

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

GERSON ERNESTO VARELA LOPES

**CARACTERÍSTICA MULTIMODAL DO FATOR DE REFLETIVIDADE RADAR  
PARA SISTEMA DE PRECIPITAÇÃO: ESTUDO DO CASO FURACÃO KATRINA**

Maceió – Alagoas

Outubro, 2014

GERSON ERNESTO VARELA LOPES

**CARACTERÍSTICA MULTIMODAL DO FATOR DE REFLETIVIDADE RADAR  
PARA SISTEMA DE PRECIPITAÇÃO: ESTUDO DO CASO FURACÃO KATRINA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Meteorologia.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Sarmiento Tenório  
Doutor em Teledetecção Atmosférica

Maceió – Alagoas

Outubro, 2014

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

Bibliotecário Responsável: Valter dos Santos Andrade

- L864c    Lopes, Gerson Ernesto Varela.  
          Característica multimodal do fator de refletividade radar para sistema de precipitação: estudo do caso furacão Katrina / Gerson Ernesto Varela Lopes. – 2014.  
          79 f. : il. tabs. e gráfs.
- Orientador: Ricardo Sarmiento Tenório.  
          Dissertação (Mestrado em Meteorologia: Processos de Superfície Terrestre) – Universidade Federal de Alagoas. Instituto de Ciências Atmosféricas. Maceió, 2014.
- Bibliografia: f. 70-72.  
          Apêndice: f. 73-79.
1. Precipitação atmosférica (Sistema) - Análise. 2. Meteorologia com radar. 3. Refletividade radar. 4. Furacão Katrina. 5. Bandas de precipitação. I. Título.

CDU: 551.577



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

### CERTIFICADO DE APRESENTAÇÃO

N.º de ordem: MET-UFAL-MS-115.

**“CARACTERÍSTICA MULTIMODAL DO FATOR DE  
REFLETIVIDADE RADAR PARA SISTEMA DE PRECIPITAÇÃO:  
ESTUDO DO FURACÃO KATRINA”**

*Gerson Ernesto Varela Lopes*

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 Sarmento Tenório  
Presidente e Orientador

Prof. Dr. Humberto Alves Barbosa  
Membro Interno - UFAL

Prof. Dr. Luiz Carlos Baldicero Molion  
Membro Interno - UFAL

Prof. Dr. Olivier Pujol  
Membro Externo  
Universidade de Lille - França

OUTUBRO/2014



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS  
COORDENAÇÃO DO MESTRADO EM METEOROLOGIA

### ATA DE APRESENTAÇÃO PÚBLICA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Aos trinta e um dias do mês de outubro do ano de dois mil e catorze, às dez horas, na Torre do Radar Meteorológico, Campus A. C. Simões da Universidade Federal de Alagoas (UFAL) perante a Banca Examinadora composta pelo Prof. Dr. Ricardo Sarmento Tenório – Presidente, Prof. Dr. Humberto Alves Barbosa e Luiz Carlos Baldicero Molion – membros internos, Prof. Dr. Olivier Pujol – membro externo, professor da Universidade de Lille – França, o senhor **Gerson Ernesto Varela Lopes**, sob a orientação do Prof. Ricardo Sarmento Tenório, apresentou publicamente, uma dissertação intitulada: **“Característica Multimodal do Fator de Refletividade Radar para Sistema de Precipitação: Estudo do Furacão Katrina”** número de série, MET-UFAL-MS-115, como requisito para a obtenção do Grau de Mestre em Meteorologia, área de concentração: Processos de Superfície Terrestre. Após a apresentação, e, seguindo o regimento do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da UFAL no seu Artigo 19, a Banca Examinadora considerou o senhor **Gerson Ernesto Varela Lopes APROVADO**. Ainda de acordo com o parágrafo único do Artigo 19, o Diploma de Mestre em Meteorologia - área de concentração Processos de Superfície Terrestre será expedido a requerimento do concluinte, anexado a no mínimo 07 (seis) cópias da versão definitiva da dissertação, satisfeitas as modificações indicadas pelos relatores e Banca Examinadora. Eu, Maria Luciene Dias de Melo, Coordenadora do Curso de Mestrado em Meteorologia da UFAL, lavrei a presente ata, que vai assinada por mim e pelos componentes da Banca Examinadora.

Maceió-AL, 31 de outubro de 2014.

Profa. Dra. Maria Luciene Dias de Melo  
(Coordenadora)

Prof. Dr. Ricardo Sarmento Tenório  
(Presidente e Orientador)

Prof. Dr. Humberto Alves Barbosa  
(Membro Interno - UFAL)

Prof. Dr. Luiz Carlos Baldicero Molion  
(Membro Interno – UFAL)

Prof. Dr. Olivier Pujol  
(Membro Externo – Universidade de Lille - França)

Deus, que me tem dado força e coragem sempre.

*Agustinho, Fatinha, Simone e Silvye, família!*

*Talita e Kauê, amores de minha vida!*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, que com graça concede toda a capacidade possível e imaginável.

Ao professor Dr. Ricardo Sarmiento Tenório pela dedicação e esforços empregados ao aceitar o desafio de orientador um aluno sem *background* em radar e teledetecção atmosférica.

Valeu André, pelas aulas entusiasmadas!

Ao professor Dr. Olivier Pujol e Dr. Henri Sauvageot, que juntos me acolheram e deram o pontapé inicial para que este trabalho fosse realizado. *Merci aussi à* M.Sc Valentin Louf!

Aos membros da banca – Dr. Humberto Barbosa por aceitar contribuir com este estudo –, e professor Dr. Luiz C. B. Molion, exemplo de cientista, acadêmico e entusiasta.

Ao professor Carlos F. de Angelis, que possibilitou o intercâmbio no INPE sob orientação do Dr. Wendell Farias, M.Sc Izabelly da Costa e Marcos Rodrigues.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES) pelo suporte financeiro recebido durante dois anos de mestrado.

Aos professores do Programa de Pós Graduação ICAT/UFAL, entre eles a incansável dedicação da Dra. Luciene Melo; Dr. Vladimir Levit e Dra. Natália Fedorova; Dr. Ricardo Amorim e Dr. Roberto Lyra.

Aos colegas de mestrado: Diva Cordeiro, Ruany Maia, Lelo Tayob, Anderson Gonçalves e Carlos Neto. Caetano Mancini, valeu *mábro!* Obrigado pela nossa turma e amizade

Minha família, a de perto e a de longe, por se mostrarem presentes sempre!

Aos amores de minha vida, Talita Fortaleza, nosso grande Kauê & bebê que está por vir. Vossa paciência, amor e presença são o bálsamo para os meus dias.

Todos vocês juntos são coautores desse trabalho!

“ELE estende o norte sobre o vazio; suspende a terra sobre o nada” Jó 26:7 (3.500 anos)

(*Isaac Newton* – Gravitação Universal, 1687)

“Da terra procede o pão, mas embaixo é revolvida como por fogo” Jó 28:5 (3.500 anos)

(*Andrija Mohorovičić* – manto, 1905; *Beno Gutenberg* – núcleo, 1930)

“Porque atraí para si gotas de água que de seu valor destilam em chuva, a qual das nuvens derrama e goteja sobre o homem abundantemente” Jó 36:27-28 (3.500)

(*Pierre Perrault* e *Edmundo Mariotte* – ciclo hidrológico, séc. XVI e XVII)

“... [o sol] que é qual noivo que sai do seu aposento, e se alegra como um herói a percorrer o seu caminho. Principia numa extremidade do céu e até à outra vai o seu percurso; e nada foge ao seu calor” Salmos 19:5-6 (3.000 anos)

(*Bertil Lindblad* – 250 km/s, século XX)

Deus, que é bom, criou o universo ordenadamente para nós. (*Nicolau Copérnico*)

O sistema mais lindo do sol, planetas e cometas, só pode proceder da sabedoria e poder de um Ser inteligente e poderoso, e na explicação de seu poder ele é chamado de Deus.

(*Isaac Newton*)

Os descobrimentos cientistas revelam um universo que concorda com as opiniões religiosas

(*Charles Townes*, Nobel da Física)

“O Todo Poderoso tem demonstrado suficiente sua grandeza tanto nas Escrituras como na ciência. O problema não está na deficiência da parte de Deus, mas na nossa obscuridade.”

(*Richard Swenson*, University of Wisconsin)

## RESUMO

Desde o início do uso da tecnologia de radares meteorológicos, excelente instrumento para detecção, observação e estudo de estruturas precipitantes, vários autores afirmam que ele permite o monitoramento de diferentes sistemas meteorológicos (Battan, 1973; Sauvageot, 1992, entre outros). O principal objetivo desse estudo foi analisar o comportamento da função densidade de probabilidade (PDF) do fator de refletividade radar ( $Z$ ) durante a transição do furacão *Katrina* do Golfo do México para o continente americano, onde teve impacto em diferentes estados devido à sua grande extensão e poder destrutivo. Para que essa análise fosse possível, foram adotados alguns critérios, utilização de softwares e uso de funções estatísticas. A distribuição de probabilidade do fator de refletividade radar  $P(Z)$  permite encontrar os possíveis valores (limites) de refletividade para o sistema o que possibilita sua caracterização em termos de estrutura física. O *Katrina* (Agosto de 2005) foi um furacão extremamente intenso, considerado um dos desastres naturais mais devastadores dos EUA, não só por danos materiais, mas principalmente pelas perdas humanas (Knabb et al., 2005). A gênese complexa do *Katrina* envolveu a interação de uma onda tropical, remanescentes de médios níveis da Depressão Tropical 10, e uma baixa na troposfera superior. Três radares foram escolhidos para estudar as características físicas do *Katrina* de acordo com o deslocamento do sistema: KLIX - Nova Orleans (Louisiana), KBMX - Birmingham (Alabama), e KNQA - Memphis (Tennessee). Usando o IDV (*Integrated Data Viewer* - UNIDATA, UCAR) para visualização estrutural do *Katrina* e o MATLAB® para calcular histogramas da função de densidade acumulada empírica (eCDF), os resultados preliminares demonstram uma coexistência de precipitação estratiforme e convectiva.

Devido à existência de diferentes bandas de precipitação, a refletividade varia entre aproximadamente 10 a 45 dBZ, com alguns picos convectivos e estratiformes de acordo com a força de furacão. Em todos os radares analisados persiste um comportamento semelhante, ou seja, nas primeiras horas de observação da PDF tende a bimodalidade com valores aproximados de 15 e 23-25 dBZ, e posteriormente apresenta uma tendência unimodal. Este fato deve-se à aproximação das bandas convectivas – primária, secundária – e elementos convectivos distantes.

**Palavras-chave:** Função densidade de probabilidade. Sistema precipitante. Refletividade radar. Furacão Katrina. Bandas de precipitação.

## ABSTRACT

Weather Radar technology have been used for monitoring weather systems since the beginning of its development as a powerful instrument to detect, observe, and study precipitating structures (Battan, 1973; Sauvageot, 1992, among others). A set of radar data gathered over various sites of the US NEXRAD (Next Generation Weather Radar) S band radar network is used to analyze the probability distribution function (pdf) of the radar reflectivity factor ( $Z$ ) of precipitation,  $P(Z)$ . The probability distribution of the average reflectivity factor  $P(Z_m)$  allows to find the possible values (limits) of reflectivity for the system and can thus characterize it in terms of its physical structure. Hurricane Katrina (August 2005) was an extraordinarily powerful hurricane, considered one of the most devastating natural disasters of the USA, not only by property damage, but mainly for the human losses (Knabb et al., 2005). Katrina complex genesis involved the interaction of a tropical wave, mid-tropospheric remnants of Tropical Depression 10, and an upper-tropospheric trough. Three radars were chosen to study Katrina's physical characteristics (i.e., hydrometeors, convective vs stratiform features, rainbands) according to the hurricanes displacement: KLIX New Orleans (Louisiana), KBMX Birmingham (Alabama), and KNQA Memphis (Tennessee). Using IDV (Integrated Data Viewer – UNIDATA, UCAR) to visualize Katrina structure and MATLAB<sup>®</sup> to compute histograms of the empirical cumulative density function (ecdf), preliminary results demonstrate a co-existence of stratiform and convective precipitation. Due to the existence of different rainbands, reflectivity varies between ~10 to 45 dBZ, with some convective and stratiform peaks according to the hurricane strength. In all analyzed radar persists a similar behavior, i.e., in the early hours of observation the PDF tends to bimodality with approximate values of 15 and 23-25 dBZ, and later the trend is to unimodality. This fact is due to the approximation of the convective bands - primary, secondary - and far convective elements.

**Key-words:** Probability density function. Precipitating system. Radar reflectivity. Katrina hurricane. Rainbands.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Características da precipitação estratiforme (a) e convectiva (b) para perfil vertical. Sombreamento mostra maior intensidade de eco de radar, com listrados indicando o eco mais forte. .19	19
Figura 2 – Esquema ilustrativo de refletividade radar para plano horizontal. ....20	20
Figura 3 – Esquema ilustrativo dos estágios de evolução de uma célula convectiva sendo (a) estágio cumulus (b) estágio maduro e (c) estágio de dissipação. ....21	21
Figura 4 – Secção vertical numa linha de instabilidade idealizada por Smull e Houze, 1985.....22	22
Figura 5 – Localizações e trilhas de ciclones tropicais para 1970-1989 em relação à superfície dos oceanos globais do estudo de Legates e Willmott (1990). (a) Localização dos furacões no primeiro dia com ventos de 115,2 km/h e (b) e <i>tracks</i> dos furacões.....24	24
Figura 6 – Anatomia de um ciclone tropical para o hemisfério norte. ....25	25
Figura 7 – Ilustração esquemática de um ciclone tropical típico do Hemisfério Norte. ....26	26
Figura 8 – Ordens de grandeza da refletividade radar equivalente dos hidrometeoros correspondente (comprimento de onda igual a 10,7 cm). ....29	29
Figura 9 – Função densidade de probabilidade hipotética para $f(x)$ para uma variável aleatória não-negativa $X$ . As probabilidades são obtidas integrando porções de $f(x)$ . ....33	33
Figura 10 – <i>Best track</i> das posições do centro do furacão Katrina, 23-30 Agosto de 2005. ....35	35
Figura 11 – Rede nacional de radares NEXRAD. Destacados os radares utilizados para o presente estudo. ....38	38
Figura 12 – Altura do feixe de radar em função da distância e elevação para uma atmosfera padrão..41	41
Figura 13 – Exemplo de imagem radar nível II em 2D. ....42	42
Figura 14 – Trajeto percorrido pelo Katrina desde sua formação até a dissipação, com detalhes sobre intensidade, pressão mínima, variação temporal e posição dos radares escolhidos. ....44	44
Figura 15 – Secção transversal vertical de Nova Orleães, mostrando altura máxima. ....45	45
Figura 16 – Fluxograma explicativo da metodologia aplicada no estudo. ....47	47
Figura 17 – Distribuição da refletividade radar P(Z) para Nova Orleans (KLIX) no período de 0000 UTC às 1300 UTC, 29 de Agosto 2005. ....49	49
Figura 18 – Distribuição da refletividade radar P(Z) para Birmingham (KBMX) no período de 1000 UTC 29 de Agosto à 0700 UTC 30 de Agosto 2005. ....52	52
Figura 19 – Distribuição da refletividade radar P(Z) para Memphis (KQNA) no período de 1200 UTC 29 de Agosto à 1500 UTC 30 de Agosto 2005. ....56	56
Figura 20 – Mosaico de radares utilizados no estudo: (1) KLIX, (2) KBMX e (3) KNQA. ....60	60
Figura 21 – Refletividade observada para o radar KLIX para dia 29 Agosto. ....62	62
Figura 22 – Refletividade observada para o radar KBMX para dia 29 e 30 de Agosto. ....64	64
Figura 23 – Refletividade observada para o radar KNQA para dia 30 de Agosto. ....66	66

## LISTA DE QUADROS

Tabela 1 – Descrição Escala de furações Saffir-Simpson .....	27
Tabela 2 – Descrição sistema de radares NEXRAD. Fonte: Adaptado de Diop (2010). .....	39
Tabela 3 – Localização dos radares e descrição dos dados utilizados .....	40

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

**AMS** – American Meteorological Society

**CAPPI** - Constant Altitude Plan Position Indicator

**CEMADEN** – Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais

**DDT** – Depressão Tropical *Ten*

**EEC** – Enterprise Electronics Corporation

**EUA** – Estados Unidos da América

**FEMA** – Agência Federal de Gestão de Emergência

**GEMPAK** – General Meteorology PAcKage

**IDV** – Integrated Data Viewer

**MATLAB** – MATrix LABoratory

**McIDAS** – Man computer Interactive Data Access System

**NEXRAD** – Next Generation Radar

**NHC** – National Hurricane Center

**NWS** – National Weather Service

**PDF** – Função Densidade de Probabilidade

**PPI** – Plan Position Indicator

**R** – Precipitação

**UCAR** – University Corporation for Atmospheric Research

**UTC** – Universal Time Coordinated

**Z** – Refletividade radar

**ZCIT** – Zona de Convergência Intertropical

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>17</b>
2.1	SISTEMAS PRECIPITANTES .....	18
2.1.1	<b>Sistemas Estratiformes x Convectivos</b> .....	<b>18</b>
2.1.2	<b>Células convectivas</b> .....	<b>20</b>
2.1.3	<b>Linhas de Instabilidade (<i>Squall Lines</i>)</b> .....	<b>21</b>
2.2	CICLONES TROPICAIS .....	23
2.2.1	<b>Estrutura de um Ciclone Tropical</b> .....	<b>24</b>
2.3	HIDROMETEOROS.....	27
2.4	REFLETIVIDADE RADAR .....	29
2.5	FUNÇÃO DENSIDADE DE PROBABILIDADE .....	32
2.6	FURACÃO KATRINA.....	33
2.6.1	<b>Histórico Sinótico</b> .....	<b>34</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>38</b>
3.1	DADOS .....	38
3.2	METODOLOGIA.....	41
3.2.1	<b>IDV – <i>Integrated Data Viewer</i></b> .....	<b>41</b>
3.2.2	<b>MATLAB®</b> .....	<b>43</b>
3.2.3	<b>Posição do sistema e radares escolhidos</b> .....	<b>43</b>
3.3	CARACTERÍSTICAS DAS REGIÕES DE ESTUDO.....	44
3.3.1	<b>Nova Orleans – Louisiana</b> .....	<b>44</b>
3.3.2	<b>Birmingham – Alabama</b> .....	<b>45</b>
3.3.3	<b>Memphis – Tennessee</b> .....	<b>46</b>
3.4	CONCLUSÃO .....	47
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>48</b>
4.1	DISTRIBUIÇÃO DA REFLETIVIDADE RADAR.....	48
4.1.1	<b>Estudo do radar KLIX – Nova Orleans</b> .....	<b>48</b>
4.1.2	<b>Estudo do radar KBMX – Birmingham</b> .....	<b>51</b>
4.1.3	<b>Estudo do radar KNQA – Memphis</b> .....	<b>55</b>

4.2	ANÁLISE FÍSICA DA DISTRIBUIÇÃO DA REFLETIVIDADE .....	60
4.2.1	Radar KLIX – Nova Orleans .....	60
4.2.2	Radar KBMX – Birmingham .....	63
4.2.3	Radar KNQA – Memphis .....	64
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	67
	REFERÊNCIAS.....	70
	APÊNDICE A .....	74

## 1 INTRODUÇÃO

Considerando o uso de tecnologias de sensoriamento remoto da atmosfera, os radares meteorológicos são os melhores instrumentos modernos para o monitoramento de sistemas precipitantes. No monitoramento desses sistemas, os radares meteorológicos são capazes de indicar com precisão, espacial e temporal, a formação, o deslocamento, as alterações e mudanças, como também a dissipação da precipitação. O uso de radares com o passar dos anos aprimorou-se sobremaneira e hoje, muito mais do que análise descritiva dos fenômenos físicos da atmosfera, permite que a análise da precipitação seja tanto quantitativa como qualitativa, associando-a à sua refletividade correspondente através da utilização de algoritmos e funções estatísticas aplicadas nos softwares.

Os mecanismos de formação de precipitação são diversos, incluindo-se mecanismos convectivos, estratiformes e também associados à orografia. Em cada sistema precipitante pode ser observado simultaneamente um ou mais mecanismos tornando-se assim complexa sua análise e descrição. Vários pesquisadores têm dedicado esforços para desenvolver e aprimorar técnicas que possibilitam estudar os mecanismos envolvidos no processo de precipitação. Essas pesquisas visam resultados como estabelecimento de relações refletividade-precipitação ( $Z-R$ ), análise da área precipitável e quantidade de água disponível, entre outras.

Com a aplicação de métodos estatísticos, esta análise se torna possível visto que a aplicação de algumas funções estatísticas pode gerar resultados satisfatórios na caracterização desses sistemas. Uma das funções que apresenta bons resultados é a função densidade de probabilidade (PDF) gerando gráficos com limites desses sistemas, valores mínimos e máximos e variação. Em estatística, considerando distribuições contínuas e variáveis aleatórias, quando a função densidade tem múltiplos pontos extremos, é normal se referir a eles por modas da distribuição.

Katrina foi um dos mais devastadores e colossais furacões que atingiram os Estados Unidos da América. Com uma extensão impressionante e ventos muito fortes, provocou danos desde a região da Flórida, onde tocou o continente pela primeira vez, até a região de Nova Orleans, Louisiana, de longe a mais afetada.

O principal objetivo deste estudo é analisar o comportamento da função densidade de probabilidade (PDF) do fator de refletividade radar  $Z$ , durante a passagem do furacão Katrina, em Agosto de 2005 nos Estados Unidos da América.

Alguns objetivos específicos contribuem para a obtenção do intento principal, destacam-se:

- Avaliar a PDF para radares localizados na rota de passagem do furacão;
- Analisar os PPI's (*Plan Position Indicator*) dos radares comparando-os com resultados da PDF;
- Comparar a PDF para os diferentes momentos do sistema precipitante.

O plano da dissertação, após essa breve introdução, é constituído pelo Capítulo 2 onde será apresentada uma revisão bibliográfica sobre a utilização de radares para detecção e pesquisa sobre sistemas precipitantes, um resumo sobre os principais sistemas precipitantes de forma separada, tendo em vista o sistema principal – furacão, bem como a descrição estatística e matemática da função densidade probabilidade e do fator de refletividade. No Capítulo 3, os métodos empregados para obter os resultados são expostos de forma detalhada, desde os dados utilizados aos softwares escolhidos e critérios para aprimorar os resultados. O Capítulo 4 traz as discussões dos resultados, primeiramente analisando a parte estatística dos mesmos, e em seguida os campos de refletividade que explicam o comportamento da PDF. No último Capítulo, 5, a síntese dos resultados é apresentada em conclusões obtidas com o desenvolvimento do trabalho e algumas considerações para referências e estudos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O estudo dos sistemas precipitantes utilizando teledetecção, sobretudo com radares meteorológicos de alta tecnologia, teve seu caminho pavimentado pós II Guerra Mundial. Durante o período da guerra, vários estudos que apresentavam finalidade bélica tornaram a tecnologia radar madura. Com o seguimento das pesquisas para melhorar o equipamento, zonas de precipitação foram identificadas – para consternação dos engenheiros que viam esse fato como uma séria limitação capaz de reduzir a eficiência na vigilância espacial. Contudo, para os meteorologistas e físicos da atmosfera, essa ‘consternação’ deveria ser explorada devido às novas funcionalidades que o radar poderia oferecer (Sauvageot, 1992). As primeiras observações meteorológicas usando radar datam o ano de 1941 – enquanto alguns estavam tentando encontrar procedimentos para eliminar ecos devido à precipitação, outros estavam otimizando os equipamentos para analisá-los. *A priori*, a função meteorológica dos radares na pesquisa e aplicação era limitada à parte descritiva; posteriormente, com os estudos voltados às medições hidrológicas e de velocidade, iniciou-se a fase quantitativa, em meados de 1960. Um resumo histórico sobre os radares meteorológicos pode ser encontrado em Atlas, 1990.

A utilização dos radares meteorológicos para análise da formação, desenvolvimento e dissipação, assim como da estrutura de sistemas precipitantes são alguns dos principais benefícios do uso dessa tecnologia. Sauvageot (1992) enumera algumas das principais vantagens do uso de radares meteorológicos, entre elas se destacam:

- Possibilidade de detecção remota ativa de alvos a pequena ou grande distância, sem deslocamento do instrumento, sendo que as características do alvo são bem representadas;
- O sinal recebido não depende da presença ou ausência da luz solar nem da emissão por parte do alvo;
- A aquisição de dados é imediata – tempo real;
- A varredura pode ser feita em 3D, em função do tempo e em grandes volumes;
- A resolução e continuidade das observações são satisfatórias, no tempo e no espaço, permitindo um grande número de produtos e aplicações;
- As observações não perturbam o meio onde os mesmos são conduzidos.

Os radares também possuem algumas desvantagens, entre poucas podem ser destacadas a ambiguidade de algumas medições e limites para a resolução. Apesar dos

contratempos citados, as vantagens do uso dos radares meteorológicos sobrepujam sobremodo as desvantagens.

Existe uma variedade ampla de estudos sobre estruturas meteorológicas observadas por radar e, nesse capítulo resumiremos os mais importantes. Primeiramente, estabeleceremos a diferenciação entre sistemas estratiformes e convectivos. Para cada tipo de sistema, indicaremos as observações feitas pelo radar, sem fazer menção aos possíveis problemas que essas informações obtidas podem acarretar. Também analisaremos o conceito de hidrometeoros e da refletividade radar, conceitos importantes para estabelecer a base de toda discussão posterior. Uma breve análise sobre o ciclone Katrina, formação, desenvolvimento e dissipação, é feita para nos ‘introduzir’ no sistema estudado.

