

MODELAGEM COMPUTACIONAL DA INTERDEPENDÊNCIA ENTRE O FENÔMENO ENOS E A PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA EM MACEIÓ

Jorge Silvestre da Silva

Universidade Federal de Alagoas

Av Lourival Melo Mota, s/n Campus A. C. Simões – Maceió-AL Cep 57072-900

e-mail: jorge@nti.ufal.br

Henrique Pacca Loureiro Luna

Universidade Federal de Alagoas

Av Lourival Melo Mota, s/n Campus A. C. Simões – Maceió-AL Cep 57072-900

e-mail: pacca@ic.ufal.br

ABSTRACT

This work seeks to verify the interdependence between the ENSO phenomena and the rainfall, using probabilistic reasoning, applying Bayesian networks in a series of 100 years of a weather station near Maceió.

Although the main focus of this work has revealed little influence of the ENSO phenomena on the precipitation in Maceió, it revealed as a byproduct, some knowledge about the evidence of the climate change and also about the possibilities of gaining information, based on the observed rainfall at this station on the possibilities of rainfall in the subsequent season.

As part of the evidence of the alleged climate change it should be noted that over the last hundred years, all seasons of the year showed a common trend: it rained more in the second half of the century than in the first one.

Keywords: Rainfall, Computational modeling, Rain monitoring.

1 INTRODUÇÃO

Os recentes cenários estabelecidos pelo Painel Internacional de Mudanças Climáticas – IPCC descrevem um aumento global acentuado da temperatura do globo, o que leva ao acréscimo de eventos meteorológicos específicos extremos, como seca, inundação, geada e furacão.

Verificamos em Molion e Bernardo (2002), que os mecanismos dinâmicos produtores de precipitação no Nordeste brasileiro podem ser classificados em mecanismos de grande escala, que são responsáveis por aproximadamente 30 a 80% da precipitação observada, de acordo com o local, e mecanismos de meso e micro escalas, que completam os totais observados.

Existem pelo menos seis sistemas atmosféricos que interferem diretamente nas condições de tempo sobre o Nordeste brasileiro – NEB, cuja ação conjunta ou não, produz precipitação pluviométrica significativa na região: A Zona de Convergência Intertropical – ZCIT, as bandas de nebulosidade associadas a Sistemas Frontais, os Distúrbios de Leste, os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis – VCAN, as Brisas Terrestres e Marítima, e um mecanismo de escala planetária conhecido como Oscilação 30 – 60 dias.

Também se observa o impacto causado pelo fenômeno El Niño – Oscilação Sul – ENOS, um exemplo de perturbação climática de escala global, onde pode ser sentida a mudança no total pluviométrico, que dependendo da intensidade pode resultar em secas severas (MOLION e BERNARDO, 2002; KOUSKY, 1979).

Porém, de acordo com (Chan 1990; Yamazaki e Rao, 1977), um dos principais determinantes de precipitação para a região do Nordeste brasileiro são distúrbios como as ondas nos ventos alísios predominantes do Atlântico Sul, que se associam à formação de nuvens convectivas que se propagam de leste para oeste. Quando essa conjunção de fatores se articula é que ocorrem as secas de amplas proporções.

Com base no exposto, este trabalho procura verificar a interdependência entre o fenômeno ENOS e a precipitação pluviométrica em Maceió, utilizando-se de raciocínio probabilístico, através de redes Bayesianas, em uma série de 100 anos da estação meteorológica pertencente à Usina Utinga Leão, Rio Largo/AL.

2 FENÔMENOS METEOROLÓGICOS

2.1 Definição de Seca

Segundo McKee et al (1993), não existe para a seca nenhuma definição válida para qualquer região, em qualquer época e ainda adequada a toda e qualquer atividade.

Mas, comum a todos os tipos de seca é o fato delas se originarem de um déficit de precipitação que resulta em uma baixa disponibilidade hídrica, para a atividade que a requer (WILHITE et al, 1987).

Conceitualmente, precipitação é a água proveniente do vapor d'água da atmosfera, que chega à superfície terrestre, sob a forma de: chuva, granizo, neve, orvalho, etc.

As secas são percebidas de modos diferentes em regiões com distintas características climáticas, e com diferentes níveis de utilização de água. Este fato contribui para a inexistência de uma definição rigorosa da seca universalmente aceita e, de um modelo uniforme de abordagem para o seu estudo, havendo várias definições de seca. De modo geral, Dracup et al (1980) e Olapido (1985) exemplificam quatro definições de seca baseadas em considerações meteorológicas, hidrológicas, agrícolas e econômicas.

