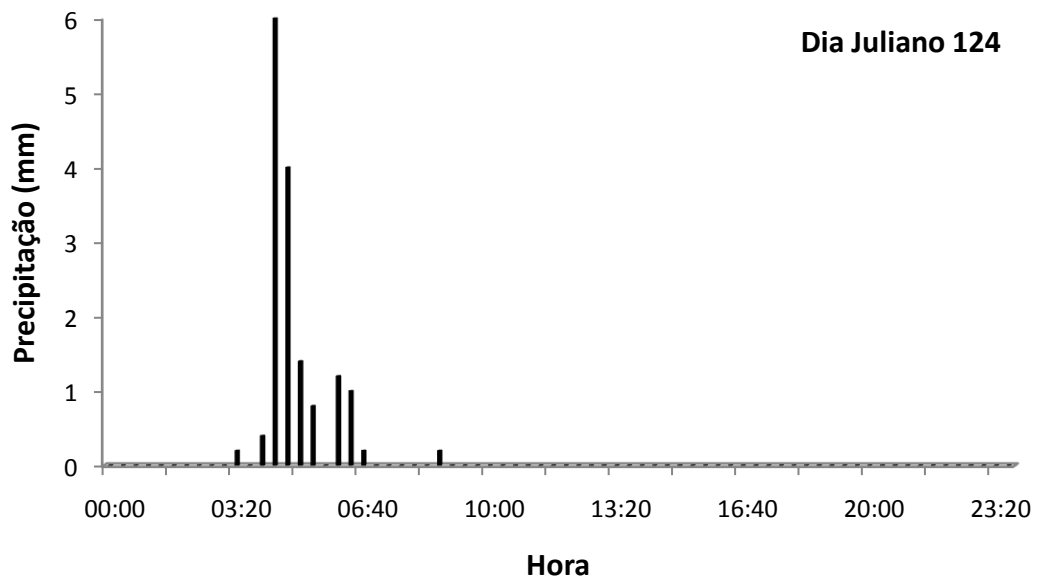


Figura 21 – Precipitação ocorrida no dia 124.

Vários autores relatam que dependendo da quantidade, intensidade e duração da precipitação, os dados lisimétricos podem ser aproveitados para a determinação da evapotranspiração, desde que sejam visualizados os processos envolvidos no sistema (Precipitação – Evapotranspiração – Drenagem).

Na figura 22 observa-se uma diminuição da umidade relativa do ar só no período em que a temperatura é elevada, permanecendo próxima da saturação ao longo do dia.

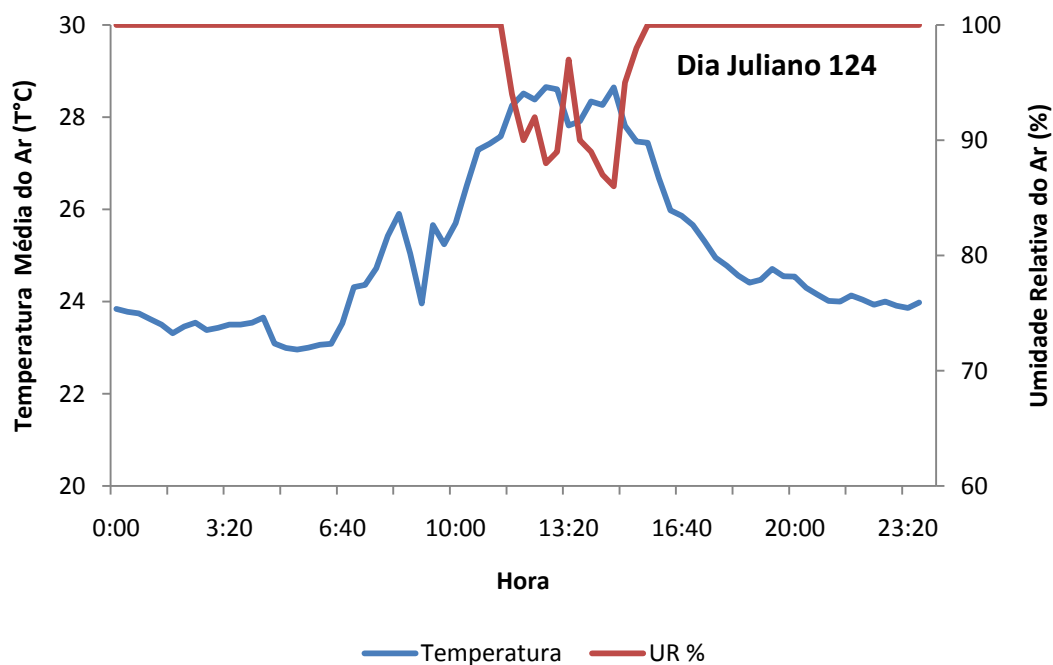


Figura 22 – Elementos do clima observados no dia 124.

Como demonstra a Figura 22 o comportamento da temperatura apresenta-se constante nas primeiras horas do dia, devido à alta nebulosidade e por ocorrência de precipitação nas primeiras horas do dia. Após a precipitação cessar a uma evolução no aumento da temperatura coincidindo com o decréscimo de massa do lisímetro (evapotranspiração).

A variação do vento (Figura 23) mantém-se normal não alcançando a  $3 \text{ m/s}^{-1}$  desse modo não sendo fator limitante na interferência da determinação da evapotranspiração pelo lisímetro.

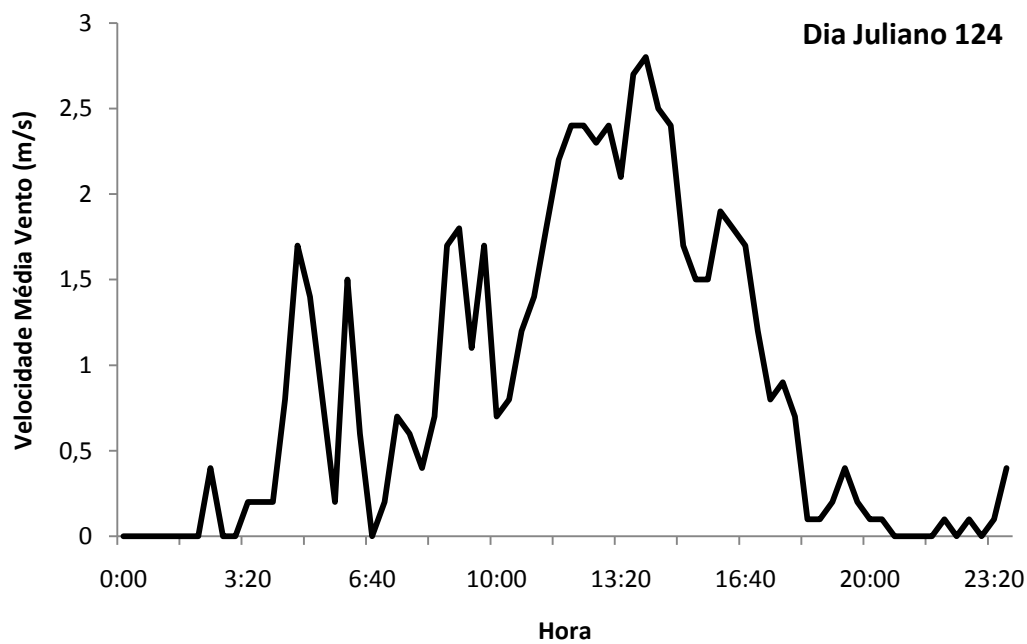


Figura 23 – Velocidade média do vento no dia 124.