## 2.1 SISTEMAS PRECIPITANTES

Os sistemas precipitantes podem ser definidos como sendo o conjunto de inúmeras partículas de água – líquidas, sólidas ou mistas – que de forma genérica são chamadas de hidrometeoros. O termo hidrometeoro, de origem grega – *hydro* (água) e *meteora* (em suspensão) – pode ser utilizado para descrever qualquer resultado da condensação ou deposição de vapor de água na atmosfera, seja formado na atmosfera livre ou na superfície (Anagnostou, 2004).

Estruturas meteorológicas podem ser analisadas numa ampla faixa de escalas, desde gotículas de nuvem com tamanho correspondente a pequenos microns, a fenômenos e distúrbios sinóticos com grande magnitude. Estas estruturas são constituídas de nuvens convectivas e estratiformes em diferentes fases. Estas nuvens, do tipo *cumulus* ou *cumulonimbus* e *estratiformes* podem estar isoladas ou agrupadas, de acordo com as mais variadas configurações em frentes frias (distúrbios extratropicais), linhas de instabilidade, *clusters* tropicais, *microbursts*, e na estrutura de bandas em ciclones. A intensidade da precipitação associada a essas estruturas é condicionada ao seu tipo, podendo ser acompanhadas de precipitações leves – estratiformes –, e intensas e localizadas – convectivas.

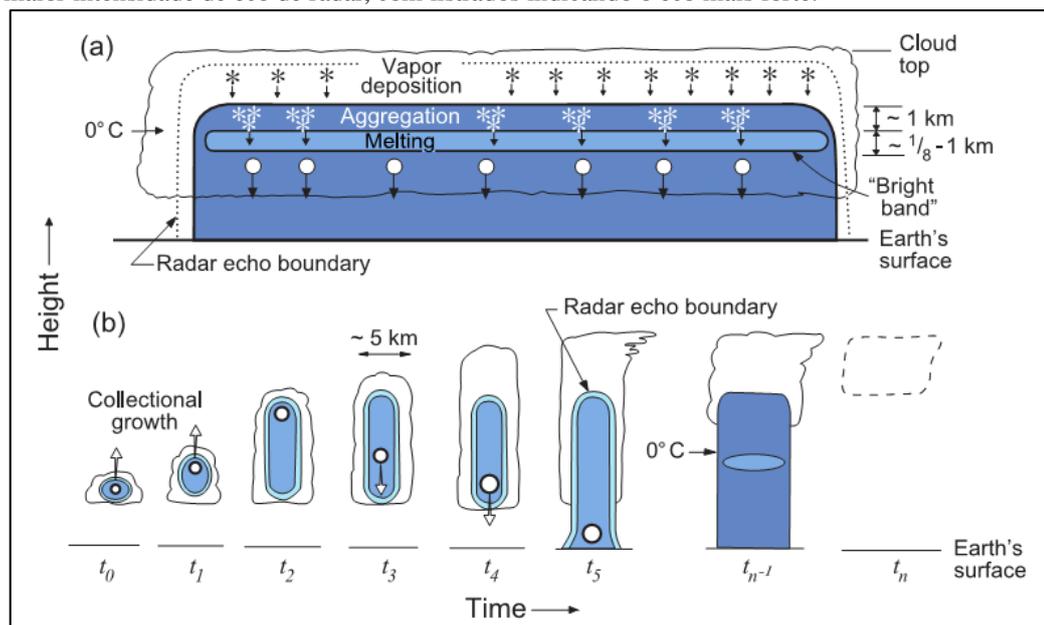
### 2.1.1 Sistemas Estratiformes x Convectivos

A precipitação associada a um sistema pode ser considerada de dois tipos distintos – *estratiformes* e *convectivas*. A precipitação estratiforme provém de sistemas com movimentos verticais fracos, mas suficientes para que as partículas se precipitem durante seu crescimento,

ou de nuvens *nimbostratus*; enquanto que a convectiva de nuvens *cumulus* e *cumulonimbus* (Houze, 1993).

De acordo com Houze (1993), a precipitação estratiforme e convectiva pode ser definida em termos da escala de velocidade vertical. A estratiforme é definida como precipitação cuja velocidade vertical do ar é fraca comparada com a velocidade dos cristais de gelo e neve ( $\sim 1-3 \text{ m.s}^{-1}$ ). Em outras palavras, o termo *estratiforme* designa o conjunto particular de processos microfísicos que levam ao crescimento e queda de precipitação num contexto de movimentos ascendentes suaves (Houze, 1997). Na Figura 1, está esquematizado o processo de precipitação estratiforme em *nimbostratus* profundos que contém partículas de gelo no alto. As partículas de gelo, ainda de acordo com o autor supracitado, exercem um papel importante no processo de precipitação, i.e., atingem o solo como gotas de chuva apesar de anteriormente se localizarem na parte superior da nuvem.

**Figura 1** – Características da precipitação estratiforme (a) e convectiva (b) para perfil vertical. Sombreamento mostra maior intensidade de eco de radar, com listrados indicando o eco mais forte.

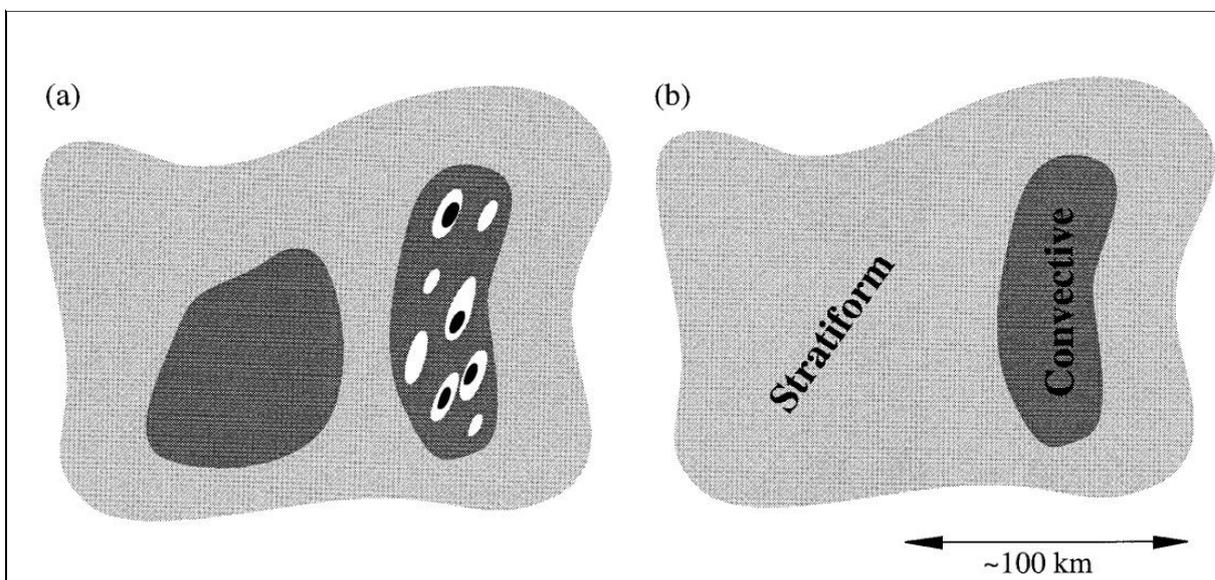


Fonte: Houze, 1993.

A precipitação convectiva por sua vez, difere acentuadamente da estratiforme. É formada por intermédio de um processo onde os movimentos ascendentes do ar possuem uma escala aproximada  $1-10 \text{ m.s}^{-1}$ , o que iguala ou excede a velocidade vertical dos cristais de gelo e neve; neste caso particular, os movimentos ascendentes do ar são muito fortes, alcançando assim camadas superiores da atmosfera (Houze, 1993). Na Figura 1b observa-se o movimento ascendente crescente, a partir do  $t_1$  até  $t_5$ , onde as gotas se precipitam. Após esse momento, a nuvem permanece num estado estacionário até sua dissipação de  $t_{n-1}$  a  $t_n$ .

Geralmente, no plano horizontal das imagens de radar, os sistemas estratiformes têm característica bastante homogênea na distribuição da refletividade radar. Verticalmente, a estrutura é dividida em camadas (Figura 1a) com destaque para a *bright band* – camada brilhante que é devida ao derretimento das partículas de gelo (Battan, 1973). Essa característica não é observada nas imagens convectivas, que normalmente apresentam um formato de célula ou núcleo, com alta refletividade associada. A Figura 2 apresenta o mapa horizontal idealizado de refletividade radar para estratiforme – representado por cor cinza correspondente a valores menores de refletividade; e convectiva – representado por tonalidade escura e núcleos correspondentes a intensa refletividade radar.

**Figura 2** – Esquema ilustrativo de refletividade radar para plano horizontal.



Fonte: Houze, 1997.

### 2.1.2 Células convectivas

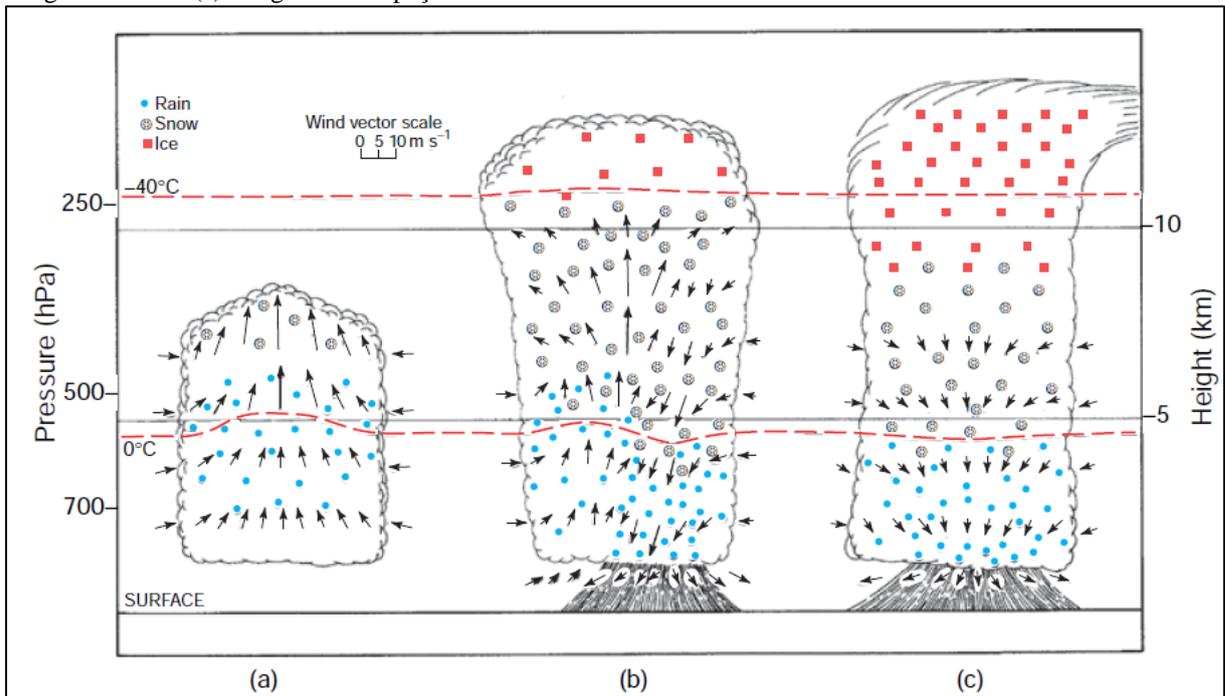
A definição de células convectivas passa necessariamente pela definição de convecção. A convecção atmosférica é o resultado da instabilidade de uma parcela de ar em relação ao meio, ou à diferença de temperatura (Houze, 1993). A convecção tende a estar concentrada dentro de regiões como monções tropicais; bandas persistentes de convergência de baixos níveis, como a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT); regiões ao longo de encostas e montanhas; nas zonas frontais e setores quentes de ciclones extratropicais (Battan, 1974; Sauvageot, 1992). É importante realçar que o conhecimento das células convectivas – sua formação, desenvolvimento e dissipação – toda sua estrutura, provém de estudos usando radares meteorológicos como principal meio de observação e medição (Atlas, 1990).

Byers e Braham (1949) caracterizam as células convectivas através de um processo consistente de três estágios (Figura 3):

1. Estágio primário de crescimento *cumuliforme* marcado pelo estabelecimento e intensificação de corrente ascendente acompanhado de um rápido aumento do topo da altura da nuvem e intensidade do eco;
2. Estágio de maturidade com a coexistência de movimentos ascendentes e descendentes na nuvem, sendo a última associada com precipitação forte e localizada;
3. Estágio de dissipação durante o qual apenas os movimentos descendentes existem, com a precipitação tendendo a generalizar-se em toda a célula enquanto sua intensidade diminui.

Como mencionado anteriormente, as células convectivas, diferentemente das estratiformes que têm característica homogênea, aparecem nas imagens de radar como manchas ou núcleos de refletividade intensa.

**Figura 3** – Esquema ilustrativo dos estágios de evolução de uma célula convectiva sendo (a) estágio cumulus (b) estágio maduro e (c) estágio de dissipação.



Fonte: Wallace e Hobbs, 2006. Adaptado de *The Thunderstorm Project*, 1949.

### 2.1.3 Linhas de Instabilidade (*Squall Lines*)

A organização das células convectivas ou de tempestades por vezes alcança centenas de km em linha ao longo de zonas frontais, sistemas convectivos de mesoescala e furacões.

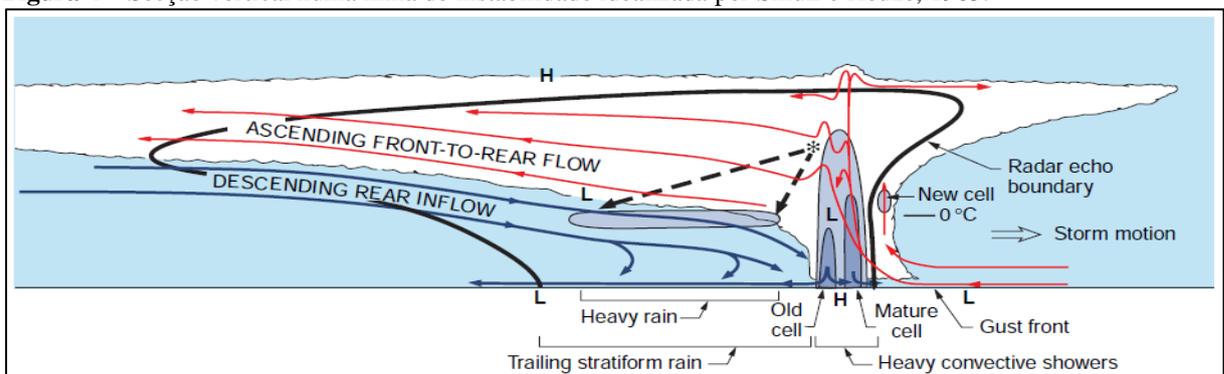
Essa organização denominada de linhas de instabilidade é frequentemente observada em regiões de latitudes médias convectivamente ativas, como a região central dos Estados Unidos durante a primavera e no verão, e ocorrem também em partes dos trópicos (Wallace e Hobbs, 2006). Estas últimas se propagam geralmente para o oeste, enquanto que as linhas de instabilidade das latitudes médias propagam para o leste.

De acordo com Sauvageot (1992), as linhas de instabilidade tropicais tem uma organização simples e consistem de uma linha ativa e intensa de convecção de aproximadamente 10-50 km de largura seguida por uma vasta bigorna estratiforme que pode se estender a mais de centenas de quilômetros.

Houze (2010) afirma que o formato de arco dessas instabilidades foi notado por radares situados em regiões costeiras quando os ciclones tropicais reagem ao atrito com a superfície terrestre, onde existe menos umidade para suportar os movimentos descendentes.

Um modelo conceitual do fluxo de ar, propriedades microfísicas, e ecos de radar em uma linha de instabilidade de latitudes médias são mostrados na Figura 4 (Wallace e Hobbs, 2006). Células convectivas velhas estão embutidas no escoamento ascendente da dianteira para a retaguarda – anteriormente parte de uma corrente de ar por convecção mais vigoroso. A ruptura entre a precipitação convectiva e estratiforme corresponde à região de fraca subsidência por trás das células convectivas ativos. É visível que a precipitação convectiva intensa se concentra na região dianteira onde ocorre convecção intensa e formação de células novas. Após essa parte dianteira observa-se uma região de precipitação estratiforme, também intensa.

**Figura 4** – Secção vertical numa linha de instabilidade idealizada por Smull e Houze, 1985.



**Fonte:** Wallace e Hobbs, 2006.

É importante realçar que as linhas de instabilidade se localizam na parte dianteira dos sistemas, e num furacão, situa-se na banda de precipitação distante, que será discutido no Capítulo III.

## 2.2 CICLONES TROPICAIS

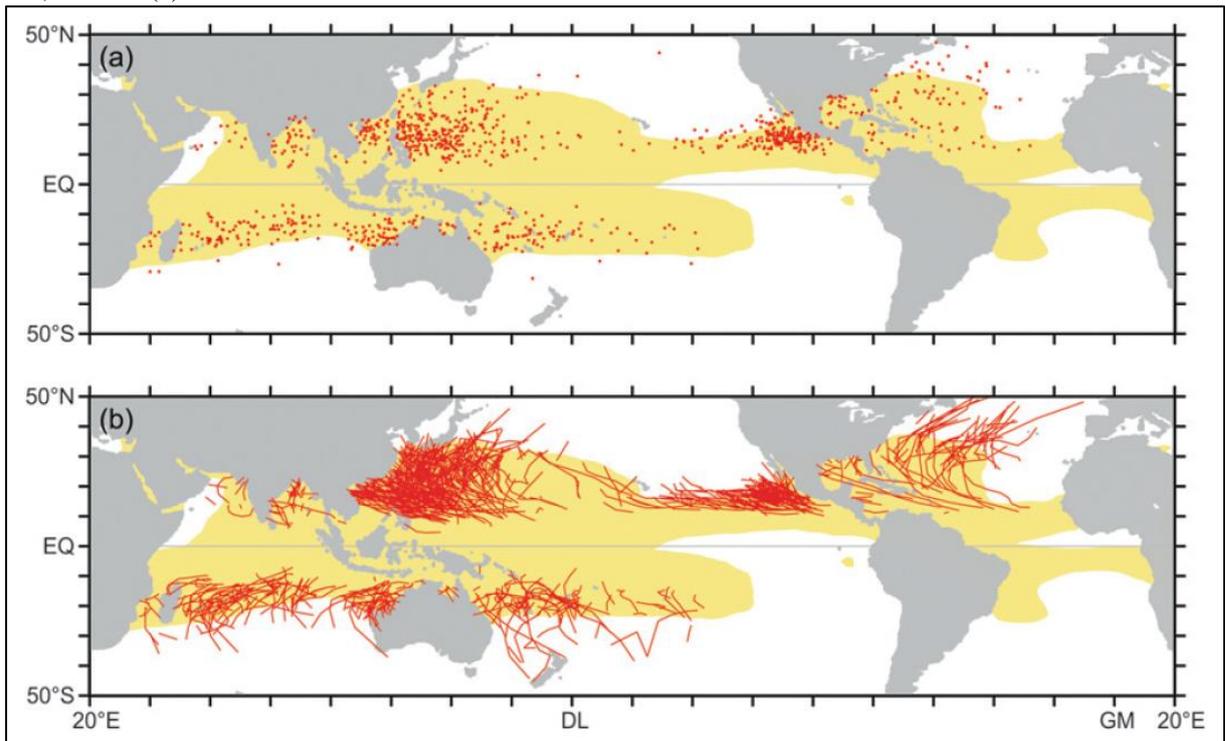
Os ciclones tropicais – também chamados de furacão nos Estados Unidos e Caribe, de tufão no oeste do oceano Pacífico – são sistemas caracterizados por ventos perto do vórtice central superiores a  $32\text{-}33\text{ ms}^{-1}$ , valores de pressão baixas no centro e rápida rotação do centro do sistema (Sauvageot, 1992; Houze, 1993). No centro do núcleo quente de um ciclone tropical, cercado por um ‘muro’ ou parede de nuvens, é o olho da tempestade que geralmente é livre de convecção profunda, e caracterizada por certa calmaria (Wallace e Hobbs, 2006). Os ciclones se formam nas baixas latitudes entre  $5^\circ$  e  $20^\circ$ , com diâmetros que variam entre 100 km e 1500 km.

Segundo Gray (1968, 1979), para acontecer a ciclogênese tropical há várias condições ambientais favoráveis, precursores a serem observados numa região:

1. Temperatura da superfície do mar – de pelo menos  $26,5^\circ\text{C}$  – ao longo de uma profundidade suficiente (é desconhecido o quão profundo, mas pelo menos na ordem de 50 m). Águas quentes são necessárias para ‘alimentar o motor’ de calor do ciclone tropical.
2. A atmosfera deve resfriar suficientemente rápido com a altura, o que a torna potencialmente instável e facilita a convecção úmida. É a atividade de tempestades que permite que o calor armazenado nas águas do oceano seja liberado para o desenvolvimento de um ciclone tropical.
3. Camadas relativamente úmidas na troposfera-média ( $\sim 5\text{ km}$ ). O ar seco em médios níveis não permite a continuidade do desenvolvimento da atividade de tempestades.
4. Distância mínima de pelo menos 500 km a partir do equador. Para que a ciclogênese ocorra, é necessário um valor não-desprezível da força de Coriolis que proporcione o equilíbrio do balanço gradiente de vento.
5. Um distúrbio próximo à superfície pré-existente com vorticidade e convergência suficiente. A ciclogênese tropical não pode ser gerada espontaneamente; para seu desenvolvimento necessita de um sistema organizado fraco com rotação considerável e afluência de baixos níveis.
6. Valores baixos de cisalhamento vertical do vento entre a superfície e a alta troposfera (inferior a  $10\text{ m.s}^{-1}$ ). O cisalhamento vertical do vento é a magnitude da mudança do vento com a altura; sendo assim, grandes valores perturbam o ciclone e podem impedir sua gênese, ou se um ciclone já está formado, esses valores podem enfraquecer e até destruí-lo por interferência com a convecção profunda circuncentral.

A Figura 5 apresenta as regiões tropicais onde geralmente se formam os ciclones tropicais. As trilhas são geralmente para o oeste em latitudes mais baixas, onde *easterlies* dominam o fluxo em grande escala. A parte sombreada a tom amarelo mostra regiões onde a temperatura da superfície do mar se encontra no valor de 26,5°C, considerado como um dos fatores principais para a formação e alimentação dos furacões.

**Figura 5** – Localizações e trilhas de ciclones tropicais para 1970-1989 em relação à superfície dos oceanos globais do estudo de Legates e Willmott (1990). (a) Localização dos furacões no primeiro dia com ventos de 115,2 km/h e (b) e *tracks* dos furacões.



Fonte: Houze, 2010.

Os ciclones tropicais têm sido alvo de vários estudos ao longo da história do desenvolvimento da ciência meteorológica. As condições supracitadas precisam ser satisfeitas, mas alguns estudos vêm demonstrando que podem não ser suficientes, como muitos distúrbios que parecem ter condições favoráveis, mas não se desenvolvem (Gray, 1981).

### 2.2.1 Estrutura de um Ciclone Tropical

De acordo com Wallace e Hobbs (2006), em contraste com os ciclones extratropicais, que derivam sua energia potencial do gradiente de temperatura ambiente meridional, os ciclones tropicais obtêm sua energia potencial através dos fluxos de calor latente e sensível na

interface atmosfera-oceano.

A Figura 6 mostra o esquema anatômico de um ciclone tropical. As principais partes de um ciclone tropical podem ser consideradas como: bandas de precipitação, olho, parede do olho. O ar tem espirais em direção ao centro em um padrão anti-horário para o hemisfério norte (sentido horário para hemisfério sul) e no topo com padrão horário.

**Figura 6** – Anatomia de um ciclone tropical para o hemisfério norte.



Fonte: [http://www.aoml.noaa.gov/hrd/weather\\_sub/faq.html](http://www.aoml.noaa.gov/hrd/weather_sub/faq.html)

No centro do ciclone, o movimento descendente do ar, afundando em direção à superfície é maior que o movimento ascendente – esse afundamento profundo é suficiente para suprimir a formação de nuvens, criando assim o 'olho' do furacão. O olho tem geralmente de 30-65 km de diâmetro, mas já foram observados valores pequenos como 3 km e também grandes como 370 km (Lander, 1999; Pasch et al., 2006). Nessa área clara, o vento é de pouca intensidade e normalmente não excede os 24 km/h e os menores valores de pressão atmosférica são registrados. A rápida mudança na intensidade dos ventos – de muito forte a fraca – é extremamente perigosa para a população, quando a mesma não tem conhecimento sobre a estrutura de um ciclone tropical. O fato das pessoas experimentarem uma condição de tempo amena após os ventos fortes cria uma falsa sensação de segurança, sendo que apenas metade do sistema passou pela região. A formação dessa parte não é totalmente compreendida e de fácil explicação. De acordo com estudos sobre estruturas meteorológicas tropicais, a *National Weather Service* (NWS, 2014) afirma que possivelmente a formação do olho do furacão tem relação com combinação entre a conservação do momento angular e a força centrífuga. A conservação do momento angular se refere ao fato de que objetos aumentarão sua velocidade de giro à medida que avançam em direção ao centro da circulação; dessa

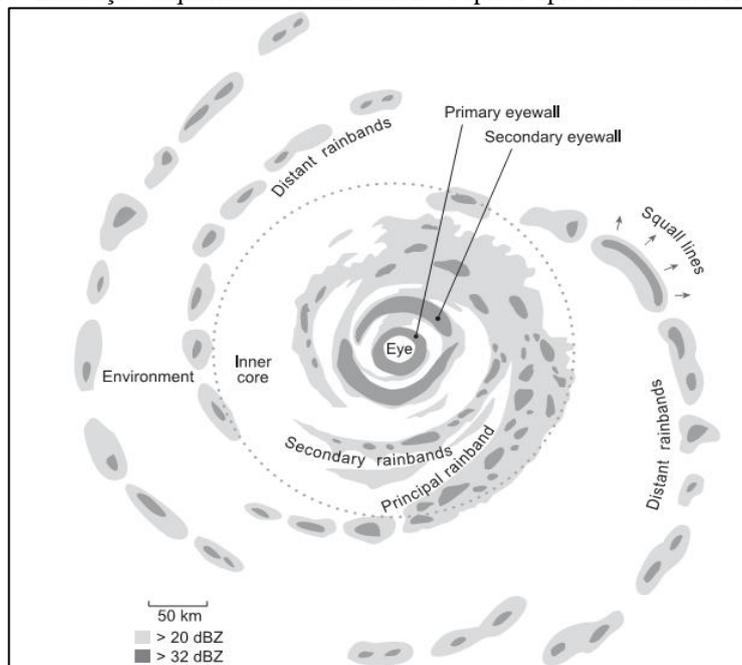
forma, o ar aumenta sua velocidade em direção ao centro do furacão. Por outro lado, como a velocidade aumenta existe o balanço – uma força externa direcionada, a força centrífuga.

