

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E
SANEAMENTO



KLEWERTON DOS SANTOS QUEIROZ

**Simulação de eventos extremos de cheia de curto-prazo usando
precipitação estimada por radar**

Maceió - AL

2018

KLEWERTON DOS SANTOS QUEIROZ

**Simulação de eventos extremos de cheia de curto-prazo usando
precipitação estimada por radar.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, como requisito para obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Ruberto Fragoso Jr.

Maceió - AL

2018

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

Bibliotecário Responsável: Janis Christine Angelina Cavalcante

Q3s

Queiroz, Klewerton dos Santos.

Simulação de eventos extremos de cheia de curto prazo usando precipitação estimada por radar / Klewerton dos Santos Queiroz. – 2018.

40 f. : il., graf., tabs.

Orientador: Carlos Ruberto Fragoso Júnior.

Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento. Maceió, 2018.

Bibliografia: f. 36-40.

1. Inundações – Impactos socioeconômicos. 2. Modelo hidrológico.
3. Radar meteorológico. 4. Precipitação observada. I. Título.

CDU: 628: 551.311.2



Folha de Aprovação

KLEWERTON DOS SANTOS QUIEROZ

SIMULAÇÃO DE EVENTOS EXTREMOS DE CHEIA DE CURTO-PRAZO USANDO
PRECIPITAÇÃO ESTIMADA POR RADAR

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, como requisito para obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento.

Prof. Dr. Carlos Ruberto Fragoso Júnior
(Orientador - PPGRHS/CTEC/UFAL)

Banca examinadora:

Prof.ª Dr.ª Cleuda Custódio Freire
(Examinadora interna – PPGRHS/CTEC/UFAL)

Prof. Dr. Marllus Gustavo Ferreira Passos das Neves
(Examinador interno – PPGRHS/CTEC/UFAL)

Prof. Dr. Benedito Cláudio da Silva
(Examinador externo – UNIFEI)

AGRADECIMENTOS

O caminho percorrido até aqui, representa uma grande vitória em minha vida, fruto de muito esforço, dedicação e superação. Desta forma, não poderia deixar de agradecer aqueles que foram importantes e fundamentais nessa conquista.

Primeiramente a Deus, por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades, que me iluminou e me conduziu no caminho correto.

A minha família, pelo incentivo, apoio e amor compartilhados. Principalmente a minha mãe por seu amor incondicional, pelos incentivos e apoio durante essa caminhada.

Ao meu orientador Carlos Ruberto Fragoso Júnior, pela orientação, suporte, apoio e confiança em mim depositado para o desenvolvimento desse trabalho.

Ao PPGRHS e professores, que foram fundamentais para minha formação, pelos ensinamentos e aprendizado.

Aos colegas da turma de 2016, em especial a Aldo, Cinthia, Heitor, Helaelson, Thiago e Valquernei, pelas angustias, aflições e bons momentos compartilhados durante o mestrado.

Aos discentes Denis e Geiza, que me ajudaram durante o desenvolvimento do presente trabalho.

Aos colegas da turma de 2014, em especial a Alane, Tardely e Marconi pela ajuda e apoio no início do mestrado.

Aos discentes Clebson e Hugo, que ajudaram a desenvolver algumas rotinas que auxiliaram no desenvolvimento da pesquisa.

A CAPES pela concessão da bolsa de mestrado.

Ao CEMADEN e ANA pela disponibilização de dados.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

RESUMO

Inundações decorrentes de enchentes são fenômenos naturais que podem causar impactos socioeconômicos e ambientais devido à ocupação humana em áreas marginais a rios. Esta ocupação indevida ao redor das planícies de inundação torna a população ribeirinha vulnerável aos eventos de enchentes como ocorrido no ano de 2010 na cidade de Rio Largo. Nesse sentido a modelagem hidrológica vem como uma importante ferramenta para o planejamento e gerenciamento de recursos hídricos, auxiliando a previsão hidrológica. A precisão nos dados de precipitação é fundamental para previsão de enchentes, que dependendo da densidade da rede pluviométrica pode não ser apropriada para caracterizar adequadamente a distribuição espacial e temporal da precipitação em toda a bacia hidrográfica. Alternativamente, as estimativas de precipitação por um radar meteorológico podem representar melhor a variabilidade real da precipitação em diferentes escalas no espaço e no tempo. Nesse sentido, o presente estudo tem o objetivo de simular eventos extremos de cheia de curto-prazo através de um modelo hidrológico distribuído em uma bacia de clima tropical/semiárido, que apresenta frequentes eventos de cheia. Foram utilizados dados horários de precipitações observadas e estimadas por radar como entrada no modelo hidrológico. O modelo hidrológico foi calibrado e validado para quatro eventos extremos de chuva (observada e estimada por radar), obtendo uma boa correspondência entre os dados estimados e observados de vazão. O coeficiente de NS obtido utilizando a chuva observada foi de 0,92 na calibração manual e 0,94 na calibração automática, com melhor desempenho para o modelo de Muskingum-Cunge em relação ao Inercial como método de propagação de vazão. A precipitação do radar obteve melhores resultados nas estimativas de vazão quando utilizado um fator de correção constante de 1,9 em comparação ao fator de correção variando com a distância. Os resultados obtidos mostram que o radar meteorológico vem como alternativa para estimativa da precipitação como forma de superar a limitação da rede pluviométrica ou para melhorar a informação da rede existente, propiciando subsídios aos gestores no planejamento dos recursos hídricos.

Palavras-chave: Inundações, modelo hidrológico, Radar.

ABSTRACT

Flooding events caused by river overflows are a natural phenomenon that may cause severe socio-economic losses and environmental impacts due to human occupation along of natural floodplain areas. Such absence in urban plain regarding risk areas occupation makes the riverine population vulnerable to flood disasters, such as the one occurred in 2010 in the city of Rio Largo, Brazil. In this sense, the hydrological modeling comes as an unevaluable tool for the planning and management of water resources, aiding the hydrological forecast conditions. Accuracy in precipitation data is critical for predicting floods, which depending on the density of the rainfall network may not be appropriate for an adequate characterization of the spatial and temporal distribution of precipitation across the watershed. Alternatively, estimates of precipitation by a weather radar may offer gain in represent the actual variability of precipitation at different scales in space and time. Therefore, the present study has the objective of simulating extreme short-term flood events through a distributed hydrological model in a tropical/semi-arid climate basin, which presents a historical of flood events. Observed and estimated radar hourly precipitation data were used as input to the hydrological model. The hydrological model was calibrated and validated for four extreme rainfall events (observed and estimated by radar), obtaining a good representation between the estimated and observed discharge data. The NS coefficient obtained using the observed rainfall was 0.92 with the manual calibration and 0.94 with the automatic calibration, getting better performance using the Muskingum-Cunge model, compared to the Inercial model as a method of flow propagation. The radar precipitation obtained better results in the flow estimates when a constant correction factor of 1.9 was applied in comparison with the correction factor varying with the distance. The results obtained shown that the meteorological radar comes as an alternative to precipitation estimation as a way to overcome the limitation of the rainfall network or to improve the information of the existing network, providing subsidies to the managers in the planning of water resources.

Keywords: Floods, hydrological model, Radar.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	9
2	MATERIAIS E MÉTODOS	11
2.1	Área de Estudo.....	11
2.2	MGB-IPH.....	13
2.3	Radar Meteorológico	15
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	18
3.1	Postos pluviométricos	18
3.2	Estação fluviométrica	19
3.3	Calibração e validação do modelo hidrológico usando precipitação observada.....	20
3.4	Dados de precipitação estimados pelo radar	26
3.5	Aplicação do modelo hidrológico para fator de correção constante.....	27
3.6	Aplicação do modelo hidrológico para fator de correção variando com a distância.....	30
4	CONCLUSÃO.....	35
5	REFERÊNCIAS	37

1 INTRODUÇÃO

As enchentes têm provocado relevantes impactos socioeconômicos e ambientais ao redor do mundo, e seus efeitos são ainda mais acentuados em localidades onde se observa o crescimento da mancha urbana ao redor da planície de inundação. Durante o período de 2001 a 2014, houve quase 84 mil mortes e mais de 1,3 bilhão de pessoas afetadas em todo o mundo por este fenômeno (EM-DAT/OFDA/CRED, 2017). Os fatores que contribuem para ocorrência das enchentes estão relacionados aos aspectos geomorfológicos, hidrológicos e hidráulicos (MONTE et al., 2016), tais como relevo, geologia, tipo e intensidade da precipitação, cobertura vegetal, capacidade de drenagem, morfologia fluvial e extensão do canal e da planície de inundação, interação canal-planície de inundação e rugosidade.

A modelagem hidrológica vem sendo utilizada como uma importante ferramenta no planejamento e gerenciamento de programas de recursos hídricos de bacias hidrográficas, auxiliando a previsão hidrológica. Esses modelos necessitam de dados fisiográficos e dados temporais de chuva e vazão para uma melhor representação dos processos.

A precipitação consiste na principal variável de entrada para os modelos chuva-vazão e possui características que dependem de seu tipo, intensidade, distribuição espacial e temporal (MOREIRA, 2005). As estimativas de precipitação têm erros inerentes, algumas vezes superiores a qualquer refinamento de metodologia que simule os processos físicos numa bacia (TUCCI, 1998).

A precisão nos dados de precipitação é fundamental para previsão de enchentes (YUCEL et al., 2015), dependendo da densidade da rede pluviométrica, esta pode não ser apropriada para caracterizar adequadamente a distribuição espacial e temporal da precipitação em toda a bacia hidrográfica. Desta forma, o radar meteorológico oferece um método alternativo para obtenção da precipitação como forma de superar a limitação da rede pluviométrica ou para melhorar a informação da rede existente (CHEN et al., 2016).

As estimativas de precipitação de radar tornaram-se cada vez mais acessíveis para aplicação em modelos hidrológicos nos últimos anos, especialmente na previsão e emissão de alertas para inundações em áreas com rede de monitoramento escassa (ZHU et al., 2014). As aplicações da chuva fornecida pelo radar na modelagem hidrológica foram avaliadas em diversos estudos (e.g. COLLIER e KNOWLES, 1986, CLUCKIE e OWENS, 1987; BELL e MOORE, 1998a, b; CARPENTER et al., 2001; BORGA, 2002; HOSSAIN et al., 2004; REICHEL et al., 2009).

Tanto as medições de chuva por pluviômetros quanto às estimadas com o radar meteorológico possuem erros. As fontes de erro de medição de chuva com o radar estão associadas à calibração eletrônica do equipamento, à equação de transformação da refletividade efetiva em taxa de precipitação (ou relação Z-R), ao efeito da curvatura da Terra, à zona de derretimento de cristais de gelo na nuvem, entre outras (GONÇALVES, 2005). Da mesma forma, as medidas de chuva por pluviômetros não possuem representatividade espacial e a ação do vento pode causar uma diminuição da coleta de gotas pelo pluviômetro, entre outras (CABRAL et al., 2017).

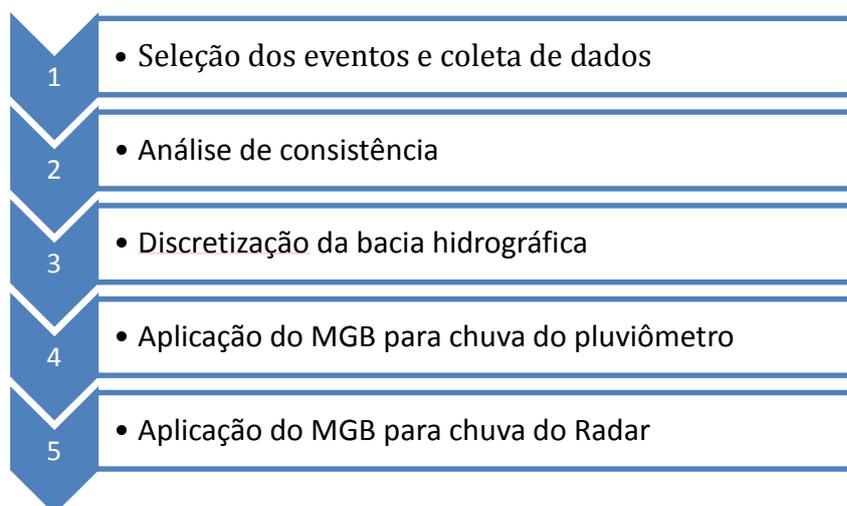
O radar fornece em tempo real, alta resolução espacial e temporal da distribuição de precipitação, com um grau de incerteza considerado baixo para previsão de inundação (CHEN, et al., 2016). A capacidade de fornecer estimativas de precipitação instantânea em alta resolução espacial e temporal torna a precipitação de radar uma alternativa importante em relação aos dados de pluviômetros nas estimativas de vazão (ZHU et al., 2014).

Zhun et al. (2014) levantam uma questão importante a ser abordada: Qual a implicação na escolha de modelos hidrológicos com diferentes estruturas quando utilizada a precipitação estimada pelo radar como alternativa aos dados de pluviômetros? Nesse sentido, a utilização de dados com alta resolução espacial e temporal no desempenho de modelos hidrológicos mais sofisticados precisa ser investigada em relação a sua representatividade para eventos de curto-prazo no comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica. Desta forma, o presente estudo analisa a resposta nas estimativas de vazão utilizando os modelos de Muskingum-Cunge e Inercial como métodos de propagação em uma bacia de clima tropical/semiárido, para eventos extremos de cheia de curto-prazo, utilizando um modelo hidrológico distribuído, tendo como entrada a precipitação estimada por radar em substituição aos dados do pluviômetro.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O fluxograma apresentado na Figura 1, resume a metodologia empregada no presente estudo para alcance do objetivo, que foi de avaliar a resposta nas estimativas de vazão para eventos extremos de cheia de curto-prazo, utilizando um modelo hidrológico distribuído, tendo como entrada a precipitação de radar em substituição aos dados do pluviômetro.

