



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

**DILTON BRANDÃO DE ALMEIDA**

**UTILIZAÇÃO DE RADAR METEOROLÓGICO E DISDRÔMETRO NA PREVISÃO  
DA VAZÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MUNDAÚ**

**Maceió**

**2015**

DILTON BRANDÃO DE ALMEIDA

UTILIZAÇÃO DE RADAR METEOROLÓGICO E DISDRÔMETRO NA PREVISÃO DA  
VAZÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MUNDAÚ

Dissertação de Mestrado apresentada à  
Coordenação de Pós-Graduação em Meteorologia  
– MET/UFAL, como parte dos requisitos para  
obtenção do título de Mestre em Meteorologia –  
Área de concentração: Processos de Superfície  
Terrestre.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Sarmiento Tenório

Co-orientador: Prof. MSc. Adriano Aubert da Silva  
Barros

Maceió

2015

**Catálogo na fonte**  
**Universidade Federal de Alagoas**  
**Biblioteca Central**  
**Divisão de Tratamento Técnico**  
**Bibliotecária Responsável: Maria Helena Mendes Lessa**

A447u Almeida, Dilton Brandão de.  
Utilização de radar meteorológico e disdrômetro na previsão da vazão da bacia hidrográfica do rio Mundaú. / Dilton Brandão de Almeida. – Maceió, 2015.  
62 p. : il.

Orientador: Ricardo Sarmiento Tenório.

Co-orientador: Adriano Aubert da Silva Barros.

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas. Instituto de Ciências Atmosféricas. Maceió, 2015.

Bibliografia: f. 60-62..

1. Bacia hidrográfica – Rio Mundaú. 2. Precipitação – Meteorologia.
3. Radar meteorológico. I. Título

CDU: 551.508.7 (813.5)



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

**CERTIFICADO DE APRESENTAÇÃO**

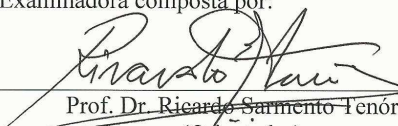
N.º de ordem: MET-UFAL-MS-123.

**“UTILIZAÇÃO DE RADAR METEOROLÓGICO E DISDRÔMETRO NA PREVISÃO DA  
VAZÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MUNDAÚ”**

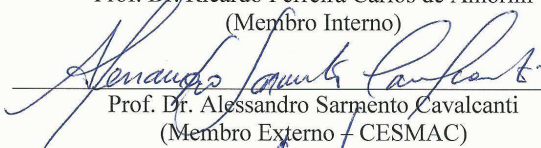
*Dilton Brandão de Almeida*

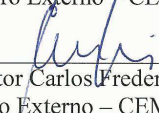
Dissertação submetida ao colegiado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Alagoas - UFAL, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Meteorologia.

Aprovado pela Banca Examinadora composta por:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Ricardo Sarmiento Tenório  
(Orientador)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Ricardo Ferreira Carlos de Amorim  
(Membro Interno)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Alessandro Sarmiento Cavalcanti  
(Membro Externo - CESMAC)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Doutor Carlos Frederico de Angelis  
(Membro Externo - CEMADEN)

**Maio/2015**

Aos meus pais Severino e Maria Jose *in  
memoriam* que destinaram toda a vida ao trabalho  
e a educação de seus dez filhos

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Dr. Ricardo Sarmiento Tenório e ao co-orientador Prof. MSc. Adriano Aubert da Silva Barros pelo trabalho de orientação desta dissertação;

À Doutora Márcia Cristina da Silva Moraes pelas informações prestadas;

Aos professores do ICAT pelos conhecimentos transmitidos;

Aos funcionários pela dedicação e comprometimento;

Aos colegas de curso com os quais muito aprendi;

À Prof. Dra. Eliana Silva de Almeida pelo incentivo;

Ao Prof. Dr. Roberaldo Carvalho de Souza pelo apoio dispensado.

## RESUMO

Este trabalho correlaciona altura pluviométrica e vazão da Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú utilizando um método para previsão de vazão com base no programa PEVva – Programa para Estimativa de Vazão, Verificação e Análise. Procurando aperfeiçoar os resultados encontrados na correlação entre altura pluviométrica e a vazão do Rio Mundaú registrada na estação da Fazenda Boa Fortuna, município de Rio Largo, em Alagoas, através do tempo modal de chuvas, determinado por meio de dados disdrométricos obtidos no banco de dados do SIRMAL entre os anos de 2003 e 2006, o presente trabalho estudou três casos selecionados, tomando como base meses que apresentaram precipitações pluviométricas que implicaram em picos de vazão registrados nas hidrógrafas da Fazenda Boa Fortuna. Foram utilizados imagens de radar em PPI e um disdrômetro Joss-Waldvogel RD – 69, de onde se extraiu os elementos necessários para determinação da altura pluviométrica com o PEVva. Foi possível chegar à conclusão de que o emprego da moda para expressar a duração dos eventos de chuva apresentou-se viável no que se refere ao ajustamento da reta quando se analisou a altura pluviométrica em função da vazão defasada em 24 horas. Os resultados obtidos com o uso do PEVva mostram-se coerentes ainda que precisem ser melhor estudados. A construção de hietogramas mostrou que as chuvas na região estudada são formadas basicamente por células do tipo estratiforme com “encaixe” de células convectivas.

**Palavras-chave:** Radar Meteorológico. Disdrômetro. PEVva. Bacia Hidrográfica. Rio Mundaú. Vazão. Chuvas.

## ABSTRACT

This work correlates rainfall height and flow Mundaú River Basin using a method for flow forecast based on PEVva program - Program for Flow Estimation, Verification and Analysis. Seeking to improve results on correlation between rainfall height and flow of Mundaú river registered in Boa Fortuna farm station, Rio Largo municipality in Alagoas, through modal time rains, determined by disdrometrics data in the database of SIRMAL between years 2003 and 2006, this paper studied three selected cases, based on months had rainfall that resulted in peak flows recorded in hidrographs of Boa Fortuna farm. Radar images have been used in PPI and disdrometer Joss-Waldvogel RD - 69, from which extracted necessary elements to determine rainfall height with PEVva. It was possible to conclude that the use of statistical mode to express duration of rainfall events showed to be feasible in relation to the straight adjustment when analyzing the rainfall height due to the lagged flow in 24 hours. The results obtained using the PEVva shown to be consistent even need to be better studied. Building hietografics showed that rainfall in study area are basically formed by stratiform type cells with "fit" of convective cells.

**Keywords:** Weather Radar. Disdrometer. PEVva. Hydrographic Basin.Mundaú River.Flow. Rains.



## LISTA DE FIGURAS

Figura1 – Destruição das cidades de Branquinha e Murici provocada pela cheia de 2010 na Bacia do Rio Mundaú.....	15
Figura 2 – Destruição provocada pela cheia de 2010 na bacia do rio Paraíba nas cidades de Quebrangulo e Viçosa.....	15
Figura3 – Curva-chave para a estação Boa Fortuna, Rio Largo, Alagoas.....	24
Figura4– Conjunto de réguas limnimétrica da Estação da Fazenda Boa Fortuna.....	24
Figura 5 – Satélite infravermelho GOES + METEOSAT (Eumetsat/CPTEC) de 18 de Janeiro de 2004 às 18 Z (15 horas local).....	29
Figura 6 – Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú.....	33
Figura 7 – Perfil longitudinal do Rio Mundaú.....	35
Figura 8 – Modelo do disdrômetro utilizado na pesquisa.....	37
Figura 9 – Sistema de radar meteorológico de Alagoas.....	38
Figura 10 – Painel de controle e visualização analógica do sinal do radar. À esquerda, em baixo, módulo de digitalização do SASSANDRA.....	39
Figura 11 – Componentes do sistema de radar meteorológico de Alagoas.....	40
Figura 12 – Imagem do radar do SIRMAL. Área de cobertura 30 km.....	40
Figura 13 – Imagem do radar do SIRMAL. Área de cobertura 130 km.....	41
Figura 14 – Imagem do radar do SIRMAL. Área de cobertura 250 km.....	41
Figura 15 – Imagem do radar do SIRMAL. Área de cobertura 380 km.....	41

Figura 16 – Estação Hidrológica da Fazenda Boa Fortuna no Rio Mundaú, município de RioLargo.....	43
Figura 17 – Leitura dos pixels e identificação das cores.....	44
Figura 18 – Máscara sobreposta à imagem do radar da BHM.....	44
Figura 19 – Hietograma para o mês de janeiro de 2004. Observa-se o predomínio de chuvas convectivas características de precipitação de grande intensidade.....	47
Figura 20 – Hidrógrafa do Rio Mundaú obtida com dados da ANA na estação fluviométrica da Fazenda Boa Fortuna. Mês de janeiro/2004.....	49
Figura 21 – Gráfico da altura pluviométrica obtido pelo processamento de imagens do radar do SIRMAL de 2004 para o mês de janeiro de 2004 usando o Programa PEVva, utilizando a moda do tempo de duração das chuvas.....	49
Figura 22 – Gráfico expressando a relação entre vazão defasada (QDef.) e altura Pluviométrica(H). Jan/2004 na Fazenda Boa Fortuna.....	50
Figura 23 – Hidrógrafa do Rio Mundaú na estação fluviométrica da Fazenda Boa Fortuna em dezembro de 2005.....	52
Figura 24 – Gráfico da altura pluviométrica no mês de dezembro de 2005 na BHM obtido pelo processamento de imagens do radar do SIRMAL .....	52
Figura 25 – Ajustamento à linha reta da vazão defasada (QDef.) e altura pluviométrica (H) no mês de dezembro de 2005.....	53
Figura 26 – Hietograma obtido com disdrômetro para o mês de dezembro de 2005 na BHM. Observa-se o predomínio de chuvas estratiformes.....	54
Figura 27 – Hidrógrafa do Rio Mundaú obtida com dados da ANA na estação Fluviométrica da Fazenda Boa Fortuna. Mês de agosto de 2006.....	56

Figura 28 – Gráfico da altura pluviométrica obtido pelo processamento de imagens do radar do SIRMAL utilizando a moda do tempo de duração das chuvas. Agosto de 2006.....	56
Figura 29 – Representação gráfica do ajustamento à linha reta para vazão defasada (QDef.) e altura pluviométrica (H). Mês de agosto de 2006.....	57

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –Municípios de Pernambuco total ou parcialmente compreendidos na BHM.....	34
Tabela 2 –Municípios de Alagoas total ou parcialmente compreendidos na BHM.....	34
Tabela 3 – Coordenadas geográficas do SIRMAL.....	38
Tabela 4 –Características técnicas do radar WR – 110 – 5/EEC.....	39
Tabela 5 – Dados da estação hidrológica da Fazenda Boa Fortuna, Rio Largo/AL.....	42
Tabela 6 – Valores dos canais de cor e o fator de refletividade associado.....	43
Tabela 7 – Série de dados referentes à altura pluviométrica obtidos pelo processamento de imagens do radar e vazão registradas pela ANA para o mês de janeiro de 2004..	48
Tabela 8 – Série de alturas pluviométricas obtida pelo processamento de imagens do radar, utilizando a moda do tempo de chuva e série de dados de vazão para o mês de dezembro de 2005.....	51
Tabela 9 – Altura pluviométrica medida com a moda de duração das chuvas pelo processamento de imagens do radar.....	55

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
BHN	Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú
CCS	Complexos Convectivos
DTG	Distribuição do Tamanho de Gotas
ENEB	Leste do Nordeste do Brasil
FBF	Fazenda Boa Fortuna
PEVva	Programa de Estimativa de Vazão Verificação e Análise
POA	Perturbações Ondulatórias dos Ventos Alísios
PPI	Indicador de Posição no Plano
RADAR	Radio Detecting and Ranging
SIRMAL	Sistema de Radar Meteorológico de Alagoas
UFAL	Universidade Federal de Alagoas
VCAN	Vórtice Ciclônico de Altos Níveis
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos.....</b>	<b>15</b>
1.1.1	Geral.....	15
1.1.2	Específicos.....	16
<b>1.3</b>	<b>Justificativa.....</b>	<b>16</b>
<b>2.</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>18</b>
<b>2.1</b>	<b>Bacia hidrográfica.....</b>	<b>18</b>
<b>2.2</b>	<b>Componentes físicos de uma bacia hidrográfica.....</b>	<b>18</b>
<b>2.3</b>	<b>Precipitação.....</b>	<b>21</b>
<b>2.4</b>	<b>Formação e tipos.....</b>	<b>21</b>
<b>2.5</b>	<b>Medidas de vazão.....</b>	<b>22</b>
<b>2.6</b>	<b>O Radar meteorológico.....</b>	<b>24</b>
<b>2.7</b>	<b>Sistemas Produtores de Chuvas no Leste do Nordeste do Brasil.....</b>	<b>25</b>
2.7.1	Chuvas.....	25
2.7.2	Sistemas produtores de chuvas.....	26
<b>3.</b>	<b>MATERIAS E MÉTODOS.....</b>	<b>33</b>
<b>3.1</b>	<b>Localização e caracterização da área de estudo.....</b>	<b>33</b>
<b>3.2</b>	<b>Pluviometria.....</b>	<b>35</b>

<b>3.3</b>	<b>Declividade do Rio Mundaú.....</b>	<b>35</b>
<b>3.4</b>	<b>Aquisição de dados.....</b>	<b>36</b>
3.4.1	Moda estatística.....	36
3.4.2	Disdrômetro.....	36
3.4.3	Radar.....	37
3.4.4	Estação hidrológica da Fazenda Boa Fortuna.....	42
3.4.5	O Programa PEVva – Programa para Estimativa de Vazão, Verificação e Análise.....	43
3.4.6	Análise das séries disdrométricas.....	45
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>46</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>58</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>60</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A previsão de vazão de recursos hídricos reveste-se de grande importância. Tal estudo é aplicado no dimensionamento de obras hidráulicas tais como barragens, canais de irrigação, projetos de águas pluviais e são de vital interesse, acima de tudo, na defesa civil para prevenção de eventos hidrológicos de cheias e consequente evacuação de comunidades ribeirinhas. Nas duas principais bacias hidrográficas de Alagoas – Mundaú e Paraíba. Segundo Fragoso Júnior et al. (2010), os últimos registros de cheias possuem um histórico de 7 grandes catástrofes (1914, 1941, 1969, 1988, 1989, 2000, 2010). As Figuras 1 e 2 mostram a destruição causada pela cheia de 2010 nas bacias hidrográficas dos rios Mundaú e Paraíba.

A vazão de um rio está associada à principal componente do ciclo hidrológico que é a precipitação que, por sua vez, constitui-se na variável mais difícil de ser avaliada com acurácia segundo Molion e Bernardo (2000). A precipitação é medida historicamente com a utilização de pluviômetros e a vazão obtida através de hidrogramas.