As bandas de precipitação são estruturas de nuvens e precipitação associadas com uma área de chuva que é significativamente alongada. Podem ser estratiformes ou convectivas, e são gerados por diferenças de temperatura. Dentro de ciclones tropicais são orientados em curvas e contêm aguaceiros e trovoadas. Apesar de ilustrativo, alguns autores mostram, com boa representatividade, o padrão do eco radar em furacões (e.g., Marks e Houze, 1987; Houze, 1993; Matyas, 2009). Nesse estudo foi adotado o esquema ilustrativo idealizado da refletividade radar num furacão do Hemisfério Norte (Figura 7) proposto por Houze (2010).

É visível a presença de bandas de precipitação distantes, com estruturas de linhas de instabilidade. De acordo com Houze (2010), essa banda é geralmente avistada antes da entrada de um furacão no continente e é descrito por pilotos e cientistas que pesquisam os ciclones tropicais como a parte mais turbulenta num voo, associado aos fortes movimentos ascendentes de ar.

Outra parte que é observada, correspondente à região mais central dos ciclones tropicais, é composta pelas bandas de precipitação primária e secundária, ambas diretamente afetadas pela dinâmica e termodinâmica da região central do ciclone.

**Figura 7** – Ilustração esquemática de um ciclone tropical típico do Hemisfério Norte.



Fonte: Houze, 2010.

### 2.2.2 A escala Saffir-Simpson para classificação dos furacões

Desenvolvida em 1971 pelo engenheiro civil Herbert Saffir e o meteorologista Bob (Robert) Simpson, a escala de vento para furacões é a mais utilizada em todo hemisfério ocidental para classificar ciclones tropicais que excedam as intensidades das depressões tropicais (superior a 62 km/h) e tempestades tropicais (63-118 km/h) – em cinco categorias que se distinguem pelas intensidades de seus ventos sustentados ou ininterruptos. A maioria das agências meteorológicas utiliza a definição de ventos sustentados recomendada pela Organização Meteorológica Mundial (OMM), que especifica ventos médios medidos a uma altura de 10,1 m durante 10 minutos. A Tabela 1 mostra de forma resumida a divisão das categorias com sua pressão atmosférica correspondente, bem como os ventos sustentados.

**Tabela 1** – Descrição Escala de furacões Saffir-Simpson

Classificação	Pressão central	Ventos	Danos possíveis
Categoria 1	980-994 mb	119-153 km/h	Pequenas inundações e poucos danos estruturais ou queda de árvores; inundações em regiões costeiras e possível falta de energia elétrica.
Categoria 2	965-979 mb	154-177 km/h	Potencial de destelhar casas e arrancar várias árvores; extensa falta de energia e danos consideráveis em estruturas mal acabadas.
Categoria 3	945-964 mb	178-208 km/h	Pode provocar danos estruturais em pequenas casas e edifícios, destruindo construções feitas de madeira; inundações perto da costa e danos em construções maiores; inundação de terrenos.
Categoria 4	920-944 mb	209-251 km/h	Grandes danos em áreas habitadas (casas e prédios podem ser derrubados pelos ventos); chuvas torrenciais e grandes inundações. Evacuação em larga escala.
Categoria 5	< 920 mb	>= 252 km/h	Apesar de ‘raros’, têm potencial para destruir tudo que estiver no seu caminho. Áreas costeiras podem ser invadidas até dezenas de km, com colapso das estruturas energéticas e sanitária. É obrigatória a retirada de todas as pessoas que morem perto da costa.

Uma das vantagens é que a classificação pode prover uma estimativa dos possíveis danos que o furacão poderá ocasionar ao entrar no continente, sendo assim uma excelente ferramenta para alertar o público sobre os possíveis impactos de vários furacões de intensidade diferente (Saffir, 1973).

Existe certa crítica em relação à escala Saffir-Simpson. Alguns cientistas, incluindo Kerry Emanuel (Instituto Tecnológico de Massachusetts – MIT) e Lakshmi Kantha (Universidade de Colorado) têm criticado a escala como sendo simplista, indicando que a escala não leva em conta o tamanho físico da tempestade, nem a quantidade de precipitação que ela produz. Algumas das características propostas é que o Índice de Intensidade de furacão (que se baseia na pressão dinâmica provocada por ventos de uma tempestade); o Índice de perigo furacão (que se baseia na velocidade do vento de superfície); e o raio de ventos máximos da tempestade, e sua velocidade de translação (Kantha, 2008).

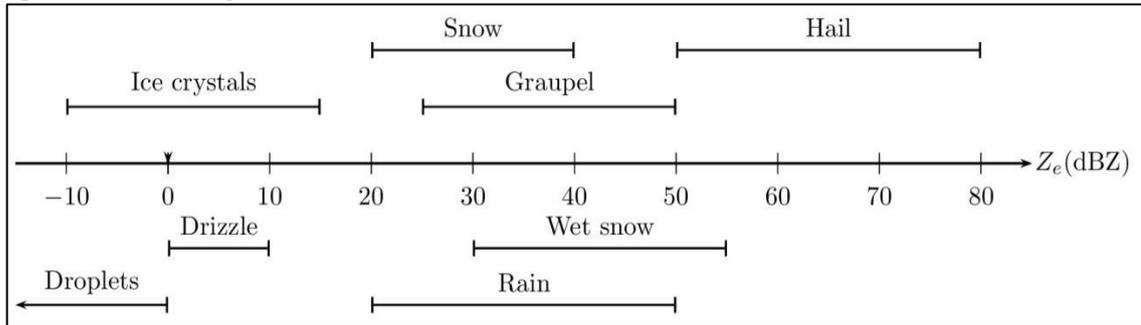
### 2.3 Hidrometeoros

Os hidrometeoros podem ser classificados de diferentes maneiras, como apresentado em seguida, de acordo com o Glossário de Meteorologia (AMS, 2014):

1. Partículas de água, líquida ou sólida, formadas e em suspensão no ar e com alto teor de umidade relativa (e.g., névoa, nuvem, neblina, nevoeiro gelado);
2. Precipitação líquida (e.g., garoa e chuva);
3. Precipitação congelada (e.g., *freezing drizzle* garoa gelada e *freezing rain* chuva gelada);
4. Precipitação sólida (e.g., neve, granizo, pelotas de gelo, pelotas de neve, graupel, grãos de neve e cristais de gelo);
5. Partículas em queda que evaporam antes de atingir a superfície (e.g., virga);
6. Partículas de água líquida ou sólida levantada pelo vento a partir da superfície da Terra.

A resposta de cada hidrometeoro citado à energia eletromagnética exposta corresponde a uma refletividade equivalente. De forma resumida, temos a descrição supracitada expressa na Figura 8.

**Figura 8** – Ordens de grandeza da refletividade radar equivalente dos hidrometeoros correspondente (comprimento de onda igual a 10,7 cm).



Fonte: Louf (2011)

## 2.4 REFLETIVIDADE RADAR

O retroespalhamento é o princípio básico por detrás do conceito de radares. É notório que a radiação, quando emitida para atmosfera, interage com os mais diferentes sistemas de nuvens e, parte dela, é retroespalhada e detectada pelas antenas dos radares. Esta pequena parte de energia fornece informações físicas do ‘alvo’ e pode ser expressa como a potência  $P_r$  recebida:

$$\bar{P}_r = \left( \frac{P_t \lambda^2 G_0^2 \theta_0 \phi_0 c \tau L_r}{1024 \pi^2 \ln 2} \right) L^2 \frac{\eta}{r^2} \quad (1)$$

onde:

$P_t$  é a potência transmitida (mW);

$P_t$  é a potência transmitida (kW);

$\lambda$  é o comprimento de onda;

$G_0$  é o ganho da antena no eixo da parábola (adimensional);

$\theta_0, \phi_0$  é a largura do feixe considerando o ganho de -3dB (°);

$c$  é a velocidade da luz ( $m.s^{-1}$ );

$\tau$  é a duração do pulso ( $\mu s$ );

$L_r$  é a atenuação devida à largura finita da banda de recepção (adimensional);

$L$  é a atenuação devida à propagação (ida e volta);

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

$r$  é a distância ao alvo.

Esta equação proposta por Probert-Jones (1962) e vários autores, considera os alvos

como sendo esféricos, com diâmetro máximo de 6 mm e sendo água líquida. De forma resumida podemos considerar a equação proposta por Fraile e Fernández-Raga (2009), que no desenvolvimento do estudo apresentam uma definição mais concisa sobre refletividade radar. Primeiro definem a potência recebida  $P_r$  como sendo:

$$P_r = C \frac{L^2 \eta}{r^2} \quad (2)$$

onde  $C$  é uma constante que depende das especificações técnicas do radar;  $L$  representa os efeitos de atenuação entre o radar e o alvo;  $r$  é a distância radar-alvo; e  $\eta$  é a refletividade radar. Esta última variável, a refletividade, é uma função do número  $N$  de elementos espalhados por unidade de volume dentro da nuvem e de suas propriedades físicas. Como resultado, a energia detectada depende (1) das características do radar, (2) do alvo e (3) do meio entre eles.

Com a aproximação de Rayleigh (1871), uma nova variável  $Z$  pode ser definida como fator de refletividade, tal que:

$$\eta = K \lambda^{-4} Z \quad (3)$$

sendo que  $K$  é uma constante que depende da unidade usada. De acordo com Fraile e Fernández-Raga (2009), em meteorologia por radar, a variável útil é o fator de refletividade equivalente ( $Z_e$ ), que é a refletividade de um hidrometeoro líquido esférico que satisfaz a aproximação de Rayleigh. De fato, a natureza dos hidrometeoros dentro de um volume é geralmente desconhecida.  $Z_e$  é simbolizado por  $Z$  (por razões práticas) e chamado de fator de refletividade. Podemos escrever o fator de refletividade de um número  $N$  de elementos espalhados por unidade de volume dentro de uma nuvem, com tamanho  $D_i$  de:

$$Z = \sum_{i=1}^N D_i^6 \quad (4)$$

Considerando o fato dos hidrometeoros não terem completamente a forma esférica (Brandes et al., 2002),  $D_i$  é o diâmetro equivalente a uma esfera que ocupa o mesmo volume que o

hidrometeoro considerado. Se  $N$  elementos são classificados em  $N'$  diferentes classes (de índice  $j$ ), cada um deles tendo  $n_j$  hidrometeoros de tamanho  $D_j$ , o fator de refletividade equivalente é:

$$Z = \sum_{j=1}^{N'} n_j D_j^6$$

Finalmente, de forma contínua, se  $n(D)$  é o número de elementos espalhados por unidade de volume e tamanho, então temos:

$$Z = \int n(D) D^6 dD \quad (6)$$

onde a integral se estende para todos os tamanhos dos elementos (diâmetros equivalente desde o diâmetro mínimo até o máximo).

O fator de refletividade  $Z$  é uma das variáveis mais usadas e importantes em se tratando de radares meteorológicos. Alguns parâmetros como a relação entre a refletividade e a taxa de precipitação, conteúdo de água e outros, são derivados do uso desse parâmetro (Battan, 1973; Sauvageot, 1992; Rinehart, 1997).

Rinehart (1997) define a refletividade como sendo um parâmetro meteorológico que é determinado pelo número e tamanho de partículas (hidrometeoros) presentes num simples volume. A refletividade pode variar amplamente podendo apresentar valores muito altos – e.g., valor igual a 36.000.000  $\text{mm}^6/\text{m}^3$  numa tempestade de granizo em Montana (Rinehart, 1997) –, e por outro lado valores baixíssimos – e.g., igual a 0,00001  $\text{mm}^6/\text{m}^3$  em nuvens quentes (Pujol et al., 2007). Desta forma, é necessário ‘comprimir’ esses valores tornando-os mais manejáveis para fins práticos. Para tal, usa-se a escala logarítmica em vez da linear (Battan, 1973; Sauvageot, 1992; Rinehart, 1997; entre outros):

$$Z = 10 \log_{10} \left( \frac{z}{\text{mm}^6/\text{m}^3} \right) \quad (7)$$

onde  $Z$  é o fator de refletividade radar logarítmico medido em unidades de dBZ; e  $z$  é o fator de refletividade radar linear medido em  $\text{mm}^6/\text{m}^3$ .

## 2.5 FUNÇÃO DENSIDADE DE PROBABILIDADE

Desde estudos clássicos (e.g., Marshall e Palmer propuseram uma relação entre a refletividade e a taxa de precipitação, 1948) a estudos mais recentes (e.g., Diop; Tenório et al.; analisaram as características de diferentes tipos de precipitação, 2010 e 2012 respectivamente), o uso de métodos estatísticos, relações e funções, comuns na meteorologia por radar, permite uma melhor caracterização dos sistemas precipitantes. Para o estudo da função densidade de probabilidade (denotado nesse estudo como PDF), é necessário debruçar sobre os conceitos de variável aleatória. Primeiro, define-se variável aleatória  $x$  como uma variável em que os possíveis valores são determinados por processos cujo resultado específico não é possível conhecer *a priori* com certeza absoluta, ou seja, o resultado (valor) depende de eventos aleatórios (Morettin, 1999).

Existem dois tipos distintos de variáveis aleatórias e podem ser definidas de acordo com Papoulis e Pillai (2002). Variáveis aleatórias discretas – podem assumir valores que podem ser enumeradas, sendo seu conjunto um conjunto finito ou infinito enumerável. Variáveis aleatórias contínuas – que podem assumir quaisquer valores numéricos em um determinado intervalo ou coleção de intervalos, e são caracterizadas por ter uma variação contínua. Em variáveis desse gênero é impossível enumerar todos os possíveis valores que a mesma pode assumir. Portanto, interessa mais calcular a probabilidade de ocorrência num determinado intervalo do que a probabilidade rigorosa de ocorrência de um determinado valor.

De forma convencional, a PDF para uma variável aleatória  $X$  é denotada por  $f(x)$  e a soma de todos os possíveis valores deve igualar 1. Desta forma, a integral de qualquer PDF sobre todos os valores admissíveis de  $x$ :

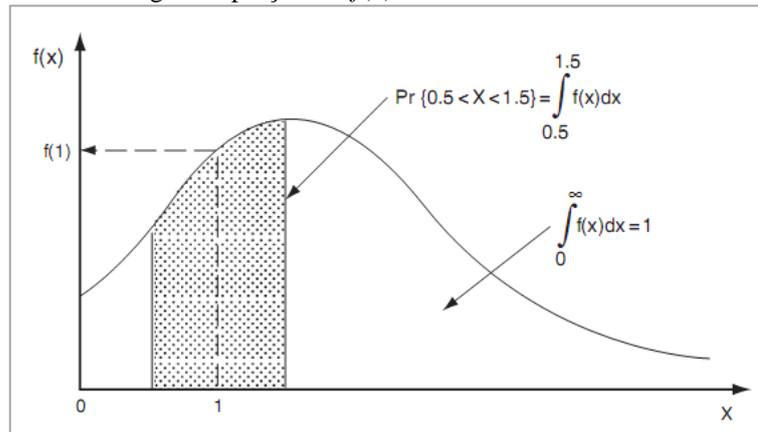
$$\int_x f(x)dx = 1 \quad (8)$$

Uma função só pode ser considerada PDF se satisfizer a condição acima. Outra característica é que deve ser não-negativa para todos os valores de  $x$ . A Figura 6 apresenta um exemplo hipotético da PDF, definido em valores não-negativos para uma variável aleatória  $X$ .

A função densidade de probabilidade pode ser avaliada para valores específicos de uma variável aleatória, sendo  $X = 1$ , mas por si mesmo  $f(1)$  não é significativo em termos de probabilidades para  $X$ . Na verdade, desde que  $X$  varie continuamente sobre algum segmento

de números reais, a probabilidade de termos exatamente  $X = 1$  é infinitesimalmente pequena. É significativo, no entanto, pensar e calcular probabilidades para valores de uma variável aleatória numa vizinhança não-infinitesimal em torno de  $X = 1$  (Wilks, 2006). A Figura 9 mostra a probabilidade de  $X$  entre 0,5 e 1,5, bem como a integral da PDF entre esses limites.

**Figura 9** – Função densidade de probabilidade hipotética para  $f(x)$  para uma variável aleatória não-negativa  $X$ . As probabilidades são obtidas integrando porções de  $f(x)$ .



Fonte: Wilks, 2006.

Wilks (2006) menciona que a maioria das variáveis atmosféricas pode assumir qualquer valor numa série contínua (e.g., temperatura, quantidade de precipitação, altura geopotencial, velocidade do vento). Ainda de acordo com o autor, mesmo que a natureza dos sistemas de medição e de relatórios seja tal que as medições atmosféricas sejam arredondadas para valores discretos, o conjunto de valores reportados é grande o suficiente para que a maioria das variáveis ainda possa ser tratada como quantidades contínuas. No nosso caso, a refletividade radar  $Z$  é uma variável aleatória, pois o mesmo pode assumir qualquer valor dentro de um limite, apesar de se aplicar o arredondamento para valores discretos, assim como os exemplos anteriormente citados.

## 2.6 FURACÃO KATRINA

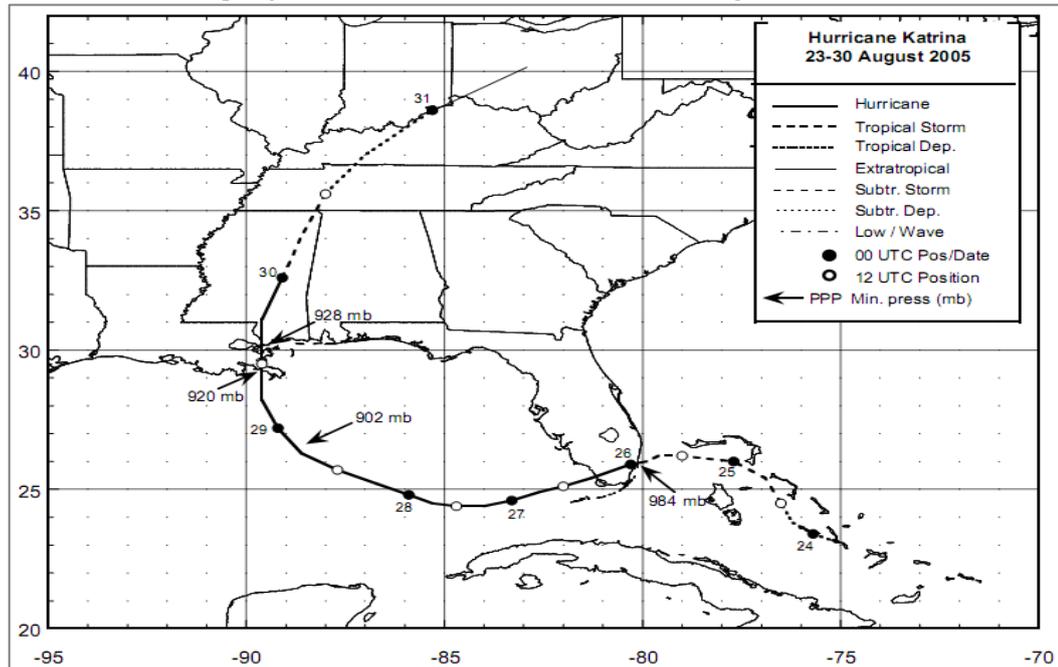
O *Katrina* foi um poderoso e devastador furacão que provocou danos catastróficos e grande perda de vidas humanas nos Estados Unidos da América. Considerado o mais caro, e um dos cinco furacões mais mortais a atingir o país (Blake et al., 2011), o furacão primeiro provocou fatalidades e estragos na região sulista da Flórida como um furacão de Categoria 1 na escala Saffir-Simpson. Os autores afirmam que devido à extensão dos seus impactos, *Katrina* é considerado um dos mais devastadores desastres naturais na história dos EUA.

Após atingir a intensidade de Categoria 5, na região central do Golfo do México, o furacão se enfraqueceu para Categoria 3, horas antes de adentrar na região costeira de Louisiana, norte do Golfo. Apesar do enfraquecimento acima citado durante a passagem do furacão, as perdas e danos causados por este colossal furacão envolveram regiões da Louisiana e Mississippi, com efeitos significantes que se estenderam ao noroeste da Florida, Georgia e Alabama. O resumo do histórico sinótico descrito nesse capítulo tem como base o relatório da *National Hurricane Center* – NHC de Knabb et al. (2005) e Beven II et al. (2007).

### **2.6.1 Histórico Sinótico**

A gênese complexa do furacão *Katrina* envolveu a interação entre uma onda tropical (Leste), remanescentes de médios níveis da Depressão Tropical *Ten* (DTT) e um cavado na troposfera superior. O cavado localizado sobre a região oeste do Atlântico e das Bahamas foi responsável por um forte cisalhamento oeste na DTT, provocando assim sua degeneração. A onda tropical, originada na costa oeste africana em 11 de Agosto, atravessou as ilhas Leeward (grupo de ilhas caribenhas) e se fundiu com os restos da DTT produzindo assim, uma vasta área com aguaceiros e tempestades a norte de Porto Rico. Durante o deslocamento do cavado para o oeste em direção à Flórida, enfraqueceu permitindo assim o sistema se transformar em uma depressão tropical sobre a região sudeste de Bahamas, a cerca de 175 milhas náuticas (324 km) de Nassau. A depressão foi designada de Depressão Tropical *Twelve* devido à presença de uma onda tropical que foi parcialmente responsável pela ciclogênese. O deslocamento do centro do furacão, suas respectivas categorias e pressão mínima estão representadas na Figura 10.

**Figura 10** – Best track das posições do centro do furacão Katrina, 23-30 Agosto de 2005.



Fonte: Knabb et al., 2005.

A depressão continuou a se organizar sobre a região central das Bahamas durante a noite de 23 de Agosto. A convecção profunda aumentou durante a noite no semicírculo leste do ciclone e formou uma banda bem definida, que começou a envolver o lado norte do centro da circulação, na manhã de 24 de Agosto. Com base em dados de vento do voo de reconhecimento, o ciclone se tornou *Katrina*, a 11ª tempestade tropical da temporada de furacões no Atlântico de 2005, em 1200 UTC 24 de agosto, quando estava centrado sobre as Bahamas, a aproximadamente 120 km a leste sudeste de Nassau. A tempestade tropical gerou uma intensa explosão de convecção profunda sobre o centro de baixo nível durante a tarde de 25 de Agosto, enquanto se encontrava posicionado sobre noroeste das Bahamas. Após intensificação, estima-se que o *Katrina* atingiu o status de furacão perto 2100 UTC, 25 de Agosto, e entrou no continente (condados de *Miami-Dade* e *Broward*) pela primeira vez aproximadamente às 2230 UTC do mesmo dia, com ventos de 129 km/h, sendo considerado um furacão de Categoria 1 na Escala de Furacões Saffir-Simpson. Estudos mostraram que, embora não tenha sido perceptível em imagens de satélite convencionais, um olho bem definido se tornou evidente através do radar de Miami, característica essa que permaneceu enquanto o furacão se deslocava pelo interior do estado, antes de se enfraquecer para categoria de Tempestade Tropical *Katrina* às 0400 UTC 26 Agosto.

Após o enfraquecimento, o centro do *Katrina* foi deslocado para a região sudeste do Golfo do México. Uma vez de volta sobre a água, rapidamente ganhou *status* de furacão com

ventos de 124 km/h às 0600 UTC 26 Agosto. Apesar do centro se localizar sobre o Golfo e distante da região sul da Flórida, uma banda de precipitação forte e bem definida impactou grande parte do estado com ventos fortes e chuva intensa. É importante realçar que, durante o dia 26 Agosto, o Katrina passou por duas fases de rápida intensificação (definido como um acréscimo na velocidade do vento maior ou igual a 55 km/h num período de 24-h) entre os dias 26 e 28 Agosto.

No primeiro período, ocorreu um aumento dos ventos de 124 km/h para 176 km/h em 24 horas terminando às 0600 UTC de 27 Agosto. Após esse período, *Katrina* atingiu a Categoria 3, com ventos máximos de 185 km/h, tendo definido e evidente o olho do furacão através das imagens infravermelhas de satélites. Durante o resto do dia, o interior da parede do olho deteriorou, enquanto uma nova parede exterior se formava, e a intensidade estabilizou em aproximadamente 185 km/h, período em que o furacão quase dobrou de tamanho. O segundo período, caracterizado pela contração na nova parede interna do olho em um anel bem definido, ocorreu por volta das 0000 UTC 28 Agosto. Neste período, a intensificação foi maior, com o furacão passando de Categoria 3 para Categoria 5 em menos de 12-h: ventos registrados de incríveis 270 km/h às 1200 UTC.

Próximo das 1800 UTC 28 Agosto, Katrina registrou sua maior intensidade, com ventos de aproximadamente 280 km/h e situado a 315 km a sudeste da foz do rio Mississippi – Louisiana. O campo de vento continuou a se expandir em 28 de Agosto, e até o final daquele dia ventos com força de tempestade tropical se estendiam a cerca de 370 km do centro, e os ventos com força de furacão se estendiam a cerca de 168 km a partir do centro, fazendo do *Katrina* não só extremamente intenso, mas também excepcionalmente grande.

