

AVALIAÇÃO DA PREVISÃO DE CURTO PRAZO DE CHUVA NA BACIA DO ALTO JAGUARIBE DURANTE A CHEIA DE 2008

Teresa Luisa Lima de Carvalho¹; Dirceu Silveira Reis Junior²; Paulo Henrique Santiago de Maria³; Sérgio S. Sombra⁴, Alexandre Araújo Costa⁵; Antonio Carlos Santana dos Santos⁶

RESUMO --- Este artigo apresenta um estudo de verificação da previsão de chuva obtida através de modelos numéricos de tempo, num horizonte de até 48 horas, nas bacias hidrográficas incrementais dos reservatórios Orós e Castanhão, no Estado do Ceará. As previsões são realizadas de forma operacional, duas vezes ao dia, utilizando o modelo *Regional Atmospheric Modeling System* (RAMS), desenvolvido pela *Colorado State University*, alimentado com dados do modelo global do CPTEC. O estudo inclui a avaliação de duas parametrizações de convecção, Kuo e Kain & Fritsch. A verificação das previsões foi realizada tanto com base nos valores numéricos de precipitação quanto em tabelas de contingência baseadas em faixas de valores de precipitação. O desempenho do modelo foi comparado com o modelo de persistência. Devido à dificuldade de se obter previsões do passado, a análise limitou-se às previsões realizadas entre os dias 8 de janeiro e 28 de maio, período que cobre a cheia de 2008. Os resultados mostram que o modelo numérico de tempo possui um desempenho melhor do que aquele obtido pelo modelo de persistência. Além disso, observou-se que o sistema de previsão fornece informações importantes que podem ser usadas em sistemas de alerta ou em modelos de previsão de vazão.

ABSTRACT --- This paper presents a verification study of a short-term precipitation forecast system (up to 48 h lead time) based on numerical weather modelling. The study focuses on the performance of the forecast system for the drainage basins of Orós and Castanhão reservoirs, both located in the State of Ceará. The precipitation forecasts, issued twice a day, is based on the results of the *Regional Atmospheric Modeling System* (RAMS), developed by Colorado State University, fed by CPTEC's global circulation model data. The study investigates the performance of two convective parameterization schemes, Kuo and Kain & Fritsch. The verification was carried out based upon contingency tables. The performance of the numerical weather model was compared to a persistent model. Due to the lack of and the difficulty in generating precipitation forecasts of previous years, the whole analysis is based solely on the rainy season of 2008, more specifically, on the January 8th – May 28th period. Results show that the numerical weather model outperforms the persistent model for both 24h and 48 h lead times. It was also concluded that the precipitation forecast system provides valuable information that may be used in a warning system.

Palavras-chave: Previsão de chuva, modelo numérico de tempo, verificação.

¹ Pesquisadora do Departamento de Recursos Hídricos da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos - FUNCEME. Av. Rui Barbosa, 1246, Aldeota, Fortaleza - CE, 60115-221. e-mail: teresaluisa10@gmail.com.

² Pesquisador do Departamento de Recursos Hídricos da FUNCEME. dirceu.reis@gmail.com.

³ Pesquisador do Departamento de Meteorologia da FUNCEME.

⁴ Pesquisador do Departamento de Meteorologia da FUNCEME

⁵ Professor Titular do Curso de Mestrado em Ciências Físicas Aplicadas da Universidade Estadual do Ceará. Av. Paranjana, 1700 – Itaperi, Fortaleza - CE - Brasil - CEP: 60740-903. alexandrearaujoc@gmail.com.

⁶ Professor Assistente do Curso de Mestrado em Ciências Físicas Aplicadas da Universidade Estadual do Ceará. Av. Paranjana, 1700 – Itaperi, Fortaleza - CE - Brasil - CEP: 60740-903. dr.acss@gmail.com.

1 – INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da modelagem atmosférica nos últimos anos, aliado ao rápido crescimento da capacidade de armazenamento e processamento computacional, contribuiu para o uso cada vez mais freqüente de modelos numéricos na previsão de tempo.

Existe uma percepção na comunidade de recursos hídricos de que estes modelos numéricos de tempo possam vir a ser usados em sistemas de previsão de vazões, embora ainda haja discussões importantes de como empregar as previsões obtidas por estes modelos para gerar previsão de vazões. As causas destas discussões estão relacionadas com o desempenho destes modelos em prever a chuva, que varia com a região onde se pretende realizar as previsões, os sistemas meteorológicos atuantes, e as escalas espacial e temporal do problema.

Mesmo que as previsões de chuva obtidas por estes modelos não sejam empregadas em sistemas de previsão de vazão, estas previsões podem ser utilizadas em sistemas de alerta, dando subsídios às atividades da Defesa Civil, desde que os tomadores de decisão tenham um entendimento, ou sensibilidade, das potencialidades e limitações destes modelos numéricos de tempo, até para que seja possível definir, para cada tipo de previsão, quais seriam as ações a serem tomadas pela Defesa Civil, que pode incluir desde um alerta à sociedade até a adoção de medidas mais extremas como remoção de toda uma comunidade localizada em área de risco.

Para que isto seja possível, é importante que haja um processo contínuo de verificação das previsões destes modelos, de modo que não apenas os usuários destas informações, mas também aqueles que desenvolvem e empregam estes modelos na previsão de tempo, possam entender os resultados obtidos por estes modelos.

Este artigo descreve a primeira tentativa de verificação da previsão de chuva diária do modelo *Regional Atmospheric Modeling System* (RAMS), empregado pela FUNCEME, desde o início de 2008, para obter previsões de 24 e 48 h para todo o nordeste brasileiro. Este estudo foca na previsão de chuva média na bacia, tendo em vista o interesse em empregar estas previsões num sistema de previsão de vazão que utiliza um modelo hidrológico concentrado.

O artigo continua com uma descrição do modelo numérico de tempo, seguido pelas métricas de verificação utilizadas no estudo. Em seguida, na seção 4, são apresentados e discutidos os resultados deste estudo de verificação, que procurou avaliar o desempenho do modelo RAMS em relação a um modelo de persistência. Por último, na seção 5, são apresentadas as discussões finais do artigo.