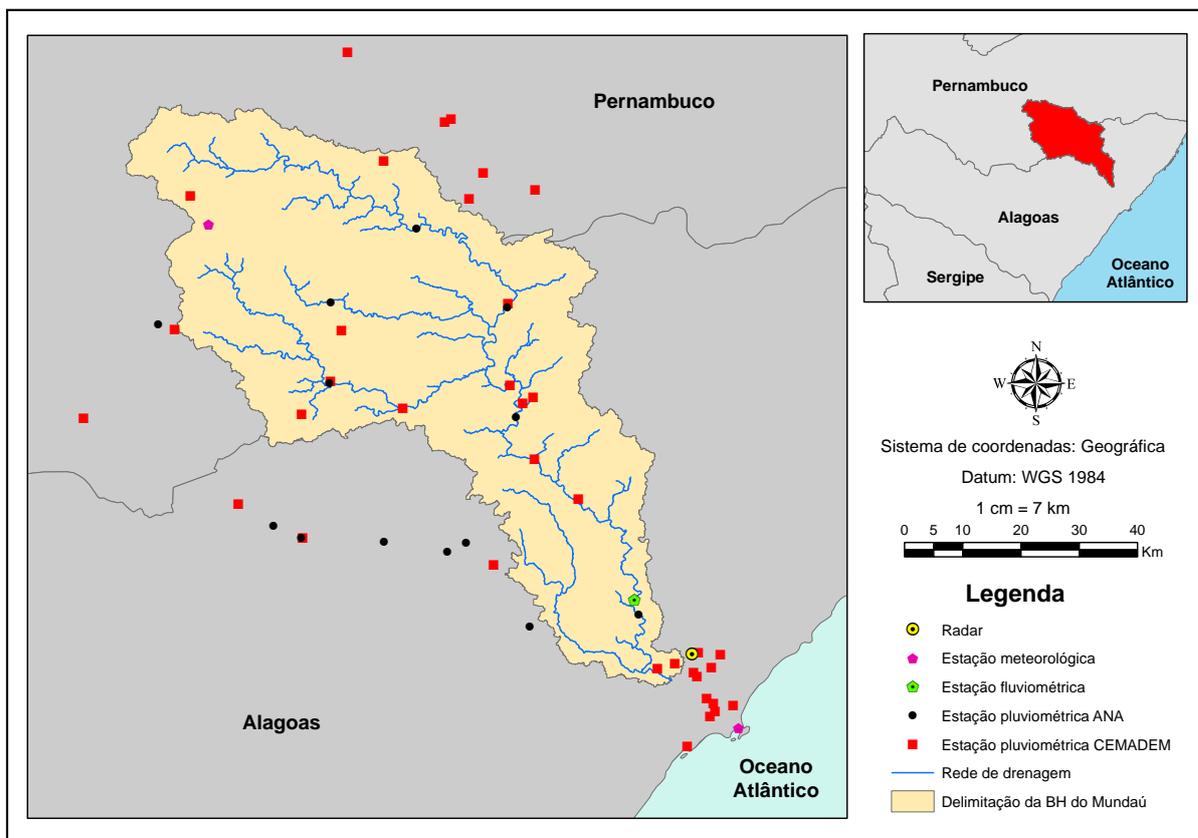
Figura 1- Resumo da metodologia utilizada no estudo.



2.1 Área de Estudo

A área de estudo compreende a bacia hidrográfica do rio Mundaú (Figura 2) que abrange os estados de Alagoas e Pernambuco. A bacia possui uma área total de aproximadamente 4.126 km², dos quais 1.971 km² (correspondente a 47,77% da bacia) estão situados na Mesorregião do Leste de Alagoas com 15 municípios inseridos total ou parcialmente na bacia. A parte de Pernambuco ocupa uma área de 2.155 km² (correspondente a 52,23% da bacia), situada na mesorregião do agreste Pernambucano com 15 municípios. O rio Mundaú possui extensão de 141 km, com uma declividade média de 3,75 m/km e tempo de concentração de 1,57 dias (FRAGOSO JÚNIOR; PEDROSA; SOUZA, 2010). Esse rio tem sua nascente no Oeste da cidade pernambucana de Garanhuns e desemboca na laguna Mundaú.

Figura 2 - Localização da bacia hidrográfica do rio Mundaú (AL/PE).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Boa parte dos municípios inseridos na bacia do Mundaú possui alta densidade populacional ocupando as planícies de inundação. Vários eventos de inundação já ocorreram provocando elevados prejuízos (1914, 1941, 1969, 1988, 1989, 2000, 2010), mostrando sua vulnerabilidade aos eventos de inundação (FRAGOSO JÚNIOR; PEDROSA; SOUZA, 2010). Monte et al. (2016) comentam sobre a carência de estudos que quantifiquem a abrangência das inundações provocadas por cheias extremas nos municípios ribeirinhos da bacia do rio Mundaú, e que venham fornecer informações para auxiliar no planejamento de políticas públicas e de medidas mitigadoras aos efeitos adversos das inundações.

A bacia hidrográfica do Rio Mundaú é composta pela presença do bioma Caatinga na sua parte alta, de aspecto climático semiárido, e o bioma Mata Atlântica na parte baixa estendendo-se até a foz com clima tropical quente e úmido (COSTA, 2014).

Segundo a classificação climática de Köppen, o clima predominante na bacia é do tipo Bsh (clima seco e quente, evapotranspiração potencial anual maior que a precipitação anual, com chuvas concentradas no inverno), caracterizando-se por apresentar precipitação média anual variando entre 1300 a 1800 mm e temperatura média anual superior a 18°C.

A bacia tem menor capacidade de infiltração em seu alto e médio curso devido a sua formação geológica pelo maciço Pernambuco-Alagoas, baseado em rochas cristalinas (i.e. de formação ígnea ou metamórfica), e no baixo curso está situada a bacia sedimentar Sergipe-Alagoas, ocupando uma pequena parte da bacia com maior capacidade de infiltração (MONTE, 2013).

2.2 MGB-IPH

Neste trabalho foi utilizado a versão 2017 em mini-bacias do Modelo Hidrológico de Grandes Bacias (MGB) publicado em Pontes et al. (2015). O MGB foi desenvolvido no Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) e consiste em um modelo hidrológico distribuído de grande escala (bacia > 10.000 km²) e bacias de médio porte, entre 2.000 e 10.000 km² (CHAVES, 2016; GAMA et al., 2011; CHAVES et al., 2014). O modelo divide-se em quatro módulos: escoamento (superficial, subsuperficial, subterrâneo), balanço de água no solo, propagação das vazões na rede de drenagem e evapotranspiração.

A versão 2017 do MGB utiliza a discretização da bacia hidrográfica em pequenas sub-bacias denominadas mini-bacias. Além disso, inclui o módulo de simulação para propagação inercial de vazões (PONTES et al., 2015), bem como a ferramenta para uso dos dados de chuva do TRMM e dados climáticos do Climatic Research Unit (CRU).

O Modelo Digital de Elevação (MDE) é uma informação fundamental que irá compor a modelagem hidrológica. Vários são os tipos de fontes de MDE existentes: Aster Global DEM (GDEM), IfSAR, LiDAR, SAR e o Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) (MONTE, 2013). Para representação do terreno e extração das informações físicas, o MDE escolhido para ser utilizado foi o do SRTM, disponibilizado gratuitamente através de sua plataforma eletrônica no endereço: <<http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp>>.

Para o cálculo da evaporação no modelo hidrológico foram utilizados dois postos meteorológicos, um localizado em Maceió (00082994) e outro em Garanhuns (00082893) provenientes da base de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

A definição das Unidades de Respostas Hidrológicas (URHs), que são regiões hidrologicamente homogêneas dentro da bacia, foi obtida do Mapa de URHs da América do Sul desenvolvido e discutido no trabalho de Fan et al. (2015). O mapa está disponibilizado em uma resolução de 400 metros na plataforma eletrônica: <<https://www.ufrgs.br/hge/modelos-e-outros-produtos/mapa-de-urhs-da-america-do-sul/>>, mantida pelo grupo de pesquisa de Hidrologia de Grande Escala (HGE) que faz parte do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH)

da Universidade do Rio Grande do Sul. Cabe salientar que foi verificado se os dados do mapa de URH usado estavam adequados para a região em estudo, o que se mostrou apropriado para realidade da bacia do Mundaú quando comparado as informações de uso e ocupação do solo contidas no plano Diretor de Recursos Hídricos da bacia.

A bacia foi dividida em seis sub-bacias baseado nos trabalhos de Alves (2016); Alves et al (2015); Chaves (2015) e Monte et al (2016), que adotaram como critério as posições das estações diárias de vazão instaladas ao longo do rio Mundaú. Os parâmetros hidrológicos obtidos na calibração do MGB dos trabalhos supracitados, foram considerados como base para calibração do presente trabalho.

A Tabela 1 apresenta os eventos que foram considerados na calibração e validação no MGB. Uma janela com 3 meses de dados, contendo os eventos da Tabela 1, foi considerada para simulação no intuito de gerar estabilidade numérica no modelo hidrológico. O MGB foi calibrado considerando um intervalo de tempo horário no período de 01/05 à 31/07/2015 (contém o evento 3). Este evento foi considerado para calibração por apresentar maior quantidade de estações pluviométricas, forma do hidrograma bem definida e valor da vazão de pico intermediária em relação ao demais eventos. No processo de calibração e validação foram utilizadas as estações pluviométricas automáticas da Agência Nacional de Águas (ANA) e do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) disponibilizados em frequência horária conforme apresentado na Tabela 1, onde é possível observar que a rede de monitoramento vem sendo ampliada. As vazões estimadas pelo MGB foram comparadas com a vazão da estação pluviométrica da Fazenda Boa Fortuna (39770000), localizada no município de Rio Largo. Esta estação é operada pela ANA que disponibiliza os dados em frequência horária.

Tabela 1 - Período dos eventos e quantitativo de estações automáticas por evento.

Eventos	Evento 1 (validação)		Evento 2 (validação)		Evento 3 (calibração)		Evento 4 (validação)	
	Período do evento	Período simulado	Período do evento	Período simulado	Período do evento	Período simulado	Período do evento	Período simulado
Período	14/05 – 17/05/2014	01/05 – 31/07/2014	06/10 - 10/10/2014	01/08 - 31/10/2014	02/07 - 07/07/2015	01/05 - 31/07/2015	25/05 - 31/05/2017	01/05 - 31/07/2017
Pluviômetros ANA		14		13		13		14
Pluviômetros CEMADEN		5		21		36		34

A qualidade da simulação realizada para os eventos selecionados, tanto na calibração como na validação, foi calculada através de três indicadores: coeficiente de eficiência de Nash

Sutcliffe (NS), coeficiente de eficiência de Nash Sutcliffe do logaritmo (NSlog) e o cálculo do erro de volume (ΔV) para análise do desempenho do modelo hidrológico. As equações destes indicadores de ajuste podem ser observadas a seguir:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (1)$$

$$NSlog = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\log(Q_{obs}) - \log(Q_{sim}))^2}{\sum_{i=1}^n (\log(Q_{obs}) - \overline{\log(Q_{obs})})^2} \quad (2)$$

$$\Delta V = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{sim} - \sum_{i=1}^n Q_{obs}}{\sum_{i=1}^n Q_{obs}} \quad (3)$$

Onde: Q_{obs} é a vazão observada; Q_{sim} é a vazão simulada pelo modelo; $\overline{Q_{obs}}$ é a média da vazão observada no período de simulação; e n o número de eventos.

O coeficiente NS, calculado por meio da Equação (1), é um dos mais importantes critérios estatísticos para avaliar o ajuste de modelos hidrológicos e por representar uma modificação padronizada do R^2 (COLLISCHONN, 2001). Através do coeficiente de NSlog obtemos uma medida de desempenho menos sensível aos picos e mais sensível aos períodos de recessão de vazão, ou seja, valoriza mais as vazões baixas que o coeficiente NS, tornando-se menos sensível a cheias. O erro relativo de volume é uma forma de avaliar se existe um desvio sistemático de superestimava ou subestimativa da vazão.

2.3 Radar Meteorológico

A equação empírica ilustrada abaixo é comumente utilizada para converter a refletividade medida pelo radar em precipitação (WAHAB et al., 2014).

$$Z = A \times R^b \quad (4)$$

onde A e b são parâmetros calibráveis, Z é a refletividade em mm^6/mm^3 e R é a precipitação observada em mm/h . Os parâmetros A e b da relação diferem de acordo com localização e também dependem da variação da distribuição do tamanho das gotas de chuva, tanto no espaço como no tempo. Geralmente a refletividade Z tem uma grande variação em magnitude, sendo portanto, usada a refletividade expressa em termos de dbz conforme equação abaixo.

$$Z (\text{dBz}) = 10 \times \log_{10} Z \left(\frac{\text{mm}^6}{\text{mm}^3} \right) \quad (5)$$

Marshall e Palmer (1948) desenvolveram uma equação geral ($Z=200R^{1,6}$) que vem sendo utilizada até os dias atuais. No entanto o uso da equação de Marshall e Palmer para relação Z-R pode não ser adequada para estimativa da precipitação, sendo necessário o desenvolvimento de uma nova relação Z-R para a região específica (RAMLI et al., 2011).

Foram utilizados os dados do radar meteorológico do CEMADEN, localizado em 35.77°W e 9.55°S, banda S, doppler e de dupla polarização (CABRAL et. al, 2017). Os pontos de grade do RADAR usado no estudo, têm resolução espacial de 1 km que cobre a área da bacia com 4.129 pontos. Os dados fornecidos pelo CEMADEN são processados no software Rainbow, onde se define uma relação Z - R para sistemas convectivos (Equação 6), e outra relação para sistemas estratiformes (Equação 7). Os sistemas estratiformes são caracterizados por chuvas leves e moderadas e grande área de cobertura, já os convectivos estão associados com altas taxas de precipitação.

$$Z = 300 \times R^{1.4} \quad (6)$$

$$Z = 200 \times R^{1.6} \quad (7)$$

Mesmo sabendo que a relação de Marshall e Palmer não é a mais adequada para estimativas de chuva na área de estudo, os dados de Radar utilizado no estudo foram assim mesmos aplicados uma vez que, o CEMADEN emprega a relação Z-R definida por a Marshall e Palmer em suas estimativas de precipitação para eventos estratiforme.