A nova parede do olho que se formou na noite de 27 de Agosto e que contraiu no início em 28 de Agosto, começou a ruir em seu lado sul no final de 28 de Agosto, enquanto outro anel externo de convecção se consolidava. Estas mudanças estruturais provavelmente contribuíram para o enfraquecimento rápido que foi observado antes da entrada final do furacão continente adentro. *Katrina* mudou sua direção para o norte do Golfo no dia 29 de Agosto. Em seguida, o furacão entrou no continente com a intensidade de Categoria 3, com ventos estimados em 204 km/h, perto de Buras, Louisiana às 1100 UTC do mesmo dia. O enfraquecimento rápido do furacão, de sua intensidade máxima próxima de 280 km/h a 204 km/h durante as 18-h que antecederam sua entrada no continente, parece ter sido, primariamente, devido às mudanças internas de sua estrutura, especificamente a deterioração da sua parede de olho interior sem a formação completa de uma nova parede exterior. O enfraquecimento também pode ter sido impulsionado pelo *entranhamento* de ar seco, que

pode ter impedido o aumento da convecção profunda que alimenta o sistema. O aumento gradual do cisalhamento do vento, temperaturas do oceano ligeiramente mais baixas e a interação com a superfície do continente também podem, de forma particular, ter desempenhado alguma influência. De acordo com o relatório da NHC, sem uma investigação profunda não é possível avaliar a influência e papel de cada um desses fatores. Os autores afirmam que o enfraquecimento da maioria dos furacões com o aproximar do nordeste da costa do Golfo ocorreu, em várias ocasiões no passado, quando um ou mais dos fatores supracitados vigoraram. Um estudo não publicado pelo NHC revela que, durante os últimos 20 anos, todos os 11 furacões que registraram uma pressão central menor que 973 mb 12-h antes de adentrar o continente a nordeste do Golfo do México enfraqueceram durante estas 12-h. Contudo, vale ressaltar que o furacão permaneceu muito extenso mesmo com a sua desintensificação, e os ventos permaneceram fortes durante o dia 29 de Agosto assim como no dia anterior.

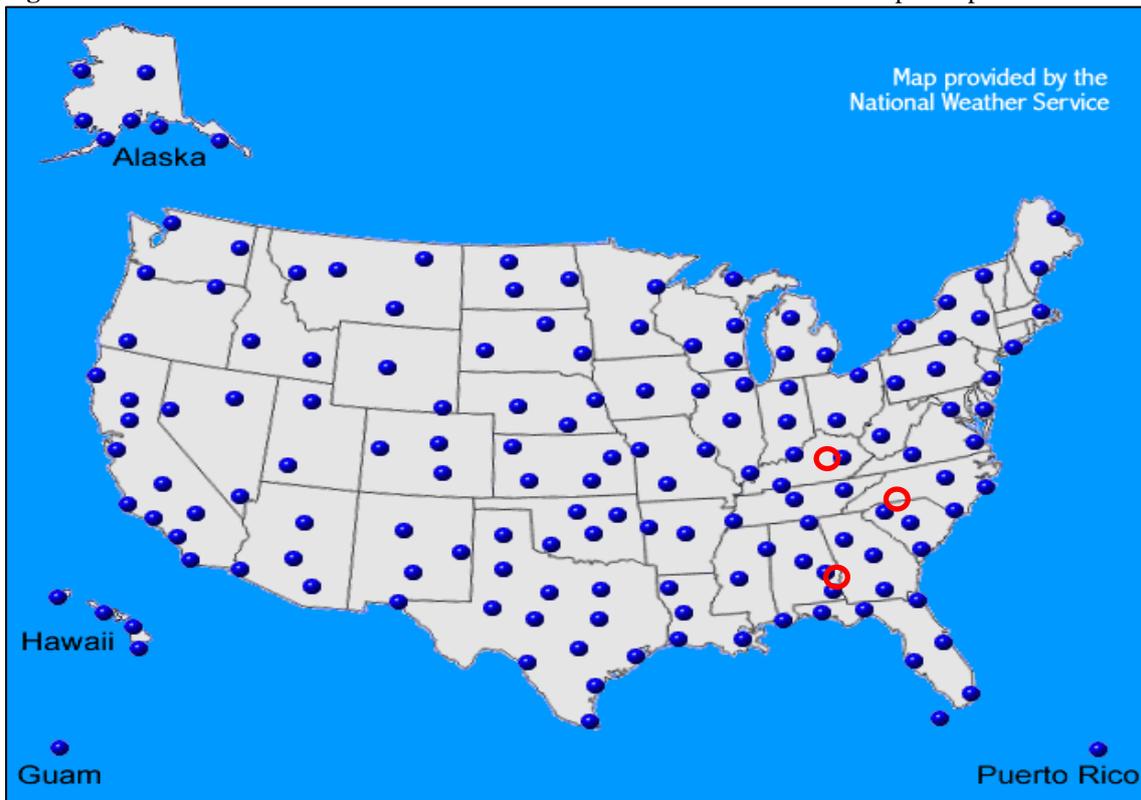
*Katrina* se desintensificou rapidamente após entrar no continente sobre a porção sul e central do Mississippi, tornando assim um furacão de Categoria 1 às 1800 UTC 29 Agosto. Seis horas depois o furacão enfraqueceu-se para tempestade tropical a noroeste de Meridian, Mississippi; seguindo depois para a região do *Great Lakes*. Continuando seu movimento, a tempestade tropical se tornou depressão tropical às 1200 UTC, 30 de Agosto, e finalmente o sistema foi absorvido dentro de uma zona frontal no dia 31 de Agosto.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 DADOS

Os dados de refletividade radar utilizados no presente estudo são provenientes da base de dados da rede de radares americanos – NEXRAD – *Next Generation Weather Radar*. Resultado de um programa federal triagencial do Governo dos EUA (Departamento do Comércio; Departamento de Transporte e Departamento de Defesa) na tentativa de prover os melhores meios tecnológicos, estado da arte, para previsão de tempo em todo território americano. O sistema é um dos mais modernos existentes com cobertura quase total de todo o território americano, incluindo Alasca e Hawaii (Figura 11). A rede é constituída por 160 radares Banda S da fabricante EEC (Enterprise Electronics Corporation) e que atualmente são de dupla polarização.

**Figura 11** – Rede nacional de radares NEXRAD. Destacados os radares utilizados para o presente estudo.



Fonte: <http://www.weatherimages.org/radar/>

De forma resumida, os dados são registrados de forma contínua sendo que o radar efetua as explorações volumétricas com varreduras azimutais completas de 360°. Os ângulos de elevação variam de 0,5° a ~20°, comum a vários sistemas de radar, com intervalos regulares de 1° entre varreduras sucessivas. O intervalo de tempo entre 2 *scans* volumétricos

completos é de 5 a 10 min dependendo do tipo de varredura e da finalidade da análise. A Tabela 2 sumariza a descrição das características dos radares do sistema NEXRAD. A descrição detalhada da rede (i.e., forma de varredura da antena; aquisição de dados; algoritmos utilizados para estimar a quantidade de precipitação) podem ser encontrados em alguns artigos (e.g., OFC, 1991 e 1992; Fulton et al., 1988).

**Tabela 2** – Descrição sistema de radares NEXRAD. Fonte: Adaptado de Diop (2010).

<b>Antena</b>	
Potência	750 kW
Ganho à 2850 MHz	45,5 dB
Largura do feixe	0,925°
Diâmetro da Parabólica	8,5 m
Ângulos de elevação	0,5 a 19,5 (VCP 11*, VCP 21**)
<b>Emissão</b>	
Frequência	Banda S – 2850 MHz
Comprimento de onda	10,5 cm
Duração do pulso	1,57 µs e 4,71 µs (máximo)
Polarização	Dupla
Alcance máximo	460 km
Resolução espacial	1 x 1
<b>Varredura</b>	
Modo <i>clear air</i> /vigilância	6-10 min repetição
Modo precipitação/severo	5 min repetição

\* Radar completa um scan volumétrico em 5 minutos com 14 elevações

\*\* Radar completa um scan volumétrico em 6 minutos com 9 elevações

Além da excelente qualidade dos dados e aquisição livre, outra vantagem do uso dos radares NEXRAD é o fato de sofrer baixa interferência dos efeitos Rayleigh e atenuação – por ser banda S (10,5 cm de comprimento de onda). Sendo assim, Diop (2013) afirma não ser necessário se proceder a uma correção de atenuação nos dados. Ainda de acordo com o mesmo autor o sistema permite a detecção de todos os tipos de hidrometeoros devido à grande sensibilidade (-15 dBZ).

Na Figura 11, onde observamos a cobertura espacial do NEXRAD, estão também apresentados os radares escolhidos para este estudo. Como observado no capítulo anterior, o *best-track* do Katrina descrito pela NHC permite a escolha dos radares para observação de todo o furacão desde o momento em que ele se encontra sobre o Golfo do México, passando pela entrada do sistema no continente até o seu enfraquecimento. Devido aos apagões,

ventania e danos causados pelas inundações decorrentes da passagem do furacão, alguns radares apresentam falta de dados porque tiveram suas funcionalidades paralisadas.

Os critérios para escolha desses radares foram: a distância do radar para o sistema, num range de 200 km; a existência de dados suficientes que pudessem permitir a análise do furacão e seu desenvolvimento.

Na Tabela 3, as informações sobre os dados utilizados estão disponíveis. A localização e designação dos radares são precisas. Além dessas informações, datas do início e fim das observações, e o número de imagens utilizadas para calcular a distribuição de refletividade para as diferentes posições do furacão também são indicadas.

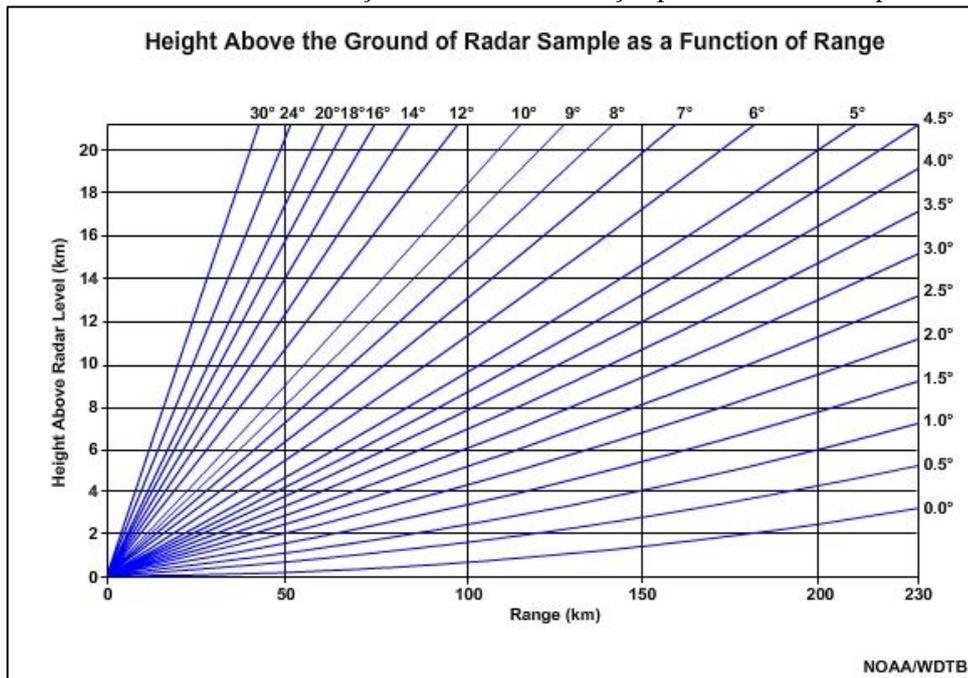
**Tabela 3** – Localização dos radares e descrição dos dados utilizados

Local	Localização (Lat; Long; Alt) [°N; °W; m]	Radar	Data		Nº de imagens
			Início	Fim	
Nova Orleans, LA	30,33; 89,82; 24	KLIX	28-08-2005	29-08-2005*	414
Birmingham, AL	33,17; 86,76; 645	KBMX	29-08-2005	30-08-2005	412
Memphis, TN	35,34; 89,87; 282	KNQA	29-08-2005	30-08-2005	318

\* dados incompletos

Os dados de refletividade escolhidos são correspondentes ao PPI (*Plan Position Indicator*) com elevação de  $0,5^\circ$ , i.e., primeiro nível de aquisição dos dados. Devido ao tamanho do sistema, superior a 400 km de diâmetro e à problemática da curvatura da Terra, a escolha, considerando a latitude local, leva em conta que a 200 km de distância o feixe passa a uma altura de pouco mais de 4 km, tal que existem homogeneidade e precisão na detecção. O primeiro pressuposto é que o feixe de radar continua a viajar através da atmosfera em sua configuração original (ângulo de elevação). Como citado anteriormente, a maioria dos radares meteorológicos emitem pulsos em vários ângulos de elevação, variando entre a digitalização de base de  $0,5^\circ$  e  $19,5^\circ$ . Em condições atmosféricas normais (i.e., temperatura e umidade diminuem com a altura na troposfera) os feixes vão percorrer por caminhos que se parecem com o ilustrado na Figura 12. Desta forma, podemos observar o sistema sem que possíveis erros induzidos pela subestimação ou superestimação afetem a representatividade da refletividade observada.

**Figura 12** – Altura do feixe de radar em função da distância e elevação para uma atmosfera padrão.



Fonte: [http://www.meted.ucar.edu/radar/basic\\_wxradar/print.htm](http://www.meted.ucar.edu/radar/basic_wxradar/print.htm)

## 3.2 METODOLOGIA

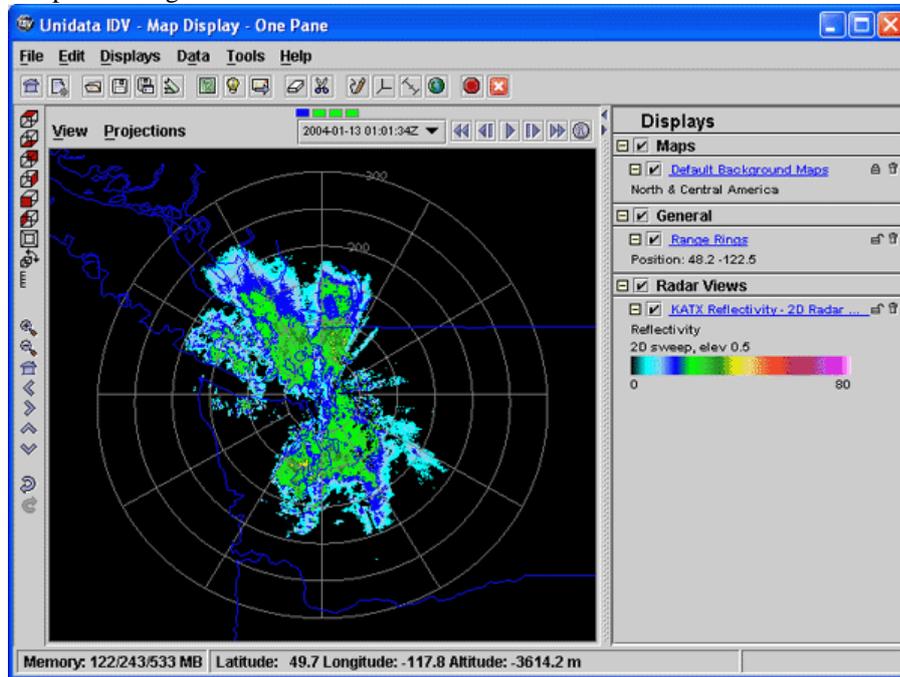
Após a escolha dos dados, os mesmos foram analisados utilizando dois softwares principais – IDV (*Integrated Data Viewer*) e o MATLAB® (*Matrix Laboratory*); ambos serão descritos com mais detalhes posteriormente. O IDV foi utilizado para visualizar os dados enquanto que o MATLAB para calcular a função densidade de probabilidade. Também foi estabelecido um critério de posicionamento baseado num esquema ilustrativo de um ciclone tropical típico do Hemisfério Norte.

### 3.2.1 IDV – *Integrated Data Viewer*

O IDV é um software com base Java™ para análise e visualização de dados de geociência. Desenvolvido pela UCAR (*University Corporation for Atmospheric Research*), Boulder – Colorado, o software é de livre acesso e entre outras funções, possibilita o trabalho e manejo de dados de satélite, dados de grade de modelos de previsão numérica de tempo, observações de superfície, dados de nível II e III do NEXRAD, além de permitir a interação com outras plataformas (e.g., McIDAS e GEMPAK) e outras fontes de dados. Na Figura 13

um exemplo do *workspace* do IDV contendo um *sample* de uma imagem radar nível II em 2D.

**Figura 13** – Exemplo de imagem radar nível II em 2D.



Fonte: <http://www.unidata.ucar.edu/software/idv/docs>

A utilização do IDV é imprescindível, pois é um dos programas recomendados para visualização direta dos dados NEXRAD. O programa permite várias opções que facilitam ao utilizador extrair grande quantidade de informação, e entre outras destacam-se:

- Visualização dos dados em todas as elevações possíveis (0,5-19,5°);
- Visualização dos dados em 2 e 3 dimensões;
- Visualização de perfil vertical do sistema;
- Análise do CAPPI, PPI;
- Velocidade radial (análise do deslocamento do sistema);
- Criação de mosaico (análise da extensão horizontal do sistema);

O emprego do IDV se constitui na etapa primária e de grande importância, pois permitindo a visualização direta dos dados o programa facilitou o estabelecimento de critérios de posicionamento.

### 3.2.2 MATLAB®

O MATLAB® é uma linguagem de programação de alto nível para visualização, computação numérica e interação com base de dados. O software permite análise de dados, desenvolvimento de algoritmos, criação de modelos e aplicações de forma interativa e rápida. Uma das grandes vantagens do uso desse *software* é o fato de disponibilizar funções matemáticas e estatísticas para análise de dados tanto em pequena como em grande quantidade.

Para procedermos ao cálculo da distribuição da refletividade, é necessário fazer uma correção nos dados, tal que:

$$Z_m = 0,5 \times (Z_{input} + 33) \quad (9)$$

onde  $Z_m$  é a refletividade média, sendo o valor dado em dBZ e plotado no gráfico;  $Z_{input}$  é o valor do dado registrado (incluindo valores negativos, e portanto justificando a correção). Esta correção é recomendada pelo próprio sistema NEXRAD. Também foi desconsiderado valores de refletividade inferiores a 10 dBZ, pois os valores muito baixos não estão associados a precipitação, que é um dos focos do estudo. Como citado anteriormente, foram utilizados dados de refletividade num raio de até 200 km, também configurado no Matlab.

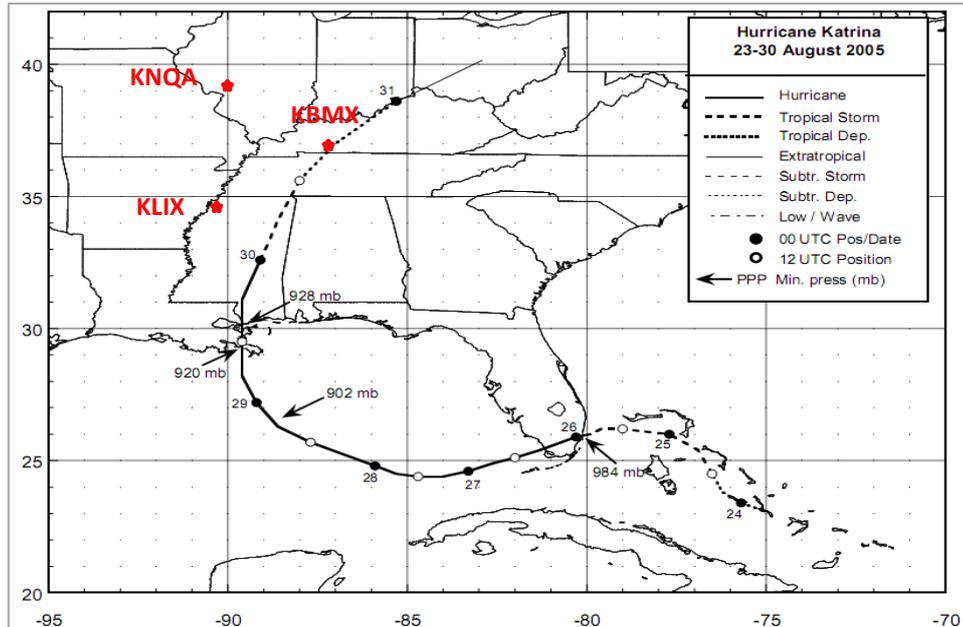
Devido à escala espacial e temporal do furacão – grande extensão e tempo de deslocamento relativamente lento em relação a outros sistemas meteorológicos – foi realizado o cálculo da refletividade média (i.e., média horária da refletividade observada).

### 3.2.3 Posição do sistema e radares escolhidos

Para melhor analisar o desenvolvimento do sistema e conseqüentemente a distribuição da refletividade, foi estabelecido um critério simples para estudar o furacão em três posições diferentes, de acordo com a distância em que o mesmo se encontra do radar. Este critério leva em conta a distância anteriormente constituída – 200 km –, e também o trajeto percorrido pelo Katrina, desde o período sobre o centro do Golfo do México, seu enfraquecimento entrando no continente e sua dissipação (vide Figura 14). Sendo assim, analisaremos as posições da seguinte forma:

- **Posição 1** – Radar KLIX
- **Posição 2** – Radar KBMX
- **Posição 3** – Radar KNQA

**Figura 14** – Trajeto percorrido pelo Katrina desde sua formação até a dissipação, com detalhes sobre intensidade, pressão mínima, variação temporal e posição dos radares escolhidos.



Fonte: Knabb et al., 2005.

Devido à grande extensão longitudinal e latitudinal do furacão e ao fato da PDF ser diretamente influenciada pela distância dos radares para o sistema (i.e., o cálculo da PDF leva em conta a refletividade radar registrada numa certa distância e num certo nível de elevação), o critério foi estabelecido para analisar de forma concisa o sistema enquanto o mesmo se aproxima dos radares.

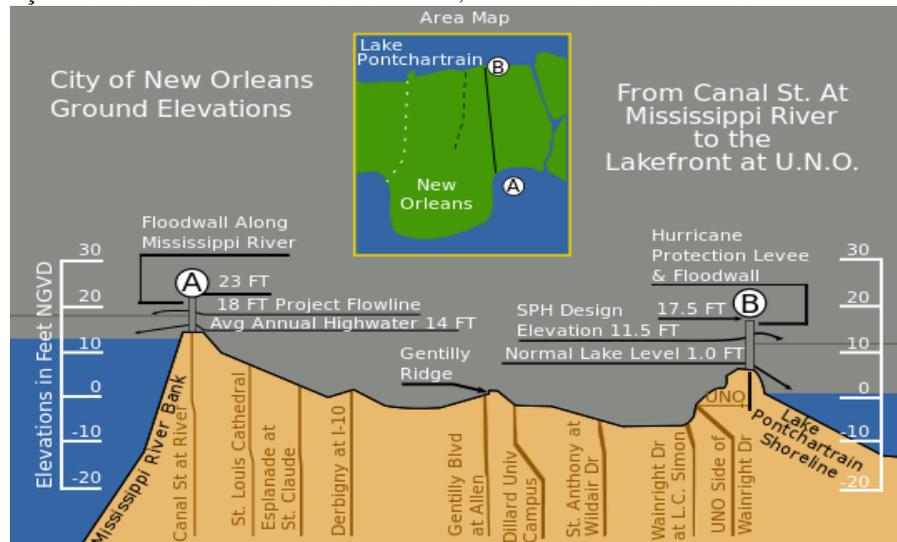
### 3.3 CARACTERÍSTICAS DAS REGIÕES DE ESTUDO

#### 3.3.1 Nova Orleans – Louisiana

Situada na região sudeste de Louisiana numa região de planície, Nova Orleans é a cidade mais populosa deste estado americano. A geografia da região caracteriza-se pela sua baixa altitude, com várias áreas estando localizadas em uma altitude abaixo do nível do mar. Esta característica torna a cidade vulnerável a enchentes e inundações que podem ser

ocasionadas por tempestades ou furacões, ou pelo aumento do nível do Rio Mississippi. A Figura 15 mostra um corte vertical apresentando as elevações da cidade.

**Figura 15** – Secção transversal vertical de Nova Orleães, mostrando altura máxima.



Fonte: Wikipedia.

Os furacões ameaçam a região de Louisiana com frequência, sendo a cidade muito afetada, devido não só à sua elevação, mas também por ser cercada por água (i.e., nas regiões a norte, este e sul). De acordo com a Agência Federal de Gestão de Emergência (FEMA em inglês), Nova Orleans é a cidade mais vulnerável a furacões de todo o território americano. Raramente a cidade registra queda de neve.

O clima de Nova Orleans, de acordo com a classificação de Köppen, é subtropical caracterizado por invernos amenos e verões quentes e úmidos. A temperatura média varia entre 12 °C em Janeiro e 28,5 °C em Julho-Agosto com um total de precipitação anual aproximado de 1590 mm. Os meses mais chuvosos correspondem aos do verão, enquanto que Outubro é o período mais seco.

### 3.3.2 Birmingham – Alabama

Birmingham é a maior cidade do estado de Alabama, situada em sua parte central. O estado está localizado na região sudeste dos Estados Unidos. A cidade ocupa uma região de vale, flanqueado por longas cadeias de montanhas paralelas com direção nordeste para sudoeste.

O clima é muito similar ao apresentado anteriormente, pois o estado americano localiza-se na macrorregião de clima subtropical úmido (Köppen, 1936). Em Birmingham os invernos são suaves com uma temperatura média de 6,6 °C para o mês de Janeiro; os verões quentes com a temperatura média para Julho de cerca de 28 °C, mas com alguns dias de temperatura superior a 32 °C; e a precipitação total anual é de aproximadamente 1370 mm sendo bem distribuída durante o ano inteiro.

