

MODELOS ESTOCÁSTICOS PARA A PREVISÃO DA CHUVA NO ESTADO DO CEARÁ (1964-1997)

Teresinha de Ma.Bezerra S. Xavier (1), Airton F.S. Xavier (2),
Pedro Leite da Silva Dias (3) e Maria Assunção F. da Silva Dias (3)

(1) Prof.^a do Curso de Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente / UFC, através do PROPAP-UFC e Pesquisador Senior junto à FUNCEME - Estado do Ceará (2) Prof. do Curso de Mestrado em Ciência da Computação e no Dept.^o de Estatística e Matemática Aplicada / UFC, através do PROPAP-UFC (3) Profs. da Universidade de S. Paulo
endereço p/ corresp.: R. Oswaldo Cruz 176/400 (Meireles), CEP 60.125-150 FORTALEZA-CE-
-BRASIL fone (085)242-3702 E-mail: atxavier@lia.ufc.br Cc : txavier@sec.secrel.com.br

ABSTRACT

In this paper we consider the forecasting of the rains for the State of Ceará-Northeast Brazil, using stochastic models, with respect to the Semester1 (Jan.-Jun.) and also to the four month period usually rainier at this region (Feb.-May). We take the rain data for Fortaleza and Acaraú at the coast and from Quixeramobim in the backlands of the State ("Sertão Central"). As covariables, we take: SST (sea surface temperature) over the intertropical Atlantic and equatorial Pacific, the pseudo-stress of the wind (meridional and zonal components) also over the Atlantic, the south oscillation index and the index of solar activity. All these covariables are measured with respect to last two months of every previous year (November-December) and in January. Were obtained high percentages of explanation of the variance, in special in the case of coastal localities, as Fortaleza and Acaraú. The "pseudo-stress" of the wind was revealed to be a very important factor to be included in the context of the prevision models. In fact, the weakness of its meridional component, close to the coast of Northeast Brazil, is very clearly associated with the descent above the equatorial line of the ITCZ (intertropical convergence zone).

PALAVRAS-CHAVE : Precipitação ; Previsão; Ceará-NE-Brasil; Vento no Atlântico

1. INTRODUÇÃO

Trata-se, aqui, o problema da previsão da chuva para o Ceará, utilizando modelos estocásticos. Estudos sobre o assunto foram iniciados pelos dois primeiros autores desde 1985 para explicar e/ou prever a chuva no NE brasileiro, particularmente no Estado do Ceará : XAVIER ET AL. (1985) (1986). Seguiram-se outros trabalhos na mesma linha, empregando Modelos Lineares Generalizados (MLG), como : XAVIER ET AL. (1990) e CORDEIRO ET AL. (1988). Trabalhos mais recentes são: XAVIER & XAVIER (1995) (1996) e XAVIER ET AL. (1997). Referências a trabalhos de outros autores sobre a previsão da Chuva no Nordeste brasileiro podem aí serem consultados, porém foram aqui omitidos por motivo óbvio de insuficiência de espaço.

2. DADOS E METODOLOGIA

Os dados mensais da *Temperatura da Superfície do Mar-TSM* e da "pseudo-tensão" do Vento-TSV no Atlântico (para esta variável vetorial, expressados através das suas componentes meridional e zonal), foram cedidos pelo Prof. Dr. Jacques Servain, ORSTOM-Brest, cobrindo a área entre 30° N e 20° S, e entre 60° W e 16° E, no período 1964-97 (de 2 em 2 graus). Esse período começando em 1964 torna-se limitante para o emprego dos demais dados. Os dados de *El Niño* e *Índice de Oscilação Sul* são os da NOAA-NMC. As áreas por nós definidas para o Atlântico intertropical constam da *Figura 1*. Para a *Atividade Solar*, considerou-se o *Índice de Wolf*, disponível no "Sunspot Index Data Center" do Observatório Real de Bruxelas. As alturas da chuva para Fortaleza-Ceará provêm do posto da FUNCEME (desde 1974) e da Universidade Federal do Ceará/CAMPUS DO PICI (desde 1966), complementadas a partir dos dados da SUDENE para os dois anos precedentes. Para Acaraú-CE e Quixeramobim-CE, também foram fornecidos pela FUNCEME.