Com o advento do radar meteorológico e sua utilização em hidrologia, o estudo do escoamento superficial vem se intensificando principalmente em países que possuem uma vasta rede hidrográfica.

Pesquisadores como Wilson (1970); Brandes (1975); Calheiros e Antônio (1979); Lisboa (1986); Pereira Filho (1989); Thielenet al. (2000); Barros (2011), utilizaram dados de radar meteorológico para estudar as precipitações, modelos chuva-vazão bem como a relação Z-R – relação entre a refletividade e a taxa de precipitação. Através do radar é possível registrar eventos de precipitação dentro de um raio de aproximadamente 180 Km (PESSOA, 1997). O radar apresenta outra grande vantagem que é a possibilidade de estimar a precipitação de forma quase contínua tanto no tempo quanto no espaço. O radar, por outro lado, oferece uma medição volumétrica da precipitação com um alto nível de detalhe quanto à distribuição espacial, tanto na direção paralela à superfície da Terra quanto na vertical.

Barros (2011) estudou a correlação entre refletividade na Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú em Alagoas e vazão obtida pela ANA – Agência Nacional de Águas tendo chegado a resultados satisfatórios com a ajuda de um modelo computacional elaborado pelo próprio pesquisador. Foi utilizado nesta pesquisa os dados do radar meteorológico banda C do SIRMAL – Sistema de Radar Meteorológico de Alagoas, um disdrômetro RD-69 Joss-Waldvogel para determinar o tempo de duração de chuva, e o modelo PEVva – Programa para estimativa de vazão verificação e análise, sendo que os dados de radar abrangeram os anos de



2003 a 2006, período em que as imagens em PPI estavam disponíveis e foi formado um banco de dados. A área de estudo foi a Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú pela sua importância para o estado de Alagoas, seu histórico de cheias, além de possuir uma estação para medidas de vazão operada pela ANA (Agência Nacional de Águas) cujos dados são produzidos desde 1974.

**Figura 1 – Destruição das cidades de Murici (esquerda) e Branquinha (direita) provocada pela cheia de 2010 na Bacia do Rio Mundaú**



Fonte: Gama, (2010 apud OLIVEIRA et al., 2010).

**Figura 2 – Destruição provocada pela cheia de 2010 na bacia do rio Paraíba nas cidades de Quebrangulo (esquerda) e Viçosa (direita).**



Fonte: Gama, (2010 apud OLIVEIRA et al., 2010).

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Geral

Desenvolver estudos sobre a vazão da Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú utilizando radar e disdrômetro para subsidiar o aperfeiçoamento do modelo PEVva.

### 1.1.2 Específicos

- Realizar estudos estatísticos que permitam aperfeiçoar o programa PEVva - Programa de Estimativa de Vazão Verificação e Análise, na correlação entre altura pluviométrica e vazão do Rio Mundaú.
- Analisar as chuvas relacionadas aos picos de vazão obtidos na Estação Fluviométrica da Fazenda Boa Fortuna na Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú.
- Obter a moda estatística característica para os eventos diários de chuva entre 2003 e 2006 na Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú.

## 1.2 Justificativa

A Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú (BHM), localizada entre as latitudes 8°48'11", caracteriza-se por ser a maior e mais importante bacia do estado de Alagoas. Apresentando uma rede de drenagem superficial que engloba quinze municípios do estado de Pernambuco e quinze municípios do estado de Alagoas, a BHM possui uma história de cheias devido a fortes chuvas, algumas delas com perdas de vidas humanas e enormes prejuízos materiais, sendo que a última dessas cheias aconteceu no ano de 2010 (GOMES et al., 2004; FRAGOSO JÚNIOR et al., 2010).

Por outro lado, o estudo e o monitoramento de chuvas através de radar meteorológico tem permitido fazer previsões com exatidão e a curtíssimo prazo em todo o mundo, conforme demonstram as pesquisas já realizadas e mencionadas na Introdução. O radar é um instrumento importante na estimativa de precipitação a qual pode ser relacionada à vazão de um curso d'água. Além de cobrir uma área considerável – quando se compara com pluviômetros, fornece a estrutura tridimensional dos sistemas precipitantes sendo possível também acompanhar o deslocamento dos sistemas e, quando necessário, enviar alertas, permitindo a evacuação das populações ribeirinhas e, conseqüentemente, evitando perdas de vidas humanas.

Como resultado das atividades do radar meteorológico banda, C foi montado um banco de dados composto de imagens as quais foram usadas por Barros (2011) que desenvolveu um programa de computador para correlacionar a altura pluviométrica à vazão do Rio Mundaú.

Moraes (2010) juntou dados disdrométricos ao trabalho de Barros (2011) estudando a distribuição do tamanho de gotas (DTG) das chuvas continentais e marinhas na BHM e correlacionando com as vazões da bacia hidrográfica.

Do exposto constata-se a existência de pesquisa procurando utilizar o radar meteorológico para medir a vazão do Rio Mundaú, mas que precisa ser continuada para melhorar sua exatidão.

Assim, o trabalho proposto pretende dar continuidade à pesquisa referida, através da utilização de tratamento estatístico, comparando os valores de vazão encontrados por Barros (2011) com valores obtidos pelo estudo de dados disdrométricos relacionados com a moda estatística do tempo de duração de episódios de chuvas, trazendo benefícios para a hidrometeorologia e a sociedade.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 Bacia hidrográfica**

Para Tucci (1997), uma bacia hidrográfica é uma área de captação natural da água de precipitação que faz convergir o escoamento para um único ponto de saída. A bacia hidrográfica compõe-se de um conjunto de superfícies vertentes e de uma rede de drenagem formada por cursos de água que confluem até resultar em um leito único no seu exutório.

Os principais elementos constitutivos de uma bacia hidrográfica são os divisores de água, fundos de vales, sub-bacias, nascentes, áreas de descargas, recarga e perfis hidrogeoquímico ou hidroquímicos.

Conforme Resolução CNRH nº32/2003, do Conselho Nacional de Recursos Hídricos, o Brasil está dividido em regiões hidrográficas. O estado de Alagoas possui dezesseis regiões hidrográficas com suas respectivas bacias hidrográficas. Esta dissertação aborda a Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú pela sua importância para Alagoas e seu histórico de eventos de cheias.

### **2.2 Componentes físicos de uma bacia hidrográfica**

#### **✓ Área de Drenagem**

A área de drenagem de uma bacia é a área plana - projeção horizontal da superfície - inserida entre seus divisores topográficos, sendo expressa em km<sup>2</sup> ou ha. A bacia hidrográfica do Mundaú possui uma área de 4.126 km<sup>2</sup>, (CARVALHO, 2002).

#### **✓ Perímetro**

É definido como sendo o comprimento linear do contorno do limite da bacia, expresso em km. O perímetro da BHM é de 350 km (CARVALHO, 2002).

#### **✓ Forma da Bacia**

Para a caracterização da forma de uma bacia são utilizados índices que buscam associá-la com formas geométricas conhecidas. O coeficiente de compacidade (Kc) ou índice de Gravelius, é a relação entre o perímetro da bacia e a circunferência de um círculo de área igual à da bacia, ou seja:

$$K_c = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A_d}}, \text{ onde:}$$

P é o perímetro da bacia, em km, e  $A_d$  a área da bacia, em  $\text{km}^2$ .

O índice de compacidade é uma medida do grau de irregularidade da bacia, já que para uma bacia circular ideal ele é igual a 1,0. Desde que outros fatores não interfiram quanto mais próximo da unidade for o índice de compacidade maior será a potencialidade de ocorrência de picos elevados de enchentes. O índice de compacidade da BHM é igual a 1,51.

O índice de conformação ou fator de forma ( $K_f$ ) é a relação entre a área da bacia hidrográfica e o quadrado de seu comprimento axial, medido ao longo do curso d'água principal, desde a foz até a cabeceira mais distante, próxima do divisor de águas da bacia. O  $K_f$  da BHM é igual a 0,14.

$$K_f = \frac{A}{L^2}$$

#### ✓ Declividade da bacia

A velocidade com que as águas de um rio escoam depende da declividade dos canais fluviais. A velocidade de escoamento é diretamente proporcional à declividade e, quanto maior a declividade, mais pronunciados e estreitos serão os hidrogramas das enchentes. Neste estudo a declividade média foi obtida dividindo-se o desnível total entre a nascente e o local de fechamento da bacia, pela extensão do curso d'água entre esses dois pontos.

#### ✓ Densidade de drenagem ( $D_d$ )

Indica o grau de desenvolvimento de um sistema de drenagem para uma bacia. A densidade de drenagem é calculada através da razão entre o comprimento total  $L_T$  dos cursos d'água pela área da bacia  $A$ , equação 3.

$$D_d = \frac{L_T}{A}$$

### ✓ Extensão média do escoamento superficial

Trata-se da distância em linha reta, que a água da chuva deverá escoar sobre os terrenos de uma bacia até alcançar o leito de um rio desta. A extensão  $l$  do escoamento superficial é calculada com a relação a seguir.

$$l = \frac{A}{4L_T}$$

### ✓ Sinuosidade do curso d'água

Segundo Vilela, 1997 é um fator controlador da velocidade de escoamento e expressa pela razão entre o talvegue e o comprimento do rio principal da bacia. Sua expressão é dada por:

$$Sin = \frac{L_T}{L}$$

Há que se destacar também outro fator relevante na velocidade do escoamento superficial: são as características do relevo da bacia. Em linhas gerais, há um aumento de velocidade com a declividade, ou seja, quanto maior for a declividade mais rápido será o deflúvio. A distribuição da elevação das áreas em uma bacia é, portanto, um fator determinante em parâmetros como a vazão e o tempo de concentração.

### ✓ Curva hipsométrica

Indica a distribuição percentual de áreas da bacia em relação ao nível médio do mar.

### ✓ Elevação média da bacia

Expressa como processos importantes ao deflúvio, como a precipitação e a temperatura são afetados com a altitude. Pode ser calculada pela altura do retângulo de área igual à determinada pela curva hipsométrica.

### ✓ Declividade de álveos

Este parâmetro determina a velocidade de escoamento. Pode ser avaliado por meio da área do perfil longitudinal do rio principal da bacia, calculando-se a altura do triângulo de área igual à encontrada no perfil longitudinal.

### ✓ Retângulo equivalente

Trata-se de uma forma de avaliar a contribuição das características físicas da bacia para o escoamento. Determina-se através do cálculo da altura  $l$  e da base  $L$  do retângulo de área igual a da bacia e com as curvas de nível paralelas à altura do retângulo. A partir do perímetro, da área do retângulo e do coeficiente de compacidade encontram-se as relações para  $l$  e  $L$ .

$$L = \frac{K_c \sqrt{A}}{1,12} \left[ 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{1,12}{A} \right)^2} \right]$$

$$l = \frac{K_c \sqrt{A}}{1,12} \left[ 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{1,12}{A} \right)^2} \right]$$

## 2.3 Precipitação

A precipitação é a principal entrada do balanço hidrológico de uma região, fazendo parte dos fatores climáticos, juntamente com a evaporação, a umidade do ar e o vento.

## 2.4 Formação e tipos

A gênese das precipitações prende-se à ascensão de massas de ar úmido, sendo este o elemento básico do processo. Esta ascensão produz um resfriamento dinâmico o que pode fazer o vapor atingir seu ponto de saturação. A partir do nível de condensação, em condições favoráveis e com a existência de núcleos higroscópicos, o vapor d'água condensa formando minúsculas gotas em torno desses núcleos. Enquanto as gotas não possuem peso suficiente para vencer a resistência do ar elas são mantidas em suspensão formando as nuvens. Uma vez atinjam tamanho suficiente para vencer a resistência do ar elas precipitarão.

Classificam-se as precipitações de acordo com as condições que produzem

movimentos ascendentes do ar, sendo três os tipos principais, a saber: ciclônicas (ou frontais), orográfico e convectivo.

#### ✓ **Precipitações ciclônicas**

Ocorrem devido ao deslocamento de massas de ar úmido de regiões de alta pressão para regiões de baixa pressão. As precipitações ciclônicas são classificadas como frontais e não frontais. Quando há convergência horizontal de massas de ar com consequente elevação de ar húmido, ocorre a precipitação não frontal. Quando há deslocamento horizontal de massas de ar quente e húmido sobre massas de ar frio implicando na elevação do primeiro e provocando o resfriamento dinâmico quando, então, ocorre a precipitação frontal.

#### ✓ **Precipitações convectivas**

São originadas pela estratificação térmica devido ao aquecimento homogêneo do ar pelo solo. Devido à quebra do equilíbrio atmosférico, ocorre a formação de correntes ascendentes de maneira abrupta provocando resfriamento adiabático e consequente precipitação de curta duração e grande intensidade.

As precipitações são caracterizadas pelas seguintes grandezas: (i) altura pluviométrica – medida realizada nos pluviômetros; (ii) intensidade da precipitação – expressando a relação entre a altura pluviométrica e a duração da precipitação, em mm/h ou mm/min; (iii) duração – período de tempo contado desde o início até o fim da precipitação, em hora (h) ou minutos (min.).

Para medir a quantidade de chuva caída numa determinada região, utilizam-se pluviômetros ou pluviógrafos. O pluviômetro é utilizado para medir a quantidade de chuva em determinado tempo, enquanto que no pluviógrafo são feitos registros do volume de chuvano tempo.

No presente trabalho a estimativa de precipitação pluviométrica na Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú, foi realizada com radar meteorológico.

## **2.5 Medidas de vazão**

Vazão de um rio pode ser definida como o volume de água que passa numa determinada seção por unidade de tempo, a qual é determinada pelas variáveis de profundidade, largura e velocidade do fluxo e é expressa em m<sup>3</sup>/s no sistema internacional de unidades (SI).



Os diversos métodos utilizados para medir a vazão levam em conta as dimensões do rio. Para pequenos rios são usados vertedores (VILELA; MATOS, 1975). Os vertedores, com seções livres triangulares ou retangulares, são instalados em trechos retilíneos do rio. A determinação da vazão é realizada utilizando-se a relação de Francis:

$$Q = 1,838 (L - 2H/10)^{H^{3/2}}$$

Onde Q = vazão (m<sup>3</sup>/s); H = altura da lâmina líquida acima do vertedor (m); L = largura do vertedor (m).

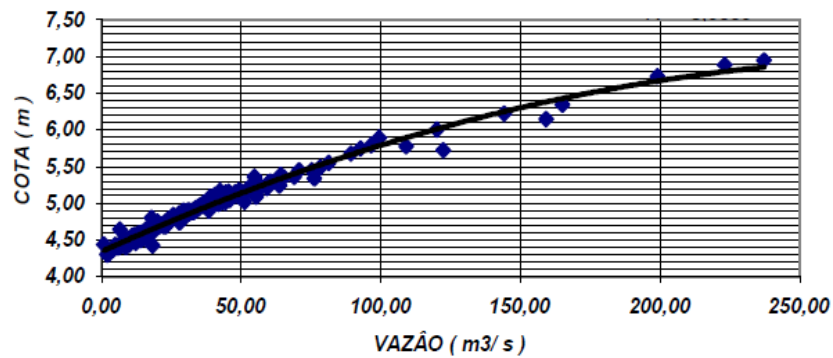
Para cursos d'água maiores os métodos diretos mais usados são os de molinete e curvas-chave.