2 – MODELAGEM NUMÉRICA DE TEMPO

2.1 – O Modelo RAMS

A Previsão Numérica de Tempo é feita operacionalmente pela Funceme com o *Regional Atmospheric Modeling System* (RAMS) 6.0, tratando-se de um modelo de área limitada desenvolvido a partir do conjunto completo de equações não-hidrostáticas compressíveis da atmosfera, além de equações de conservação para grandezas escalares. Conta ainda com diferentes opções de parametrização que permitem a reprodução de grande parte dos fenômenos atmosféricos mais relevantes (Cotton et al., 2003; Pielke et al., 1992).

2.2 – Configurações das Simulações

Neste estudo são empregados os resultados das previsões de tempo feitas entre 8 de Janeiro de 2008 e 28 de Maio de 2008. A cada dia são efetuadas duas simulações cobrindo um prazo de 84 horas com uma grade horizontal de 115 por 115 pontos, espaçados em 25 km sobre a região Nordeste. A **Figura 1** apresenta a grade computacional do modelo na região do Estado do Ceará.

Na determinação das condições de contorno são usados resultados da previsão do modelo global T126L28 mantido pelo CPTEC/INPE. A caracterização da superfície é feita com dados de topografia, NDVI, tipo de vegetação e uso do solo, e climatológicos fornecidos pela página internet de apoio ao modelo RAMS, enquanto a assimilação da temperatura da superfície do mar (tsm) é feita diariamente usando estimativas de satélites fornecidas por *Remote Sensing Systems* (RSS). Devido a inconstâncias na aquisição dos dados de grande escala, não estão disponíveis os resultados das previsões feitas nos dias 25/01, 16/02, 01/03, 16/04, 26/04 e 25/05.

No que diz respeito às parametrizações físicas, é usado o esquema de Chen & Cotton (1987; 1983) para radiação em ondas curtas e longas, utilizado a cada 20 minutos, a turbulência é resolvida com o esquema de Mellor & Yamada (1982), a microfísica de nuvens é parametrizada conforme o esquema proposto por Walko et al. (1995), e a interação com superfície é resolvida pelo submodelo LEAF2, descrito por Walko et al. (2000). Foram utilizadas duas parametrizações de convecção, uma descrita por Kain & Fritsch (1993) e a outra que utiliza uma modificação do esquema de Kuo (1974), proposta por Tremback (1990).

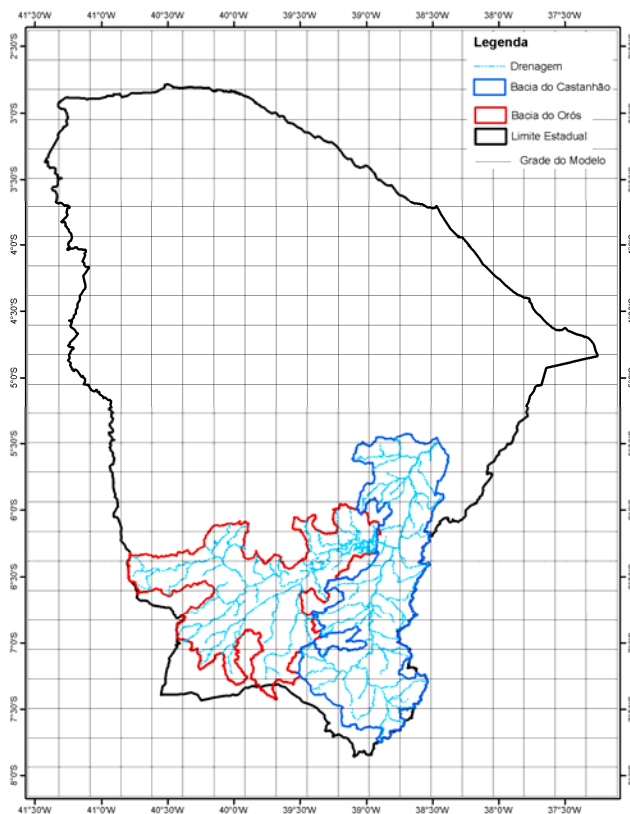


Figura 1: Localização das bacias incrementais dos reservatórios Orós (vermelho) e Castanhão (azul) e a grade de 25 km do modelo RAMS empregada na previsão de chuva do nordeste brasileiro.

3 – MÉTRICAS DE VERIFICAÇÃO

A qualidade da previsão de precipitação pode ser avaliada em termos de variável contínua e discreta. Neste estudo, em termos de variável contínua, a análise se restringiu ao cálculo do *bias* e do coeficiente de correlação. O *bias* (B) tem o propósito de identificar tendências entre as duas séries, sendo aqui avaliado em termos percentuais conforme a equação 1

$$B = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \right) \times 100, \quad (1)$$

onde P_i e O_i são os valores previstos e observados, e n é o número de observações, de forma que valores de *bias* negativos quantificam a tendência percentual de subestimativa da precipitação, enquanto que os positivos indicam a tendência de superestimativa.

Quanto ao coeficiente de correlação, o objetivo é avaliar o grau de linearidade entre as séries de previsão e observação, sabendo-se que uma previsão perfeita apresenta coeficiente de correlação unitário.

A avaliação da previsão em termos de variável discreta se inicia pela discretização das séries contínuas em N faixas ou categorias, seguida da análise da distribuição conjunta das séries de

previsão (Prev i) e observação (Obs j), onde i e j , variam entre 1 e N , sendo N o número de categorias.

A distribuição conjunta de previsões e observações, que associa uma probabilidade à ocorrência de todas as combinações entre Prev j e Obs i por uma função de distribuição bivariada $P(\text{Obs } i, \text{Prev } j)$, pode ser fatorada em dois caminhos, vindos da definição de probabilidade condicional, quais sejam:

$$P(\text{Obs } i, \text{Prev } j) = P[\text{Prev } j|\text{Obs } i] \times P[\text{Prev } j], \text{ com } i \text{ e } j \text{ variando de } 1 \text{ a } N \quad (2)$$

e
$$P(\text{Obs } i, \text{Prev } j) = P[\text{Obs } i|\text{Prev } j] \times P[\text{Obs } i], \text{ com } i \text{ e } j \text{ variando de } 1 \text{ a } N, \quad (3)$$

onde $P[\text{Prev } j|\text{Obs } i]$ é a probabilidade da previsão Prev j ocorrer dado que a observação Obs i ocorra, $P[\text{Obs } i|\text{Prev } j]$ é a probabilidade de uma observação Obs i ocorrer dado que uma previsão Prev j ocorra, e $P[\text{Prev } j]$ e $P[\text{Obs } i]$ são as probabilidades de ocorrência da previsão Prev j e da observação Obs i , respectivamente (Wilks; 2006).