A metodologia utilizada pelo software para estimativa da precipitação instantânea está descrita em Cabral et al. (2017). De acordo com os limiares de taxa de precipitação (Tabela 2) são aplicados as variáveis polarimétricas (Z – reflectividade horizontal [dBZ], Zdr – refletividade diferencial [db] e Kdp – diferencial do deslocamento de fase [°/km]) ilustradas na Tabela 2. A cada varredura (10 minutos) realizada pelo radar é feita essa estimativa e os resultados são acumulados em períodos de uma hora. A relação de Marshall e Palmer ($Z=aR^b$) segue o equacionamento para sistemas convectivos e estratiformes definidos pelas equações 6 e 7, respectivamente.

Tabela 2 - Relações Z – R em função da taxa de precipitação.

Para $R(Z) < 6$ mm/h	Para $R(Z) < 50$ mm/h	Para $R(Z) > 50$ mm/h
$R = \frac{R(Z)}{0,4 + 5 Z_{dr} - 1 ^{1,3}}$	$R = \frac{R(K_{dp})}{0,4 + 3,5 Z_{dr} - 1 ^{1,7}}$	$R = R(K_{dp})$
Em que:		
$R(Z) = \frac{1}{a^{1/b}} \times Z^{1/b} \Leftrightarrow Z = aR^b$		$R(K_{dp}) = 44 K_{dp} ^{0,822}$, para $KDP > 0$

Em geral, a medida que o local onde se deseja quantificar a precipitação se distancia do radar, piores são as informações para estimativa da intensidade pluviométrica baseada nos dados de reflectividade. Nesse sentido, fatores de correção (F_c) são empregados nas estimativas de chuva, a fim de minimizar as distorções produzidas nas informações medidas pelo radar com a distância alvo-radar. Cabral et al. (2017) utilizou o erro médio sobre os dados do radar seguindo o resultado obtido por Brandes (1975) e Barnes (1964), aplicando uma subestimativa de 60% ($F_c=1,6$) na bacia hidrográfica do rio São Miguel que está situada entre a Zona da Mata e o Agreste Alagoano.

Baseado no fator de 1,6 aplicado por Cabral et al. (2017), dois cenários foram testados. O primeiro foi baseado aplicando-se um fator de correção constante a precipitação do radar, enquanto o segundo foi baseado aplicando o fator de correção em função da distância alvo-radar. No primeiro cenário, foi realizada uma calibração prévia da precipitação estimada por radar aplicando-se inicialmente o fator de 1,6 (empregado por Cabral et al., 2017) para o período do evento 3 (Tabela 1). O valor do fator de correção foi ajustado manualmente até obter um valor que produzisse uma melhor correspondência entre os hidrogramas simulado e observado.

O segundo cenário, baseia-se em aplicar determinado valor do fator de correção, nas estimativas de precipitação em função da distância que o alvo se encontra do radar, sendo aplicado a todos os pontos da grade. Esta relação ($F_c \times$ distância) foi obtida através da regressão linear gerada entre o fator de correção, adquirido pela comparação dos dados observados do pluviômetro com a estimativa de chuva do radar no ponto da grade próximo à estação automática, e a distância em que o alvo se encontrava do radar.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Postos pluviométricos

Tendo em vista que foram utilizadas duas fontes de dados (ANA e CEMADEN) para precipitação observada, inicialmente foi realizada uma análise de consistência com a finalidade de verificar a homogeneidade dos dados obtido em uma estação operada pela ANA com relação as precipitações registradas em um posto vizinho operado pelo CEMADEN. O método da dupla massa foi aplicado entre duas estações automáticas de chuva próximas. A Figura 3 ilustra o resultado obtido para o período de 10/09 a 13/09/2014 entre o posto 39720000 operado pela ANA e o posto 270830301A operado pelo CEMADEN, ambos localizados no município de São José da Laje, verificando que não houve inconsistência entre os postos. A Figura 4 ilustra a precipitação horária acumulada para o período supracitado entre as duas estações, sendo possível observar que o erro entre elas é de aproximadamente 9% para precipitação acumulada em todo o período. Esse valor é justificável uma vez que os postos não se encontram na mesma coordenada e fornecem medições pontuais de precipitação, podendo haver perdas de informações durante certos eventos.

Figura 3 - Comparação da precipitação observada entre os postos 39720000 e 270830301A.

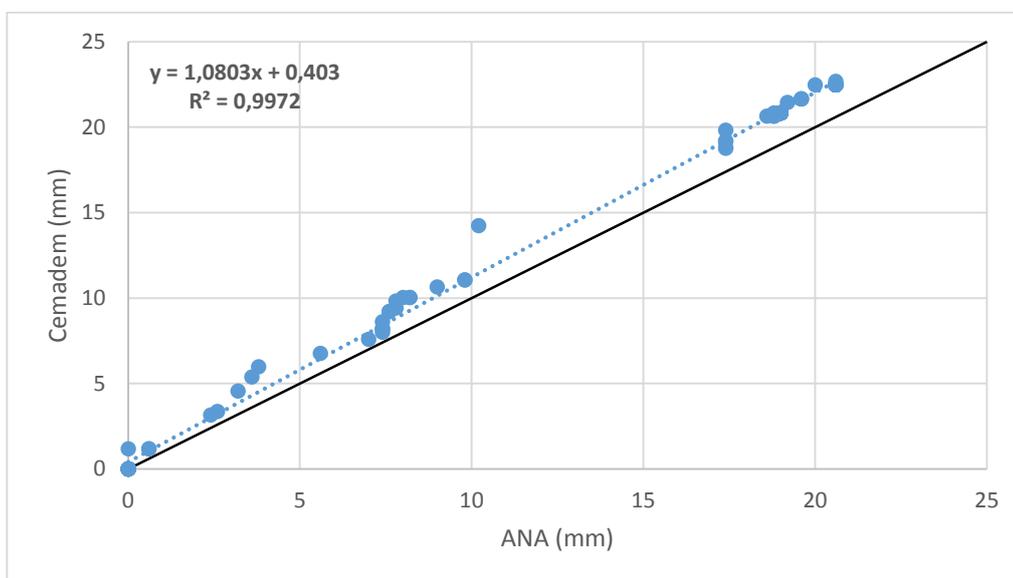
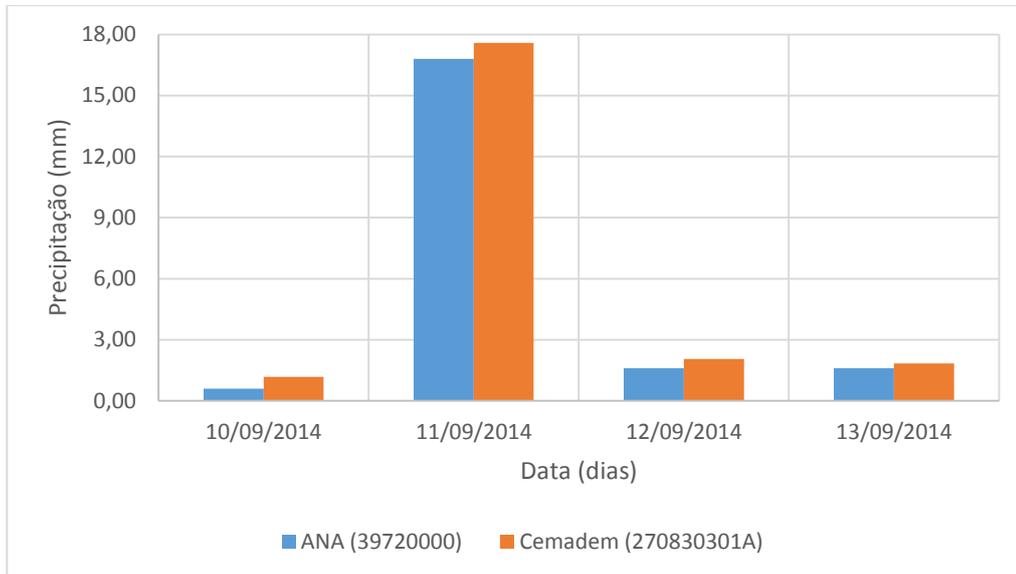


Figura 4 - Comparação do volume de precipitação observada entre os postos 39720000 e 270830301A.

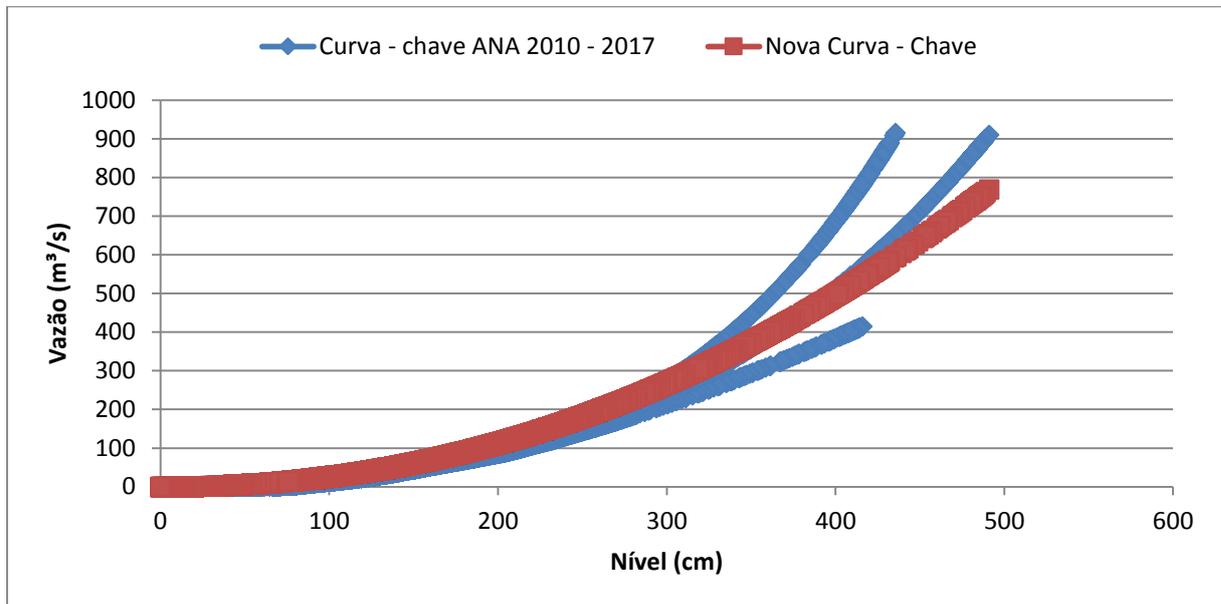


3.2 Estação fluviométrica

A estação fluviométrica Boa Fortuna (Código 37990000), localizada no município de Rio Largo, foi utilizada para calibração e validação das vazões estimadas pelo modelo hidrológico. A estação está localizada na Latitude $-9^{\circ}28'2''$ e Longitude $-35^{\circ}51'35''$, com área de contribuição de aproximadamente 3.876 km², sendo operada pela ANA, que disponibiliza os dados de vazão e nível com frequência a cada 15 minutos.

Através da análise de consistência realizada na série de dados de vazão entre 2010 a 2017, constatou a presença de três curvas-chaves relacionando nível x vazão na estação 39770000 para este período (Figura 5, linha azul). Baseado nisso, foi realizado uma medição de vazão na seção transversal do rio Mundaú pelo Método Acústico Doppler (ADCP), onde está localizada a estação fluviométrica. A medição realizada no dia 15/12/2017 às 10h30min mostrou valor médio de 6,5 m³/s, enquanto o valor registrado pela ANA em sua plataforma eletrônica era de 3,1 m³/s, mostrando que as vazões registradas pela estação fluviométrica Boa Fortuna estavam sendo subestimadas. Também foi observado que o valor registrado na régua linimétrica presente no local era de 433 centímetros, enquanto o valor registrado pelo sensor de nível telemétrico, disponibilizado no site da ANA, foi de 418 centímetros.

Figura 5 - Curva-chave para a estação 39770000, ente o período de 2010 a 2017.



Tendo em vista a inconsistência nos dados de vazão da estação 39770000, foi elaborada uma nova curva-chave para o cálculo de uma nova série de vazão (Figura 5, linha vermelha) baseada na série histórica dos registros de nível fornecidos pelo sensor telemétrico operado pela ANA, sendo somado a série de nível a diferença média de 15 cm observado entre a régua linimétrica e o sensor de nível para a série histórica de 2010 a 2017.