2.2 O Fenômeno ENOS

O papel dos oceanos é importante não somente pelo imenso reservatório de água, um elemento vital à vida, mas principalmente pelo controle climático, através da redistribuição de calor sobre o planeta. Considerando que a água é cerca de mil vezes mais densa que o ar e, desde que a quantidade de energia térmica transportada por um fluido em movimento é proporcional à sua densidade, um volume de água pode transportar cerca de mil vezes mais calor que um volume equivalente de ar. Desta forma, flutuações de curto período no vento ou na temperatura do ar podem influenciar diretamente as correntes e a temperatura dos oceanos, enquanto que flutuações oceânicas podem aumentar, diminuir ou modificar as flutuações

atmosféricas, mostrando que, os oceanos e a atmosfera são fortemente acoplados e juntos formam o componente mais dinâmico do sistema climático.

Na década de 1920, o matemático Sir Gilbert Walker estabeleceu uma correlação inversa existente entre a pressão atmosférica nos extremos leste e oeste do oceano Pacífico, sendo esta, chamada de Oscilação Sul.

No final da década de 1960, o norueguês J. Bjerknes, explicou de forma mais detalhada a interação tropical oceano-atmosfera que mantém as fases frias e quentes do El Niño Oscilação Sul – ENOS.

Mas foi apenas há cerca de 29 anos que o mundo começou a prestar atenção nesse fenômeno, após as consequências causadas pelo El Niño de 1982/83, intensificando assim esforços para entender como o processo ocorre globalmente.

Em anos normais, sem a presença do El Niño ou La Niña, as águas do Oceano Pacífico Equatorial Oeste são mais quentes do que junto à costa oeste da América do Sul, onde as águas do Pacífico são um pouco mais frias. A circulação do ar que sobe no Pacífico Equatorial Central e que vai para o leste em altos níveis da atmosfera e desce no Pacífico Leste, em conjunto com os ventos alísios em baixos níveis da atmosfera, formam o que os meteorologistas chamam de Célula de circulação de Walker.

Este é o padrão de circulação em todo o Pacífico Equatorial em anos normais. Como as águas do oceano no Pacífico Oeste são mais quentes, há mais evaporação e formam-se nuvens numa grande área. Em regiões em que o ar vem de altos níveis da troposfera para níveis mais baixos, raramente há formação de nuvens de chuva.

2.2.1 El Niño Oscilação Sul

Verificamos em (Silva, 2000; Oliveira, 1999; Trenberth, 1997; Glantz, 1996; Aceituno, 1992), que o El Niño Oscilação Sul – ENOS é um fenômeno de grande escala que ocorre no oceano Pacífico Equatorial. O fenômeno mostra de forma marcante, o forte acoplamento oceano-atmosfera, que se manifesta sobre a região. O El Niño representa o componente oceânico do fenômeno, enquanto a Oscilação Sul representa a contrapartida atmosférica. A variação irregular em torno das condições normais de ambos os componentes revela duas fases opostas do ENOS: um desses extremos é representado pelas condições de El Niño, quando se verifica um aquecimento das águas simultaneamente com diminuição da pressão atmosférica no Pacífico leste (também denominada fase quente ou fase negativa), e a situação oposta, ou seja, quando ocorre um resfriamento das águas e aumento na pressão atmosférica na região leste do Pacífico (também denominada fase fria ou fase positiva), representando condições de La Niña.

2.2.2 Células de Walker e o ENOS

Essas células de circulação zonal são definidas na região equatorial, que se organizam entre os continentes e os mares, estando sobre o oceano Pacífico a maior célula de Walker. Em condições normais da temperatura da superfície do Pacífico Tropical, observa-se a oeste do oceano, onde estão situadas as águas mais quentes do mundo, um ramo ascendente. O carregamento da água quente superficial para oeste faz com que, a leste, águas frias sejam trazidas à superfície (ressurgência). A ressurgência de águas profundas traz à superfície, nutrientes químicos que alimentam o fitoplâncton, base da cadeia alimentar marinha, o que favorece a fauna local. A termoclina (fronteira entre a água quente superficial e a água fria do fundo) apresenta inclinação para oeste, ou seja, aproxima-se da superfície a leste e é mais profunda a oeste.