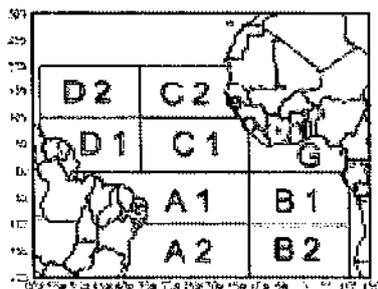


Figura 1 Áreas selecionadas para cálculos de temperaturas médias e de anomalias no Atlântico intertropical Sul e Norte

Na presente exposição ficamos limitados à utilização da Regressão Linear Múltipla, “passo-a-passo” (“stepwise”), correspondendo ao “*Modelo Linear Generalizado com Erro Normal e Ligação Identidade*”. O emprego do *Erro Gama* e/ou da *Ligação Log* não melhora substancialmente a previsão, em termos do percentual de explicação da variância da regressão, apesar de poder garantir maior confiabilidade aos testes estatísticos no caso de erros que se afastem da normalidade

Na montagem dos modelos de previsão houve a restrição de trabalhar com os dados de cada variável a prever e das respectivas covariáveis, somente até o ano de 1993. Como se dispunha de todas as observações até julho de 1997, tornou-se então possível utilizar os modelos propostos para intentar previsões da chuva para os anos subsequentes, ou seja, para 1994, 1995, 1996 e 1997, comparado-as com as alturas da chuva efetivamente observadas

Note-se que a variável chuva diz sempre respeito à chuva acumulada no primeiro semestre (ou em outro sub-intervalo de tempo, por exemplo o quadrimestre mais chuvoso) de cada ano em curso. Com efeito, é dentro do período janeiro-junho que ocorre a estação chuvosa no Nordeste setentrional. Nesta exposição nos limitamos a “modelos de previsão”. Ora, para essa finalidade, as covariáveis devem ser medidas num intervalo de tempo anterior. Com outras palavras, em cada modelo de previsão existirão “retardos” (ou “lags”) no tempo entre os preditores (covariáveis) e o preditando (chuva).

Notaremos por *FORs1* e *FORqfm* a chuva acumulada no primeiro semestre e no quadrimestre fevereiro-março (variáveis a prever), em Fortaleza. De forma análoga, substituindo FOR por ACA e QXE, nos casos de Acaraú e Quixeramobim, resp. As covariáveis que entram nos modelos são, basicamente : *TSMb6*, *SOLb6* e *N34b6*, ou seja, a TSM média na área B do Atlântico Sul (adjacente à costa da África), a Atividade Solar Média e a TSM na área 3+4 do Pacífico (El Niño), todas essas medidas no Bimestre 6 (nov./dez.) de cada ano anterior. Bem como, *WYAb6* (ou *WYAb6*), isto é, o valor médio da componente meridional da “pseudo-tensão” do vento na área A (resp., na sub-área A1) do Atlântico sul, adjacente à costa do Nordeste brasileiro, também medida no Bimestre 6. Note-se que *SOIb6* (a anomalia do Índice de Oscilação Sul) avaliada no Bimestre 6, poderá eventualmente substituir *N34b6* nos modelos estudados, o que é explicável. Trabalhamos também com *N34jan* e *WYA1jan*, com referência ao mês de janeiro.

2. RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.1 Previsão da Chuva Acumulada em Fortaleza no Semestre 1 (Janeiro/Junho) a partir de Covariáveis medidas no Bimestre 6 (Novembro/Dezembro) do Ano Anterior

Para a previsão da chuva acumulada no primeiro semestre de cada ano é possível chegar a um indicativo, relativamente precoce, através de covariáveis medidas no último bimestre do ano precedente. Para esse fim, foram considerados dois modelos básicos: **Modelo 1** (no qual não intervem o vento no Atlântico) e **Modelo 2** (no qual é introduzido o vento).