A primavera e o outono são períodos agradáveis, mas também com algumas variações, principalmente pela entrada de frentes frias que carregam tempestades severas e podem contribuir para formação de tornados na região. Em relação aos tornados, é importante destacar a localização da cidade no coração do conhecido *Tornado Alley* (região conhecida dos Estados Unidos pela vulnerabilidade à ocorrência de fortes e violentos tornados). Outra característica digna de realce é a proximidade do estado ao Golfo do México, o que o leva a experimentar, no final do verão e outono, furacões e tempestades tropicais ocasionais.

### 3.3.3 Memphis – Tennessee

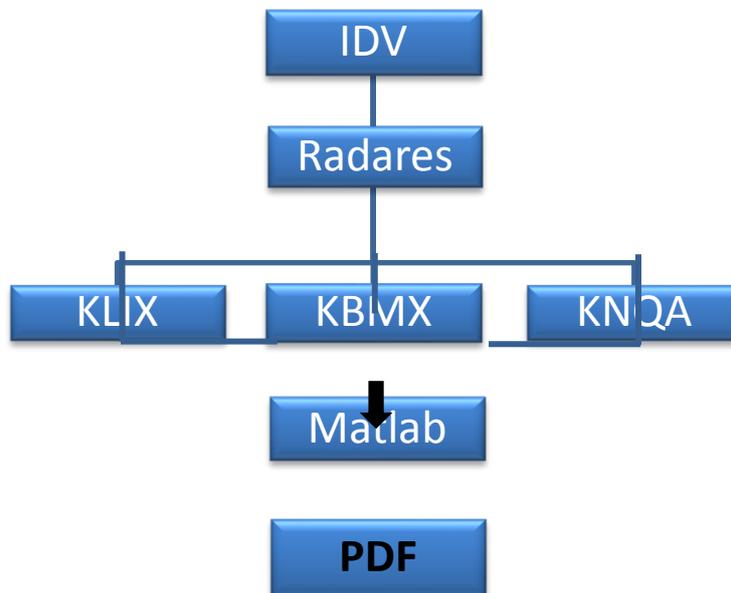
A cidade de Memphis fica localizada na parte sudoeste do estado de Tennessee. O clima é subtropical úmido (Köppen) com quatro estações distintas. Devido à sua localização, as variações de tempo são provenientes das regiões adjacentes. O inverno vem alternadamente das Grandes Planícies superiores e do Golfo do México, ocasionando oscilações drásticas de temperatura. O tempo do verão pode vir do Texas (muito quente e úmido) ou do Golfo (quente e muito úmido). Julho tem uma temperatura média diária de 28,2 °C, com altos níveis de umidade, devido à umidade proveniente do Golfo do México. Tempestades vespertinas e noturnas são frequentes durante o verão, geralmente breves, não mais duradouros do que uma hora. Os invernos são de suaves a frios, com uma temperatura média diária em Janeiro de 5,1 °C. Esporadicamente no inverno ocorre queda de neve, que por vezes representa perigo às linhas de energia e pode tornar a condução perigosa.

Os inícios de outono são secos e amenos, mas podem ser quentes até o final de Outubro. Durante esse período, geralmente o tempo é chuvoso e mais frio. A precipitação média anual fica na faixa de 1360 mm e relativamente distribuída no ano. As tempestades severas podem ocorrer em qualquer época do ano, mas principalmente durante os meses de primavera. Ocorrência de chuvas de granizo, ventos fortes, inundações e raios são frequentes e podem acompanhar estas tempestades. Algumas tempestades podem gerar tornados.

### 3.4 CONCLUSÃO

De forma resumida, a Figura 16 apresenta o fluxograma com a metodologia aplicada para a obtenção dos resultados. Resumidamente, o IDV foi utilizado para visualizar os dados escolhidos para o período da passagem do Katrina, em seguida o critério estabelecido para determinar quais radares seriam mais apropriados para analisar os dados no range determinado. Após esses passos primários os dados de cada radar específico foram computados e calculados através do MATLAB gerando dessa forma os gráficos da densidade de probabilidade para o fator de refletividade radar ( $Z_m$ ).

**Figura 16** – Fluxograma explicativo da metodologia aplicada no estudo.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos com a aplicação da metodologia proposta. Os resultados serão apresentados para três posições diferentes, escolhidos de acordo com a distância que o furacão se encontra de cada radar escolhido. O primeiro radar apresentado se localiza na região de Nova Orleans, bastante castigada pela passagem do furacão. Em seguida, os resultados referentes ao radar de Birmingham são analisados, lembrando que a escolha desse radar se deve ao *blackout* ocorrido na rede elétrica de Nova Orleans, impedindo o radar no monitoramento do sistema, assim como obtenção de mais dados. Por último é apresentado o radar de Memphis, que visualiza o sistema durante seu período de enfraquecimento, de furacão para tempestade tropical. A distribuição da probabilidade do fator de refletividade média  $P(Z_m)$  permitirá obter os possíveis valores (limites) da refletividade para o sistema, podendo assim caracterizar sua evolução em termos de sua assinatura própria, i.e., sua estrutura física. A localização, deslocamento bem como a estrutura do sistema precipitante serão analisadas através das imagens IDV dos radares escolhidos.

### 4.1 DISTRIBUIÇÃO DA REFLETIVIDADE RADAR

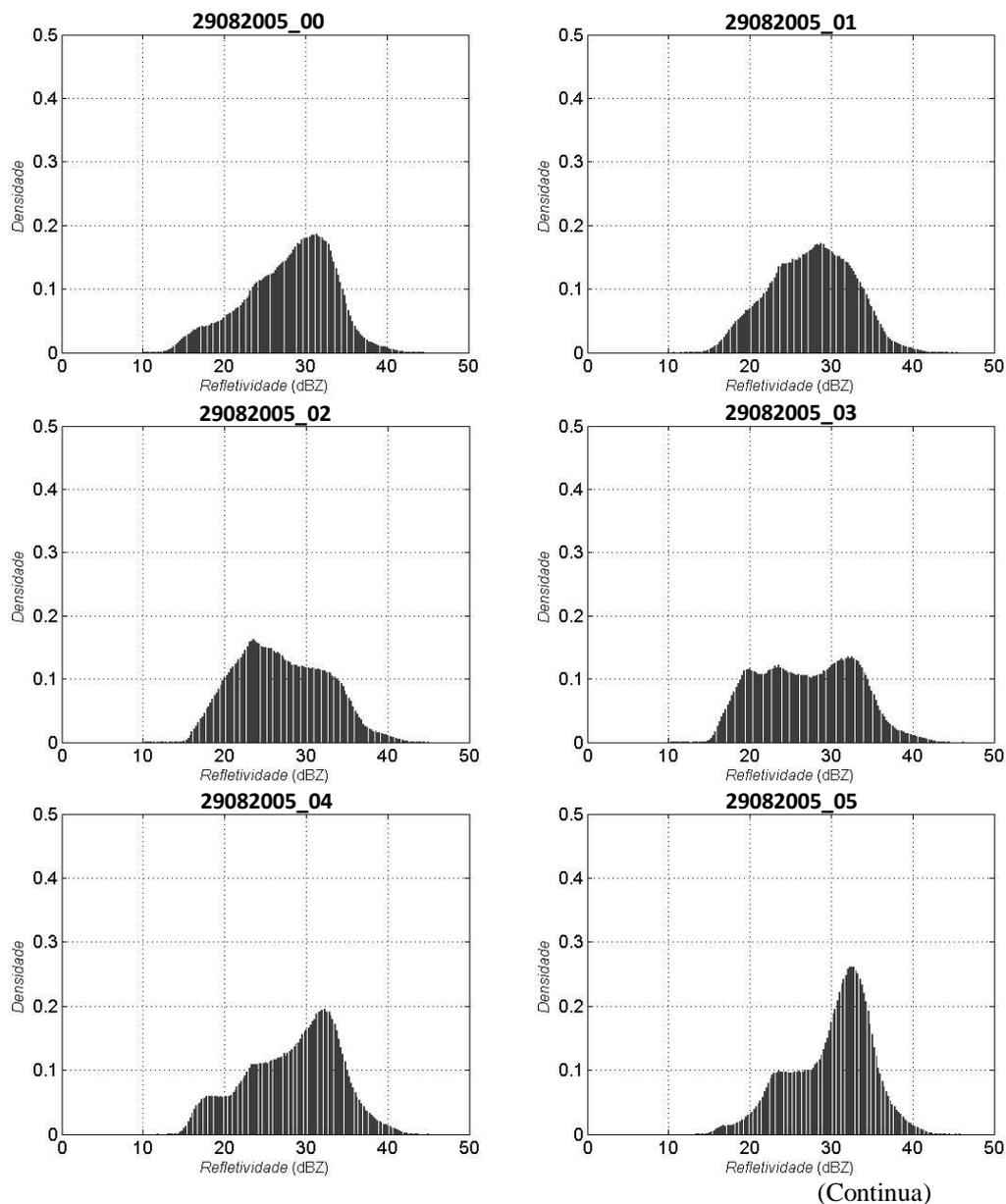
#### 4.1.1 Estudo do radar KLIX – Nova Orleans

A região de Nova Orleans, caracterizada pela presença de vários lagos e pela baixa altitude, é representativa de um sítio costeiro. O horário de estudo foi de 0000 às 1300 UTC do dia 29 de Agosto de 2005.

Nota-se que nas primeiras horas de observação os valores da refletividade têm picos alternados em torno de 30 dBZ. Na Figura 17 observamos que a distribuição tem um comportamento mais bimodal, sendo que em dois horários os máximos estão acima de 30 dBZ (casos 00 e 03 UTC), e outros dois horários abaixo de 30 dBZ (casos 01 e 02 UTC). Nessa primeira análise, é perceptível a existência de uma prevalência, tanto nos valores da moda principal, valor em torno de 32 dBZ com aproximadamente 25-30 %, como também nos valores da moda secundária, com valores próximos a 22-23 dBZ (casos 04 a 11 UTC). Vale salientar que a partir de 0600 UTC, é possível observar curvas quase idênticas, mostrando certa estabilidade dos limites de  $P(Z)$ , tendo uma porção de curva normal (Gaussiana) entre os valores aproximados de 28 dBZ e 44 dBZ. Nos últimos dois horários de estudo, 12 e 13 UTC

respectivamente, onde a totalidade do furacão se encontra visível no range máximo do radar (400 km), a PDF apresenta uma distribuição mais convectiva com tendência mais unimodal, em torno de 32 dBZ. Os valores da refletividade se situam na faixa compreendida entre 10 dBZ (valor de corte, explicado no Capítulo III) e 45 dBZ. Esses limites de  $P(Z)$  são característicos da presença e predominância de nuvens associadas à precipitação de intensidade moderada a intensa – estratiformes e convectivas, respectivamente.

**Figura 17** – Distribuição da refletividade radar  $P(Z)$  para Nova Orleans (KLIX) no período de 0000 UTC às 1300 UTC, 29 de Agosto 2005.



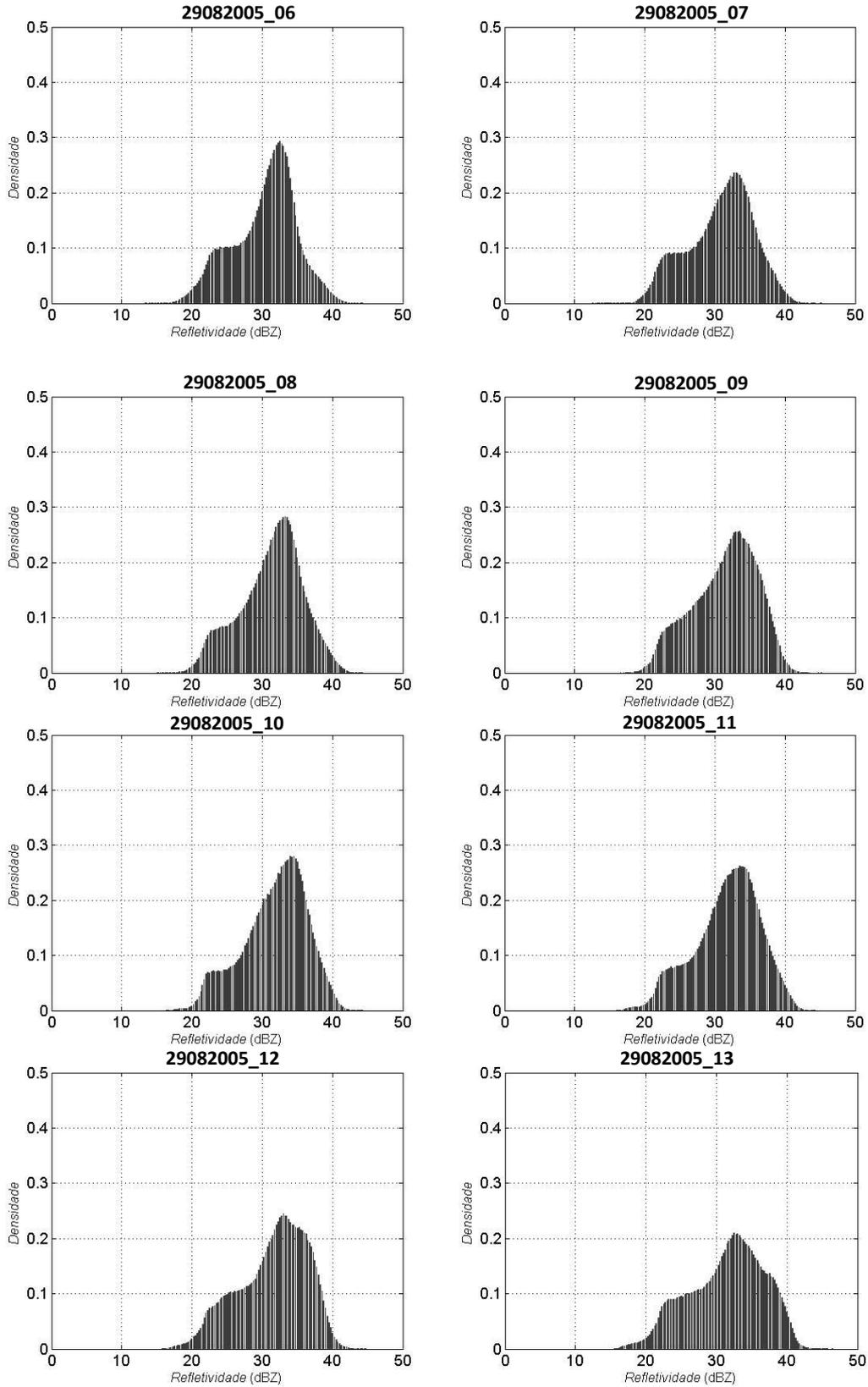


Figura 17 – Continuação

#### 4.1.2 Estudo do radar KBMX – Birmingham

Birmingham, cidade situada numa região de vale é representativa de um sítio continental, apesar de sua relativa proximidade com o Golfo, que a torna uma região propensa à passagem dos furacões.

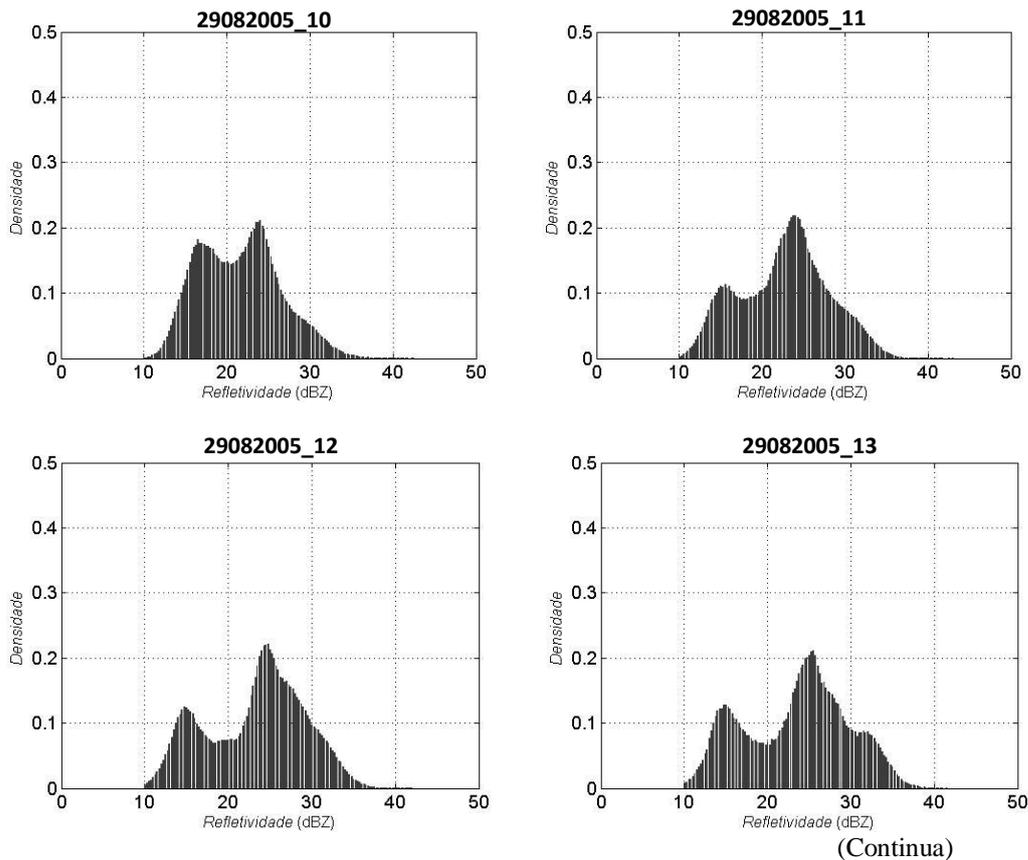
O estudo utiliza dados de refletividade entre 1000 UTC do dia 29 a 0700 UTC do dia 30 de Agosto de 2005. Durante esse período, observa-se que os valores próximos ao pico máximo tendem a se deslocar podendo ser divididos em 3 momentos diferentes: (1) período bimodal com valores inferiores a 25 dBZ; (2) período de transição, onde a refletividade aumenta e alcança valor máximo registrado para o radar KBMX; (3) período uni-modal com os valores de refletividade diminuindo de 22 dBZ a ~18 dBZ. Essas mudanças são a principal característica do sistema para o radar KBMX. Tais mudanças podem também ser observadas na variação dos limites da refletividade, que *a priori* se situam na faixa 10-42 dBZ, mas aumentam para 10-45 dBZ e 10-48 dBZ, mesmo com densidade pouco significativa. Diferentemente dos horários anteriores, a PDF da refletividade para o radar de Birmingham apresenta valores menores de refletividade e certa tendência à bimodalidade, vista nos primeiros horários de estudo. Fato importante é que essa bimodalidade tem seus valores com ambos os picos abaixo de 25 dBZ, sendo os mesmos mais centrados em torno de 15 dBZ e 23-25 dBZ (Figura 18, casos 10-16 UTC).

Com a aproximação da parte central (*banda de precipitação secundária e principal*) e linhas de tempestades ligadas ao furacão (*squall lines – banda distante*), ocorre o aumento da refletividade, pois parte dessas bandas de precipitação tem características convectivas. Apesar desse aumento, os valores de refletividade continuam sendo menores que os registrados para o radar KLIX. Paulatinamente, a moda situada na região 15 dBZ desloca-se e um novo pico, acima de 30 dBZ, pode ser observado (Figura 18, casos de 17 UTC dia 29 até 01 UTC dia 30). É necessário destacar que esse deslocamento acompanha o momento em que o *Katrina* enfraquece, perdendo seu *status* de furacão para Tempestade Tropical (classificação de acordo com ventos entre 60-119 km/h) a partir das 00 UTC do dia 30 de Agosto. De acordo com estudos da NHC, quando os furacões adentram o continente enfraquecem devido à ausência dos principais “combustíveis” que alimentam o sistema – calor latente disponível para convecção profunda, temperatura superfície do mar, e também a umidade disponível –, e os sistemas precipitantes no furacão sofrem mudanças dinâmicas. Estas mudanças podem ser vistas diretamente na evolução da PDF, que apresenta valores mais híbridos, ou seja, existe

uma mistura nos valores de refletividade, tendo na sua grande maioria densidade não superior a 20 % em toda sua extensão.

O último e terceiro momento começa com a transição observada entre 01-02 UTC, onde se verifica a mudança da PDF com valores da refletividade calculados decrescendo. Esta diminuição, visível nos gráficos da probabilidade, pode também ser notada nas imagens do IDV. Nesse momento, além do enfraquecimento, o centro do sistema se desloca para a região oeste de Birmingham, ficando assim fora do range do radar. Esta situação permite-nos concluir que a aplicação da PDF favorece estudos de sistemas precipitantes locais, ou com pouco deslocamento durante os processos de formação, desenvolvimento e dissipação. O valor da moda situa-se em torno de 22 dBZ (04-07 UTC) e posteriormente passa a ser menor que 20 dBZ (aproximadamente 18 dBZ).

**Figura 18** – Distribuição da refletividade radar  $P(Z)$  para Birmingham (KBMX) no período de 1000 UTC 29 de Agosto à 0700 UTC 30 de Agosto 2005.



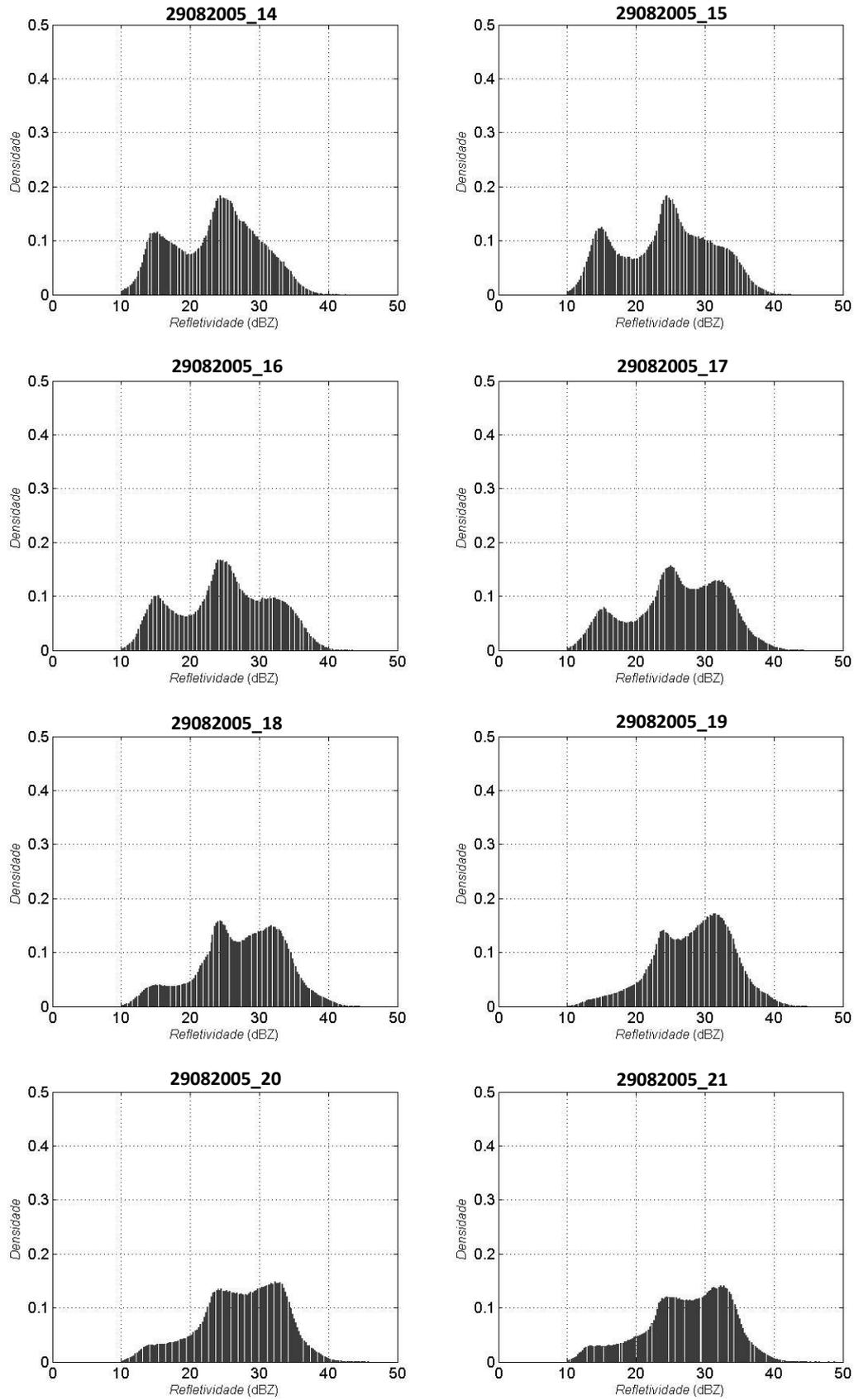


Figura 18 – Continuação

(Continua)