Em condições de El Niño com o enfraquecimento dos alísios, diminui o acúmulo de água quente no Pacífico oeste, bem como, a ressurgência das águas frias no Pacífico leste. Essas mudanças enfraquecem a Célula de Walker e em casos de eventos fortes de El Niño pode desaparecer. Com o deslocamento das águas quentes da TSM, o ar ascende no Pacífico centro-leste e desce no Pacífico oeste e norte da América do Sul. Com o “afastamento” das águas quentes a oeste do Pacífico, a pressão de superfície em Darwin, fica acima da média, enquanto no Pacífico sul-central, representado pela estação no Tahiti, a pressão fica abaixo da média, resultando um Índice de Oscilação Sul – IOS, negativo. Esse evento tem um período de duração

que varia entre 10 e 18 meses e acontece de forma irregular em intervalos de 2 a 7 anos. E se caracteriza por um aumento médio da TSM em torno de 4,5 °C do Pacífico Equatorial.

Em condições de La Niña os ventos alísios se intensificam, causando aumento no carregamento de águas quentes para oeste, aumentando a diferença de temperatura entre o leste e oeste e da ressurgência das águas frias no Pacífico Leste. O comportamento da pressão na superfície é o oposto ao observado em condições de El Niño, ou seja, a pressão fica abaixo da média na região ao norte da Austrália, onde as águas estão mais quentes e acima da média no Pacífico sul-central, resultando num IOS positivo. Esse evento costuma ocorrer em períodos alternados com o El Niño, apresenta um período de duração que varia entre 9 a 24 meses ou mais e acontece de forma irregular em intervalos que variam de 2 a 7 anos. A principal característica desse fenômeno é o resfriamento, em média de 2 a 3 °C, fora do normal das águas superficiais do Pacífico Equatorial.

2.2.5 Cronologia do ENOS

Existem alguns índices que são frequentemente utilizados para identificar um fenômeno El Niño e quantificar a sua intensidade. O mais comum destes índices é o Índice de Oscilação Sul (IOS), calculado em áreas específicas (Quadro 2.1). Uma dessas áreas é a chamada Região Niño 4, situada a 160°Este-150°Oeste e 5°S- 5°N. Outra é a Região Niño 3.4, localizada a 5°S-5°N, 120°-170°O. Esse índice é definido como a diferença entre os desvios normalizados da pressão na superfície entre as regiões do Tahiti (18°, 150°O), no Pacífico central-sul e em Darwin (12°S, 131°E), ao norte da Austrália constituindo um dos principais indicadores utilizados no monitoramento do ENOS de acordo com a Figura 2.6.

Neste trabalho foi utilizado o índice IOS para a determinação dos eventos ENOS. Este índice representa a diferença normalizada entre a pressão atmosférica medida no Tahiti (na Polinésia Francesa) e em Darwin, na Austrália. Um valor alto do IOS (grande diferença de pressões) significa ventos mais fortes que a média e normalmente está associado a uma situação de La Niña. Segundo o Bureau of Meteorology – Australia, os valores positivos do índice indicam eventos de La Niña e os valores negativos eventos de El Niño. A região do neutro está situada entre -5 e 5 no índice. Seis períodos consecutivos caracterizam o fenômeno, podendo um dos valores do intervalo divergir, por causa de um evento local.

Regiões Niño	Faixa Longitude	Faixa Latitude
1 + 2	90°W – 80°W	10°S – 0°
3	150°W – 90°W	5°S – 5°N
3.4	170°W – 120°W	5°S – 5°N
4	160°E – 150°W	5°S – 5°N

Quadro 2.1 – Regiões Niño.

Fonte: NCEP/NOAA/NASA – EUA

As listagens disponíveis com o histórico de ocorrências de El Niño e La Niña e suas respectivas intensidades, muitas vezes diferem umas das outras, por que dependem do critério adotado para tais definições. Assim, comparando algumas cronologias, percebe-se que, tanto a periodicidade de ocorrência quanto a duração dos eventos, possuem uma variabilidade significativa.

A NOAA (National Oceanic & Atmospheric Administration) considera como um evento ENOS, o limite de +/- 0,5°C para a anomalia da TSM da região Niño 3.4 observada em pelo menos cinco trimestres.