Os métodos diretos mais utilizados para cursos d'água maiores são os molinetes hidrométricos e as curvas-chave. Os molinetes hidrométrico são dotados de uma hélice que converte o movimento de translação do fluxo de água em movimento de rotação de uma hélice; com auxílio de um contador, é determinado num intervalo de tempo, o número de voltas da hélice realizou. Determina-se, então a velocidade do fluxo com auxílio da “equação do molinete”. Esta equação, fornecida pelo fabricante, é calibrada para cada molinete de forma individual.

A medição convencional com molinete hidrométrico é universalmente utilizada para medição de vazão de águas naturais e consiste em determinar a área da seção e a velocidade média do fluxo que passa nesta seção. A área é determinada através da medição da largura do rio e da profundidade em um número significativo de pontos ao longo da seção denominados verticais nas quais também é realizada a medição da velocidade com molinete em um número significativo de pontos a diferentes profundidades, que irão dar origem à velocidade média na vertical. Em geral determina-se a velocidade média na vertical através de métodos analíticos, ou seja, fórmulas recomendadas em função do número de medições de velocidade e posição.

A elaboração da curva-chave para um determinado ponto do rio constitui-se em outro método para determinação da vazão de um curso d'água. Neste, escolhe-se uma seção transversal do rio em um trecho retilíneo de fácil acesso, fixa-se uma régua limnimétrica para determinação do nível de água. Mede-se a vazão através de molinete e, com os dados da altura e da vazão, elabora-se a curva-chave em um ponto determinado do rio. O gráfico relaciona a vazão do rio à altura (ou cota). A Figura 3 mostra a curva-chave do rio Mundaú, na Fazenda Boa Fortuna, município de Rio Largo e a Figura 4 o conjunto de réguas limnimétrica para medição de cotas do rio Mundaú.

**Figura 3 – Curva-chave para a estação Boa Fortuna, Rio Largo, Alagoas**



Fonte: Moraes, Oliveira e Costa (2006)

**Figura 4 – Conjunto de réguas limnimétricas da Estação da Fazenda Boa Fortuna**



Fonte: Barros (2011).

Geralmente os símbolos usados em hidrologia quando da medição de vazão são:  $Q$  = vazão ( $m^3/s$ );  $A$  = área da seção do rio ( $m^2$ ) ( $w.h$ );  $V$  = velocidade do fluxo de água ( $m/s$ );  $h$  = profundidade média na seção transversal do canal ( $m$ ); largura do canal =  $w$ . Expressa matematicamente tem-se a relação  $Q = (w.h) \cdot V$  ou  $Q = A.V$ . (CARVALHO, 2008)

## 2.6 O Radar meteorológico

O radar é um equipamento ativo, capaz de realizar o sensoriamento remoto da atmosfera adequado para monitorar os sistemas precipitantes, devido à sua alta resolução espacial e temporal (WILSON, 1970). O termo Radar – oriundo da expressão inglesa Radio Detection and Ranging, ou avaliação e detecção por ondas de rádio, tem sido empregado de forma genérica para qualificar os sistemas de transferência de ondas eletromagnéticas que operam na faixa de frequência das microondas. No caso do radar meteorológico o sinal

interage com os hidrometeoros das nuvens, de maneira que cada hidrometeoro espalha a energia incidente em todas as direções. Parte dessa energia espalhada retorna à antena, onde é recebida e amplificada. Essa informação recebe o nome de refletividade ( $Z$ ) e é expressa em  $\text{mm}^6\text{m}^{-3}$ . Para estimar a chuva através da refletividade utilizam-se as relações Z-R, do tipo  $Z = aR^b$ , onde  $R$  (taxa de chuva) é medido em  $\text{mm.h}^{-1}$  e  $a$  e  $b$  são coeficientes que dependem essencialmente do tamanho e distribuição do espectro de gotas na atmosfera (SAUVAGEOT, 1992).

O emprego de radares meteorológicos em hidrologia vem aumentando em escala mundial principalmente em países com grandes redes hidrográficas como o Brasil (MORAES, 2011).

Calheiros e Antônio (1979) foram os primeiros a quantificar chuvas com radar e confrontar com uma rede de postos pluviométricos; Lisboa (1986) quantificou chuvas com radar na bacia do rio Tamandateí, em São Paulo, e utilizando modelo hidrológico e dados pluviométricos, concluiu pela viabilidade do aprimoramento de modelos hidrológicos evidenciando o processo de escoamento em bacias hidrográficas e otimização das técnicas de previsão hidrometeorológicas.

Utilizando dados do radar meteorológico de São Paulo, Pereira Filho (1989) simulou vazões na bacia hidrográfica do Rio Tamandateí, fazendo previsão de vazões com previsão de chuvas através de extrapolação.

Barros (2011) empregando um radar meteorológico banda C do SIRMAL, obteve uma significativa correspondência entre vazão do Rio Mundaú e refletividade do radar, num estudo pioneiro no estado de Alagoas.

As mencionadas pesquisas apontam para uma crescente utilização do radar meteorológico em hidrologia com a possibilidade de prever vazões em recursos hídricos, permitindo o seu uso em sistemas de alerta contra fenômenos extremos de cheias e um melhor entendimento sobre o comportamento das bacias hidrográficas em resposta a altos índices pluviométricos e a sua distribuição espaço-temporal.

## **2.7 Sistemas produtores de chuva no leste do Nordeste do Brasil**

### **2.7.1 Chuvas**

Segundo Varejão-Silva (2001), as chuvas, designadas como hidrometeoros ou conjunto de partículas de constituição hídrica de estado líquido ou sólido em suspensão ou queda livre (precipitação) na atmosfera, são um importante componente do ciclo hidrológico, permitem a

renovação dinâmica da água encontrada no meio ambiente. As chuvas têm influência direta nas atividades humanas, seja no abastecimento de reservatórios, para geração de energia ou consumo urbano, ou na agricultura. O regime das chuvas ou precipitações é diferenciado pelas peculiaridades da região (clima, relevo, hidrografia, etc.) e sua medição é de grande importância no contexto agrícola, seja pela sua falta, excesso ou distribuição espacial e temporal.

As chuvas nos trópicos apresentam maior variação em termos de mudanças sazonais, sendo o principal fator na divisão do clima de uma região. Por isso, a chuva na região tropical é o elemento meteorológico de maior importância (MORAES, 2011). Ainda o mesmo autor, mostra a importância da precipitação no Leste do Nordeste do Brasil (ENEB) constituindo-se elemento de valor preponderante para o abastecimento d'água visando atender aos diversos setores – do abastecimento doméstico até as diversas atividades industriais e agrícolas.

### 2.7.2 Sistemas produtores de chuvas

O Leste do Nordeste do Brasil estende-se na parte litorânea dos estados do Rio Grande do Norte até o sul da Bahia. O clima é tropical úmido, sendo considerada a região mais úmida do nordeste brasileiro. Os maiores volumes de precipitação ocorrem nos meses de abril a julho correspondendo a cerca de 60% das chuvas. O período menos chuvoso corresponde ao quadrimestre de setembro a dezembro, com 10% das chuvas anuais. (BERNARDO,1999). É pertinente ressaltar que entre os meses de abril a julho ocorrem os ventos mais fracos; os ventos mais fortes concentram-se entre os meses de setembro a dezembro.

A produção de chuva no Leste do NEB obedece a mecanismos de escala sinótica, meso-escala e micro-escala, de acordo com as seguintes considerações.

- Escala sinótica – sistemas frontais e vórtices ciclônicos de altos níveis (VCAN).
- Meso-escala – perturbações ondulatórias dos alísios (POA) e brisas marinhas e terrestres.
- Micro-escala– pequenas células convectivas.
- Vórtices ciclônicos de altos níveis

O Vórtice Ciclônico em Altos Níveis (VCAN) é um sistema de escala sinótica caracterizado por uma baixa pressão que se forma na alta troposfera, podendo estender-se até a média troposfera, dependendo da instabilidade da atmosfera. Esse sistema possui uma circulação ciclônica (horária no Hemisfério Sul) fechada com centro mais frio que sua

periferia. As primeiras investigações sobre VCAN foram feitas por Palmén (1949) e Palmer (1951) e, a partir desses dois pesquisadores, o VCAN passou a ser classificado em dois tipos: tipo Palmén - associado a bolsões de ar frio, acoplados a extensos cavados na alta troposfera que se desprendem e são confinados no lado equatorial dos ventos de oeste. A sua origem é nas latitudes subtropicais, durante a época de inverno e primavera (austral). O segundo tipo, Palmer, origina-se nas latitudes tropicais, a uma altitude acima de 10 km, com maior frequência no verão austral, sendo raramente observado no inverno do hemisfério sul. Segundo Palmer (1951), em algumas situações, a circulação desses VCANs tropicais é similar aos VCANs de latitudes médias observados no Hemisfério Norte (HN), porém, o processo físico de formação é diferente pois, na gênese dos VCANs tropicais, não aparece a incursão de ar polar. De acordo com Kousky e Gan (1981), a origem e manutenção dos VCANs, que se formam no Atlântico Tropical entre a faixa de 20°W - 45°W e 0° - 28°S, está associada à intensificação da vorticidade ciclônica, corrente abaixo da crista em 200 hPa.

A ocorrência do VCAN no NEB identifica a existência de uma forte correlação entre a advecção de temperatura e o desenvolvimento do vórtice, com a advecção do ar frio contribuindo para intensificar o sistema. A formação de VCANs ciclônicos coincide com a época do ano em que o escoamento em altos níveis (200 hPa) apresenta-se meridionalmente, de sul a norte, sobre o Brasil, a leste do meridiano de 50° W. A maioria dos vórtices ciclônicos da alta troposfera está confinada nos altos níveis (acima de 5000 m de altura) sendo que cerca de 60% não atingem o nível de 700 hPa e em torno de 10% atingem a superfície (FRANK, 1970).

A configuração da circulação ciclônica surge inicialmente nas partes mais altas da troposfera, estendendo-se gradualmente para os níveis mais baixos (GAN; KOUSKY, 1982). Os ventos são fracos nos níveis baixos e médios, aumentando sua velocidade com a altura e atingindo velocidade máxima em torno de 200 hPa. Esses vórtices ciclônicos são caracterizados por um movimento descendente de ar frio e seco no seu centro, e um movimento ascendente de ar quente e úmido na sua periferia, possuindo, portanto, uma circulação direta.

Os vórtices ciclônicos podem também ser classificados como úmidos ou secos, dependendo da quantidade de nebulosidade associada. Os vórtices confinados na média e alta troposfera possuem pouca nebulosidade e são denominados secos. Os vórtices secos, como descrito por Frank (1966), estão caracterizados por movimento descendente e seco no seu centro. Os vórtices que atingem os níveis mais baixos da troposfera possuem bastante nebulosidade, sendo chamados de vórtices úmidos. A nebulosidade associada varia, ocorrendo

muitas vezes com bastante intensidade e com precipitação, e em outras ocasiões com pouca intensidade e com céu quase claro.

Os vórtices deslocam-se lentamente do oceano para o continente e vice-versa, apresentando nebulosidade e instabilidades nos setores leste e nordeste do vórtice. Os vórtices ciclônicos da alta troposfera que atuam no Nordeste são observados nas estações da primavera, verão e outono, com máxima frequência no mês de janeiro.

Os VCANs são os mais importantes mecanismos produtores de chuva no Leste do NEB, incluindo a região semi-árida, durante os meses de verão do Hemisfério Sul. Seus efeitos sobre a precipitação do Nordeste do Brasil são bastante evidentes, principalmente quando se originam próximos à costa leste. Seu movimento aleatório faz com que haja grande variabilidade da precipitação nas áreas afetadas pelos movimentos ascendentes na periferia e pelos subsidentes localizados no seu centro. Quando o VCAN adentra o NEB, parte da região experimenta nebulosidade e chuvas (periferia) e parte tem céu claro, decorrente dos movimentos subsidentes. Ao se deslocar para oeste sobre o NEB, esses sistemas com o centro sobre o interior do continente inibem chuvas sobre esta região. O vórtice está associado a um sistema frontal semi-estacionário na região. Esse sistema frontal é uma região de baixa pressão.

A presença de um VCAN criou as condições necessárias para ocorrência de intensidades de chuva superiores a 250 mmh/dia em quase toda a região do Estado de Alagoas em 18 de janeiro de 2004, como mostram as imagens de radar na Seção 2 e a Figura 5.

Segundo Gan e Kousky (1986), os VCANs originados nos trópicos apresentam as seguintes características:

- i. Originam-se em torno de 600 hPa, nas latitudes baixas;
- ii. Podem permanecer na região tropical por longos períodos;
- iii. Durante a passagem para latitudes mais altas, geralmente crescem e intensificam-se.

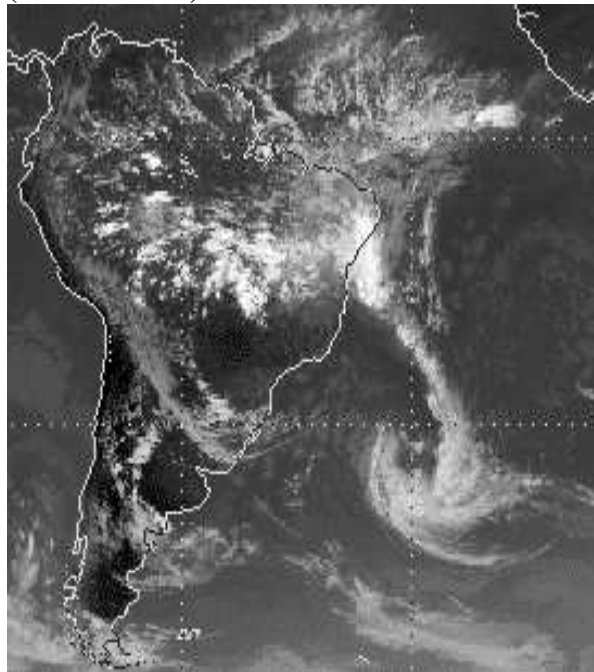
De acordo com Kousky e Gan (1981), esses sistemas correspondem a uma circulação ciclônica fechada em altos níveis, com centro mais frio que sua periferia, e formam-se corrente abaixo da amplificação de uma crista em 200 hPa. Segundo Gan e Kousky (1986), foi observado o seguinte mecanismo de formação: um sistema frontal, ao penetrar nas latitudes subtropicais, provoca forte advecção de ar quente no seu interior. O cavado que está à leste desta, também é intensificado, formando o ciclone na alta troposfera. Esses vórtices

apresentam movimento zonal em ambas as direções e podem permanecer estacionários por 3 a 4 semanas, podendo atingir o oeste da América do Sul.

a. Sistemas frontais

O movimento de duas massas de ar com diferentes características de temperatura, pressão e umidade encontram-se, dando origem ao chamado sistema frontal, que é composto por uma frente fria, o motor do sistema, e uma frente quente que a antecede. A faixa onde o ar mais frio e denso encontra a massa de ar quente e menos densa, empurrando-a em forma de cunha e obrigando-a a subir, designa-se por frente fria. A faixa onde a massa de ar quente volta a ter contato com o ar mais frio e denso, sendo assim forçado a subir também em forma de cunha, designa-se por frente quente.