Note-se que quanto maior o número de faixas ou categorias, maior é a complexidade da análise. Numa discretização da precipitação em três faixas, que foi a utilizada neste trabalho, há nove pares de combinações possíveis entre os eventos de previsão e observação. Tais combinações podem ser organizadas em uma tabela, denominada tabela de contingência, auxiliando na análise da previsão.

A Figura 2 exemplifica uma tabela de contingência de uma previsão dicotômica (sim/não), que é o caso mais simples, e como uma previsão em três categorias pode ser facilmente convertida numa de duas categorias, ao considerar cada uma das faixas como um evento dicotômico. Neste caso as letras $a, b, c, d, r, s, t, u, v, w, x, y, z$ representam as quantidades ocorridas em cada par de previsão/observação possível.

		Observação	
		sim	não
Prev	sim	a	b
	não	c	d

		Observação		
		fx1	fx2	fx3
Previ.	fx1	r	s	t
	fx2	u	v	w
	fx3	x	y	z

fx1	a=r	b=s+t
	c=u+x	d=v+w+y+z
fx2	a=v	b=u+w
	c=s+y	d=r+t+x+z
fx3	a=z	b=x+y
	c=t+w	d=r+s+u+v

Figura 2: Redução da tabela de contingência de 3 eventos para 2 eventos, adaptado de Wilks (2006)

Através da tabela de contingência, de 2 eventos é possível facilmente obter as probabilidades condicionais pela relação entre as quantidades a, b, c e d , como se vê abaixo nas formulações das probabilidades condicionais do observado dado o previsto:

$$P [\text{Obs}_{\text{sim}}|\text{Prev}_{\text{sim}}] = a / (a+b) \quad (2)$$

$$P [\text{Obs}_{\text{não}}|\text{Prev}_{\text{sim}}] = b / (a+b) \quad (3)$$

$$P [\text{Obs}_{\text{sim}}|\text{Prev}_{\text{não}}] = c / (c+d) \quad (4)$$

$$P [\text{Obs}_{\text{não}}|\text{Prev}_{\text{não}}] = d / (c+d) \quad (5)$$

Wilks (2006) apresenta uma lista de aspectos que podem ser utilizados para avaliar a qualidade da previsão: a precisão, que reflete o quanto os pares de previsão e observação são correspondentes; o *bias* sistemático que relaciona o número de vezes que o evento foi previsto com o número com que foi observado; a calibração e a resolução que estão relacionadas à probabilidade de ocorrência do observado dado o previsto $P [\text{Obs } i|\text{Prev } j]$; a discriminação e o refinamento que estão associados à probabilidade do previsto dado o observado $P [\text{Prev } i|\text{Obs } j]$.

As análises deste estudo se resumiram aos aspectos de precisão e de calibração. O de precisão se deu através da métrica proporção de acerto, dada pela equação 6, que relaciona a soma dos valores da diagonal principal da tabela de contingência (acertos) com o número total de previsões. Quanto ao aspecto de calibração, este foi avaliado pela métrica de probabilidade de acerto de cada faixa, ou seja, pela probabilidade condicional da precipitação ocorrer na faixa prevista pelo modelo de previsão, que corresponde à equação 2 aplicada a cada faixa. Sendo todas as equações baseadas nos valores das tabelas de contingência apresentadas na Figura 2.

$$PA = \frac{r + v + z}{n_3}, \text{ onde } n_3 = r + s + t + u + v + w + x + y + z. \quad (6)$$

4 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

A verificação da previsão de chuva diária, com horizontes de previsão de 24 e 48 h, foi realizada para as bacias incrementais dos reservatórios Orós e Castanhão tendo em vista a importância destas duas bacias nas cheias do Alto Jaguaribe.

Como não há dados de previsão de chuva de 24 e 48 h de anos anteriores, o estudo de verificação limitou-se ao período que vai de 8 de janeiro de 2008 a 28 de maio de 2008, quando ocorreu uma grande cheia, que causou danos importante na região do Cariri.

Esta seção começa com uma descrição da chuva observada neste período nas duas bacias estudadas, mostrando o grau de severidade desta série de eventos de precipitação, principalmente durante os meses de março e abril. Em seguida, são apresentados os resultados propriamente ditos desta análise de verificação das previsões.

4.1 – A Chuva de 2008 no Ceará

Os eventos de precipitação ocorridos no Estado do Ceará em 2008 causaram inundações severas em várias partes do estado, em especial na região do Alto Jaguaribe, na região do Cariri. As chuvas de maior intensidade e de mais longa duração aconteceram principalmente nos meses de março e abril. A Figura 3 apresenta os hietogramas diários nas bacias incrementais dos reservatórios Castanhão e Orós no ano de 2008. Pode-se observar que ao longo dos meses de março e abril choveu praticamente todos os dias nas duas bacias, com intensidades maiores na bacia do Castanhão. Os valores diários de precipitação média na bacia são bastante altos considerando as áreas das bacias de 15.117 e 14.061 km², respectivamente.