2.2.6 O ENOS e os Efeitos na Agricultura

A agricultura é uma atividade econômica que depende diretamente dos fatores climáticos. Qualquer alteração no clima pode afetar o zoneamento agrícola, a produtividade de diversas culturas e as técnicas de manejo. Segundo Ortolani e Camargo (1987), dentre os elementos climáticos, a precipitação é o que mais influencia a produtividade agrícola.

As ocorrências do ENOS têm sido associadas a variações nos rendimentos agrícolas de várias regiões do mundo. Os efeitos no clima mais conhecidos e de maior impacto provocado pelo ENOS estão relacionados ao regime térmico e, principalmente, ao pluviométrico. Na

agricultura, as consequências desses efeitos exigem estudo minucioso, tendo em vista que o impacto no rendimento de determinada cultura depende da duração e severidade dos períodos secos, da regularidade das chuvas e das próprias características fisiológicas de cada cultura. Assim, a inclusão de variáveis meteorológicas no estudo do desenvolvimento das plantas não pode ser analisada separadamente, além da importância em se ter o conhecimento prévio da correlação existente entre o ENOS e as variáveis meteorológicas em determinado local.

As secas, decorrentes da presença de fenômenos ENOS, que assolam periodicamente o Nordeste do Brasil constituem um fenômeno de natureza devastadora que provoca grandes impactos sociais, econômicos e ambientais. As principais consequências das secas são relacionadas, principalmente, com a baixa produtividade na agricultura, pecuária e abastecimento de água aos centros urbanos e comunidades rurais.

3 MODELAGEM COMPUTACIONAL

3.1 Princípios do Processo de Modelagem

O homem sempre desejou entender o seu planeta e o mundo em geral. As imposições da sobrevivência assim o determinaram. Na impossibilidade de lidar diretamente com a complexidade do mundo, o homem tem se mostrado cada vez mais hábil na criação de metáforas para a representação e solução de sua relação com esse mesmo mundo. Os modelos, para serem implementáveis, devem ser livres de pequenos detalhes onerosos. Nessa abordagem a importância do equilíbrio simplificação versus validade é básica. Concluímos que: os modelos são representações simplificadas da realidade que preservam, para determinadas situações e enfoques, uma equivalência adequada (GOLDBARG e LUNA, 2005).

3.2 Redes Bayesianas

Vamos utilizar a expressão A/B para denotar que a variável A está condicionada ao conhecimento de um valor para B . Para todo valor a da variável aleatória A , $P(A = a | B = b) = P(A/b)$ significa a distribuição de probabilidade de A condicionada a $B = b$, onde as demais informações conhecidas são irrelevantes para A .

Quando o especialista do domínio obtém alguma evidência anteriormente desconhecida, as probabilidades *a priori* devem ser revistas, pois podem perder a sua utilidade. Ao invés delas, devem ser usadas probabilidades condicionais (também denominadas probabilidades *a posteriori*), com a notação $P(A/B)$. Surgindo uma nova evidência C , deve-se calcular $P(A/B,C)$ ao invés de $P(A/B)$.

No texto de Niedermayer (1998), verificamos que probabilidades condicionais podem ser definidas em termos de probabilidades incondicionais.

$$P(B | A) = \frac{P(A | B)P(B)}{P(A)} \quad (1)$$

A equação (1) é válida para $P(A) > 0$.

A equação (1), inicialmente formulada pelo reverendo Thomas Bayes, é conhecida como Teorema de Bayes (ou ainda Regra de Bayes ou Lei de Bayes). Nesta equação, $P(A/B)$ é a probabilidade da evidência A ser observada, dado que B é verdadeiro. Ou seja, $P(A/B)$ é a *likelihood* (possibilidade, verossimilhança) da ocorrência de B causar a evidência A .

O Teorema de Bayes é uma equação de grande importância, pois permite o cálculo ou a atualização de probabilidades condicionais como uma função de probabilidade a priori.

Uma rede Bayesiana é um grafo direcionado acíclico (*DAG – Directed Acyclic Graph*) onde os nós representam variáveis aleatórias e os arcos direcionados representam relacionamentos causais diretos entre os nós que conectam. Em uma rede Bayesiana, cada nó X_i é condicionalmente independente de qualquer subconjunto de nós que não são seus descendentes, conhecidos os nós pais de X_i (representados por $pa(X_i)$). Assim, considerando-se X_1, X_2, \dots, X_n como os nós de uma rede Bayesiana e tomando-se da estrutura desta rede as situações onde se tem independência condicional, a seguinte equação permite determinar a probabilidade conjunta de todos os nós (RUSSELL e NORVIG, 2004):

$$P(X_1, X_2, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n P(X_i | pa(X_i)) \quad (2)$$

Pode-se também definir uma rede Bayesiana por meio de uma tripla (V, E, P) , onde: $V = \{X_1, \dots, X_n\}$ corresponde ao conjunto de n nós da rede; E corresponde ao conjunto de arcos orientados; $G(V, E)$ é um grafo direcionado acíclico; e P é a distribuição de probabilidade, determinada com o emprego da equação (2).

