



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

**Nº de Ordem: MET-UFAL-MS-085.**

**CORRELAÇÃO ENTRE O FATOR DE REFLETIVIDADE DO RADAR  
E A VAZÃO DO RIO MUNDAÚ**

**ADRIANO AUBERT SILVA BARROS**

**Maceió – AL  
Fevereiro de 2011.**



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

**CERTIFICADO DE APRESENTAÇÃO**

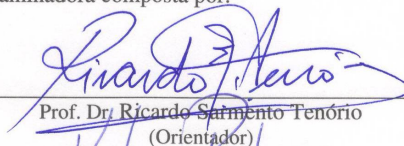
N.º de ordem: MET-UFAL-MS-085.

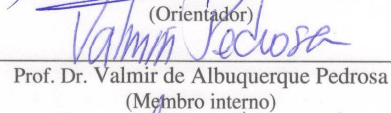
**“CORRELAÇÃO ENTRE O FATOR DE REFLETIVIDADE DO RADAR E A VAZÃO  
DO RIO MUNDAÚ.”**

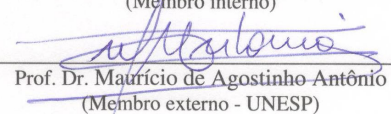
***Adriano Aubert Silva Barros***

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 Fenório  
(Orientador)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Valmir de Albuquerque Pedrosa  
(Membro interno)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Maurício de Agostinho Antônio  
(Membro externo - UNESP)

**Fevereiro /2011**

**ADRIANO AUBERT SILVA BARROS**

**CORRELAÇÃO ENTRE O FATOR DE REFLETIVIDADE DO RADAR  
E A VAZÃO DO RIO MUNDAÚ**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia do Instituto de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Alagoas, para obtenção do título de Mestre em Meteorologia – Área de Concentração Processos de Superfície Terrestre.

**Orientador: Prof. Doutor. Ricardo Sarmiento Tenório**

**Maceió – AL  
Fevereiro de 2011.**

**Catálogo na fonte**  
**Universidade Federal de Alagoas**  
**Biblioteca Central**  
**Divisão de Tratamento Técnico**  
**Bibliotecária Responsável: Helena Cristina Pimentel do Vale**

B277c    Barros, Adriano Aubert Silva.  
          Correlação entre o fator de refletividade do radar e a vazão do rio Mundaú /  
          Adriano Aubert Silva Barros. – 2011.  
          111 f. : il.

          Orientador: Ricardo Sarmento Tenório.  
          Dissertação (mestrado em Meteorologia : Processos de Superfície Terrestre) –  
          Universidade Federal de Alagoas. Instituto de Ciências Atmosféricas. Maceió, 2011.

          Bibliografia: f. 108-111.

          1. Pluviometria 2. Fluviometria. 3. Teledeteção Atmosférica. 4. Rio Mundaú  
          (AL). 5. Chuvas. 6. Vazão. 7. Radar Meteorológico. I. Título.

CDU: 556.12(813.5)

Ao meu Pai Eraldo por minha vida, educação, carinho e amor o que me traz alento e esperança em vencer os desafios que surgem ao longo de minha caminhada. À minha esposa Rosângela, companheira carinhosa e zelosa; Aos meus filhos Isaac, Rafael e Daniel que são o esteio de minha luta. À minha querida Mãe Maria do Carmo (Dona Lourdinha). *in Memoriam*

Dedico.

## AGRADECIMENTOS

A DEUS por ter criado o universo e nos permitir compreendê-lo, porque deu-nos a vida;

A meu orientador, Professor Doutor Ricardo Sarmiento, por sua sabedoria em guiarme em nossa pesquisa com maestria e paciência. Por ser um exemplo e amigo;

Aos professores que compuseram a banca avaliadora deste trabalho, por suas críticas e recomendações sempre para o desenvolvimento e aprimoramento deste;

Aos meus professores de graduação em Física e em Meteorologia, por serem os exemplos que são e pelo incentivo para que prosseguisse com meus estudos;

Aos amigos do CEAAL, Centro de Estudos Astronômicos de Alagoas que sempre estiveram ao meu lado apoiando e me fortalecendo para fazer o melhor;

Aos amigos da turma de mestrado pelos momentos de alegria e companheirismo, em especial, aos colegas do Radar André e Márcia que participaram deste estudo e trouxeram considerações fundamentais ao seu desenvolvimento;

À Secretaria de Estado de Educação por haver concedido minha licença para cursar o Mestrado;

À minha família pelo apoio e motivação.

Agradeço a todos.

## PENSAMENTOS

*"A dúvida é o princípio da sabedoria".*

**(Aristóteles)**

*"O conhecimento é orgulhoso por ter aprendido tanto;  
a sabedoria é humilde por não saber mais."*

**(William Cowper).**

BARROS, Adriano A. S. CORRELAÇÃO ENTRE O FATOR DE REFLETIVIDADE DO RADAR E A VAZÃO DO RIO MUNDAÚ, 2010, 111 páginas. Orientador Dr. Ricardo Tenório Sarmiento. Maceió – AL: ICAT/UFAL Dissertação (Mestrado em Meteorologia) Instituto de Ciências Atmosféricas.

## RESUMO

---

O presente trabalho tem como objetivo identificar uma possível correlação entre o fator de refletividade do sinal do RADAR do Sistema de Radar Meteorológico de Alagoas (SIRMAL), com a vazão do Rio Mundaú, obtida a partir de dados da Estação Hidrológica da Agência Nacional de Águas (ANA), na Fazenda Boa Fortuna, Município de Rio Largo, Alagoas. O que se pretende é um monitoramento remoto e contínuo do nível de vazão, em um ponto da bacia hidrográfica do rio Mundaú, com o intuito de prever possíveis ondas de cheias. As enchentes no rio Mundaú são recorrentes, tendo trazido grandes prejuízos em recursos materiais e em vidas humanas ao longo de décadas; o seu monitoramento é de importância fundamental para o melhor planejamento e gerenciamento desses recursos. Para isso foi construído um código de computador, na linguagem orientada a objeto, OBJECT PASCAL. O programa lê a imagem, em formato jpeg, gerada e disponibilizada pelo SIRMAL em seu sítio da Internet, integra espacialmente todos os valores de refletividade do pulso de microondas sobre a bacia, determinando volume precipitado e posteriormente a altura pluviométrica considerada sobre área da Bacia Hidrográfica do rio Mundaú. Este valor está associado ao estado reflexivo da bacia, em um dado momento e indica a quantidade de água precipitada na bacia para um determinado período. A altura pluviométrica está relacionada à precipitação sobre a bacia e em consequência à vazão no rio. Para a verificação da correlação com a vazão, foram escolhidos cinco meses, o período de 2004 a 2006, em que a vazão medida na Fazenda Boa Fortuna apresentou variações bruscas, e se procurou variações semelhantes na altura pluviométrica, aferidas a partir do processamento da imagem do radar. Para os meses de janeiro de 2004, dezembro de 2005 e setembro de 2006, obteve-se uma correlação superior a 70% entre o fator de refletividade e a vazão. A partir da análise diária da altura e da vazão determinou-se



uma correlação qualitativa. Esta foi obtida a partir dos dados da vazão, retirados das séries históricas da estação, obtidas no sistema HidroWeb da ANA, e a altura pluviométrica obtida a partir dos dados do radar com o método. A correlação se mostrou promissora, porém, não conclusiva. Através da análise foi demonstrado que a sensibilidade das variações na altura, indicando em até 24 horas a elevação do nível de vazão para 60% dos casos estudados.

**Palavra-Chave:** Correlação vazão-fator de refletividade, Vazão, Fluviometria, sensoriamento remoto, chuva com radar.

## ABSTRACT

---

This application aims to identify a possible correlation between the reflectivity factor signal RADAR Weather Radar System of Alagoas (SIRMAL), with the flow of the Rio Mundaú, data obtained from the Hydrological Station National Water Agency (ANA) in BoaFortuna, Rio Largo, Alagoas. What is required is a remote monitoring and continuous rate of flow, at one point the river basin Mundaú in order to predict possible flood waves. The floods in the river Mundaú are recurrent, having brought great losses in material resources and human lives for decades, their monitoring is of fundamental importance for better planning and management of these resources. For this we constructed a computer code in object-oriented language, Object Pascal. The program reads the image in jpeg format, generated and provided by SIRMAL on his Internet site, spatially integrates all the values of reflectivity of the microwave pulse on the watershed, determining the volume and then precipitated considered high rainfall area on the Watershed River Mundaú. This value is associated with the reflective state of the basin, at a given time, indicates the amount of precipitated water in the basin for a given period. The high rainfall is related to precipitation over the basin and consequently the flow in river. To verify the correlation with the flow, were chosen five months, the period from 2004 to 2006, when the flow measured at the farm Good Fortune, showed abrupt changes and sought similar variations in rainfall height, measured from the image processing radar. For the months of January 2004, December 2005 and September 2006, we obtained a correlation exceeding 70% between the reflectivity factor and the flow. From the daily analysis of the height and flow rate determined to be a qualitative correlation. This was obtained from the flow data, derived from stories of the season series, obtained in the HIDROWEB ANA rainfall and the height obtained with the method. The correlation was promising but not conclusive. Through the analysis it was demonstrated that the sensitivity of variations in height, indicating up to 24 hours to raise the level of flow to 60% of cases.

**Keyword:** Correlation between flow-reflectivity factor, Flow, fluviometric, remote sensing, rain radar.

## LISTA DE FIGURAS

---

<b>Figura 3.1</b> - Bacia Hidrográfica do rio Mundaú	26
<b>Figura 3.2</b> - Bacia Hidrográfica do Mundaú subdividida em polígonos para utilização do método de Thiessen.	31
<b>Figura 3.3</b> – Curva-chave para estação Boa Fortuna, Rio Largo, Alagoas	36
<b>Figura 3.4</b> - Válvula Magnetron VMX 1090 do radar PAR 80	40
<b>Figura 3.5</b> – Distribuição da energia eletromagnética emitida no pulso do Radar	42
<b>Figura 4.1</b> - Localização da Bacia Hidrográfica do Mundaú, nos Estados de Pernambuco e Alagoas	48
<b>Figura 4.2</b> - Perfil Longitudinal do Rio Mundaú	50
<b>Figura 4.3</b> – Estação Hidrológica da Fazenda Boa Fortuna e Rio Mundaú	55
<b>Figura 4.4</b> – Réguas limnimétricas da estação da Fazenda boa Fortuna	56
<b>Figura 4.5</b> - Estação Hidrológica da Fazenda Boa Fortuna	56
<b>Figura 4.6</b> -. Prédio do SIRMAL no campus da UFAL, Maceió, Alagoas	58
<b>Figura 4.7</b> – Painel de controle e visualização analógica do sinal do Radar. À esquerda, embaixo, módulo de digitalização do SASSANDRA	59
<b>Figura 4.8</b> – Componentes do Sistema de Radar Meteorológico de Alagoas	60
<b>Figura 4.9</b> – Imagem na escala 30 km do dia 05 de dezembro de 2005, as 16:06h	62
<b>Figura 4.10</b> – Imagem na escala 130 km do dia 05 de dezembro de 2005, as 16:08h	62
<b>Figura 4.11</b> – Imagem na escala 250 km do dia 05 de dezembro de 2005,	

as 16:06h	63
<b>Figura 4.12</b> – Imagem na escala 380 km do dia 05 de dezembro de 2005, as 16:04h	63
<b>Figura 4.13</b> – Código inicial para leitura e identificação da cor de um elemento de imagem a partir dos canais RGB, primeira, segunda e terceira coluna respectivamente	65
<b>Figura 4.14</b> – Bacia Hidrográfica do Mundaú selecionada na imagem com máscara transparente	66
<b>Figura 4.15</b> – Interface do Programa de Estimativa de Vazão – verificação e análise, PEVva	73
<b>Figura 4.16</b> – Varredura dos pixels da imagem e identificação de cor através dos canais RGB	74
<b>Figura 4.17</b> – Estrutura do algoritmo para o programa PEVva	77
<b>Figura 4.18</b> – Interface do programa PEVx	78
<b>Figura 4.19</b> - Estrutura do algoritmo para o programa PEVx	85
<b>Figura 5.1</b> - Hidrógrafa obtida para o mês de janeiro de 2004 (ANA)	88
<b>Figura 5.2</b> - Altura pluviométrica obtida a partir do processamento de imagem do radar (SIRMAL) para janeiro de 2004	88
<b>Figura 5.3</b> - Gráfico para correlação entre a vazão (Q) e a altura pluviométrica (H) para o mês de janeiro de 2004	89
<b>Figura 5.4</b> - Precipitação sobre a BHM em 14 de janeiro de 2004 as 16:23h.	90
<b>Figura 5.5</b> - Hidrógrafa obtida para o mês de dezembro de 2005 (ANA)	92
<b>Figura 5.6</b> - Altura pluviométrica obtida a partir do processamento de imagem do radar (SIRMAL) para dezembro de 2005	92
<b>Figura 5.7</b> - Gráfico para correlação entre a vazão (Q) e a altura pluviométrica (H) para o mês de dezembro de 2005	93

<b>Figura 5.8</b> - Hidrógrafa obtida para o mês de agosto de 2006 (ANA)	95
<b>Figura 5.9</b> - Altura pluviométrica obtida a partir do processamento de imagem do radar (SIRMAL) para agosto de 2006	95
<b>Figura 5.10</b> - Gráfico para correlação entre a vazão (Q) e a altura pluviométrica (H) para o mês de agosto de 2006	96
<b>Figura 5.11</b> - Hidrógrafa obtida para o mês de setembro de 2006 (ANA)	99
<b>Figura 5.12</b> - Altura pluviométrica obtida a partir do processamento de imagem do radar (SIRMAL) para setembro de 2006	99
<b>Figura 5.13</b> - Gráfico para correlação entre a vazão (Q) e a altura pluviométrica (H) para o mês de setembro de 2006	100
<b>Figura 5.14</b> - Hidrógrafa do rio Mundaú obtida na estação da FBF, para o mês de novembro de 2006 (ANA)	102
<b>Figura 5.15</b> - Altura pluviométrica na BHM, obtida a partir do processamento de imagem do radar (SIRMAL) para novembro de 2006	102
<b>Figura 5.16</b> - Gráfico para correlação entre a vazão (Q) e a altura pluviométrica (H) para o mês de novembro de 2006	103

## LISTA DE QUADROS E TABELAS

---

<b>Quadro 3.1</b> - Bandas de rádio emissão com valores máximos de frequências e mínimos de comprimentos de onda	46
<b>Quadro 4.1</b> – Características físicas e geográficas da BHM	53
<b>Quadro 4.2</b> – Dados da estação hidrológica da Fazenda Boa Fortuna, Rio Largo, Alagoas	54
<b>Quadro 4.3</b> - Coordenadas geográficas e altitude do SIRMAL	58
<b>Quadro 4.4</b> - Objetos definidos para o programa PEVva – Programa para estimativa de vazão.-versão análise	70
<b>Quadro 4.5</b> - Variáveis globais inicializadas no procedimento form	71
<b>Quadro 4.6</b> - Variáveis locais do procedimento BtAbrir – PEVva	72
<b>Quadro 4.7</b> - Objetos definidos para o programa PEVx – Programa para estimativa de vazão	78
<b>Quadro 4.8</b> - Variáveis globais utilizadas no programa PEVx	79
<b>Quadro 4.9</b> - Variáveis locais do procedimento BtAbrir.	80
<b>Quadro 4.10.</b> - Condições para estimativas de vazão após 24 horas na Fazenda Boa Fortuna	84
<b>Tabela 3.1.</b> Indicação da altura em km, e a largura do feixe em função da elevação e distância ao radar	45
<b>Tabela 4.1(a).</b> - Municípios total ou parcialmente compreendidos na BHM	49
<b>Tabela 4.1(b).</b> - Municípios total ou parcialmente compreendidos na BHM. .	50
<b>Tabela 4.2</b> - Características técnicas do radar Banda C WR-100-5/EEC	61
<b>Tabela 4.3</b> - Formato de saída de dados	69
<b>Tabela 4.4</b> - Tabela com os valores dos canais de cor e o fator de	

refletividade associado	75
<b>Tabela 5.1</b> – Altura pluviométrica obtida pelo processamento de imagens do radar (SIRMAL) e série de dados de vazão (ANA) do mês de janeiro de 2004	87
<b>Tabela 5.2</b> - Regressão linear Q x H do mês de janeiro de 2004	89
<b>Tabela 5.3</b> – Altura pluviométrica obtida pelo processamento de imagens do radar (SIRMAL) e série de dados de vazão (ANA) do mês de dezembro de 2005.	91
<b>Tabela 5.4</b> - Regressão linear Q x H do mês de dezembro de 2005.	93
<b>Tabela 5.5</b> – Altura pluviométrica obtida pelo processamento de imagens do radar (SIRMAL) e série de dados de vazão (ANA) do mês de agosto de 2006	95
<b>Tabela 5.6</b> - Regressão linear Q x H do mês de agosto de 2006	96
<b>Tabela 5.7</b> – Altura pluviométrica obtida pelo processamento de imagens do radar (SIRMAL) e série de dados de vazão (ANA) do mês de setembro de 2006	96
<b>Tabela 5.8</b> - Regressão linear Q x H do mês de setembro de 2006	100
<b>Tabela 5.9</b> – Altura pluviométrica obtida pelo processamento de imagens do radar (SIRMAL) e série de dados de vazão (ANA) do mês de novembro de 2006	101
<b>Tabela 5.10</b> - Regressão linear Q x H do mês de novembro de 2006	103
<b>Tabela 5.11</b> - Classes de estimativas para Q na Fazenda Boa Fortuna, em relação a vazão e a altura pluviométrica	104

## SUMÁRIO

---

<b>1 – INTRODUÇÃO</b>	17
<b>2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	21
<b>3 – FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b>	25
<b>3.1 Hidrologia</b>	25
<b>3.2 Bacia Hidrográfica</b>	25
3.2.1 A Área de drenagem	26
3.2.2 O Coeficiente de Compacidade	26
3.2.3 O Fator de forma	26
3.2.4 A Densidade de drenagem	27
3.2.5 A Extensão média	27
3.2.6 A Sinuosidade do curso D'água	27
3.2.7 A Curva Hipsométrica	27
3.2.8 A Elevação média da bacia	28
3.2.9 A Declividade de Álveos	28
3.2.10 O Retângulo equivalente	28
<b>3.3 Precipitação</b>	28
3.3.1 Precipitações orográficas	29
3.3.2 Precipitações ciclônicas	29
3.3.3 Precipitações convectivas	29
3.3.4 O método aritmético	30
3.3.5 O método das Isoietas	30
3.3.6 O método de Thiessen	31
<b>3.4 Sistemas Meteorológicos atuantes no Nordeste do Brasil</b>	31
3.4.1 – Sistemas Frontais	32
3.4.2 – Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis	32
3.4.3 – Perturbações Ondulatórias dos Alísios	33
3.4.4 – Brisas Marinha e Terrestre	34
3.4.5 – Sistemas Convectivos Locais	34
<b>3.5 A Medição da Vazão</b>	35



<b>3.6 O Radar</b>	36
3.6.1 - História do RADAR	36
3.6.2 Conceitos Fundamentais	38
3.6.3 Componentes do Radar	39
3.6.4 A Relação Z – R	44
<b>4 - METODOLOGIA</b>	48
<b>4.1 A Bacia Hidrográfica do Mundaú</b>	48
4.1.1 Localização	48
4.1.2 Densidade Demográfica	50
4.1.3 Pluviometria	51
4.1.4 Clima	51
4.1.5 Temperatura	51
4.1.6 Umidade Relativa	52
4.1.7 Insolação	52
4.1.8 Evaporação	52
4.1.9 Formação Geológica	52
4.1.10 Solo e Vegetação	52
<b>4.2 Resumo das Características Físicas da BHM</b>	53
<b>4.3 A Estação Hidrológica da Fazenda Boa Fortuna</b>	54
<b>4.4 O Sistema de Radar Meteorológico de Alagoas – SIRMAL</b>	57
4.4.1 Localização do Radar	58
4.4.2 Estrutura do SIRMAL	59
4.4.3 Características Técnicas	60
4.4.4 O Sistema de Digitalização de Imagens SASSANDRA	61
<b>4.5 Desenvolvimento do algoritmo e código</b>	
64	
4.5.1 Etapa de Análise	65
4.5.2 Etapa de Finalização para Usuário	68
<b>4.6 Algoritmos</b>	69
4.6.1 Programa Para Análise (PEVva)	69
4.6.2 Programa Final Para Usuário	78
<b>5 – ESTUDO DE CASOS</b>	86
<b>5.1 Janeiro de 2004</b>	87

<b>5.2 Dezembro de 2005</b>	91
<b>5.3 Agosto de 2006</b>	94
<b>5.4 Setembro de 2006</b>	98
<b>5.5 Novembro de 2006</b>	101
<b>6 – CONCLUSÃO</b>	105
<b>Referências</b>	109

---

## 1 - INTRODUÇÃO

A vida, em nosso mundo, só é possível por causa da existência de água. Em todo nosso planeta só encontramos a vida associada a esta substância. Ela é vital para todos os processos orgânicos que sustentam esse arranjo particular da matéria e que possibilita a vida. O Ser humano é uma máquina de água com 72% de sua composição, coincidentemente, quase a mesma proporção é encontrada na biosfera terrestre. Estamos íntima e inexoravelmente ligados a essa substância fundamental.

Os processos de evaporação, condensação e liquefação, que ocorrem na biosfera terrestre e que definem o ciclo hidrológico, produzem um fluxo contínuo que possibilita a vida. Contudo, a intensidade com que estes processos ocorrem podem determinar a extinção ou o desenvolvimento de biomas.

O ciclo da água é certamente o processo de maior importância para a meteorologia. A distribuição espaço-temporal da água na atmosfera é vital para a sociedade e pode trazer tanto a fartura quanto a destruição. Um período regular de distribuição de água em uma dada região pode desenvolver vários setores da sociedade, uma vez que o recurso básico de subsistência foi garantido. Por outro lado, desequilíbrios na distribuição da água podem levar a escassez ou ao excesso do recurso, o que acarretará em prejuízos materiais e até mesmo desastres ambientais, com a perda de vidas.

Para diminuir e também prevenir os efeitos dessas possíveis oscilações na distribuição da água, faz-se necessário um monitoramento contínuo deste recurso. Não deve ser desprezada a importância desse monitoramento, uma vez que a cada ano aumenta a demanda por água. Outro fato importante, é que o aumento da população a deixa mais vulnerável em relação a desastres ambientais e que estão associados ao ciclo hidrológico, como enchentes.

Redes integradas de monitoramento podem ser constituídas por satélites, radares e estações meteorológicas. Estas redes permitem a observação, senão de todo o volume, de parte importante da quantidade água em uma região, que possibilitaria um maior manejo desse valioso recurso. Com o aumento da demanda e da população, estas redes serão de fundamental importância.

Particularmente em relação ao poder destrutivo que um desequilíbrio hídrico pode acarretar em uma região, destacam-se os eventos de secas e enchentes, que periodicamente trazem prejuízos relevantes em todo o mundo. Um exemplo é a escassez de água no sertão do Nordeste do Brasil, que é um problema recorrente e que só será sanado com a instalação de redes integradas que permitiram um maior monitoramento quantitativo do recurso, e lógico, ações estruturantes que possibilitem maior acesso a água. No caso das cheias, o monitoramento também é de extrema importância. Uma vez que os eventos de enchentes, recorrentes em várias bacias, são muito intensos, rápidos e destruidores, como se constata nos trabalhos de REIS, SILVA e PEDROSA (2000) e FRAGOSO JÚNIOR et al (2010). Por isso, o acompanhamento do estado hídrico das bacias deverá ser feito de maneira contínua e eficaz para a detecção de eventos que possam produzir elevações perigosas dos níveis limnimétricos dos rios e que permitirão a tomada de decisões para ações preventivas que assegurem os recursos naturais e materiais, bem como o bem estar das populações que estejam às margens de um rio.

Dentre as variáveis meteorológicas, a que está diretamente relacionada às enchentes é a precipitação. O volume de água acumulada em uma bacia é função da precipitação sobre a bacia. Monitorar a precipitação é uma forma indireta de verificar o estado hídrico da bacia. É verdade que outras variáveis como a insolação, infiltração, percolação e a evapotranspiração são variáveis fundamentais, também, mas, é principalmente através da precipitação que ocorrem as oscilações nos níveis limnimétricos e que, portanto, está associada à ocorrência de cheias.

A precipitação está também diretamente relacionada à refletividade do sinal de RADAR. Para o Sistema de Radar Meteorológico de Alagoas a relação Z-R entre a refletividade e a taxa horária de precipitação foi determinada por MORAES – 2003. Com esta relação e com um algoritmo para análise é possível estimar a quantidade de chuva precipitada sobre uma bacia hidrográfica em um dado período de tempo.

A relação entre a taxa de precipitação horária, a refletividade do RADAR e a relação entre a precipitação com a vazão de um rio, permite-nos induzir uma possível correlação entre a refletividade do RADAR e a vazão. Dessa forma, poder-se-á, a partir da teledetecção, monitorar o estado reflexivo da bacia, e, em seguida, identificar possíveis alterações, o que indicará variações na precipitação e consequentemente a vazão.

Neste trabalho busca-se identificar as variações da vazão a partir da refletividade do Radar. Para isso, calcula-se os índices horários e diários da refletividade e os comparam com as vazões diárias consistidas, obtidas no sistema Hidroweb da Agência Nacional de Águas. O objetivo foi o de identificar elevações nos índices diários e horários que antecederiam os picos de vazão e que representam um potencial risco de enchentes nas cidades à margem do Rio Mundaú e que posteriormente seriam utilizados como bases para o desenvolvimento de um programa de monitoramento da bacia através da análise das imagens de RADAR.

O rio Mundaú, que é um dos principais rios de Alagoas, tem em sua história vários eventos de enchentes e consiste de um recorrente e sério problema para as cidades à sua margem, sobretudo as que estão no baixo Mundaú. A detecção prévia de uma potencial enchente poderá representar uma economia significativa e principalmente poderá salvar vidas.

Com o Sistema de Radar Meteorológico da UFAL produziu-se um programa de computador para o monitoramento da bacia hidrográfica do rio Mundaú. Este programa terá a função de determinar eventuais oscilações nas alturas pluviométricas acumuladas diárias, o que indicará uma potencial ameaça de enchente.

A estrutura deste trabalho consiste de:

No capítulo 2 uma revisão dos textos que fundamentaram o método a ser utilizado no desenvolvimento desta pesquisa.

No capítulo 3 apresentam-se as variáveis que determinam a vazão de um rio, suas interrelações e métodos de medida. Encerrando este capítulo Faz-se um estudo teórico sobre a teledetecção por radar, apresenta-se um breve resumo histórico e discute-se suas principais características, vantagens e desvantagens.

No capítulo 4, apresenta-se, a Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú, localizando-o geograficamente e suas principais características hidrológicas. Descreve-se a estação fluviométrica da Fazenda Boa Fortuna, no Município de Rio Largo, Alagoas, onde foram obtidas as medidas da vazão do Rio Mundaú disponíveis no sistema Hidroweb da Agência Nacional de Águas. Descreve-se, também, o Sistema de Radar Meteorológico da UFAL. Relata-se ainda, a metodologia que foi utilizada para construir os programas de computador e realizar a análise de dados. Apresenta-se o

algoritmo utilizado para os programas Programa de Estimativa de Vazão, versão análise, PEVva e Programa de Estimativa de Vazão, versão usuário, PEVx, suas interface e alguns exemplos de saída de dados. Descreve-se como utilizá-lo na detecção de eventos de pico de vazão.

O Capítulo 5 ficou reservado para estudo e análise de alguns casos demonstrativos, onde se pode observar a resposta das alturas pluviométricas acumuladas e a vazão para a bacia hidrográfica do Rio Mundaú, em eventos de intensa precipitação com conseqüentes picos de vazão.

No Capítulo 6, é apresentada a conclusão deste trabalho, ressaltando a importância do monitoramento de bacias hidrográficas através da teledetecção por Radar, aliada ao processamento digital de imagens.

---

## 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1- RADAR METEOROLÓGICO

A evolução histórica do RADAR como instrumento de detecção de embarcações no mar e no ar na Segunda Guerra Mundial a sua utilização para detecção da precipitação é descrita por Atlas (1990). O autor também descreve em seu trabalho, os princípios físicos do Radar e suas principais características. Descreve ainda, como se dá a visualização da precipitação através do Radar e como o instrumento é utilizado na pesquisa meteorológica.