No caso de FORTALEZA, de um modelo para o outro, a explicação da variância passa de $R^2 = 77,0\%$ (coeficiente de correlação entre valores calculados e observados da ordem de $R = 0,88$), para $R^2 = 84,3\%$ ($R = 0,92$), depois de introduzida a covariável *WYAb6*. No caso de ACARAÚ, de $R^2 = 79,8\%$ ($R=0,89$) para $R^2 = 83,0\%$ ($R=0,91$), este último resultado já melhorado pela introdução de *TSMCb6* no lugar de *WYAb6*. Para QUIXERAMOBIM, no Sertão Central, a previsibilidade é menor, corroborando resultados anteriores.

Para FORTALEZA, através do **Modelo 2** em que intervêm a componente meridional do vento, a equação de regressão é da forma: $FORS1 = \alpha + \beta TSMb6 + \gamma SOb6 + \delta N34b6 + \lambda WYAb6 + \varepsilon$, onde $\beta > 0$, $\gamma < 0$, $\delta < 0$ e $\lambda < 0$ (assim, os sinais algébricos dos coeficientes apreendem os significados físicos ou os efeitos sobre a chuva no Ceará e no Nordeste brasileiro setentrional, registrados na literatura especializada). Os valores numéricos respectivos sendo $\alpha = -1,290$; $\beta = 645,521$; $\gamma = -4,248$; $\delta = -167,939$; $\lambda = -50,737$; com $p \cong 0,0000$.

Na **Figura 2** temos o gráfico dos valores calculados contra os previstos, para o modelo em pauta. Há de se notar pela inspeção do gráfico, que embora seja elevado o porcentual $R^2 = 84,3\%$, o modelo ainda comporta alguns importantes desvios (ou erros) de ajuste e, portanto, ainda os deverá comportar para a previsão de valores futuros. Isso decorre, em parte, por conta dos quase 16% da variância não explicada através do modelo. Por exemplo, percebe-se que os erros de ajuste são grandes nos anos de 1971 e 1985 (valores observados superiores aos calculados). Quanto aos erros de previsão, propriamente ditos, ainda se explicam pela circunstância dos dados não cobrirem um número de anos suficientemente grande (cerca de apenas 30 anos) e portanto situações que venham a ocorrer no futuro podem não estar assimiladas no modelo.

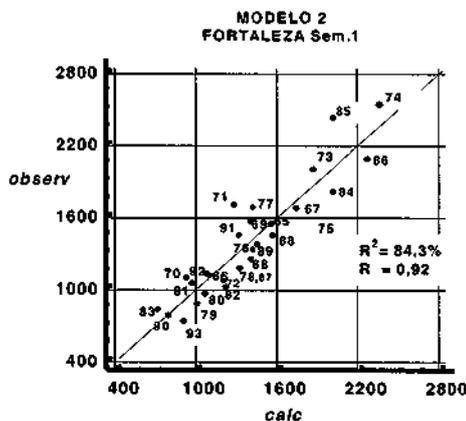


Figura 2 Modelo 2 :

$$FORS1 = \Phi(WYAb6, TSMb6, SOLb6, N34b6)$$

Valores Calculados (previstos intra-modelo) ×
× Valores Observados

2.2 Previsão da Chuva Acumulada em Fortaleza no Quadrimestre Fevereiro/Maio, utilizando Covariáveis no Bimestre 6 (Novembro/Dezembro) do Ano Anterior e em Janeiro

Nesta subsecção passa-se a considerar a previsão para a chuva acumulada no quadrimestre que vai de fevereiro a maio, geralmente o mais chuvoso na capital (Fortaleza) e também na maioria das demais localidades do Estado do Ceará, com exceção do Cariri. Consideramos, para Fortaleza o **Modelo 3**, no qual intervêm $TSMB1b6$ e $SOLb6$ (no bimestre nov.-dez.), bem como $N34jan$ e $WYA1jan$ (em janeiro). A equação de regressão obtida foi: $FORS1 = \alpha + \beta TSMb6 + \gamma SOb6 + \delta N34jan + \lambda WYA1jan + \varepsilon$, onde, mais uma vez, $\beta > 0$, $\gamma < 0$, $\delta < 0$ e $\lambda < 0$; tendo sido obtidos os valores abaixo listados para esses coeficientes, com as respectivas probabilidades de erro: $\alpha = -9530,468$ ($p = 0,0000$); $\beta = 451,964$ ($p = 0,0000$); $\gamma = -2,957$ ($p = 0,0001$); $\delta = -114,014$ ($p = 0,0024$); $\lambda = -29,380$ ($p = 0,0010$).