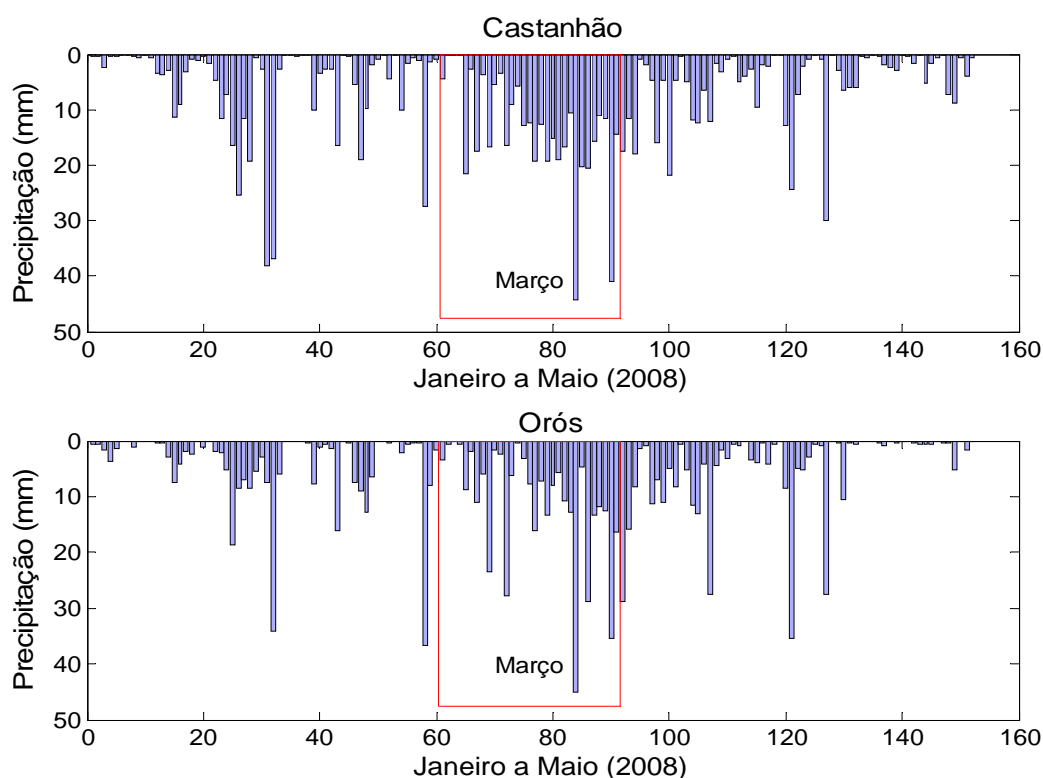


Figura 3: Hietogramas diários nas bacias incrementais do Castanhão e Orós no ano de 2008.

A precipitação acumulada do mês de março (423 mm) na bacia incremental do Castanhão foi a segunda maior já registrada, sendo menor apenas do que a chuva registrada em 1960 (450 mm). Embora ainda não tenha sido realizado um estudo definitivo de análise de frequência da chuva de março de 2008, um estudo preliminar indica que o tempo de recorrência seja de 58 anos, conforme apresentado na Figura 4. Este resultado foi baseado no ajuste da distribuição Gama aos 97 anos de dados históricos na bacia.

Na bacia incremental do reservatório Orós, o tempo de recorrência da chuva de março, também estimado de forma preliminar através do ajuste de uma distribuição Gama, não é tão alto, 22 anos, embora não seja desprezível. O total precipitado em março de 2008 nesta bacia foi apenas 3% menor do que a maior precipitação observada nos últimos 30 anos.

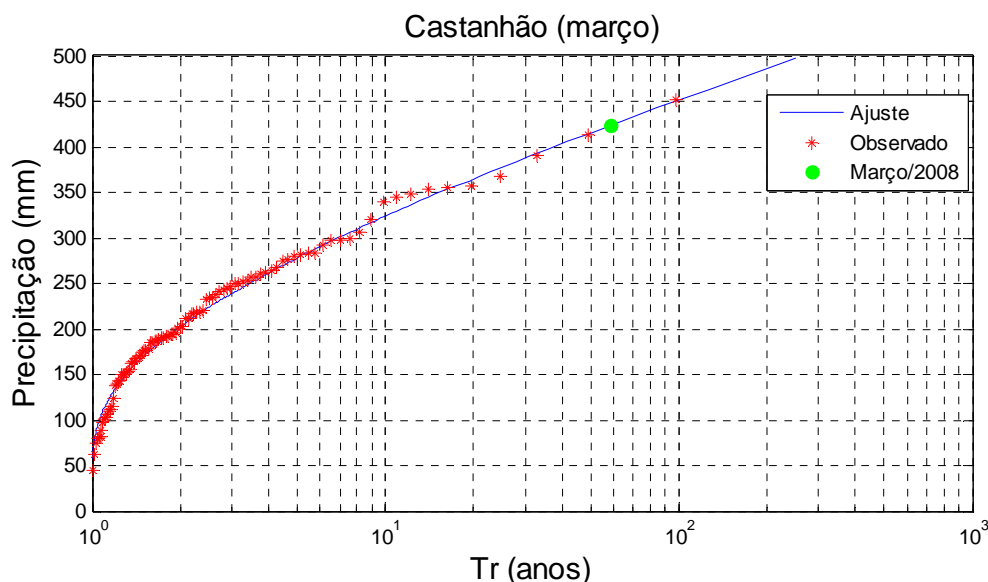


Figura 4: Análise de frequência da chuva mensal de março baseado na distribuição Gama (estudo preliminar).

4.2 – Verificação da previsão

A previsão de precipitação foi avaliada tanto em termos de variável contínua, considerando os valores reais previstos e observados, quanto de variável discreta, separando os valores em faixas de precipitação.

A primeira avaliação consistiu no cálculo de *bias* e do coeficiente de correlação, enquanto a segunda abordou os índices proporção de acerto (PA), probabilidade de detecção (POD) e falso alarme (FAR), obtidos a partir da análise da tabela de contingência.

Os resultados apresentados nesta seção compreendem duas bacias hidrográficas, Orós e Castanhão, dois modelos de parametrizaçã, Kuo e Kain & Fritsch, e dois horizontes de previsão, 24 e 48 horas.

4.2.1– Bias e Correlação

As previsões para a bacia do Castanhão apresentaram baixo valor de *bias*, com diferenças de apenas 2% em relação ao observado (sendo -2% para a parametrização de Kain & Fritsch (KF)) no horizonte de 24h e de 10% e 14% no horizonte de 48 horas, para as parametrizações de Kuo e KF, respectivamente.