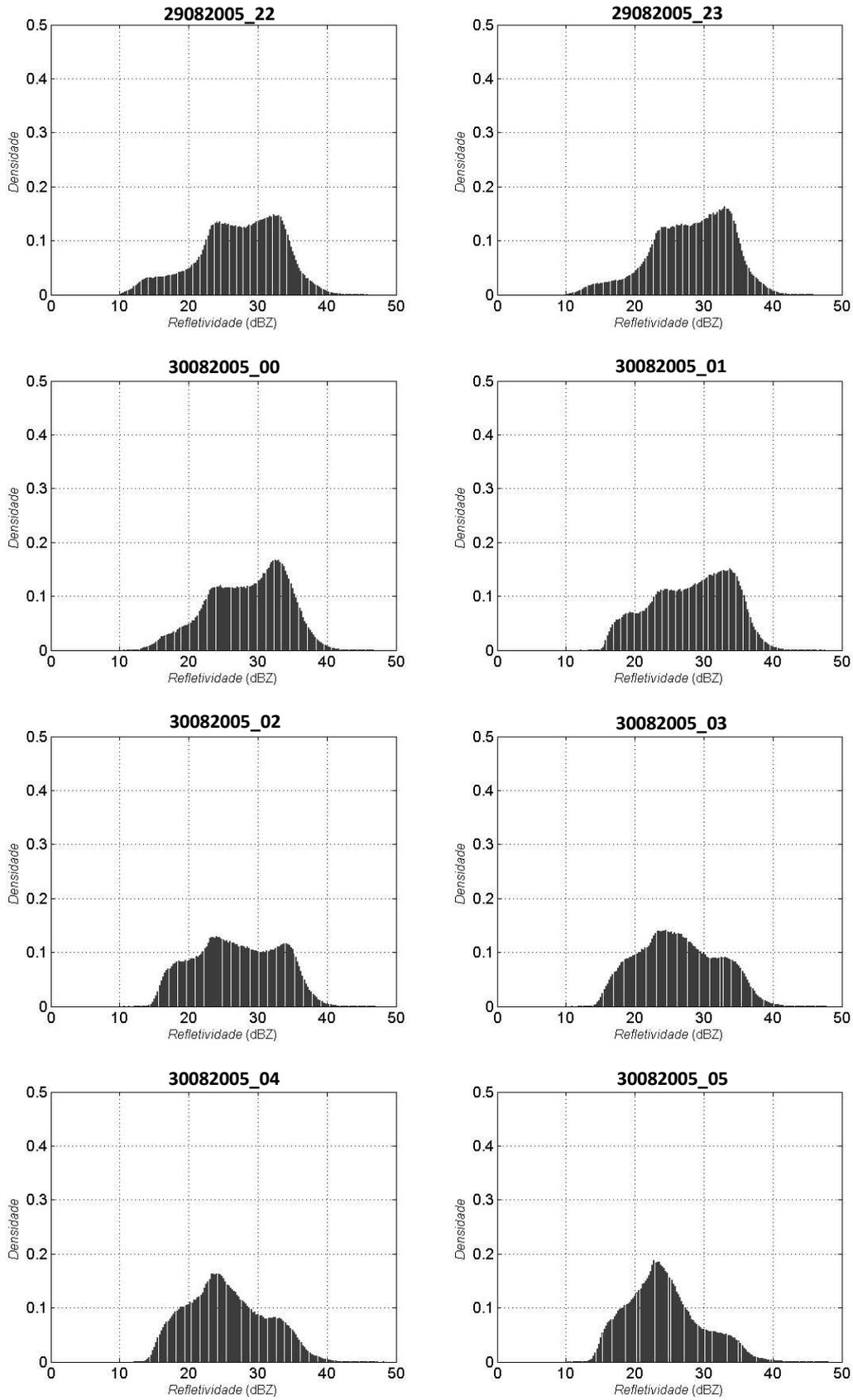
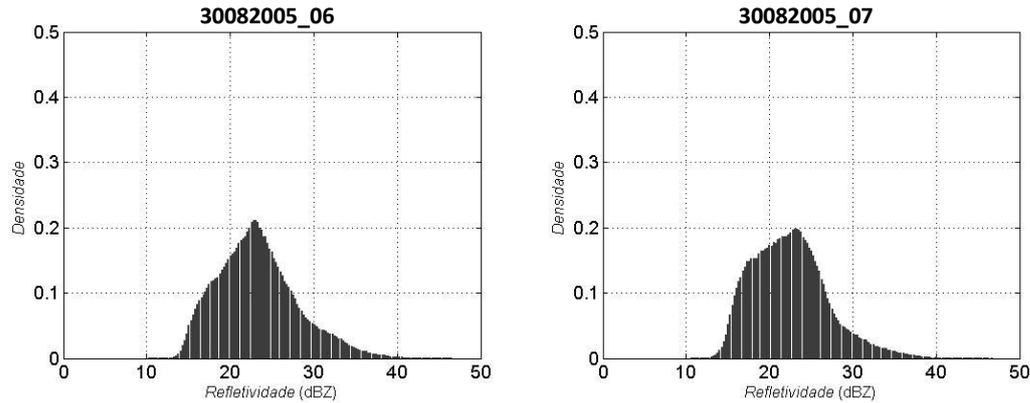


Figura 18 – Continuação

(Continua)



**Figura 18** – Continuação

O comportamento da PDF a partir do radar KBMX é explicado por vários autores quando analisam a desintensificação de furacões que atingiram os EUA e outras regiões do globo onde sua ocorrência é frequente. Battan (1974) afirma que quando furacões se deslocam sobre continentes ou nos oceanos das altas latitudes eles enfraquecem, primariamente devido à quantidade de energia disponível, ou seja, o “combustível” é menor, pois o furacão se afasta das águas quentes que o alimentam; também a rugosidade do continente exerce forças de atrito adicional, que atuam para reduzir a velocidade dos ventos.

#### 4.1.3 Estudo do radar KNQA – Memphis

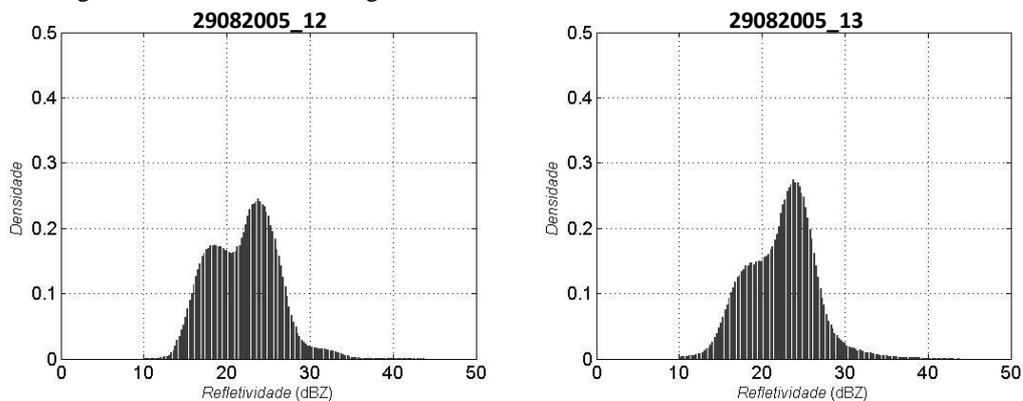
O terceiro e último período – radar KNQA, Memphis – foi considerado o momento em que o furacão está localizado sobre o continente, e sua extensão sobre os estados de Mississippi, Alabama e Tennessee. Após adentrar o continente, o furacão se enfraqueceu tornando-se uma tempestade tropical (caso anterior) e por fim uma depressão tropical. A análise deste radar compreende o período de 1200 UTC do dia 29 às 1500 UTC do dia 30 de Agosto. Assim como no radar de Nova Orleans existe uma pequena, porém importante falha, entre 0700 e 1200 UTC, onde não foram registrados dados, provocado por um *blackout*.

Para os horários estudados é notável que a distribuição da refletividade segue o padrão da PDF do radar KBMX. Isto ocorre, pois em ambos os casos ao se aproximar do radar, as partes mais estratiformes do sistema são primariamente visíveis no range de 200 km (picos de refletividade menores que 25 dBZ). Entre as 4 primeiras horas, i.e., das 20-23 UTC, ocorre uma mudança pequena no pico da refletividade, que no primeiro momento estava situada em torno de 22-23 dBZ, e desloca-se para direita tendendo a valores superiores a 30 dBZ (Figura 19, casos de 20 UTC do dia 29 à 00 UTC dia 30). A partir da 01 UTC é possível observar que

permanece um pico com valor superior a 30 dBZ com cerca de 30-42 % (casos de 00 a 05 UTC).

Assim como no caso de KLIX, a PDF apresenta uma porção com curva normal que persiste nos horários acima destacados. Essa componente tem seus valores em aproximadamente 27-39 dBZ, valores que são menores em comparação com os limites da PDF para Nova Orleans. A explicação para esses limites menores está no fato que explica toda a mudança da PDF durante o estudo. Apesar da grande extensão latitudinal e longitudinal, do deslocamento lento do sistema e da distância em relação aos radares, a detecção do sistema acontece de forma gradual; portanto, bandas de precipitação distantes – que sobre o continente tendem a enfraquecer até sua dissipação – são visíveis e computadas e posteriormente as partes centrais. As bandas de precipitação secundária e primária são geralmente formadas de nuvens com fortes movimentos ascendentes (Houze, 2010), o que facilita a convecção e conseqüentemente os valores de refletividade associadas às nuvens e precipitação são mais intensas.

**Figura 19** – Distribuição da refletividade radar P(Z) para Memphis (KQNA) no período de 1200 UTC 29 de Agosto à 1500 UTC 30 de Agosto 2005.



(Continua)

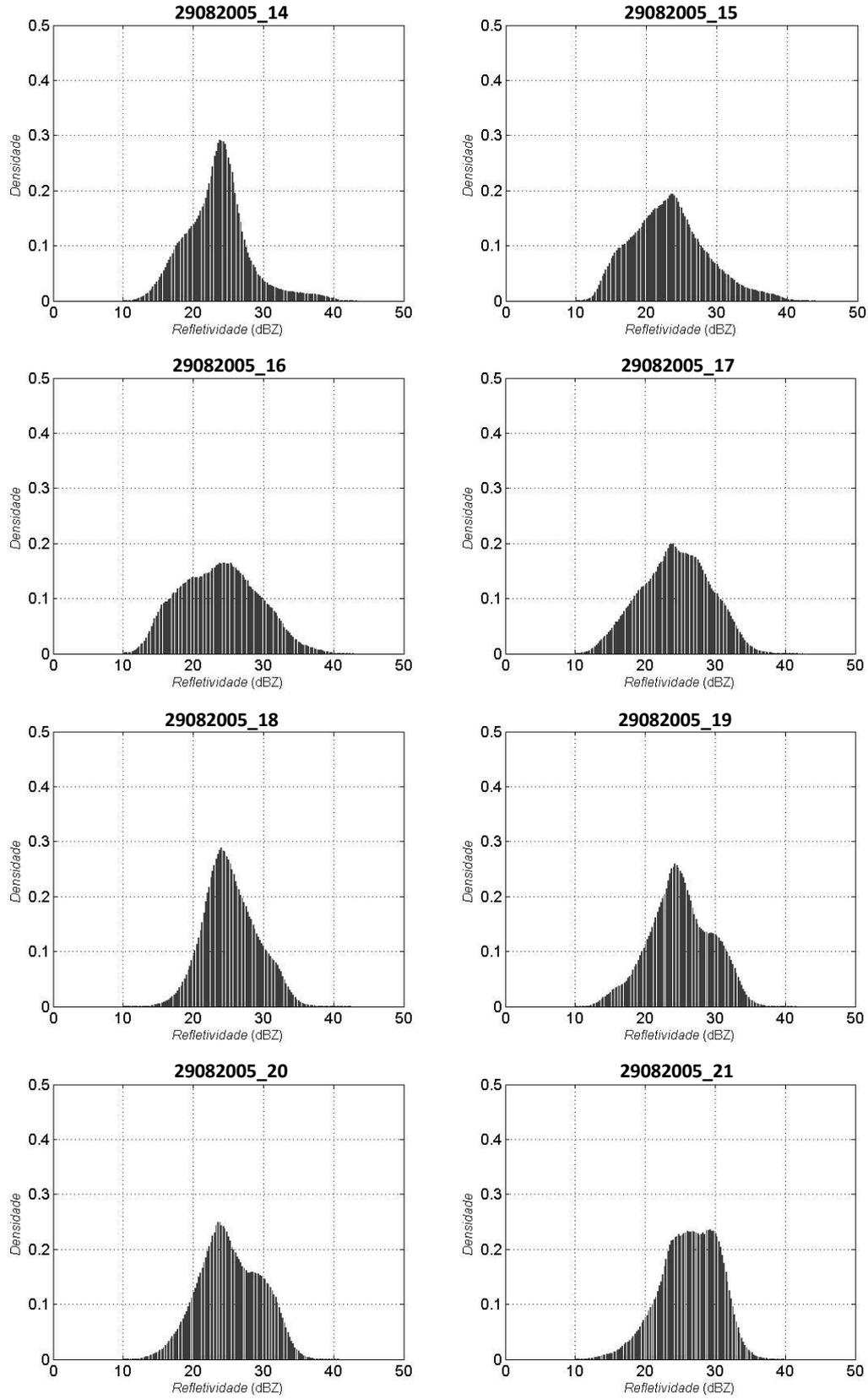


Figura 19 – Continuação

(Continua)

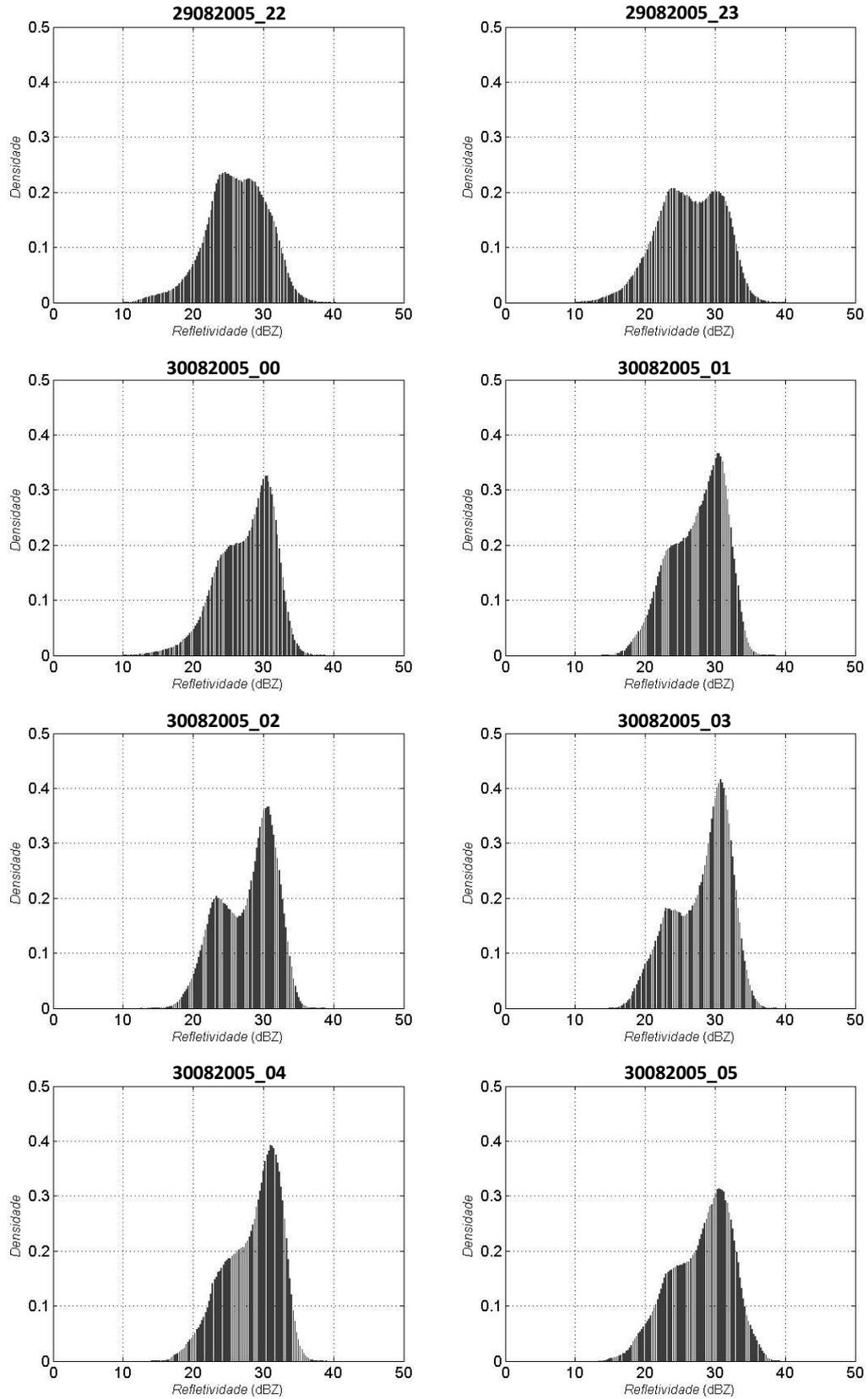
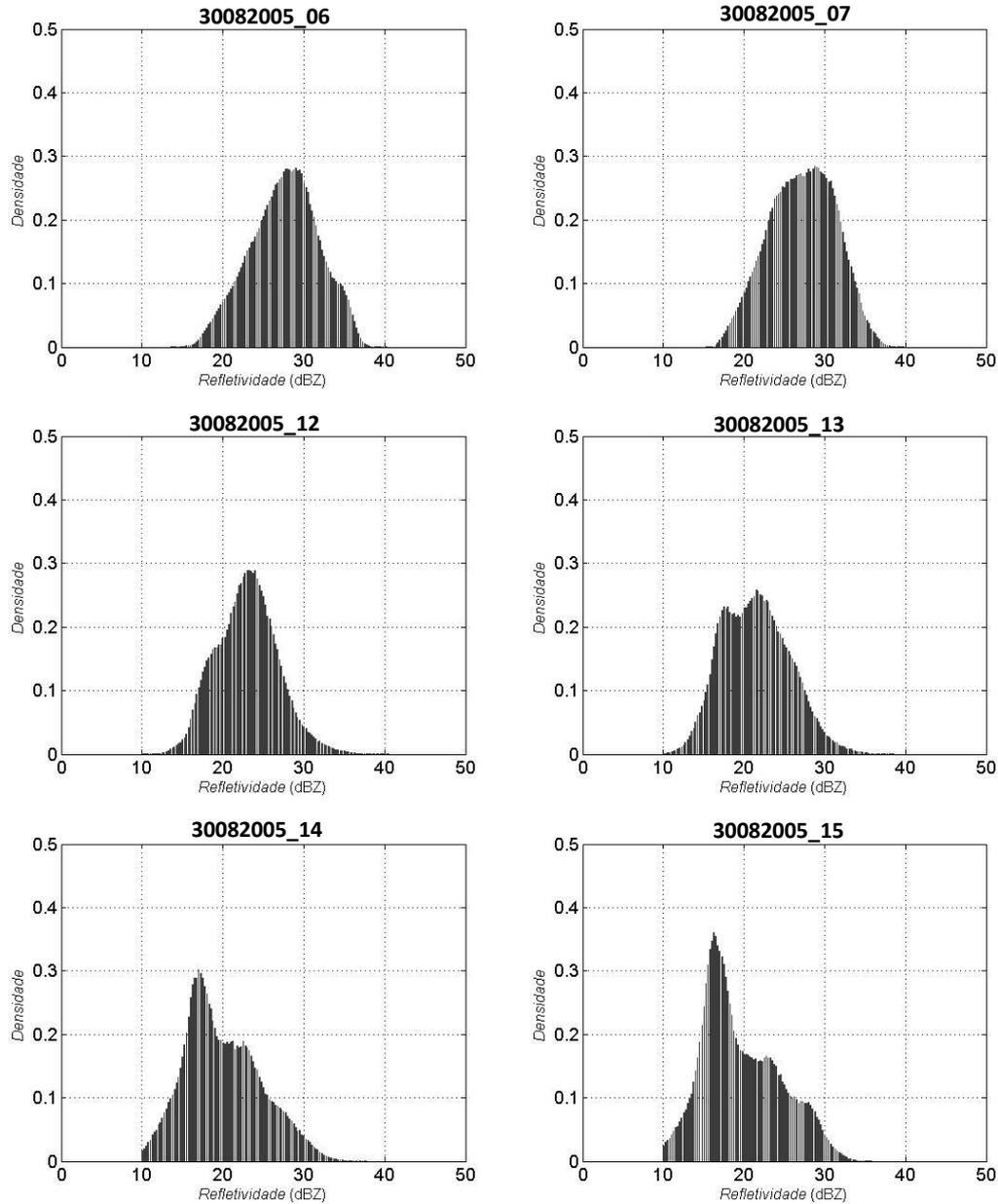


Figura 19 – Continuação

(Continua)



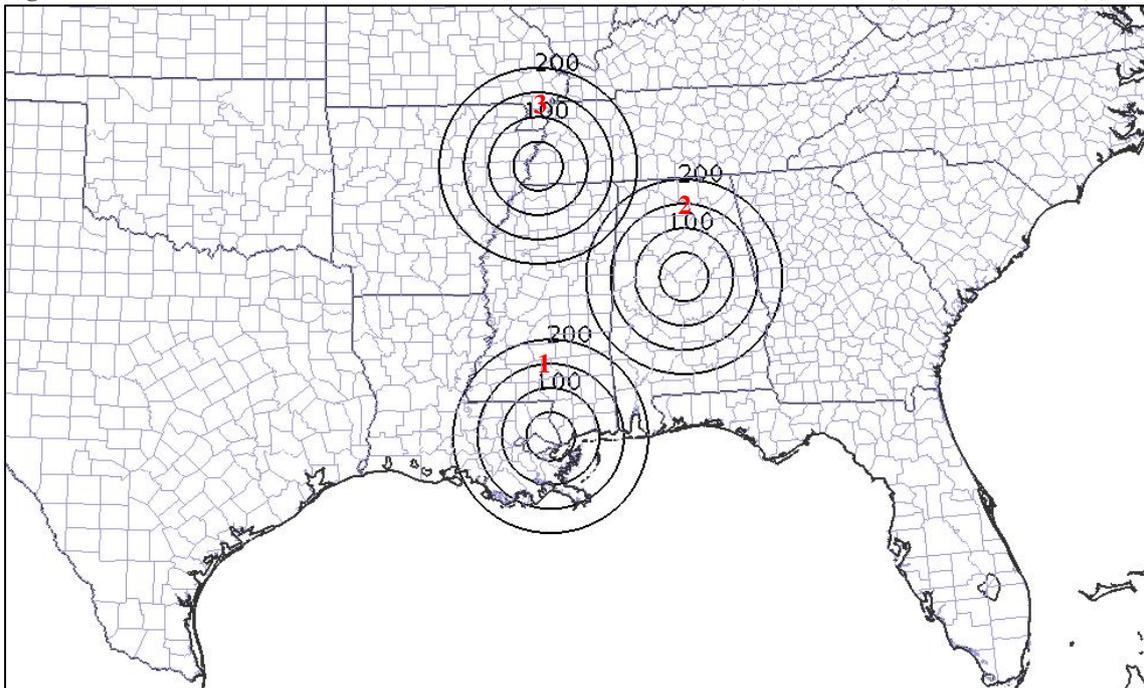
**Figura 19** – Continuação

Apesar de existir a falta de dados entre 07 e 12 UTC, claramente se percebe a mudança na PDF, com a moda se deslocando para esquerda, com valores mais estratiformes. Os picos são perceptíveis tendo valores em torno de 22-23 dBZ e 17-18 dBZ, para os casos 12-13 UTC e 14-15 UTC respectivamente.

## 4.2 ANÁLISE FÍSICA DA DISTRIBUIÇÃO DA REFLETIVIDADE

Após o estudo da componente estatística da PDF é necessário analisar o campo de refletividade através do uso do IDV que permite a visualização do sistema. Essa análise se torna importante, pois explica o comportamento da PDF para os radares escolhidos podendo assim elucidar os resultados encontrados anteriormente. São os processos microfísicos que regem a formação e crescimento dos hidrometeoros; desta forma, estudando o sistema poderemos explicar os limites da PDF, as modas obtidas e a evolução da mesma. A Figura 20 apresenta o mosaico com os radares utilizados e o alcance definido para o estudo. A distância entre cada anel do radar é de 50 km e é possível também ver as divisões de estado e municípios americanos.