Neste modelo, é alcançado para R^2 o valor de 81,8% ($p = 0,0000$) que corresponde a uma coeficiente de correlação $R = 0,90$ entre valores observados e calculados no período 1964-93, excepcionalmente elevado. Como em todos os modelos anteriores, os sinais algébricos dos coeficientes da equação de regressão (aqui omitida) são compatíveis com o papel que se esperava de cada uma das covariáveis envolvidas. Na **Figura 3** segue-se o correspondente gráfico dos valores calculados contra os previstos. Mais uma vez, embora seja elevado o valor de R^2 , ou seja, 81,8%, este modelo ainda comporta alguns desvios (ou erros) importantes de ajuste e, em consequência também isso pode acontecer com respeito à previsão de valores futuros. Isso corre por conta dos quase 18% da variância não explicada.

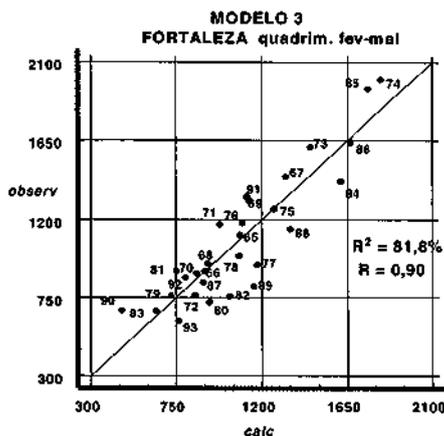


Figura 3 Modelo 3 : $FOR_{qfm} = \Phi(SOLb6, TSMB1b6, N34jan, WYA1jan)$
 Valores Calculados (previstos intra-modelo) ×
 × Valores Observados

Na **Tabela 1** (página seguinte) são comparados entre si valores observados e calculados (resp., previstos), no período 1965-93 (resp., 1994-97). Os erros de ajuste ou de previsão são medidos pelo desvio $y - x = \{valor\ observado\} - \{valor\ previsto\}$. Como se percebe, na maioria dos anos (65,5%) os erros de ajuste (correspondentes aos valores calculados “intra-modelo, de 1965 a 1993) não alcançam o valor de 1 (um) desvio padrão (“sigma”); por outro lado, em (31,0%) dos casos, o desvio varia (em valor absoluto) de uma vez a duas vezes “sigma”; finalmente, em apenas um caso é maior que duas vezes “sigma”. Os anos para os quais os erros de ajuste são pequenos, evidentemente, são aqueles que se encontram mais próximos da reta $y=x$, no gráfico da **Figura 6**.

Nesse contexto, com respeito a Fortaleza durante o ano de 1997, pode-se considerar que o quadrimestre fevereiro-maio foi pluviometricamente “normal” (valor acumulado de 1019,9 mm, próximo da *média* = 1147,6 mm e da *mediana* = 1066,0 mm); ora, o valor previsto pelo modelo (1154,5 mm) casa com essa condição de normalidade. Por outro lado, para o quadrimestre fevereiro-maio de 1996, a previsão pontual da chuva (1337,2 mm) é ainda mais próxima da altura pluviométrica efetivamente medida (1379,3 mm); isto é, configurando um quadrimestre “chuvoso” (porém, não muito chuvoso), com uma diferença entre a chuva observada e a previsão pontual da ordem de apenas 40 mm. Para 1995, contudo, a previsão pontual teria sido de um quadrimestre “chuvoso” (1372,2 mm), quando na realidade entrou na categoria de “muito chuvoso” (1762,7 mm); porém, esse seria o tipo do erro de previsão sem consequências desastrosas do ponto de vista agrícola, apesar de sensível no que concerne ao aspecto da gestão dos recursos hídricos. Finalmente, com respeito a 1994, a previsão seria de um quadrimestre “muito chuvoso” (1629,5 mm) (embora já se aproximando da faixa “chuvoso”), quando o quadrimestre de fato foi apenas “chuvoso” (1496,1 mm) (porém no limiar para “muito chuvoso”); realmente, a diferença entre o valor observado e a previsão pontual para 1994, é da ordem de tão somente 135 mm. Em consequência, pela análise do comportamento da previsão referente aos anos de 1994 a 1997, daí decorre a indicação de uma excelente potencialidade do modelo no sentido de gerar previsões aceitáveis.