**Figura 5 – Satélite Infravermelho GOES+METEOSAT (Eumetsat/CPTEC) de 18 de janeiro de 2004 às 18Z (15 horas local)**



Fonte: INPE/CEPETEC

Esse encontro entre as massas é forçado por um gradiente de pressão, que impulsiona uma massa em direção a outra. Quando úmidas e estáveis, as nuvens predominantemente são as estratiformes (nimbostratos, altostratos e cirrostratos) com precipitação moderada.

Entretanto, quando o ar quente é úmido e instável (ou com tendência para ser instável), as nuvens são predominantemente cumuliformes e a precipitação ocorre na forma de pancadas com intensidade moderada a forte.

Os sistemas frontais de latitudes médias afetam o tempo nas regiões de latitudes mais baixas. Na região amazônica, por exemplo, esse fenômeno é conhecido como "Friagem", ocasionando quedas de 15° C a 20° C na temperatura do ar e tendo uma duração média de 3 a 5 dias, (MOLION, 1987; OLIVEIRA,1986) observou uma interação entre os sistemas frontais e a convecção tropical, em suas variações de intensidade, ou seja, esses sistemas penetram até as baixas latitudes, no intervalo entre 20° S e 30° S onde, habitualmente, ocorrem essas interações. Os sistemas frontais que ultrapassam 20°S rumo ao NEB geralmente estão associados com a convecção tropical localizada no setor Norte da Amazônia.

Segundo Molion e Bernardo (2002), o sistema frontal é um importante mecanismo na produção de chuva no leste do NEB em todas as épocas do ano, principalmente no inverno do Hemisfério Sul, o que está de acordo com Kousky (1979). As latitudes de penetração desses sistemas ficam entre 5° S e 18° S.

#### b. Perturbações ondulatórias nos Alísios

São sistemas também responsáveis pela chuva na Costa Leste do Nordeste Brasileiro, ocorrendo mais frequentemente durante a estação chuvosa, entre os meses de abril e agosto. Geralmente estão associados a sistemas convectivos responsáveis por grandes taxas de chuva sobre a costa Leste do NEB.

De acordo com Molion e Bernardo (2002), a Perturbação Ondulatória nos Alísios (POA) ocorre através de uma produção de grandes complexos convectivos (CCS) na região da ZCIT (6) que, por sua vez, causam perturbações ondulatórias no campo do vento dos Alísios. Esses CCS são formados através da penetração de sistemas frontais do HN, para as regiões de latitude equatoriais, quando o posicionamento da ZCIT está mais para HS, durante os meses de dezembro a abril. O deslocamento das POAs ocorre para oeste, cruzam o Equador, com velocidade de 6° a 8° de longitude por dia, não apresentando sobre o oceano condições de desenvolvimento e sua intensificação ocorre quando chegam a costa, devido ao aumento da convergência e umidade e ao contraste térmico. Quando associadas com a brisa marinha, essas perturbações chegam a penetrar até 300 km para dentro do continente. Quando confluem com a brisa terrestre, ocorrendo principalmente próximo à costa do Leste do NEB à noite, podem intensificar-se e causar tempestades com total pluviométrico superiores a 50mm por dia.



### c. Brisas marinha e terrestre

As brisas do mar são um tipo de vento litoral de meso-escala causadas pela circulação térmica. Durante o dia, a superfície do continente se aquece mais rapidamente que a do oceano adjacente. Como consequência, pela manhã, surge uma faixa de pressão mais baixa sobre o litoral, propiciando o desenvolvimento de correntes convectivas ascendentes sobre o continente, as quais geram nuvens convectivas.

Acima do oceano a pressão continua elevada, face à menor temperatura da água na superfície. Dessa maneira, é estabelecida uma circulação fechada, com movimentos ascendentes na costa e subsidentes sobre o mar. O vento, à superfície, sopra do oceano para o continente, em direção aproximadamente perpendicular à linha da costa e é chamado de brisa marinha.

Durante a noite o continente perde calor mais rapidamente que o oceano e, a partir de uma certa hora após o pôr-do-sol, a superfície do oceano passa a ostentar uma temperatura mais elevada que a do continente. A faixa de baixa situa-se, então, sobre o oceano e o movimento ascendente associado a ela pode gerar nuvens convectivas. O vento passa a soprar do continente para o mar, à superfície, constituindo a brisa terrestre, também perpendicular à costa. A brisa terrestre é, em geral, mais fraca que a marinha.

No leste do NEB, o máximo de chuva ocorre entre maio e julho. Esse máximo está associado a uma maior atividade da circulação de brisa, a qual advecta bandas de nebulosidade média para o continente e associando-se às ações das frentes frias remanescentes, que se propagam ao longo da costa (KOUSKY, 1979). Segundo Molion e Bernardo (2002), as massas de ar das brisas terrestres apresentam características termodinâmicas distintas das associadas aos alísios, isto é, a temperatura da brisa está entre 21°C a 24°C, enquanto que a dos Alísios permanece entre 24° e 26°C; a umidade relativa para brisas é de 65% a 75% e dos alísios de 80% a 90%.

O efeito da super-refração sofrida pelo feixe do radar ao longo da costa sugere uma forte correlação com a presença das brisas. Quando tal fenômeno ocorre, aparecem “manchas” nas imagens geradas pelo sistema, na sua maioria, ao longo da costa, que não se deslocam. Estas manchas possuem um efeito de *fade-in*, *fade-out* (aumento e diminuição gradual da intensidade) quando observadas através da animação das imagens, com duração de até algumas horas (QUINTÃO, 2004).

#### d. Convecção local

O conhecimento das características estruturais da convecção tropical é importante para a compreensão da organização individual das células convectivas e da sua interação com a circulação em grande escala. Essa convecção deve-se ao aquecimento da superfície e à convergência de umidade que é transportada pelos Alísios. Segundo Molion e Bernardo (2002), a convecção máxima ocorre nos meses de fevereiro e março, sendo esses meses os mais chuvosos em grande parte do Nordeste. As células de chuva e seus baixos totais pluviométricos não devem ser desprezados, por constituírem um mecanismo muito importante para a vida do semi-árido.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Localização e caracterização da área de estudo

A área de estudo é a Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú. A BHM está localizada entre as latitudes 8°48'11" e 9°40'23" e tem como rio principal o Mundaú, o qual tem suas nascentes localizadas a oeste do município de Garanhuns no estado de Pernambuco, com uma extensão de 195 km até chegar ao Oceano Atlântico, passando antes por sua foz afogada - Lagoa de Mundaú (TENÓRIO, 1985). Na BHM atuam a Massa Polar Atlântica, a Massa Tropical Atlântica e a Massa Equatorial do Atlântico Sul. A figura 1 mostra a localização da BHM.

**Figura 6 – Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú**



Fonte: Ferreira (2014)

A bacia do rio Mundaú abrange uma área total de 4.126 km<sup>2</sup>, tendo um perímetro de 382,68 km. Da área total da BHM, 2.155km<sup>2</sup> (54,90%) pertencem ao estado de Pernambuco e os restantes 1.951 km<sup>2</sup> (45,10%) ao estado de Alagoas. Geograficamente a bacia está localizada na Mesorregião do Agreste Pernambucano e, em Alagoas, na Mesorregião do Leste Alagoano.

No estado de Pernambuco, a bacia possui uma população de 346.702 habitantes, na qual estão inseridos total ou parcialmente, territórios de 15 municípios.

Em Alagoas existem total ou parcialmente, 15 municípios, totalizando uma população de 1.326.472 habitantes. São 10 sedes municipais e uma pequena parte da zona urbana de Maceió. Destacam-se como núcleos urbanos as cidades de União dos Palmares e Rio Largo (CARVALHO, 2002).

**Tabela 1 - Municípios de Pernambuco total ou parcialmente compreendidos na BHM**

<b>Pernambuco</b>		
Município	Área Total (km <sup>2</sup> )	Área na bacia (km <sup>2</sup> )
1. Angelim	126,7	126,7
2. Brejão	161,9	114,6
3. Caetés	324,2	49,9
4. Calçado	56	16,3
5. Canhotinho	423	386,6
6. Capoeiras	344,3	91,2
7. Correntes	285,2	285,2
8. Garanhuns	467,8	383,6
9. Jucati	109,4	87,4
10. Jupí	151,2	64,7
11. Jurema	147	7,6
12. Lagoa do Ouro	219,6	101,9
13. Lajedo	208,9	2,7
14. Palmeirina	200,5	200,5
15. São João	236,6	236,6
<b>TOTAL</b>	<b>3462,30</b>	<b>2155,50</b>

Fonte: Carvalho (2002).

**Tabela 2 - Municípios de Alagoas total ou parcialmente compreendidos na BHM**

<b>Alagoas</b>		
Município	Área Total (km <sup>2</sup> )	Área na bacia (km <sup>2</sup> )
1. Atalaia	534,3	152,9
2. Branquinha	191,2	177,8
3. Capela	226,9	53,8
4. Chã Preta	202,1	19,6
5. Ibateguara	255,5	32,7
6. Maceió	512,8	9,7
7. Messias	113,3	10,4
8. Murici	425,8	377,8
9. Pilar	221,6	15,8
10. Rio Largo	310,6	235,4
11. Santa Luzia do norte	28,7	7,6
12. Santana do Mundaú	226,4	220,3
13. São José da Laje	273,8	271,2
14. Satuba	42,7	31,6
15. União dos Palmares	429,6	354
<b>TOTAL</b>	<b>3995,30</b>	<b>1970,60</b>
Área Total da Bacia		<b>4126,10</b>

Fonte: Carvalho (2002).

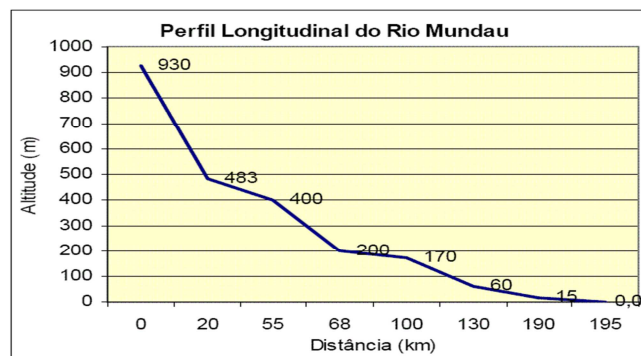
### 3.2 Pluviometria

A precipitação sobre a bacia do Rio Mundaú tem sua gênese em sistemas meteorológico com diferentes escalas, tais como: Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis – VCANs. Distúrbios de Leste, Sistemas Frontais, Brisas Marinhas e Ventos Alísios e anomalias de escala planetária como os ENSO e o Dipolo do Atlântico, são exemplos de processos climáticos que alteram a distribuição das chuvas no NEB conforme Tenório (1985). Medeiros e Molion (2002) buscaram um relação entre clima global e as descargas na bacia, obtendo coeficientes de correlação não conclusivos. A precipitação é normalmente distribuída, ao longo do ano em dois períodos marcantes: A estiagem que ocorre nos meses de outubro a janeiro e o período chuvoso que ocorre mais intensamente entre maio e agosto. A precipitação média anual varia ao longo da bacia, tendo valores de 1200 mm/ano no baixo Mundaú, 1600 mm/ano no médio Mundaú e 1080 mm/ano no alto Mundaú; em algumas regiões do médio Mundaú, encontram-se valores médios anuais de 2000 mm/ano (CARVALHO, 2002).

### 3.3 Declividade do Rio Mundaú

A velocidade com que as águas de um rio escoam depende da declividade dos canais fluviais. A velocidade de escoamento é diretamente proporcional à declividade e, quanto maior a declividade, mais pronunciados e estreitos serão os hidrogramas das enchentes. Neste estudo a declividade média foi obtida dividindo-se o desnível total entre a nascente e o local de fechamento da bacia, pela extensão do curso d'água entre esses dois pontos. O rio Mundaú possui um comprimento aproximado de 195 km e uma declividade de 930 m, sendo mais marcante nos primeiros 20 km, onde o desnível atinge 447 m. Figura 7.

**Figura 7 – Perfil longitudinal do rio Mundaú**



Fonte: Carvalho (2002).

### 3.4 Aquisição de dados

Para realização dos estudos de que trata a presente dissertação utilizou-se um disdrômetro e um radar meteorológico banda C do SIRMAL de onde foram obtidos dados e imagens sobre precipitação pluviométrica na bacia hidrográfica do rio Mundaú. Os dados disdrométricos sobre tempo de duração de chuvas e aqueles extraídos das imagens do radar, foram submetidos a um tratamento estatístico com base em distribuição de frequência, medidas de posição e dispersão, ajustamento à linha reta e análise de regressão. Para utilização do programa PEVva, foi determinada a moda do tempo de duração das chuvas e obtidos os valores referentes à altura da precipitação, em milímetros.

Os gráficos plotados consideraram a moda do tempo de chuva e a vazão defasada do rio Mundaú. Este parâmetro foi conseguido considerando-se o tempo de concentração da Bacia, estimado em 24 horas. As hidrógrafas foram traçadas utilizando-se o valor das vazões mensais em tabelas e plotando os gráficos em planilha eletrônica.

#### 3.4.1 Moda estatística

A moda de um conjunto de números é o valor que ocorre com maior frequência, ou seja, o valor mais comum. A moda de um conjunto de números pode não existir e, mesmo que exista, pode não ser única.

A moda pode ser estimada através da seguinte fórmula:

$$X_m = \bar{X} - 3(\bar{X} - X_c)$$

#### 3.4.2 Disdrômetro

O disdrômetro utilizado é um equipamento que transforma o impulso vertical de uma gota de chuva em um pulso elétrico cuja amplitude é função do tamanho da gota para, assim, obter amostras estatisticamente representativas das gotas de chuva de uma região. Utilizou-se um Joss-Waldvogel RD-69, conforme a Figura 8, composto por um transdutor eletromecânico, uma unidade de amplificação e filtragem de ruídos, unidade conversora analógico-digital ADA-90 e unidade de armazenamento de dados.

Da série histórica disponível no SIRMAL (2003 a 2006) referente ao tempo de duração das chuvas foram estudados três casos onde se pode observa a ação da precipitação

medida com radar sobre a vazão do Rio Mundaú. Estes casos ocorreram entre os anos de 2004 e 2006.