A história, os princípios físicos, as características do RADAR e suas aplicações na meteorologia são abordadas por SAUVAGEOT (1992). Dentro de sua obra é descrito de maneira pormenorizada os tipos de Radar, as características de seus componentes, e de fenômenos como atenuação, refração e resolução, também explica a equação do Radar e como esta responde a alvos simples e distribuídos espacialmente, estudo sobre precipitação e nuvens, os princípios físicos envolvidos, sua formação e distribuição de tamanhos de gotas. O autor mostra como a potência recebida está associada ao fator de refletividade e este com a taxa de precipitação. Este último tópico é de fundamental interesse para o trabalho em questão.

Com propósito de realizar a calibração do sistema de Radar (WR100-5/EEC) Meteorológico de Alagoas, QUINTÃO (2004) desenvolveu programas computacionais adaptados ao sistema digitalização dos sinais do radar para possibilitar a armazenagem dos dados, a geração das imagem e aquisição das informações do radar empregadas na calibração. Utilizou-se também um Disdrômetro Joss-Waldevogel RD-69 como padrão de calibração e realizou comparação de  $Z$  obtida com disdrômetro ( $dBZ_d$ ) com o valor da  $Z$  obtido pelo radar ( $dBZ_r$ ). No trabalho de QUINTÃO (2004) chegou-se a conclusão que o uso disdrômetro como parâmetro constante de calibração possibilita entender o comportamento da  $Z-R$  na região de Alagoas. A automatização do radar poderá tornar visível a diminuição de erros causados em função da instabilidade da potência do radar, melhorando a estabilidade de  $C_{SR}$ .

## 2.2 DISTRIBUIÇÃO DE GOTAS DE CHUVA-DTG

MORAES (2003) igualmente utilizou dados coletados com Disdrômetro-RD69 estudou as distribuições do tamanho de gotas de chuva-DTGs de chuvas sobre a região de Maceió-AL. Seus resultados conduziram às seguintes conclusões: a estratificação das DTGs em classes de taxa de chuva mostrou claramente a dependência da maioria dos parâmetros das funções analíticas com a taxa de chuva e foi observada também uma marcante variação mensal. Todos os parâmetros (conteúdo de água líquida, fator de refletividade e os parâmetros da distribuição exponencial ( $N_0$  e  $\lambda$ ) e um único parâmetro da log-normal ( $Nt$ ) mostram dependentes com a taxa de chuva ( $R$ ), as únicas exceções foram os dois outros parâmetro da log-normal ( $\sigma$  e  $D_g$ ) que praticamente permaneceram constantes em todos os ajustes. Quanto à forma da DTG seu resultado foi satisfatório, embora não tenha havido uma concordância em termos de quantidades de gotas. Esse resultado pode ser justificado devido ao curto período de estudo ou ainda uma provável explicação seria a variabilidade intersazonal da intensidade de chuva.

TENÓRIO et al. (2005, 2010) usando Disdrômetro RD-69 estudaram a distribuição da concentração de gotas, na região de Maceió-AL, dentro da escala de classe do equipamento durante as chuvas ocorridas durante os meses de março, abril, junho e setembro de 2002. Concluíram que as concentrações de gotas variaram em torno de  $400 \text{ m}^{-3}$  a  $500 \text{ m}^{-3}$ . Essas concentrações ficam localizadas nas classes 7 e 8 do equipamento que corresponde a um diâmetro médio de 1,1mm e 1,3mm.

## 2.3 BACIAS HIDROGRAFICAS

O papel hidrológico da bacia hidrográfica seria, segundo TUCCI (1997), o de transformar uma entrada de volume concentrada no tempo (precipitação), em uma saída de água (escoamento) de forma mais distribuída no tempo. Esse papel hidrológico vai ser grandemente influenciado pelas características físicas das bacias que compreendem a sua área de drenagem, forma, sistema de drenagem e características do relevo.

Para VILELLA & MATTOS (1975), existe uma grande correspondência entre as características físicas e o regime hidrológico, pois através de relações e comparações entre esses dois elementos pode-se determinar indiretamente valores



hidrológicos em regiões onde esses dados são escassos. Além disso, através de informações de características físicas, podem-se inferir condições sobre formações geológicas, perdas de sedimentos entre outras características relacionadas ao solo da região.

Os fundamentos da Hidrologia são descritos com esmero por BRATER & WISLER (1964). Este trabalho descreve a importância da ciência ressaltando os benefícios para o ser humano. Os autores discutem os processos de escoamento que são fundamentais para este estudo. Também, apresentam os tipos e causas das precipitações, estas que são a principal variável de entrada para o algoritmo que se pretende desenvolver. Outras importantes variáveis para este estudo são discutidas no trabalho, a saber: infiltração, insolação, evaporação e interceptação. Os autores apresentam um resumo sobre o escoamento em bacias hidrográficas úmidas e secas através de análise da hidrógrafa unitária.

O Núcleo de Meteorologia e Recursos Hídricos da Secretaria de Planejamento de Alagoas, (ALAGOAS, 1992) no trabalho “Os Recursos Hídricos do Estado de Alagoas” apresenta um levantamento dos recursos hídricos do Estado de Alagoas. O trabalho, descreve as características hidrológicas do Estado, apresenta as 44 bacias hidrográficas de Alagoas e descreve de forma sumária, as lagoas do Estado. Apresenta, ainda, uma descrição das condições climáticas, destacando a pluviometria e a evapotranspiração, que são variáveis fundamentais deste estudo. Ressalta, também os problemas com a estiagem e enchentes onde destaca os eventos nas bacias dos rios Mundaú, Paraíba e São Francisco. Apresenta ainda, problemas como o despejo de efluentes, a salinização de açudes e o assoreamento.

PEREIRA FILHO (1989) analisou três sistemas precipitantes responsáveis por enchente na Bacia do Alto Tietê - SP através de imagem PPI (*plan position indicator*) do radar meteorológico de São Paulo e dados de postos fluviométricos. Constatou que situações de enchentes tendem a ser geradas por sistemas precipitantes organizados de longa duração e que os eventos precipitantes podem ser previstos com boa antecedência fazendo análises de meso-escala, sinótica e monitoramento dos sistemas através de um radar meteorológico com previsão a curto-prazo.

FRAGOSO JÚNIOR et al (2010) analisaram preliminarmente o evento hidrológico ocorrido nas bacias dos rios Mundaú e Paraíba durante as fortes chuvas que ocorreram no mês de junho de 2010 e esclarecem algumas questões sobre as características, incluindo duração, intensidade, tempo de retorno e distribuição temporal e espacial da precipitação, bem como os fatores que podem ter

intensificado a magnitude deste evento tais como saturação do solo, fortes declividades, rompimento de barragens e ocupação urbana na planície de inundação. A análise das vazões máximas do posto da Fazenda Boa Fortuna, localizado no Município de Rio Largo/AL, indicou que o evento ocorrido pode ter um tempo de retorno superior a 200 anos.

## **2.4 LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO**

Uma linguagem de programação é um método padronizado para expressar instruções para um computador. Neste trabalho utilizou-se a linguagem de programação Object Pascal, esta derivada da linguagem Pascal (WOOD, 1987). FERNANDES, KANE e ARCOVERDE (1998) através de um guia, dão uma visão objetiva e experimental, descrevendo de maneira prática os fundamentos da linguagem Object Pascal e introduzindo o leitor a utilização do aplicativo Delphi de forma objetiva clara, com exemplos esclarecedores. Este guia de consulta rápida contém uma referência completa do Object Pascal e do IDE do DELPHI, sendo indispensável para quem quer obter o máximo proveito dos recursos do programa sem perder tempo consultando volumosos manuais. Os códigos gerados para este trabalho utilizaram uma programação estruturada conforme preconizada por WOOD (1987) e que puderam ser expandidas através da programação orientada a objetos.

---

## 3 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 3.1 Hidrologia

Hidrologia é a ciência que estuda a água, suas características e propriedades físicas, químicas, biológicas, a sua ocorrência, distribuição, circulação e armazenamento. A hidrologia permite conhecer como o ciclo da água se dá, como ele interfere em processos diversos como a irrigação, processos geológicos ou a produção de energia, e como influencia o clima e transforma a atmosfera. Os estudos hidrológicos possibilitam o conhecimento da capacidade de abastecimento de um aquífero e da demanda por água de uma população. A hidrologia é portanto, uma ciência fundamental aos seres humanos e que permite o planejamento e gerenciamento deste recurso tão valioso que é a água.

### 3.2 Bacia hidrográfica

Bacia hidrográfica é definida por Viessman, Harbaugh e Knapp (VILELA e MATOS, 1975) como uma área determinada por seus limites topográficos e que é drenada por sistema conectado por curso de água e que tem uma única saída. A bacia hidrográfica assim definida contém divisores topográficos e freáticos. Os divisores topográficos são determinados por uma linha de máximas alturas, enquanto que os divisores freáticos são definidos pela rocha impermeável abaixo da bacia (BRATER & WISLER, 1964). Esses divisores em geral não coincidem, o que provoca uma fuga ou acréscimo de águas na bacia.

As características físicas de uma bacia estão associadas a diversos fatores como área, extensão, forma, rede de drenagem, tipos de solos, declividade. Estes fatores são de fundamental importância para a hidrologia da bacia e podem ser analisados através coeficientes e análise gráfica. Na figura 3.1 se vê a disposição e forma da bacia hidrográfica do rio Mundaú e seus principais tributários os rios Una e Canhoto.



**Figura 3.1** - Bacia Hidrográfica do rio Mundaú.  
Fonte: FRAGOSO JÚNIOR et al (2010).

**3.2.1 A Área de drenagem** é a projeção horizontal da área da bacia definida pelos divisores topográficos.

A forma da bacia é caracterizada por dois parâmetros: O Coeficiente de Compacidade e o Fator de Forma.

**3.2.2 O Coeficiente de Compacidade**  $K_c$ , também conhecido como índice de Gravelius, constitui-se na razão entre o perímetro da bacia e a circunferência de área igual a da bacia. Desta definição obtém-se a equação 01.

$$K_c = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad \text{Equação. 01}$$

Onde:

$K_c$  é o coeficiente de compacidade;

$P$  é o perímetro da bacia e

$A$  é a área da bacia.

O risco de enchentes é tanto maior, quanto mais próximo da unidade for o coeficiente de compacidade.

**3.2.3 O Fator de forma**  $K_f$  é determinado pela razão entra a largura média da bacia e o comprimento ao longo do maior curso de água da bacia. A largura média é

determinada através da razão entre área  $A$  da bacia e o seu comprimento  $L$ . Para o fator de forma tem-se a equação 02:

$$K_f = \frac{A}{L^2} \quad \text{Equação. 02}$$

**3.2.4 A 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 03.

$$D_d = \frac{L_T}{A} \quad \text{Equação. 03}$$

**3.2.5 A Extensão média do escoamento superficial** consiste 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 equação 04.

$$l = \frac{A}{4L_T} \quad \text{Equação. 04}$$

**3.2.6 A Sinuosidade do curso d'água** é um fator determinante da velocidade de escoamento (VILELA e MATOS, 1975). É determinado pela razão entre o talvegue e comprimento do rio principal da bacia, equação 05.

$$Sin = \frac{L_T}{L} \quad \text{Equação. 05}$$

Outro importante fator na velocidade do escoamento superficial são as características do relevo da bacia. De uma forma geral, a velocidade aumenta 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 decisivo em grandezas como a vazão e o tempo de concentração.

**3.2.7 A Curva Hipsométrica** indica a distribuição percentual de áreas da bacia em relação ao nível médio do mar.

**3.2.8 A Elevação média da bacia** indica 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.

**3.2.9 A Declividade de Álveos** determina a velocidade de escoamento. Pode ser calculada através da área do perfil longitudinal do rio principal da bacia, determinando-se a altura do triângulo de área igual à encontrada no perfil longitudinal.

**3.2.10 O Retângulo equivalente** consiste em 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 à 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  $L$ .

$$L = \frac{K_c \sqrt{A}}{1,12} \left[ 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{1,12}{A} \right)^2} \right] \quad \text{Equação. 06}$$

$$l = \frac{K_c \sqrt{A}}{1,12} \left[ 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{1,12}{A} \right)^2} \right] \quad \text{Equação. 07}$$

### 3.3 Precipitação

A precipitação é o principal fator climático de entrada para cálculo do balanço hidrológico em uma bacia. Junto com a evaporação e outros fatores como a temperatura, ventos e umidade do ar determina o regime hidrológico na região.

As correntes ascendentes de ar ao sofrer o resfriamento adiabático ou dinâmico são responsáveis pela maioria das precipitações. Levando-se em consideração este fato, se pode classificar as precipitações em:

- Precipitações orográficas
- Precipitações ciclônicas
- Precipitações convectivas

### **3.3.1 *Precipitações orográficas***

Ocorrem devido a elevação mecânica de massa de ar úmido pela topografia da região.

### **3.3.2 *Precipitações ciclônicas***

Ocorrem devido ao deslocamento de massas de ar úmido de regiões de alta para baixa pressão. Estes movimentos são oriundos dos processos de aquecimento não uniforme do ar pelo solo. As precipitações ciclônicas são classificadas em frontais e não frontais. As precipitações não frontais ocorrem quando há convergência horizontal de massas de ar com posterior elevação de ar úmido. As precipitações frontais ocorrem quando há deslocamento horizontal de massa ar quente e úmido sobre massas de ar frio o que acarreta na elevação do primeiro provocando o resfriamento dinâmico e conseqüentemente a precipitação.

### **3.3.3 *Precipitações convectivas***

Ocorrem devido a estratificação térmica provocadas pelo aquecimento não homogêneo do ar pelo solo. Quando o equilíbrio atmosférico é desfeito, correntes ascendentes se formam abruptamente provocando resfriamento adiabático e conseqüente precipitação de curta duração e grande intensidade.

As grandezas fundamentais na pluviometria são: altura pluviométrica, intensidade de precipitação e duração.

A *altura* da chuva é determinada através de pluviômetros ou pluviógrafos. Estes coletam o volume de água precipitada em um período, geralmente um dia. Obtém-se a altura pluviométrica através da razão entre o volume e a área coletora do pluviômetro.

A *duração* consiste no intervalo de tempo em que ocorreu a precipitação e a intensidade da precipitação que é a razão entre a altura da chuva e a duração.

A variabilidade da precipitação é também um importante fator a ser considerado no estudo hidrológico. A precipitação varia no tempo e no espaço de forma bastante complexa, isto ocorre devido ao grande número de variáveis associadas à precipitação. Geograficamente a precipitação deveria decrescer com o aumento da latitude numa escala continental, ou seja, seria máxima no equador e mínima nos pólos. Esta tendência não é observada devido a inúmeros motivos como topografia, circulação atmosférica deslocamentos de massas de ar, vegetação, clima e outros. A variação temporal da precipitação também apresenta um aspecto peculiar; ela tende a manter um valor médio, em uma dada região, para longos períodos de tempo. Contudo, para curtos períodos de tempo está tendência não se mantém, o que demonstra o caráter aleatório e um caráter ordenado nas pequenas e grandes escalas temporais.

No estudo da precipitação média sobre uma bacia hidrográfica, pode-se determinar a altura pluviométrica média a partir da análise de dados das estações distribuídas na área da bacia. Três métodos para cálculo da média se destacam:

1. O método aritmético;
2. O método das isoietas;
3. O método de Thiessen.

#### **3.3.4 O método aritmético**

Consiste em se calcular a média aritmética das alturas pluviométricas obtidas. Para um cálculo mais representativo as medidas não devem apresentar um desvio acentuado em relação à média, os pluviômetros devem estar uniformemente distribuídos e o relevo do terreno deverá preferencialmente plano.

#### **3.3.5 O método das Isoietas**

Consiste em se traçar linhas que contém áreas as quais a altura pluviométrica tenha o mesmo valor. Em seguida determina-se o valor das áreas contidas pelas isoietas e as utiliza como peso para o cálculo da média ponderada das médias das alturas pluviométricas adjacentes sobre a área total da bacia.

$$\bar{h} = \frac{\sum \left( \frac{h_i + h_{i+1}}{2} \right) A_i}{A} \quad \text{Equação. 08}$$

Onde:



$h_i$  e  $h_{i+1}$  são os valores da altura pluviométrica em duas isoietas adjacentes;  
 $A_i$  é a área contida pela isoietas  $i$  e

$A$  é a área total da bacia.

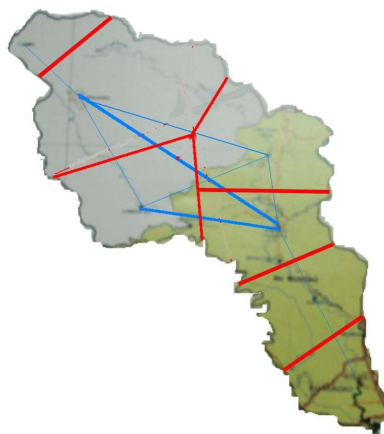
### 3.3.6 O método de Thiessen

Consistem em se traçar linhas entre as estações pluviométricas determinando-se os pontos médios destas e traçando-se linhas ortogonais a elas que contém esse ponto médio. O encontro das linhas ortogonais traçadas a partir de estações próximas a uma dada estação. Procedendo-se assim definir-se-ão polígonos nos quais as estações de medição estarão em seu centro. Em seguida, determinam-se as áreas internas à bacia, desses polígonos e as utilizam como peso para o cálculo da média ponderada das alturas pluviométricas obtidas pelas estações. A média é calculada sobre toda a área da bacia.

$$\bar{h} = \frac{\sum h_i A_i}{A} \quad \text{Equação. 09}$$

Onde  $h_i$  e  $A_i$  são as alturas pluviométricas e áreas dos polígonos  $i$  e  $A$  é a área total da bacia.

Na figura 3.2 estão representados polígonos encontrados na BHM, para utilização do método de Thiessen. As linhas vermelhas são os limites dos polígonos e as azuis são os segmentos de reta que unem as estações pluviométricas.



**Figura 3.2** - Bacia Hidrográfica do Mundaú subdividida em polígonos para utilização do método de Thiessen.

### **3.4 – Sistemas Meteorológicos atuantes no Nordeste do Brasil**

A distribuição das chuvas no NEB são irregulares, tanto espacial como temporalmente, o que têm conseqüências graves para a região (ARAÚJO et al, 2003). Os resultados dessas irregularidades provocam eventos de enchentes e secas que castigam a região. É uma constante nos Estados do Leste do NEB, uma ampla variabilidade da precipitação. Em Alagoas, as taxas médias anuais de precipitação variam de 400 mm a 2000 mm.

Os principais sistemas meteorológicos causadores de chuva no leste do NEB compreendem as escalas sinótica, meso-escala e micro escala. Na escala sinótica os sistemas frontais e os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis são os sistemas mais atuantes; na Meso-escala as perturbações ondulatórias dos Alísios (POA) e as brisas marinhas, e na micro-escala sistemas de pequenas células convectivas.

#### **3.4.1 – Sistemas Frontais**

Os sistemas frontais têm origem no encontro de massas de ar frio e seco com massas de ar quentes e úmidas. O ar úmido se eleva sobre o ar seco, mais denso, e se resfria condensando e precipitando em seguida. Os sistemas frontais ocorrem com maior freqüência no Sul e Sudeste do Brasil. No Nordeste do Brasil, NEB, ocorrem durante todo o ano e são importantes mecanismos de produção de chuvas com maior freqüência nos meses de junho a agosto, (MOLION e BERNARDO, 2002), o que está de acordo com estudos sobre a influência desses sistemas no NEB, desenvolvidos por KOULSKI, 1979. A ocorrência de sistemas frontais está associada a variações no tempo observadas no NEB e Norte do Brasil, NB. A friagem, fenômeno que ocorre na Amazônia, provoca quedas de temperaturas de 15°C a 20°C e tem duração de 3 a 5 dias (MOLION, 1986). OLIVEIRA, 1986 também observou variações na convecção tropical em função do avanço de sistemas frontais até latitudes mais baixas.

#### **3.4.2 – Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis**

Os vórtices ciclônicos de altos níveis (VCAN) são sistemas meteorológicos de escala sinótica que surgem devido a conservação de vorticidade; segundo GAN (1982), esta são originadas quando sistemas frontais atingem baixas latitudes.

Segundo KOUSKI e GAN (1981) os vórtices ciclônicos transformam energia potencial em cinética no seu movimento descendente no centro e ascendente nas laterais. No Hemisfério Sul, HS, originam-se sobre o Oceano Atlântico, entre as latitudes 0°S – 28°S e longitudes 20°W- 45°W (CALBETE e SATYAMURTY, 2010). Os VCANs que atuam no NEB são de origem tropical, com duração de horas a algumas semanas (FRANK, 1970). Apresentam forte subsidência central, núcleo frio, e elevação de massas de ar úmidas nas suas laterais o que provoca precipitações intensas. Os VCANs têm ocorrência nos meses de primavera e verão para o NEB. Quando associados aos sistemas frontais com duração de mais de uma semana, estabelecem uma Zona de Convergência do Atlântico Sul, ZCAS. O deslocamento dos VCANs é irregular com tendência a ser anticiclônico no HS (CALBETE e SATYAMURTY, 2010).

A ocorrência de VCANs no NEB está associado ao escoamento em altos níveis, 200hPa, que ocorrem no verão do HS sobre o Brasil. Nesta época, com desenvolvimento da Alta da Bolívia e de um cavado a leste do NEB, no nível de 200h Pa, o que propiciam a formação dos vórtices (GAN E KOUSKY 1986, RAO E BONATTI, 1987). Os VCANs surgem nos altos níveis da troposfera, a cerca de 12 km se estendendo para altitudes mais baixas (GAN, 1983). Têm circulação horária no HS (ciclônica) e a velocidade de circulação aumenta com o aprofundamento na troposfera.

### **3.4.3 – Perturbações Ondulatórias dos Alísios**

As perturbações ondulatórias dos Alísios, POAs, são sistemas meteorológicos que ocorrem devido a interação da Zona de Convergência Intertropical, ZCIT, com os ventos Alísios. Ocorrem com maior frequência no período de abril a agosto. Os grandes complexos convectivos presentes na ZCIT, quando forçados por sistemas frontais do Hemisfério Norte, HN, podem atingir latitudes equatoriais que interagem com os ventos de leste, ventos Alísios. Essa convergência leva para o leste do NEB, grandes volumes de umidade. A combinação entre as massas úmidas e as temperaturas mais baixas, produz precipitações de grandes intensidades. À noite as tempestades podem atingir valores de precipitação da ordem de 50 mm em único dia (MORAES, 2003)

#### **3.4.4 – Brisas Marinha e Terrestre**

As brisas marinhas e terrestres são formadas pelo gradiente de pressão gerado pelo aquecimento e resfriamento do continente e do mar durante o dia e a noite. Durante o dia o continente aquece mais rápido que a água do oceano. O ar sobre o continente se eleva estabelecendo uma baixa de pressão. Sobre a água do mar, mais fria, o ar permanece com pressão superior a da costa. Com o gradiente estabelecido o ar úmido se desloca do mar para o continente. À noite, o processo se inverte, uma vez que a água do mar está a uma temperatura superior a do continente, que esfriou mais rapidamente. A circulação se inverte e o ar desloca-se do continente para o mar. No NEB as brisas marinhas e terrestres advectam e elevam massas de ar úmido para a costa provocando precipitações regulares com maior frequência no período de maio a julho devido a interação do sistema com remanescentes de frentes frias (KOUSKI, 1979)

#### **3.4.5 – Sistemas Convectivos Locais**

Os sistemas convectivos locais são fenômenos meteorológicos de micro escala oriundos de fatores fisiográficos e do aquecimento diferencial da superfície e consequentes processos como evaporação e evapotranspiração. Segundo MOLION e BERNARDO (2002) são mais frequentes no período de fevereiro a março e são responsáveis por grande parte da precipitação no NEB. As células convectivas de chuva são formadas devido a insolação e sofrem advecção devido aos movimentos dos campos de velocidade dos alísios e movimentos as massas de ar .

### 3.5 Medição da Vazão

A medição da vazão  $Q$ , em um curso d'água pode ser realizada de diversas maneiras. Para sua determinação leva-se em conta as dimensões do rio. Para pequenos rios, os métodos mais utilizados são os de vertedores (VILELA e MATOS 1975). Nestes, se utilizam vertedores com secções livres triangulares ou retangulares, que devem ser instalados em trecho retilíneos no rio. A determinação da vazão é feita através da relação de Francis.

$$Q = 1,838 \cdot \left( L - \frac{2 \cdot H}{10} \right) \cdot H^{\frac{3}{2}} \quad \text{Equação. 10}$$

Onde:

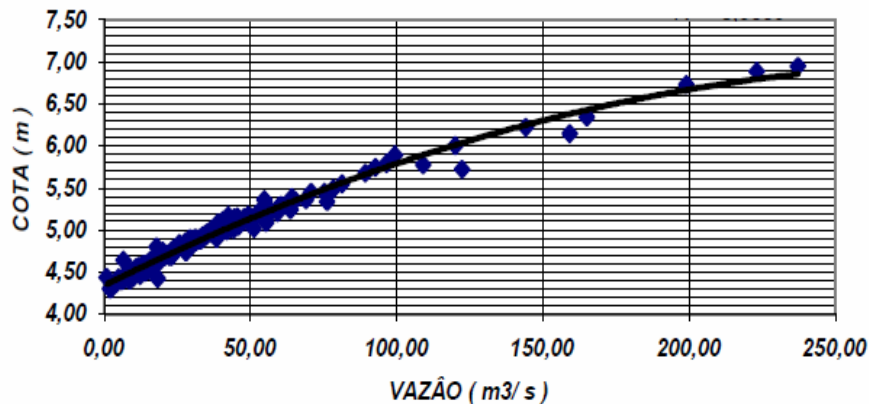
$Q$  – Vazão ( $\text{m}^3/\text{s}$ );

$H$  – Altura da lâmina Líquida acima do vertedor (m);

$L$  – Largura do vertedor (m).

Para cursos de água maiores, os métodos diretos mais utilizados são o de molinetes e de curvas-chave. *Molinete* é um instrumento dotado de uma hélice que ao girar permite a determinação da vazão. Esta é aferida em função da velocidade de giro dos molinetes. O método para determinação da vazão consiste em dividir uma secção transversal do rio em retângulos de áreas conhecidas. Verifica-se a velocidade dos molinetes para diferentes profundidades em um determinado retângulo e calcula-se a sua média. A vazão será determinada através da somatória do produto das médias das velocidades pelas áreas dos retângulos delimitados.

Outro método para determinação de vazão é determinando a *curva-chave* para a vazão em um ponto do rio. Neste, escolhe-se um secção transversal do rio, em um trecho retilíneo com taludes pronunciados de fácil acesso, fixa-se um régua limnimétrica para determinação do nível da água. Mede-se então, através de molinetes a vazão. Com os dados da altura e da vazão constrói-se curva-chave, em ponto determinado do rio. O gráfico relaciona a vazão à altura ou cota do rio. Na figura 3.3 está reproduzida a curva-chave para a Fazenda Boa Fortuna encontrada por MORAES, OLIVEIRA e COSTA (2006).



**Figura 3.3** – Curva-chave para estação Boa Fortuna, Rio Largo, Alagoas.

Fonte: MORAES, OLIVEIRA e COSTA (2006)

Dentre as variáveis relacionadas à vazão, o tempo de concentração é de especial interesse para este estudo, pois determina a resposta da vazão à precipitação sobre a bacia. SILVA e TUCCI (1998) realizaram estudo onde discutem como esta e outras variáveis estão relacionadas à razão entre as vazões máximas e instantâneas.

### 3.6 O Radar

O radar é um instrumento para detecção da dinâmica de alvos por emissão de ondas eletromagnéticas, usualmente microondas. Foi desenvolvido inicialmente com propósitos vigilância contra aeronaves na Segunda Guerra Mundial e posteriormente em estudos meteorológicos (ATLAS, 1990). Atualmente, o radar constitui um importante instrumento para o estudo da atmosfera.

#### 3.6.1 - História do RADAR

O início da história do RADAR começa com os trabalhos teóricos do físico escocês James Clerk Maxwell (1831-1879) (PARKER, 2000). Maxwell por volta de 1865, desenvolve a Teoria Eletromagnética, que como consequência, prediz a existência de ondas eletromagnéticas.

Em 1886, apenas sete anos após a morte prematura de Maxwell, o físico alemão Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894) (PARKER, 2000), em uma aula

experimental, acidentalmente descobre as ondas eletromagnéticas previstas por Maxwell. Hertz, aprofundando seus estudos, descobre ainda que as ondas eletromagnéticas propagavam-se de forma semelhante a da luz. Tinham velocidades iguais as da luz, se moviam em linha reta e eram refletidas e refratadas.