Note-se, ademais, que este modelo também permite o cálculo de um intervalo de confiança (ao nível de 95%) para a chuva prevista em cada quadrimestre fevereiro-maio. Porém, como se trata de intervalo de confiança para um “valor individual” da chuva, sua amplitude em geral é maior do que o intervalo que seria calculado para uma média. São omitidos os resultados, análogos, para Acaraú. No que se refere a Quixeramobim, mais uma vez, a previsibilidade é menor.

3. CONCLUSÕES

Dentre as conclusões, do que foi exposto ao longo da secção precedentem, ressalta-se o fato de que a *componente meridional da “pseudo-tensão” do vento, principalmente na sub-área A1 do Atlântico intertropical, nas proximidades da costa da região Nordeste, é uma covariável importante para explicar a chuva no decorrer do primeiro semestre de cada ano.*

Em etapa subsequente, partiremos para modelar a chuva nas várias Regiões Climáticas do Estado do Ceará, com base nas séries pluviométricas de 93 postos selecionados e representativos dessas regiões, no contexto de Projeto em desenvolvimento na FUNCEME sob o título TEMPO DE CHUVA.

TABELA 1 Resultados para o Modelo 3, Fortaleza-Ceará, Quadrimestre Fevereiro-Maio
Valores Observados X Calculados ("intra-modelo") 1965-93 Observados X Previstos 1994-97

| Observação | | Valores | | Valores | Residuais | Residuais |
|------------|------|------------|------------|-----------|--------------|-----------|
| Número | Anos | Observados | Calculados | Residuais | Padronizados | |
| 1 | 1965 | 1112.00 | 1084.91 | 27.0944 | 0.16974 | |
| 2 | 66 | 900.800 | 904.134 | -3.33447 | -0.02074 | |
| 3 | 67 | 1448.30 | 1329.33 | 118.973 | 0.71026 | |
| 4 | 68 | 946.300 | 917.002 | 29.2984 | 0.18719 | |
| 5 | 69 | 1311.00 | 1132.87 | 178.131 | 1.10363 | |
| 6 | 1970 | 891.900 | 859.172 | 32.7276 | 0.19479 | |
| 7 | 71 | 1172.30 | 980.287 | 192.013 | 1.22532 | |
| 8 | 72 | 762.700 | 849.823 | -87.1230 | -0.54540 | |
| 9 | 73 | 1612.30 | 1455.89 | 156.415 | 1.02771 | |
| 10 | 74 | 2000.90 | 1830.62 | 170.283 | 1.15688 | |
| 11 | 75 | 1262.10 | 1266.24 | -4.13617 | -0.02447 | |
| 12 | 76 | 1181.00 | 1098.06 | 82.9388 | 0.56969 | |
| 13 | 77 | 940.400 | 1175.66 | -235.257 | -1.53643 | |
| 14 | 78 | 990.600 | 1082.03 | -91.4304 | -0.55863 | |
| 15 | 79 | 761.300 | 723.012 | 38.2879 | 0.22831 | |
| 16 | 1980 | 723.100 | 927.133 | -204.033 | -1.34373 | |
| 17 | 81 | 903.900 | 752.211 | 151.689 | 0.95096 | |
| 18 | 82 | 757.300 | 1032.11 | -274.815 | -1.82732 | |
| 19 | 83 | 672.000 | 644.080 | 27.9202 | 0.17690 | |
| 20 | 84 | 1418.10 | 1613.97 | -195.873 | -1.26403 | |
| 21 | 85 | 1944.90 | 1761.55 | 183.354 | 1.18212 | |
| 22 | 86 | 1639.60 | 1667.25 | -27.6461 | -0.17310 | |
| 23 | 87 | 838.700 | 894.262 | -55.5622 | -0.35766 | |
| 24 | 88 | 1146.10 | 1351.98 | -205.881 | -1.28818 | |
| 25 | 89 | 812.400 | 1156.93 | -344.533 | -2.62558 | |
| 26 | 1990 | 676.200 | 462.531 | 213.669 | 1.54312 | |
| 27 | 91 | 1333.00 | 1120.52 | 212.481 | 1.33396 | |
| 28 | 92 | 863.500 | 800.086 | 63.4138 | 0.40301 | |
| 29 | 93 | 615.800 | 764.864 | -149.064 | -0.91646 | |
| Observação | | Valores | | Valores | Residuais | |
| Número | Anos | Observados | Previstos | Residuais | | |
| 30 | 94 | 1496,10 | 1629,50 | -133,40 | | |
| 31 | 95 | 1762,70 | 1308,47 | 454,23 | | |
| 32 | 96 | 1379,30 | 1337,23 | 42,07 | | |
| 33 | 97 | 1019,90 | 1154,50 | -134,60 | | |