3.3 Probabilidade para Representar Incerteza

O cálculo de probabilidades leva a um raciocínio baseado na execução de inferências probabilísticas; ou seja, um raciocínio baseado no cálculo de probabilidades condicionais utilizando o Teorema de Bayes. Neste raciocínio, a probabilidade condicional fornece o grau de crença em um evento, dadas todas as evidências disponíveis.

3.4 Justificativa para o Uso de Redes Bayesianas

Uma vez que a maior parte dos eventos é condicionalmente independente da maioria dos outros, não é necessário considerar suas interações. Uma rede Bayesiana possibilita modelar um domínio do mundo real sem a necessidade de utilizar uma tabela de probabilidades conjuntas, onde são dispostas as probabilidades de todas as combinações possíveis de eventos. Para isso, uma rede deste tipo emprega uma representação mais local, onde aparecem agrupamentos de eventos diretamente relacionados.

Podem ser citados três motivos de grande relevância para a utilização de redes Bayesianas:

1. É um formalismo que possibilita expressar as relações de dependência e independência condicionais de maneira visual (o que facilita a compreensão);
2. Representa uma distribuição probabilística conjunta de maneira a explorar o fato das relações entre as variáveis serem esparsas;
3. A representação de um domínio por meio de uma rede Bayesiana faz com que o processo de inferência probabilística seja eficiente.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Dados e Área de Estudo

Para o presente estudo foram utilizados dados de precipitação pluviométrica obtidos no Setor Agrícola da Usina Utinga Leão. Esses dados correspondem a uma série histórica de 100 anos, de 1911 a 2010, colhidos na estação pluviométrica da referida usina, localizada no Município de Rio Largo (9° 29' 4" S, 35° 49' 54", 45m) na parte Leste do Estado de Alagoas, no Litoral, apresentando um clima tropical, sendo "quente-úmido" no verão e "frio-úmido" no inverno.

4.2 Procedimentos para a Determinação de Anomalias de Chuva

A partir dos dados da série, foram feitos os cálculos da média aritmética e desvio padrão para as análises dos meses correspondentes a todas as estações do ano. Os dados foram normalizados pela equação (3) (SOONG, 1986; SPIEGEL, 1994; LOPES, 2001; MAGALHÃES e LIMA, 2010).

$$Z_{(i)} = \frac{(P_{(i)} - P_m)}{D_p} \quad (3)$$

Onde: $Z_{(i)}$ = precipitação normalizada

$P_{(i)}$ = precipitação total do período

P_m = precipitação média do período

D_p = desvio padrão

As anomalias de chuva dos períodos de estudo, positivas e negativas, foram definidas quando o valor observado de precipitação está fora do intervalo entre o ponto dado pelo valor da média menos o desvio padrão e o ponto dado pelo valor da média mais o desvio padrão.

Definindo-se:

A^+ anomalia positiva de chuva: período com precipitação acima da faixa média climatológica observada.

A^- anomalia negativa de chuva: período com precipitação abaixo da faixa média climatológica observada.

\hat{A} período sem anomalia de chuva

A período com anomalia de chuva (negativa ou positiva).

Onde, $A = A^- \cup A^+$
 P precipitação em análise
 Observa-se a ocorrência de:
 A^+ se $P > P_m + D_p$, (4)
 \hat{A} se $P_m - D_p \leq P \leq P_m + D_p$, (5)
 A^- se $P < P_m - D_p$, (6)