Guglielmo Marconi (1874-1937) (PARKER, 2000) em 1895, a partir dos experimentos de Hertz, conseguiu desenvolver um equipamento capaz de gerar ondas eletromagnéticas e recebê-las a centenas de metros de distância. Em 1901 foi capaz de transmitir um sinal “s” em código Morse da Inglaterra aos Estados Unidos.

Em 1904, o engenheiro alemão Christian Hülsmeyer (1881-1957) (Christian Hülsmeyer and about the early days of radar inventions, 2009), inventa o primeiro radar. denominado por ele mesmo de “Telemobiloscope”. Apesar de ter sido comprovada a sua eficiência na detecção de navios a até 3 quilômetros de distância, não despertou interesse da indústria e da marinha alemãs.

Nikola Tesla (1856-1943) em 1917 afirmou ser possível, através da detecção ondas rádio emitidas por uma estação fixa, determinar a posição, deslocamento e velocidade de objetos que se moviam, como navios. Tesla foi além ao afirmar que a identificação destes alvos móveis poderia ser visualizada através de uma tela fosforescente.

Em 1934, as pesquisas e experimentos de Pierre David, Henri Gutton e Maurice Ponte sobre a transmissão e recepção de ondas de rádio de altas frequências, permitiu o desenvolvimento de um dispositivo capaz de detectar, com grande precisão, aviões. Em 1935 foi instalado um transceptor de ondas de rádio no navio *Normandie*. O objetivo do dispositivo era o de identificar, à distância, possíveis obstáculos para sua navegação.

Na Inglaterra, em 1935, o meteorologista Robert Watson-Watt (1892-1973) (History of Radar, 2010) desenvolveu uma plataforma giratória para localizar tempestades a partir do pulso eletromagnético gerado nos relâmpagos. Watson utilizou, pela primeira vez um osciloscópio acoplado a antena giratória. Assim quando ocorria uma descarga elétrica esta poderia, ao ser visualizada na tela, ser localizada.

Com início da Segunda Guerra Mundial, Watson desenvolveu um dispositivo para detecção de aeronaves através de ondas de rádio, que na época chamava-se

RDF (*Radio Detection Finding*) e implementou uma estrutura fixa e giratória capaz detectar a posição e velocidade dos aviões inimigos, conforme as previsões de Tesla. Posteriormente o dispositivo ficou conhecido por RADAR do inglês *Radio Detecting and Range*. O sucesso do experimento de Watt e sua aplicação imediata, fez o governo inglês produzir muitas outras unidades no litoral da Inglaterra. O radar tornou-se então uma importante arma de defesa dos aliados.

Quando os comprimentos de onda aproximaram-se da ordem dos centímetros, e, portanto, tornavam-se mais precisos, processos atmosféricos, como a precipitação, começaram a ser observados na tela do radar, dificultando a identificação dos aviões, prejudicando assim a vigilância necessária a um país em guerra. Os engenheiros perceberam então que esta era uma real limitação para uma maior definição na posição dos aviões inimigos (ATLAS, 1990). Os meteorologistas, no entanto, viram surgir um novo instrumento para a observação dos fenômenos da atmosfera.

Nos anos seguintes ao término da 2ª Guerra Mundial, os radares foram utilizados na observação da precipitação por David Atlas nos EUA. Nas décadas de 50 a 60 a tele-deteção por radar foi adotada em larga escala nos países do hemisfério norte. A partir de 1973, com o desenvolvimento do radar Doppler foi possível verificar com maior precisão a velocidade da precipitação. A partir desta época foram criadas redes de monitoramento em todos os EUA, alguns países da Europa e Japão.

### **3.6.2 Conceitos fundamentais**

O radar consiste de um dispositivo de emissão e recepção de microondas no intervalo de frequências de 3 GHz a 30 GHz, o que corresponde a um intervalo de comprimentos de ondas de 1cm a 10 cm. Seu funcionamento se deve o fato de a atmosfera ser transparente a esse tipo de radiação e ao efeito de retro-espalhamento Rayleigh (SAUVAGEOT, 1992). Neste último, parte da energia incidente sobre partículas com dimensões da ordem de um décimo do comprimento da onda são refletidas na direção da fonte emissora.

As microondas de um Radar podem ser produzidas em uma cavidade Magnetron ou por uma válvula Klystron. Esta radiação é então conduzida através de



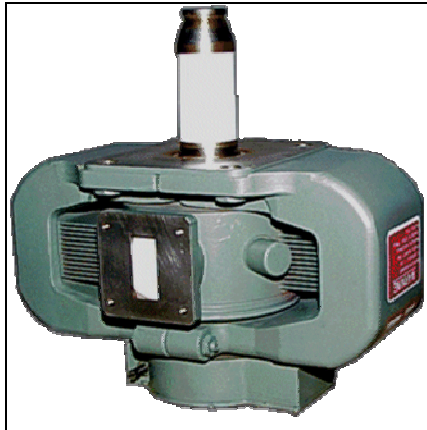
guias de onda até uma antena parabólica que as concentra e as emite na atmosfera (UNIVERSITY OF ILLINOIS, Online Remote Sensing Guide, 1990). As microondas são emitidas em pulsos que duram alguns microssegundos. A radiação ao se propagar na atmosfera sofre o retro-espalhamento Rayleigh ao atingir alvos como chuva e neve, retornando à antena que a concentra e envia para o sistema de registro de saída. Conhecendo o intervalo de tempo entre a emissão e a recepção determina-se a posição do alvo.

### **3.6.3 Componentes de um Radar**

Fundamentalmente o Radar compõe-se de quatro componentes, a saber:

- - Transmissor;
- - Antena;
- - Receptor;
- - Sistema de visualização e armazenamento de dados.

O transmissor constitui-se do circuito que gera a radiação eletromagnética, em geral microondas, que será transmitida a atmosfera pelo radar. O seu principal componente é uma cavidade Magnetron ou válvula Klystron (figura, 3.4). Cujas função é a de produzir pulsos de microondas a partir de uma corrente contínua de alta voltagem. Um circuito oscilador determina a frequência com que esses pulsos são gerados (PRF) servindo de base temporal para todo o sistema do radar. Os pulsos são então conduzidos até o alimentador através das guias de onda. O alimentador então, emite o pulso espalhando-o por toda a superfície da antena. Esta reflete o pulso em uma direção paralela ao seu eixo principal, colimando o pulso. A radiação eletromagnética ao sofrer o retro-espalhamento retorna parcialmente a antena do Radar. O pulso recebido consiste no eco do radar.



**Figura 3.4** Válvula Magnetron VMX 1090 do radar PAR 80.  
Fonte: [www.radartutorial.eu](http://www.radartutorial.eu)

A antena do radar tem como função redirecionar um feixe de ondas eletromagnéticas colimando a radiação emitida pelo alimentador que está localizado no foco da antena. Esta tem também a função de concentrar a radiação refletida pelos alvos para o sistema de recepção do radar. Para tanto, a antena tem uma superfície refletora côncava, geralmente um parabolóide, que obedecendo as leis de reflexão, concentra uma onda incidente, que se propaga na direção de seu eixo principal, em seu foco. Da mesma forma, produz um feixe colimado quando ondas são geradas a partir de seu foco.

O alimentador, os suportes e o refletor da antena são suportados por uma montagem altazimutal automatizada, controlada através de motores elétricos e sensores que indicam tanto a elevação quanto o azimute do eixo principal da antena. O sistema de referência adotado para o radar consiste de um valor para o azimute e outro para a elevação.

O azimute é medido em graus, a partir do Norte ( $0^\circ$ ) nas direções Leste ( $90^\circ$ ), Sul ( $180^\circ$ ) e Oeste ( $270^\circ$ ). O ângulo de altura ou elevação varia de  $0^\circ$  a  $90^\circ$  quando o eixo principal da antena aponta nas direções do horizonte e do zênite respectivamente. O poder de concentração da radiação incidente paralela ao eixo principal da antena é denominado “Ganho” da antena. Geralmente é expresso em dB (decibel). O Ganho de uma antena varia com a distância angular entre a direção do eixo principal da antena e uma direção qualquer. O Ganho é máximo quando as ondas incidem em uma direção paralela ao eixo principal.

A largura angular do feixe do Radar é por definição, aquela em que o ganho varia do valor máximo até – 3 dB.

A energia enviada e recebida através da antena do radar está distribuída espacialmente como indica o diagrama de radiação (figura 3.5). A maior parte da radiação se concentra no lóbulo primário que é simétrico em relação ao eixo principal da parábola refletora da Antena. Os pulsos de microondas são, na sua maior parte, emitidos através do cone definido pelo lóbulo primário. O ângulo sólido do cone, ou a largura do feixe de radiação é definido pelo lóbulo principal. Contudo parte da radiação também é distribuída nos lóbulos secundários e terciários que não estão orientados na direção do eixo principal, como se pode ver no diagrama de radiação na figura 3.5. Essa irradiação espúria provoca um ruído de interferência que tem origem nas múltiplas reflexões dos objetos próximos ao Radar.

A potência retroespalhada ou recebida, no pulso do radar pode ser determinada utilizando a equação do radar (SAUVAGEOT, 1992).

$$P_r = \left( \frac{P_t \cdot \eta_l^2 \cdot A_e \cdot L_r}{4 \cdot \pi \cdot \lambda^2} \right) \cdot L^2 \cdot \frac{\sigma}{r^4} \quad \text{Equação. 11}$$

Onde:

$P_r$  – Potência retroespalhada (mW);

$P_t$  – Potência total emitida (kW);

$\eta_l$  – Eficiência da Antena (adimensional);

$A_e$  – Área efetiva da antena (m<sup>2</sup>);

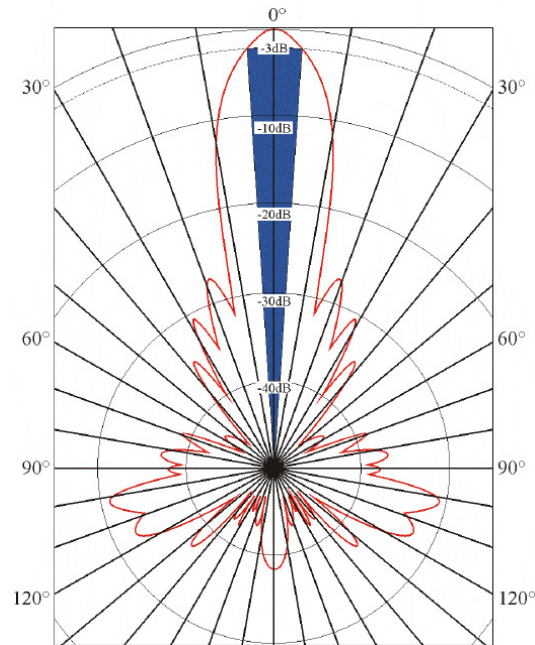
$L_r$  – Atenuação de largura de banda (adimensional);

$\lambda$  – comprimento de onda (cm);

$L$  – Atenuação de propagação (adimensional);

$\sigma$  – Secção reta de retroespalhamento do alvo (m<sup>2</sup>);

$r$  – Distância do alvo (m);



**Figura 3.5** – Distribuição da energia eletromagnética emitida no pulso do radar.  
Fonte (QUINTÃO, 2004).

Sendo os alvos gotas de chuva de até 6 mm de diâmetro vale a lei de espalhamento de Rayleigh. A secção reta de retroespalhamento para a gota de chuva será, portanto:

$$\sigma = \frac{\pi^5}{\lambda^4} \cdot |K|^2 \cdot D^6 \quad \text{Equação. 12}$$

Onde:

$\sigma$  - secção reta de retroespalhamento (m<sup>2</sup>);

$\lambda$  - comprimento de onda (cm<sup>2</sup>);

$|K|^2$  - Fator dielétrico. Para a água na atmosfera  $|K|^2 = 0,93$ ;

$D$  - diâmetro da gota (m)

Considerando a potência retroespalhada dentro do volume definido pelo lóbulo principal, ser aproximada por uma distribuição gaussiana, então esta potência pode ser calculada a partir da equação 13.

$$\bar{P}_r = \left( \frac{P_t \cdot \lambda^2 \cdot G_0^2 \cdot \theta_0 \cdot \phi_0 \cdot c \cdot \tau \cdot L_r}{7005,2746} \right) \cdot L^2 \cdot \frac{\eta}{r^2} \quad \text{Equação. 13}$$

Onde:

$\bar{P}_r$  - Potência média recebida (mW);

$P_t$  - Potência emitida (kW);

$\lambda$  - Comprimento de onda (cm);

$G_0$  - Ganho da antena (adimensional);

$\phi_0, \theta_0$  - largura do feixe (°);

$c$  - velocidade da luz no vácuo (m/s);

$\tau$  - Duração do pulso ( $\mu$ s);

$L_r$  - Atenuação de banda (adimensional);

$L$  - Atenuação de propagação (adimensional);

$\eta$  - refletividade do radar ( $\text{cm}^{-1}$ );

$r$  - Distância do alvo (m).

A refletividade do radar pode ser encontrada a partir da distribuição dos tamanhos das gotas de chuva (DTG).

$$\eta = \int_{Min}^{Máx} \sigma(D) \cdot N(D) dD \quad \text{Equação. 14}$$

Onde:

$\eta$  - Refletividade do radar ( $\text{cm}^{-1}$ );

$\sigma(D)$  - Área de secção reta de uma gota de diâmetro  $D$  ( $\text{cm}^2$ );

$N(D) dD$  - Concentração de gotas por unidade de volume ( $\text{cm}^{-4}$ );

Das equações e verifica-se que:

$$\eta = \frac{\pi^5}{\lambda^4} \cdot |K|^2 \cdot \int_{Min}^{Máx} D^6 \cdot N(D) dD \quad \text{Equação. 15}$$

A integral da equação 15 determina o fator de refletividade  $Z$  para uma distribuição de gotas de chuva.

$$Z = \int_{Min}^{Max} D^6 \cdot N(D)dD \quad \text{Equação. 16}$$

Onde:

Z – fator de refletividade do radar ( $m^6m^{-3}$ )

### 3.6.4 A Relação Z - R

Conhecendo o fator de refletividade do radar pode-se determinar a intensidade ou taxa de precipitação R através da relação Z-R.

$$Z = a \cdot R^b \quad \text{Equação. 17}$$

Onde:

Z – fator de refletividade do radar ( $m^6m^{-3}$ );

R – Taxa de precipitação (mm/h);

a e b - coeficientes de relação.

Os coeficientes a e b são encontrados a partir de estudos estatísticos levados em conta a partir da dados pluviométricos com o fator de refletividade do sinal do radar.

Para Maceió, MORAES (2003) encontrou a relação de uso geral.

$$Z = 176,5 \cdot R^{1,29} \quad \text{Equação. 18}$$

Importante perceber que Z, o fator de refletividade, independe do comprimento de onda do radar. diferentemente da refletividade  $\eta$  (QUINTÃO, 2004).

É conveniente também, utilizar uma escala em decibéis, logarítmica, para expressar Z.

$$dBZ = 10 \cdot \log Z \quad \text{Equação. 19}$$

Considerando a equação 13 para a potência média retroespalhada, tomando-se sua forma logarítmica e em seguida agrupando as constantes obtém-se a relação entre o fator de refletividade do radar e a distância do alvo.

$$Z(\text{dB}) = P_r + 20 \cdot \log r + C \quad \text{Equação. 20}$$

Onde:

Z (dB) – Fator de refletividade em escala logarítmica;

$P_r$  – Potência recebida (dB S/N);

r – Distância (km);

C – Constante de calibração.

Conforme se propaga na atmosfera o pulso do Radar se alarga e eleva em relação ao solo, isso ocorre devido a curvatura da Terra. A tabela 3.1 indica as alturas do feixe de um a radar a partir do ângulo de elevação. Considera-se uma abertura angular do feixe de  $1,5^\circ$  e uma deflexão padrão da atmosfera (QUINTÃO, 2004).

**Tabela 3.1.** Indicação da altura em km, e a largura do feixe em função da elevação e distância ao radar.

Elevação [°]	Distância [km]															
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	150	200	250	300	350	400
0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	1,3	2,4	3,7	5,3	7,2	9,4
0,5	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6	0,7	0,9	1,1	1,3	1,5	2,6	4,1	5,9	7,9	10,3	12,9
1,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,3	1,5	1,8	2,0	2,3	3,9	5,8	8,0	10,5	13,3	16,4
1,5	0,3	0,5	0,8	1,1	1,5	1,8	2,1	2,5	2,8	3,2	5,3	7,6	10,2	13,1	16,4	19,9
2,0	0,4	0,7	1,1	1,5	1,9	2,3	2,7	3,2	3,6	4,1	6,6	9,3	12,4	15,8	19,4	23,4
2,5	0,4	0,9	1,4	1,8	2,3	2,8	3,3	3,9	4,4	5,0	7,9	11,1	14,6	18,4	22,5	26,9
3,0	0,5	1,1	1,6	2,2	2,8	3,4	4,0	4,6	5,2	5,8	9,2	12,8	16,8	21,0	25,5	
3,5	0,6	1,2	1,9	2,5	3,2	3,9	4,6	5,3	6,0	6,7	10,5	14,6	19,0	23,6	28,6	
4,0	0,7	1,4	2,2	2,9	3,6	4,4	5,2	6,0	6,8	7,6	11,8	16,3	21,2	26,3		
4,5	0,8	1,6	2,4	3,2	4,1	4,9	5,8	6,7	7,6	8,5	13,1	18,1	23,4	28,9		
5,0	0,9	1,8	2,7	3,6	4,5	5,5	6,4	7,4	8,4	9,3	14,4	19,9	25,5			
10,0	1,8	3,6	5,3	7,1	9,0	10,8	12,6	14,5	16,3	18,2	27,8					
15,0	2,7	5,4	8,1	10,8	13,5	16,3	19,0	21,8	24,6	27,4						
20,0	3,6	7,3	11,0	14,7	18,3	22,0	25,8	29,5								
25,0	4,7	9,3	14,0	18,7	23,5	28,2										
30,0	5,8	11,6	17,4	23,2	29,0											
35,0	7,0	14,0	21,1	28,1												
40,0	8,4	16,8	25,2													
45,0	10,0	20,0														
50,0	11,9	23,9														
55,0	14,3	28,6														
60,0	17,3															
Largura do feixe ( $1,5^\circ$ ) [km]	0,3	0,5	0,8	1,0	1,3	1,6	1,8	2,1	2,4	2,6	3,9	5,2	6,5	7,9	9,2	10,5

Fonte: NCAR - PDAS

Os radares são classificados a partir do comprimento de onda ou freqüência da radiação emitida. Cada banda de emissão indica estas características. No quadro

3.1 estão indicados os limites máximos das freqüências e mínimos dos comprimentos de onda, para cada banda do radar.

**Quadro 3.1.** Bandas de rádio emissão com valores máximos de freqüências e mínimos de comprimentos de onda. Fonte ARRL Handbook, 1995.

Banda	L	S	C	X	Ku	K	Ka
Freqüência (GHz)	2	4	8	12,5	18	26,5	40
$\lambda$ (cm)	15	7,5	3,75	2,4	1,67	1,13	0,75

O receptor do Radar constitui-se de um receptor de rádio convencional super-heteródino<sup>1</sup> de alta sensibilidade (RadarTutorial.eu, 2010). O receptor está conectado a linha de alimentação através de uma chave duplexadora que interrompe o circuito quando o transmissor está enviando os pulsos de radiação para a antena. Nos intervalos entre as emissões dos pulsos a chave duplexadora religa o receptor à linha de alimentação da antena, permitindo assim, a recepção do sinal de retorno provocado pelo retro-espalhamento dos alvos. Determinando o intervalo de tempo correspondente ao envio e a recepção do pulso pode-se facilmente determinar a distância até o alvo (equação 21).

$$r = c \cdot \Delta t / 2 \quad \text{Equação. 21}$$

Determinado o azimute e a elevação do eixo principal da antena, localiza-se a posição do alvo. O alcance do sinal de radar ( $r_{\text{máx}}$ ) pode também ser determinado a partir da freqüência de repetição de pulso com a equação 22.

$$r_{\text{máx}} = c \cdot \frac{1}{2} \cdot f_{\text{rp}} \quad \text{Equação. 22}$$

A visualização do sinal do Radar foi feita inicialmente com a utilização de osciloscópios que sincronizados com a freqüência de recorrência de pulsos, permite verificar o nível do sinal recebido em função do tempo, o que indica a localização do alvo, como visto anteriormente. Outra forma de visualizar os dados do radar é utilizar um tubo de raios catódicos (CRT). No tubo a localização do radar está no centro, a varredura do sinal é feito na direção radial, do centro para a extremidade.

<sup>1</sup> Circuito de recepção de rádio de alta seletividade obtida a partir da combinação de uma freqüência fixa com a freqüência da onda recebida.



A varredura também se desloca acompanhando o giro do radar, apresentando, dessa forma, uma visualização bidimensional com elevação fixa. Esta visualização é conhecida pela sigla inglesa PPI (*Plan Position Indicator*). Pode-se também, obter uma visualização vertical da atmosfera, mantendo-se o azimute fixo e fazendo variar a elevação da antena do radar. Este tipo de varredura é conhecido como RHI (*Ranging Height Indicator*). Atualmente a visualização tanto em PPI como em RHI se dá através de computadores que são conectados aos radares através de conversores A/D. Estes convertem o sinal analógico do radar em sinal digital possibilitando assim, que os dados do radar sejam apresentados nas suas telas e armazenados digitalmente.

Outros sistemas que compõem o radar são: o sistema de alimentação de corrente elétrica, a montagem altazimutal automatizada e a cúpula do radar. A cúpula do radar tem a função de proteger contra as intempéries a Antena. É feita geralmente de fibra de vidro que é praticamente transparente à radiação de microondas do Radar.

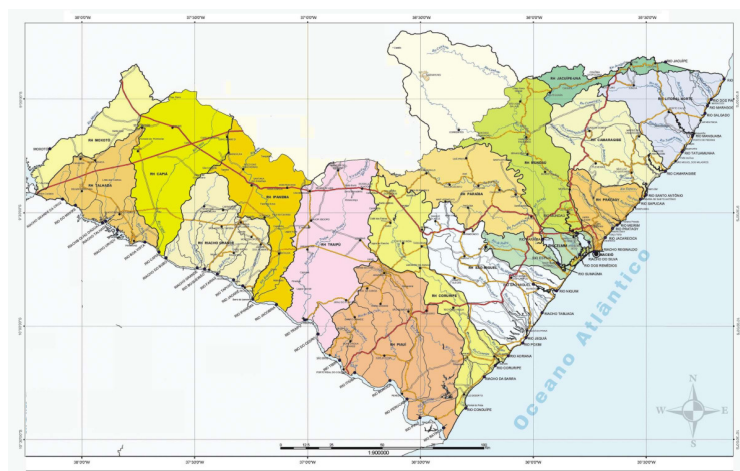
## 4 - METODOLOGIA

O objetivo deste trabalho é do buscar uma correlação entre as imagens obtidas com o radar e a vazão em um ponto da Bacia Hidrográfica do Mundaú com o intuito de estimar o risco de cheias no rio. Para isso, foi desenvolvido um algoritmo e posteriormente um código de leitura e análise das imagens disponíveis no site do SIRMAL e das séries de dados histórico de vazão na Fazenda Boa Fortuna na cidade de Rio Largo, Alagoas. Estas séries foram obtidas através do sítio da Agência Nacional de Águas - ANA.

### 4.1 - Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú

#### 4.1.1 Localização

A Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú (BHM) está localizada na região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental de acordo com resolução 32/2003 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH). Esta localiza-se na parte centro-oriental do Nordeste brasileiro. A BHM está compreendida entre as coordenadas 8º 41' 34" e 9º 14' 00" de latitude sul, e 36º 03'36" e 36º 37' 27" de longitude oeste. A BHM estende-se de Pernambuco à Alagoas, constituindo assim um rio de domínio federal como se vê na figura 4.1.



**Figura 4.1** Localização da Bacia Hidrográfica do Mundaú, nos Estados de Pernambuco e Alagoas. Fonte: Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos de Alagoas, (ALAGOAS, 2010).

A BHM tem área total de 4.126 km<sup>2</sup>, sendo 2.155 km<sup>2</sup> em Pernambuco e 1971 km<sup>2</sup> em Alagoas. Compreende 30 municípios, quinze em Pernambuco e quinze em Alagoas, abrangendo uma população de 441.000 habitantes nos dois Estados (IBGE 2007). Ao Norte a BHM é limitada pela bacia do Rio Una e a nordeste pelas bacias dos rios Pratagi, Meirim e Reginaldo, ao sul e sudoeste limita-se com a bacia do Rio Paraíba do Meio e a leste na faixa litorânea com o oceano Atlântico.

A nascente do Rio Mundaú localiza-se no município pernambucano de Garanhuns, na parte sudeste do planalto da Borborema. Tem como principais tributários os rios Canhoto e Inhaúma. A tabela 4.1(a) mostra os municípios de Pernambuco e suas respectivas áreas.

**Tabela 4.1(a).** Municípios total ou parcialmente compreendidos na BHM.  
Fonte: CARVALHO 2002.

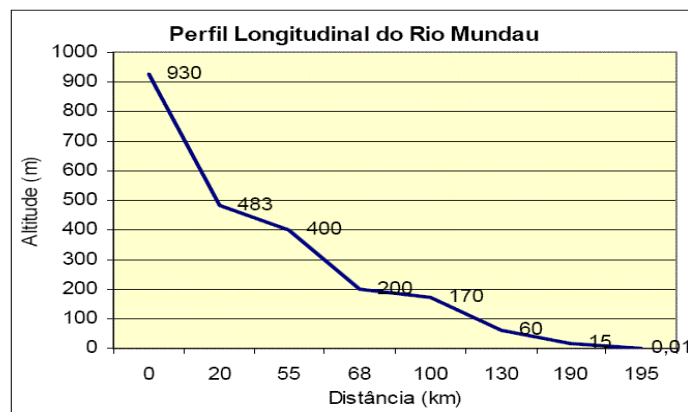
<b>Pernambuco</b>		
Município	Área Total (km <sup>2</sup> )	Área na bacia (km <sup>2</sup> )
1. Angelim	126,7	126,7
2. Brejão	161,9	114,6
3. Caetés	324,2	49,9
4. Calçado	56	16,3
5. Canhotinho	423	386,6
6. Capoeiras	344,3	91,2
7. Correntes	285,2	285,2
8. Garanhuns	467,8	383,6
9. Jucati	109,4	87,4
10. 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>

Estes dois Rios unem-se ao Mundaú no Município de União dos Palmares em Alagoas. O Rio Mundaú atravessa toda a região centro-oriental, zona da mata do Estado de Alagoas, até chegar a sua foz afogada na lagoa homônima (TENÓRIO 1985). Os municípios de Alagoas que estão contidos na bacia do Mundaú e suas respectivas áreas estão apresentados na tabela 4.1(b).

**Tabela 4.1(b).** Municípios total ou parcialmente compreendidos na BHM.  
Fonte: CARVALHO 2002.

<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>

Tem uma extensão de aproximadamente 195 km e um desnível 930 m, sendo esta mais acentuada nos primeiros 20 km, onde o desnível atinge 447 m, conforme se vê na figura 4.2



**Figura 4.2.** Perfil Longitudinal do Rio Mundaú. Fonte: CARVALHO 2002.

#### 4.1.2 Densidade demográfica

A BHM, em seus 30 municípios, compreende uma população de aproximadamente 441.000 pessoas, sendo 220 mil em Pernambuco e 221 mil em

Alagoas. Tem-se então uma densidade demográfica de aproximadamente 107 hab/km<sup>2</sup>.

#### **4.1.3 Pluviometria.**

A precipitação sobre a bacia tem origem em sistemas meteorológico com diferentes escalas, 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, que são exemplos de processos climáticos que alteram a distribuição das chuvas no NEB segundo TENÓRIO (2003). MEDEIROS e MOLION (2002) buscaram uma 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).

#### **4.1.4 Clima.**

O clima predominante na BHM segundo a classificação de Köppen-Geiger é As' (A-Tropical, s'- com chuvas de inverno-outono) e Bsh (B-Árido, s- com chuvas de inverno, h-seco e quente temperatura média anual > 18°C) com a estação seca no período primavera-verão e a estação chuvosa no período outono-inverno.