Por outro lado, na bacia do Orós, a tendência à superestimativa é bastante evidente principalmente para a parametrização de Kain & Fritsch com 48 h de antecedência (vide **Figura 5**), quando atinge superestimativa média de 100%, caindo para 74% no horizonte de 24 horas. O modelo de Kuo também é tendencioso, mas com menor intensidade, apresentando superestimativa de 54% e 26% , nos horizontes de 48 e 24 horas.

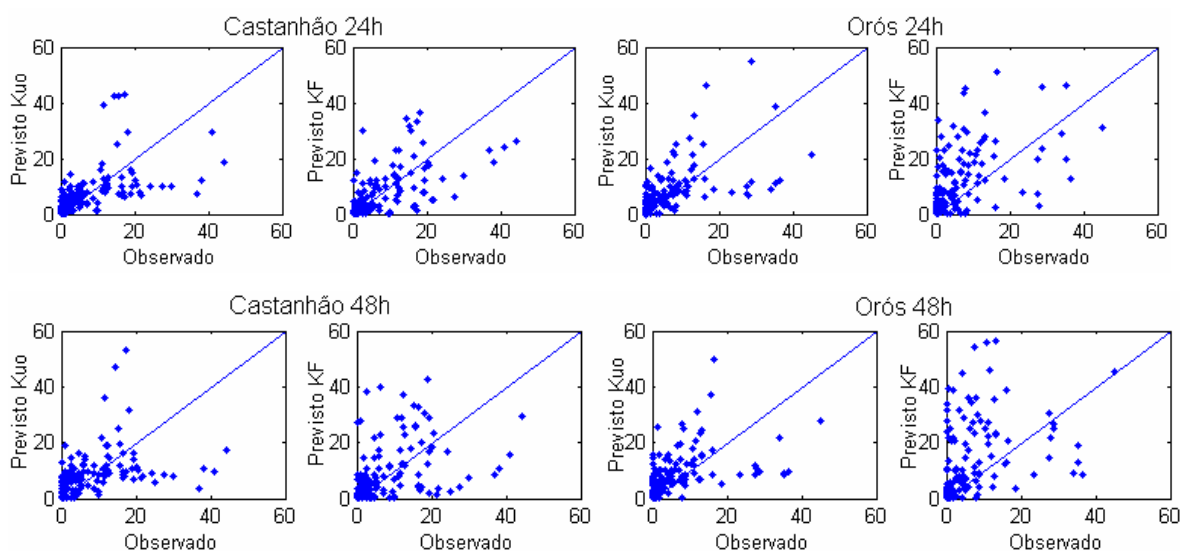


Figura 5: Séries de observação *versus* previsão, com relação à reta $x=y$.

Observando-se ainda a figura 5, percebe-se que, para ambas as bacias e parametrizações, as séries de valores previstos com antecedência de 48 horas apresentam correlação relativamente baixa com os valores observados. Os coeficientes de correlação, neste caso, ficaram entre 0,36 e 0,41. Para o horizonte de 24 horas as correlações melhoram um pouco, passando a variar entre 0,52 e 0,61.

Vale notar que os valores destas estatísticas podem ser melhorados através de um estudo de correção da precipitação. A discussão dos resultados baseados em faixas de previsão explora um pouco esta questão, conforme apresentado adiante.

4.2.2– Discretização da chuva

Os resultados que se seguem estão focados em avaliar a capacidade do modelo numérico de tempo em prever se as chuvas futuras ocorrerão dentro de limiares de precipitação previamente definidos.

A definição das faixas de precipitação a serem utilizadas num estudo de verificação não é uma tarefa simples. Como o objetivo neste caso específico é o de utilizar estas previsões de chuva num sistema de alerta de cheias, as faixas deveriam ser escolhidas de modo que representassem claramente diferentes graus de risco de cheias.

Ainda que esteja claro o objetivo na escolha das faixas, a definição propriamente dita dos limiares de precipitação a serem utilizados num estudo de verificação ainda possui um caráter subjetivo, visto que é possível que numa dada bacia uma chuva média de 20 mm pode causar problemas de cheia, enquanto que para uma outra bacia, uma chuva de 10 mm já seria suficiente para a ocorrência de extravasamento da calha do rio. Além da chuva, outros fatores interferem na ocorrência das cheias. Características da bacia hidrográfica, tais como, declividade, cobertura vegetal, tipo do solo, e densidade de drenagem interferem na maneira pela qual a onda de cheia se

forma e se propaga na rede drenagem, sem falar no grau de ocupação de áreas inundáveis, que é o que vai de fato definir o grau de prejuízos causados pela ocorrência de uma cheia. Portanto, em princípio, estes limiares de precipitação, que servirão de base para o estudo de verificação, deveriam ser estabelecidos especificamente para cada bacia separadamente. Mas mesmo que isso fosse feito, o problema de definição destas faixas é ainda difícil porque a distribuição espacial da chuva numa dada bacia e as condições antecedentes de umidade do solo também são fatores que interferem na gênese de uma cheia.

Apesar do exposto acima, a definição das faixas neste caso foram realizadas de maneira simples e direta, sabendo que uma metodologia mais elaborada possa ser utilizada no futuro no caso da implementação de um sistema de alerta de cheias. Neste estudo, foram utilizadas três faixas de precipitação, definidas por dois limiares, sendo o primeiro associado a uma probabilidade de não-excedência de 33%, e o segundo com uma probabilidade de excedência de 20%. Estes percentis foram definidos com base nos dados de chuva diária observados no período de análise, que foi bastante úmido (vide **Figura 3**).

A lógica por trás destes limiares é de que a ocorrência de chuva acima do segundo limiar, ou seja, dentro da terceira faixa, é motivo de atenção para a possibilidade de ocorrência de cheias importantes na bacia. Chuvas na primeira faixa não trazem qualquer preocupação quanto à ocorrência de eventos extremos.

Como colocado anteriormente, esta é uma análise subjetiva, pois não é fácil estabelecer uma relação quantitativa direta entre chuva e ocorrência de cheia. Para isto seria preciso desenvolver um sistema de previsão de vazões de curto prazo nos locais de interesse, algo que vem sendo realizado em um outro projeto na FUNCEME, mas que não é objeto deste artigo.

A **Tabela 1** apresenta os limiares superiores das faixas de precipitação para as duas bacias hidrográficas utilizadas neste estudo.