**Figura 8 – Modelo de disdrômetro utilizado na pesquisa**



Fonte: Moraes (2001).

A Figura 8 mostra o disdrômetro utilizado na pesquisa. O Transdutor, responsável por transformar o impulso mecânico da gota que chega ao sensor em pulso elétrico, onde a amplitude do mesmo é proporcional ao impulso mecânico. Ainda a Figura 8 ilustra o processador que elimina sinais indesejáveis devido a ruídos acústicos mostra o processador ADA-90. Todos esses equipamentos são conectados a um computador pessoal.

### 3.4.3 Radar

O radar utilizado nesta pesquisa foi um banda C WR-110-5/EEC do Sistema de Radar Meteorológico de Alagoas (SIRMAL), pertencente à Universidade Federal de Alagoas (UFAL) e montado em um prédio de 7 andares, conforme Figura 9, cujas coordenadas estão descritas no Quadro 1. As características técnicas do radar WR-110-5/EEC estão listadas no Quadro 2.

Este equipamento foi modernizado ao ser integrado ao sistema de armazenamento de dados SASSANDRA, desenvolvido pelo Laboratório de Aerologia da Universidade Paul Sabatier- França. Posteriormente foram desenvolvidos outros programas, pela equipe do Radar. A estrutura do radar banda C do SIRMAL compõe-se das seguintes unidades: domo, montagem e antena; transceptor de microondas; painel de controle e visualização PPI e RHI; sistema digitalizador de imagens (SASSANDRA), Figura 10; PC e unidade de armazenamento e conexão. Na Figura 11 está representado um esquema das unidades do SIRMAL.

Com a digitalização das imagens do Radar foi possível desenvolver um monitoramento mais eficiente da precipitação sobre Alagoas. As imagens captadas pelo radar

foram digitalizadas pelo programa SASSANDRA e, depois, formatadas pelos programas Radar e Radarauto. Estes arquivos, na área de cobertura de 130 km, é que serão processados pelo programa PEVva, isto devido a proporcionar uma melhor visualização da BHM. As figuras 12,13,14 e 15 mostram as imagens nas áreas de cobertura de 30, 130, 250 e 380 km.

**Figura 9 – Sistema de radar meteorológico de Alagoas**



Fonte: Barros (2011).

**Tabela 3 – Coordenadas Geográficas do SIRMAL**

Coordenadas Geográficas do SIRMAL	
Latitude	09°33'04,8" Sul
Longitude	35°46'14,8" Oeste
Altura acima do nível do mar	
100 m	

Fonte: SIRMAL (2014).



**Tabela 4 - Características técnicas do radar WR-110-5/EEC**

Característica	Valor
Energia de alimentação	120V ~18%, monofásica
Consumo de energia	2500W (máximo)
Comprimento de onda ( $\lambda$ )	5,4 cm
Sinal Mínimo Detectável	-105 dBm
Frequência de emissão	5,6 GHz
Potência máxima	250 kW
Recorrência de impulsão	250 Hz
Largura de impulsão	2 $\mu$ s
Diâmetro da antena	2,5 m
Ângulo de abertura	2°

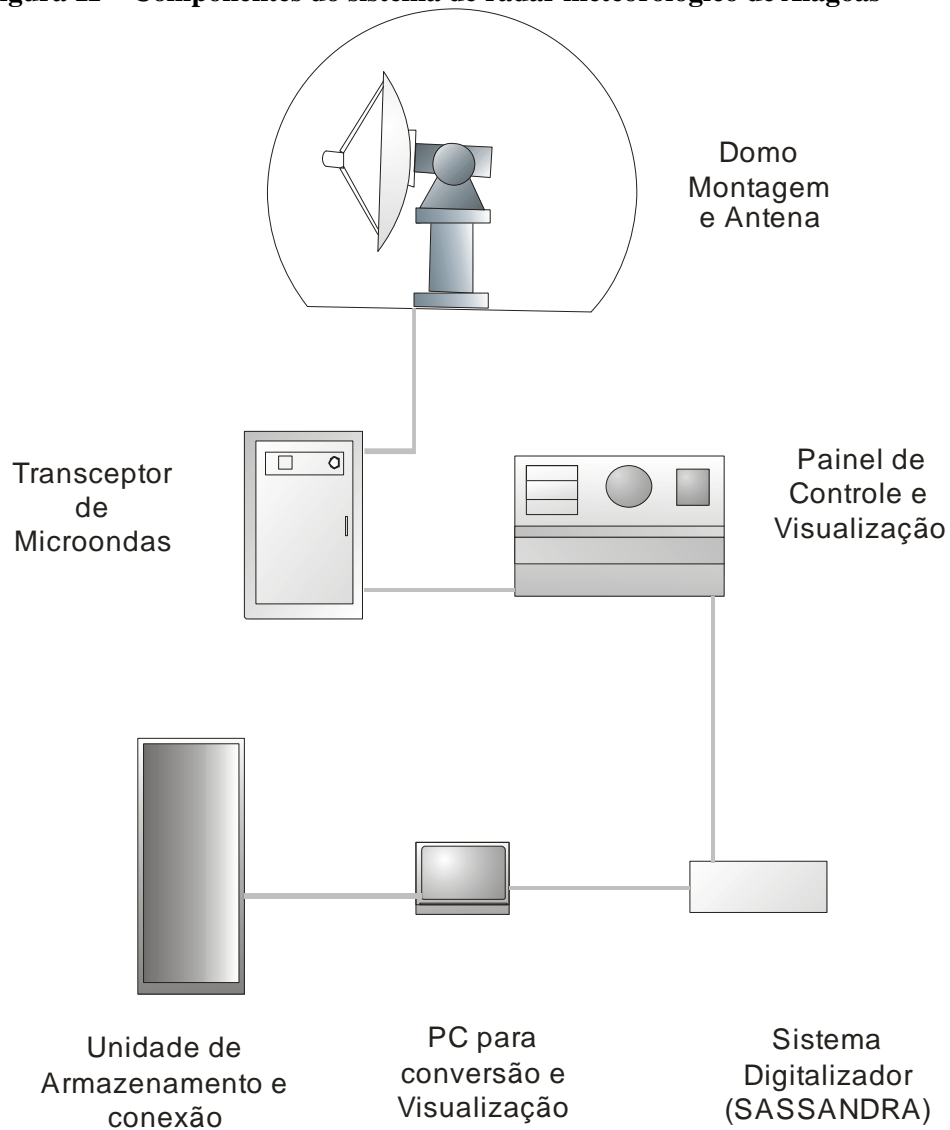
Fonte: SIRMAL (2014).

**Figura 10 – Painel de controle e visualização analógica do sinal do radar. À esquerda, em baixo, módulo de digitalização do SASSANDRA**



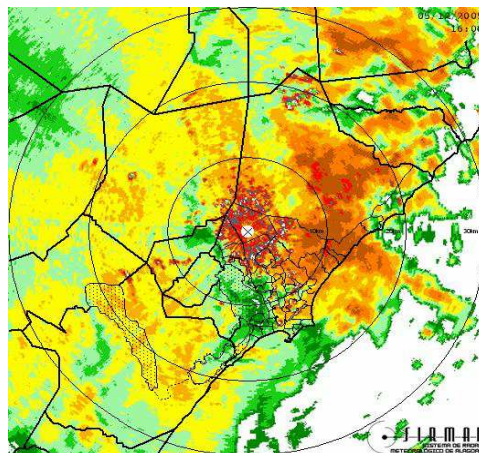
Fonte: Barros (2011).

**Figura 11 – Componentes do sistema de radar meteorológico de Alagoas**



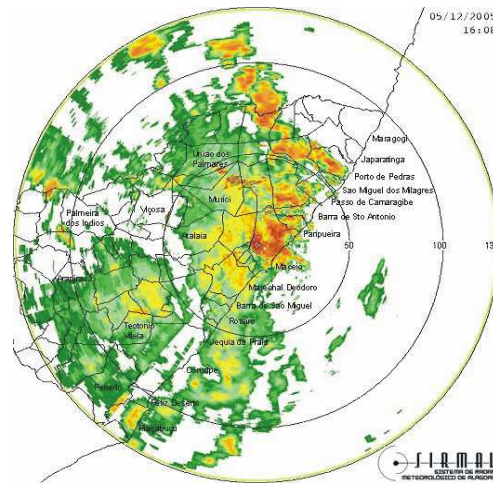
Fonte: Barros (2011)

**Figura 12 – Imagem do radar do SIRMAL. Área de cobertura 30km**



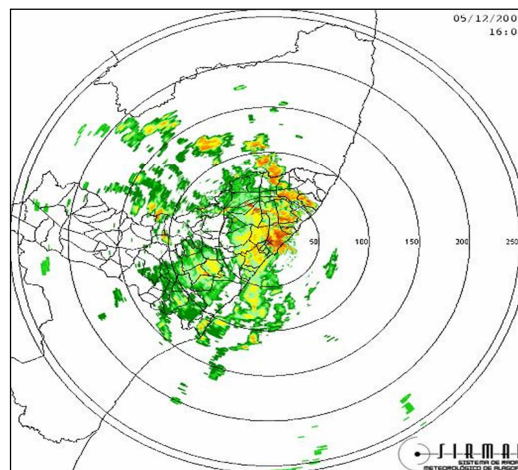
Fonte: SIRMAL (2014).

**Figura 13 – Imagem do radar do SIRMAL. Área de cobertura 130 km.**



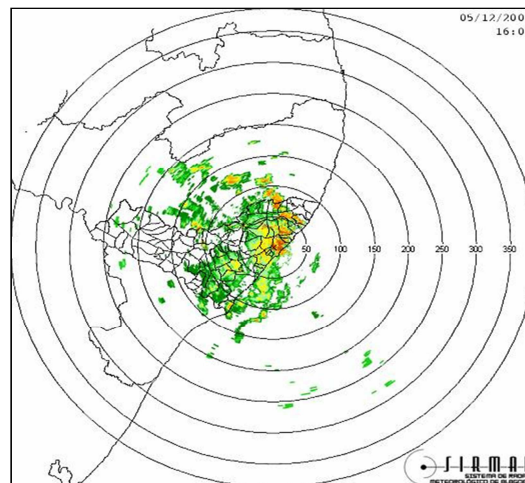
Fonte: SIRMAL (2014).

**Figura 14 - Imagem do radar do SIRMAL. Área de cobertura 250 km.**



Fonte: SIRMAL (2014)

**Figura 15 – Imagem do radar do SIRMAL. Área de cobertura 380 km.**



Fonte: SIRMAL (2014).

### 3.4.4 Estação hidrológica da Fazenda Boa Fortuna

Conforme a ANA (Agência Nacional de Águas) no Inventário das Estações Fluviométricas (2009) a Estação Hidrológica da Fazenda Boa Fortuna, localiza-se no município de Rio Largo, sendo uma estação com codificação no curso d'água, provida de escalas para medições do nível da água, de medições de descargas líquidas e sólidas, de qualidade da água e telemetria. A Figura 16 mostra a estação localizada às margens do rio Mundaú.

**Tabela 5 – Dados da estação hidrológica da Fazenda Boa Fortuna, Rio Largo, Alagoas**

Nome	Fazenda Boa Fortuna
Código Fluviométrico	39770000
Código Pluviométrico	935056
Bacia	Atlântico – Norte Nordeste
Sub-Bacias	39 – Rios Capibaribe, Mundaú,
Latitude	9° 29' 1,99" S
Longitude	35° 31' 34,99" O
Rio	Mundaú
Município	Rio Largo
Tipo de transmissão	Telemétrica
Tipo de dado coletado	Hidrológico
Id Satelital	32630
Intervalo de coleta	60 s
Intervalo de Transmissão	60 s
Origem	ANA/INPE
Operadora	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
Responsável	ANA / DNAEE - ANEEL

Fonte: Brasil (2009)

**Figura 16 – Estação Hidrológica da Fazenda Boa Fortuna no Rio Mundaú, município de Rio Largo**



Fonte: Barros (2011)

### 3.4.5 O Programa PEVva – Programa para Estimativa de Vazão, Verificação e Análise

Utiliza-se nesta pesquisa o programa PEVva concebido por Barros (2011), o qual visa correlacionar a refletividade do radar com a vazão da Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú.

Partindo do volume precipitado acumulado em um dia, o PEVva determina a altura da precipitação pluviométrica em toda extensão da Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú. Utilizando dados diários o programa faz uma correlação entre medida da vazão com uma defasagem de 24 horas e altura pluviométrica calculada com radar em imagem com alcance de 30 km. A defasagem de 24 horas foi assumida em função do tempo de retenção da BHM.

Construído na linguagem Object Pascal, o programa consta de dois algoritmos: o primeiro identifica as cores na imagem do radar e o segundo algoritmo transforma a refletividade de cada pixel em taxa de chuva.

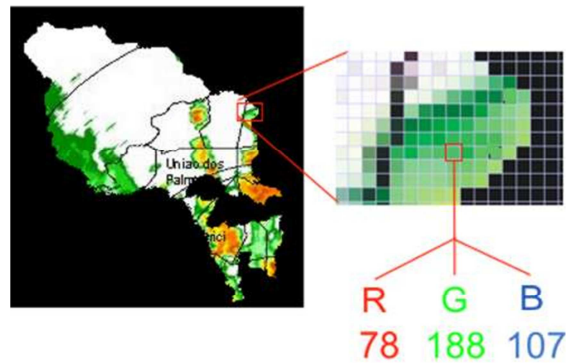
A partir dos canais R (vermelho), G (verde) e B (azul) foi elaborado um código para identificação da cor de um pixel da imagem do radar cuja escala possui 11 cores que, variando do vermelho ao azul, faz a leitura da imagem do sinal do radar em .jpg através do seu respectivo algoritmo, conforme Figura 17.

**Tabela 6 – Valores dos canais de cor e o fator de refletividade associado**

Refletividade dBZ	Cor	R		G		B	
		Min	Max	Min	Max	Min	Max
15	Verde escuro	0	54	80	154	0	65
20	Verde	10	86	144	229	0	89
25	Verde claro	140	210	231	255	142	209
30	Amarelo	215	255	222	255	0	141
35	Laranja	190	255	151	208	0	117
40	Laranja escuro	192	255	100	155	0	98
45	Marrom	126	219	66	123	0	65
50	Vermelho	137	255	0	51	0	52

Fonte: Barros (2011).