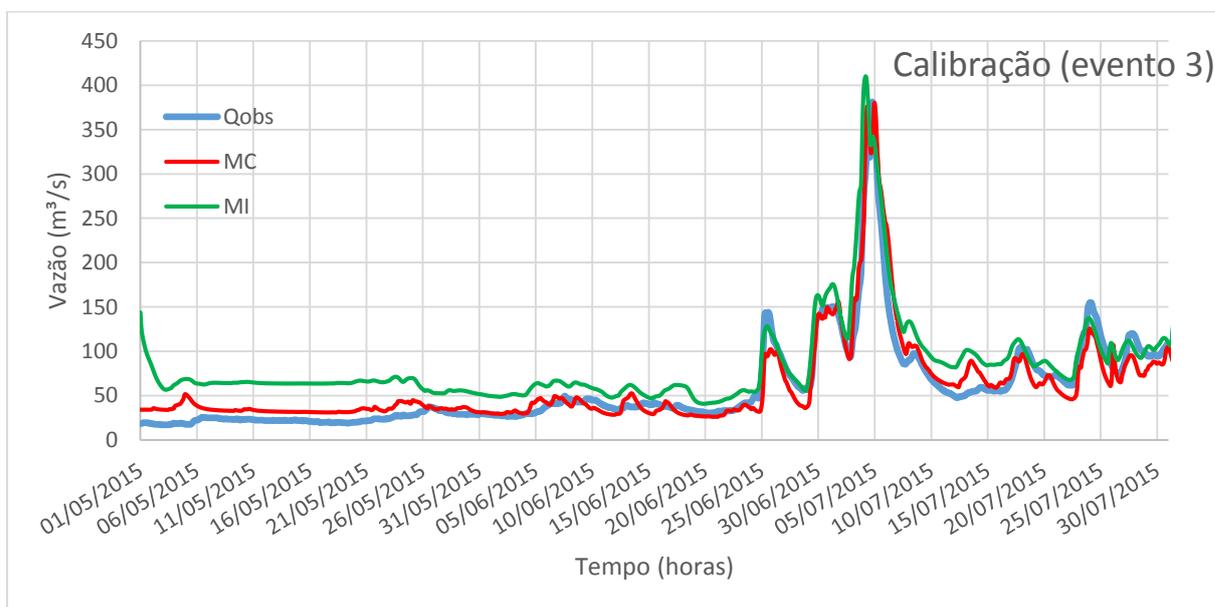
3.3 Calibração e validação do modelo hidrológico usando precipitação observada

A calibração dos parâmetros hidrológicos no MGB, foi realizada inicialmente de forma manual e posteriormente de forma automática, sendo avaliado a eficiência da simulação através das funções objetivas apresentadas pelas equações 1, 2 e 3, comparadas com os dados observados de vazão no posto fluviométrico de Boa Fortuna localizado em Rio Largo, onde também foram observadas a forma e características do hidrograma calculado em comparação ao observado, tais como: forma geral do hidrograma, a recessão das vazões durante a estiagem, a magnitude dos picos, o tempo de ocorrência dos picos, e o volume geral dos hidrogramas.

A calibração foi realizada usando o modelo Muskingum-Cunge como método de propagação de vazão. Também foi aplicado o modelo Inercial em substituição ao de Muskingum-Cunge mantendo o mesmo conjunto de parâmetros hidrológicos. O hidrograma simulado pelo MGB para os dois métodos de propagação em comparação a vazão observada, é apresentado na Figura 6 para o período entre 01/05 a 31/07/2015.

Apesar do modelo de Muskingum-Cunge apresentar equacionamento mais simplificado em relação ao modelo inercial, que se baseia na aproximação das equações de Saint-Venant desprezando apenas o termo de inércia advectiva na equação dinâmica (Pontes et al., 2015), o modelo de Muskingum-Cunge se mostrou mais eficiente. Apesar disso, o resultado obtido pelo método inercial mostrou o comportamento do hidrograma relativamente próximo ao modelo de Muskingum-Cunge, que apresentou picos de cheia mais atenuados e próximo ao observado.

Figura 6 - Calibração para chuva observada no MGB para o período entre 01/05 a 31/07/2015.



A Tabela 3 apresenta os valores das funções objetivas entre os dois métodos de propagação na calibração manual e automática. Nela é possível observar que o coeficiente de Nash-Sutcliffe e o erro de volume são melhores quando utilizado o método de propagação por Muskingum-Cunge. Collischonn (2001) destaca que valores de Nash-Sutcliffe maiores que 0,75 são considerados adequados. Por tanto, o desempenho do modelo mostrou resultados satisfatórios uma vez que apresentou coeficiente de Nash de 0,94 para o modelo de Muskingum-Cunge e 0,75 para o modelo Inercial. Outros trabalhos (e.g. ALVES, 2016; ALVES et al., 2015; CHAVES, 2015; MONTE et al., 2016) também obtiveram bons resultados aplicando o MGB para bacia do rio mundaú utilizando dados em escala diária.

Tabela 3- Valores das funções objetivas utilizando a parametrização obtida na calibração manual e automática entre os dois métodos de propagação.

Eventos		NS		NSLog		ΔV (%)	
		MC	Inercial	MC	Inercial	MC	Inercial
Evento 1	Cal. Manual	-4,88	-5,75	-2,30	-2,44	-46,98	-58,33
	Cal. Automática	-2,56	-3,17	-1,11	-1,52	-37,54	-49,48
Evento 2	Cal. Manual	0,84	0,87	0,36	0,69	-28,74	0,34
	Cal. Automática	0,79	0,84	0,49	0,77	-20,89	5,90
Evento 3	Cal. Manual	0,92	0,75	0,79	0,27	-2,46	37,26
	Cal. Automática	0,94	0,74	0,84	0,24	3,78	43,09
Evento 4	Cal. Manual	-0,20	-1,45	0,73	0,48	-29,98	-49,31
	Cal. Automática	-0,49	-1,37	0,73	0,51	-31,05	-49,31

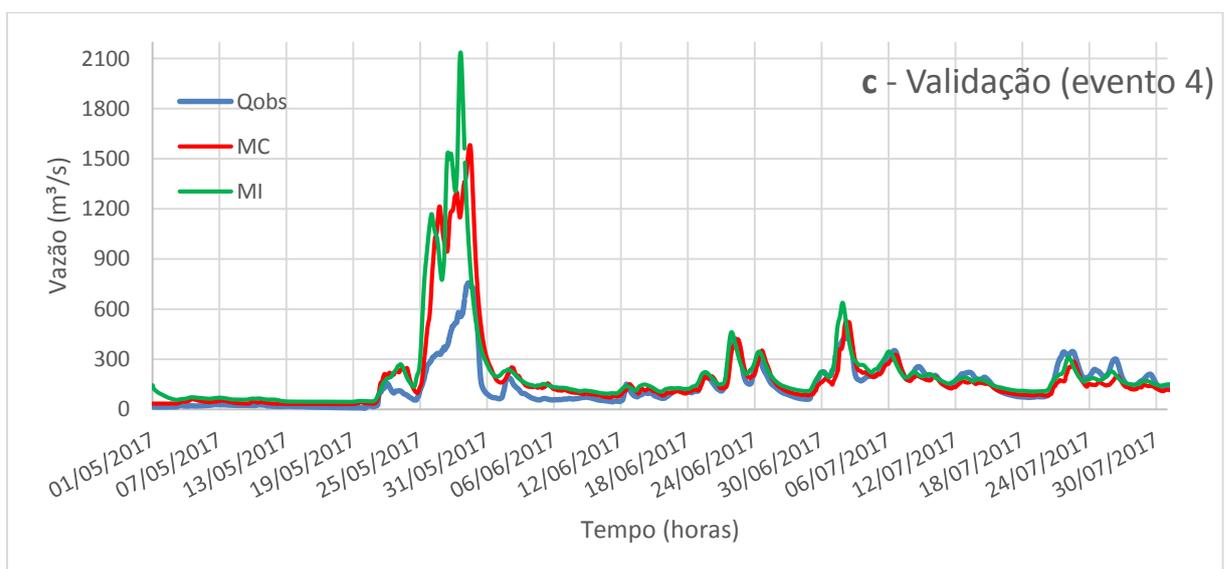
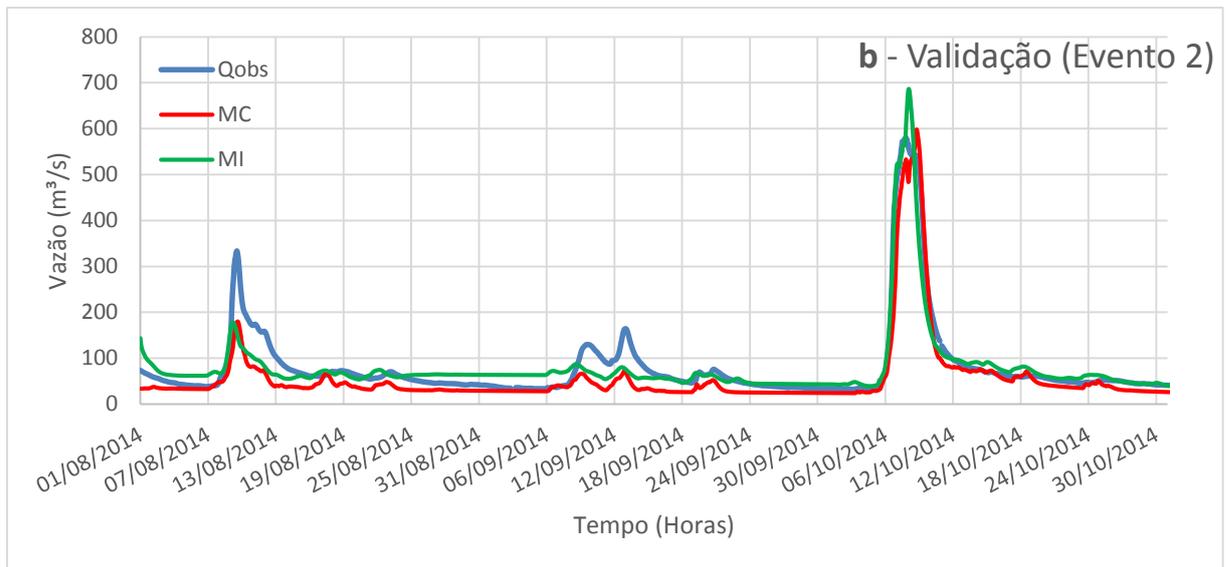
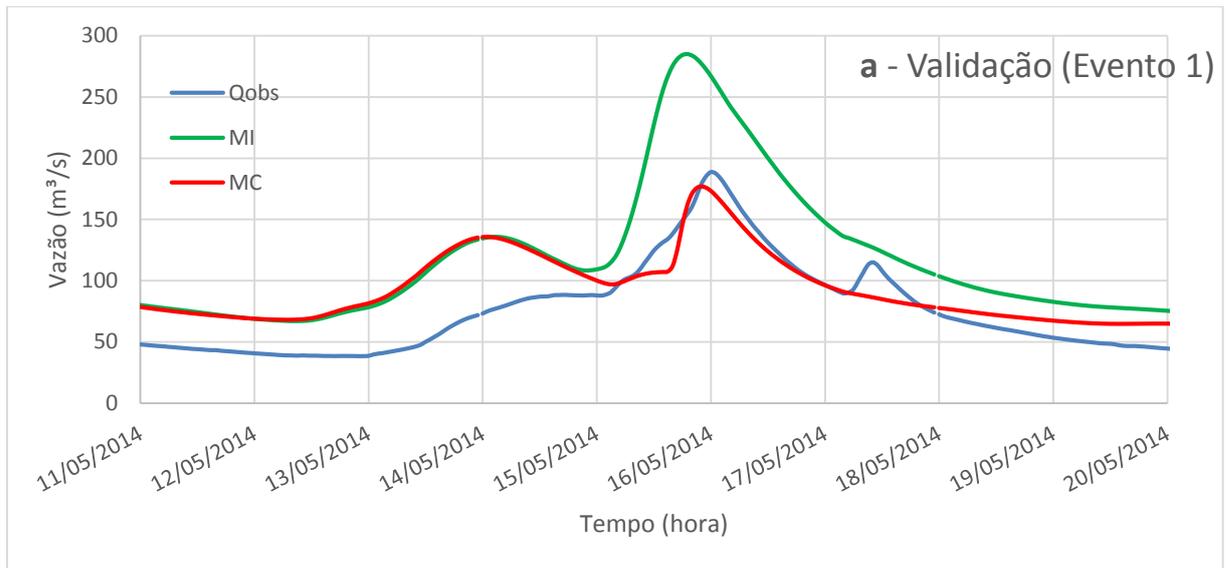
A validação do modelo hidrológico foi realizada para três períodos distintos representados na Figura 7. Observa-se que para o evento 1 o modelo hidrológico não conseguiu representar o comportamento do hidrograma observado para os dois métodos de propagação. As vazões de pico foram subestimadas em 47% e 51% pelos métodos de Muskingum-Cunge e Inercial, respectivamente. Também é notável que há um atraso no hidrograma simulado pelo modelo de Muskingum-Cunge em comparação ao observado.

Chen et al. (2016) comenta que a depender da densidade da rede pluviométrica, esta pode não ser adequada para caracterizar a distribuição espacial e temporal da precipitação em toda bacia hidrográfica. Nesse sentido os valores superestimados na vazão de pico para o evento 1 pode ser justificado pela baixa quantidade das estações automáticas de precipitação (ver Tabela 1), e sua distribuição espacial ao longo da bacia.

A localização das estações pluviométricas devem ser geograficamente fixadas obedecendo uma certa regularidade na distribuição espacial para se obter o melhor monitoramento hidrológico (SALGUEIRO, 2005). A Organização Mundial de Meteorologia no ano de 1965, criou um manual de práticas hidrológicas com recomendações sobre a densidade mínima da rede pluviométrica. A versão publicada na WMO (1994), recomenda uma densidade mínima de 10 a 20 quilômetro quadrado por estação, para unidade fisiográfica área urbana, que quando comparada a malha disponível na bacia do Mundaú percebemos a carência de estações para caracterizar a distribuição espacial da precipitação.

A simulação do MGB para o evento 2 mostrou resultados significativos, principalmente para o modelo inercial que apresentou coeficiente de NS de 0,87 com os parâmetros da calibração manual, ainda assim o modelo subestimou em 18% a vazão de pico

Figura 7 - validação para chuva observada no MGB para evento 1 (a), eventos 2 (b) e evento 4 (c).