### 3.2 Calibração

De acordo com a metodologia apresentada, procedeu-se a calibração dos lisímetros obtendo uma alta correlação entre peso mensurado e o peso padrão. As áreas dos lisímetros são de  $2,7\text{m}^2$  e considerando a densidade da água igual à unidade, a variação da massa do conjunto (kg) foi dividida pela área do lisímetro obtendo assim a evapotranspiração de referência, em mm.



Nas Figuras 24 e 25 estão demonstrados os resultados da calibração dos lisímetros, a equação apresentada nessa figura foi obtida a partir dos dados de carregamento e descarregamento, a resposta dos valores da saída da célula de carga, em milivoltagem (mV) foram convertidas em kilogramas (Kg) automaticamente pelo datalog, registrado em planilha do Excel e armazenado no notebook instalado no local. O ensaio obteve linearidade excelente entre as variações de peso padrão e mensurados, pois os coeficientes de determinação ( $r^2$ ) encontrados foram de 0,9962 para o lisímetro 1 e 0,9998 para o lisímetro 2.

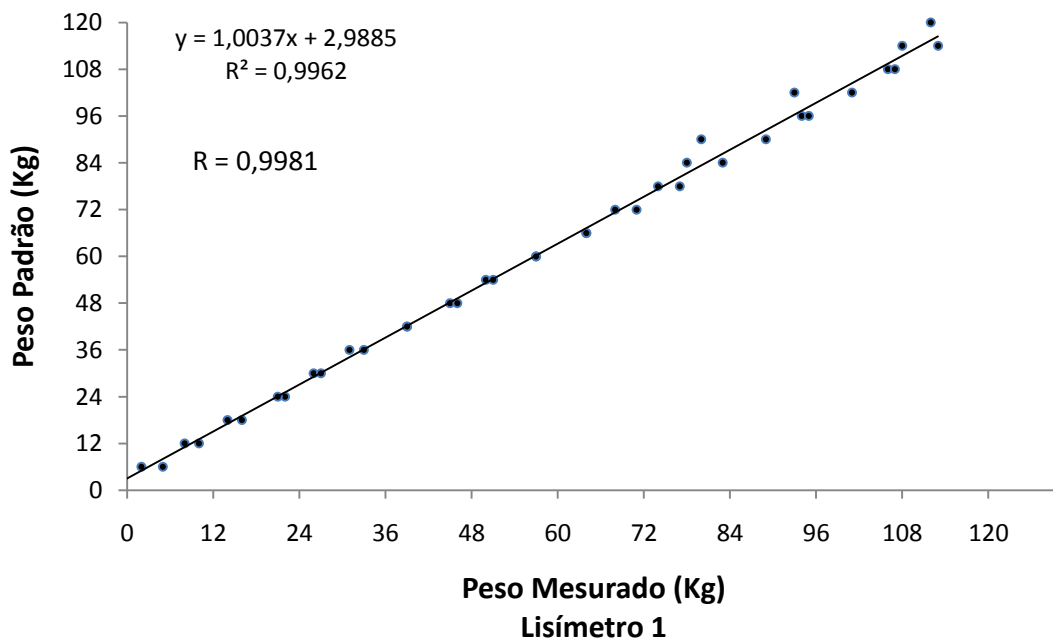


Figura 24 – Resultado da calibração do lisímetro de pesagem 1.

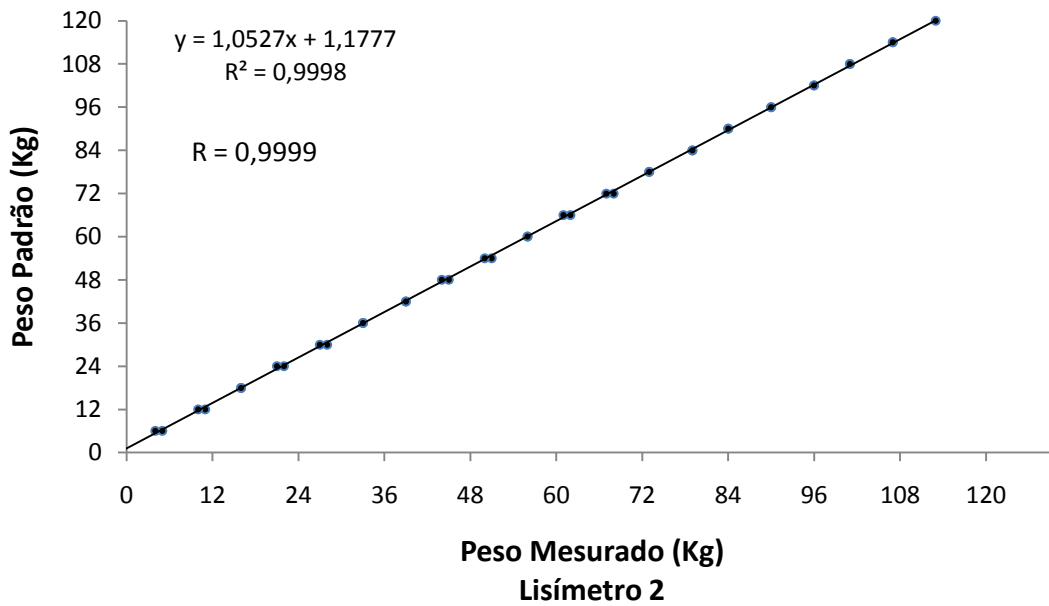


Figura 25 – Resultado da calibração do lisímetro de pesagem 2.

A calibração foi realizada entre 07:00h e 09:00h da manhã no intuito de amenizar a interferência dos elementos do clima. Valores de velocidade média do ar superiores a  $1,5 \text{ m/s}^{-1}$  devem ser evitados, pois provocam turbulência resultando em alta histerese. Pereira et al., (2002) relata que quanto mais alta for a vegetação dentro do lisímetro maior será o efeito da ação do vento. Tendo em vista que os valores observados de velocidade do vento no ensaio não ultrapassam a  $1 \text{ m/s}^{-1}$  esse efeito se torna nulo conforme resultados obtidos por diversos autores dentre eles Carvalho et al. (2007); Pereira et al. (2002); Miranda et al. (1999).