#### **4.1.5 Temperatura**

As baixas latitudes em que se encontra a BHM potencializa a radiação solar elevando suas temperaturas, intensificando o ciclo hidrológico. As temperaturas médias anuais para a BHM, obtidas de estações climatológicas de Maceió e Garanhuns apresentam amplitude de 2,8° C para uma média de 24,8°C em Maceió e uma amplitude de 3,7°C para uma média de 20,5°C em Garanhuns. As temperaturas médias máximas ocorrem no período de novembro a março, para Maceió uma amplitude de 3,4°C para uma temperatura média máxima de 28,9°C. Em Garanhuns,

a temperatura média máxima foi de 25,5°C com amplitude de 7,7°C. Já as temperaturas mínimas, que ocorrem no período de junho e setembro, apresentaram as médias mínimas de 16,9°C com amplitude de 3,2°C para Garanhuns e 21,6°C com amplitude de 2,5°C para Maceió.

#### **4.1.6 Umidade relativa**

Tomou-se como base comparativa para a BHM, os dados de umidade relativa do ar, relatados no trabalho de CARVALHO (2002), para as estações de Maceió e Garanhuns. Neste trabalho, verifica-se que os valores de médias mensais são superiores a 75%, atingindo máximos de 90% no período chuvoso.

#### **4.1.7 Insolação**

A insolação sobre a BHM diminui no período chuvoso quando aumenta a nebulosidade. Os valores médios anuais da insolação, encontrados são de 2.308 horas para Garanhuns e 2.609 horas para Maceió. (CARVALHO, 2002)

#### **4.1.8 Evaporação**

A evaporação é uma importante variável no ciclo hidrológico. Estudos indicam ser uma das principais causas de chuvas e grande parte do Nordeste do Brasil. Para a BHM as estações climatológicas de Maceió e Garanhuns registraram uma total anual médio de 1.217 mm para Maceió e 1.077mm para Garanhuns. Dos dados verifica-se que cerca de 3 a 5 mm/ dia em média são evaporados nas duas cidades e portanto, em toda a BHM.

#### **4.1.9 Formação Geológica**

A bacia Hidrográfica do Mundaú localiza-se sobre duas províncias geológicas: a província Costeira e Marginal Continental do Nordeste e a província Borborema. O Alto Mundaú tem seu curso sobre a região Cratogênica Pernambuco-Alagoas, enquanto o Médio e o Baixo Mundaú sobre a bacia sedimentar Sergipe-Alagoas. Os tipos líticos na bacia são variados com predominância de migmatitos.

#### **4.1.10 Solo e Vegetação.**

O PDRH Mundaú (1999) indica haver variadas feições fisiográficas na BHM. Isto é resultado dos fatores geológicos e climáticos diversos encontrados na bacia.

Em Pernambuco encontram-se na BHM os climas agreste, micro-clima de altitude, em Garanhuns, e zona da mata úmida. Em Alagoas, o clima da zona da mata úmida predomina até a foz na Lagoa Mundaú.

No Alto Mundaú, na região agreste da BHM o Latosol e o Regosol predominam, enquanto na região até a divisa com Alagoas, o solo Podzólicos e Latosol são mais frequentes.

#### 4.2 Resumo das características físicas da BHM

O Quadro 4.1 apresenta o resumo das características físicas e geográficas da BHM. Estas permitem uma visão geral da área de estudo deste trabalho.

**Quadro 4.1** - Características Físicas e Geográficas da BHM.

Características	Unidades	Valores
Localização Geográfica		
Paralelos	° ' "	8°41'34" S
	° ' "	9°14'00" S
Meridianos	° ' "	36°03'36" O
	° ' "	36°37'27" O
População	habitantes	441.000
Área	km <sup>2</sup>	4.126
Perímetro	km	340
Densidade Demográfica	hab/km <sup>2</sup>	106,9
Número de municípios	municípios	30
Extensão	km	195
Declividade	m	930
Precipitação anual		
Alto Mundaú	mm	1080
Médio Mundaú	mm	1600-2000
Baixo Mundaú	mm	1200
Clima		As' e Bsh
Temperatura média anual	°C	20,5° a 24,5°
Umidade relativa	-	75% a 90%
Insolação	h	2.308 a 2609
Evaporação	mm	1077 a 1217
Formação geológica	-	Variada
Hidrologia		
Coeficiente de Compacidade	-	1,48
Fator de forma	-	0,11
Extensão média de escoamento	km	6,08
Densidade de Drenagem	km/km <sup>2</sup>	0,26

### 4.3 Estação Hidrológica da Fazenda Boa Fortuna

Em operação desde outubro de 1965 até agosto de 2010, a estação hidrológica da fazenda Boa Fortuna em Rio Largo, Alagoas, está sob a responsabilidade da Agência Nacional de Águas. É uma estação com codificação no curso d'água, com escalas para medições do nível d'água, de medições de descargas líquidas e sólidas, de qualidade de água e telemétrica (BRASIL, 2009). Na figura 4.3. se vê a localização da estação às margens do Rio Mundaú. Abaixo segue quadro com dados sobre a estação.

**Quadro 4.2** – Dados da estação hidrológica da Fazenda Boa Fortuna, Rio Largo, Alagoas. Fonte BRASIL (2009)

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

A estação localizava-se às margens do Rio Mundaú, na Fazenda Boa Fortuna e foi totalmente destruída com a enchente de junho de 2010. Contava com uma casilha metálica, figura 4.4, que abrigava equipamentos para telemetria: datalogger, antena, painel solar e baterias. Contava também, com um pluviômetro e sensor de nível.





**Figura 4.3** – Estação Hidrológica da Fazenda Boa Fortuna e Rio Mundaú.



**Figura 4.4** Estação Hidrológica da Fazenda Boa Fortuna,.

Ao lado da estação telemétrica foi instalada uma escala de réguas limnimétricas, figura 4.5, para leitura direta do nível do rio. As leituras das cotas são realizadas diariamente 07 e 17 horas por técnico da ANA. A estação automática efetuava leituras a cada minuto, enviando os dados ao satélite.



**Figura 4.5** – Réguas limnimétricas da estação da Fazenda Boa Fortuna.

#### **4.4 O Sistema de Radar Meteorológico de Alagoas – SIRMAL**

O Sistema de Radar Meteorológico de Alagoas, SIRMAL, foi concebido pelo Departamento de Meteorologia da Universidade Federal de Alagoas em 1995. Em 2001 através de um convênio cooperação científica e tecnológica com o Instituto de Pesquisas Meteorológicas da UNESP – Bauru e com o apoio do Sindicato dos Usineiros do Estado de Alagoas, o radar de banda C WR-100-5/EEC foi adquirido pela UFAL. Este radar, desenvolvido pelo EEC – USA em 1973, entrou em operação no IPMet da UNESP – Bauru - SP em 1974. Em janeiro de 2003 entrou em operação no Campus A.C. Simões da UFAL em Maceió (QUINTÃO, 2004). Com sua instalação em Maceió, o Radar foi modernizado ao ser integrado ao Sistema de Armazenamento de Dados SASSANDRA, desenvolvido pelo Laboratório de Aerologia – Université - Paul Sabatier, França. Posteriormente foram desenvolvidos outros programas, pela equipe do Radar, e um site na internet onde são disponibilizados dados e produtos do SIRMAL ([www.ufal.br/radar](http://www.ufal.br/radar)).

Com o sistema de digitalização das imagens do Radar foi possível desenvolver um monitoramento mais eficiente da precipitação sobre Alagoas. As imagens captadas pelo radar são digitalizadas pelo programa SASSANDRA e depois são formatadas pelos programas RADAR e RADAR AUTO para serem disponibilizadas no site do radar. Com esses implementos o SIRMAL pôde responder as necessidades de previsões meteorológicas de vários setores da sociedade como: Agricultura, contribuindo com o setor sucro-alcooleiro do Estado possibilitando uma maior produtividade; a Pesquisa, no desenvolvimento de novos estudos meteorológicos no nordeste do Brasil; a Defesa Civil, através de boletins de alerta e monitoramento de eventos severos na atmosfera e que permite emitir previsões com horas de antecedência, minimizando a perda de recursos e principalmente de vidas; nas Atividades Portuárias, trazendo informações importantes para o planejamento e gerenciamento de cargas dos graneleiros e trânsito naval no porto de Maceió.

#### 4.4.1 Localização do Radar



**Figura 4.6.** Sistema de Radar Meteorológico de Alagoas-SIRMAL localizado no campus da UFAL, Maceió, Alagoas.

O Radar está localizado no Campus A.C. Simões em Maceió, Alagoas. A escolha do local levou em conta não apenas as atividades de operacionais, mas também, e principalmente as de ensino e pesquisa. Através de um projeto financiado pela Agência Nacional de Águas, ANA, pelo Conselho Nacional de Pesquisas, CNPq e Fundação de Amparo à Pesquisa de Alagoas foi construído um prédio de sete andares onde foi instalado o radar e as equipes de operação, pesquisa e administração, conforme (figura 4.6). As coordenadas do Radar são apresentadas no quadro a seguir .

**Quadro 4.3** Coordenadas geográficas e altitude do SIRMAL (datum WGS-84 – precisão:  $\pm 5$  m).

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

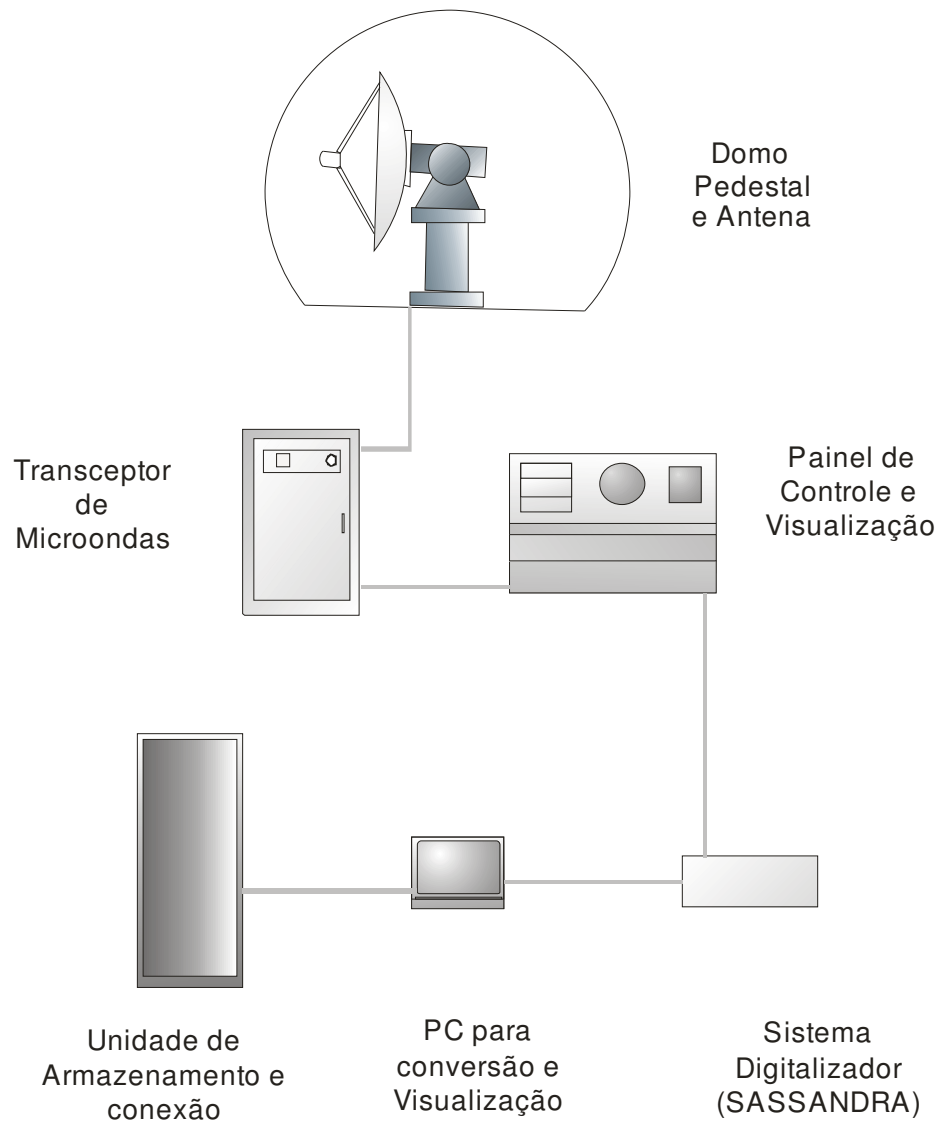
#### 4.4.2 Estrutura do SIRMAL

O sistema do radar compõe-se das unidades: Domo, pedestal e antena; Transceptor de microondas; Painel de controle e visualização PPI e RHI; Sistema digitalizador de imagens (SASSANDRA), mostrados na (figura 4.7); PC e unidade de armazenamento e conexão. Na figura 4.8 está representado um esquema das unidades do SIRMAL.



**Figura 4.7** – Painel de controle e visualização analógica do sinal do radar. À esquerda embaixo módulo de digitalização do SASSANDRA.

O Sistema permite a detecção, visualização e digitalização dos campos de chuva. Através da relação entre a refletividade do sinal e da intensidade da chuva, relação Z-R, é possível aferir variáveis como duração das células de chuvas, área de abrangência, volume precipitado em uma determinada área; deslocamento e a velocidade dos campos de chuva pode também ser obtidos com imagens sucessivas. A figura 4.8 mostra a integração dos componentes do SIRMAL.



**Figura 4.8** – Componentes do Sistema de Radar Meteorológico de Alagoas.

#### 4.4.3 Características Técnicas

As características técnicas do radar estão relacionadas na tabela 4.2.

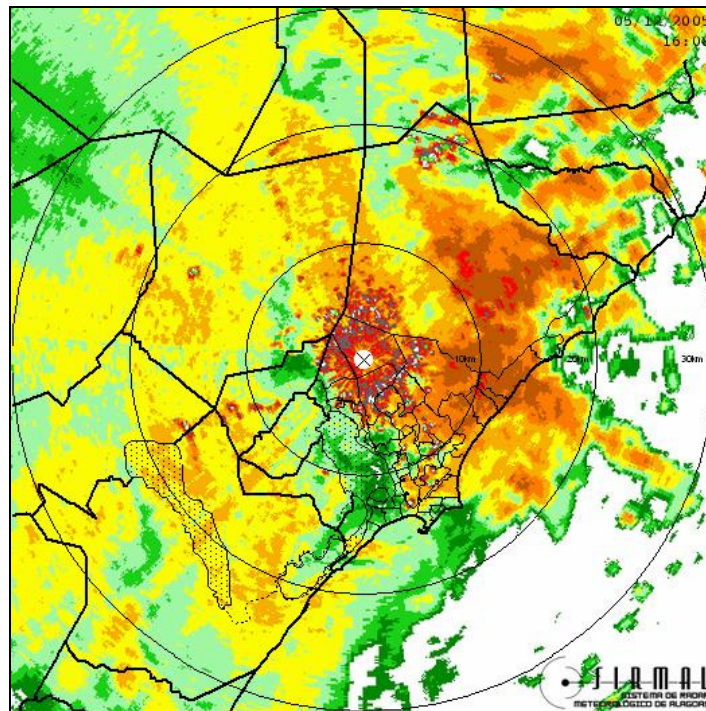
**Tabela 4.2** Características técnicas do radar Banda C WR-100-5/EEC.  
Fonte: SIRMAL.

<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
Energia de alimentação	120V ~18%, monofásica
Consumo de energia	2500W (máximo)
Comprimento de onda ( $\lambda$ )	5,4 cm
Sinal Mínimo Detectável	-105 dBm
Freqüência 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°

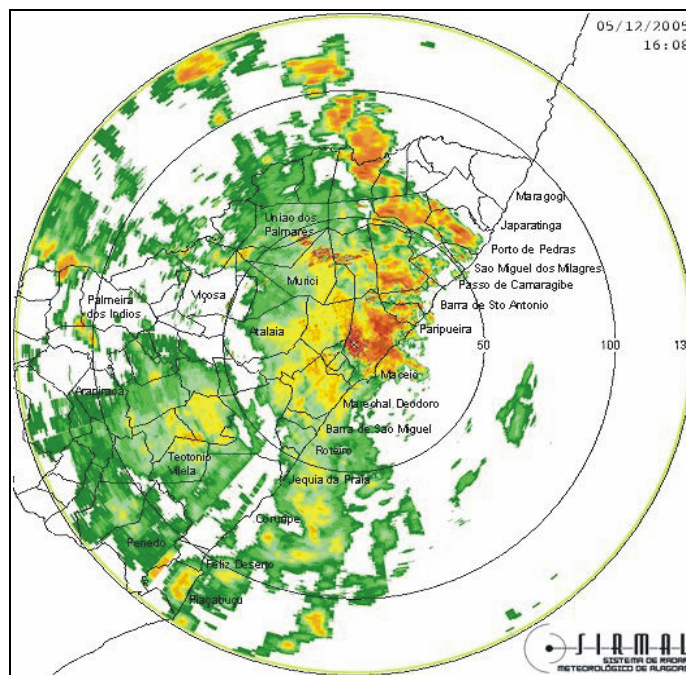
#### **4.4.4 O Sistema de digitalização de imagem SASSANDRA**

O sistema SASSANDRA foi desenvolvido por técnicos da UNESP, UPS e UFAL e tem a finalidade de converter o sinal analógico em um arquivo digital de dados de formato proprietário, com extensão RD. Esse arquivo é composto por uma seqüência de dados, que representam uma radial obtida a partir da integração de 64 pulsos do radar (QUINTÃO, 2004). A visualização dos dados é obtida a partir do programa RADAR, do SASSANDRA.

Para a disponibilização da imagem na internet, o programa RADAR AUTO converte o arquivo RD em formato gif e posteriormente, após redução de seu tamanho, converte este para o formato .jpg. Estes arquivos, na escala 130, é que serão processados pelo programa PEVva e PEVx. Abaixo, nas figuras 4.9, 4.10, 4.11 e 4.12 seguem imagens obtidas com o programa RADAR AUTO nas escalas, 30 km, 130 km, 250km e 380 km respectivamente. .

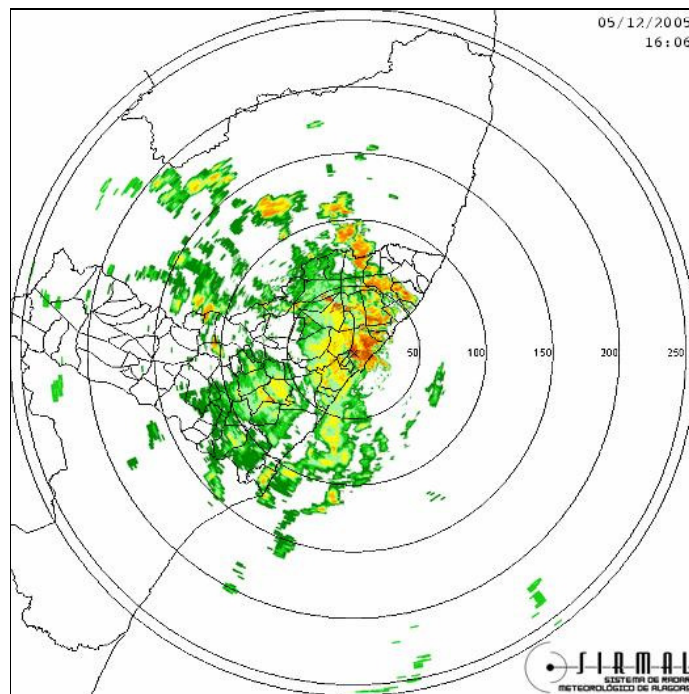


**Figura 4.9** – Imagem na escala 30 km do dia 05 de dezembro de 2005, as 16:06h

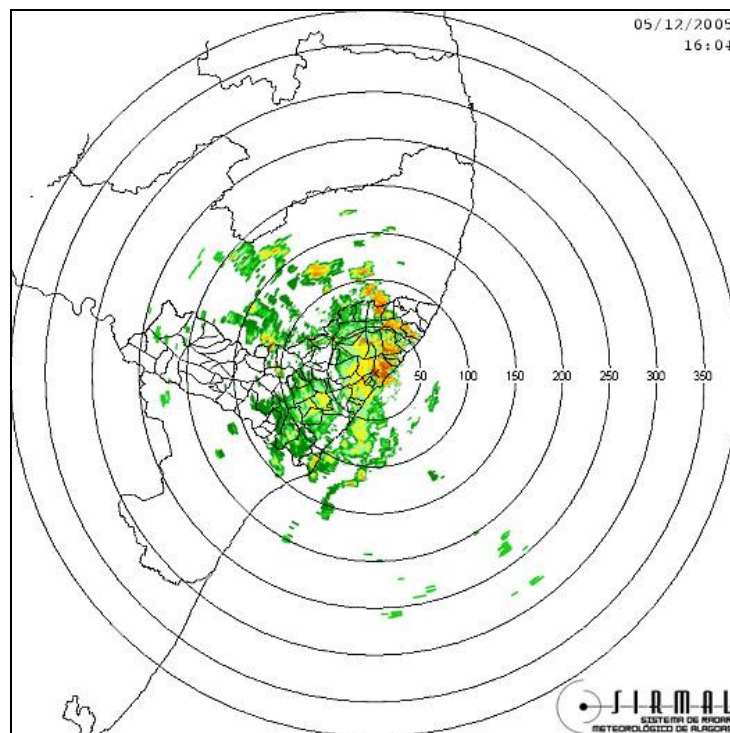


**Figura 4.10** – Imagem na escala 130 km do dia 05 de dezembro de 2005, as 16:08h.





**Figura 4.11** – Imagem na escala 250 km do dia 05 de dezembro de 2005, as 16:06h.



**Figura 4.12** – Imagem na escala 380 km do dia 05 de dezembro de 2005, as 16:04h

#### 4.5 Desenvolvimento do algoritmo e código

O trabalho consistiu em estimar a vazão em um ponto do rio Mundaú a partir do sinal do radar. Inicialmente pensou-se em utilizar as imagens brutas geradas pelo sistema de digitalização do radar, SASSANDRA. Contudo, mostrou-se mais prático ao nível do usuário, a utilização das imagens gráficas disponibilizadas no site do SIRMAL. Dessa forma, o usuário poderá obter as imagens na escala de 130 km, que são disponibilizadas no sítio do SIRMAL e proceder, com a utilização de programa especialmente desenvolvido para este objetivo, a monitoração da vazão do Rio Mundaú.

A grande problemática consistia em correlacionar o fator de refletividade do radar com a vazão em um ponto específico da bacia do rio Mundaú. A correlação indireta entre a vazão e o fator de refletividade é obtida através da relação Z-R, esta contudo, pode ser alterada por diversos fatores como exposto por MOREIRA (2005), o que torna o problema mais complexo. Outro problema consiste na parametrização dos campos de chuva, devido a características estruturais e grande variabilidade da precipitação como foi demonstrado por TENÓRIO e SAUVAGEOT (1996). A utilização de modelos para a determinação da precipitação através do sensoriamento remoto, como exposto por MORAES (1992) pode, apesar de todo o conjunto de variáveis, apresentar resultados promissores a despeito de ser uma avaliação com grande dispersão. Escolheu-se a estação hidrológica da ANA na Fazenda Boa Fortuna em Rio Largo, Alagoas. Esta estação fica próxima à foz afogada do rio na lagoa homônima e possui uma série histórica de dados de vazão desde janeiro de 1974.

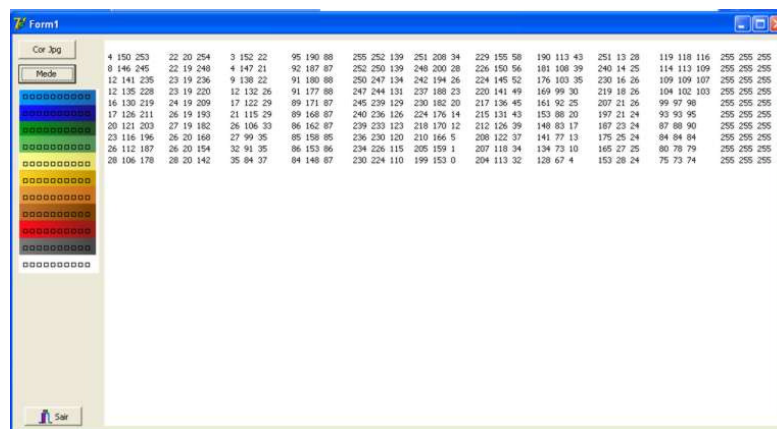
O SIRMAL possui um conjunto de imagens digitais desde 2003. O método que se resolveu adotar foi o de extrair das imagens do radar grandezas associadas diretamente a vazão. A precipitação foi a escolha óbvia, uma vez que é a principal variável e que gera a vazão. Contudo, a distribuição espaço-temporal da precipitação e também a descontinuidade na série de imagens, obtidas com o sistema do SIRMAL e o lapso de tempo com que estes dados foram colhidos tornaram-se elementos complicadores no processo.

Verificou-se que os dados disponíveis foram obtidos em sua grande maioria, em intervalos de tempo de uma hora. Este, portanto seria a unidade básica, ou lapso de tempo entre as medidas, o que certamente produz uma perda de informação, uma vez que os fenômenos meteorológicos associados ao trabalho têm escalas de

tempo inferiores a esta. Construiu-se então, um programa de computador, em linguagem Object Pascal, que obtém, a partir do volume precipitado acumulado em um dia na BHM, a altura da precipitação, considerando ser esta distribuída sobre toda a extensão da bacia. A partir dos dados diários procurou-se a correlação entre a medida da vazão, obtida pela ANA e a altura encontrada com as imagens do radar. Verificando os momentos em que ocorriam picos de vazão e de alturas das precipitações foi possível determinar para quais valores da última obtinha-se um aumento significativo na vazão com potencial de cheia, após o tempo de concentração, encontrado na análise dos dados. Estes valores são as referências para uma estimativa de cheia a partir da análise do sinal do radar. O desenvolvimento do programa se deu em duas etapas, a saber: a etapa de análise e a de finalização para o usuário.

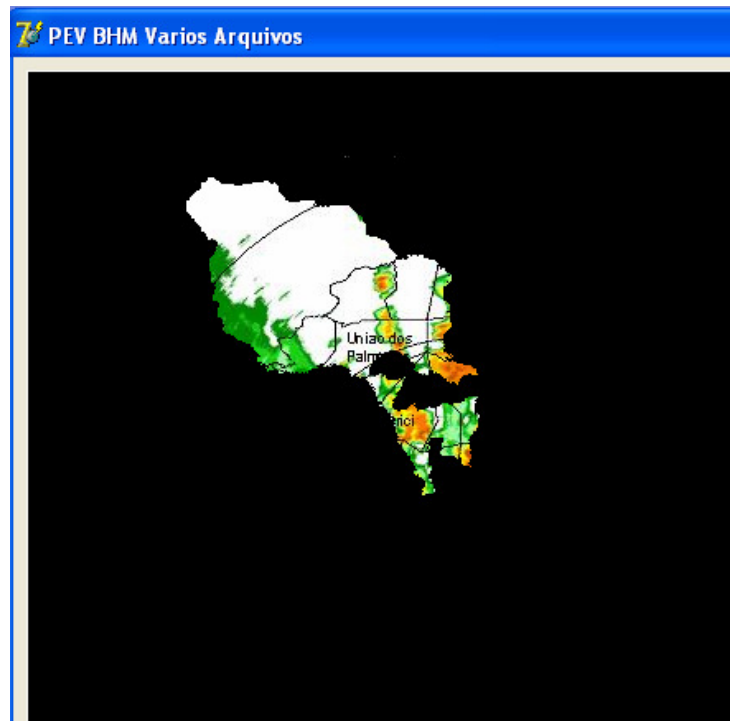
#### 4.5.1 Etapa de Análise

Na etapa de análise foram produzidos um conjunto de pequenos códigos com funções específicas e que posteriormente foram acrescentados a um programa para a leitura das imagens do radar, extração da altura pluviométrica e análise com série história de vazões da ANA, na Fazenda Boa Fortuna. Este programa foi denominado PEVva, Programa para Estimativa de Vazão – Verificação e Análise. Inicialmente construiu-se um código para identificação da cor de um pixel da imagem, a partir dos canais R (vermelho), G (verde) e B (azul). Na figura 4.13 está representada a interface do código de leitura de cores dos canais RGB.



**Figura 4.13** – Código inicial para leitura e identificação da cor de um elemento de imagem a partir dos canais RGB, primeira, segunda e terceira coluna respectivamente.