**Figura 20** – Mosaico de radares utilizados no estudo: (1) KLIX, (2) KBMX e (3) KNQA.



### 4.2.1 Radar KLIX – Nova Orleans

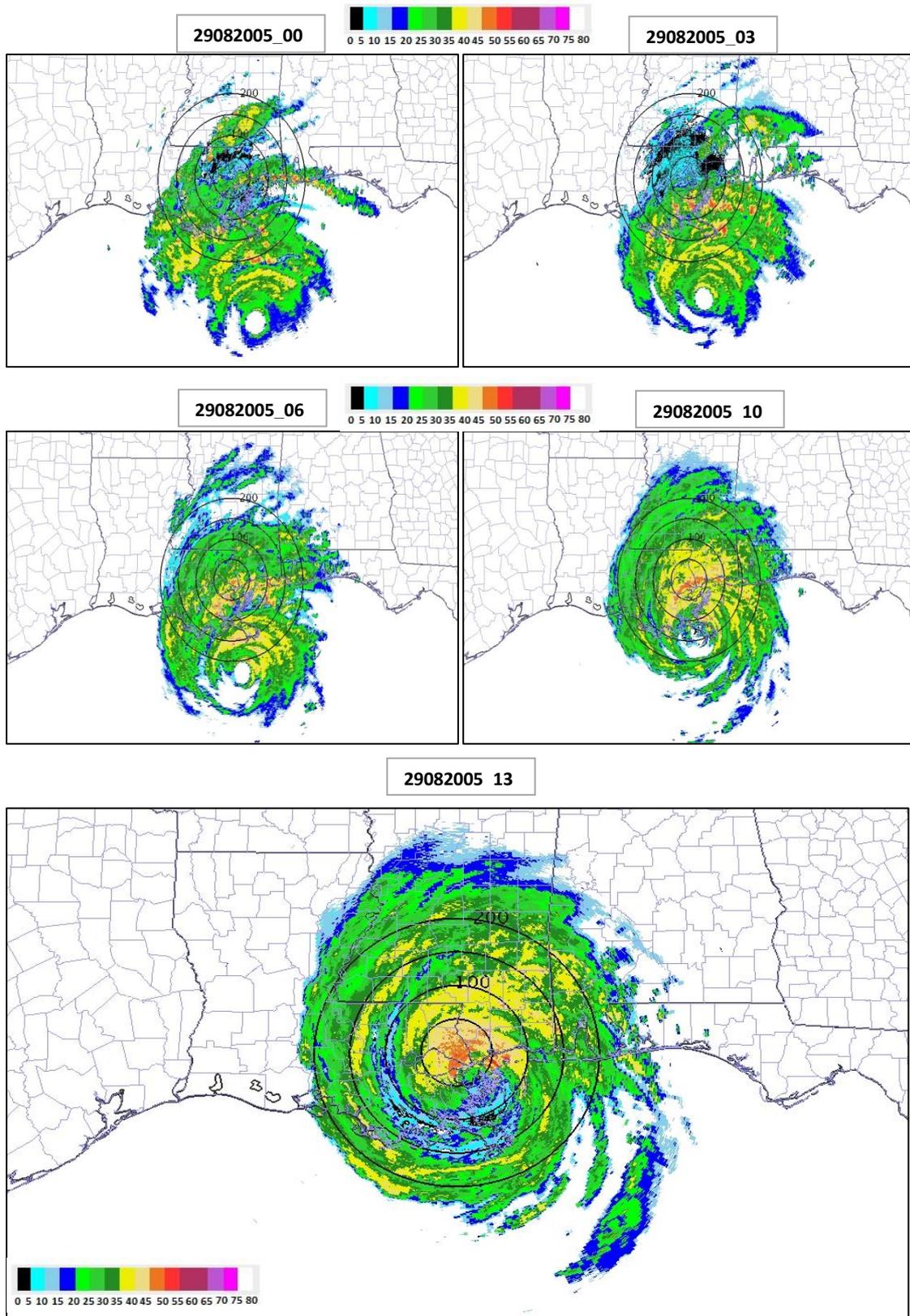
Para o radar KLIX, é visível no primeiro momento que o olho do furacão está sobre o oceano e pouco a pouco adentra o continente, enquanto que a *banda de precipitação distante* está localizada sobre a região costeira de Louisiana. Alguns autores afirmam que na banda

distante elementos convectivos presentes tendem a ter o eco-radar em forma de arco (e.g., Battan, 1973; Fugita, 1978; Davis et al., 2004), característico de uma forte corrente descendente que se estende abaixo de uma célula de convecção. Esta característica está bem representada na Figura 21, para as 00 UTC, onde claramente se observa os ecos em forma de arco com extensão horizontal na faixa de centenas de quilômetros, atingindo inclusive a região do noroeste da Flórida e sul do Alabama. Destaca-se também que essa banda contém nuvens cumulonimbus que são essencialmente similares às células convectivas associadas a outros sistemas precipitantes (e.g., regiões pré-frontais). Houze (2010) afirma que a identificação desses sistemas nos furacões teve seu desenvolvimento através do uso de radares situados em regiões costeiras, quando ciclones tropicais estão reagindo à superfície continental e ao fato de terem pouca umidade disponível. Observa-se também várias células com tons de amarelo, laranja e vermelho, correspondentes a refletividade superior a 45 dBZ concentrados essencialmente sobre o sudeste e regiões do delta do estado de Louisiana, regiões mais afetadas pelas inundações causadas pela forte precipitação associadas à essas células convectivas (Figura 21, caso 03 UTC).

A partir das 06 UTC, as células convectivas intensas, anteriormente perceptíveis nas imagens, diminuem sua intensidade com a entrada do furacão no continente. Entre o horário citado e 13 UTC, o sistema penetra no continente e ocorre uma mudança no olho do furacão (vide Figura 21, caso 06, 10 e 13 UTC). O processo de formação de uma parede de olho externa e seu deslocamento para parte central, onde os ventos mais fortes ocorrem, enfraquece o furacão devido ao emparelhamento da parede interna (Landsea e Goldenberg, 2014).

O último horário observado pelo radar KLIX é 13 UTC, onde grande parte do furacão se encontra nos limites do range do radar, definido em 200 km. A possível causa do *blackout* pode ser deduzida na imagem, pois se observa que a parte central do furacão, com maior intensidade, está localizada sobre o radar. De acordo com Knabb et al., (2005), a área mais afetada pelos ventos intensos, chuva forte e inundações foi a de Nova Orleans, região em torno do radar.

Figura 21 – Refletividade observada para o radar KLIX para dia 29 Agosto.



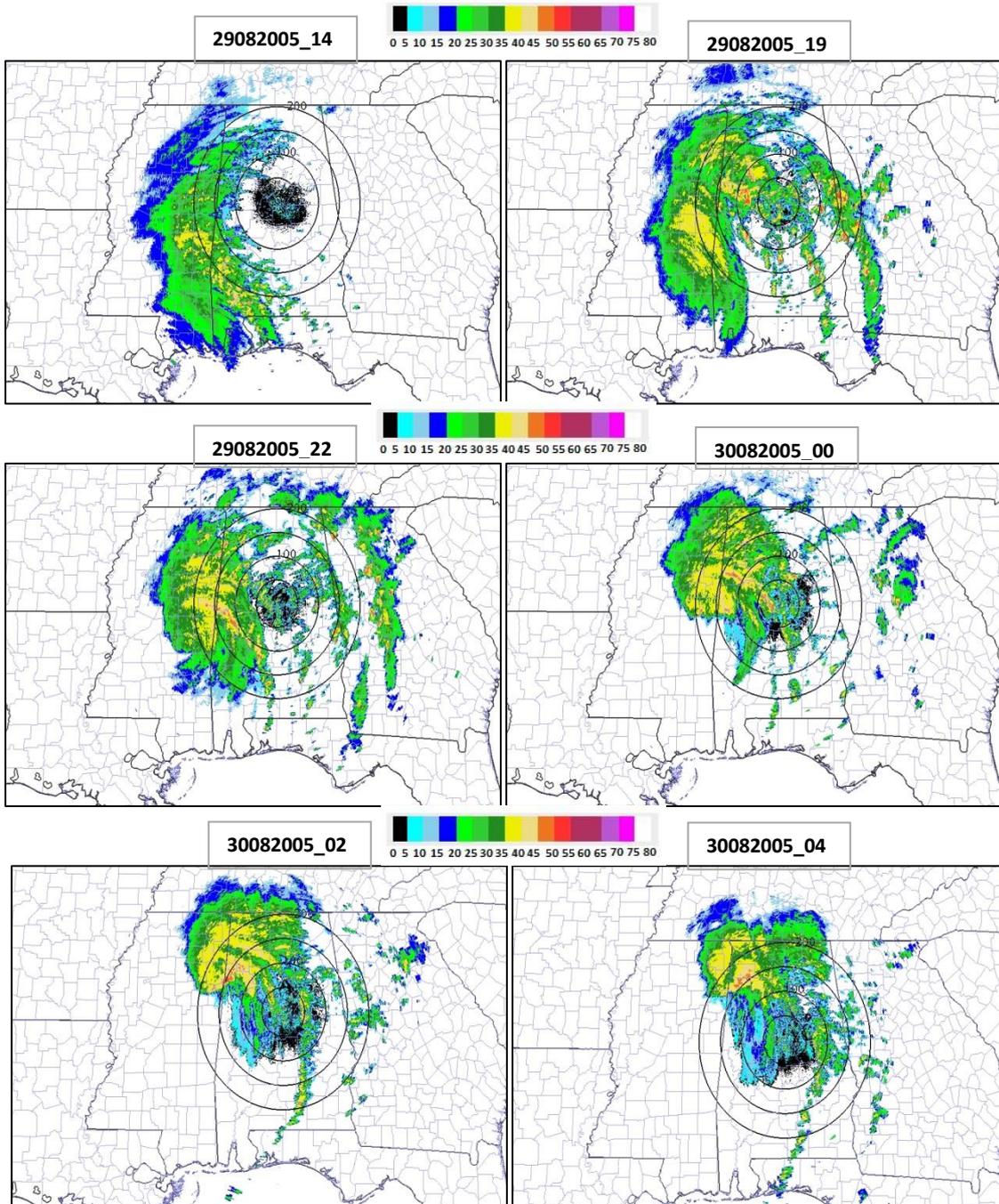
#### 4.2.2 Radar KBMX – Birmingham

Assim como o radar KLIX, a análise de KBMX compreende diferentes momentos da entrada do furacão no continente. No primeiro momento, as bandas de precipitação, anteriormente definidas e discutidas, são visíveis e, à medida que o sistema se aproxima do radar, as bandas de precipitação *secundária* e *principal* são observadas (Figura 22, todos os casos). Devido ao alcance do radar, não é possível observar claramente o olho do furacão. Nos dois primeiros horários (11 e 14 UTC) as partes mais estratiformes podem ser observadas, o que reforça o comportamento bimodal da PDF e as modas com valores de 15 e 23-24 dBZ. É importante salientar que esse comportamento é visto até o horário anterior a 19 UTC, momento em que as bandas distantes são observadas (Figura 22, casos 19 e 22 UTC).

A banda principal pode ser definida como a parte quase-estacionária que gira (espirais) em direção ao centro da parte externa do ciclone até que se torne tangente à parede do olho. Na parte traseira, a banda é constituída em geral por estruturas mais estratiformes compostas de células convectivas em dissipação (esquema ilustrativo de um ciclone tropical típico para o Hemisfério Norte). Na Figura 22, às 22 UTC, podemos observar essa banda de precipitação na parte sudoeste-oeste do radar com tons amarelos e laranja, identificando a intensidade da refletividade. Em seguida, às 00 e 02 UTC do dia 30, o deslocamento e extensão dessa banda pode ser vista sobre o radar. Vale lembrar que a partir das 00 UTC, o sistema deixa de ser um furacão e passa a ser classificado de *Tempestade Tropical Katrina*.

A banda de precipitação secundária, localizada na região interna do núcleo da tempestade tende a ser menor e mais transiente do que a banda principal. Alguns estudos têm demonstrado o funcionamento interno nessa banda de precipitação (e.g., Barnes et al., 1983; Didlake and Houze, 2009). Pode ser vista também na Figura 22 nos casos supracitados, na parte traseira da banda principal.

**Figura 22** – Refletividade observada para o radar KBMX para dia 29 e 30 de Agosto.



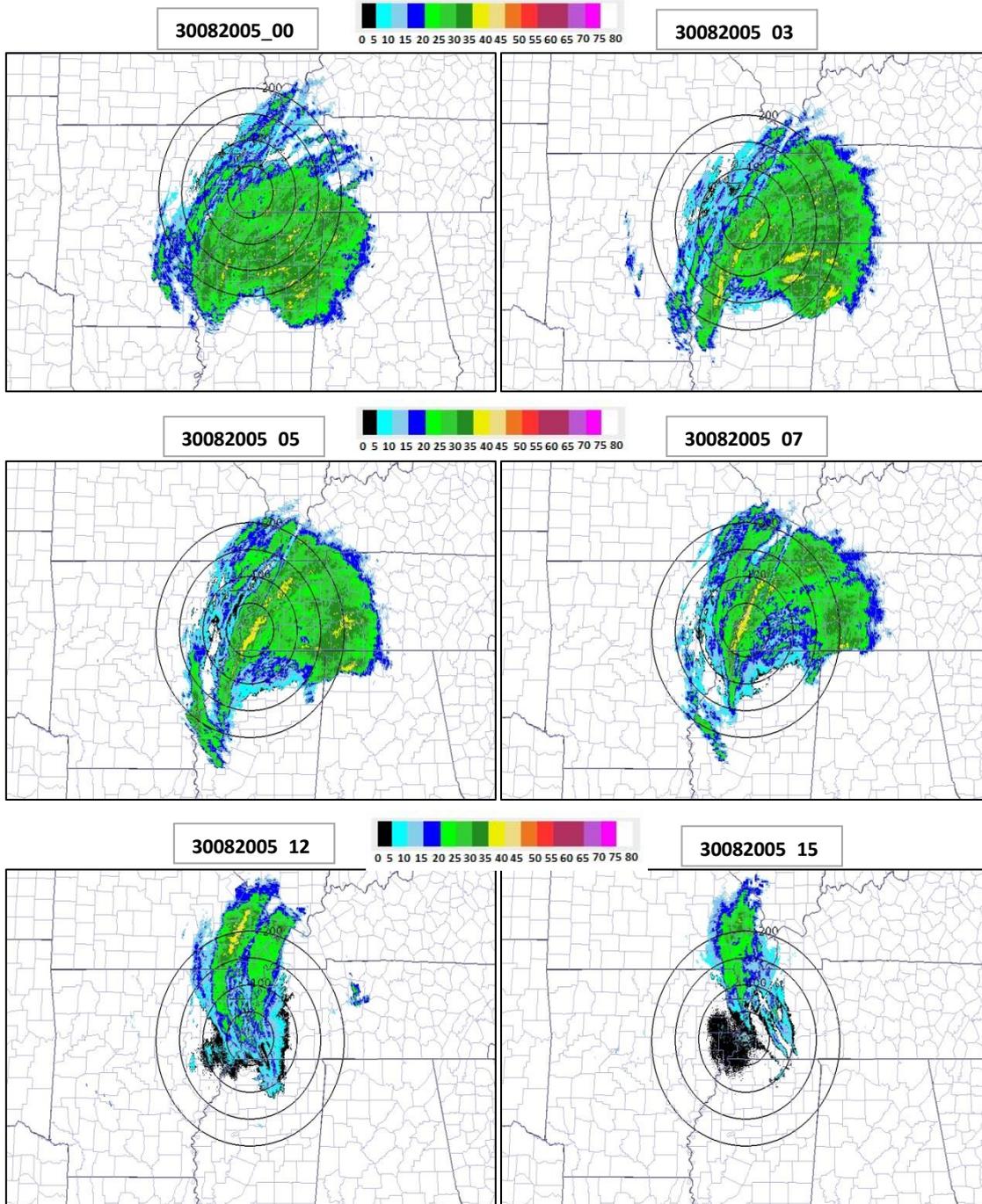
### 4.2.3 Radar KNQA – Memphis

O terceiro radar utilizado para o estudo registra os ‘momentos finais’, isto é, a desintensificação do sistema antes de se tornar um distúrbio extratropical em direção aos estados de Kentucky e Ohio. O período que o sistema é observado pelo radar KNQA, a intensidade é diferente das análises feitas para os radares KLIX e KBMX. Para Memphis, as imagens correspondem ao período de 00 a 15 UTC do dia 30.

Apesar do enfraquecimento causado pela entrada no continente, o sistema permanece com grande extensão, podendo ser claramente observado no range do radar (Figura 23, de 00 a 05 UTC). Nesses horários, a PDF obtida teve um comportamento mais unimodal com o pico próximo a 31 dBZ. Nas imagens anteriormente citadas, existe a predominância de tons verdes claros e escuros, que correspondem à refletividade na faixa de 20-34 dBZ, associados tanto a regiões estratiformes como a convectivos. Outra característica importante do sistema é a sua rotação, visível em todas as imagens da Figura 23, exceto para 15 UTC. É importante realçar que apesar do processo de desintensificação do sistema como um todo, partes intensas ainda podem ser observadas, como são os casos dos horários 03, 05 e 07 UTC, onde são nitidamente visíveis linhas horizontalmente extensas amareladas, correspondentes a partes onde os movimentos ascendentes e a convecção, apesar de fracos, continuam ocorrendo.

Devido à falta de dados, não é possível observar a transição do sistema de tempestade tropical para depressão tropical (ocorrido entre 11 e 12 UTC). Para os horários 12 e 15 UTC, é visível a mudança do sistema, tendo uma posição mais latitudinal e com extensão reduzida.

**Figura 23** – Refletividade observada para o radar KNQA para dia 30 de Agosto.



As imagens apresentadas nos resultados acima podem ser vistas na íntegra no Apêndice 1 em anexo. O apêndice trás, além dessas imagens, toda a sequência horária de PPI observados para os três radares. Acima apenas horários específicos foram escolhidos para ilustração do comportamento da PDF.

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O principal objetivo desse estudo foi analisar o comportamento da função densidade de probabilidade (PDF) do fator de refletividade radar durante a passagem do furacão *Katrina* do Golfo do México para o continente americano, onde teve impacto em diferentes estados devido à sua grande extensão e poder destrutivo. Por ser uma função estatística que habilita o estudo de variáveis aleatórias contínuas, caso da refletividade radar, os resultados do comportamento da PDF possibilitam estabelecer os possíveis limites da refletividade para um sistema precipitante, avaliar as modas com valores máximos e/ou mínimos de refletividade, estimar a probabilidade de ocorrência de diferentes tipos de hidrometeoros e precipitação associada aos mesmos.

O alcance dos objetivos propostos deve-se ao estabelecimento de alguns critérios, ou métodos, que nos capítulos anteriores contribuíram para que os resultados fossem satisfatórios; destacam-se entre eles:

- Seleção de conjunto de radares, pertencentes ao sistema de radares classificado como um dos mais avançados e modernos do mundo – NEXRAD, que possibilitasse o acompanhamento do sistema durante os diferentes momentos de seu ciclo de vida. A falta de dados existente foi compensada com a opção por radares relativamente perto que pudessem ‘escoltar’ o furacão.
- Escolha dos softwares, IDV e Matlab<sup>®</sup>, que permitissem respectivamente a visualização e o cálculo da PDF. O IDV possui inúmeras vantagens (criação de sequência de imagens, análise direta dos sistemas precipitantes) e é um dos softwares recomendados; enquanto que o Matlab é um dos mais conceituados softwares usados na área de Geociências, permitindo a representação e o cálculo de funções estatísticas aplicadas a banco de dados.
- Estabelecimento de critérios pontuais para análise do *Katrina*. Um desses critérios foi o alcance máximo de 200 km, dado ao fato de ser um sistema grande e devido à altura do feixe emitido em relação à curvatura da Terra; o cálculo da refletividade média horária devido ao deslocamento lento do furacão em comparação a sistemas mais transientes (e.g., tornados).

Todos os resultados obtidos nessa pesquisa conduzem a várias conclusões que podem ser consideradas satisfatórias tendo em referência os critérios adotados supracitados. Em síntese, as principais conclusões são:

1. Para os radares estudados o comportamento da PDF do fator de refletividade radar,  $P(Z)$  tende a ser multimodal – sendo a maioria dos casos unimodal e bimodal. Esse comportamento deve-se principalmente à coexistência de diferentes bandas de precipitação, que com suas características convectivas e estratiformes, dão a assinatura própria do sistema.
2. A coexistência de bandas de precipitação estratiformes e convectivas é perceptível através da distribuição das modas inferiores e superiores ao limiar de 30 dBZ, respectivamente, e que mostram a presença de diferentes tipos de precipitação dentro do furacão. O entendimento da formação e conteúdo das precipitações permite-nos estimar os hidrometeoros existentes e a refletividade associada. Também foi observado que as bandas estratiformes e convectivas coexistem nas diferentes partes do furacão.
3. Os maiores valores da moda foram registradas para o radar KLIX – Nova Orleans com valores entre 32-35 dBZ, enquanto que para KBMX – Birmingham e KNQA – Memphis os valores situam-se na faixa de 31-33 dBZ. Isso evidencia claramente o enfraquecimento do furacão após entrada no continente. Alguns autores afirmam que a falta de umidade para convecção profunda é um dos principais fatores para essa desintensificação. Os limites da refletividade variam, apesar de permanecerem entre 10-50 dBZ.
4. Em todos os radares analisados persiste um comportamento similar, i.e., nas primeiras horas de observação a PDF tende à bimodalidade com valores aproximados de 15 e 23-25 dBZ, e posteriormente a tendência é unimodal. Este fato deve-se à aproximação das bandas mais convectivas – principal, secundária –, e elementos convectivos distantes.

5. A aplicação da função densidade de probabilidade para refletividade se mostra como excelente ferramenta estatística para caracterizar os sistemas precipitantes observados por radar. O uso da PDF para sistemas mais localizados como tempestades (e.g., tempestades de gelo, granizo, sistemas convectivos) pode ajudar na descrição desses sistemas, pois a PDF é condicionada à distância que sistema se encontra do radar. No caso do furacão, por ser um sistema de grande extensão, longitudinal e latitudinal é necessário haver um conjunto de radares que possa acompanhar o deslocamento para sua posterior caracterização.

Visando futuras pesquisas para aprimoramento dos resultados alcançados, recomenda-se:

- Aplicação da função densidade de probabilidade para sistemas precipitantes atuantes no Brasil, com foco na sua descrição detalhada, estudando a formação, desenvolvimento e deslocamento, assim como a dissipação dessas estruturas. Com a implementação do sistema integrado de radares *Banda S* (CEMADEN), a aquisição, tratamento e análise dos dados poderá ser feita.
- Testar o método para diferentes níveis (PPIs) tendo em vista a comparação dos resultados obtidos. Esta recomendação poderá contribuir também para comparação e estudo do perfil vertical de sistemas precipitantes.

## REFERÊNCIAS

- ANAGNOSTOU, E. N. A convective/stratiform precipitation classification algorithm for volume scanning weather radar observations. **Meteorological Applications**. Cambridge University Press, 11 (4), 291–300, 2004.
- ATLAS, D. Radar in Meteorology. **Amer. Meteor. Soc.** 806 pp, 1990.
- BARNES, G. M.; ZIPSER, E. J.; JORGENSEN, D.; MARKS JR., F. D. Mesoscale and convective structure of a hurricane rainband. **J. Atmos. Sci.**, 40, 2125–2137, 1983.
- BATTAN, L. J. **Radar observation of the atmosphere**. University of Chicago Press: Chicago, 1973.
- BATTAN, L. J. **Weather**. Prentice-Hall: New Jersey, 1974.
- BEVEN, John L. Atlantic Hurricane Season of 2005. **Mon. Wea. V.** 136, 1109-1173, 2008.
- BLAKE, E. S. LANDSEA, C. W. GIBNEY, E. J. The Deadliest, Costliest, and Most Intense United States Tropical Cyclones from 1851 to 2010 (And Other Frequently Requested Hurricane Facts). National Hurricane Center, United States National Oceanic and Atmospheric Administration's National Weather Service. 2011. Acesso em 15 de junho de 2015. Disponível online em: <http://www.nhc.noaa.gov/pdf/nws-nhc-6.pdf>. 2011.
- BRANDES, Edward A.; GUIFU ZHANG, J. Vivekanandan. Experiments in Rainfall Estimation with a Polarimetric Radar in a Subtropical Environment. **J. Appl. Meteor.** V. 41, 674-685, 2002.
- BYERS, Horace R.; ROSCOE, R. Braham. Thunderstorm structure and circulation. **J. Meteor.** V. 5, 71-86, 1948.
- DAVIS, C.; BOSART, L. F. Numerical simulations of the genesis of Hurricane Diana (1984). Part I: Control simulation. **Monthly Weather Review**. V. 129, 1859–1881, 2001.
- DIDLAKE, A. C.; HOUZE JR., R. A. Convective-scale downdrafts in the principal rainband of Hurricane Katrina (2005). **Monthly Weather Review**. V. 137, 3269–3293, 2009.
- DIOP, C. A.; SAUVAGEOT, H.; MESNARD, F. Partitioning the distribution function of radar reflectivity in convective storms using maximum likelihood method. **Atmospheric Research**. V. 124, 123-136, 2010.

FRAILE, R.; FERNANDEZ-RAGA, M. On a more consistent definition of radar reflectivity. **ATMÓSFERA**. V. 22:4, 375-385, 2009.

FUJITA, T. T. Manual of downburst identification for project NIMROD. **Satellite and Mesometeorology Research Paper**. Dept. of Geophysical Sciences, University of Chicago. 156,104 pp, 1978.

FULTON, R. A.; BREIDENBACH, J. P. Seo; MILLER, D. A.; O'BANNON, T. The WSR-88D Rainfall Algorithm. **Wea. Forecasting**, V. 13, 377-395, 1998.

GRAY, W. M. A global view of the origin of tropical disturbances and storms. **Mon. Wea. Rev.** V. 96, 669-700, 1968.

\_\_\_\_\_. Hurricanes: Their formation, structure and likely role in the tropical circulation. *Meteorology Over Tropical Oceans*. In: D. B. Shaw (Ed.), **Roy. Meteor. Soc.** James Glaiser House, Grenville Place, Bracknell, Berkshire, RG12 1BX, pp.155-218, 1979.

GRAY, W. M. **Recent advances in tropical cyclone research from rawinsonde composite analysis**. World Meteorological Organization, 407 pp, 1981.

GLOSSARY OF METEOROLOGY. American Meteorological Society, 2014. Disponível em: <[http://glossary.ametsoc.org/wiki/Main\\_Page](http://glossary.ametsoc.org/wiki/Main_Page)>. Acesso em 15 de junho de 2014.

HOLLAND, G. J., 1993: **The Global Guide to Tropical Cyclone Forecasting**. Geneva: WMO/TD-560, World Meteorological Organization, 337pp, 1993.

HOUZE, R. A. Cloud Dynamics. **Academic Press**, 573 pp, 1993.

HOUZE, R. A. Stratiform precipitation in regions of convection: A meteorological paradox. **Bull. Amer. Meteor. Soc.** 78, 2179-2196, 1997.

HOUZE, Robert A. Clouds in Tropical Cyclones. **Mon. Wea. Rev.** 138, 293-344, 2010.

KANTHA, L. Tropical Cyclone Destructive Potential by Integrated Kinetic Energy. **Bulletin of the American Meteorological Society**. 89 (2): 219-22, 2008.

KNABB, R. D.; RHOME, J. R.; BROWN, D. P. 2005: Hurricane Katrina: August 23-30, 2005 (Tropical Cyclone Report). National Hurricane Center, United States National Oceanic and Atmospheric Administration's National Weather Service. Disponível em: <[http://www.nhc.noaa.gov/pdf/TCR-AL122005\\_Katrina.pdf](http://www.nhc.noaa.gov/pdf/TCR-AL122005_Katrina.pdf)> Acesso em 15 de junho de 2014.

KÖPPEN, W. Das geographischa System der Klimate. Handbuch der Klimatologie, W. Köppen and G. Geiger, Eds., Vol. 1, C. Gebr. Borntraeger, 1-44, 1936.

KNABB, R. D.; RHOME, J. R.; BROWN, D. P. **Tropical Cyclone Report**. National Hurricane Center, FL, 2005.

LANDER, Mark A., 1999: A Tropical Cyclone with a Very Large Eye. **Monthly Weather Review**. 127 (1): 137, 1999.