Os dados climáticos de velocidade média do vento e temperatura observados durante a calibração dos lisímetros são demonstrados na Figura 26. Os valores baixos de velocidade do vento e de pequenas variações da temperatura favoreceram ao ensaio de calibração.

Conforme constatado por Silva; Folegatti; Magiotto (1999) e Fietz; Silva; Urchei (2003), variações bruscas de temperatura podem acarretar deformações na sensibilidade das células de cargas, induzindo ao erro na leitura.

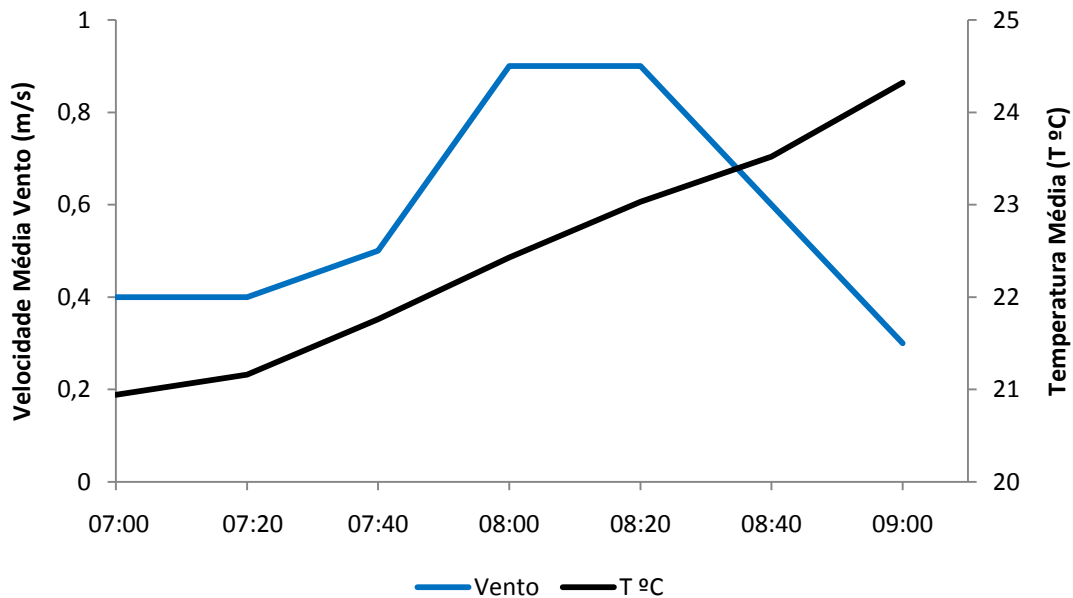


Figura 26– Elementos do clima observados durante a calibração.

### 3.3 Análise de Funcionamento

Para análise de funcionamento dos lisímetros foram obtidos valores de evapotranspiração por três formas  $ETc_1$ ,  $ETc_2$  e  $ETc_3$  no período de 01/10/2010 a 31/10/2010, como demonstra a Figura 27 (lisímetro 1) e a Figura 28 (lisímetro 2).

A  $ETc_1$  considerada como padrão, corresponde a diferença de massa do conjunto solo-caixa no início do dia (0 h) e a massa obtida no final do dia (24 h). A  $ETc_2$  consiste no somatório de todas as diferenças de massa calculadas em cada intervalo de integração ao longo de um dia, descontando apenas os valores de precipitações e irrigações. A  $ETc_3$  consiste na diferença de massa do período de 06:00h às 19:30h (diurno).

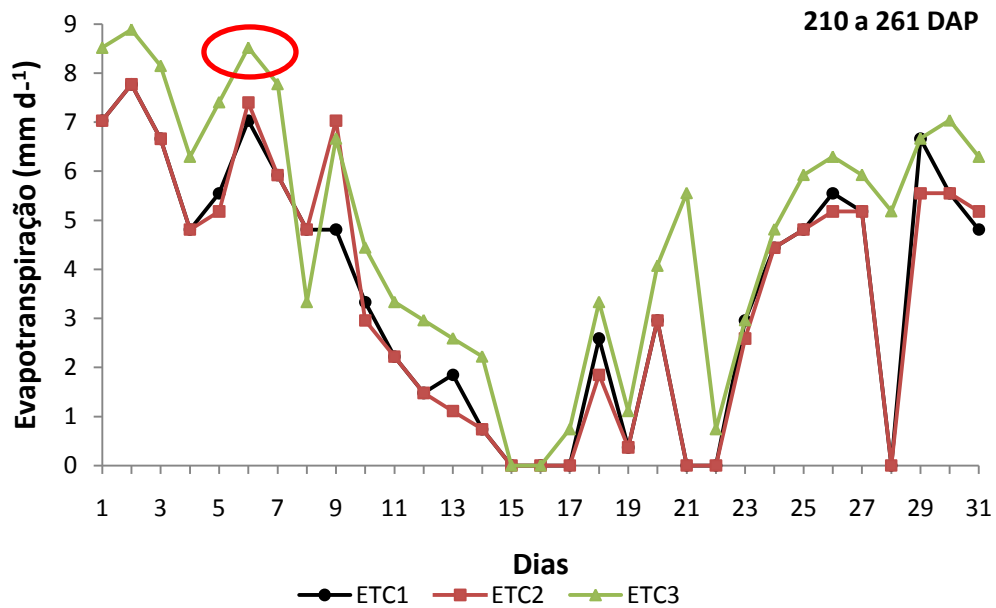


Figura 27 – Variação da evapotranspiração obtida no lisímetro 1 em condições típicas de funcionamento, cultivado com cana-de-açúcar, medida por três formas (ETC<sub>1</sub>, ETC<sub>2</sub> e ETC<sub>3</sub>).

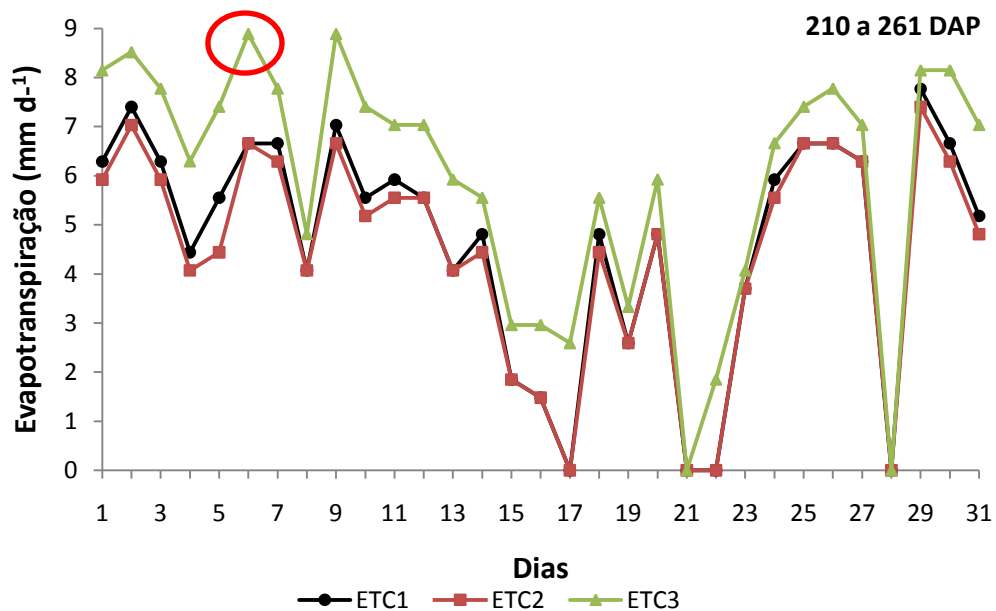


Figura 28 – Variação da evapotranspiração obtida no lisímetro 2 em condições típicas de funcionamento, cultivado com cana-de-açúcar, medida por três formas (ETC<sub>1</sub>, ETC<sub>2</sub> e ETC<sub>3</sub>).