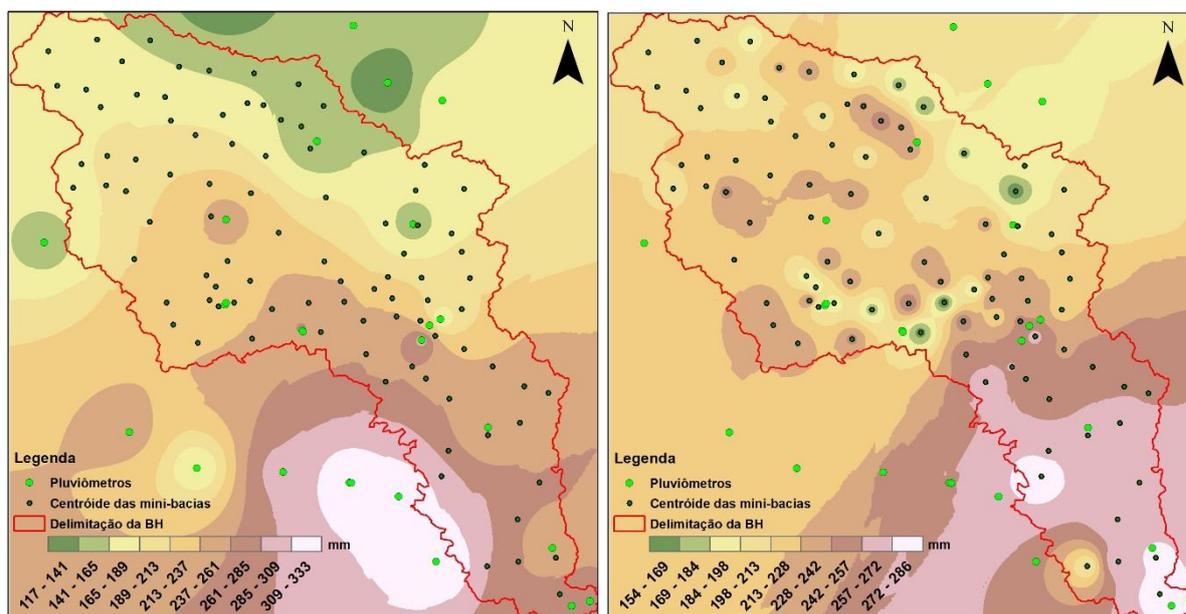


contra 3% do método de Muskingum-Cunge (Tabela 3). É possível observar uma diferença significativa entre os dois métodos de propagação para o coeficiente de NSlog, indicando que o modelo inercial se mostrou mais eficiente no comportamento das vazões de menor magnitude para este evento, isso se deve porque o NSlog é mais sensível a recessão e as vazões de estiagem, ou seja, valoriza mais as vazões baixas que o coeficiente NS. O resultado obtido para o evento 2 foi superior quando comparado ao evento 1, isso provavelmente ocorreu pela expansão na malha de estações pluviométricas que era de 19 no evento 1, e foi para 34 no evento 2, mas ainda sim considerada baixa para representação da distribuição espacial e temporal da bacia.

Observando a Figura 7 (c) percebemos que as estimativas de vazão para o evento 4 foram muito superiores as observadas, principalmente pelo modelo inercial com vazão de pico estimada na ordem de 2100 m³/s, quando a observada foi de 652 m³/s. Apesar disso, o modelo conseguiu representar de forma adequada as vazões observadas para o período antecedente e posterior ao evento, com melhores valores do coeficiente de NSlog para o modelo de Muskingum-Cunge.

Ao analisar a distribuição espacial da chuva para o evento 4 produzida pelo conjunto de ferramentas do ArcGIS (Figura 8), verificamos que a mesma está concentrada fora da bacia próxima a foz conforme apresentado na Figura 8 (a). Através da interpolação da chuva para as mini-bacias, o modelo transferiu um volume significativo de água que antes estava concentrado fora da bacia conforme ilustrado pela Figura 8 (b). Este volume de água proveniente da interpolação, foi o que provavelmente resultou nas altas estimativas de vazão geradas pelo MBG para o evento 4 conforme Figura 7 (c).

Figura 8 - (a) Distribuição da chuva acumulada baseada nas estações pluviométricas para o período entre 25 a 28/2017, (b) Distribuição da chuva acumulada baseada na interpolação dos centroides das mini-bacias para o período entre 25 a 28/2017.



Observou-se que para todos os eventos o modelo inercial superestimou as vazões simuladas em comparação ao de Muskingum-Cunge. Essa diferença entre os dois métodos pode ser explicada porque, ao contrário do método de Muskingum-Cunge, no método de propagação Inercial é representada a inundação da planície e a evaporação direta das áreas inundadas (PONTES et. al, 2015), o que não é observado nas características fisiográficas da bacia do rio Mundaú, que não apresenta área de planície com grandes extensões inundáveis.

Outro fator limitante que explica os resultados observados para o modelo inercial, consiste em se ter empregado a relação geomorfológica pré-definida no MGB. Essa relação geral foi utilizada devido à ausência de informação de parâmetros baseado na área de drenagem, como profundidade e largura do canal para diferentes trechos do rio, para que fosse definido uma relação geomorfológica representativa da dinâmica do rio Mundaú, possibilitando uma determinação mais precisa do momento de extravasamento do canal.

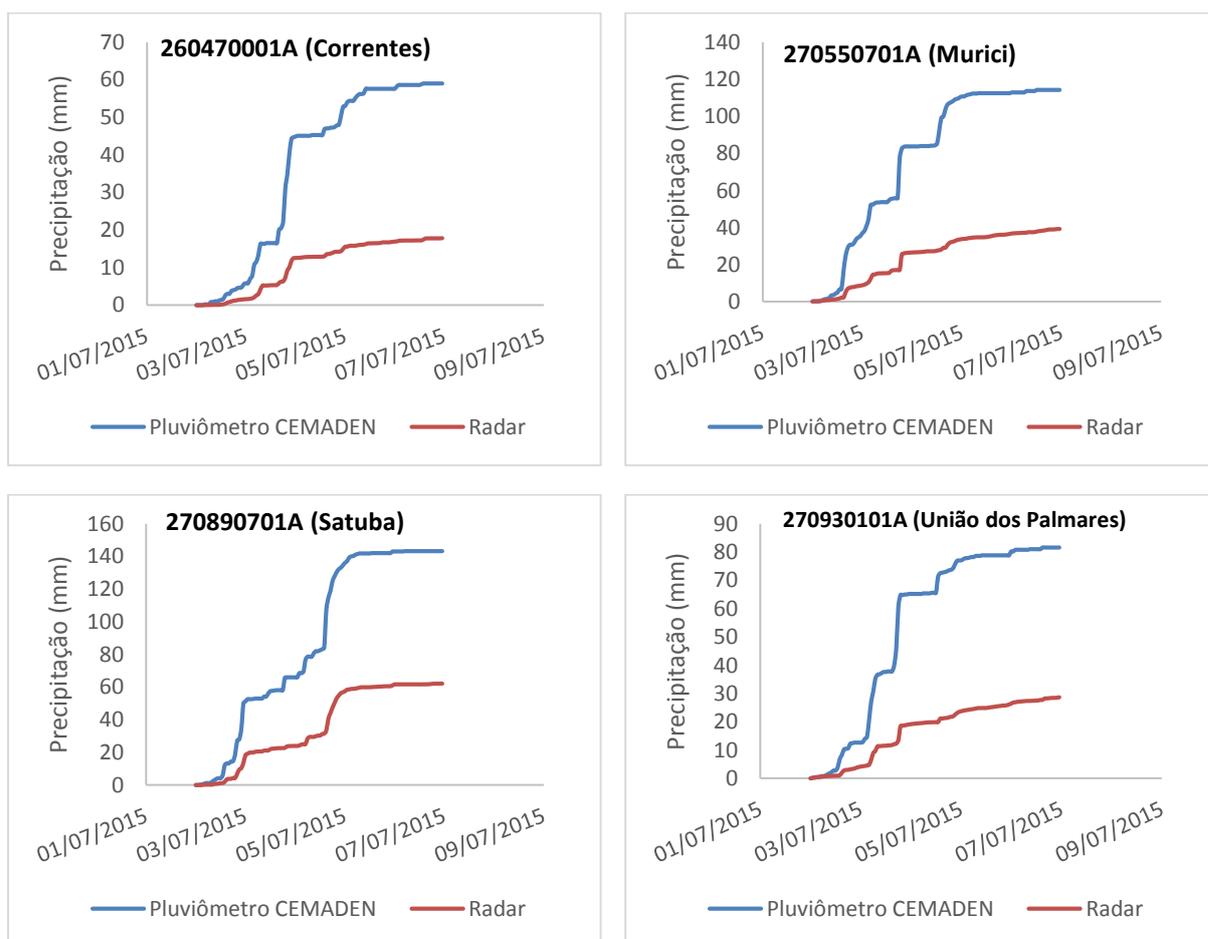
Para obter melhores resultados pelo modelo de inercial, seria necessário segmentar o rio Mundaú em pequenos trechos e obter informações geomorfológicas como o coeficiente de rugosidade, largura e profundidade do canal para cada segmento. Além do esforço de campo, o tempo de processamento para calibração dos parâmetros hidrológicos pelo método Inercial, é cerca de 10 vezes mais lento quando comparado ao de Muskingum-Cunge (PONTES et. al, 2015). Desta forma, apesar do modelo de Muskingum-Cunge ser um método simplificado, a depender das características morfológicas e hidrológicas da bacia, o modelo pode ter melhor

eficiência, além de economizar tempo de processamento e informações de entrada para o modelo quando comparado ao Inercial.

3.4 Dados de precipitação estimados pelo radar

A Figura 9 ilustra o comparativo entre a chuva acumulada observada para quatro postos (260470001A, 270550701A, 270830701A e 270930101A) do CEMADEN localizados na parte baixa, média e alta da bacia, em relação a chuva estimada pelo radar para os pontos da grade próximos as estações supracitadas no período do evento 4. Os resultados mostram que a tendência da curva de precipitação estimada pelo radar acompanha adequadamente a curva de precipitação observada, entretanto suas magnitudes são significativamente subestimadas, sendo necessário aplicar um fator de correção para melhorar suas estimativas.

Figura 9 - Comparativo da chuva acumulada para os pluviômetros do CEMADEN (linha azul) com a chuva estimada do radar (linha vermelha) no ponto da grade mais próxima as estações.



Pessoa (2013) comenta que as estimativas do radar pioram à medida que o local onde se deseja quantificar a precipitação se distancia do radar. A fim de minimizar essas distorções com a distância alvo-radar, fatores de correção (F_c) geralmente são empregados nas

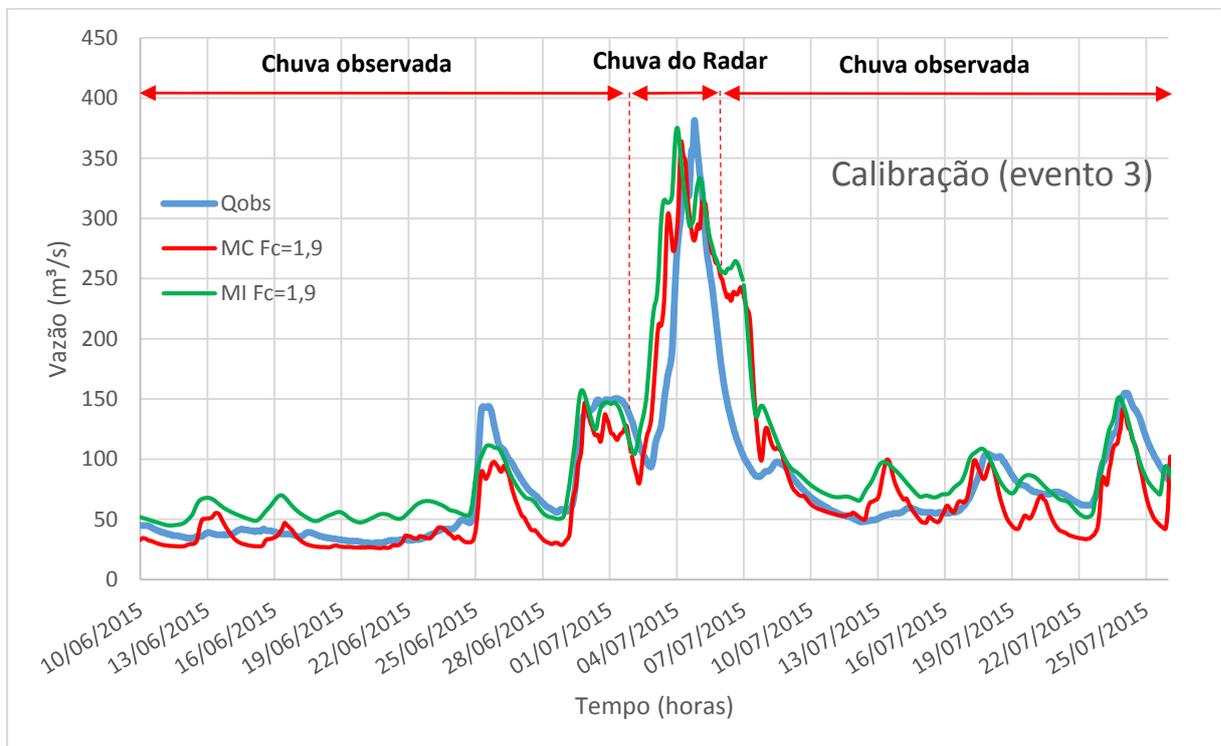
estimativas de chuva (e.g. CABRAL et al., 2016) ou novas relações Z-R são desenvolvidas para região de interesse, uma vez que as estimativas pela relação de Marshall-Palmer tendem a subestimar os valores de precipitação (e.g. WAHAB et al., 2014; TENÓRIO et al., 2010).

3.5 Aplicação do modelo hidrológico para fator de correção constante

Cabral et al. (2016) utilizaram o erro médio obtido nos trabalhos Brandes (1975) e Barnes (1964) sobre os dados do radar utilizado no presente estudo, aplicando um fator de correção de 1,6 na bacia hidrográfica do rio São Miguel. Baseado nesse valor, uma calibração prévia da precipitação do radar foi realizada para o evento 3, atribuindo valores ao fator de correção entre 1,6 a 1,9 com variação de 0,1. A nova série de precipitação foi fornecido como entrada no modelo hidrológico avaliando o resultado da simulação através da comparação com os dados observados.