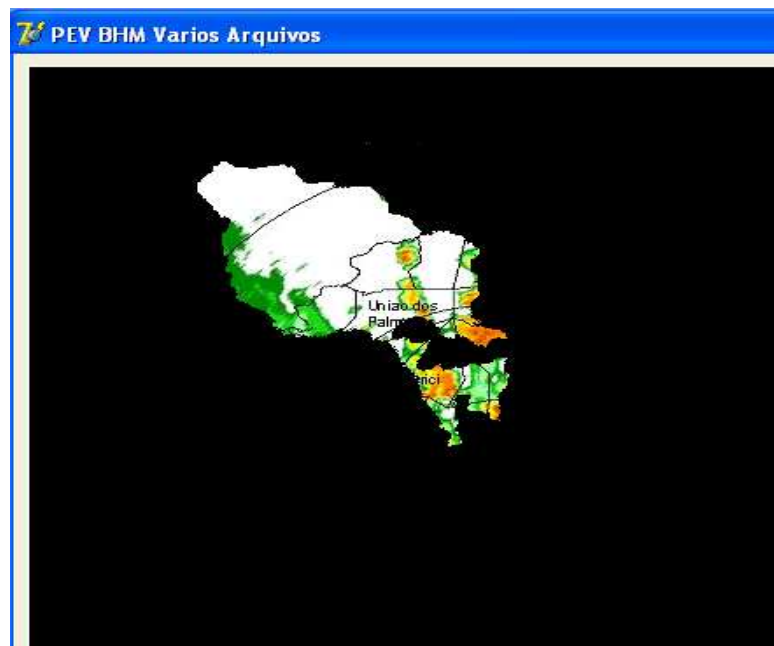
**Figura 17 - Leitura dos pixels e identificação das cores**



Fonte: Barros (2011).

Com a finalidade de excluir os ruídos de fundo (ground-clutters) do radar e definir com transparência a BHM, foi construída uma máscara em fundo preto conforme se pode ver na Figura 18.

**Figura 18 - Máscara sobreposta à imagem do radar na BHM**



Fonte: Barros (2011).

O segundo algoritmo tem a função de converter a refletividade em cada pixel em taxa de precipitação pluviométrica, com entrada para os parâmetros  $a$  e  $b$  da equação  $Z = aR^b$ . A relação Z-R adotada foi  $Z = 176,5 R^{1,29}$  (MORAES, 2003), calculada para a área de estudo.

Este código transforma o valor da refletividade em taxa de precipitação sendo que os valores  $a$  e  $b$  podem ser alterados objetivando testar outras relações Z-R.

Uma vez determinada a intensidade da chuva, o algoritmo calcula a altura pluviométrica (H) em cada pixel para um intervalo de tempo de chuva pré-estabelecido. Nesta pesquisa foi determinada a moda estatística como intervalo de tempo. Anteriormente Moraes (2012), utilizou dados do disdrômetro do SIRMAL dos anos de 2003 a 2006 e considerou como critério de escolha dos eventos de chuva a duração contínua e superior a 5 minutos. Para o cálculo da moda utilizada no presente trabalho a mesma série de chuvas e critério semelhante para a duração de eventos de chuva.

#### 3.4.6 Análise das séries disdrométricas

Os eventos de chuva ocorridos entre os anos de 2003 a 2006 foram mensurados pelo disdrômetro Joss-Valdovogel RD-69 do SIRMAL. Da análise de tais eventos foi obtido o tempo modal de duração das chuvas o qual foi utilizado no programa PEVva.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Tabelas 3, 4 e 5 apresentadas adiante mostram registros da precipitação e da vazão. A precipitação foi obtida através de imagens do radar com varredura em PPI – Plan Position Indicator e a vazão na estação fluviométrica localizada na Fazenda Boa Fortuna (FBF), município de Rio Largo, operada pela ANA – Agência Nacional de Águas. Na primeira coluna está indicado o dia; a segunda coluna (H) indica a altura pluviométrica obtida pelo programa PEVva utilizando a moda de duração das chuvas; a terceira coluna apresenta a vazão registrada na Fazenda Boa Fortuna – FBF no município de Rio Largo; na quarta coluna está a vazão defasada em 24 horas em virtude do tempo de retenção da BHM constante que se está assumindo.

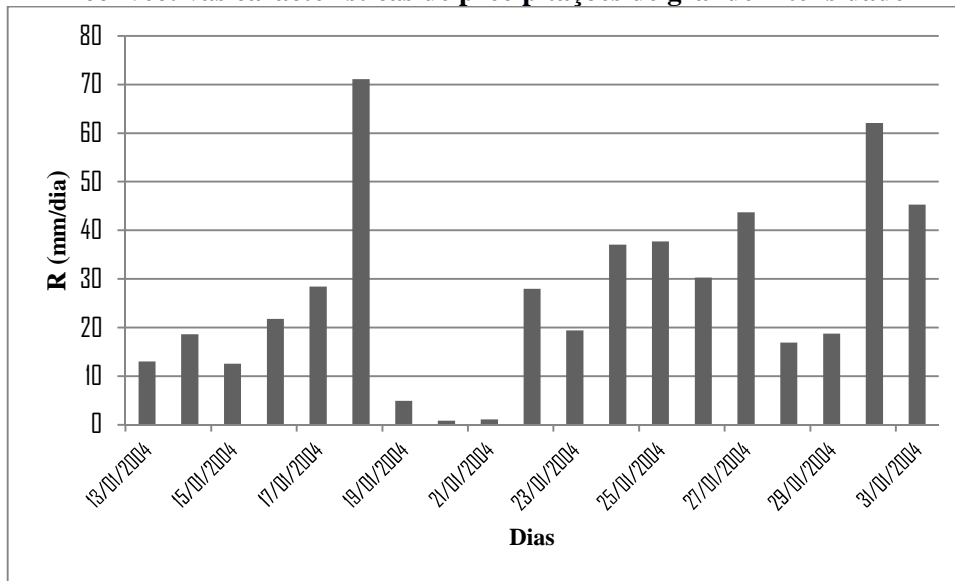
### ✓ Mês de janeiro de 2004

O mês de janeiro foi marcado por fortes chuvas devido à presença de um VCAN situado sobre o litoral da Bahia, a partir da segunda semana do mês. Tal sistema precipitante provocou nebulosidade em todo o Nordeste do Brasil – NEB e estava associado à Alta da Bolívia – AB, posicionada sobre a parte central da América do Sul e a uma Frente Fria, localizada no litoral do Sudeste brasileiro. A intensa precipitação não atingiu todo o estado de Alagoas, mas principalmente a faixa costeira do litoral norte e parte da Zona da Mata.

Esses eventos precipitantes foram registrados na estação fluviométrica da Fazenda Boa Fortuna e no SIRMAL através de imagens de radar feitas em PPI e no disdrômetro. O hietograma da Figura 19 mostra a predominância de chuvas convectivas. Para qualificar as chuvas em convectivas e estratiformes, utilizou-se a classificação de Nzeukouet al. (2004) que considera convectivas as chuvas cuja taxa de precipitação  $R$  é maior ou igual a  $10\text{mm/h}^{-1}$  e chuvas estratiformes menor ou igual a  $10\text{mm/h}^{-1}$ .



**Figura 19 – Hietograma do mês de janeiro de 2004. Observa-se a predominância de chuvas convectivas características de precipitações de grande intensidade**



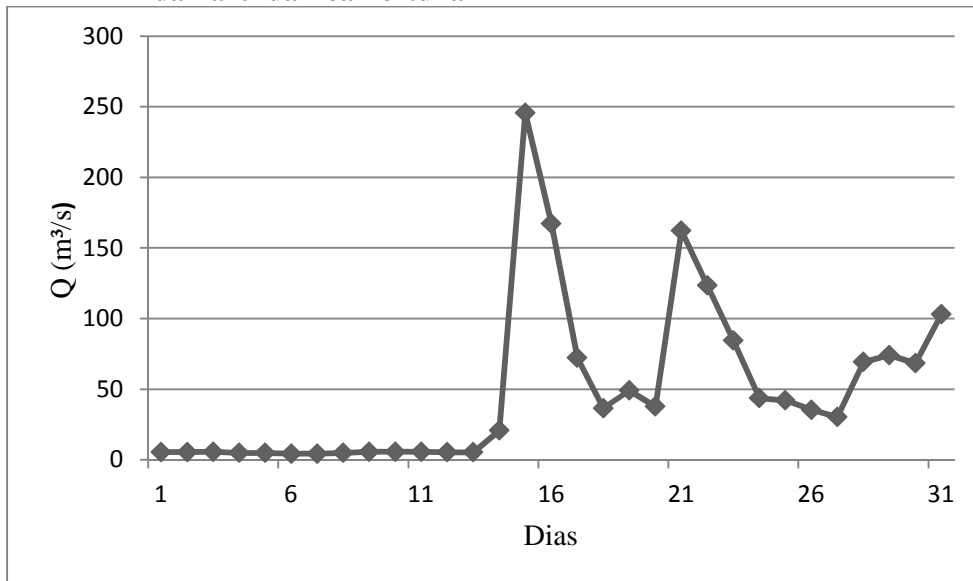
Fonte: Autor (2014).

**Tabela 7 – Série de dados referentes à altura pluviométrica obtida pelo processamento de imagens do radar e vazões registradas pela ANA para mês de janeiro de 2004**

Dias	H(mm)	Q (m <sup>3</sup> /s)	Q(Def.)24h
1	0,17405	5,48	5,48
2	0,17706	5,48	5,68
3	0,18322	5,68	4,89
4	0,18340	4,89	4,89
5	0,18826	4,89	4,32
6	1,02406	4,32	4,32
7	0,93113	4,32	4,89
8	0,28340	4,89	5,68
9	0,30305	5,68	5,68
10	0,17924	5,68	5,68
11	0,57415	5,68	5,28
12	5,11571	5,28	5,28
13	2,60090	5,28	20,75
14	8,00338	20,75	245,7
15	5,08619	245,7	167,14
16	0,46282	167,14	72,16
17	1,23338	72,16	36,54
18	4,48445	36,54	49,04
19	4,14122	49,04	37,69
20	4,68849	37,69	162,29
21	1,87365	162,29	123,39
22	0,90533	123,39	84,55
23	0,88141	84,55	43,65
24	0,87743	43,65	42,03
25	0,75724	42,03	35,39
26	1,09641	35,39	30,22
27	2,0709	30,22	69,29
28	2,08508	69,29	74,1
29	1,45006	74,1	68,34
30	1,72276	68,34	102,97
31	1,61342	102,97	

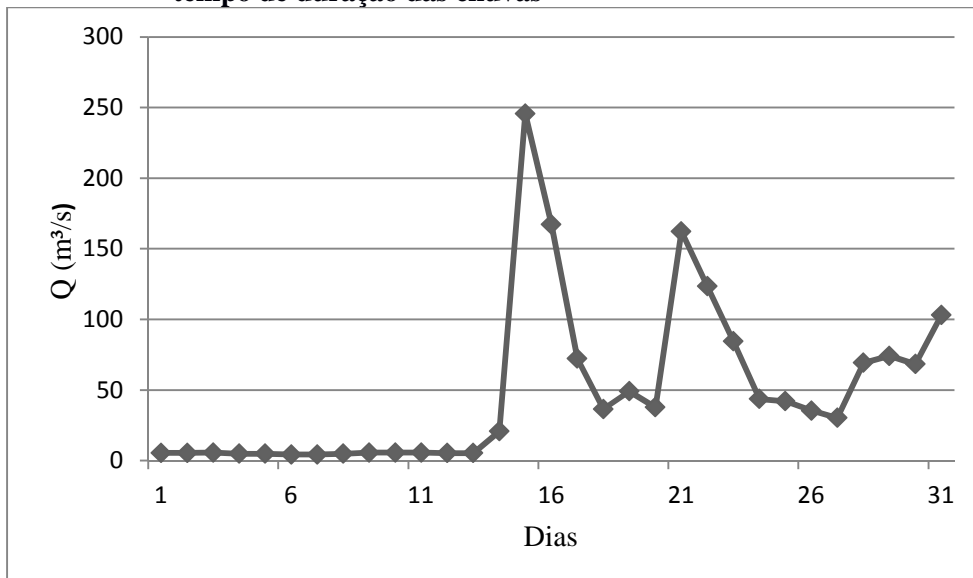
Fonte: Agência Nacional de Águas (2014).

**Figura 20 – Hidrógrafa do Rio Mundaú para o mês de janeiro de 2004 na Estação Fluviométrica da Fazenda Boa Fortuna**



Fonte: Autor (2014).

**Figura 21 – Altura pluviométrica obtida através do processamento de imagens do radar do SIRMAL para o mês de janeiro/2004 usando o Programa PEVva e a moda do tempo de duração das chuvas**

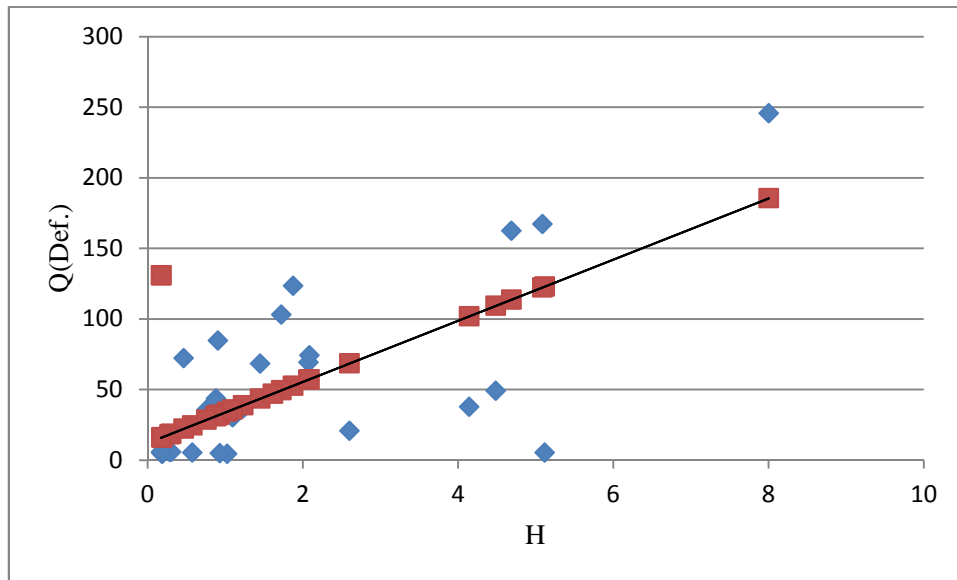


Fonte: Autor (2014).

Analisando a hidrógrafa (Figura 20) observam-se picos de vazão para o Rio Mundaú nos dias 15 e 21, na ordem de 245,7 m³/s e 162,3 m³/s respectivamente, enquanto que o gráfico correspondente à altura pluviométrica ( Figura 21 ), mensurada a partir de imagens do radar, assinala valores máximos para os dias 12, 14 e 20, com alturas de 5,1mm, 8,0mm e

4,6mm. Ressalte-se que a altura pluviométrica corresponde a altura de uma lâmina d'água sobre toda a área considerada da Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú – BHM.

**Figura 22 – Gráfico expressando a relação entre vazão defasada (QDef) e altura pluviométrica (H) para o mês de janeiro de 2004 na Fazenda Boa Fortuna**



Fonte: Autor (2014).

A relação entre Q(def) e H apresentou os seguintes resultados:

Relação  $Q_{def} = A + B \cdot H$ .