O código lê os valores destes canais, localizando cada elemento de imagem a partir de coordenadas x,y com uma função específica e em seguida, através de uma estrutura condicional construída a partir de uma tabela de cor, identifica a cor do pixel associando-o, através da mesma aos valores do fator de refletividade Z, em decibéis (dBZ) da escala padrão indicada nas imagens do radar. A aplicação deste procedimento na imagem do radar foi feita unindo-o a um procedimento de apresentação da imagem disponibilizada pelo sistema do radar no site, e que foi armazenada em uma pasta. A imagem é apresentada na interface gráfica do programa e em seguida é sobreposta uma máscara de fundo e preto onde está definida como transparência a área da bacia hidrográfica do Mundaú. A figura 4.14 mostra a máscara da BHM sobreposta a imagem do radar. Através das coordenadas x,y da interface do programa posiciona-se a máscara sobre a imagem.



**Figura 4.14** – Bacia Hidrográfica do Mundaú selecionada na imagem com máscara transparente.

O código para identificação da cor atribui o valor 0 (zero) quando identifica as cores, branco, cinza e preto no pixel

O passo seguinte na etapa de análise foi converter a refletividade encontrada para o pixel em taxa de precipitação. Pretendeu-se usar um código onde a relação  $ZR$  pudesse ser alterada. Por isso, construiu-se um código com entradas para os

parâmetros  $a$  e  $b$  da relação  $ZR$  (eq. 4.1), customizando a fórmula. Com a refletividade identificada em um dado pixel, o código converte a partir da equação 4.2 o valor da refletividade em taxa de precipitação.

$$Z = a \cdot R^b \quad \text{Equação 23}$$

Ou

$$R = \left( \frac{Z}{a} \right)^{\frac{1}{b}} \quad \text{Equação 24}$$

Com

$$Z = 10^{\frac{Z(\text{dBz})}{10}} \quad \text{Equação 25}$$

Com a intensidade da chuva encontrada o código calcula a altura (h) da precipitação na área do pixel, considerando um intervalo de tempo fixo para a duração da precipitação. Foi necessário atribuir um valor fixo para a duração da precipitação devido ao intervalo médio de uma hora, entre as imagens obtidas com o radar durante o período de 2003 a 2006. Com a intenção de relacionar o tipo de precipitação com sua duração, a equipe do SIRMAL desenvolveu experimentos utilizando disdrômetros Joss-Waldvogel. A partir de estudos estatísticos dos dados de intensidade e duração coletados no experimento obteve-se grande dispersão, no entanto, verificou-se uma duração média das precipitações em 15 minutos. Este intervalo de tempo foi então considerado para o cálculo da altura da precipitação no pixel. A partir deste ponto, o programa calcula o volume precipitado em cada pixel. Para isso considera que na escala de 130 km do radar, cada pixel da imagem compreende uma área de 0,2462 km<sup>2</sup>. Em seguida, acumula o volume precipitado em uma variável que representará o total do volume de água precipitada na bacia no intervalo de uma hora, que é o lapso de tempo padrão que utilizamos nesta análise.

O Programa processa todos os pixels em um retângulo predefinido de 201 por 180 pixels totalizando 36.180 pixels, onde está inscrita a Bacia Hidrográfica do Mundaú, da maneira acima descrita. Foram mascaradas duas regiões que apresentam grande fator de refletividade devido ao relêvo e lóbulos secundários da emissão do pulso do radar. Estas regiões se localizam nos municípios de Murici, União dos Palmares e em Maceió. O valor encontrado para o volume precipitado acumulado sobre toda a bacia, com exceção dessas duas regiões, é, então,

dividido pela área representada para que assim se determine a altura da precipitação, como se ocorresse sobre toda a extensão considerada da bacia. Então, este valor encontrado para altura da precipitação de cada imagem do radar, é o acumulado diário, com vinte e quatro imagens, obtidas com um intervalo de uma hora. O valor encontrado corresponde logicamente, a altura da precipitação acumulada em um dia sobre a bacia. A intenção foi a de procurar relacionar os valores diários das alturas encontradas com a vazão diária consistida determinada na estação fluviométrica da Fazenda Boa Fortuna, em Rio Largo, AL. Os valores diários da altura e da precipitação calculado sobre a área da bacia foram registrados em um arquivo de texto gerado pelo programa, para posterior análise. Um programa de planilha de cálculos foi utilizado para ler a série de dados das alturas pluviométricas e de vazão, para um determinado período, gerando em seguida um gráficos que representam as variações sofridas pelas grandezas com o passar do tempo. Utilizou-se para análise o período de um mês. Posteriormente utilizou-se um programa de análise matemática para verificar a correlação entre os dados os dados de vazão e altura.

#### **4.5.2 Etapa de Finalização para usuário**

Nesta etapa foi desenvolvido um programa para a verificação do fator de refletividade das imagens do radar para a estimativa da vazão na Fazenda Boa Fortuna em Rio Largo, Alagoas. Foi denominado PEVx, Programa de Estimativa de Vazão. A estimativa de vazão deve ser considerada após o tempo de concentração, 24 h (vinte e quatro horas) obtido na etapa de análise para o rio. O programa possui as mesmas características e procedimentos do código desenvolvido para a etapa de análise, sendo, contudo limitado ao processamento de uma única imagem de cada vez. A intenção é a de proceder um monitoramento contínuo da refletividade-vazão do rio pelo usuário.

O Programa inicialmente apresenta a imagem obtida pelo radar, previamente salva em uma pasta no computador. Depois, o programa aplica automaticamente a máscara da BHM, verificando os pixels da imagem, identificando o fator de refletividade para cada um, calculando a intensidade da chuva e o volume precipitado, determinando a altura característica da precipitação na imagem para toda a BHM. Através de estrutura condicional, verifica se a altura da precipitação acumulada nas últimas 24 horas é superior, igual ou inferior a altura média

encontrada na etapa de análise, nos momentos quando ocorreu cheias no rio, valor de referência. Em seguida, apresenta a estimativa de vazão para um tempo de concentração de 24 h (vinte e quatro horas) e armazena os dados em arquivo de texto. O Programa apresenta ainda uma tabela com a leitura dos dados do arquivo gerado para verificação de recorrência de dados. O arquivo texto gerado poderá ser manipulado para a correção de alguma entrada repetida. Se assim o fizer, o usuário deverá ter o cuidado de não alterar a estrutura do arquivo, caso contrário, a sua leitura poderá acarretar em um erro de processamento do programa. A estrutura do arquivo de dados gerados está indicada na tabela 4.1. Trata-se de um arquivo no formato texto contínuo com campos separados por “;”.

**Tabela 4.3-** Formato de saída de dados

<b>Dia</b>	<b>Mês</b>	<b>Ano</b>	<b>Hora</b>	<b>Min</b>	<b>H (mm)</b>
01	05	2005	01	00	0,00001

O arquivo de dados inicia a 00:00h do primeiro dia de janeiro do ano. Contém as últimas 24 alturas (24 horas) do ano anterior, que serão necessárias para as estimativas das primeiras 24 horas do dia 1º de janeiro do ano em curso. O arquivo de dados constitui dessa forma uma série histórica da altura pluviométrica determinada pela razão entre o volume precipitado e área de toda a BHM, obtida pelo nível de refletividade sobre a BHM para cada hora do ano. Importante salientar que as alturas são medidas diárias acumuladas a partir de imagens horárias e estimadas com uma base de tempo fixa para a duração das precipitações ocorridas.

## 4.6 Algoritmos

### 4.6.1-Programa para análise (PEVva)

- Inicialmente o programa carrega as unidades de funções que permitem a programação orientada a objetos;
- Em seguida, relaciona os objetos por tipo que irão processar os dados, quadro 4.4.;
- A declaração de variáveis globais é feita em seguida, quadro 4.5. As variáveis globais são percebidas por todos os procedimentos inclusos no programa;
- Após as variáveis é feita a definição de constantes. São definidas duas constantes a saber: NPBHM – número de Pixels da imagem da BHM na

escala de 130 km disponível no site do Radar; e APIX que corresponde a área em metros quadrados de cada pixel da imagem nesta escala;

- Na implementação do código, o programa carrega a unidade AdBZ. Esta unidade consiste de uma função de identificação de cor dos pixels da imagem;

**Quadro 4.4** - Objetos definidos para o programa PEVva – Programa para estimativa de vazão.-versão análise.

<b>Objeto</b>	<b>Tipo</b>
ImgTela1	área para imagem ou texto
ImgTela2	Área para imagem ou texto
BtAbrir	Botão
EdtTempo	Área para inserção de dados
BitBtn1	Botão com função pré-definida
OpenPictureDialog1	Conjunto de funções para abrir imagens gráficas
OpenDialog1	Conjunto de funções para abrir arquivos
Edit1	Área para inserção de dados
Edit2	Área para inserção de dados
Edit3	Área para inserção de dados
Label1	Texto
Label2	Texto
Label3	Texto
Label4	Texto
Label5	Texto
Label6	Texto
StrinGrid1	Tabela de dados

- O Programa possui dois procedimentos, um de inicialização do formulário (Form) e outro para o processamento da imagem e criação ou gravação do arquivo de dados (BtAbrir);
- Assim que a execução do código inicia o procedimento Form é acionado e inicializa um conjunto de variáveis globais indicadas na tabela 4.3.1;



**Quadro 4.5** - Variáveis globais inicializadas no procedimento form.

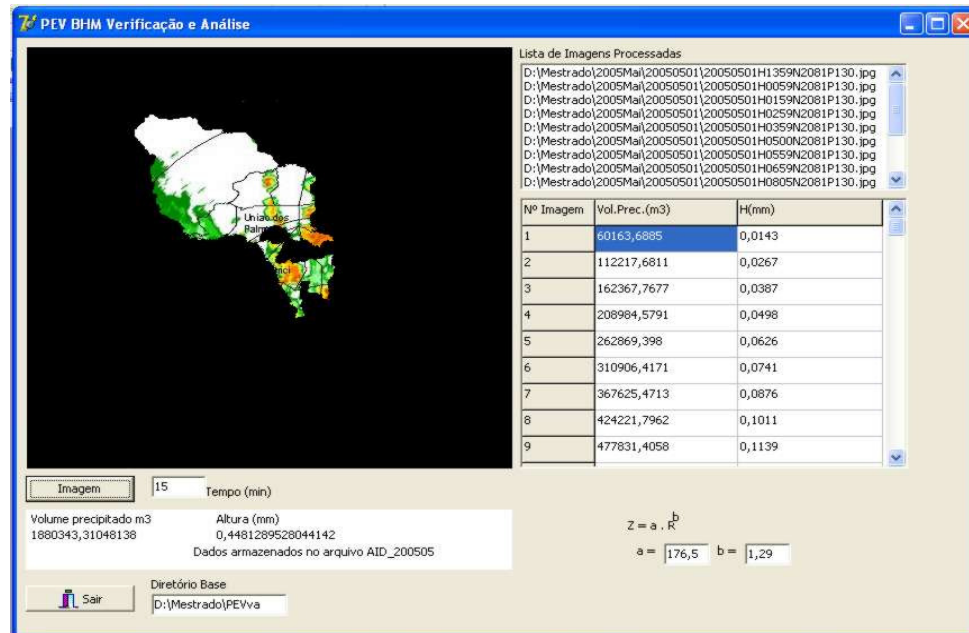
Variável	Tipo	Valor
DirBase	String	Objeto Edit3
SVp	Real	0
Cont	Inteiro	0
Nim	Inteiro	0
bZ	String	Objeto Edit1
aZ	String	Objeto Edit2
Valdbz[1]	Real	10
ValdbZ[2]	Real	15
ValdbZ[3]	Real	20
ValdbZ[4]	Real	25
ValdbZ[5]	Real	30
ValdbZ[6]	Real	35
ValdbZ[7]	Real	40
ValdbZ[8]	Real	45
ValdbZ[9]	Real	50
ValdbZ[10]	Real	55

- O procedimento Form também escreve termos nos objetos StrinGrid1 e ImgTela3;
- Em seguida, com o formulário apresentado na interface gráfica, o programa aguarda a seleção das imagens para o processamento;
- Com o acionamento do objeto BtAbrir, botão imagem, se inicia o procedimento BtAbrir, em que são declaradas variáveis locais, reconhecidas pelo programa apenas durante o procedimento. As variáveis estão descritas na tabela 4.3.2;
- - O acionamento do objeto BtAbrir programa de análise, abre uma caixa de diálogo para a seleção de imagens;
- - O procedimento aciona o processo de leitura de arquivos gráficos. Os arquivos gráficos são imagens obtidas com varreduras do radar, digitalizados pelo sistema SASSANDRA, cujos arquivos gerados são convertidos pelo programa RADARAUTO e que são disponibilizadas no site do SIRMAL no formato jpg. As imagens são armazenadas em uma pasta local no computador, para análise;

**Quadro 4.6** - Variáveis locais do procedimento BtAbrir.

Variável	Tipo
AI	Arquivo texto
AID	Arquivo texto
Vpix	Inteiro
cx	Inteiro
cy	Inteiro
i	Inteiro
j	Inteiro
n	Inteiro
d	Vetor com 180 inteiros
r	Vetor com 180 inteiros
g	Vetor com 180 inteiros
b	Vetor com 180 inteiros
dbZ	String
est	String
s	String
c	Caracter
cd	Caracter
cm	Caracter
ca	Caracter
ch	Caracter
cmi	Caracter

- - Uma estrutura de repetição é então iniciada. O objetivo é o de ler cada imagem selecionada no objeto de leitura, descrito no item acima, processando-a em seguida;
- - Cada arquivo selecionado é então associado a um elemento da lista do objeto ListBox1 e apresentado neste objeto na interface gráfica do programa;
- - Um objeto imagem (jpeg1) é criado e associado ao primeiro item do objeto ListBox1;
- Uma área da interface é definida para apresentação do arquivo de imagem. Esta área tem 526x526 pixels, as mesmas dimensões das imagens obtidas pelo sistema do radar. Na figura 4.15 se vê a interface com a imagem do radar e máscara subreposta;



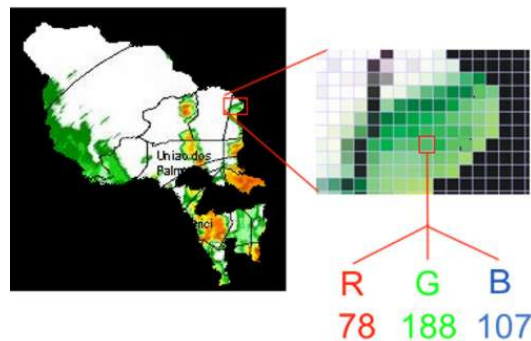
**Figura 4.15** – Interface do Programa de Estimativa de Vazão – verificação e análise, PEVva.

- Em seguida, é extraído do nome do arquivo a data e a hora da imagem. Esses dados são armazenados nas variáveis ano, mês, dia, hora e min;
- O objeto jpeg1 é apresentado na área definida na interface gráfica do programa;
- A memória do objeto jpeg1 é então liberada para estar disponível quando outra imagem for lida;
- A variável AiD recebe os valores “AID\_ ” concatenada aos valores das variáveis ano e mês;
- O procedimento verifica se existe na pasta DirBase+“dados\” um arquivo com o nome igual ao obtido na variável AiD. Caso não seja encontrado, um arquivo será criado com o nome definido na variável;
- Logo após ser criado o arquivo é fechado, ficando disponível para atualização e análise na pasta de dados;
- Em seguida é criado um objeto gráfico denominado gif1, que irá armazenar uma máscara transparente da BHM, no formato gif. Nesta foram subtraídas as regiões na bacia com ecos de solo e lóbulos secundários de emissão do radar. Esta máscara tem cor preta e dimensões 524x524 pixels;
- A máscara é então sobreposta à imagem obtida do radar, encobrindo o que não é a BHM;
- A memória do objeto gif1 é liberada;

- Inicia-se então a varredura da imagem com a máscara sobreposta. A figura 4.16 mostra como a varredura seleciona um pixel e identifica os canais RGB;
- Uma estrutura de repetição é iniciada tendo como índice a variável  $n$ ;
- A varredura ocorre em um retângulo com  $180 \times 201$  pixels na imagem e que tem inscrita toda a região da BHM. A variável  $n$  da estrutura de repetição irá assumir valores de 1 a 201, correspondentes às linhas na imagem;
- As variáveis  $cx$  e  $cy$  definem as coordenadas para o início da varredura. São definidas como:

$$cx = 96 \quad \text{e} \quad cy = 65+n \quad \text{Equação 26}$$

- - A cada incremento na variável  $n$ , o código iniciará a varredura de uma nova linha da imagem;



**Figura 4.16** – Varredura dos pixels e identificação de cor através dos canais RGB.

- Em seguida uma nova estrutura de repetição é definida, com a variável de controle  $i$ . Esta irá assumir os valores de 1 a 180, correspondentes as colunas da imagem;
- Uma função de leitura verifica os valores dos canais R (vermelho), G (verde) e B (azul) do pixel cuja coordenada é dada por  $(cx+i, cy)$ . Dessa forma, o código lê os canais de cor da imagem pixel por pixel de uma linha;
- Em seguida, associa aos vetores  $r[i]$ ,  $g[i]$  e  $b[i]$  aos valores encontrados pela função de leitura de cada pixel da linha;
- - Após ler toda uma linha e armazenar os valores dos canais RGB de cada pixel, o código inicia uma nova estrutura de repetição, novamente utilizando a variável  $i$  como controle;
- - A variável dBZ assume os valores que a unidade ADBZ, de reconhecimento da cor do pixel retorna quando nela são inseridos os elementos  $r[i]$ ,  $g[i]$  e  $b[i]$

determinados anteriormente. A unidade ADBZ é uma função de três variáveis. Consiste em uma estrutura condicional que ao receber os elementos de cor do pixel associa-o a um valor de refletividade do sinal do radar em decibéis. A tabela 4.4. apresenta a relação entre os valores dos canais RGB e a refletividade do radar;

**Tabela 4.4.** Tabela com os 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

- Com o fator de refletividade do pixel em decibéis, identificada, utiliza-se a equação 4.2 e 4.3 para determinar a refletividade e intensidade da precipitação. Os valores calculados são armazenados nas variáveis Z e RZ;
- No cálculo da taxa de precipitação utilizam-se os valores dos parâmetros a e b da equação 4.1 e que estão associados aos objetos Edit1 e Edit2, armazenados nas variáveis az e bz;
- Em seguida o código calcula o volume precipitado no pixel, para isso considera a taxa de precipitação calculada e armazenada em RZ, a duração da precipitação, cujo valor estimado está associado ao objeto EdtTempo. Considerou-se um valor constante de 15 minutos para a duração da precipitação, uma vez que o lapso de tempo entre imagens é de uma hora em média, e da área compreendida em cada pixel na escala de 130 km da imagem do radar;

$$Vp = (RZ / 1000) \cdot (T_{prec} / 60) \cdot Apix \quad \text{Equação 27}$$

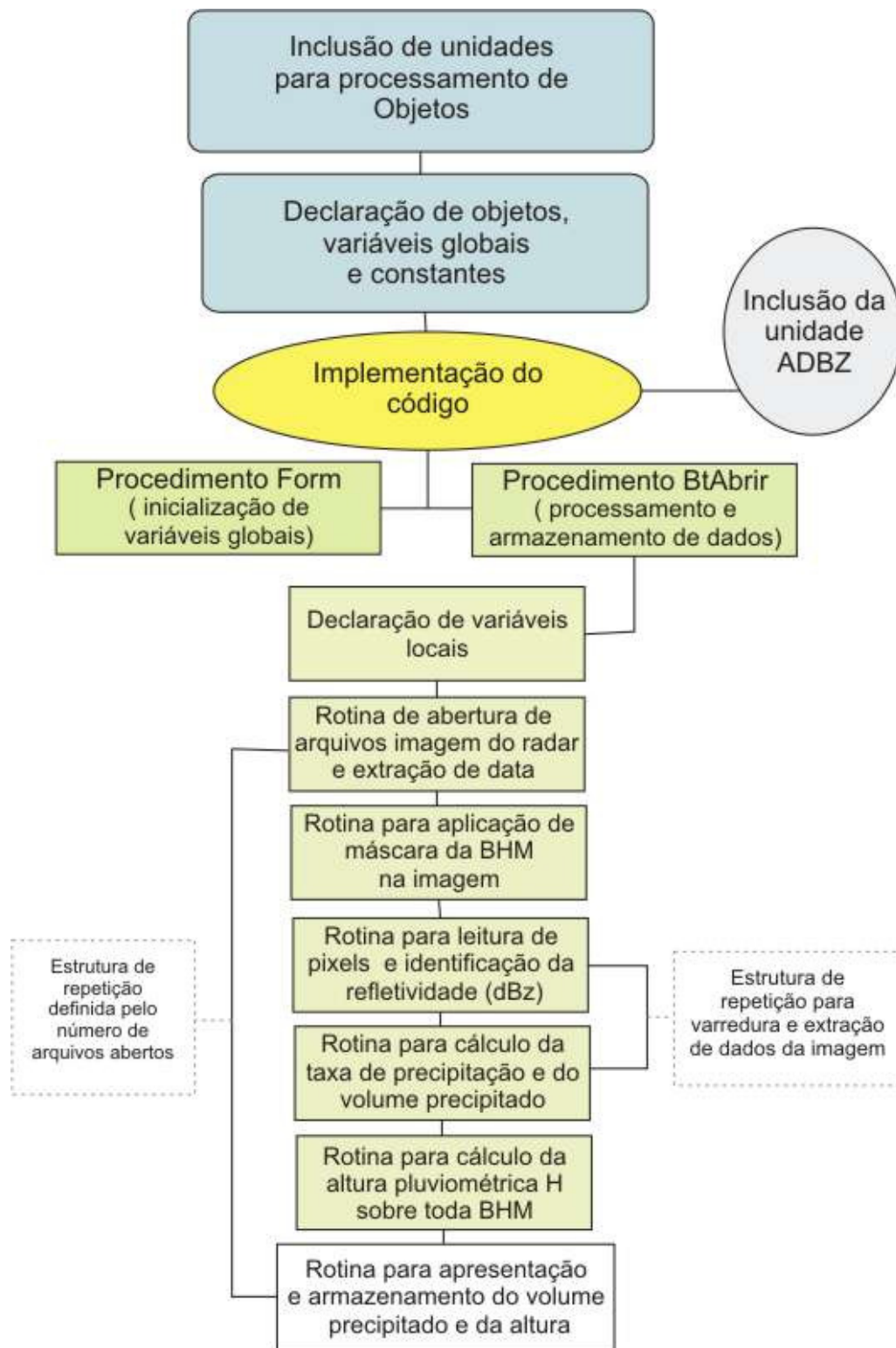
- Com o cálculo do volume precipitado, acumula-se somando esse à variável SVp. Esta variável, portanto, indica o volume precipitado em metros cúbicos acumulado em uma linha da imagem;
- Encerra-se a estrutura de repetição para a leitura da linha da imagem.

- Incrementa-se  $n$  e o código processa mais uma linha até o total de 201 linhas do retângulo considerado na imagem. Procedendo dessa forma a variável  $SV_p$  acumula o volume total precipitado, considerando uma duração fixa para a precipitação;
- Encerra-se a leitura da imagem;
- Incrementa-se a variável  $N_{lm}$  e uma nova imagem da lista é processada e dela extraído volume precipitado acumulado. A variável  $SV_p$  acumula o volume das imagens subseqüentes;
- Calcula-se então a altura pluviométrica, considerando o volume precipitado e acumulado sobre a área considerada da BHM, através da relação:

$$H = 1000 * (SV_p / NPBHM) / Apix \quad \text{Equação 28}$$

- Para cada imagem, o código apresenta, no objeto `Stringrid1`, os valores das variáveis  $SV_p$  e a altura pluviométrica da precipitação para aquele volume considerado;
- Encerra-se a estrutura de repetição para leitura das imagens;
- O código grava no arquivo associado à variável `AID`, um registro contendo os campos do dia, mês, ano e altura pluviométrica para posterior leitura e análise. Este dado, a altura pluviométrica acumulada diariamente foi utilizada para correlação com a vazão na Fazenda Boa Fortuna;
- A análises dos arquivos textos gerados pelo PEVva foram feitas com programas editores de texto, planilhas e de análise matemática. A figura a seguir apresenta a estrutura básica para o desenvolvimento do algoritmo.

Na figura 4.17 está representado esquematicamente o algoritmo acima descrito para o programa PEV.va.



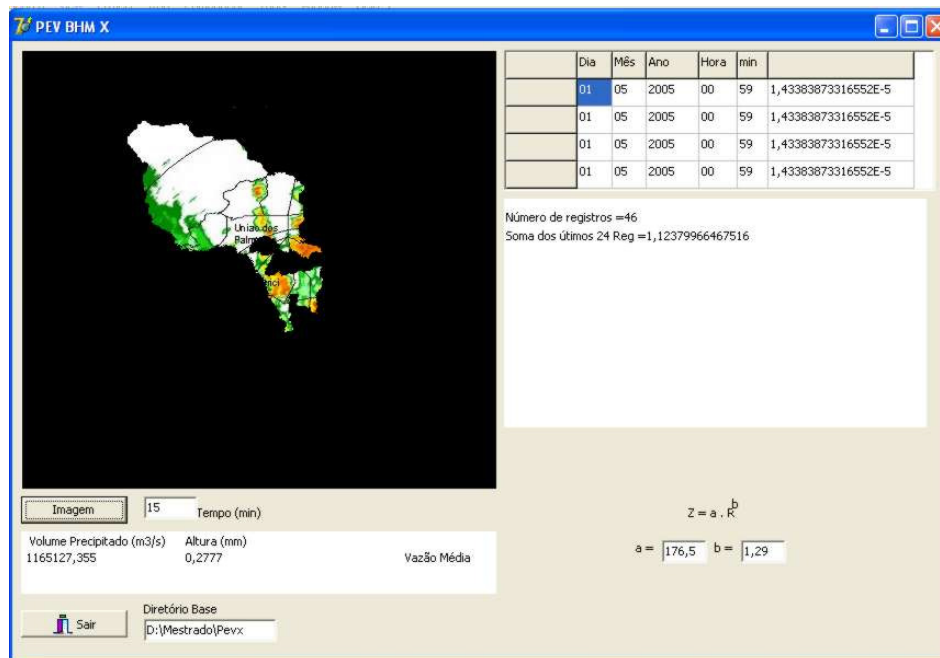
**Figura 4.17.** – Estrutura do algoritmo para o programa PEVva.

#### 4.6.2 Programa final para usuário

- - Inicialmente o programa carrega as unidades de funções que permitem a programação orientada a objetos;
- - Relaciona os objetos por tipo que irão processar os dados. Os objetos estão listados no quadro ;

**Quadro 4.7** - Objetos definidos para o programa PEVx – Programa para estimativa de vazão

Objeto	Tipo
ImgTela1	área para imagem ou texto
ImgTela2	Área para imagem ou texto
BtAbrir	Botão
EdtTempo	Área para inserção de dados
Label1	Texto
BitBtn1	Botão com função pré-definida
OpenPictureDialog1	Conjunto de funções para abrir imagens gáficas
OpenDialog1	Conjunto de funções para abrir arquivos
Label3	Texto
Edit1	Área para inserção de dados
Edit2	Área para inserção de dados
Label2	Texto
Label4	Texto
StrinGrid1	Tabela de dados



**Figura 4.18** – Interface do programa PEVx.



- - A declaração de variáveis globais é feita em seguida. As variáveis globais são percebidas por todos os procedimentos inclusos no programa. As variáveis globais utilizadas no PEVx estão listadas na tabela 4.8.