4. BIBLIOGRAFIA

- CORDEIRO, G.M.; XAVIER, T.de Ma.B.S. & XAVIER, A.F.S. (1988), Modelos Lineares Generalizados no Estudo de Parâmetros que Influenciam a Pluviometria no Nordeste Brasileiro, II. Previsão da Chuva no 1o. Semestre; Anais do V CONGRESSO BRASILEIRO de METEOROLOGIA, Rio de Janeiro, Novembro de 1988, Vol. 2, pp. II.55-II.59
- XAVIER, T.de Ma.B.S.; XAVIER, A.F.S. & PIMENTEL, T. (1985), Sea Surface Temperatures of the Tropical Atlantic Ocean and Solar Activity : Relationships with Rainfall at Ceará-Northeast Brazil, I. Preliminary Results, em: CCCO Workshop and Panel Meeting Tropical Atlantic, 9-13 Sept. 1985, Rio de Janeiro
- XAVIER, T. de Ma.B.S.; XAVIER, A.F.S. & PIMENTEL, T. (1986), Sea Surface Temperatures of the Tropical Atlantic Ocean and Solar Activity : Relationships with Rainfall at Ceará-Northeast Brazil, II. Results for the Period 1964-1984; Anais do I CONGRESSO INTERAMERICANO de METEOROLOGIA/ IV CONGRESSO BRASILEIRO de METEOROLOGIA., Brasília, 20-24 Out. 1985, Vol. 1, pp. 161-166
- XAVIER, T.de Ma.B.S.; XAVIER, A.F.S.; & CORDEIRO, G.M. (1990), Application des Modèles Linéaires Généralisés pour l'Explication et la Prévision de la Pluviométrie au Nord-Est du Brésil, Extended Abstracts of Papers Presented at the THIRD WMO SYMPOS. ON METEOROLOGICAL ASPECTS OF TROPICAL DROUGHTS WITH EMPHASIS ON LONG-RANGE FORECASTING, Niamey-Nigeria, 30/iv-04/v 1990, WMO/TD No.353, Geneve, pp. 255-261
- XAVIER, T.de Ma.B.S. & XAVIER, A.F.S. (1995), Modelos Lineares Generalizados na Explicação e Previsão da Chuva no Estado do Ceará (1964-91) [em: DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DOS RECURSOS HÍDRICOS - HIDROLOGIA, Vol. 1, pp. 303-307, Clarke, R.T. et al. Eds., Artigos selecionados do XI Simpós. Bras. de Recursos Hídricos e II Simpos. de Hidráulica dos Países de Língua Oficial Portuguesa. ABRH, Publicações nº1, Nov. 1995]
- XAVIER, T.de Ma.B.S. & XAVIER, A.F.S. (1996), Explaining and Predicting the Rain at Northeast-Brazil by Generalized Linear Models, IX CONGRESSO BRAS. de METEOROLOGIA, Campos de Jordão-SP, novembro de 1996
- XAVIER, T.de Ma.B. S., XAVIER, A. F. S., SILVA DIAS, P.L. da & SILVA DIAS, M.A.F.da (1997), Papel da Componente Meridional do Vento na Costa do Nordeste Brasileiro e de Outras Covariáveis para Prever a Chuva no Estado do Ceará (1964-1997), pre-print : *Cadernos Atena, No 7A, 1997, Fortaleza-Ceará, 23 págs.* (trabalho submetido à "Revista Bras. de Recursos Hídricos").