Houve uma expressiva variação da  $ET_c$  nas três formas, analisando os dados do lisímetro 1, observa valores entre 0 e  $7,77 \text{ mm.d}^{-1}$  para  $ET_{c1}$  e  $ET_{c2}$ , para  $ET_{c3}$  valores entre 0 e  $8,88 \text{ mm.d}^{-1}$ . No lisímetro 2 obteve valores entre 0 e  $7,77 \text{ mm}$  para  $ET_{c1}$ , 0 e  $7,40 \text{ mm}$  para  $ET_{c2}$  e 0 e  $8,88 \text{ mmd.}^{-1}$  para  $ET_{c3}$ .

Conforme demonstra a variação, as formas  $ET_{c1}$  e  $ET_{c2}$  apresentam resultados semelhantes, com uma ligeira subestimativa do  $ET_{c2}$ , ambas formas consideram a variação de massa de 24h do lisímetro. Bergamaschi et al. (1997) sugeriu considerar a variação entre o início e fim do dia e período de integração de 60 minutos.

A forma  $ET_{c3}$  apresenta superestimativa quando comparado com a forma padrão  $ET_{c1}$ , conforme análise do dia 06/10/2010 na Figura 29 e 30 observa-se que a umidade relativa do ar estava abaixo de 60% e a temperatura em torno  $23^\circ\text{C}$  com velocidade média do vento foi superior  $2 \text{ m/s}^{-1}$ , entre o período 06:00 a 19:30h, a combinação desses elementos favoreceu a uma maior evapotranspiração.

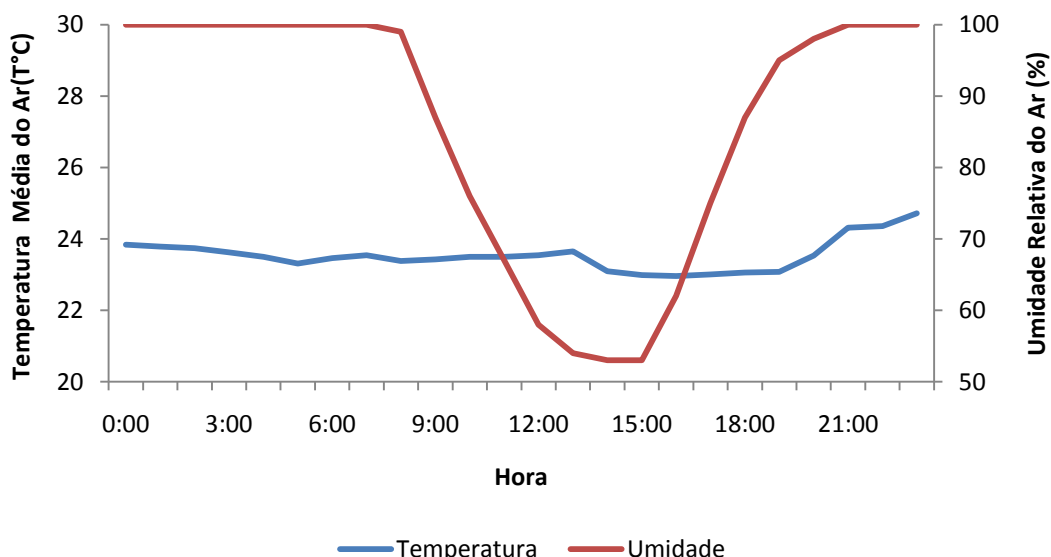


Figura 29 – Variação da umidade relativa do ar e temperatura média do Ar no dia 06/10/2010 em Coruripe-AL.

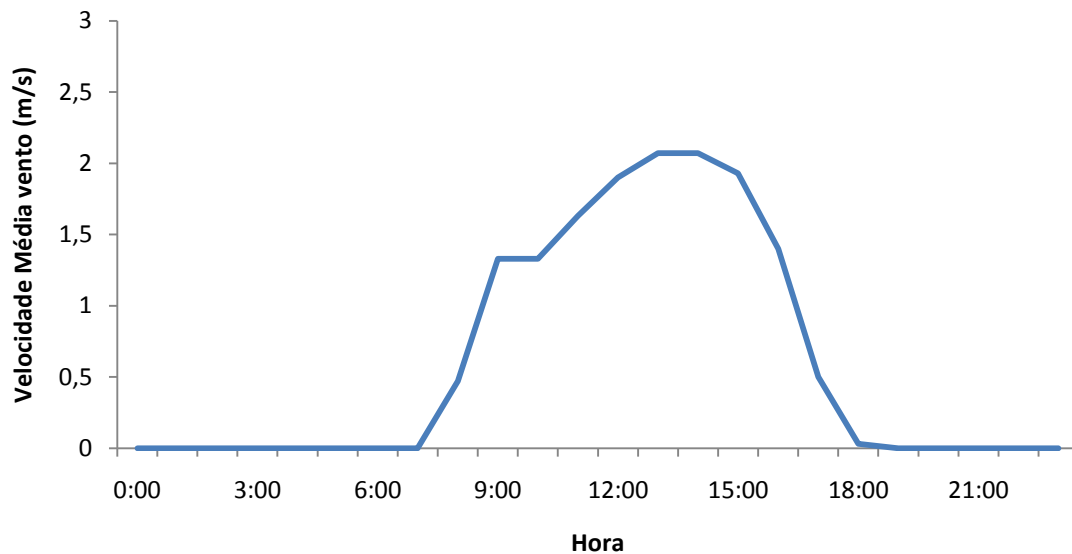


Figura 30 – Variação da velocidade do vento no dia 06/10/2010 em Coruripe-AL.

Alguns autores relatam que problemas operacionais são observados em lisímetros de pesagem, a ocorrência de rajadas de ventos provoca oscilações nas medidas do lisímetro em função de flutuações intermitentes, sendo acentuado esse efeito quanto maior for o porte da cultura (PEREIRA et al, 2002).