**Quadro 4.8** - Variáveis globais utilizadas no programa PEVx.

Variável	Tipo
Form1	Formulário
Jpeg1	Imagem jpeg
Gif1	Imagem gif
Reg1	Endereço de memória para imagens
Vp	Real
SVp	Real
TPrec	Real
H	Real
ano	String
mês	String
dia	String
hora	String
min	String
DirBase	String
aa	String
mm	String
dd	String
hh	String
mi	String
nomearq	String
nomeAAno	String
sr	arquivo lógico
FileAttrs	Inteiro
aZ	Real
bZ	Real
rZ	Real
valdBz	Vetor com Inteiros
i	Inteiros

- - Em seguida, são declaradas as constantes que serão utilizadas no programa.
- NPBHM = 17858 , esta constante define o número total de pixels da área considerada da BHM na escala 130 km do radar. Apix = 234964 é a área em metros quadrados contida em cada pixel da imagem na escala de 130 km do radar;
- - Inicia-se a implementação do código;
- - A unidade ADBZ, para identificação da refletividade do radar a partir da leitura dos pixels da imagem, é incorporada ao programa;

- - Dois procedimentos são definidos no código, a saber: o procedimento Form que contém as inicializações das variáveis e apresentação do formulário principal do PEVx; o procedimento BtAbrir que irá executar as ações para leitura, extração de dados e estimativa de vazão na Fazenda Boa Fortuna;
- - Com a execução o procedimento Form inicializa as variáveis globais como mostra a tabela 4.3.1;
- - O Programa aguarda a execução do procedimento BtAbrir, que é iniciado quando o objeto BtAbrir é acionado;
- - O código declara as variáveis locais do procedimento BtAbrir. As variáveis locais estão listadas na tabela 4.3.2.3;

**Quadro 4.9 - Variáveis locais do procedimento BtAbrir.**

<b>Variável</b>	<b>Tipo</b>
AAno	Arquivo Texto
vpix	Inteiro
cx	Inteiro
cy	Inteiro
i	Inteiro
j	Inteiro
n	Inteiro
r	Vetor com 180 elementos inteiros
g	Vetor com 180 elementos inteiros
b	Vetor com 180 elementos inteiros
dBz	String
c	Caracter
cd	Caracter
cm	Caracter
ca	Caracter
ch	Caracter
cmi	Caracter
s	String
est	String
Nreg	Integer

- A execução do procedimento inicia com a variável TPrec recebendo o valor do objeto EdTempo que consiste no intervalo de tempo de duração considerado para as chuvas identificadas na imagem;
- - Em seguida um objeto imagem é criado e associado a variável Jpeg1;
- - O Objeto OpenPictureDialog1 é executado abrindo uma caixa de diálogo para a leitura de um arquivo imagem que será armazenado na variável Jpeg1.

- - A variável Reg1 é associada a uma área na interface gráfica do programa, com dimensões de 526x526 pixels;
- - A variável nomearq é associada ao arquivo gráfico selecionado;
- - as variáveis ano, mês, dia, hora e min são obtidas a partir da variável nomearq;
- - A imagem contida na variável jpeg1 é apresentada na área definida pela variável Reg1 na interface gráfica do programa;
- - A variável jpeg1 tem sua memória liberada para acessar outro arquivo imagem;
- - A variável nomeAAno recebe a string AAno\_ concatenada ao valor da variável ano que foi determinado a partir da variável nomearq;
- - O código verifica em seguida, se existe um arquivo na pasta definida pelo dado contido na variável DirBase concatenada à pasta Dados com nome igual ao da variável nomeAAno. Caso exista, o código dá continuidade ao processamento; caso não, o código cria um arquivo texto na pasta e continua a execução do programa;
- - Em seguida, é aplicada uma máscara através da variável Gif1 que é associada a uma arquivo imagem, este armazenado na pasta definida pelo valor da variável DirBase concatenada a img. A imagem da máscara consiste na área considerada da BHM em transparência. A máscara tem dimensões 524x524 e é de cor preta. O resultado é que somente a área considerada da bacia fica visível, todo restante fica com a cor negra da máscara;
- - A memória da variável gif1 é então liberada para novo processamento;
- - Uma estrutura de repetição para leitura dos pixels da imagem com a mascara é então iniciada. A variável controle é n. Onde n varia de 1 a 201 e representa as 201 linhas do retângulo de com 180x201 pixels e no qual está inscrita a BHM.;
- - As variáveis cx e cy são inicializadas com os valores para o ponto inicial da varredura (96,65). A variável cy é incrementada com o valor de n, ou seja o ponto inicial da varredura será:

$$(cx,cy) = (96,65+n)$$

Equação 28

- Outra estrutura de repetição, interna a primeira é iniciada. A variável de controle é i. A variável i assumirá valores de 1 a 180 e representará a i'ésima coluna do retângulo de varredura;
- - A variável vpix, através de função específica, lê e armazena os canais RGB do pixel da imagem, cujas coordenadas x e y são dadas por:

$$(cx+i, cy)$$

Equação 29

- - Dessa forma, os valores dos canais RGB dos pixels serão lidos para cada pixel em uma linha;
- - Os valores dos canais RGB de cada pixel são então separados através função específica a partir da variável vpix. Cada pixel terá associado, então, três valores de cor, que serão armazenados nas variáveis indexadas r[i], g[i] e b[i];
- - A estrutura para leitura da linha é encerrada;
- - Uma nova estrutura de repetição é iniciada, esta com o objetivo de identificar a refletividade em decibéis do sinal do radar a partir dos valores armazenados nas variáveis r[i], g[i] e b[i]. A variável de controle dessa nova estrutura é novamente i. Onde i varia de 1 a 180;
- - A função ADBZ é então acionada. Ela identifica, a partir dos valores armazenados nas variáveis r[i], g[i] e b[i] a refletividade em dB do pixel i. Isto é feito através de uma estrutura condicional que associa a cor à refletividade, utilizando para isso os valores apresentados na tabela 4.3.3;
- - A função ADBZ, após identificar a refletividade do pixel, retorna este valor que é então associado a variável dBz;
- - Depois o código calcula a intensidade da precipitação a partir do valor da refletividade contido na variável dBz. O valor da intensidade da precipitação no pixel é armazenado na variável RZ;
- - Considerando a duração da precipitação no pixel igual ao valor da variável TPrec, calcula-se o volume precipitado na área contida no pixel;
- - O Volume precipitado é então acumulado na variável SVp;
- - A estrutura de repetição é encerrada. Incrementando i;
- - Em seguida, a estrutura de repetição para leitura das linhas também é encerrada. Incrementando n;

- - Ao final do processo a variável SVp armazenará o volume precipitado sobre toda a área considerada para a BHM;
- - A altura pluviométrica é então determinada com a relação 4.5;
- - O programa abre o arquivo texto associado a variável AAno e grava os dados no formato descrito na tabela 4.2.1. Acrescentando mais um registro horário. O arquivo associado a variável AAno, consiste então de uma série de dados horários contendo o altura pluviométrica da precipitação sobre a BHM;
- - O arquivo é fechado liberando a memória armazenada na variável AAno;
- - Sequencialmente, o programa abre uma estrutura de repetição para leitura do arquivo texto atualizado. O objetivo é o de visualizar os dados do arquivo através do objeto StringGrid1;
- - A estrutura de repetição consiste de uma estrutura para leitura de registro na qual estão contidas pequenas estruturas de repetição para leitura dos campos, dia, mês, ano, hora, minuto e altura pluviométrica. As variáveis utilizadas nessas estruturas são: cd,dd,cm,mm,ca,aa,ch,hh,cmi,mi,c e s;
- - após a leitura de um registro, os valores encontrados para os campos são então apresentados no objeto StringGrid1;
- - a variável j é incrementada o que representa o número de registros no arquivo;
- - Os valores das variáveis dd,mm,aa,hh,mi e s são associados a String nula para a leitura do registro seguinte;
- -A estrutura de repetição continua a execução contando os registros com a variável j e apresentando os campos no objeto StringGrid1, até atingir o final do arquivo;
- - Ao concluir a leitura o arquivo é encerrado liberando a memória da variável AAno;
- - A variável NReg é associada ao valor acumulado em j e representa o número de registros no arquivo texto;
- - Em seguida uma nova estrutura de repetição, semelhante a anterior, faz a leitura do arquivo texto associado a variável AAno;
- - Os campos são lidos da mesma forma descrita acima e a variável j é incrementada da mesma maneira. A diferença é que uma estrutura condicional é inserida, antes do incremento da variável j. A função desta estrutura condicional é a de acumular na variável soma os últimos 24 registros

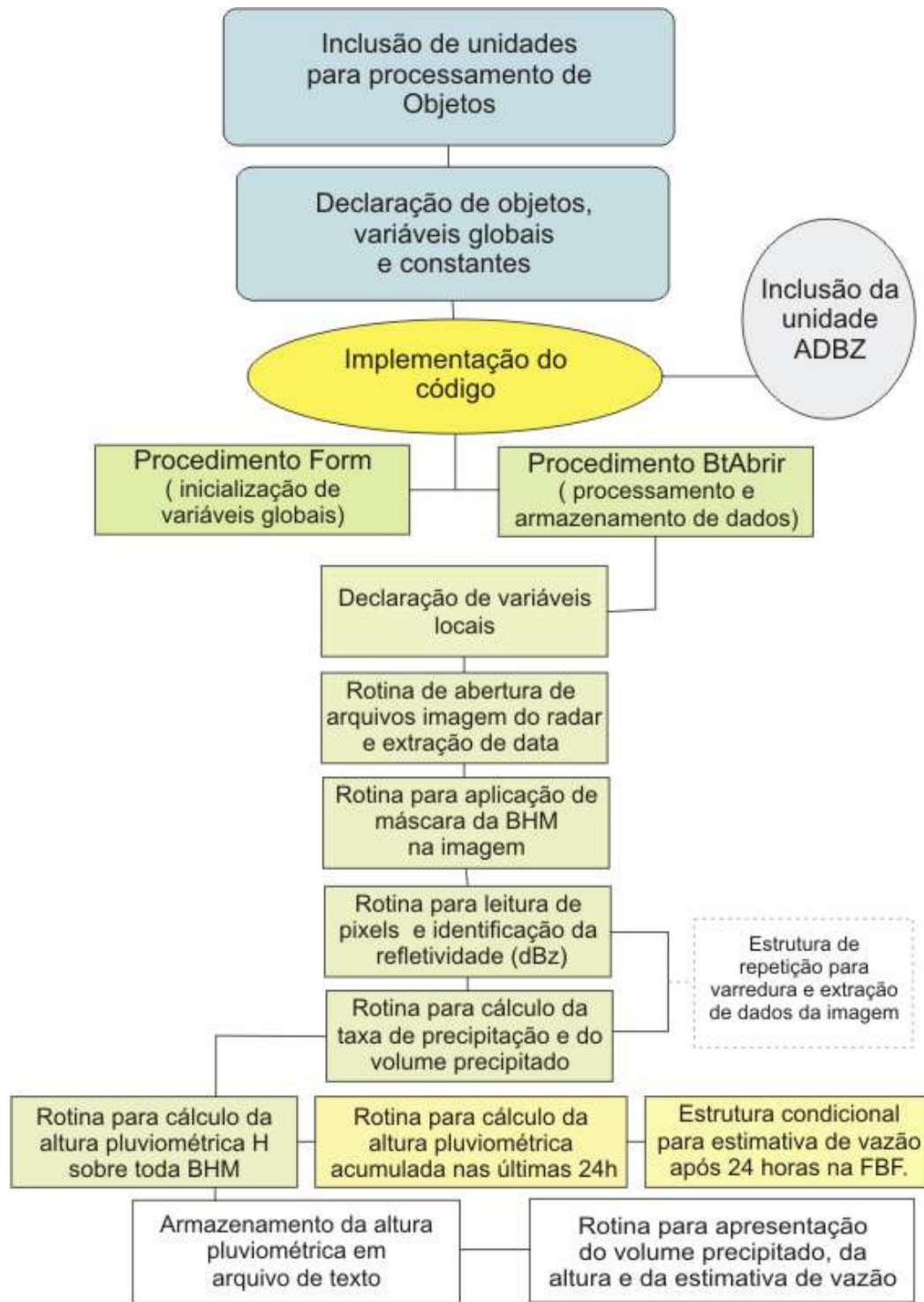
do arquivo, que representam as últimas 24 horas de precipitação sobre a BHM;

- - A variável soma irá representar a altura pluviométrica acumulada em um dia antes da medida efetuada a partir da refletividade do radar. Considerando o tempo de concentração na BHM até a Fazenda Boa Fortuna em aproximadamente 24 horas, poderemos estimar a intensidade da vazão um dia após a medida;
- - O código encerra o arquivo texto liberando a memória na variável AAno;
- - Uma estrutura condicional simples compara o valor da variável soma com valores encontrados na etapa de análise e associa à variável est a estimativa da vazão em três classes: Vazão baixa, Vazão média, Vazão alta. A tabela . apresenta as estimativas a partir dos valores da variável soma.

**Quadro 4.10** Estimativas de vazão após 24 horas na Fazenda Boa Fortuna. A variável soma indica a altura acumulada em 24 imagens processadas.

<b>Condição</b>	<b>Estimativa</b>
soma $\leq$ 0,47	Vazão Baixa
0,47 < soma $\leq$ 1,45	Vazão Média
soma > 1,45	Vazão Alta

Na figura 4.19 está representado esquematicamente o algoritmo acima descrito para o programa PEVx.



**Figura 4.19.** Estrutura do algoritmo para o programa PEVx.

---

## 5 - ESTUDO DE CASOS

Para obter parâmetros que permitam estimar qualitativamente a vazão do rio Mundaú na Fazenda Boa Fortuna, a partir da imagem gerada pelo radar e disponibilizada no sítio, foi necessário realizar, com o programa PEVva uma análise comparativa da vazão com a altura pluviométrica sobre toda a área considerada da bacia, sem as regiões de ecos, como já mencionado. Utilizou-se para isso, a série histórica de vazões disponível no sítio da ANA e imagens do radar, no formato jpeg, disponibilizadas no sítio do SIRMAL.

A partir das hidrógrafas obtidas para a estação da ANA na Fazenda Boa Fortuna, no período de 2004 a 2006, procurou-se elevações abruptas da vazão. Foram selecionados cinco meses que apresentaram eventos que estavam claramente associados à precipitações de média e grande intensidades. Os dados mensais foram extraídos da série histórica e em seguida armazenados. As imagens do Radar, na escala 130 km que abrange toda a BHM, para os meses escolhidos anteriormente, também, foram armazenadas para análise. Utilizou-se então, o programa PEVva que gerou um arquivo texto com dados diários e acumulados, da altura pluviométrica sobre a área considerada da BHM para cada mês. Utilizou-se em seguida, um programa de planilha de cálculos para gerar os gráficos da altura pluviométrica e da vazão. De imediato, se percebeu a correspondência entre estes gráficos, sendo claro um deslocamento temporal de aproximadamente um dia entre a vazão e a altura pluviométrica aferida, isso devido ao tempo de concentração para a FBF. Adiantou-se as medidas das vazões em um dia e se construiu uma nova coluna defasada (QDef). Isto para proceder uma análise de correlação linear entre H e QDef. Utilizou-se novamente o programa de planilha de cálculos para gerar o gráfico de correlação entre essas grandezas. Em seguida, procedeu-se uma regressão linear, tabelando-se os resultados.

A seguir são apresentados os resultados obtidos a partir de arquivos textos gerados com o programa PEVva



### 5.1 Janeiro de 2004.

Em janeiro de 2004, um vórtice ciclônico de altos níveis, provocou intensa precipitações a partir da segunda semana do mês. A precipitação e a vazão registradas através das imagens do radar e da estação da Fazenda Boa Fortuna, registraram os eventos intensos ocorridos naquele mês. A tabela 5.1 apresenta estes registros. Na primeira coluna está indicado o dia, na segunda a altura pluviométrica obtida a partir das imagens obtidas naquele dia, na terceira coluna a vazão registrada na Fazenda Boa Fortuna para o dia. Na quarta coluna está a vazão defasada de 24 horas, devido ao tempo de concentração, que se está assumindo constante, até a FBF.

**Tabela 5.1** – Altura pluviométrica obtida pelo processamento de imagens do radar (SIRMAL) e série de dados de vazão (ANA) do mês de janeiro de 2004.

Dias	H(mm)	Q (m <sup>3</sup> /s)	Q Def. 24h
1	0,28967	5,48	5,48
2	0,29467	5,48	5,68
3	0,30693	5,68	4,89
4	0,30608	4,89	4,89
5	0,30984	4,89	4,32
6	0,83397	4,32	4,32
7	0,76127	4,32	4,89
8	0,30817	4,89	5,68
9	0,33580	5,68	5,68
10	0,29952	5,68	5,68
11	0,39322	5,68	5,28
12	2,42100	5,28	5,28
13	1,04157	5,28	20,75
14	2,55358	20,75	245,70
15	1,49788	245,70	167,14
16	0,38867	167,14	72,16
17	0,54173	72,16	36,54
18	1,68922	36,54	49,04
19	3,29907	49,04	37,69
20	3,89819	37,69	162,29
21	1,70854	162,29	123,39
22	0,69433	123,39	84,55
23	0,67772	84,55	43,65
24	0,94749	43,65	42,03
25	0,75724	42,03	35,39
26	0,89883	35,39	30,22
27	1,27056	30,22	69,29
28	1,79558	69,29	74,10
29	1,13777	74,10	68,34
30	1,27697	68,34	102,97
31	1,43457	102,97	

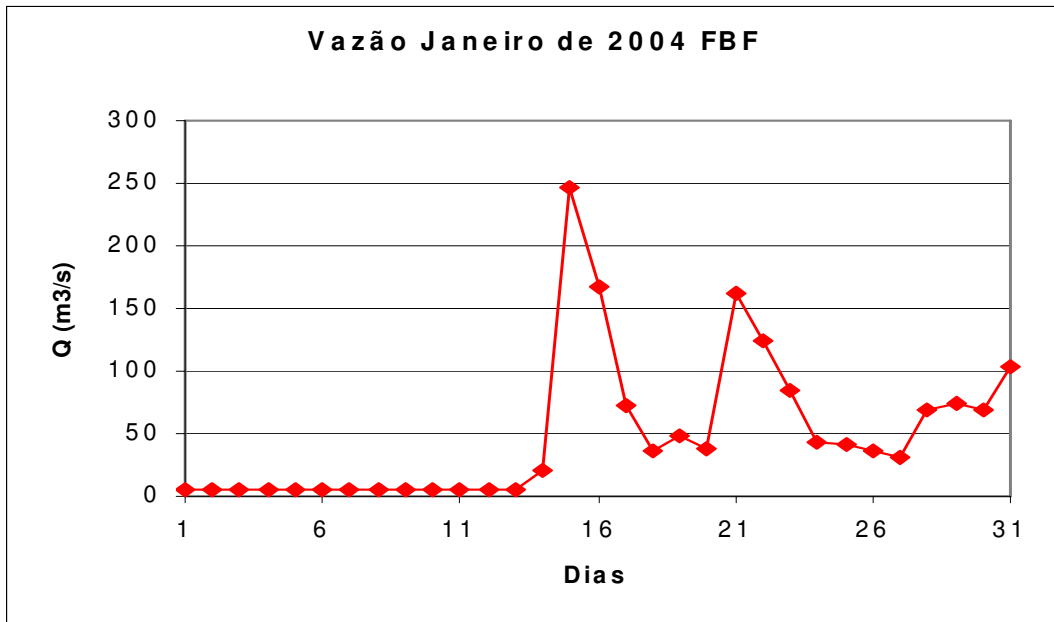


Figura 5.1. Hidrógrafa obtida para o mês de janeiro de 2004 (ANA).

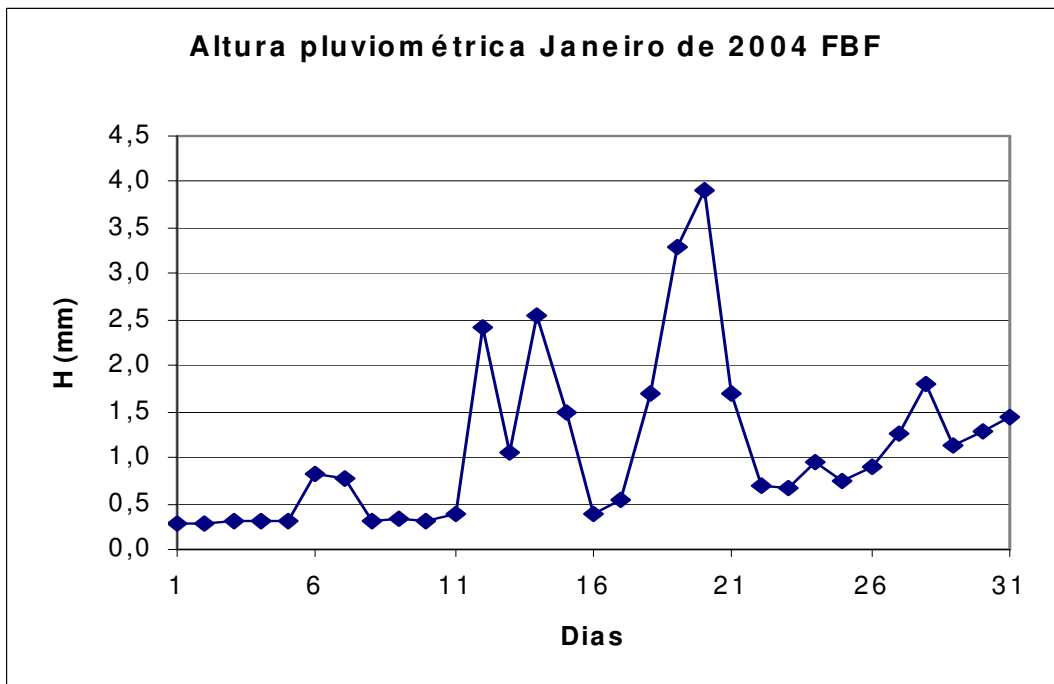
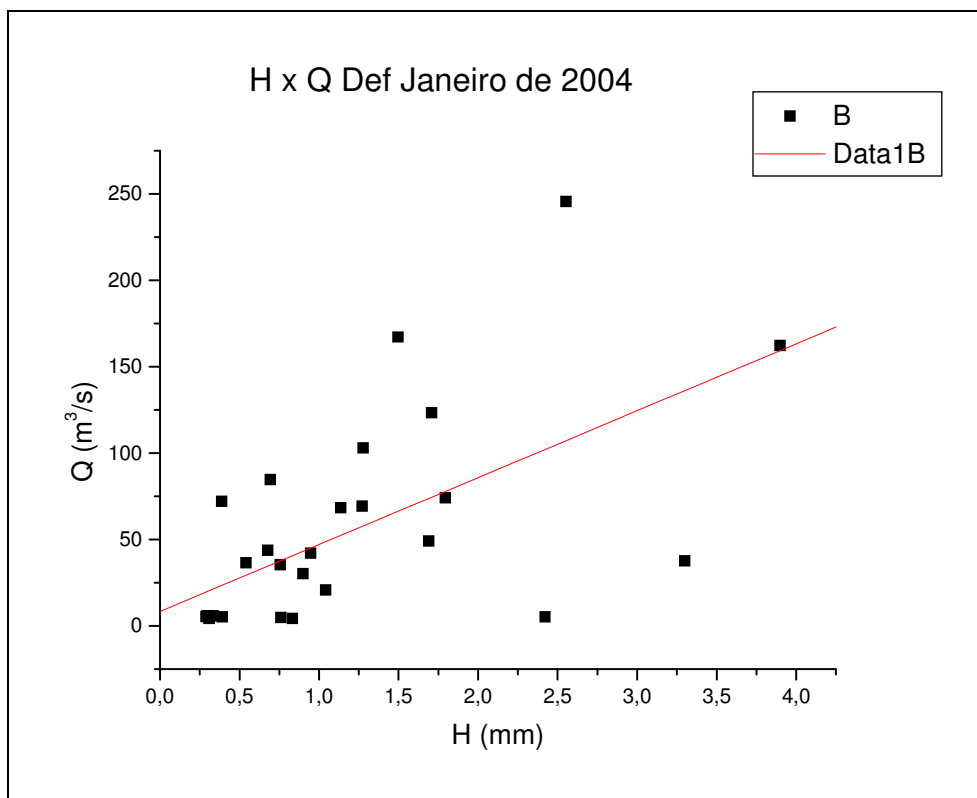


Figura 5.2 - Altura pluviométrica obtida a partir do processamento de imagem do radar (SIRMAL) para janeiro de 2004.



**Figura 5.3** - Gráfico para correlação entre a vazão (Q) e a altura pluviométrica (H) para o mês de dezembro de 2004.

A regressão linear entre  $Q_{def}$  e  $H$  para janeiro de 2004 apresenta os seguintes resultados.

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

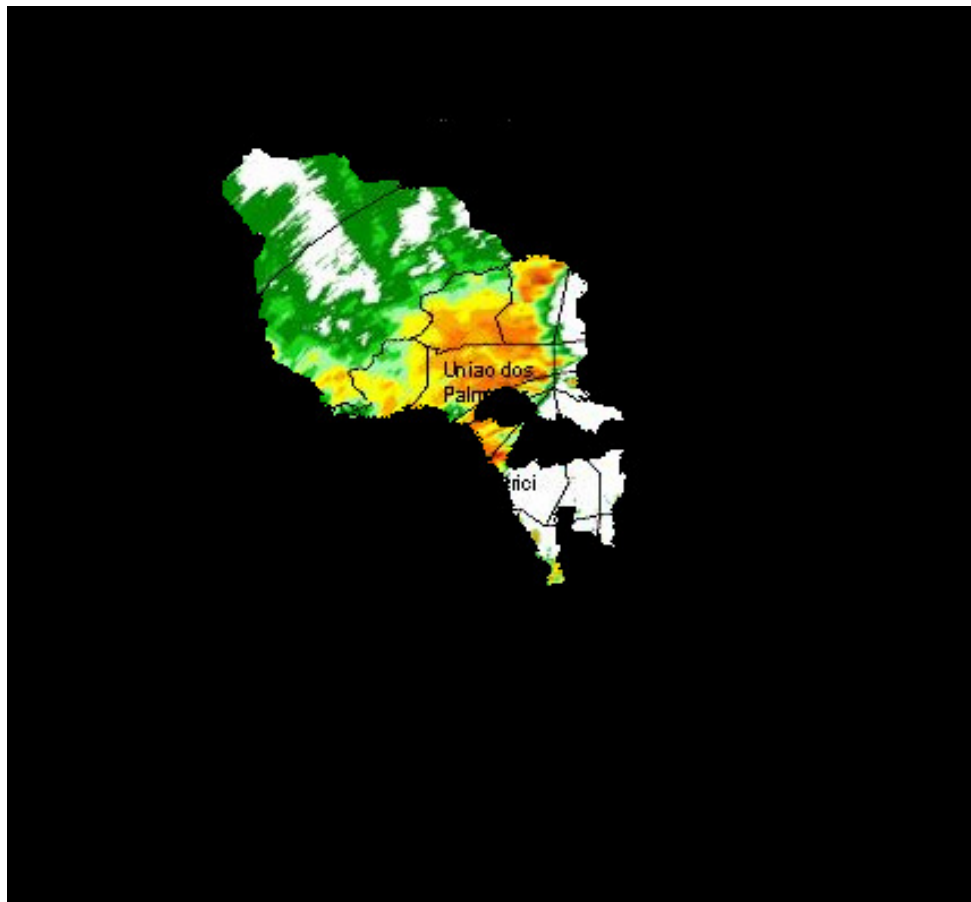
**Tabela 5.2** Regressão linear  $Q_{def}$  x  $H$  do mês de janeiro de 2004.

Parâmetros	Valor	Erro	R	$\sigma$
A	8,3996	13,67909	0,60705	47,91207
B	38,7223	9,57938		

No mês de janeiro de 2004, um VCAN se formou no leste do NEB e provocou chuva intensa sobre Alagoas. O evento durou pelo menos sete dias e provocou fortes chuvas em toda a BHM. A precipitação se intensificou no dia 11, mas somente no dia 12 ocorreu, com maior intensidade sobre a BHM. Da análise da hidrógrafa do mês de janeiro de 2004 para a estação da Fazenda Boa Fortuna, verifica-se que nos dias 15 e 21 ocorreram eventos abruptos de elevação da vazão. Esta atingiu valores diários máximos acumulados de 245,7 m<sup>3</sup>/s e 162,3 m<sup>3</sup>/s respectivamente. Ao se

verificar o gráfico da altura pluviométrica medida a partir das imagens do radar, encontra-se máximos para os dias 12,14 e 20, com alturas de 2,4 mm, 2,5 mm e 2,9 mm. Vale salientar que esta altura corresponde a altura de uma lâmina de água sobre toda a área considerada da bacia.

As variações relativas da vazão e de altura foram respectivamente de 24 vezes e 10 vezes, dos níveis dessas grandezas que antecederam o evento. Há também, que se considerar que a amostragem das imagens tem um lapso de uma hora, devido às que estão disponíveis no banco de imagens do radar, e que a duração da precipitação possivelmente excedeu o intervalo de tempo fixo de 15 minutos considerado pelo programa. Apesar disso, a correlação entre  $Q_{def}$  e  $H$  se mostrou provável. O coeficiente de correlação encontrado  $R = 0,61$ , aponta para uma provável correlação.