Tabela 1: Limiares das faixas de precipitação utilizadas na tabela de contingência

Bacia	Limiar superior (mm)	
	fx 1	fx 2
Castanhão	1,3	12,8
Orós	0,6	8,7

4.2.3– Proporção de acertos

A **Tabela 2** mostra que o modelo RAMS, independente das parametrizações de convecção utilizadas, Kuo ou Kain & Fritsch (KF), teve desempenho melhor, para um horizonte de 24 h, em termos de proporção de acerto das faixas, do que o modelo-base de comparação, que é o modelo de persistência, cujas previsões com horizontes de 24 e 48 h são iguais à precipitação do dia anterior.

Tabela 2: Proporção de acertos da previsão por faixas

Bacia	24h			48h		
	Kuo	KF	PER	Kuo	KF	PER
Castanhão	0,61	0,66	0,49	0,52	0,58	0,45
Orós	0,55	0,49	0,50	0,52	0,49	0,51

Os resultados referentes à proporção de acerto de faixas não são conclusivos em relação à definição das parametrizações de convecção. Na bacia incremental do reservatório Orós, o modelo que utiliza a parametrização de Kuo apresenta uma proporção maior de acerto das faixas (0,55) do que o modelo que emprega a parametrização de Kain & Fritsch (0,49). Já para a bacia incremental do Castanhão, os resultados mostram o oposto, ou seja, o modelo RAMS com a parametrização KF obteve uma proporção maior de acertos (0,66) do que com a parametrização de Kuo (0,61).

No caso das previsões com horizonte de 48 h, a diferença de desempenho entre o modelo RAMS e o modelo de persistência é bem mais modesta para a bacia do Castanhão, em relação à previsão de 24 h, e inexistente para a bacia do Orós. Neste caso, o modelo RAMS com a parametrização KF obteve uma proporção de acertos de 0,58 para a bacia do Castanhão, enquanto que o mesmo modelo com a parametrização Kuo obteve apenas 0,52. O modelo de persistência, neste caso, obteve uma proporção de acertos de 0,45, ainda com desempenho inferior ao desempenho do modelo RAMS.

Como os modelos numéricos de tempo podem apresentar erros sistemáticos, ou seja, podem fornecer constantemente previsões mais úmidas, ou mais secas, do que as precipitações observadas, uma segunda análise de proporção de acertos foi realizada. Neste caso, os limiares de precipitação que definem as faixas de precipitação foram estabelecidos para cada modelo, respeitando as probabilidades de não-excedência escolhidas na definição das faixas apresentadas na **Tabela 1**, quais sejam, 1/3 para a primeira faixa e 80% para a segunda faixa. Deste modo, os limiares do modelo RAMS que definem as três faixas de precipitação, serão diferentes dos limiares das faixas de precipitação observada.

Os resultados de proporção de acertos para este caso são apresentados na **Tabela 3**. Pode-se observar que houve uma melhora de desempenho apenas para a bacia do Orós, enquanto que para a bacia do Castanhão observou-se até mesmo uma piora dos resultados. A melhora de desempenho mais significativa ocorreu com o modelo RAMS que utiliza a parametrização de KF, cuja proporção de acerto passou de 0,49 (horizonte de 24 h), quando se utiliza apenas as faixas de precipitação apresentadas na **Tabela 1**, para 0,60 quando a previsão da faixa é feita com base nos limiares de cada modelo.

O modelo RAMS com a parametrização de Kuo também obteve uma melhora de desempenho, porém mais modesta, passando de 0,55 para 0,59. Para o horizonte de previsão de 48 h, observou-se melhora apenas para a parametrização de KF. Neste caso, a proporção de acerto das faixas passa de 0,49 para 0,55.

Estes resultados são explicados pelo fato das previsões terem apresentado clara tendência de superestimativa na bacia do Orós, conforme foi comentado no ítem 4.2.1, principalmente para parametrização de KF de 48h, quando o percentual de *bias* foi de 100%, ou seja, em média precipitações duas vezes maiores que as observadas.

Tabela 3: Proporção de acertos da previsão por faixas (modelos com suas próprias faixas)

Bacia	24h			48h		
	Kuo	KF	PER	Kuo	KF	PER
Castanhão	0,56	0,64	0,49	0,51	0,59	0,45
Orós	0,59	0,60	0,50	0,53	0,55	0,51

Embora a proporção de acerto das faixas forneça uma informação importante acerca da qualidade das previsões, nada é dito em relação à capacidade do modelo numérico em acertar as faixas que são de fato importantes para um sistema de alerta de cheias. O fato de o modelo ter boa capacidade de prever chuva na faixa 1 não tem o mesmo grau de importância do fato do modelo ter boa capacidade de prever chuvas na faixa 3.

Seguindo ainda este raciocínio, pode-se dizer que a ocorrência de erros significativos quando a previsão é de chuva na faixa 1 (falso negativo) causa impactos diferentes no sistema de alerta em relação à situação na qual ocorrem erros significativos quando a previsão indica chuva na faixa 3 (falso positivo). No primeiro caso, a cheia pode ocorrer sem que um alerta possa ser emitido a tempo de tomar as ações necessárias para mitigar os danos. No segundo caso, existe o risco de haver um excesso de alertas de cheias que acabam não se concretizando, o que é ruim, pois pode desmoralizar o sistema de alerta frente à sociedade. Ambos os erros são ruins, mas os impactos são diferenciados. A métrica de proporção de acertos não dá nenhuma informação a este respeito.

Portanto, para avaliar estes aspectos utilizou-se a métrica de probabilidade de acerto, dada pela probabilidade condicional da precipitação ocorrer na mesma faixa prevista pelo modelo, $P[\text{Obs } i | \text{Prev } j]$, com $i=j$.