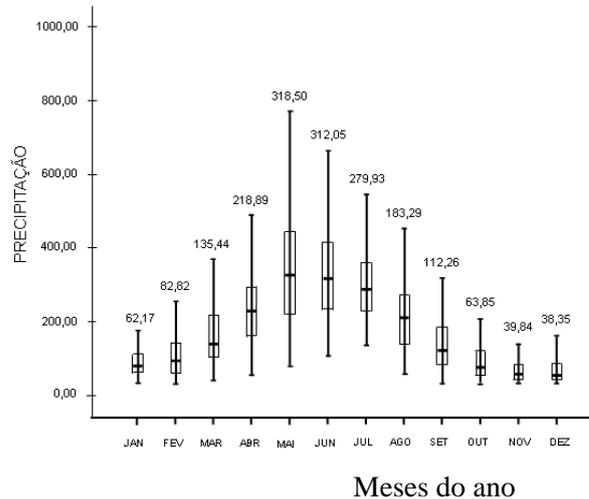


Gráfico 1 – Box-plot dos valores mensais da série climatológica
 Fonte: o autor

O Gráfico 1 caracteriza a normalização e o comportamento da série pluviométrica utilizada neste trabalho de pesquisa. Observa-se que a estação que apresenta maior índice de precipitação pluviométrica corresponde à estação Outono, que neste trabalho corresponde aos meses de Abril, Maio e Junho. O período que apresenta o menor índice de precipitação pluviométrica corresponde à estação Primavera, aqui representada pelos meses de Outubro, Novembro e Dezembro.

4.3 Estudo da influência da ocorrência de anomalia de chuva entre as estações do ano.

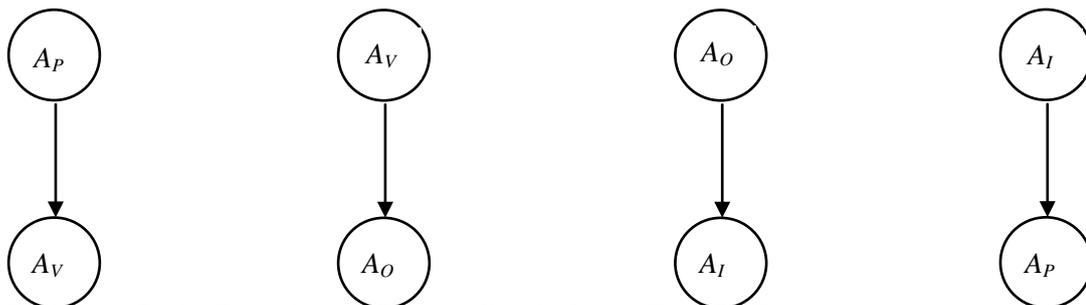


Figura 1 – Redes Bayesianas de Anomalias de Chuva Entre as Estações do Ano
 Fonte: o autor

Valores de Probabilidade Associados à Estação Verão				
Valor da variável A_V , de Anomalia de chuva no Verão.	Probabilidade a priori de Anomalia de chuva no Verão.	Probabilidade a posteriori de Anomalia de chuva no Verão $P(A_V A_P)$, dado o valor de Anomalia de chuva na Primavera.		
A_V	$P(A_V)$	A_P^-	\hat{A}_P	A_P^+
A_V^-	0,11	0,25	0,11	0
\hat{A}_V	0,72	0,75	0,73	0,54
A_V^+	0,17	0	0,15	0,45

Tabela 1 – Valores de probabilidade associados à variável A_V , a priori e depois de se conhecer A_P .

Fonte: o autor

Valores de Probabilidade Associados à Estação Outono				
Valor da variável A_O , de Anomalia de chuva no Outono.	Probabilidade a priori de Anomalia de chuva no Outono.	Probabilidade a posteriori de Anomalia de chuva no Outono $P(A_O A_V)$, dado o valor de Anomalia de chuva no Verão.		
A_O	$P(A_O)$	A_V^-	\hat{A}_V	A_V^+
A_O^-	0,17	0,18	0,15	0,24
\hat{A}_O	0,67	0,45	0,72	0,59
A_O^+	0,16	0,36	0,12	0,18

Tabela 2 – Valores de probabilidade associados à variável A_O , a priori e depois de se conhecer A_V .

Fonte: o autor

Valores de Probabilidade Associados à Estação Inverno				
Valor da variável A_I , de Anomalia de chuva no Inverno.	Probabilidade a priori de Anomalia de chuva no Inverno.	Probabilidade a posteriori de Anomalia de chuva no Inverno $P(A_I A_O)$, dado o valor de Anomalia de chuva no Outono.		
A_I	$P(A_I)$	A_O^-	\hat{A}_O	A_O^+
A_I^-	0,15	0,29	0,15	0
\hat{A}_I	0,69	0,70	0,72	0,56
A_I^+	0,16	0	0,13	0,44

Tabela 3 – Valores de probabilidade associados à variável A_I , a priori e depois de se conhecer A_O .