LANDSEA, C.; GOLDENBERG, S. Tropical Cyclone winds and energy. Frequently Asked Questions (FAQ). Disponível em: <http://www.aoml.noaa.gov/hrd/tcfaq/tcfaqD.html> Acesso em: 10 de setembro de 2014.

LOUF, V. **Simulations d'observations à plusieurs fréquences de systèmes précipitants par radar aéroporté**. Stage de Master 2 Recherche. Laboratoire d'Optique Atmosphérique, Lille, France, 37p, 2010.

MARKS, F. D.; HOUZE JR, R. A. Inner-core structure of Hurricane Alicia from airborne Doppler-radar observations. **J. Atmos. Sci.** 44, 1296-1317, 1987.

MARSHALL, J. S.; PALMER, W. M. The distribution of raindrops with size. **Journal of Atmos. Sci.** Vol. 5, 165-166, 1948.

MATYAS, Corene J., 2009: A Spatial Analysis of Radar Reflectivity Regions within Hurricane Charley (2004). **J. Appl. Meteor. Climatol.**, 48, 130-142.

MORETTIN, L. G. **Estatística Básica**. Volume I – Probabilidade. 7ª Edição. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 1999.

OFC. **Doppler radar meteorological observations**, Part C, WSR- 88D products and algorithms. Federal Meteorological Handbook 11, FCM-H11C-1991. Office of the Federal Coordinator for Meteorological Services and Supporting Research, Silver Spring, MD, 210 pp, 1991.

\_\_\_\_\_, 1992: Doppler radar meteorological observations, Part D, WSR-88D unit description and operational applications. Federal Meteorological Handbook 11, FCM-H11D-1992, Office of the Federal Coordinator for Meteorological Services and Supporting Research, Silver Spring, MD, 208 pp.

PASCH, Richard J.; BLAKE, Eric S. COBB III, Hugh D. ROBERTS, David P. "Tropical Cyclone Report: Hurricane Wilma: 15–25 October 2005". **National Hurricane Center**. September 28, 2006

PUJOL O.; GEORGIS, J. F.; SAUVAGEOT, H. Influence of drizzle on Z–M relations in warm clouds. **Atmos. Res.** V. 86, 297-314, 2007.

PAPOULIS, A.; PILLAI, S. U. **Probability, Random Variables and Stochastic Processes**. 4th edition, McGraw Hill, 2002.

PROBERT-JONES, J. R. The radar equation in meteorology. **Quart. J. Roy. Meteor. Soc.** V. 88, 485-495, 1962.

RAYLEIGH, Lord, 1871. On the light from the sky, its polarization and colour. **Phil. Mag.** V. 41, 107-120, 1871.

RINEHART, R. E., 1997. **Radar for meteorologists**. Third edition. Rinehart Publications, Grand Forks, ND, 1997.

SAFFIR, H. S. Hurricane Wind and Storm Surge. **The Military Engineer**, 423, pp 4-5, 1973.

SAUVAGEOT, H., 1992. **Radar Meteorology**. Boston: Artech House, 1992. 384 pp.

TENÓRIO, R. S.; MORAES, M. C. S.; SAUVAGEOT, H. Raindrop Size Distribution and Radar Parameters in Coastal Tropical Rain Systems of Northeastern Brazil. **J. Appl. Meteor. Climatol.** 51, 1960–1970, 2012.

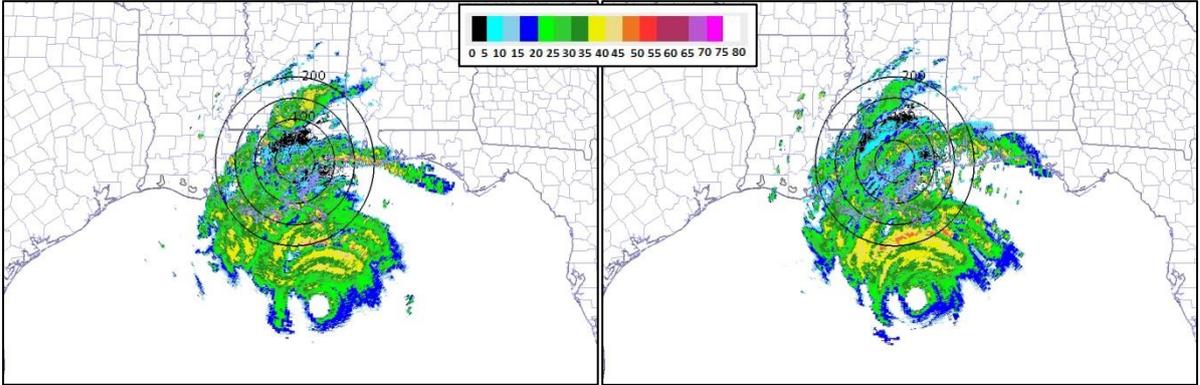
WILKS, D. S. **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences**. Second Edition. International Geophysics Series, Academic Press, 669 pp, 2006.

# APÊNDICE A

## KLIX – NEW ORLEANS

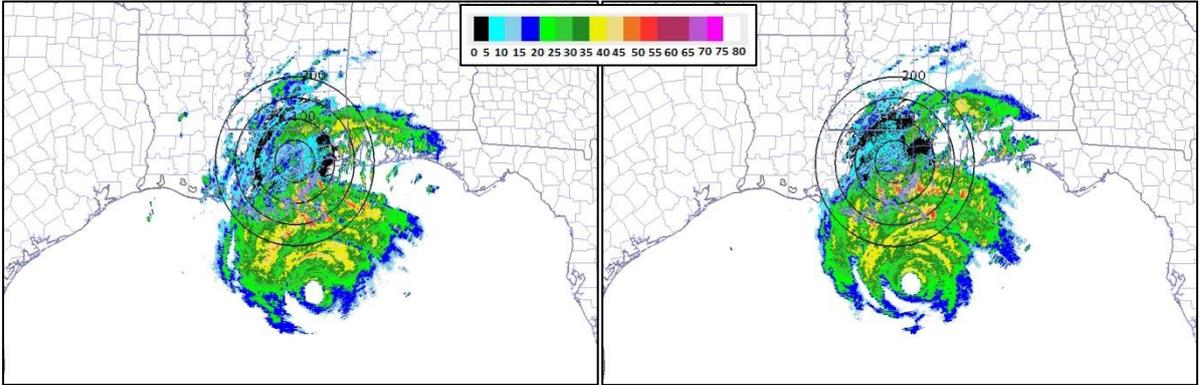
29082005\_00

29082005\_01



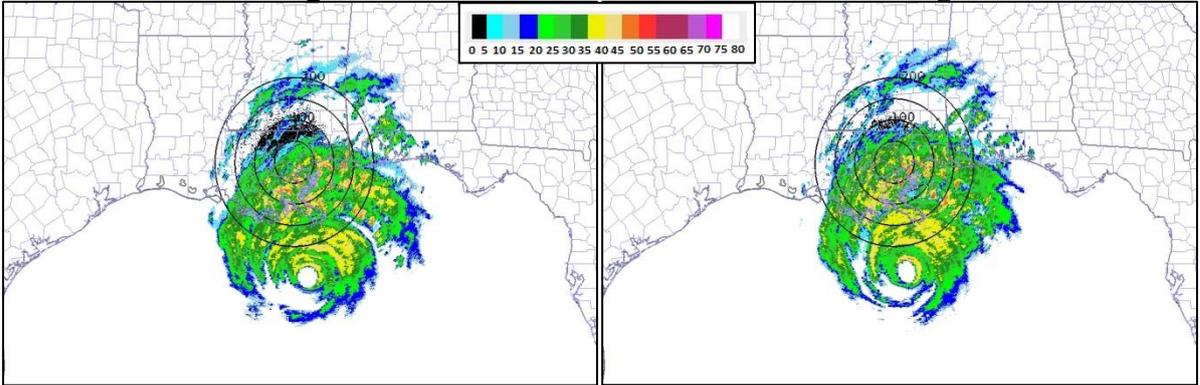
29082005\_02

29082005\_03



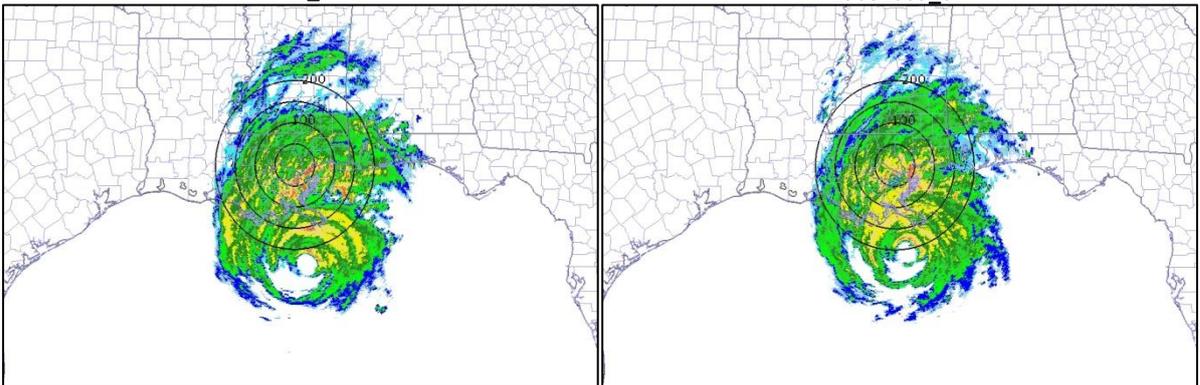
29082005\_04

29082005\_05



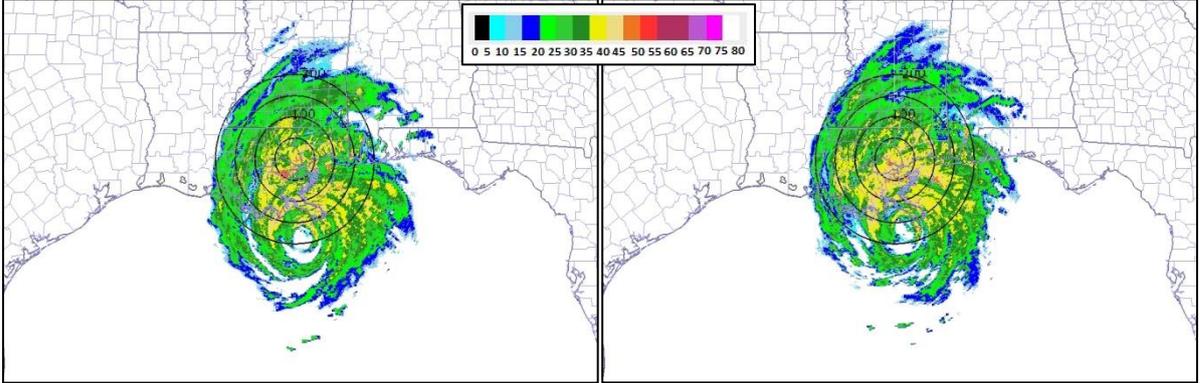
29082005\_06

29082005\_07



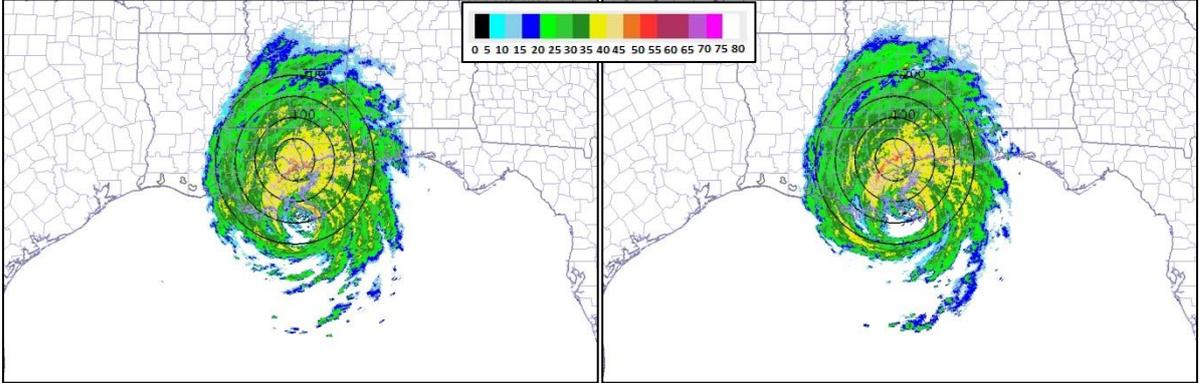
29082005\_08

29082005\_09



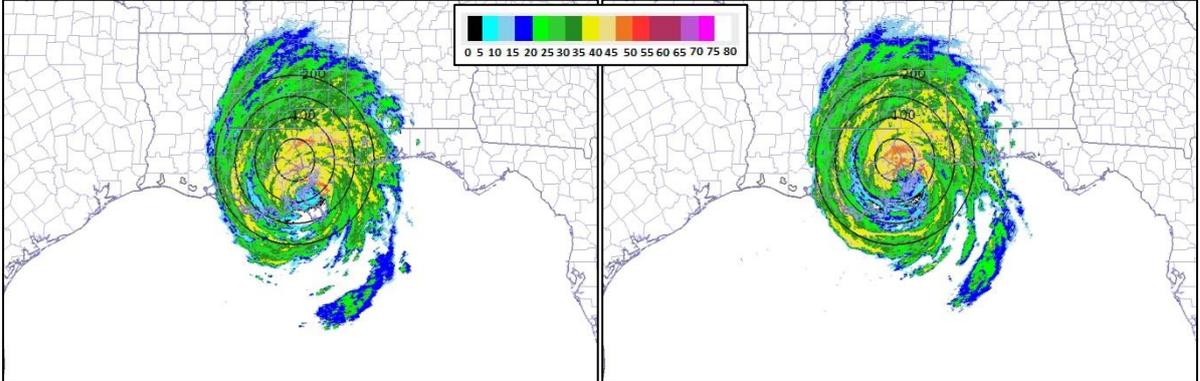
29082005\_10

29082005\_11



29082005\_12

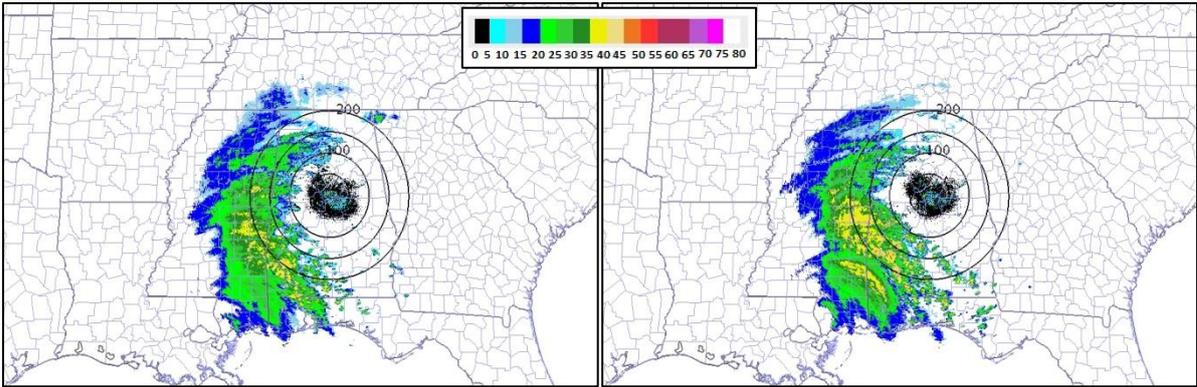
29082005\_13



### KBMX – BIRMINGHAM

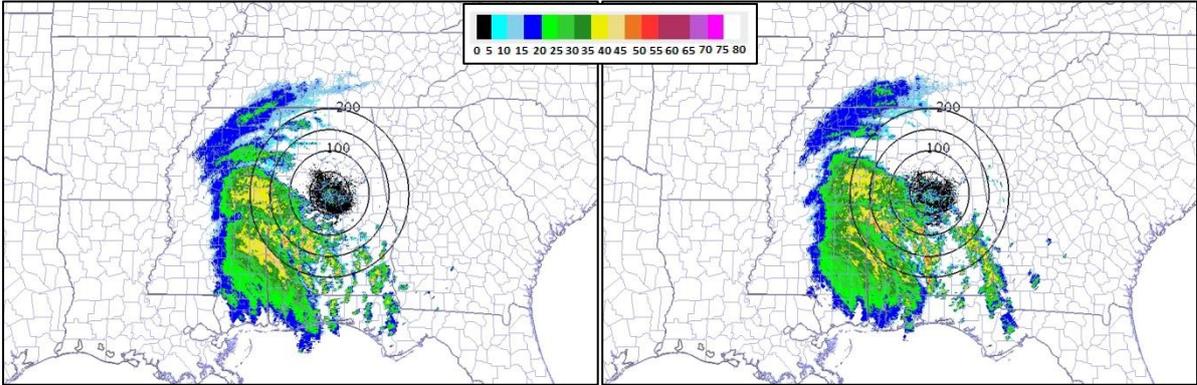
29082005\_14

29082005\_15



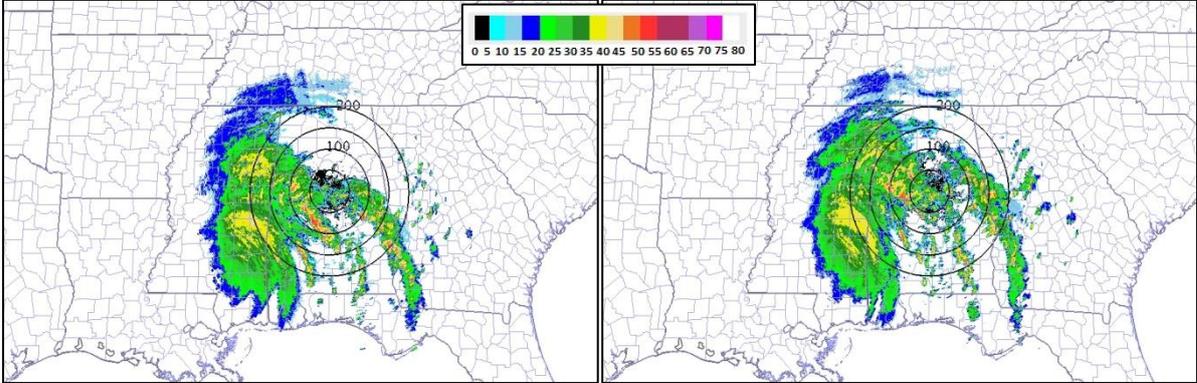
29082005\_16

29082005\_17



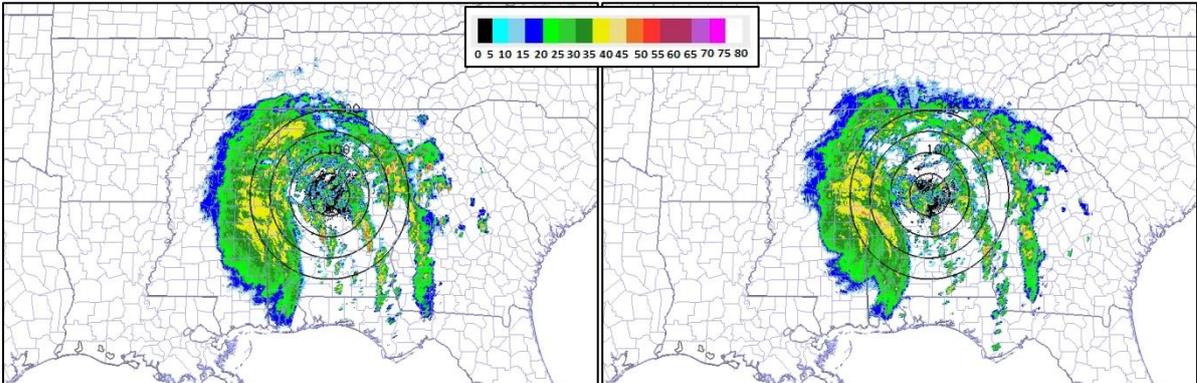
29082005\_18

29082005\_19



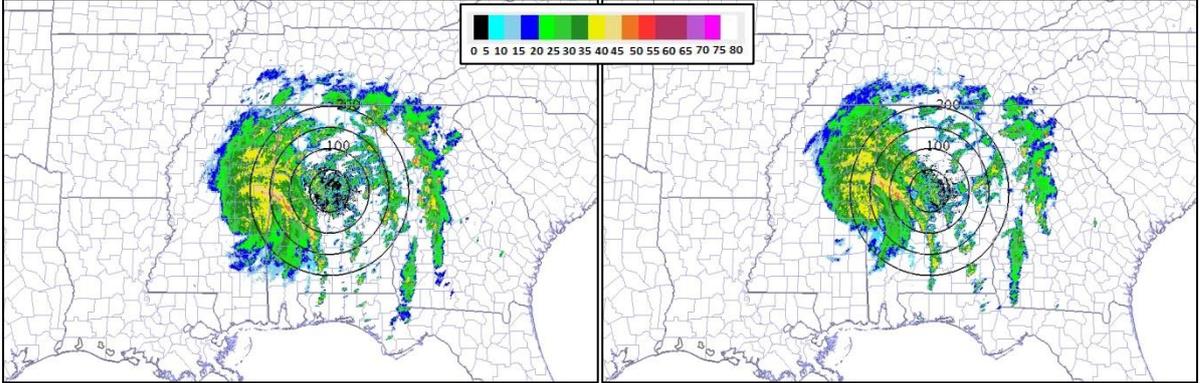
29082005\_20

29082005\_21



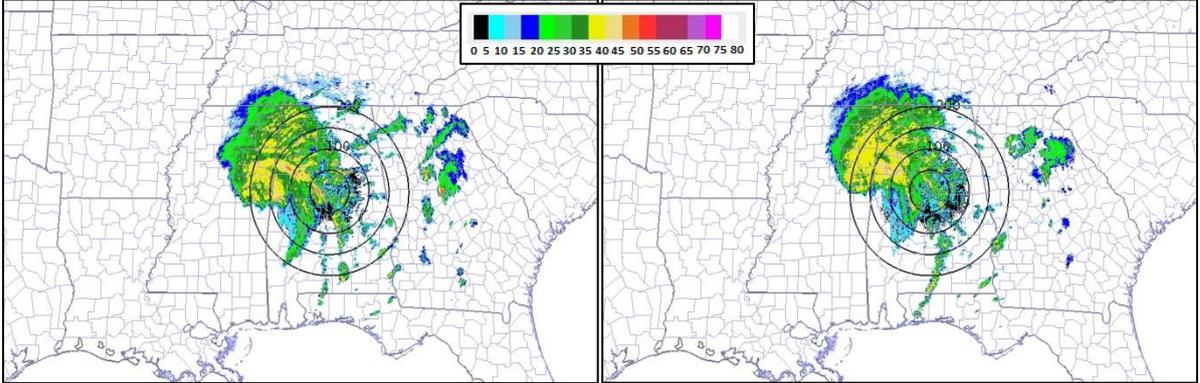
29082005\_22

29082005\_23



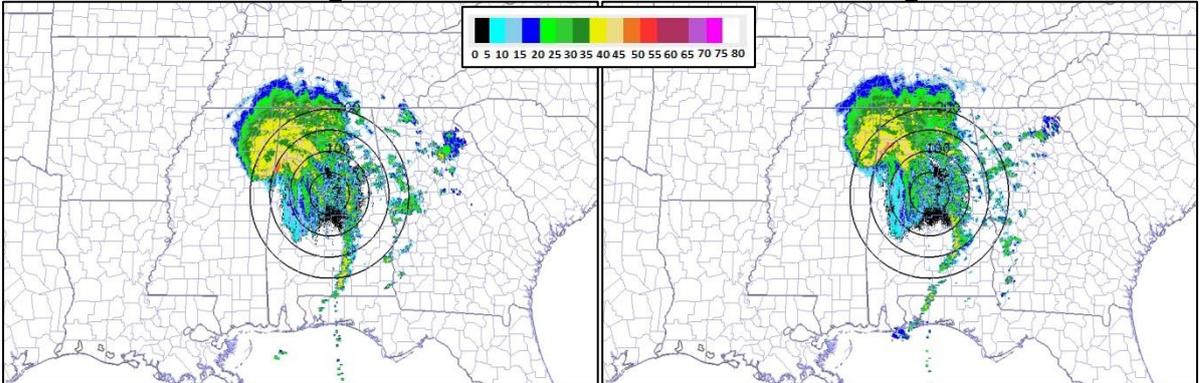
30082005\_00

30082005\_01



30082005\_02

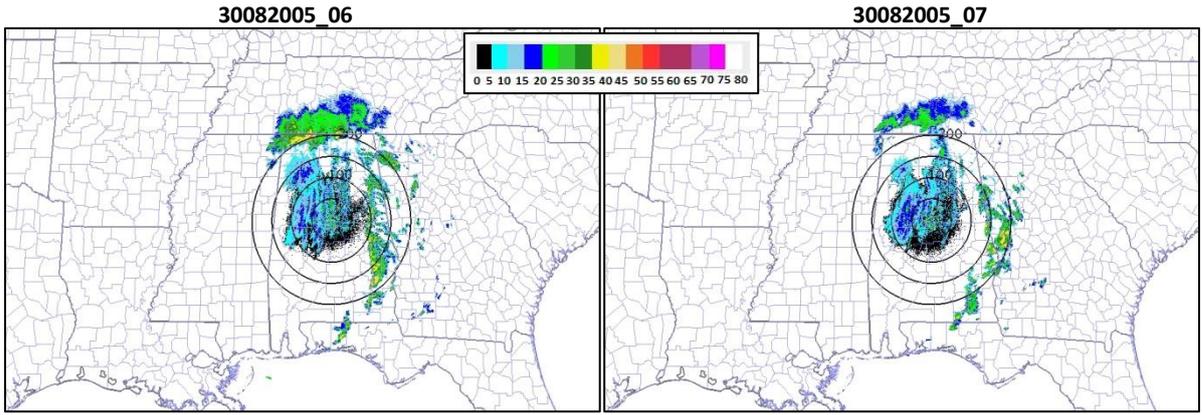
30082005\_03



30082005\_04

30082005\_05





# KNQA – MEMPHIS