Nas figuras 31 e 32 estão demonstrado os valores diários de evapotranspiração  $ET_c$ , utilizando as três formas. A diferença de massa entre a meia noite do dia atual e do dia anterior  $ET_{c_1}$  foi considerada como padrão, conforme demonstra a Figura 31 (lisímetro 1) houve subestimativa em 1% dos valores de evapotranspiração quando foi considerado a forma do somatório das diferenças de massa ao longo do dia ( $ET_2$ ). Quando a comparação é com a forma de somatório de diferenças de massa entre 06:00 a 19:30h ( $ET_{c_3}$ ) houve uma superestimativa em 35% (figura 32).

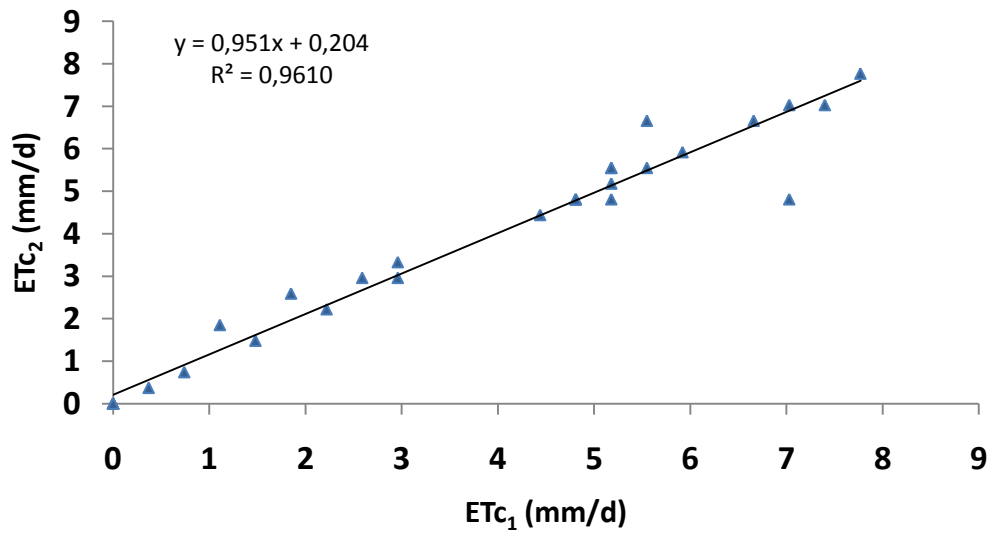


Figura 31 – Valores de evapotranspiração obtidos no lisímetro 1 pela forma de valores de massa inicial e final ( $ET_{c1}$ ) comparado pela forma de somatório negativo de massa ( $ET_{c2}$ ).

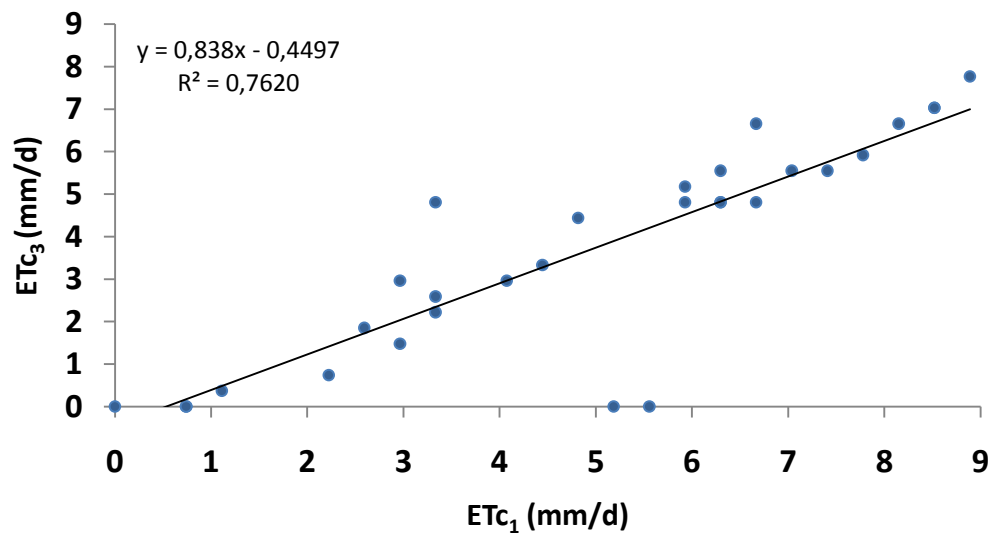


Figura 32 – Valores de evapotranspiração obtidos no lisímetro 1 pela forma de valores de massa inicial e final ( $ET_{c1}$ ) comparado com a forma valores de massa de 06:00 a 19:30h ( $ET_{c3}$ ).

Analisando os dados do lisímetro 2 seguindo a mesma metodologia utilizada no lisímetro 1, conforme demonstra a Figura 33 houve subestimativa em 4,2% dos valores de evapotranspiração quando foi considerado a forma do somatório de massa ao longo do dia ( $ET_2$ ). Quando a comparação é com a forma de somatório de diferenças entre 06:00 a 19:30h ( $ET_{C3}$ ) houve uma superestimativa em 27% (figura 34).

Campeche (2002), analisando o funcionamento de quatro lisímetros de pesagem, comparando a forma da diferença de massa da meia noite de um dia até a meia do dia posterior ( $ET_{C1}$ ) com a forma do somatório de todas as diferenças de massa ao longo de um dia ( $ET_{C2}$ ), obteve resultado semelhante aos da (Figura 31 e 33) com subestimativas de 5 e 3% em dois lisímetros e concordância de valores entre os outros dois lisímetros.

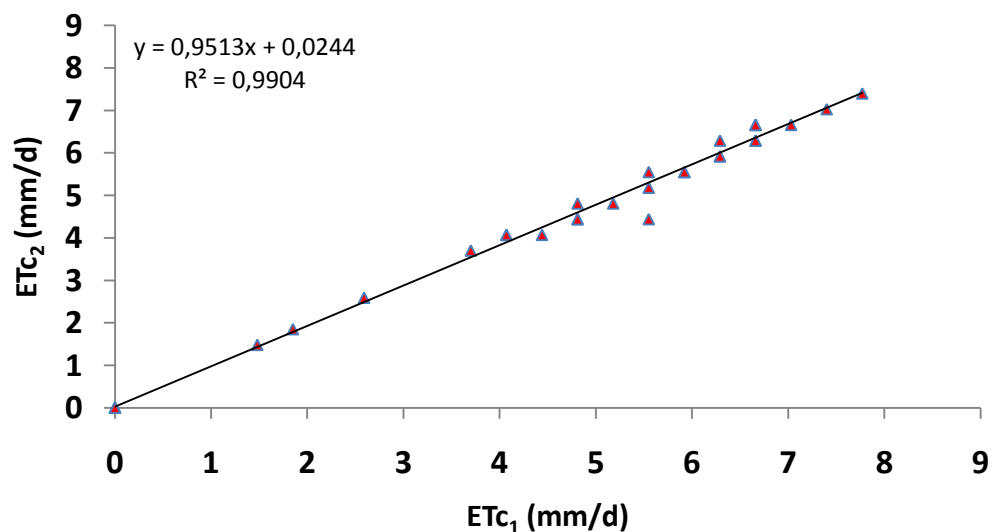


Figura 33 – Valores de evapotranspiração obtidos no lisímetro 2 pela forma de valores de massa inicial e final ( $ET_{C1}$ ) comparado pela forma de somatório negativo de massa ( $ET_{C2}$ ).