**Figura 5.4** - Precipitação sobre a BHM em 14 de janeiro de 2004 às 16:23h.

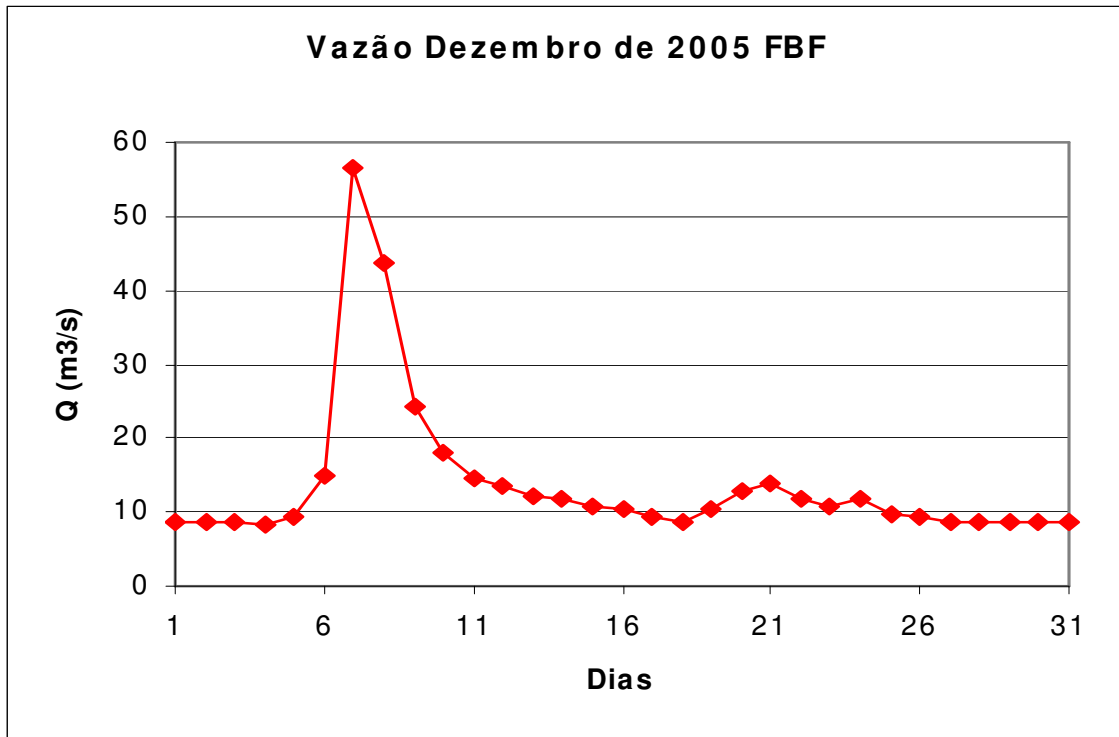
## **5.2 Dezembro de 2005**

Em dezembro de 2005 precipitações no início do mês, sobre a BHM, tornaram peculiar a hidrografa. Um pico pronunciado na precipitação fez a vazão na FBF se elevar, caracterizando a correlação entre estas grandezas. Na tabela 5.3 estão relacionadas a altura pluviométrica medida a partir das imagens do radar, a vazão

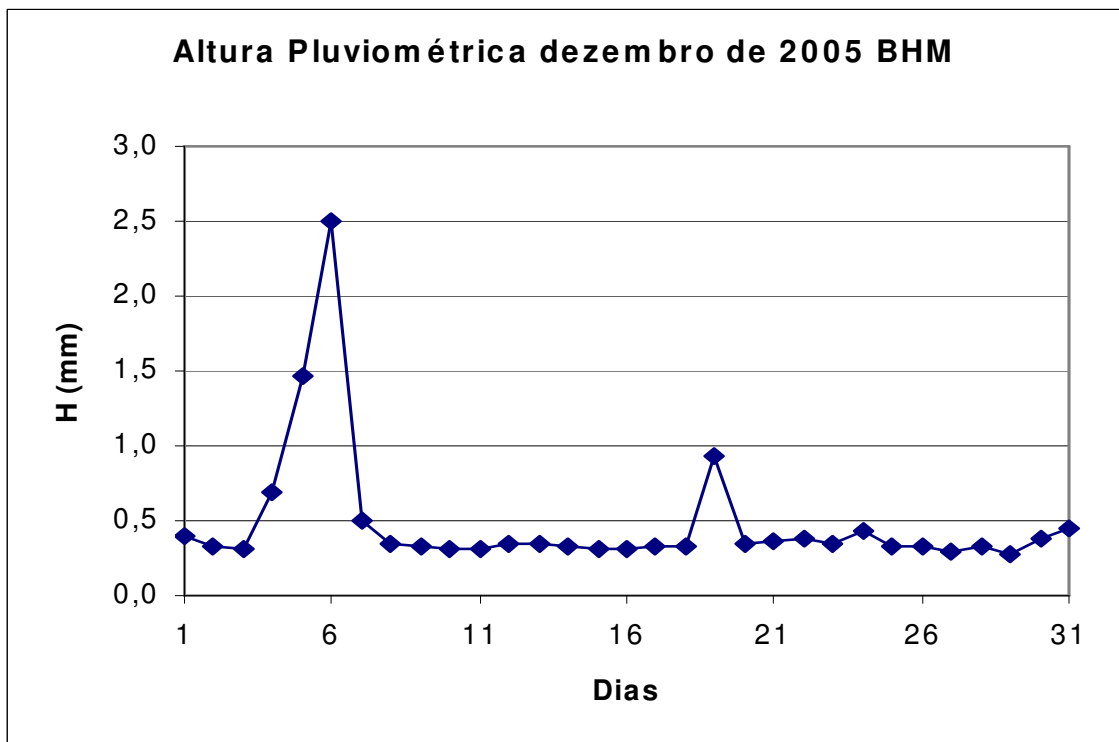
diária consistida, obtida na estação da FBF, e a vazão defasada em 24 horas, devido ao tempo de concentração assumido.

**Tabela 5.3** – Altura pluviométrica obtida pelo processamento de imagens do radar (SIRMAL) e série de dados de vazão (ANA) do mês de dezembro de 2005.

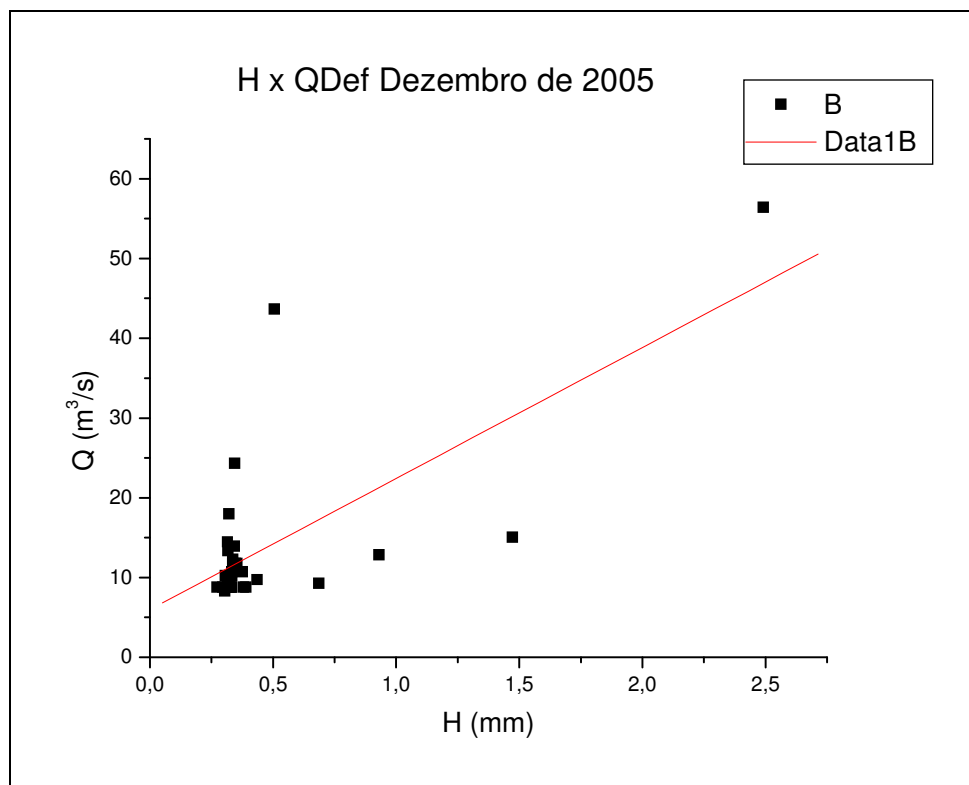
Dias	H (mm)	Q (mm)	Q Def 24h
1	0,39021	8,77728	8,77728
2	0,32032	8,77728	8,77728
3	0,30350	8,77728	8,30827
4	0,68600	8,30827	9,25491
5	1,47300	9,25491	15,0405
6	2,49181	15,0405	56,4132
7	0,50575	56,4132	43,6479
8	0,34423	43,6479	24,3276
9	0,32128	24,3276	17,9681
10	0,31511	17,9681	14,4763
11	0,31774	14,4763	13,3701
12	0,33641	13,3701	12,294
13	0,34721	12,294	11,7675
14	0,33258	11,7675	10,7381
15	0,30691	10,7381	10,2355
16	0,31552	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	0,33639	10,7381	11,7675
24	0,43539	11,7675	9,74102
25	0,32343	9,74102	9,25491
26	0,32665	9,25491	8,77728
27	0,29671	8,77728	8,77728
28	0,33085	8,77728	8,77728
29	0,27246	8,77728	8,77728
30	0,37949	8,77728	8,77728
31	0,44813	8,77728	8,77728



**Figura 5.5.** Hidrógrafa obtida para o mês de dezembro de 2005 (ANA).



**Figura 5.6.** Altura pluviométrica obtida a partir do processamento de imagem do radar (SIRMAL) para dezembro de 2005.



**Figura 5.7.** Gráfico para correlação entre a vazão (Q) e a altura pluviométrica (H) para o mês de dezembro de 2005.

A regressão linear entre  $Q_{def}$  e  $H$  para dezembro de 2005 apresenta os seguintes resultados.

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

**Tabela 5.4** Regressão linear Q x H do mês de dezembro de 2005.

Parâmetros	Valor	Erro	R	$\sigma$
A	5,9916	2,06788	0,70038	7,63885
B	16,43003	3,16438		

No início de dezembro de 2005, chuvas de intensidade moderada, com fatores de refletividade de 15 dBZ a 35 dBZ, incidiram sobre a BHM provocando a elevação da vazão na Fazenda Boa Fortuna. Esses eventos ocorreram possivelmente devido a POA's e provocando uma variação de aproximadamente seis vezes nas vazões que antecederam e precederam o evento. Da análise da hidrógrafa e também da representação da altura pluviométrica na BHM, pode se verificar facilmente o tempo de concentração de cerca de um dia para a BHM. Outro fato a ressaltar é que os

acréscimos tanto na vazão quanto na altura foram equivalentes, aproximadamente seis vezes. O grau de correlação também foi razoável ,  $R = 0,70$ .

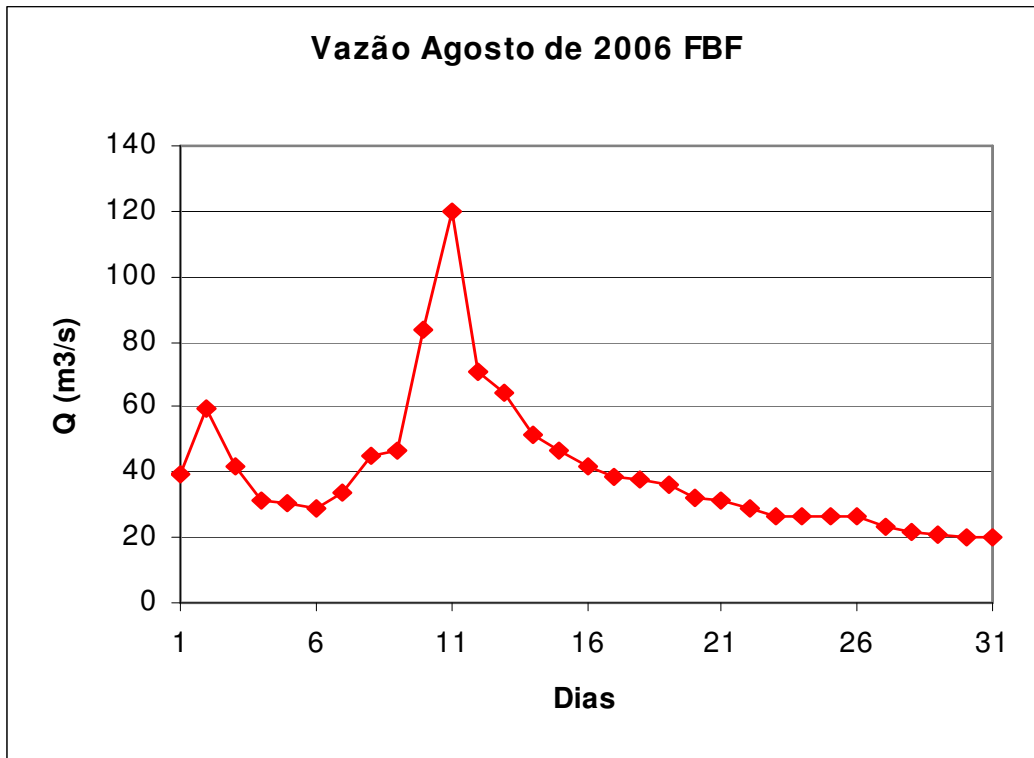
### 5.3 Agosto de 2006

Em agosto de 2006 a vazão medida na FBF sofreu uma grande variação, entre os dias 9, 10 e 11, como se pode verificar na tabela 5,5 e hidrógrafa, figura 5.8, abaixo. Contudo, não houve uma variação correspondente medida na altura pluviométrica, conforme se verifica na tabela e na figura 5.9.

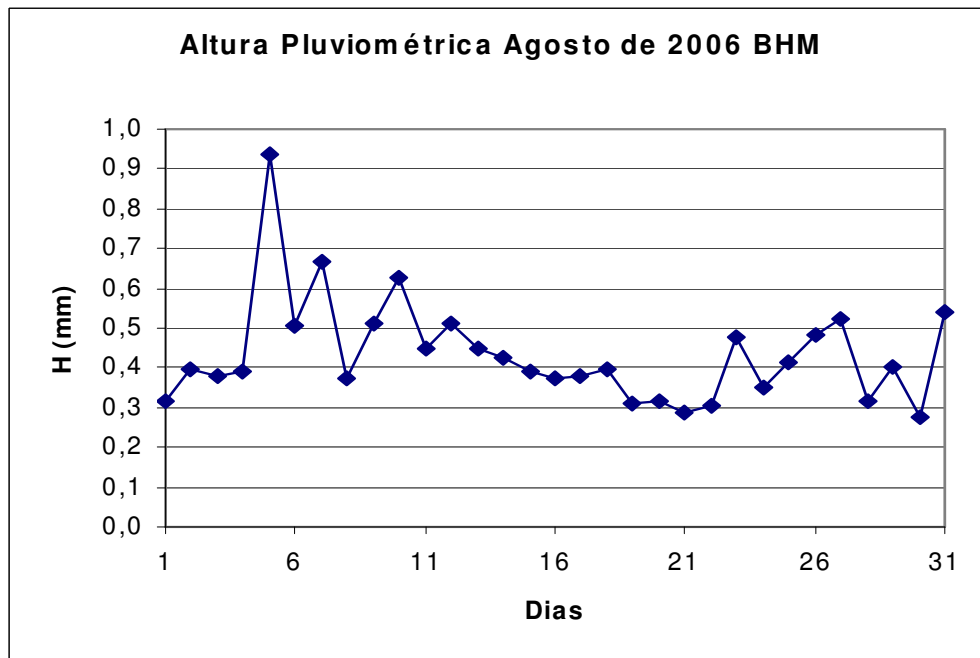
**Tabela 5.5** – Altura pluviométrica obtida pelo processamento de imagens do radar (SIRMAL) e série de dados de vazão (ANA) do mês de agosto de 2006.

Dias	H(mm)	Q (mm)	Q Def 24h
1	0,31773	39,64	59,55
2	0,39441	59,55	42,03
3	0,37831	42,03	31,67
4	0,38976	31,67	30,22
5	0,93439	30,22	29,15
6	0,50571	29,15	33,52
7	0,66842	33,52	44,87
8	0,37309	44,87	46,53
9	0,51149	46,53	84,04
10	0,62666	84,04	119,71
11	0,45103	119,71	71,20
12	0,51034	71,20	64,59
13	0,44829	64,59	51,17
14	0,42734	51,17	46,94
15	0,39365	46,94	42,03
16	0,37354	42,03	38,86
17	0,37900	38,86	38,08
18	0,39675	38,08	36,15
19	0,30846	36,15	32,40
20	0,31351	32,40	31,31
21	0,28629	31,31	28,80
22	0,30364	28,80	26,36
23	0,47545	26,36	26,36
24	0,35089	26,36	26,36
25	0,41455	26,36	26,36
26	0,48002	26,36	23,33
27	0,52057	23,33	21,39
28	0,31676	21,39	21,07
29	0,40431	21,07	20,43
30	0,27544	20,43	20,43
31	0,54242	20,43	

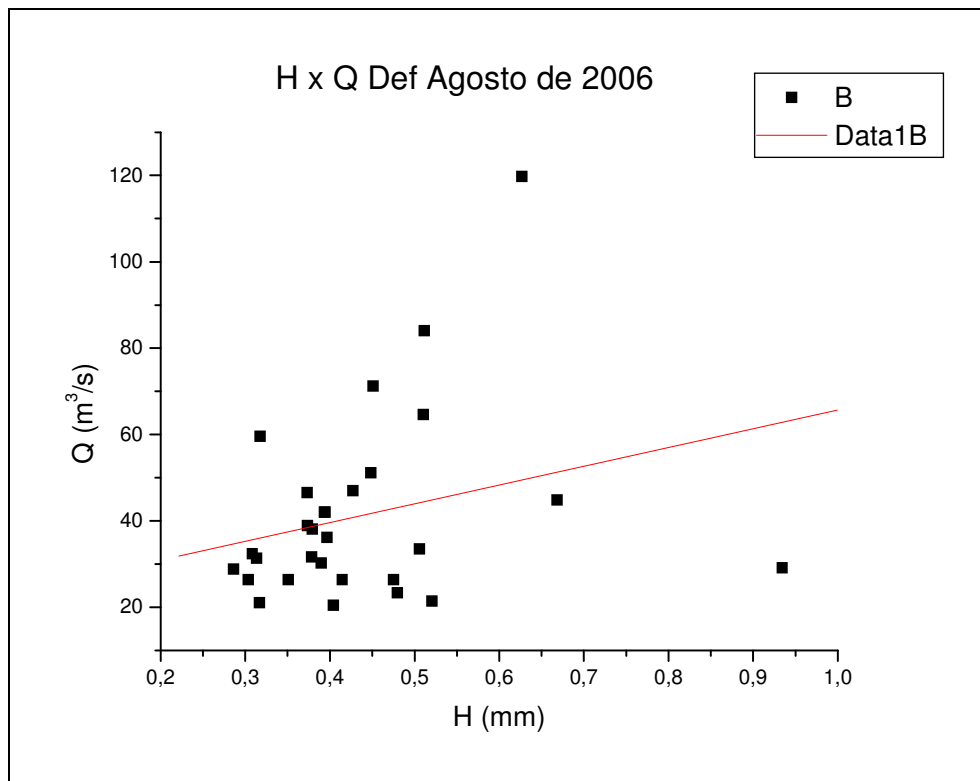




**Figura 5.8.** Hidrógrafa obtida para o mês de agosto de 2006 (ANA).



**Figura 5.9.** Altura pluviométrica obtida a partir do processamento de imagem do radar (SIRMAL) para agosto de 2006.



**Figura 5.10.** Gráfico para correlação entre a vazão (Q) e a altura pluviométrica (H) para o mês de agosto de 2006.

A regressão linear entre  $Q_{def}$  e  $H$  para agosto de 2006 apresenta os seguintes resultados.

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

**Tabela 5.6** Regressão linear Q x H do mês de agosto de 2006.

Parâmetros	Valor	Erro	R	$\sigma$
A	20,00557	13,14967	0,29431	21,05481
B	47,54465	29,17736		

Em agosto de 2006, da hidrógrafa, figura 5.8, se verifica ter havido uma variação abrupta na vazão medida na fazenda Boa Fortuna nos dias 9, 10 e 11, no entanto, não foi detectada nenhuma variação significativa na altura pluviométrica medida a partir do método aqui proposto, figura 5.9. Analisando as imagens do radar para agosto, verifica-se que não houve registro de chuvas com intensidades que provocasse o acréscimo de vazão observado, porém é uma constante as chuvas originadas na brisa marinha e também dos alísios, fenômeno típico da época de inverno para a BHM. Outro fato que pode ser verificado é o nível mínimo de vazão

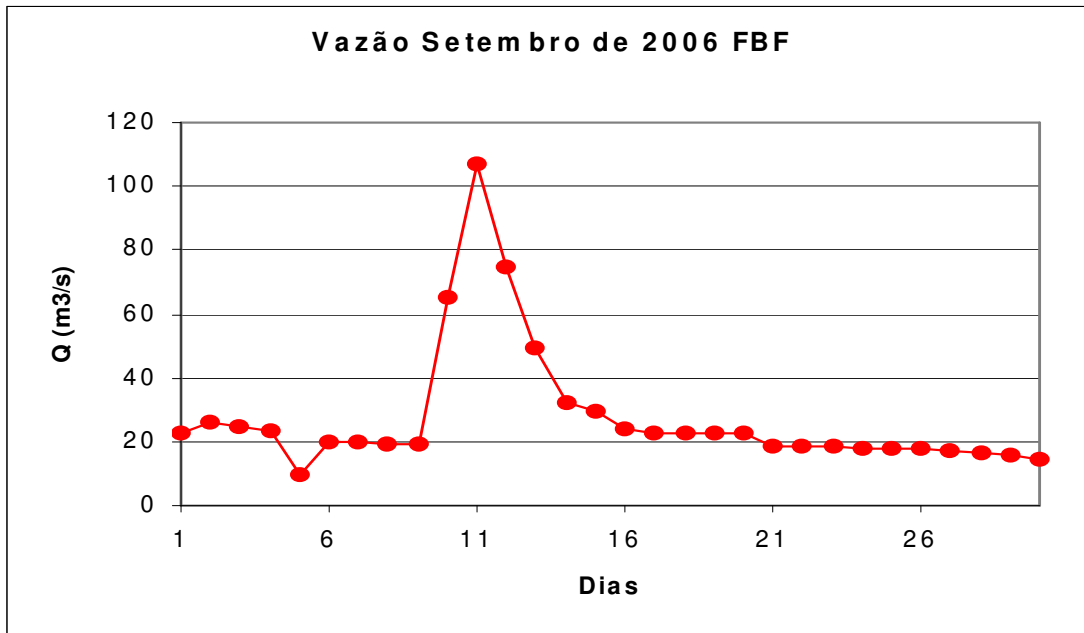
para o mês, que foi de cerca 20 m<sup>3</sup>/s. Isto é um indicador de que a BHM apresentava-se saturada e que portanto, parte significativa da chuva provocou escoamento superficial elevando a vazão. O Baixo índice de correlação R=0,29 demonstra a necessidade de se rever os procedimentos adotados.

### 5.4 Setembro de 2006

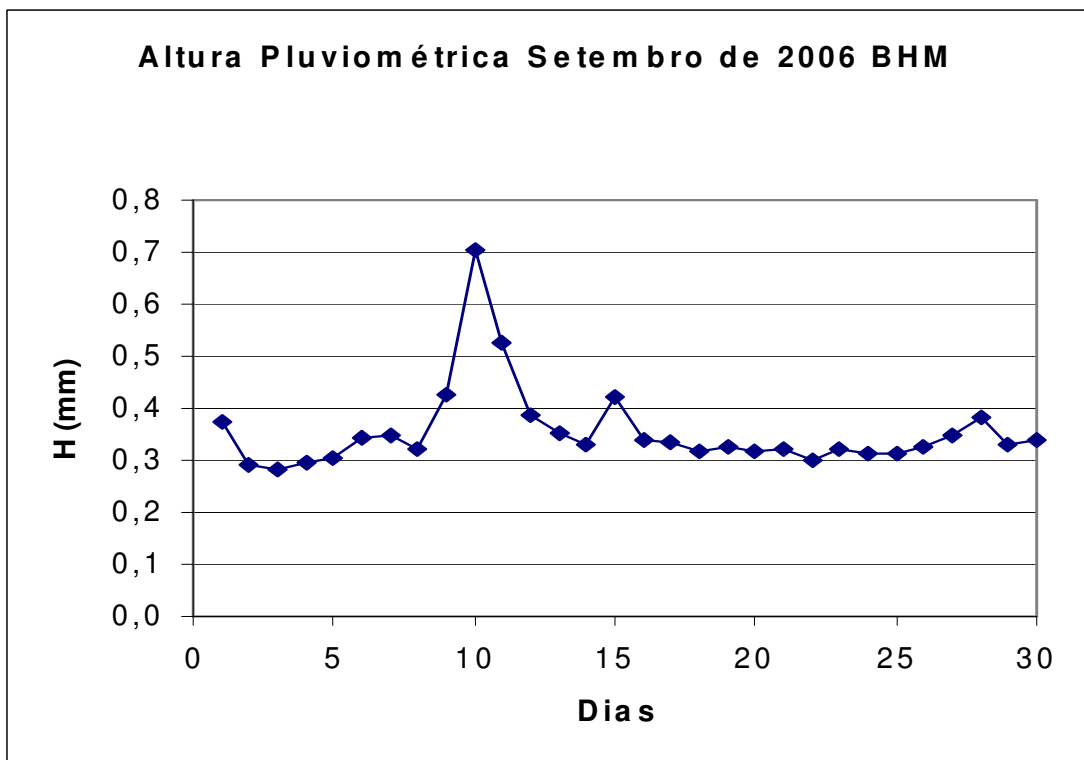
Os dados obtidos para a altura pluviométrica na BHM e da vazão na FBF para o mês de setembro de 2006, tabela 5.7, determinam hidrógrafa, figura 5.11 e gráfico da altura pluviométricas, figura 5.12, correspondentes considerando a defasagem ocorrida devido ao tempo de concentração adotado. Na figura 5,13 está representado o gráfico para correlação entre Q e H.

**Tabela 5.7** – Altura pluviométrica obtida pelo processamento de imagens do radar (SIRMAL) e série de dados de vazão (ANA) do mês de setembro de 2006.

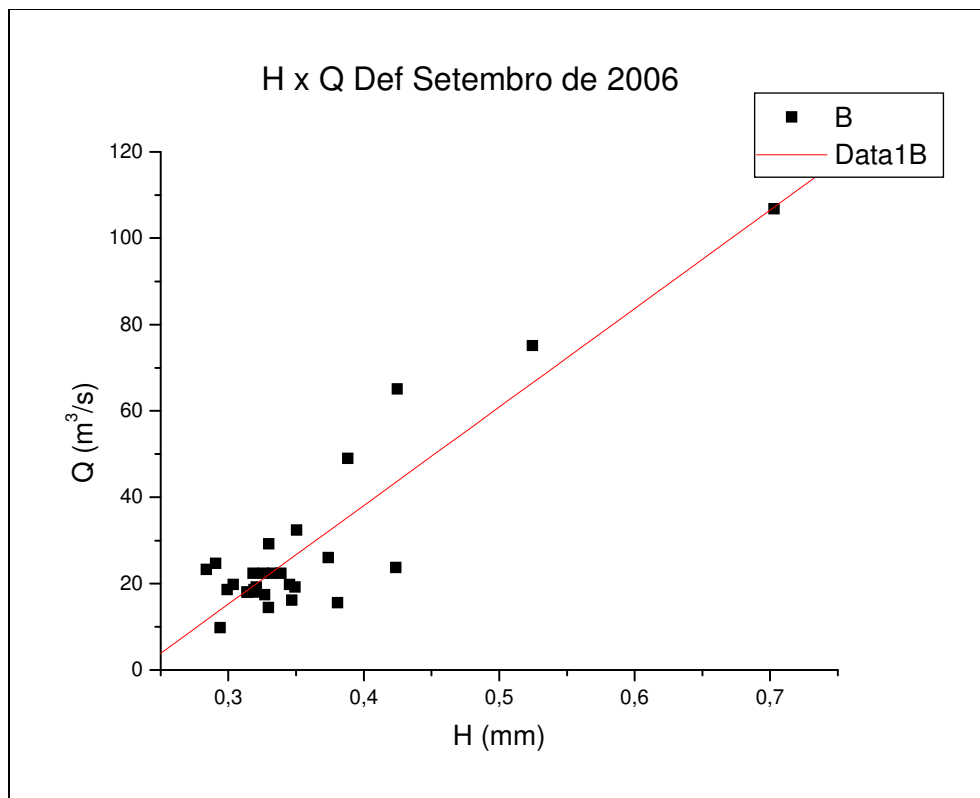
Dia	H (mm)	Q (m <sup>3</sup> /s)	Q def 24h
1	0,37389	22,4	26,0
2	0,29076	26,0	24,7
3	0,28372	24,7	23,3
4	0,29397	23,3	9,8
5	0,30360	9,8	19,8
6	0,34518	19,8	19,8
7	0,34923	19,8	19,2
8	0,32057	19,2	19,2
9	0,42480	19,2	65,1
10	0,70287	65,1	106,8
11	0,52459	106,8	75,1
12	0,38839	75,1	49,0
13	0,35052	49,0	32,4
14	0,32980	32,4	29,2
15	0,42376	29,2	23,7
16	0,33882	23,7	22,4
17	0,33309	22,4	22,4
18	0,31826	22,4	22,4
19	0,32597	22,4	22,4
20	0,31904	22,4	18,6
21	0,32060	18,6	18,6
22	0,29916	18,6	18,6
23	0,32042	18,6	18,0
24	0,31412	18,0	18,0
25	0,31380	18,0	18,0
26	0,32700	18,0	17,4
27	0,34677	17,4	16,2
28	0,38083	16,2	15,6
29	0,32966	15,6	14,5
30	0,34102	14,5	



**Figura 5.11.** Hidrógrafa obtida para o mês de setembro de 2006 (ANA).



**Figura 5.12.** Altura pluviométrica obtida a partir do processamento de imagem do radar (SIRMAL) para setembro de 2006.