A Figura 10 ilustra os melhores resultados da calibração obtida para a precipitação do radar. O método de propagação por Muskingum-Cunge foi o que apresentou melhores resultados quando comparados com o modelo inercial.

Figura 10 – Calibração com precipitação do radar para o evento 3 usando fator de correção constante.



A Tabela 4 apresenta os resultados para os coeficientes de desempenho na calibração (evento 3) e validação entre os dois métodos de propagação. O fator de correção de 1,6 foi o

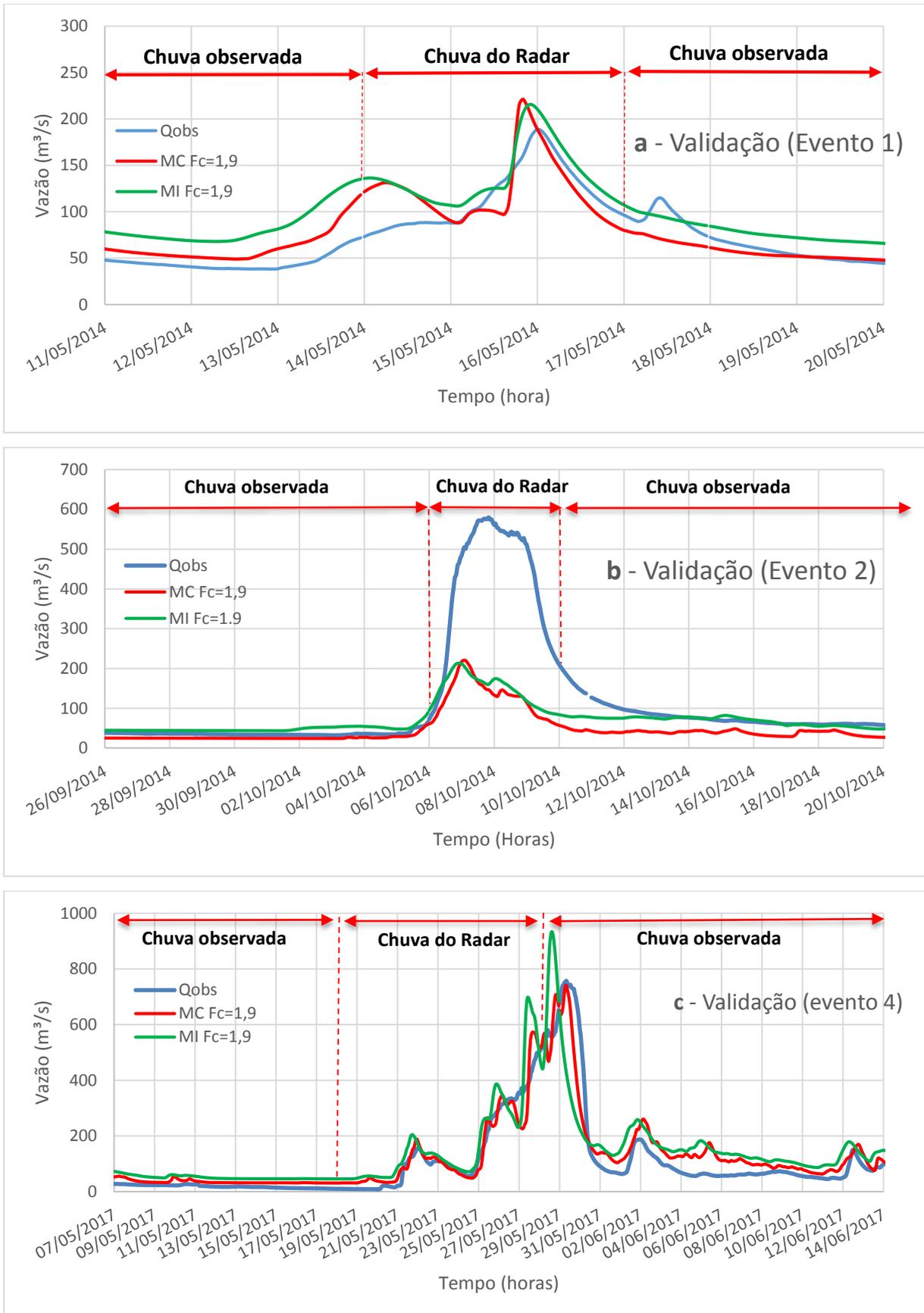
valor que apresentou melhor resultado para o coeficiente de NS na calibração do evento 3 com o modelo de Muskingum-Cunge. Apesar disso a vazão de pico teve erro de apenas 4,50% quando utilizada o fator de correção igual a 1,9 como ilustrado na Figura 10, onde é possível observar que o hidrograma simulado está adiantado no tempo em relação ao observado, o que talvez explique o baixo valor de 0,37 encontrado para o coeficiente de NS. Desta forma, a simulação na fase de validação para os demais eventos foi realizada com fator de 1,6 e 1,9.

Tabela 4 - Valores das funções objetivas utilizando a parametrização obtida na calibração manual e automática entre os dois métodos de propagação para as estimativas de precipitação do radar.

Eventos			NS		NSLog		ΔV (%)	
			MC	Inercial	MC	Inercial	MC	Inercial
Evento 1	Cal. Manual	1,6	-1,95	-1,38	-0,58	-1,12	-3,79	-9,01
		1,9	-2,05	-0,70	-1,88	-0,36	5,97	-16,64
	Cal. Automática	1,6	-0,07	0,45	-0,58	0,29	9,23	-3,42
		1,9	0,22	-0,44	-0,04	0,29	0,43	-10,42
Evento 2	Cal. Manual	1,6	-2,16	-1,87	-4,10	-2,62	-72,62	-66,45
		1,9	-1,80	-1,55	-3,16	-1,98	-69,42	-63,55
	Cal. Automática	1,6	-1,70	-1,43	-2,45	-1,57	-67,86	-62,32
		1,9	-1,26	-1,07	-1,58	-0,98	-62,88	-57,71
Evento 3	Cal. Manual	1,6	0,59	0,39	0,57	0,30	-0,04	12,77
		1,7	0,57	0,31	0,50	0,19	6,74	18,71
		1,8	0,50	0,14	0,40	0,03	13,40	26,46
		1,9	0,37	-0,09	0,26	-0,15	20,57	33,39
	Cal. Automática	1,6	0,56	0,46	0,55	0,34	1,29	13,04
		1,7	0,56	0,38	0,50	0,23	7,90	19,90
		1,8	0,51	0,23	0,42	0,08	14,47	27,40
		1,9	0,41	0,05	0,30	-0,07	21,63	34,41
Evento 4	Cal. Manual	1,6	0,77	0,85	0,80	0,76	25,53	6,12
		1,9	0,93	0,65	0,88	0,74	-9,73	-23,46
	Cal. Automática	1,6	0,87	0,90	0,86	0,76	19,95	-1,60
		1,9	0,93	0,50	0,88	0,70	-9,73	-35,73

A validação para o evento 1 mostrou melhores resultados utilizando a chuva do radar em relação a precipitação do pluviômetro. O método inercial apresentou melhores resultados em comparação ao de Muskingum-Cunge, com pico mais atenuado e hidrograma melhor definido em relação ao observado (Figura 11), sendo o fator de correção de 1,9 o que obteve melhores valores para o coeficiente de NS em comparação ao fator de 1,6 (Tabela 4).

Figura 11 - Validação utilizando a precipitação estimada por radar com fator de correção constante para os eventos 1 (a), 2 (b) e 4 (c).



O resultado da simulação para o evento 2 mostra que as vazões calculadas foram subestimadas de forma significativa quando comparadas ao observado (Figura 11), sendo refletido nas funções objetivas conforme Tabela 4. Cabe salientar que o evento em questão ocorreu em um período atípico, no mês de outubro, com vazões equiparadas ao período húmido que chegam praticamente na ordem dos 600 m³/s.

A subestimativa no valor da vazão obtida para o evento 2, pode estar associada ao tipo de fenômeno atmosférico que originou este evento. Brito et al. (2011) cita os principais sistemas sinóticos e de mesoescala que determinam o tempo no Nordeste do Brasil (NEB): Zona de Convergência Intertropical, Ventos Alísios e perturbações ondulatórias no campo dos Alísios, anticiclone subtropical, Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis, Vórtices Ciclônicos em Médios Níveis, Zonas Frontais, Ondas de Leste, Alta da Bolívia, Zona de Convergência do Atlântico Sul, linhas de instabilidade, Complexos Convectivos de Mesoescala.

Nesse sentido, uma análise do tipo de sistema sinótico para cada evento analisado é sugerida, no intuito de investigar se o tipo de sistema que originou a chuva do evento 2 pode estar associado a incertezas na geração de informação medida pelo radar em comparação aos demais eventos.

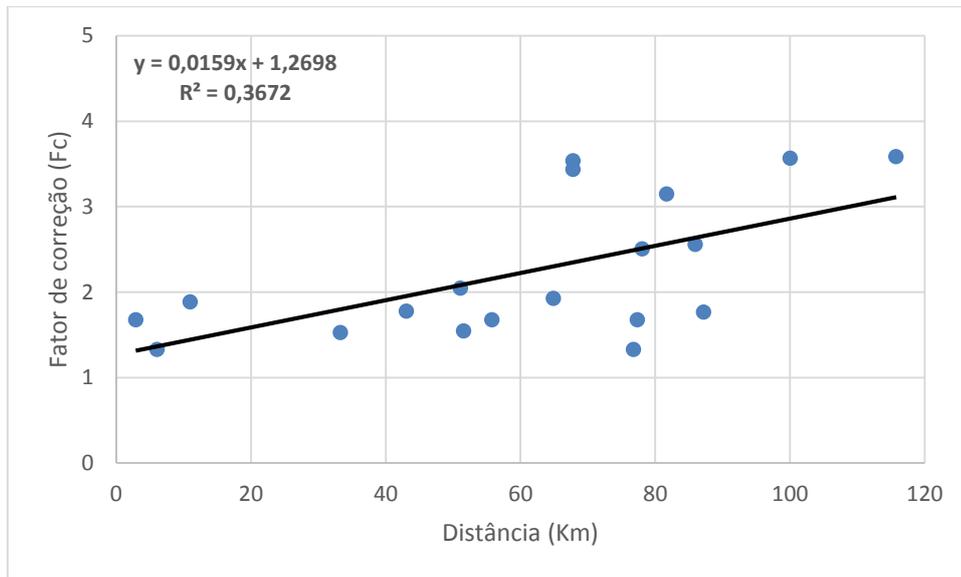
O evento 4 apresentou melhores resultados em comparação aos demais eventos, com coeficiente de NS igual a 0,93. A propagação por Muskingum-Cunge apresentou melhor desempenho em comparação ao modelo inercial, com melhor ajuste ao hidrograma observado e menor erro na vazão de pico em relação ao modelo inercial (Figura 11).

3.6 Aplicação do modelo hidrológico para fator de correção variando com a distância

Tendo em vista que a precisão nas estimativas de precipitação do radar diminuem com a distância alvo-radar, uma relação entre distância e o fator de correção foi obtida através de uma regressão linear. Foram selecionados 19 postos pluviométricos inseridos dentro da bacia (Figura 2) bem como os pontos da grade do radar próximos a estes. A precipitação acumulada para os dados observados e estimados pelo radar foi obtida e o fator de correção para cada ponto da grade foi calculada baseada nos dados observados. Posteriormente uma regressão linear foi calculada entre os fatores de correção com as respectivas distâncias do alvo em relação ao radar. O resultado obtido na regressão linear está ilustrado na Figura 12, cuja relação obtida é apresentada pela Equação 8, com ajuste obtido de 0,37.

$$Fc = 0,0159 \times Dist + 1,2698 \quad (8)$$

Figura 12 - Regressão linear entre fator de correção e distância do ponto da grade ao radar.