A forma  $ET_{C_3}$  obteve valores de evapotranspiração superestimados quando comparado com a forma padrão em ambos os lisímetros (Figuras 32 e 34) sendo esses valores resultado da interação dos elementos climáticos do período de 06:00 a 19:30h, como esse período corresponde ao de maior percentagem de radiação solar (radiação solar líquida) e maiores interferências por parte da velocidade do vento, obtém-se valores superestimados por não levar em conta as variações que ocorrem durante a noite. Medeiros, et al. (2003) recomenda que todas as leituras do lisímetros sejam analisadas diariamente, a fim de evitar erros.

Em síntese, tanto a forma padrão como  $ET_{C_2}$  podem ser utilizados sem prejuízo para o cálculo da evapotranspiração, mesmo o lisímetro de pesagem utilizando métodos modernos de aquisição de dados, problemas operacionais podem aparecer sendo prudente o acompanhamento dos elementos meteorológicos, no intuito de visualização e entendimento de todos os processos envolvidos na evapotranspiração.

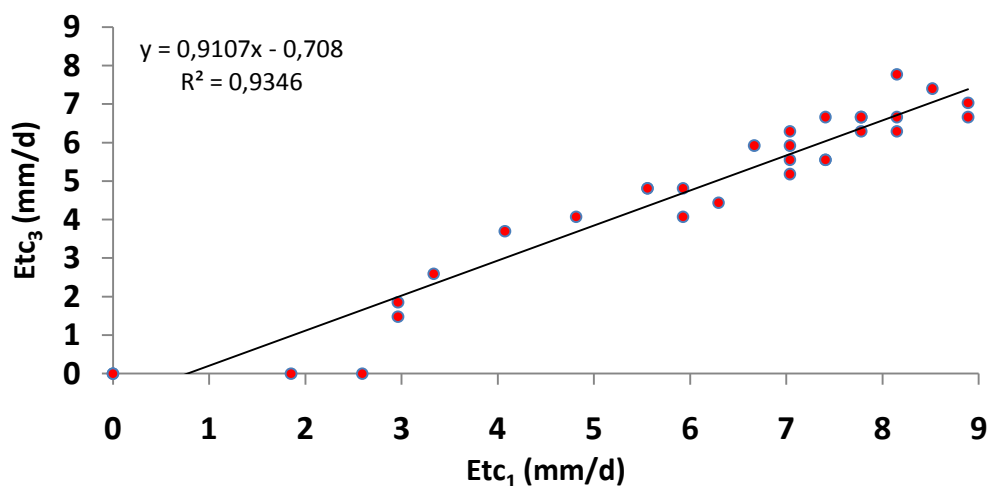


Figura 34 – Valores de evapotranspiração obtidos no lisímetro 2 pela forma de valores de massa inicial e final ( $ET_{C_1}$ ) comparado com a forma de valores de massa de 06:00 a 19:30h ( $ET_{C_3}$ ).

As figuras 35 e 36 apresentam a variação da evapotranspiração obtida pelos lisímetros cultivados com cana-de-açúcar na fase intermediária  $ET_{C1}$  comparados com  $ET_o - PM$ .

A variação da evapotranspiração obtida nesse período 01/10/2010 – 31/10/2010 (261 DAP a 292 DAP) apresenta a cana-de-açúcar no final da fase intermediária, ou seja, no terceiro estágio ocorre da cobertura completa efetiva ao começo da maturação que é indicado freqüentemente pelo começo do envelhecimento, amarelecimento ou senescência das folhas, queda da folha, ou o amadurecimento de acordo com o grau que a evapotranspiração da cultura é reduzida em relação à  $ET_o$ .

Conforme demonstra as figuras 35 e 36 há uma tendência de queda da  $ET_c$  em relação  $ET_o$  no final da fase intermediária, fato constatado por Gonçalves (2010) obtendo queda da  $ET_c$  em relação a  $ET_o$  já a partir do 210 DAP.

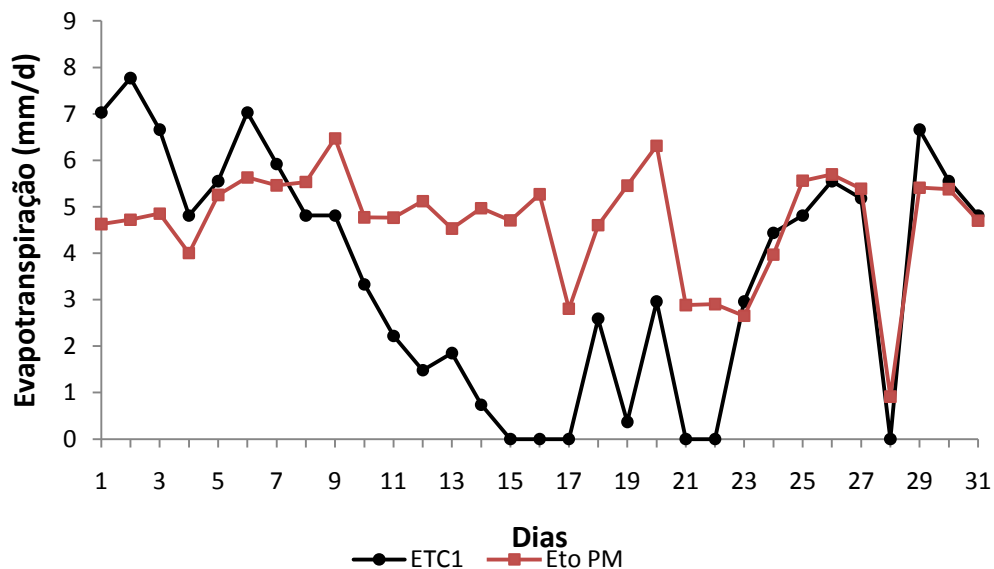


Figura 35 – Variação da evapotranspiração obtida no lisímetro 1 ( $ET_{C1}$ ) em condições típicas de funcionamento, cultivado com cana-de-açúcar, comparado com o método estimado de Penman-Monteith.