4.2.3–Probabilidade de acertos

A **Figura 6** apresenta os resultados de probabilidade de acerto, por faixa de previsão, para a bacia incremental do Castanhão para os horizontes de 24 e 48 h. Percebe-se claramente o melhor desempenho do modelo RAMS frente ao modelo de persistência, e da parametrização Kuo frente à KF, pelo menos para as faixas extremas. Na faixa intermediária, a parametrização de KF obteve

resultados melhores do que a de Kuo. Pode-se verificar que a proporção de acerto para a terceira faixa é maior que 0,65 quando o modelo RAMS é utilizado para a previsão de 24 h. Neste caso, o modelo de persistência apresenta um desempenho muito ruim, por volta de 0,35. No caso da primeira faixa, a proporção de acertos com o uso do modelo RAMS é muito boa, 0,80 quando a parametrização Kuo é utilizada, e 0,70 quando se utiliza a parametrização KF.

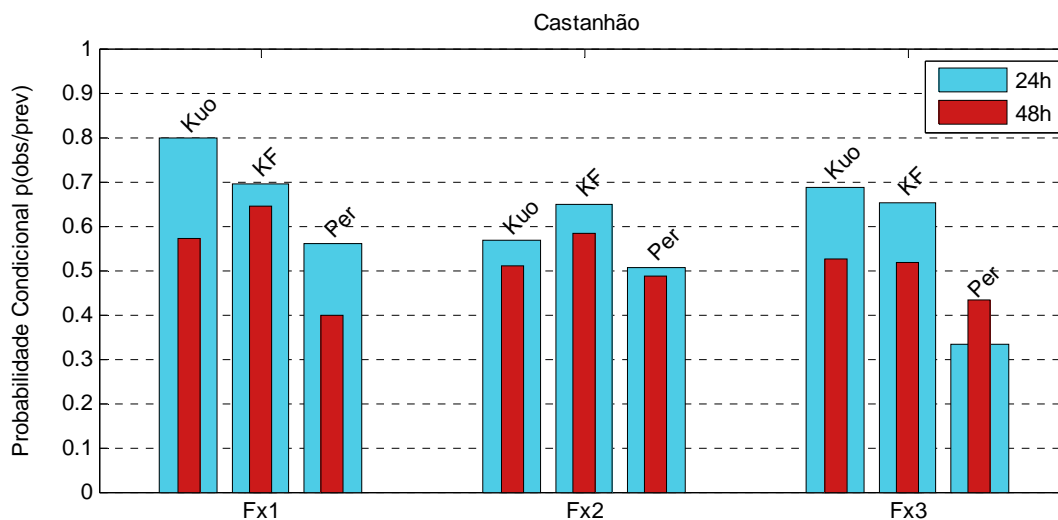


Figura 6: Probabilidade da chuva acontecer numa determinada faixa, dado que o modelo previu esta mesma faixa. Resultados para a bacia incremental do Castanhão para 24 e 48 h de horizonte de previsão.

A Tabela 4 apresenta os resultados da probabilidade de se observar uma chuva na faixa i , dado que a previsão indicou chuva na faixa j , para i e j variando entre 1 e 3. Esta tabela fornece informações importantes associadas à confiança que se pode ter em relação às previsões dos modelos. Esta tabela foi construída com base nos limiares de faixa apresentados na **Tabela 1**.

Como ocorre com a análise da proporção de acertos, a probabilidade de acerto apresenta melhores resultados na bacia do Orós, quando se utiliza limiares diferenciados na definição das faixas de previsão e observação(faixa dupla), pelo menos nas faixas 2 e 3. Observa-se novamente que o modelo de KF é o mais beneficiado pela análise de faixa dupla, e que os dois modelos apresentam resultados semelhantes, sob essa análise, conforme se verifica na **Figura 7**.

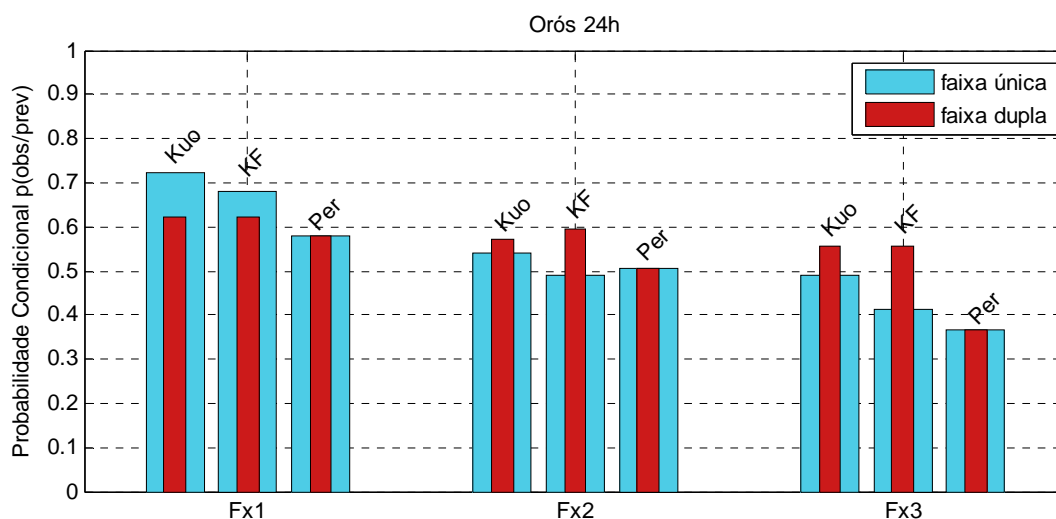


Figura 7: Probabilidade da chuva ocorrer em determinada faixa, dado que o modelo previu esta mesma faixa. Resultado na bacia do Orós para 24 horas, com análise empregando limiares de faixas com base nos valores observados (Tabela 1) e limiares definidos para cada modelo (faixa dupla).

Tabela 4: Probabilidade condicional para a bacia do reservatório Castanhão – P[Obs|Prev]

		Castanhão Previsão de 24 horas								
		Kuo			KF			Per		
		fx1	fx2	fx3	fx1	fx2	fx3	fx1	fx2	fx3
Observado	fx1	0,80	0,26	0,00	0,69	0,19	0,04	0,56	0,25	0,13
	fx2	0,20	0,57	0,31	0,31	0,65	0,31	0,38	0,51	0,53
	fx3	0,00	0,17	0,69	0,00	0,16	0,65	0,06	0,24	0,33

Pode-se verificar claramente, corroborando os resultados de proporção de acertos, que o modelo RAMS, independente da parametrização utilizada, costuma acertar mais as faixas do que o modelo de persistência, como pode ser visto na diagonal das matrizes dos três modelos. Os valores apresentados na diagonal de cada matriz representam as probabilidades de acerto em cada faixa, ou seja, $P[\text{Obs } i|\text{Prev } j]$, com $i=j$.