**Figura 5.13.** Gráfico para correlação entre a vazão (Q) e a altura pluviométrica (H) para o mês de setembro de 2006.

A regressão linear entre  $Q_{def}$  e  $H$  para setembro de 2006 apresenta os seguintes resultados.

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

**Tabela 5.8** Regressão linear Q x H do mês de setembro de 2006.

Parâmetros	Valor	Erro	R	$\sigma$
A	-53,16162	7,37511	0,90805	8,91056
B	228,10101	20,24892		

Em setembro de 2006, chuvas provocadas, possivelmente pela combinação entre a brisa marinha e as POA's provocaram um aumento de seis vezes no nível de vazão na Fazenda Boa Fortuna. Da análise do gráfico da altura pluviométrica se verifica a correspondência entre esta e a vazão após o tempo de concentração para a BHM. Altura indicada para o pico foi de aproximadamente duas vezes o altura

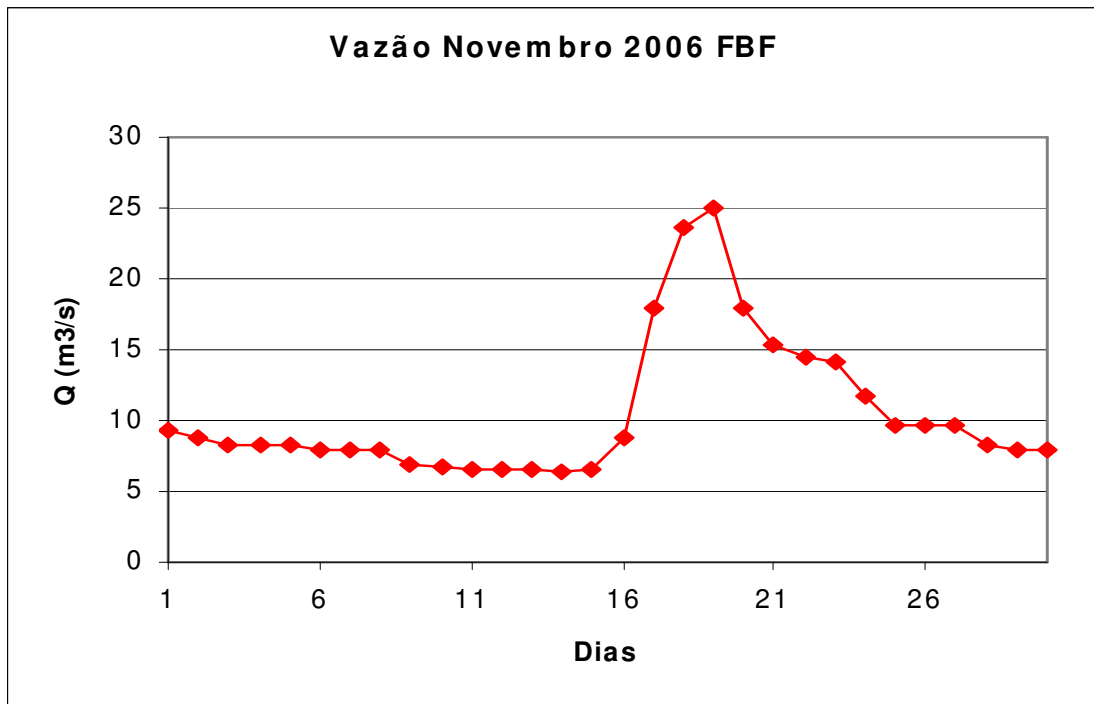
média antecedente. O índice de correlação  $R=0,91$  indica uma boa perspectiva para a estimativa de Q a partir de H.

### 5.5 Novembro de 2006

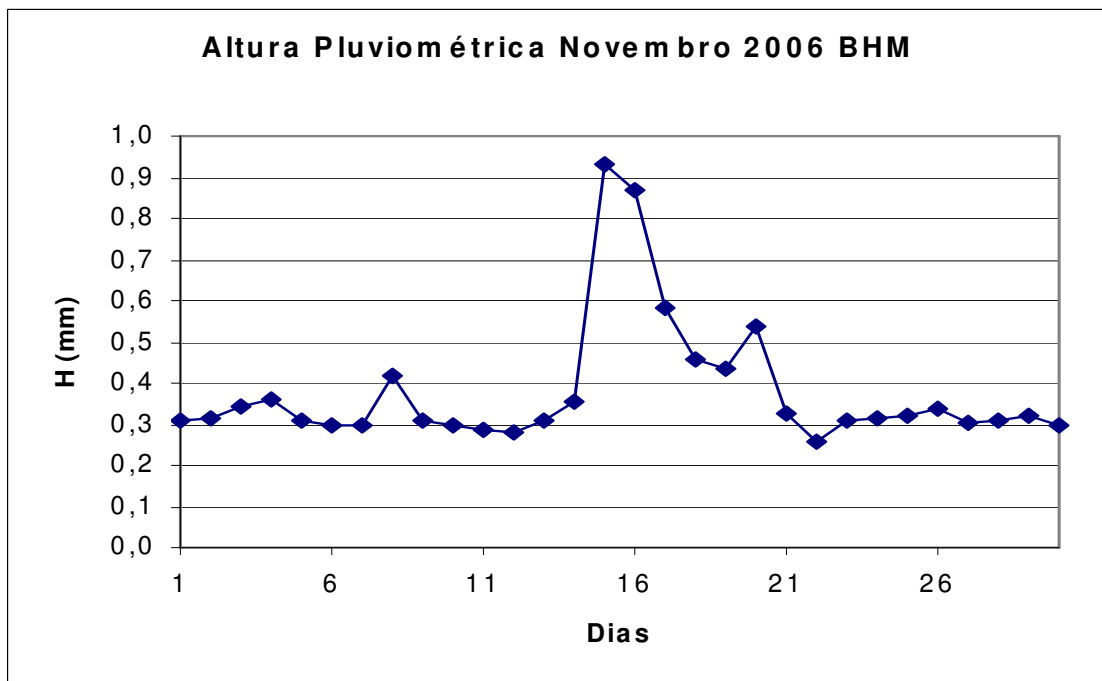
Em novembro de 2006, a hidrógrafa, figura 5.14, obtida a partir dos dados de vazão, tabela 5.9, apresenta uma elevação acentuada que tem o correspondente no gráfico da altura pluviométrica, figura 5.15, contudo o tempo de concentração de 24 horas não parece ser adequado para o mês, conforme se observa no gráfico para correlação Q x H da figura 5.16.

**Tabela 5.9** – Altura pluviométrica obtida pelo processamento de imagens do radar (SIRMAL) e série de dados de vazão (ANA) do mês de novembro de 2006.

Dias	H (m)	H(mm)	Q (m <sup>3</sup> /s)	Q Def 24h
1	0,00031	0,30799	9,25	8,78
2	0,00031	0,31154	8,78	8,31
3	0,00034	0,34148	8,31	8,31
4	0,00036	0,35809	8,31	8,31
5	0,00031	0,31122	8,31	7,85
6	0,00030	0,29723	7,85	7,85
7	0,00030	0,29608	7,85	7,85
8	0,00042	0,41790	7,85	6,95
9	0,00031	0,30763	6,95	6,74
10	0,00030	0,29952	6,74	6,52
11	0,00029	0,28653	6,52	6,52
12	0,00028	0,27758	6,52	6,52
13	0,00031	0,30823	6,52	6,31
14	0,00035	0,35156	6,31	6,52
15	0,00093	0,93339	6,52	8,78
16	0,00087	0,87024	8,78	17,97
17	0,00058	0,58317	17,97	23,66
18	0,00046	0,45659	23,66	25,00
19	0,00044	0,43537	25,00	17,97
20	0,00054	0,53550	17,97	15,33
21	0,00032	0,32393	15,33	14,48
22	0,00026	0,25614	14,48	14,20
23	0,00031	0,30696	14,20	11,77
24	0,00032	0,31618	11,77	9,74
25	0,00032	0,31907	9,74	9,74
26	0,00034	0,33714	9,74	9,74
27	0,00030	0,30045	9,74	8,31
28	0,00031	0,30966	8,31	7,85
29	0,00032	0,31750	7,85	7,85
30	0,00030	0,29990	7,85	

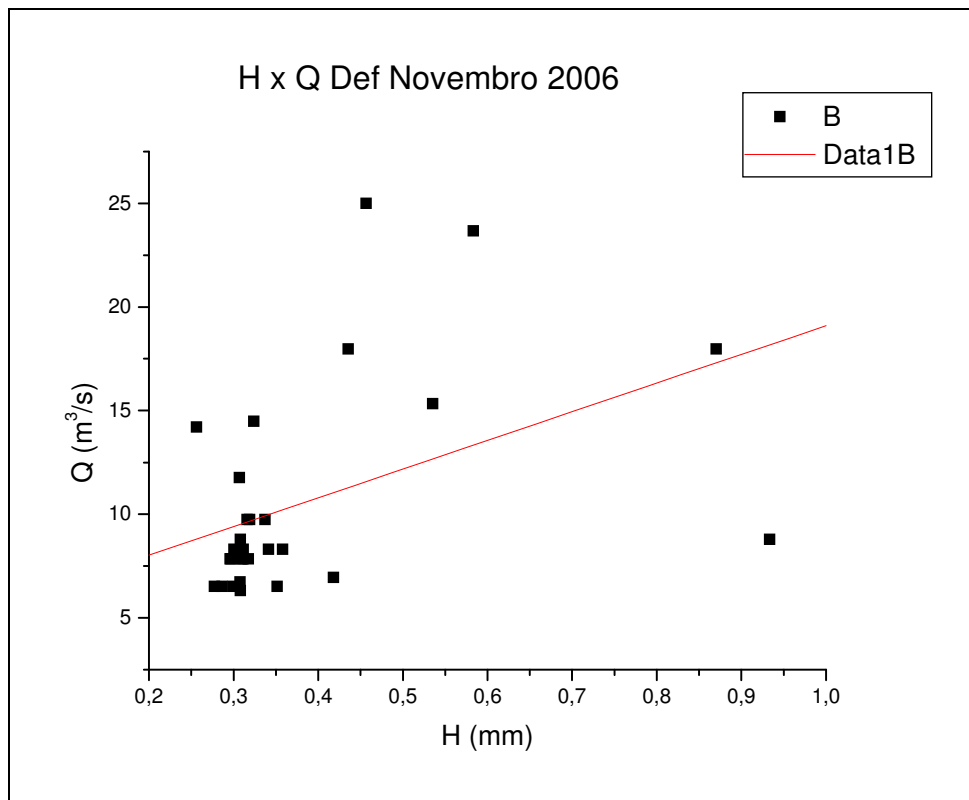


**Figura 5.14.** Hidrógrafa do rio Mundaú obtida na estação da FBF, para o mês de novembro de 2006 (ANA).



**Figura 5.15.** Altura pluviométrica na BHM, obtida a partir do processamento de imagem do radar (SIRMAL) para novembro de 2006.





**Figura 5.16.** Gráfico para correlação entre a vazão (Q) e a altura pluviométrica (H) para o mês de novembro de 2006.

A regressão linear entre  $Q_{def}$  e  $H$  para novembro de 2006 apresenta os seguintes resultados.

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

**Tabela 5.10** Regressão linear Q x H do mês de novembro de 2006.

Parâmetros	Valor	Erro	R	$\sigma$
A	5,25751	2,22783	0,44347	4,6254
B	13,84	5,38315		

As chuvas sobre a BHM em novembro de 2006, provocaram uma variação de 2,5 vezes a vazão antecedente. A altura pluviométrica obtida também respondeu a precipitação com uma variação de 3 vezes. Contudo o que mais chama atenção na comparação da hidrógrafa com o gráfico da altura é a defasagem que parece indicar um tempo de concentração superior a dois dias para a BHM. O baixo índice de

correlação,  $R=0,44$  indica haver uma variação no tempo de concentração em função da distribuição espacial das chuvas na BHM.

Para uma avaliação qualitativa da estimativa de vazão na Fazenda Boa Fortuna, foram definidas três classes de estimativa, conforme tabela 5.11.

**Tabela 5.11** Classes de estimativas para Q na Fazenda Boa Fortuna, em relação a vazão e a altura pluviométrica.

<b>Estimativa</b>	<b>Q (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>H (mm)</b>
<b>Vazão baixa</b>	< 30	< 0,47
<b>Vazão média</b>	30 <= Q <= 90	0,47 <= H <= 1,45
<b>Vazão alta</b>	> 90	> 1,45

Os valores limites de H que determinam a estimativa, foram calculados a partir do valor limite estipulado para os níveis de vazões e verificados na hidrógrafa de cada mês. Dessa forma, identificou-se o dia em que houve uma vazão próxima dos limites e em seguida, considerando o tempo de concentração do rio para a Fazenda Boa Fortuna, encontrou-se o valor da altura pluviométrica determinada pelo processamento. Em seguida, calculou-se a média aritmética dos valores de H e Q.

---

## 6 - CONCLUSÃO

A abordagem geral para a obtenção de um código de análise qualitativa da vazão a partir da imagem do radar foi desenvolvida em duas etapas. A primeira foi a análise da precipitação de cinco meses dos anos de 2004, 2005, 2006. Nesta foi extraída taxa de precipitação e com ela determinado o volume precipitado sobre a BHM. Com isso calculou-se a altura pluviométrica considerada sobre a área exposta da BHM, para cada imagem somando as 24 por dia e extraíndo a altura acumulada no dia. Assim, obteve-se a série de alturas necessárias à comparação com a vazão. Foram processadas aproximadamente 3603 imagens e extraídos 153 dados de altura pluviométrica.

A partir análise dos meses de Janeiro de 2004, dezembro de 2005, agosto, setembro e novembro de 2006, verifica-se que o tempo concentração do rio até a Fazenda Boa Fortuna foi de cerca de um dia, contudo, a distribuição espacial e temporal das chuvas pode modificar este importante parâmetro. Isto pode ser verificado observando as diferenças dos tempos entre os picos de Q e H para os meses de dezembro 2005, setembro e novembro de 2006.

Percebe-se ainda, que as vazões típicas, na Fazenda Boa Fortuna, oscilam entre valores de 5 a 10 m<sup>3</sup>/s nos meses de verão e de 20 a 50 m<sup>3</sup>/s nos meses de inverno. Ocorreram picos de vazões que atingiram valores superiores a 100 m<sup>3</sup>/s nos meses estudados. Estes picos foram registrados tanto na série de vazões quanto nas imagens processadas pelo PEVva, reforçando a relação direta entre a precipitação e a vazão.

O grau de correlação entre H e Q variou nos meses estudados. Três dos cinco meses estudados, apresentaram valores superiores a 0,6.

As limitações já descritas determinaram a análise qualitativa da vazão, ao invés de uma quantitativa. Por isso, definiram-se três classes para estimativa da vazão; Vazão baixa, alta e média. Na análise dos dados determinaram-se os limites de H para as vazões das classes. Encontraram-se os valores médios de 0,47 e 1,45 mm para esses limites.

A segunda etapa consistiu da alteração do código para que estivesse pronto a ser utilizado por um usuário final. Com este código o usuário terá apenas de armazenar uma imagem gráfica disponível no sítio do SIRMAL e processá-la no

programa PEVx para obter a estimativa da vazão na Fazenda Boa Fortuna após 24 horas, que assumiu-se ser o tempo de concentração para a bacia. No processamento de uma imagem, o código lê os últimos 24 registros armazenados e o compara com os valores limites das classes de vazão, identificando a possível estimativa de vazão. Esta implementação foi necessária para informar ao programa o estado hídrico da BHM, antes da medida. Procedendo dessa forma, o programa PEVx faz a estimativa considerando as precipitações ocorridas no último dia, acumulando a altura pluviométrica e comparando-a com os limites das níveis de vazões.

Os resultados encontrados com o programa de análise, PEVva, apesar de não conclusivos, apontam para uma possível correlação entre H e Q. Dos casos estudados, verifica-se que nos meses de primavera e verão a resposta de H é melhor correlacionada a Q. As respostas da vazão aos picos de precipitação identificados no processamento das imagens é inconfundível nestes meses. Isto se deve possivelmente, ao tipo de precipitação mais freqüente no período, as precipitações convectivas. Já no semestre outono-inverno a correlação diminui consideravelmente dificultando a estimativa. Isto vem limitar fortemente o uso do programa neste período e aponta para uma melhoria em seu algoritmo. Em um contexto geral, os dados observados e correlacionados indicam existir uma função de correlação entre as variáveis H e Q.

Na construção dos algoritmos e códigos, ficou claro a necessidade de envidar maiores esforços na coleta de dados com lapsos de tempo menores e que servissem de comparação com a vazão futura em uma escala de tempo menor, considerando o tempo de concentração para a Fazenda Boa Fortuna. Estudos sobre o tempo de concentração e suas variações podem indicar um melhor ajuste de Q e H com o método proposto.

Outra possibilidade de estudos consiste em se buscar funções periódicas ou mesmo harmônicas, para definir as vazões mínimas e coeficientes de expansão para a altura pluviométrica. Isto iria possibilitar uma melhor aproximação das curvas H e Q o que possivelmente traria um maior grau de correlação entre estas variáveis.

Dentre um dos problemas encontrados no processamento das imagens do radar verificou-se uma variação considerável na relação ruído-sinal das imagens, o que obviamente afeta ao processamento das imagens codificadas no formato jpeg. Um estudo da relação sinal ruído poderia indicar a viabilidade do monitoramento da

vazão através do radar com o processamento de imagens codificadas como as utilizadas nesse trabalho.

Um trabalho importante, seria proceder uma análise estatística sobre a duração do tempo de precipitação comparando imagens de radar e dados de disdrômetros. Esse trabalho poderá dar maior embasamento a duração média das precipitações e sua variabilidade espaço-temporal o que possivelmente permitiria um maior grau de correlação entre as variáveis H e Q.

Outra possibilidade também, seria identificar os tipos de precipitação através dos efeitos destas sobre a vazão em um ponto no rio.

Por fim, um último trabalho seria o de implementar os programas PEVx e PEVva para previsão da vazão em diversos pontos de uma bacia hidrográfica.

## REFERÊNCIAS

---

ALAGOAS. Núcleo de Estadual de Meteorologia e Recursos Hídricos, Secretaria de Planejamento, CDCT/SEPLAN. Boletim Especial de Recursos Hídricos -. Maceió, 1992.

ALAGOAS. Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos de Alagoas. Disponível em: <<http://www.semarh.al.gov.br/recursoshidricos/regioes-hidrograficas>>. Acesso em 13/07/2010.

ARAÚJO, L. E. et al. Análise Estatística de Chuvas Intensas na Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba. Rev. Brasileira de Meteorologia. São José dos Campos, vol.23 no.2, 2008.

ATLAS, D. Radar in Meteorology: Battan Memorial and 40th Anniversary Radar Meteorology Conference. American Meteorological Society-EUA, 806p, 1990; ISBN 978-0-933876-86-6.

BRASIL Agência Nacional de Águas. Inventário das estações fluviométricas. 2ed. Brasília: ANA, SGH, 2009. 196 p. ISBN: 978858962957-7.

BRATER, E.F. WISLER, C.D. Hidrologia. Rio de Janeiro. Livro Técnico S.A. 484p. 1964.

CALBETE, N. O. de; SATYAMURTY, P. Vórtices Ciclônicos da Alta Troposfera que Atuam Sobre a Região Nordeste do Brasil. Climanálise – CPTEC / INPE. Disponível em: <<http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/cliesp10a/dock.html>>, acesso em 10/12/2010.

CARVALHO, G.S. Potencialidade dos recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Mundaú. SERHI . Recife. 2002.

Christian\_Hülsmeier and about the early days of radar inventions. Disponível em: <<http://www.xs4all.nl/~aobauer/Koeln%202006%20ppt.pdf>>. acesso em 26/08/2009.

COSTA, M.C., et al. Distribuição da Precipitação na Bacia do Rio Mundaú, Alagoas e Pernambuco. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, XX. Anais eletrônicos. Florianópolis: SBMET, 2006. Disponível em: <<http://www.cbmet.com/cbm-files/14-55977a26c903bb69e1e83359804a25a.pdf>>. Acesso em 11/05/2010.

DA SILVA, D.F. et al. Acompanhamento Climático das Bacias dos Rios Mundaú e Paraíba do Sul. Revista de Engenharia Ambiental, v.5, n.3, Espírito Santo do Pinhal. set/dez SP – 2008.

FERNANDES, A., KANE, R. ARCOVERDE, R. Delphi 4 Completo Visão Objetiva e Prática. Niterói. Book Express Ltda. 355p. 1998.

FRAGOSO JÚNIOR, C.R., PEDROSA, V.A., SOUZA, V.C.B. Reflexões Sobre a Cheia de Junho de 2010 nas Bacias do Rio Mundaú e Paraíba. 2010. Disponível em: <<http://www.ctec.ufal.br/professor/vap/Cheia2010.pdf>>. Acesso em 02/12/2010.

FRANK, N.L. On the Energetics of the Cold lows. In: Proceedings of the Symposium on Tropical Meteorology, American Meteorological Society, EIV I-EIV 6, Boston, USA. 1970.

GAN, M.A., KOUSKY, V.E., Vórtices Ciclônicos da Alta Troposfera no Oceano Atlântico Sul. Revista Brasileira de Meteorologia, São José dos Campos. 1, p 19-28. 1986.

GAN, M.A..Um Estudo Observacional Sobre as Baixa frias da Alta Troposfera, nas Latitudes Subtropicais do Atlântico Sul e Leste do Brasil. 1982, 80p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), INPE, S.J. Campos.

History of Radar Disponível em: <[inventors.about.com/library/inventors/blradar.htm](http://inventors.about.com/library/inventors/blradar.htm)>. Acesso em 10/12/2010.

KOUSKY, V. E. e GAN, M.A.,. 1981. "Upper tropospheric cyclonic vórtices in the tropical South Atlantic". Tellus, v.33(6), p538 –551.

KOUSKY, V.E. "Frontal influences on Northeast Brazil". Mon. Wea. Rev., 107, p1140-1153. 1979.

MEDEIROS, F.C.; MOLION, L.C.B.. Influência do Clima Global Nos Prognósticos das Descargas de Bacia Hidrográficas do Estado de Alagoas.In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, XII. Anais. Foz do Iguaçu : SBMET, 2002.

MOLION, L. C. B. e 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. de. Um modelo Hidrológico com Estimativa de Precipitação Por Satélite. 1992. Tese (Doutorado em Meteorologia) INPE, São José dos Campos.

MORAES, M. C. DA SILVA. Distribuição das gotas de chuva e relação Z – R para radar na costa leste do nordeste do Brasil: 2003, 101p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) UFAL, Maceió.

MORAES,J.C., OLIVEIRA,M.C.F., COSTA,M.C. Regime Hidrológico do Rio Mundaú. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, XIV.,Anais eletrônicos.

Belém: SBMET, 2010. Disponível em: <<http://www.cbmet.com/cbm-files/14-eb3243822f130061a0732433d5903734.pdf>>. Acesso em 16/12/2009.

MOREIRA, I. A. Modelagem Hidrológica Chuva-Vazão com dados de Radar e Pluviômetros 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidrológica). UFPR, Curitiba.

OLIVEIRA, A.S. Interações Entre Sistemas Frontais na América do Sul e a Convecção na Amazônia. 1986. 115p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). INPE. São José dos Campos.

PARKER J. S. Historia del Radar. Revista de Marina Armada de Chile, v.1, 2000. Disponível em: <http://www.revistamarina.cl/> . Acesso em 02/12/2009.

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). USP. São Paulo.

PINHO, V.N., GOMES, H.B., MEDEIROS, I.R. et al. Análise Subjetiva de Eventos Meteorológicos através do Radar Meteorológico de Maceió-AL. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, XIV. Anais eletrônicos. Belém: SBMET, 2010. Disponível em: <[http://www.cbmet2010.com/anais/artigos/558\\_51330.pdf](http://www.cbmet2010.com/anais/artigos/558_51330.pdf)>. Acesso em 02/12/2010.

QUINTÃO, D. DE A. Calibração de Sistema de Radar meteorológico Através de Dados Espectrogranulométricos dos Campos de Chuva no Nordeste do Brasil: 2004, 101p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). UFAL, Maceió.

RadarTutorial.eu. Disponível em: <<http://www.radartutorial.eu/09.receivers/rx05.en.html>>. Acesso em ;02/12/2010.

RAO, V.B., BONATTI, J.P.: On the origin of upper tropospheric cyclonic vortices in the South Atlantic ocean and adjoining Brasil during the summer. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 37, p 11-16. 1987.

REIS, L.G.M., DA SILVA, O.A., PEDROSA, V.A. Análise da Cheia de Agosto de 2000 no Rio Mundaú em Alagoas. Disponível em: <<http://www.ctec.ufal.br/professor/vap/CheiaMundau2000.pdf>>. Acesso em 16/12/2009.

SAUVAGEOT, H.. *Radar Meteorology*. Artech House. EUA, 366p, 1992;  
SILVA, E. A. S; TUCCI, C.E.M. Relação Entre as Vazões Máximas Diárias e Instantâneas. (RBRH) *Revista Brasileira de Recurso Hídrico*, vol 3, nº 1, p 133 – 151, 1998.

TENÓRIO, R. S. (1985). Estudo Hidrometeorológico da Bacia do Rio Mundaú. UFAL, Maceió. 1985.



TENORIO, R. S. et al. Estimation of Z-R Relation through the disdrometer for the coastal region in the Northeast of Brazil. J. of the Korean Earth Science Society, v.24, p.30-35, 2003.

TENORIO, R. S. et al. Radar Rainfall Studies over Eastern Cost of Northeast Brazil. J. Korean Met. Soc., v.39, p.699-707, 2003.

TENÓRIO, R. S. Etude statistique de la distribution de taille des cellules de pluie: implications pour l'estimation des champs de précipitation par radar. 1996.198p. Dissertação (Doutorado) – Universidade Paul Sabatier, Toulouse, França.

TENÓRIO, S. R., B. H. KWON, M. C. S AND G. LEE. Tropical Rainfall Charactersitics at the Eastern Coast of South America. Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences, 46, 415-423. 2010.

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

UNIVERSITY OF ILLINOIS, Online Remote Sensing Guide: Radar Meteorology Guide, W2010 Project. Disponível em:<[http://ww2010.atmos.uiuc.edu/\(Gh\)/guides/rs/rad/home.rxml](http://ww2010.atmos.uiuc.edu/(Gh)/guides/rs/rad/home.rxml)>. Acesso 02/12/2009.

VILLELA, S. M; MATOS, Hidrologia Aplicada. São Paulo. Editora Mc Graw-Hill do Brasil Ltda. 245p. 1975.

WOOD, S. – Turbo Pascal – Guia do Usuário. São Paulo. McGraw Hill. 177p. 1987.