Valores de  $A = 21,6538$ ;  $B = 12,1227$  e  $R = 0,716$

Equação da reta:  $Y = 21,654 + 12,123$

O valor  $R = 0,716$ , obtido pela técnica de ajustamento à linha reta, aponta para uma presumível correlação e para uma estimativa provável para determinar Q a partir de H.

Os dados disdrométricos expressos no gráfico da Fig. 22, mostram o comportamento das precipitações ocorridas no mês de janeiro de 2004 e o consequente aumento da vazão do Rio Mundaú. A partir do dia 13 a vazão se intensifica e atinge o máximo no dia 18 quando há um incremento de cerca de 12 vezes o valor alcançado no dia 14; daí, alcança o valor de  $30,22 \text{ m}^3/\text{s}$  no dia 27 e depois chega a  $102,97 \text{ m}^3/\text{s}$  no dia 31.

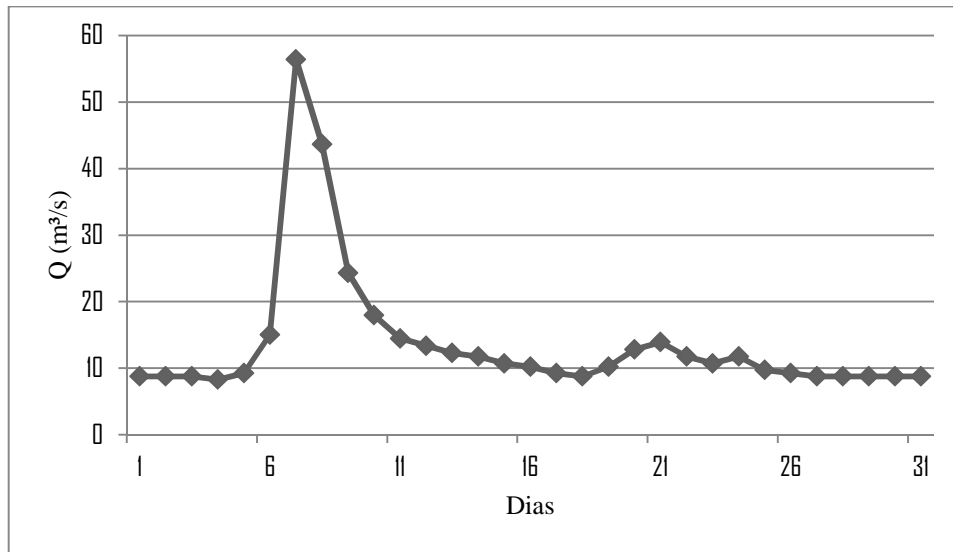
## ✓ Mês de dezembro de 2005

**Tabela 8 – Série de alturas pluviométricas obtidas pelo processamento de imagens do radar, utilizando a moda do tempo de chuva e série de dados de vazão para o mês de dezembro de 2005**

Dias	H	Q	Q Def 24h
	(mm)	(m <sup>3</sup> /s)	(m <sup>3</sup> /s)
1	0,25410	8,77728	8,77728
2	0,19223	8,77728	8,77728
3	0,19775	8,77728	8,30827
4	0,41058	8,30827	9,25491
5	2,00754	9,25491	15,0405
6	2,65099	15,0405	56,4132
7	0,34010	56,4132	43,6479
8	0,21240	43,6479	24,3276
9	0,19217	24,3276	17,9681
10	0,21976	17,9681	14,4763
11	0,19192	14,4763	13,3701
12	0,20512	13,3701	12,294
13	0,20672	12,2940	11,7675
14	0,19953	11,7675	10,7381
15	0,18347	10,7381	10,2355
16	0,18900	10,2355	9,25491
17	0,33098	9,25491	8,77728
18	0,33302	8,77728	10,2355
19	0,93048	10,2355	12,8283
20	0,34274	12,8283	13,9195
21	0,35356	13,9195	11,7675
22	0,37496	11,7675	10,7381
23	0,19851	10,7381	11,7675
24	0,25993	11,7675	9,74102
25	0,20997	9,74102	9,25491
26	0,18581	9,25491	8,77728
27	0,18186	8,77728	8,77728
28	0,19850	8,77728	8,77728
29	0,16455	8,77728	8,77728
30	0,33866	8,77728	8,77728
31	0,26750	8,77728	

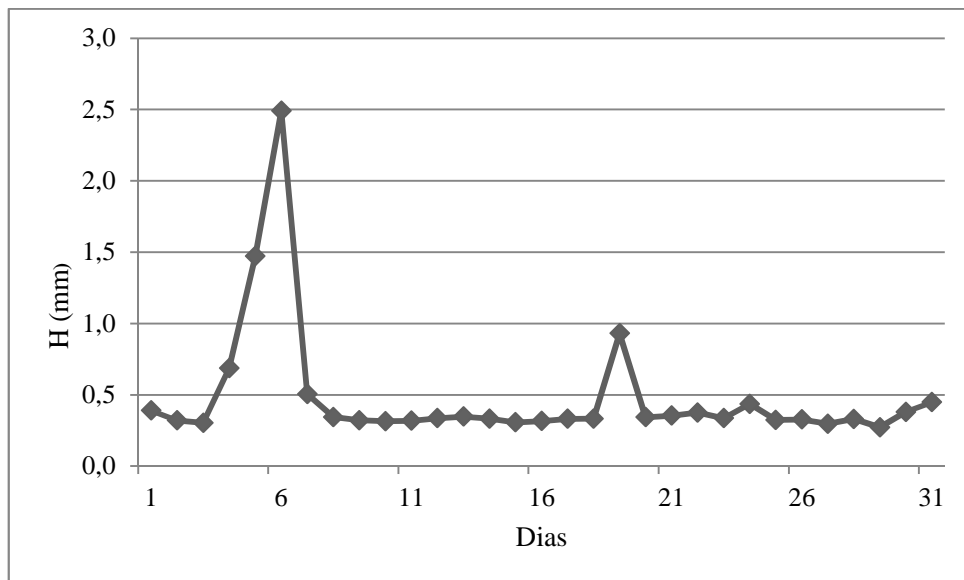
Fonte: Autor (2014)

**Figura 23 – Hidrógrafa do Rio Mundaú na estação fluviométrica da Fazenda Boa Fortuna em dezembro de 2005.**



Fonte: Agência Nacional de Águas.

**Figura 24 - Gráfico da altura pluviométrica no mês de dezembro de 2005 da BHM obtido pelo processamento de imagens do radar do SIRMAL**

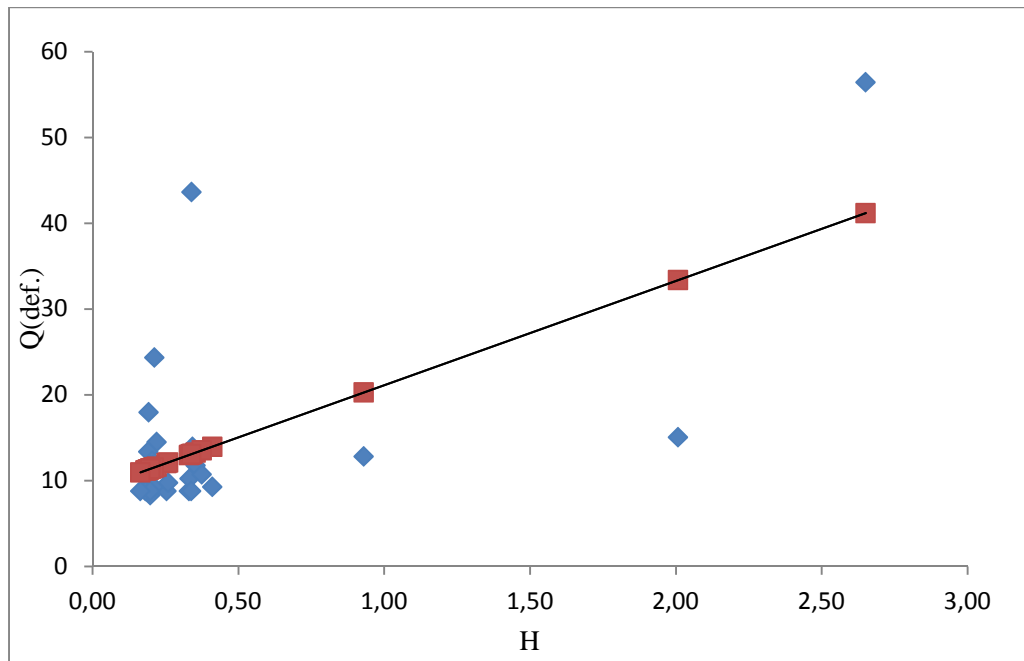


Fonte: Autor (2014).

A hidrógrafa, Figura 23, assinala um pico de precipitação com a respectiva repercussão na vazão, no início do mês, da ordem de 6,7 vezes dos valores que o

antecederam, devido a chuvas de intensidade moderada que incidiram sobre a Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú, possivelmente devido à atuação de POA's – Perturbações Ondulatórias dos Alíseos, provocando a variação de vazão. A Figura 24 mostra a correspondência do pico de vazão com a altura pluviométrica medida com radar.

**Figura 25 - Ajustamento à linha reta da vazão defasada (QDef.) e altura pluviométrica (H) no mês de dezembro de 2005 na BHM.**



Fonte: Autor (2014).

O ajustamento à linha reta entre vazão defasada em 24 horas e altura pluviométrica para o mês de dezembro de 2005 apresentou os seguintes resultados (Fig 25):

$$Q_{def.} = A + B \cdot H$$

$$A = 8,9514$$

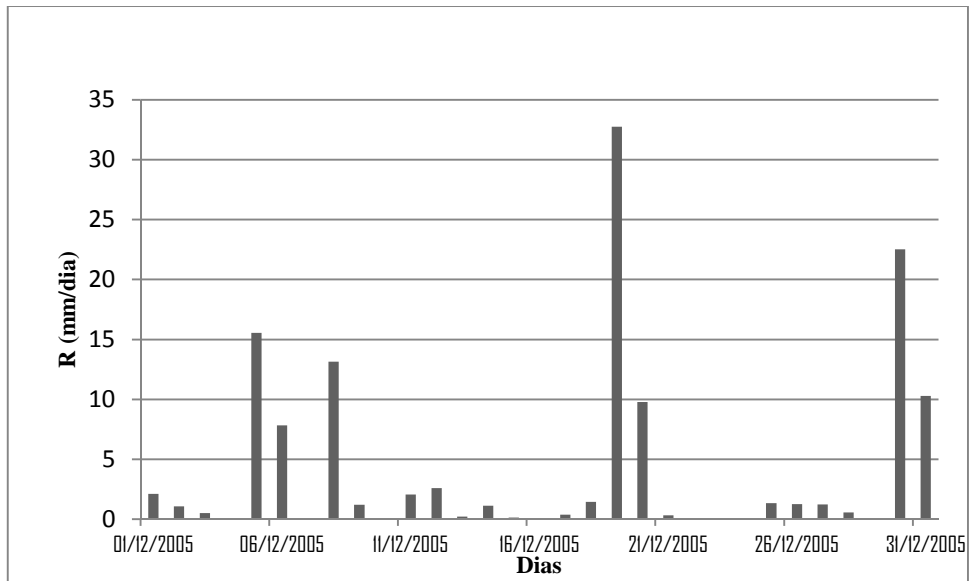
$$B = 12,158$$

$$R = 0,633$$

$$\text{Equação da reta: } Y = 12,158x + 8,9514$$

Observa-se o índice R correspondente a uma resposta da vazão aos picos de precipitação. O hietograma (Fig.26) mostra o predomínio de chuvas estratiformes o que sugere a incidência de precipitação de intensidade moderada sobre a BHM.

**Figura 26 – Hietograma obtido com disdrômetro para o mês de dezembro de 2005 na BHM. Observa-se o predomínio de chuvas estratiformes**



Fonte: Autor (2014).



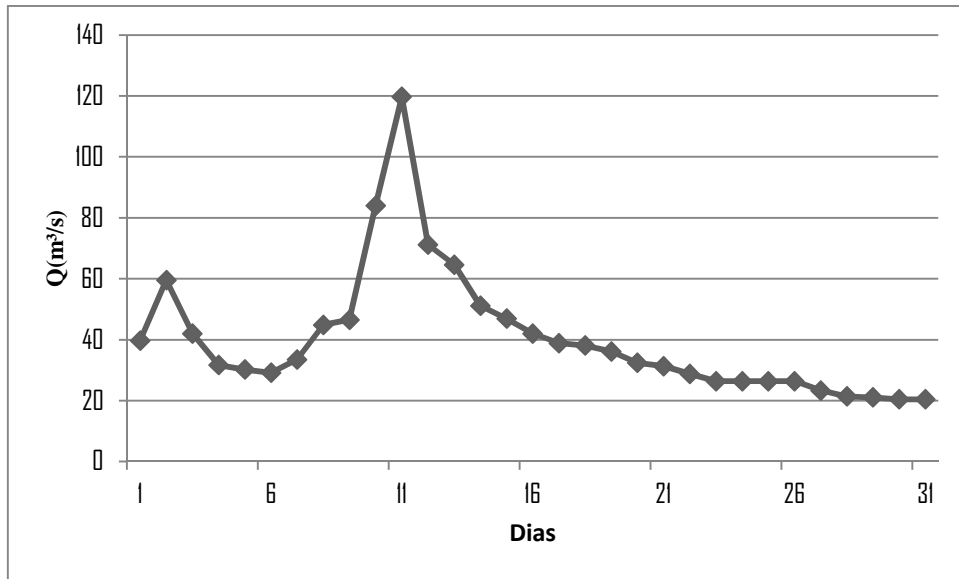
## ✓ Mês de agosto de 2006

**Tabela 9 - Altura pluviométrica medida com a moda de duração das chuvas pelo processamento de imagens do radar**

Dias	H(mm)	Q (m <sup>3</sup> /s)	Q(Def.)m <sup>3</sup> /s
1	0,18768	39,64	59,55
2	0,24385	59,55	42,03
3	0,2224	42,03	31,67
4	0,23578	31,67	30,22
5	0,5631	30,22	29,15
6	0,30407	29,15	33,52
7	0,39765	33,52	44,87
8	0,22957	44,87	46,53
9	0,30867	46,53	84,04
10	0,38049	84,04	119,71
11	0,26885	119,71	71,2
12	0,31222	71,2	64,59
13	0,26485	64,59	51,17
14	0,25596	51,17	46,94
15	0,23592	46,94	42,03
16	0,2319	42,03	38,86
18	0,24031	38,08	36,15
19	0,18426	36,15	32,4
20	0,18372	32,4	31,31
21	0,17350	31,31	28,8
22	0,18437	28,8	26,36
23	0,28249	26,36	26,36
24	0,21328	26,36	26,36
25	0,41455	26,36	26,36
26	0,32005	26,36	23,33
27	0,30792	23,33	21,39
28	0,19065	21,39	21,07
29	0,23876	21,07	20,43
30	0,16956	20,43	20,43
31	0,32363	20,43	

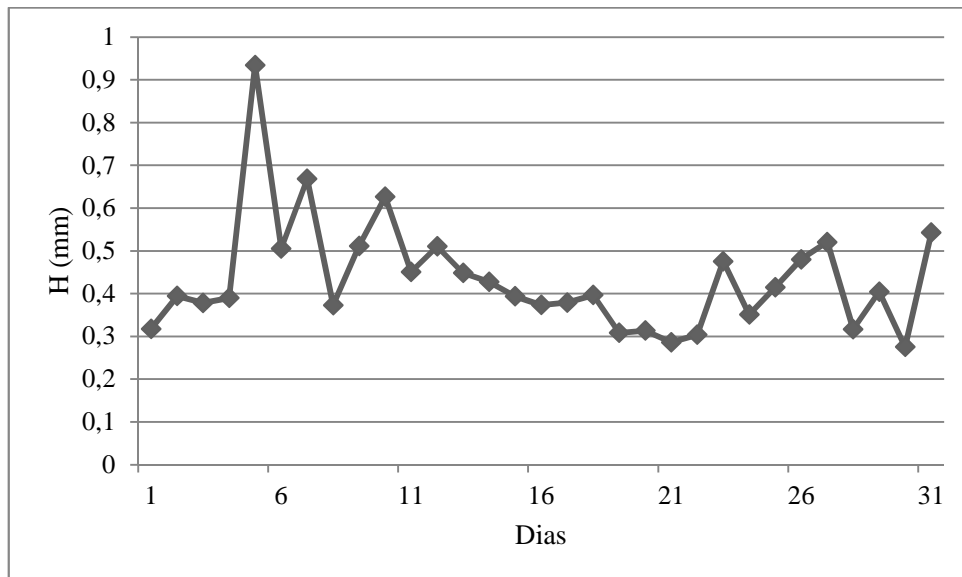
Fonte: Autor (2014).