Esta tabela também permite verificar as probabilidades de emitir falsos-positivos e falsos-negativos. A probabilidade de se observar chuva na faixa 1, dado que o modelo RAMS com a parametrização KF previu chuva na faixa 3, é de apenas 4%. No caso da parametrização Kuo, a probabilidade é ainda mais baixa (o valor estimado foi zero, embora não seja possível dizer que a probabilidade disso acontecer num ano qualquer seja zero. A amostra é relativamente pequena). Já a probabilidade de falso-positivo no modelo de persistência é relativamente alta, em torno de 13%. É claro que estes números consideram que o falso-positivo acontece apenas quando ocorre previsão de chuva na faixa mais alta e a chuva ocorre na faixa mais baixa. Isto não é necessariamente correto. É possível que uma chuva na faixa intermediária não cause qualquer tipo de transtorno, o que poderia ser interpretado pela sociedade como um falso-positivo. Em todo caso, a Tabela 4 apresenta muito mais detalhes do que uma simples tabela com a proporção de acertos.

5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve por objetivo avaliar a qualidade da previsão diária de chuva, realizada operacionalmente pela Funceme, a partir do modelo numérico de tempo RAMS. Nesse caso específico, foram avaliadas as previsões obtidas com duas diferentes parametrizações de convecção (Kuo e Kain & Fritsch), nos horizontes de 24h e 48h, nas bacias hidrográficas incrementais dos reservatórios Orós e Castanhão, no Estado do Ceará.

De maneira geral o modelo RAMS, com ambas parametrizações, apresentou desempenho superior ao obtido pelo modelo de persistência, tanto em termos da proporção de acerto, como da probabilidade de acerto em cada faixa.

O estudo revelou um comportamento espacialmente diferenciado, onde as previsões apresentaram tendência à superestimativa na bacia do Orós, principalmente para as previsões com a parametrização de Kain & Fritsch com 48h de antecedência. Desta forma, a discretização da chuva em limiares próprios para previsão e observação proporcionou uma melhor avaliação dos resultados quando da existência de *bias*.

Com relação à probabilidade de acerto na faixa de precipitações mais elevadas, verificou-se que as duas parametrizações foram bastante superiores à persistência, revelando que o sistema de previsão fornece informações importantes que podem ser bastante úteis a sistemas de alerta de cheias, ou serem utilizadas em modelos de previsão de vazão.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pelo financiamento do projeto “Uso de Previsão de Cheias com Base em Modelos Atmosférico-Hidrológicos na Operação Otimizada de Reservatórios”, Edital Universal 2006, e à FINEP pelo financiamento dos projetos PSICO e REPENTE. Os autores também agradecem ao Msc. Francisco Jorge pela confecção do mapa do Estado do Ceará com as bacias hidrográficas do estudo e a grade computacional do modelo RAMS.

BIBLIOGRAFIA

- CHEN, CHAING, E WILLIAM R. COTTON (1983). “A one-dimensional simulation of the stratocumulus-capped mixed layer”. *Boundary-Layer Meteorology* 25, no. 3 (Março 1): 289-321. doi:10.1007/BF00119541.
- CHEN, CHAING, E WILLIAM R. COTTON (1987). “The Physics of the Marine Stratocumulus-Capped Mixed Layer”. *Journal of the Atmospheric Sciences* 44, no. 20 (Outubro 1): 2951-2977 .

- COTTON, W. R., R. A. PIELKE SR., R. L. WALKO, et al (2003). “RAMS 2001: Current status and future directions”. *Meteorology and Atmospheric Physics* 82, no. 1 (Janeiro 19): 5-29. doi:10.1007/s00703-001-0584-9.
- KAIN, J. S., E J. M. FRITSCH. 1993. Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme. *The Representation of Cumulus Convection in Numerical Models*, Meteor. Monogr. 46: 165-170.
- KESSLER, WILLIAM S., E JULIAN P. MCCREARY. 1993. The Annual Wind-driven Rossby Wave in the Subthermocline Equatorial Pacific. *Journal of Physical Oceanography* 23, no. 6 (Junho 1): 1192-1207 .
- KUO, H.L. 1974. Further Studies of the Parameterization of the Influence of Cumulus Convection on Large-Scale Flow. *Journal of the Atmospheric Sciences* 31, no. 5 (Julho 1): 1232-1240 .
- MELLOR, G. & YAMADA, T. (1982). “Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems”. *Reviews of Geophysic. & Space Physics*, 20: 851–875.
- PIELKE, R. A., W. R. COTTON, R. L. WALKO, et al. 1992. A comprehensive meteorological modeling system—RAMS. *Meteorology and Atmospheric Physics* 49, no. 1 (Março 1): 69-91. doi:10.1007/BF01025401.
- TREMBACK, C. J., (1990). “Numerical simulation of a mesoscale convective complex model development and numerical results”. Ph.D. dissertation, Atmos. Sci. Paper No. 465, Department of Atmospheric Science, Colorado State University, FortCollins, CO 80523, 247pp.
- WALKO R., BAND L., BARON J., et al (2000). “Coupled Atmosphere-Biophysics-Hydrology Models for Environmental Modeling”, *J. Appl. Meteorol.*, 39: (6) 931-944.
- WALKO, R. L. TREMBACK, C.J. PIELKE, R. A. and COTTON, W. R (1995). “An interactive nesting algorithm for stretched grids and variable nesting ratios”. *J. Appl. Meteor.*, 34, 994-999.
- WALKO, R. L., W. R. COTTON, M. P. MEYERS, E J. Y. HARRINGTON. 1995. New RAMS cloud microphysics parameterization part I: the single-moment scheme. *Atmospheric Research* 38, no. 1-4 (Setembro): 29-62. doi:10.1016/0169-8095(94)00087-T.
- WILKS, D. S., (2006). “Statistical Methods in the Atmospheric Sciences”, 2nd Ed., Academic Press, 627 pp.