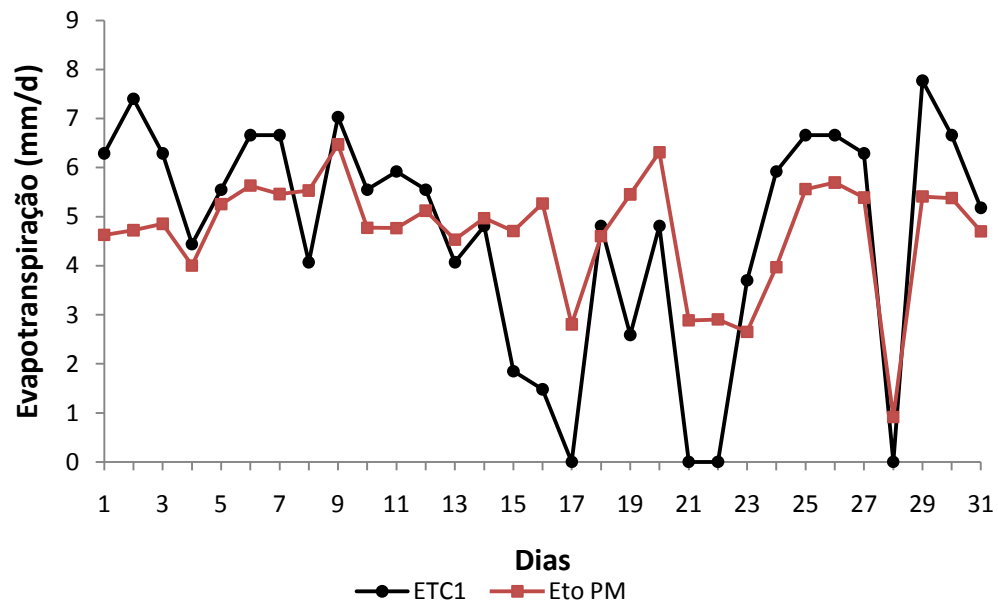


Figura 36 – Variação da evapotranspiração obtida no lisímetro 2 ( $ETC_1$ ) em condições típicas de funcionamento, cultivado com cana-de-açúcar, comparado com o método estimado de Penman-Monteith.

## 4 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos neste estudo conclui-se:

A metodologia adotada na construção dos lisímetros foi adequada, os lisímetros apresentaram boa performance, detectando as variações de massa ao longo do dia, incluindo dias com precipitações.

Os lisímetros obtiveram um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,9981 e 0,9999 respectivamente para os lisímetro 1 e lisímetro 2, estando ambos aptos para a determinação da evapotranspiração.

A evapotranspiração da cana-de-açúcar determinada na fase final intermediária pelos lisímetros ( $ET_{c1}$ ) foi menor que a estimada  $ET_o$ -PM.

## REFERÊNCIAS

- ABOUKHALED, A. ; ALFARO, A.; SMITH, M. **Lysimeters: Irrigation and Drainage.** Paper 39. Rome: FAO, 1982. 68p.
- ALLEN, R. G.; FISCHER, D. K. **Direct load cell-based weighing lysimeter system.** In: Allen, R. G.; Howell, T. A.; Pruitt, W. O.; Water, I. A.; Jensen, E. (Eds.) *Lysimeter for evapotranspiration and environmental measurements.* New York: American Society of Civil Engineers, 1991. p.114-124.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D. et al. **Crop evaporation : guidelines for computing crop water requirements.** Rome: FAO, 1998. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56). 300p.
- AUDE, M. I. S. **Estádios de desenvolvimento da cana-de-açúcar e suas relações com a produtividade.** Ciência Rural, Santa Maria, v.23, n.2, p.241-248, 1993.
- BERGAMASCHI, H.; SANTOS, M. L. V.; MEDEIROS, S. L. P.; CUNHA, G. R. **Automação de um lisímetro de pesagem através de estação meteorológica, a campo.** In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 10, 1997, Piracicaba. Anais... Piracicaba: SBA,1977,p.176-177.
- BOMFIM, G. V; AZEVEDO, B. M; VIANA,T. V. A; BORGES, R. L. M;OLIVEIRA,J. J. G; **Calibração de um lisímetro de pesagem após dois anos de utilização.** Revista Ciência Agronômica, Vol. 35, Número Especial, out., 2004: 284 – 290.
- BURMAN, R.D.; NIXON, P.R.; WRIGHT, J.L.; PRUITT, W.O. Water requirements. In: JENSEN, M.E. (Ed.) **Design and operation of farm irrigation systems.** St. Joseph: ASAE, 1983. p.189-232. (Monograph, 3).
- CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar,** terceiro levantamento, dezembro/2009/ Companhia Nacional de Abastecimento. Brasília: CONAB, 2009.
- CAMPECHE, L. F. S. M. **Construção, calibração e análise de funcionamento de lisímetros de pesagem para determinação da evapotranspiração da cultura da lima ácida 'Tahiti' (Citrus latifolia Tan.).** 2002. 79f. Tese (Doutorado), Escola Superior de Agronomia 'Luiz de Queiroz', Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- CARVALHO, D. F.; SILVA, L. D. B.; FOLEGATTI, M. V.; COSTA, J. R.; CRUZ, F. A. **Avaliação da evapotranspiração de referência na região de Seropédica – RJ utilizando lisímetro de pesagem.** Revista Brasileira de Agrometeorologia, v.14, n.1, p. 97-105, 2006.

CARVALHO, D. F.; SILVA, L. D. B.; GUERRA, J. G. M.; CRUZ, F. A.; SOUZA, A. P.; **Instalação, Calibração e Funcionamento de um Lisímetro de Pesagem.** Revista Engenharia Agrícola., Jaboticabal, v.27, n.2, p.363-372, Maio/Ago. 2007.

CRUZ, F. A.; **Instalação e calibração de lisímetro de pesagem e determinação da evapotranspiração de referência para a região de Seropédica - RJ.** 2005. 79 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2005.

DALRI, A. B.; CRUZ, R. L. **Produtividade da cana-de-açúcar fertirrigada com N e K via gotejamento subsuperficial.** Eng. Agríc., Jaboticabal, v.28, n.3, p.516-524, jul./set. 2008.

DIEESE. **Desempenho do setor sulcroatóoleiro brasileiro e os trabalhadores;** Departamento intersindical de estatísticas e estudos econômicos; Estudos e Pesquisas, Ano 3; V. 30, Fevereiro, 2007.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H.; **Yield response to water.** Rome: FAO, 1979. 193p. Irrigation and Drainage Paper,33.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. **Guidelines for predicting crop water requirements.** Roma: FAO, 1975. 179p. (Irrigation and Drainage Paper).

FARIA, R. T.; CAMPECHE, F. S. M.; CHIBANA, E. Y.; **Construção e calibração de lisímetros de alta precisão.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. v.10, n.1, p.237–242, 2006 .Campina Grande, PB.

FARIAS, C. H. A.; FERNANDES, P. D.; AZEVEDO, H. M. and DANTAS NETO, José. **Índices de crescimento da cana-de-açúcar irrigada e de sequeiro no Estado da Paraíba.** Rev. bras. eng. agríc. ambient. 2008, v.12, n. 4.