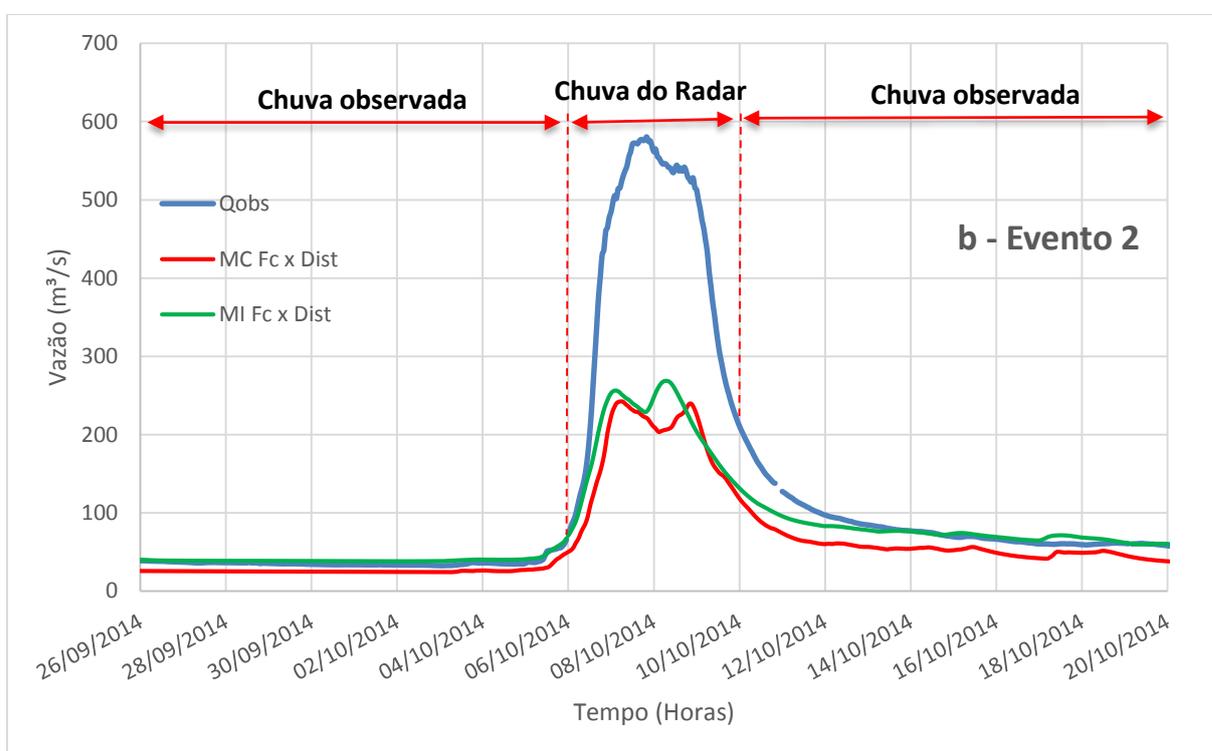
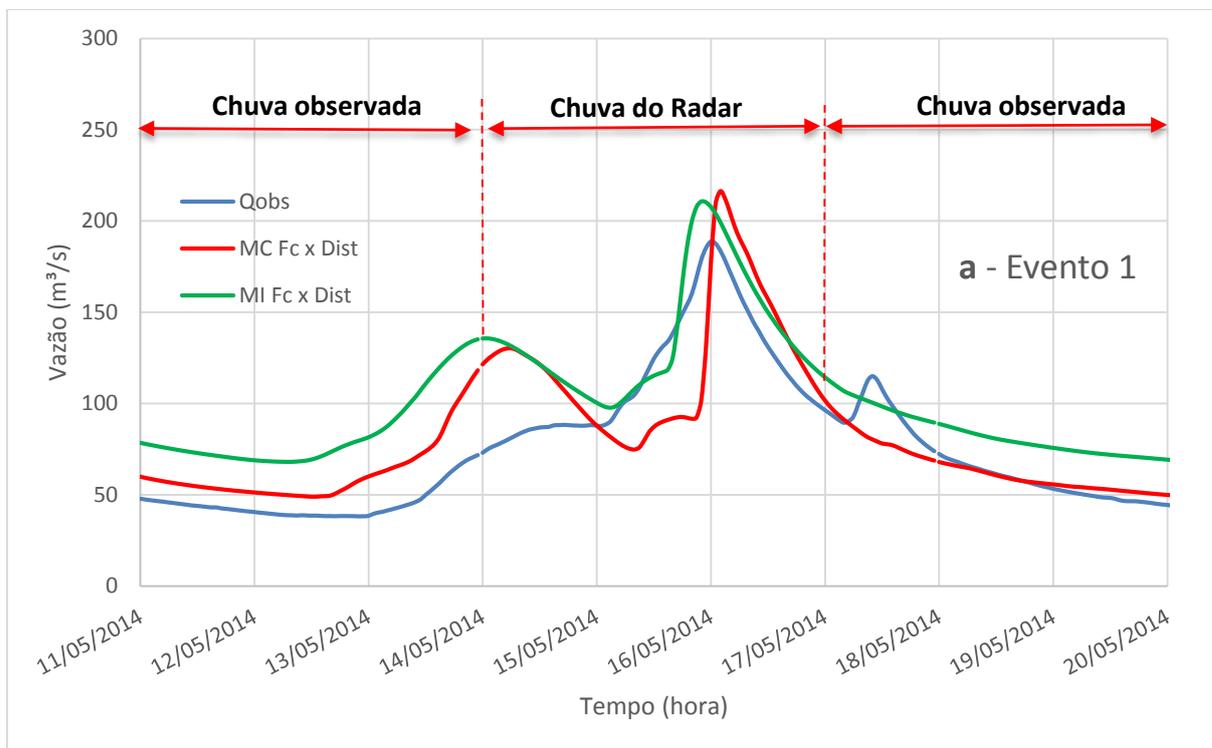


A relação F_c x distância foi aplicada para os 4.129 pontos da malha do radar, que foram consideradas como estações virtuais e, foram fornecidas como entrada no modelo hidrológico para as estimativas das vazões.

A Figura 13 ilustra o resultado para os quatro eventos aplicando os dois métodos de propagação de vazão. De modo geral todos os eventos foram superestimados com exceção do evento 2, que apresentou ajuste abaixo do hidrograma observado. Os eventos 1 e 3 apresentaram resultados mais significativos com melhor ajuste ao hidrograma observado, com erro na vazão de pico de 11% para o evento 1, e de 2% para o evento 3, apesar disso não ser refletido nos indicadores de desempenho (Tabela 5).

Os resultados apresentados na seção 3.5 para o fator de correção constante, revelaram melhor desempenho quando comparado ao fator de correção variando com a distância, mostrando que a utilização de um valor médio aplicado para os dados de precipitação estimado por radar, mostra-se mais adequada para representação do comportamento hidrológico da bacia do rio Mundaú.

Figura 13 - Resultados da simulação no MGB aplicando a relação Fc x Distância para precipitação do radar a cada ponto da grade para os eventos 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d).



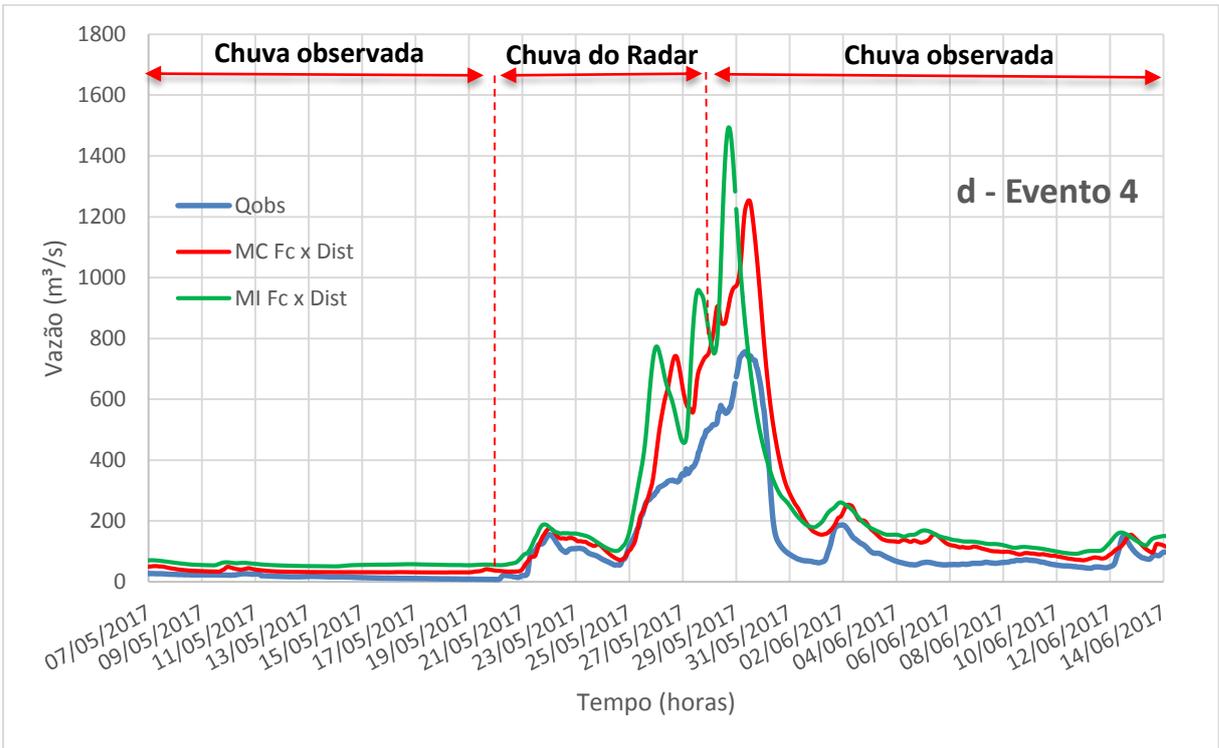
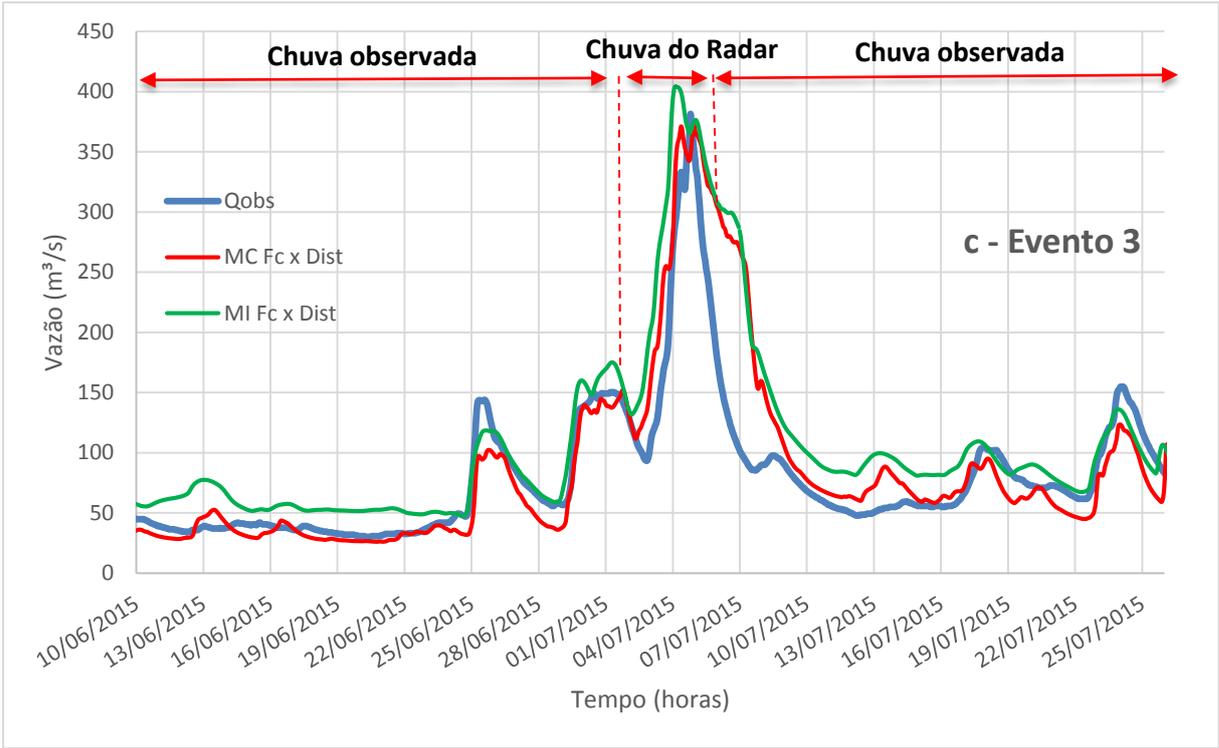


Tabela 5 - Valores das funções objetivas utilizando a parametrização obtida na calibração manual e automática entre os dois métodos de propagação para as estimativas de precipitação do radar.

Eventos		NS		NSLog		ΔV (%)	
		MC	Inercial	MC	Inercial	MC	Inercial
Evento 1	Cal. Manual	-1,83	-0,81	-1,55	-0,32	-8,67	-20,90
	Cal. Automática	-0,06	0,37	-0,24	0,25	-0,97	-15,30
Evento 2	Cal. Manual	-1,48	-1,23	-2,15	-1,31	-65,66	-59,94
	Cal. Automática	-0,81	-0,55	-0,66	-0,19	-55,65	-49,82
Evento 3	Cal. Manual	0,17	-0,41	0,13	-0,32	29,57	42,72
	Cal. Automática	0,14	-0,43	0,14	-0,31	32,40	47,22
Evento 4	Cal. Manual	0,53	-1,97	0,85	0,62	-34,17	-77,29
	Cal. Automática	0,05	-1,60	0,80	0,55	-51,24	-87,81

4 CONCLUSÃO

O presente estudo avaliou o desempenho do modelo hidrológico MGB utilizando as entradas do modelo em frequência horária. Os resultados mostraram que o modelo teve um ganho significativo utilizando os dados horários quando comparados as entradas diárias obtida por outros estudos aplicado a bacia do rio Mundaú (e.g MONTE, 2013; CHAVES, 2015; ALVES, 2016). Também foi avaliado a eficiência do MGB ao utilizar o modelo Inercial em substituição ao de Muskingum-Cunge como método de propagação de vazão.

Os parâmetros do modelo foram calibrados manualmente e em seguida de forma automática usando o modelo de Muskingum-Cunge. Os resultados obtidos foram comparados ao modelo Inercial mantendo o mesmo conjunto de parâmetros hidrológicos. Na fase de calibração foram obtidos coeficiente de Nash de 0,94 para o modelo de Muskingum-Cunge e 0,75 para o modelo Inercial, considerado adequado por Collischonn (2001).

Na fase de validação o MGB superestimou a vazão para o evento 1 e 4 conforme ilustrado na Figura 7. As superestimavas observada nos dois eventos podem ser explicados pela baixa quantidade de estações pluviométricas, que segundo Chen et al. (2016) a densidade da rede pluviométrica, é fator limitante para caracterizar a distribuição espacial e temporal da precipitação em uma bacia hidrográfica. No período do evento 1 existiam apenas 19 estações para representação espacial e temporal do evento, já no evento 4 apesar do aumento na malha de monitoramento para 48 estações, observou-se que chuva estava concentração fora da bacia, e em função da má distribuição espacial das estações um volume significativo de água foi transferido para dentro das mini-bacia quando interpolado pelo MGB (Figura 8).

Os resultados mostram que o modelo de Muskingum-Cunge obteve melhor desempenho quando comparado ao modelo Inercial que de forma geral superestimou as vazões simuladas. Essa diferença pode ser explicada porque, ao contrário do método de Muskingum-Cunge, no método de propagação Inercial é representada a inundação da planície e a evaporação direta das áreas inundadas (PONTES et. al, 2015), sendo que a bacia do Mundaú não apresenta área de planície com grandes extensões inundáveis.