**Figura 27 – Hidrógrafa do Rio Mundaú obtida com dados da ANA na estação fluviométrica da Fazenda Boa Fortuna. Mês de agosto de 2006**



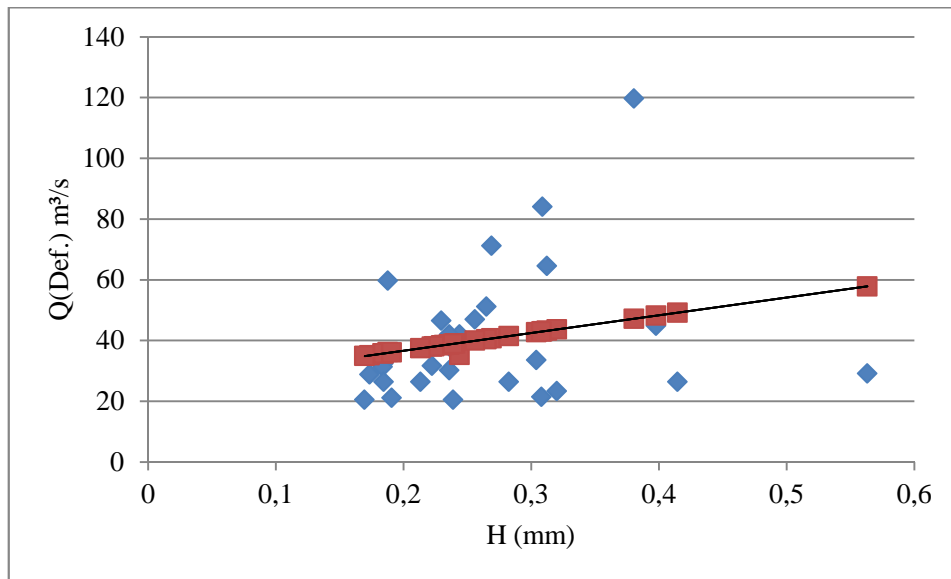
Fonte: Autor (2014)

**Figura 28 – Gráfico da altura pluviométrica obtida pelo processamento de imagens do radar do SIRMAL utilizando a moda do tempo de duração das chuvas. Agosto de 2006.**



Fonte: Autor (2014)

**Figura 29 – Representação gráfica do ajustamento à linha reta entre vazão defasada (QDef.) e altura pluviométrica (H). Mês de agosto de 2006**



Fonte: Autor (2014).

A grande variação de vazão medida na FBF entre os dias 9, 10 e 11, não implicou numa variação correspondente observada na altura pluviométrica, conforme se constata analisando a Tabela 5 e a Figura 28. Avaliando as imagens do radar para o mês em tela, conclui-se pela inexistência de registros de chuvas com intensidades que causasse o acréscimo de vazão observado. No entanto, são uma constante as chuvas originadas da brisa marinha e também dos ventos alíseos, fenômeno típico da época de inverno para a BHM (BARROS, 2011). Outro fenômeno que pode ser observado é o nível mínimo de vazão para o mês – cerca de 20 m³/s (Tabela 5) sugerindo que a BHM apresentava-se saturada e que, portanto, parte significativa da chuva provocou escoamento superficial elevando a vazão.

O ajustamento à linha reta entre altura pluviométrica e vazão sugere um estudo mais detalhado segundo se observa no valor do índice R obtido, conforme verifica-se na Fig. 29.

$$Q_{def} = A + B \cdot H$$

$$A = 58,209$$

$$B = 25,035$$

$$R = 0,230$$

$$\text{Equação da linha reta: } Y = 58,209x + 25,035$$

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O objetivo desta pesquisa foi o de utilizar uma metodologia que correlaciona a vazão da Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú (BHM) com a altura da precipitação pluviométrica, visando com isto obter uma correspondência entre picos de vazão e elevação da altura pluviométrica medida com radar. Esta metodologia poderá, desde que aperfeiçoada, ser utilizada para ajudar a sociedade no que se refere à prevenção de eventos de cheias.

Empregou-se o Programa de Estimativa de Vazão, Verificação e Análise e o tempo de 9 min., pré-estabelecido para o cálculo do volume de chuvas. Este tempo foi calculado pela moda estatística. Os meses analisados foram janeiro de 2004, dezembro de 2005 e agosto de 2006, meses em que foi verificada uma resposta mais acentuada da vazão do Rio Mundaú à picos de precipitação medidos com radar.

Apesar dos resultados encontrados numericamente, é possível observar uma relação direta entre picos de vazão na BHM e altura pluviométrica obtida com radar.

A análise da vazão foi realizada utilizando-se as hidrógrafas da Fazenda Boa Fortuna (FBF), onde se encontra uma Estação Fluviométrica do Rio Mundaú sob a responsabilidade da Agência Nacional de Águas (ANA). A altura pluviométrica foi obtida através do radar. Empregando-se um disdrômetro calculou-se o tempo de duração das chuvas, de onde se extraiu a moda estatística.

Observando-se os meses referidos verifica-se que o tempo de concentração do rio Mundaú até a FBF é de cerca de um dia. No entanto, a distribuição espacial e temporal das chuvas pode alterar este parâmetro.

Foi utilizada a técnica de ajustamento à linha reta para analisar a correlação R entre altura pluviométrica e vazão defasada. Para os meses estudados R variou de 0,230 a 0,716 sendo que no primeiro caso a correlação da altura pluviométrica com a vazão precisa ser mais bem estudada. Apesar dos diferentes níveis de correlação, os picos de vazão apontam para uma possível correlação entre H e Q.

Para os meses pesquisados, o maior valor de vazão e maior altura pluviométrica referem-se ao mês de janeiro de 2004 – 245,7(m<sup>3</sup>/s) e 8,0 mm respectivamente, não obstante ser um mês de verão.

Como pesquisa futura, sugere-se a possibilidade de redução do lapso de tempo do radar na leitura da altura pluviométrica, o que ensejaria um estudo mais acurado da relação chuva/vazão. Outra possibilidade de pesquisa refere-se à implementação do programa PEVva

em diversos pontos de uma bacia hidrográfica para previsão de vazão, o que serviria para comparação de resultados com o presente trabalho.

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Inventário das estações fluviométricas**. 2. ed. Brasília, DF, 2009. 196 p.
- BARROS, A. A. S. **Correlação entre o fator de refletividade do radar e a vazão do Rio Mundaú**. 2011, 108 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2011.
- BERNARDO, S. O. **Clima e suas anomalias para a cidade de Maceió**. 1999. 122 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Física) - Departamento de Física, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 1999.
- BRANDES, E.A. Optimizing rainfall estimates with the aid of radar. **Journal of Applied Meteorology**, Boston, v. 14, n. 7, p. 1339-1345, 1975.
- CALHEIROS, R. V.; ANTÔNIO, M. de A. **Aplicação do radar de Bauru para fins hidrológicos**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 10., 1979, Manaus. **Anais...** Rio de Janeiro: ABESA, 1979.
- CARVALHO, G. S. **Estudo sobre a potencialidade dos recursos hídricos das bacias hidrográficas do Rio Mundaú-AL**. Maceió: [s.n.], 2002.
- FERREIRA, J. T. P. **Vale do Mundaú agrícola**. Disponível em <<http://valedomundauagricola.blogspot.com.br>> .Acesso em: 5 maio 2014.
- FRANK, N. L. **The weather distribution with upper tropospheric cold lows in tropics**. Washington: Environmental Science Services Administration, Dep. of Commerce, Weather Bureau Southern Region, Scientific Services Division, 1966. (Technical Memorandum n. 28).
- FRAGOSO JÚNIOR., C. R.; PEDROSA, V. D. A.; SOUZA, V. C. B. D. Reflexões sobre a cheia de junho de 2010 nas bacias do rio Mundaú e Paraíba. In: SIMPÓSIO REGIONAL BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 10, 2010, Fortaleza. [**Anais...**]. Fortaleza: ABRH, 2010. Disponível em: <http://www.ctec.ufal.br/professor/vap/Cheia2010.pdf>. Acesso em: 21 jun. 2014.
- GAN, M. A.; KOUSKY, V. E. Vórtices ciclônicos da alta troposfera no oceano atlântico sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 1, p. 19 -28, 1986.
- GOMES, H, B. et al. Estudo dos dados hidrometeorológicos da Bacia do rio Mundaú utilizando métodos estatísticos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 13, 2004, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2004.
- KOUSKY, V. E. Frontal influences on northeast Brazil. **Monthly Weather Review**, Boston, v. 107, n. 9, p. 1140-1153, 1979.
- KOUSKY, V; GAN, M. A. Upper tropospheric cyclonic vortices in the tropical South Atlantic. **Tellus**, New Jersey, v. 33, n. 6, p. 538–551, 1981.

LISBOA, H. M. **Avaliação de estimativa da precipitação por radar meteorológico na previsão de vazões em tempo real para uma bacia urbana.** 1986. 209 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Atmosféricas) – Instituto Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1986.

MOLION, L, C, B. Climatologia da Região Amazônica: mecanismos de precipitação. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v.2, p. 107-117, 1987.

MOLION, L. C. B; BERNARDO, S. O. Revisão da dinâmica de chuvas no nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 17, n.1, p 1-10, 2002.

MORAES, J. C. **Um modelo hidrológico com estimativa de precipitação por satélite.** 1992. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1992.

MORAES, M. C. S. **Parâmetros de radar e distribuição do tamanho de gotas de chuva continental ou marinha no leste do nordeste do Brasil:** sua influência na estimativa da vazão na Bacia do Rio Mundaú. 2011. 125 f. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011.

MORAES, J. C.; OLIVEIRA, M. C. F.; COSTA, M.C. **Regime hidrológico do Rio Mundaú.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 14., 2010, Belém. **Anais eletrônicos...** Belém: SBMET, 2010. Disponível em: <<http://www.cbmet.com/cbm-files/14-eb3243822f130061a0732433d5903734.pdf>>. Acesso em: 16 de mai. 2014.

NZEUKOU, A. et al. Rain size distribution and radar parameters at Cape Verde Rain. **Journal of Applied Meteorology**, Boston, v. 43, p. 90-105, 2004.

OLIVEIRA, A. S. **Interações entre sistemas frontais na América do Sul e a convecção na Amazônia.** 1986. 115 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1986.

OLIVEIRA , D. L.; SOUZA, V. C. B. de; FRAGOSO JÚNIOR, C. R. Análise das precipitações e níveis do evento de junho de 2010 nas bacias dos rios Mundaú e Paraíba, em Alagoas e Pernambuco. In: SIMPÓSIO REGIONAL BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 19, 2011, Maceió. [**Anais...**]. Maceió: ABRH, 2011. Disponível em: [https://www.abrh.org.br/sgcv3/UserFiles/Sumarios/97faa0327eaa16813e37a31e37a98dd4\\_b5f38094a66b399d3d78946813b3f236.pdf](https://www.abrh.org.br/sgcv3/UserFiles/Sumarios/97faa0327eaa16813e37a31e37a98dd4_b5f38094a66b399d3d78946813b3f236.pdf). Acesso em: 14 abr. 2014.

PALMEN, E. Origin and structure of high levels cyclones south of the maximum westerlies. **Tellus**, New Jersey, v. 1, p. 22 -31, 1949.

PALMER, C, E. On high-level cyclones originating in the tropics. **Transactions of the American Geophysics Union**, Los Angeles, v. 32, n. 5, p. 683-696. 1951.

PEREIRA FILHO, A. J. **Uso do radar meteorológico para previsão de chuva a curto prazo aplicado à previsão hidrológica em bacias urbanas.** 1989. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.

QUINTÃO, D. A. **Calibração de sistema de radar meteorológico através de dados disdrométricos dos campos de chuva no nordeste leste do Brasil**. 2004. 104 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2004.

SAUVAGEOT, H. **Radarmeteorology**. Washington: Artech House, 1992.

SILVA, L. A. **A influência do vórtice ciclônico de altos níveis (VCAN) sobre a precipitação do nordeste do Brasil (NEB) e as características associadas**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005.

TENÓRIO, R. S. **Estudo hidrometeorológico da Bacia do Rio Mundaú**. 1985. 62 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 1985.

THIELEN, J.; BOUDEVILLAIN, B.; ANDRIEU, H. A radar data based short-term rainfall prediction model for urban areas: a simulation using meso-scale meteorological modeling. **Journal of Hydrology**, v. 239, n. 1-4, p. 97-114, 2000.

TUCCI, C .E. M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade da UFRGS; ABRH, 1997. (Coleção ABRH de Recursos Hídricos; v.4).

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e climatologia**. 2. ed. Recife, INMET, 2001. Versão Digital 2.

VILLELA, S. M; MATOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo. McGraw Hill do Brasil, 1995. 245 p.

WILSON, J. W. Integration of radar and raingage data for improved rainfall measurement. **Journal of Applied Meteorology**, Boston, v. 9, n. 3, p. 489-497, 1970.