FREITAS, E. D.; **Notas de aula da disciplina de agrometeorologia.** Universidade de São Paulo. 153f. 2005. São Paulo.

FELTRIN, R. M.; **Comportamento das variáveis hidrológicas do balanço hídrico do solo em lisímetros de drenagem.** 2009. 94f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria – Santa Maria.

FIETZ, C. R.; SILVA, F.C.; URCHEI, M. A. **Instalação e calibração de lisímetros de pesagem para medida de evapotranspiração de culturas anuais.** In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 13, 2003, Santa Maria. Anais..Santa Maria: SBA, 2003.p.411-412.

GOUVÊA, J. R. F.; **Mudanças climáticas e a expectativa de seus impactos na cultura da cana-de-açúcar na região de Piracicaba, SP.** 2008. 98p. Dissertação ( Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Piracicaba – SP.

GONÇALVES, F. M.; **Evapotranspiração e coeficientes de cultivo da cana-de-açúcar irrigada por gotejamento subsuperficial**. 2010. 65f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal do Ceará. Fortaleza.

GREBET P. **Precision lysimetry in France**. In: ALLEN, R. G. et al. Lysimeter for evapotranspiration and environmental measurements. New York: American Society of Civil Engineers, 1991. p. 105-113.

GREBET, P.; CUENCA, R. History of lysimeter desing of environmental disturbances. 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. 10-18.

HOWELL, T. A. et al. **History of lisimeter design of environmental disturbances**. In: ALLEN, R. G. et al. Lysimeter for envapotranspiration and environmental measurements. New York: American Society of Civil Engineers, 1991. p.1-9.

HOWELL, T. A.; SCHINEIDER, A. D.; DUSEK, D. A. et al. Calibration and scale performance of Bushland weighing lysimeters. **Transactions of the ASAE**, v 38 n. 4, p 1019-1024, 1995.

LEÃO, I. B.; COSTA, B. C.; SOUSA, A. J. S.; BRAUNER, D. C.; TOLEDO FILHO, M. R.; **Balço de energia para uma cultura de cana-de-açúcar no Estado de Alagoas**. Revista Ciência e Natura. Santa Maria. V especial, p.95-98, 2007.

MATZENAUER, R.; **Evapotranspiração de plantas cultivadas e coeficientes de cultrura**. In: BERGAMASCHI, H. (Coord.). Agrometeorologia aplicada à irrigação. Porto Alegre-RS: Editora Universitária/UERGS. (1992). p.33-47.

McMILLAN, W.D; PAUL, H.A. **Floating lysimeter**. Agricultural Engineer, Bedford, v.42, p.498-9, 1961.

MEDEIROS, A.T.; SENTELHAS, P.C.; LIMA, R.N. **Estimativa da Evapotranspiração de referência a partir da equação de Penman-Monteith, de medidas lisimétricas e de equações empíricas, em Paraipaba - CE**. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.23, n.1, p.21-30, 2003.

MIRANDA, F. R.; YODER, R. E.; SOUSA, F. **Instalação e calibração de um lisímetro de pesagem no projeto de irrigação Curu-Paraipaba, CE**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.3, n.1, p107-110, janeiro-abril, 1999.

MORAES, M.F. **Estimativa do balanço hídrico na bacia experimental representativa de Santa Maria/Cambiocó - Município de São José de Ubá – RJ**. 2007. 233f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.

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

PEREIRA, A.R; VILLA NOVA, N.A; SEDIYAMA, G.C. **Evapotranspiração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183 p.

PEREIRA, A. R.; SANTIAGO, A. V.; MAGGIOTTO, S. R.; FOLEGATTI, M. V. **Problemas operacionais com lisímetros de pesagem durante a estação chuvosa e em dias secos com rajadas de vento**. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v.10, n.1, p. 51-56, 2002.

PORTO, R. L.; FILHO, K. Z.; **Evapotranspiração. Notas de Aula**. Escola Politécnica de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. 31p.São Paulo; 2000.

PRUITT, W. O.; ANGUS, D. E. **large weighing lysimeter for measuring evapotraspiration**. Transaction of the ASAE, v.3, n.2, p.13-18, 1960.

PRUITT, W. O.; LOURENCE, F. G. **Experinces in lysimeter for ET and surface drag measurements**. In: NATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN EVAPOTRANSPIRATION, Chicago, 1985: Advances in evapotraspiration: proceedings. St. Joseph: ASAE, 1985. p.51-69. (ASAE. Publication, 14-85).

QUAGLIA, L. **Calibração de um lisímetro de pesagem para monitoramento da evaporação do solo sem cobertura vegetal**. 2005. 104 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba-SP.

RAUDKIVI, A. J. **Hidrology**. Oxford : Ed., Pergamon Press, 1979, 471p.

REICHARDT, K. **Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera**. 4. ed. Campinas: Fundação Cargill, 1985. 466p.

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

SANTOS, M. A.L.; **Irrigação suplementar de cana-de-açúcar ( Saccharum ssp): um modelo de análise de decisão para o Estado de Alagoas**. 2005. 100f. (Tese de Doutorado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Piracicaba.

SANTOS, F. X; **Lisímetro de pesagem hidráulica e evapotranspiração de referência por diferentes métodos no agreste pernambucano**. 2004. 77f. (Dissertação) Mestrado em ciência do Solo. Universidade Rural Federal de Pernanbuco. Recife.

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



SILVA, F. C.; **Uso de dispositivos lisimétricos para determinação da evapotranspiração de referência.** 1996. 61 f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) . Escola Superior de Agricultura .Luiz de Queiroz., Piracicaba.

SENTELHAS, P.C. **Estimativa diária da evapotranspiração de referência com dados de estação meteorológica convencional e automática.** 1998. 97f. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo. Piracicaba.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; **Plant physiology.** 3.ed. Sunderland: Sinauer Associates, 2002. 798p.

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

THORNTWAITE, C. W.; WILM, H. G.; MATHER, J. R. et al. **Report of the committee on evaporation and transpiration.** Transactions of the American Geological Institute, v.27, n.5, p.721-723, 1946.

KHAN, B. R. et al. **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.

VIANA, T. V. de A. **Evapotranspiração obtida com o sistema razão de Bowen e um lisímetro de pesagem em ambiente protegido.** 2000. 138 f. Tese (Doutorado em Agrometeorologia) . Escola Superior de Agricultura .Luiz de Queiroz., Piracicaba.

WIEDENFELD, R.P. **Water stress during different sugar cane growth periods on yield and response to N fertilizer.** Agricultural Water Management., Elsevier, v.43 p.173–182, 2000.

WRIGHT, J. L. **Using weighing lysimeters to develop evapotranspiration crop coefficients.** In: ALLEN, R. G. et al. Lysimeter for envapotranspiration and environmental measurements. New York: American Society of Civil Engineers, 1991. p.191-199.