Observou-se que as estimativas do radar utilizado no presente estudo tendem a subestimar a precipitação observada (Figura 9), também observado por Cabral et al. (2016), Wahab et al. (2014) e Tenório et al. (2010), sendo necessário aplicar fator de correção aos dados do radar. O fator de 1,6 aplicado por Cabral et al. (2016) e de 1,9 obtido na calibração do evento 3, foram os valores que mostraram melhor performance no modelo hidrológico. Na

fase de validação do MGB utilizando a precipitação estimada pelo radar para o fator de correção constante (Figura 11), observou-se que os eventos 1 e 4 obtiveram bom ajuste quando comparado ao hidrograma observado, com coeficiente de NS de 0,45 e 0,93 para os eventos 1 e 4, respectivamente. Estes resultados mostram que os dados do radar vêm como alternativa para suprir as limitações da rede pluviométrica em representar a distribuição espacial e temporal da precipitação.

Tendo em vista que a precisão nas estimativas de precipitação do radar diminui com a distância alvo-radar, uma relação entre distância e o fator de correção foi avaliada através de uma regressão linear aplicada a cada ponto da grade do radar. Os resultados não se mostraram adequados quando comparados com o fator de correção constante, indicando que um valor médio aplicado a chuva estima pelo radar é suficiente para representar a condição de precipitação da região.

O presente trabalho mostra que o radar meteorológico pode ser uma alternativa promissora para se trabalhar com dados de alta resolução nas estimativas de precipitação, superando as limitações da rede pluviométrica na representação espacial e temporal da chuva ou mesmo melhor a rede já existente. Por fim, espera-se que os resultados obtidos vêm contribuir na geração de informação para bacia do rio Mundaú, fornecendo subsídios aos gestores no planejamento dos recursos hídricos e políticas públicas que venham resultar em medidas mitigadoras aos efeitos adversos das inundações para bacia do rio Mundaú.

5 REFERÊNCIAS

ALVES, A. L. Efeito de Teleconexões Climáticas na Variabilidade Espaço-Temporal dos Índices de Disponibilidade Hídrica em Uma Bacia Hidrográfica sob Transição Climática (Tropical/Semiárido). 2016. Dissertação de Mestrado, (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió-AL, 2016.

ALVES, A. L.; FRAGOSO JR., C. R.; NASCIMENTO, F. A. B., CHAVES, M. B., QUEIROZ, K. S., RABELO, T. M. L. Calibração do modelo MGB-IPH para vazões mínimas na bacia hidrográfica do rio Mundaú (AL/PE). In: XXI SIMPÓSIO DE BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, Brasília, DF. Anais... Porto Alegre: ABRH, p. 1-8, 2015.

BARNES, S. L. A technique for maximizing details in numerical weather map analysis. *Journal of Applied Meteorology*, v. 3, p. 396-409, 1964. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0450\(1964\)003%3C0396:ATFMDI%3E2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0450(1964)003%3C0396:ATFMDI%3E2.0.CO;2)

BRITO, B. M.; LEVIT, V.; FEDOROVA, N.; MOLION, L. C. B.; TENÓRIO, R. S.; RODRIGUES, R. N.; SILVA, B. F. P.; ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DAS TROVOADAS NO ESTADO DE ALAGOAS, PREVISÃO À CURTO PRAZO. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 26, n. 2, p. 243 - 256, 2011.

BRANDES, E. A. Optimizing rainfall estimates with the aid of radar. *Journal of Applied Meteorology*, v. 14, p. 1339-1345, 1975. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0450\(1975\)014<1339:OREWTA>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0450(1975)014<1339:OREWTA>2.0.CO;2)

BELL, V. A. and MOORE, R. J.: A grid-based distributed flood forecasting model for use with weather radar data: Part 1. Formulation, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2, p. 265-281, doi:10.5194/hess-2-265-1998, 1998a.

BELL, V. A. and MOORE, R. J.: A grid-based distributed flood forecasting model for use with weather radar data: Part 2. Case studies, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2, p. 283-298, doi:10.5194/hess-2-283-1998, 1998b.

BORGA, M. Accuracy of radar rainfall estimates for streamflow simulation, *J. Hydrol.* 267, p. 26-39, 2002.

BRUNNER, G. W.; PIPER, S. S.; JENSEN, M. R.; CHACON, B. Combined 1D and 2D Hydraulic Modeling within HEC-RAS. *World Environmental and Water Resources Congress 2015: Floods, Droughts, and Ecosystems*. p. 1432-1443. 2015.

CABRAL, S. L.; SAKURAGI, J.; SILVEIRA, C. S. Incertezas e erros na estimativa de vazões usando modelagem hidrológica e Precipitação por RADAR. *Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, v. 12 n. 1 Taubaté – Jan./Feb. 2017. doi:10.4136/ambi-agua.

CARPENTER, T. M.; GEORGAKAKOS, K. P.; SPERFSLAGEA, J. A. On the parametric and NEXRAD radar sensitivities of a distributed hydrologic model suitable for operational use, *J. Hydrol.*, 253, p. 169-193, 2001.

COLLISCHONN, W. Simulação hidrológica em grandes bacias. 2001. 194f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D.; SILVA, B. C. DA.; TUCCI, C. E. M. The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modelling. *Hydrological Sciences Journal*, v. 52, n. 5, p. 878-895, Mai. 2007.

COLLISCHONN, B.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Daily hydrological modeling in the Amazon basin using TRMM rainfall estimates. *Journal of Hydrology*, v. 360, n. 1-4, p. 207-216, Out. 2008.

COSTA, D. D. Previsão hidrológica de Longo-Prazo baseada em Componentes Climáticas em Bacias Hidrográficas Semiáridas/Tropicais. Dissertação de Mestrado, (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió-AL, 2014.

COLLIER, C. G. and KNOWLES, J. M. Accuracy of rainfall estimates by radar, Part III: Application for short-term flood forecasting, *J. Hydrol.*, 83, p. 237-249, 1986.

CHAVES, M. B.; FREIRE, P. A. F. F.; FRAGOSO JR., C. R. F.; DA SILVA JR., R. S. A previsão de vazão em curto prazo na bacia do rio Mundaú através do acoplamento unidirecional entre modelos. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2014. Bento Gonçalves (Rio Grande do Sul). Anais ... Bento Gonçalves (Rio Grande do Sul): XX SBRH, 2014.

CHAVES, M. B. Simulação hidrometeorológica em bacia semiárida/tropical através de um modelo atmosférico-hidrológico acoplado. 2016. Dissertação de Mestrado, (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió-AL, 2016.

CHEN, X.; ZHANG, L.; GIPPEL, C. J.; SHAN, L.; CHEN, S.; YANG, W. Uncertainty of Flood Forecasting Based on Radar Rainfall Data Assimilation. *Hindawi*. 12 p. 2016.

CLUCKIE, I. D. and OWENS, M. D. Real-time rainfall-runoff models and use of weather radar information, in: Weather Radar and Flood Forecasting, John Wiley& Sons, 1987.

DMITRIEVA, T. G.; PESKOV, B. E. Numerical forecast with the mesosynoptic specification of extremely severe squalls in the European part of Russia (Case study for June 13 and July 29, 2010). Russian Meteorology and Hydrology, v. 38, n. 2, p. 71-79, Fev. 2013.

EM-DAT: THE INTERNATIONAL DISASTER DATABASE/CENTRE FOR RESEARCH ON THE EPIDEMIOLOGY OF DISASTERS – CRED. Disaster profile. Disponível em: http://www.emdat.be/disaster_profiles/index.html. Acessado em 08 de março de 2017.

FRAGOSO JR., C. R., PEDROSA, V. A., SOUZA, V. C. B. Reflexões sobre a cheia de junho de 2010 nas bacias do rio Mundaú e Paraíba. Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste (SRHN). Fortaleza-CE, 2010.

FRAGOSO JR., C. R. – coordenador do projeto. Sistema de apoio ao gerenciamento de recursos hídricos na bacia do rio mundaú (AL/PE). Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, chamada MCTI/CNPq/CT – Hidro N° 35/2013 – Gerenciamento de Recursos Hídricos. Universidade Federal de Alagoas. Maceió-AL, 2013.

GAMA, W. M. Impacto das mudanças climáticas na resposta hidrológica da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Meio (AL/PE). Dissertação de Mestrado, (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió-AL, p. 74, 2011.

GONÇALVES, F. M. Utilização de radar meteorológico em hidrologia. 2005. 116f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

HOSSAIN, F.; ANAGNOSTOU, E. N.; DINKU, T.; BORGA, M. Hydrological model sensitivity to parameter and radar rainfall estimation uncertainty, Hydrol. Process., 18, p. 3277-3291, 2004.

MARSHALL, J. S. & PALMER, W. M. K. The distribution of raindrops with size. Journal of Meteorology, v. 5, p. 165-166, 1948.

MONTE, B. E. Mapeamento de inundação no município de Rio Largo. Dissertação de Mestrado, (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió-AL, 2013.

MONTE, B. E. O.; COSTA, D. D.; CHAVES, M. B.; MAGALHÃES, L. O.; UVO, C. B. Hydrological and hydraulic modelling applied to the mapping of flood-prone areas. RBRH: Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 21, n. 1, p. 152-167, Jan./Mar. 2016.

MOREIRA, I. A. Modelagem hidrológica chuva-vazão com dados de radar e pluviômetros. Dissertação de Mestrado, (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR, 2005.

PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W.; BUARQUE, D. C. Validation of a full hydrodynamic model for large-scale hydrologic modelling in the Amazon. *Hydrological Processes*, v. 27, n. 3, p. 333-346, Jan. 2013.

PESSOA, M. L. Hidrometeorologia com Radar. In: TUCCI, C. E. M.; *Hidrologia: ciência e aplicação*. 4 ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2013. v. 4, Capítulo 23, p. 889. 2013.

PAZ, A. R. DA.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M.; PADOVANI, C. R. Large-scale modelling of channel flow and floodplain inundation dynamics and its application to the Pantanal (Brazil). *Hydrological Processes*, v. 25, n. 9, p. 1498-1516, Abr. 2011.

PONTES, P. R. M.; COLLISCHONN, W.; FAN, F. M.; PAIVA R. C. D.; BUARQUE, D. C. Modelagem hidrológica e hidráulica de grande escala com propagação inercial de vazões. *RBRH: Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. v. 20, p. 888 – 904, nº. 4, out./dez. 2015. DOI: 10.21168/rbrh.v20n4.p888-904.b

RAMLI, S.; BAKAR, S. H. A.; TAHIR, W. Radar Hydrology: New Z/R Relationships for Klang River Basin, Malaysia, in Proc. International Conference on Environment Science and Engineering IPCBEE, v. 8, p. 537 – 541. DOI: 10.1109 / CHUSER.2011.6163790, 2011.

REICHEL, F.; VERWORN, H. R.; KRÄMER, S., CLUCKIE, I.; RICO-RAMIREZ, M. A. Radarbased flood forecasting for river catchments, *Proc. ICE-Water Manage.*, 162, p. 159-168, doi:10.1680/wama.2009.162.2.159, 2009.

SALGUEIRO, J. H. P. B. Avaliação de rede pluviométrica e análise de variabilidade especial da precipitação: Estudo de caso na bacia do rio Ipojuca em Pernambuco. Dissertação de Mestrado, (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, 2005.

SRINIVAS, C. V.; HARIPRASAD, D.; BHASKAR RAO, D. V.; ANJANEYULU, Y.; BASKARAN, R.; VENKATRAMAN, B. Simulation of the Indian summer monsoon regional climate using advanced research WRF model. *International Journal of Climatology*, v. 33, n. 5, p. 1195-1210, Abr. 2013.

TENÓRIO, R. S.; MORAES, M. C. S.; KWON, B. H. RAINDROP DISTRIBUTION IN THE EASTERN COAST OF NORTHEASTERN BRAZIL USING DISDROMETER DATA. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 25, n. 4, p. 415 – 426, 2010.

- TUCCI, C. E. M. Inundações Urbanas. Rio Grande do Sul: ABRH/RHAMA, 389 p. 2007.
- TUCCI, C. E. M. Modelos Hidrológicos. Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Editora Universitária UFRGS, Porto Alegre, 1998.
- TRAPERO, L.; BECH, J.; LORENTE, J. Numerical modeling of heavy precipitation events over Eastern Pyrenees: Analysis of orographic effects. *Atmospheric Research*, v. 123, n. n/d, p. 368-383, Abr. 2013.
- WAHAB, M. A.; ABDULLAH R. B.; ABUSTAN I. B.; ADAM M. K. M.; Nur Atiqah A. A. The Radar-Rainfall Relationship for Northern Region of Peninsular Malaysia. *International Journal of Innovation, Management and Technology*, Vol. 5, N°. 2, p. 143 – 147. DOI: 10.7763/IJIMT.2014.V5.503, April 2014.
- WMO. Guide to Hydrological Practices, Data Acquisition and Processing, Analysis, forecasting and other Applications. 5ª edição, Nº 168, Geneva – Suíça, Cap. 20, p. 259, 1994.
- YUCEL, I.; ONEN, A.; YILMAZ, K. K.; GOCHIS, D. J. Calibration and evaluation of a flood forecasting system: utility of numerical weather prediction model, data assimilation and satellite-based rainfall. *Journal of Hydrology*, vol. 523, p. 49-66, 2015.
- ZHU, D.; XUAN, Y. and CLUCKIE, I. Hydrological appraisal of operational weather radar rainfall estimates in the context of different modelling structures. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 18, n. 1, p. 257-272, 2014.
- PEREIRA, M. et al. Integração do modelo hidrológico para grandes bacias MGB-IPH e sistemas de informação geográfica para suporte à decisão de outorga de direito de uso da água. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, v. 9, n. 2, 21-33, ISSN 2359- 1919, 2012.