Fonte: o autor

Valores de Probabilidade Associados à Estação Primavera				
Valor da variável A_P , de Anomalia de chuva na Primavera.	Probabilidade a priori de Anomalia de chuva na Primavera.	Probabilidade a posteriori de Anomalia de chuva na Primavera $P(A_P A_I)$, dado o valor de Anomalia de chuva no Inverno.		
A_P	$P(A_P)$	A_I^-	\hat{A}_I	A_I^+
A_P^-	0,08	0,07	0,10	0
\hat{A}_P	0,81	0,80	0,83	0,75
A_P^+	0,11	0,13	0,07	0,25

Tabela 4 – Valores de probabilidade associados à variável A_P , a priori e depois de se conhecer A_I .

Fonte: o autor

4.11 Médias Pluviométricas da Série Climatológica

Estações do Ano e Média Pluviométrica			
Verão	Outono	Inverno	Primavera
93,48	283,15	191,83	47,35

Tabela 5 – Médias pluviométricas por Estação do Ano na série climatológica

Fonte: o autor

A Tabela 5 realça a média pluviométrica por Estação do Ano na série utilizada neste trabalho de pesquisa.

Na Tabela 6 verificam-se duas situações relacionadas às médias pluviométricas por Estação do Ano. A primeira está relacionada com as médias pluviométricas dos primeiros 50 anos da série. A segunda está relacionada com as médias pluviométricas dos últimos 50 anos da série.

	Médias Pluviométricas das Estações do Ano por Período			
	Verão	Outono	Inverno	Primavera
Primeiros 50 anos	83,94	268,35	176,57	42,54
Últimos 50 anos	103,02	297,95	207,09	52,16

Tabela 6 – Médias pluviométricas por Estação do Ano e por período de 50 anos na série climatológica

Fonte: o autor

Verifica-se através da Tabela 6 que nos primeiros 50 anos da série climatológica choveu menos que nos últimos 50 anos da série.

Verifica-se pela tabela 4.8 que nos 50 primeiros anos da série registrou-se 28 ocorrências de anomalia negativa e 18 ocorrências de anomalia positiva, enquanto nos últimos 50 anos foram observadas 22 ocorrências de anomalia negativa e 42 ocorrências de anomalia positiva. O que nos leva a acreditar que existe uma tendência de aumento na precipitação, ou seja, podemos dizer que choveu menos nos primeiros 50 anos que nos últimos 50 anos da série.

4.13 Interdependência com o Fenômeno ENOS

4.13.1 Influência do Fenômeno ENOS na Anomalia de Chuva por Estação do Ano

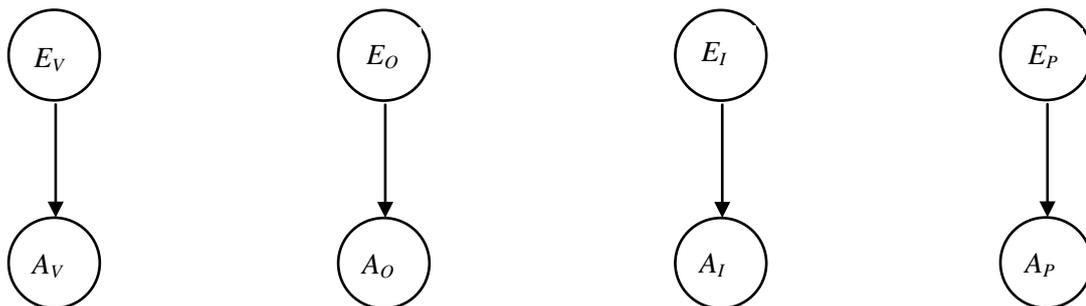


Figura 1 – Redes Bayesianas de Influência do Fenômeno ENOS em Anomalias de Chuva nas Estações do Ano

Fonte: o autor

Anomalias de chuva no Verão e fenômeno ENOS				
Anomalias de chuva no Verão		ENOS no Verão		
Probabilidade a Priori		Probabilidade a Posteriori		
A_V	$P(A_V)$	EN_V	LN_V	\hat{E}_V
A_V^-	0,11	0,15	0,10	0,10
A_V^+	0,72	0,54	0,70	0,76
A_V^+	0,17	0,31	0,20	0,13

Tabela 7 – Valores de probabilidade associados à variável A_V , a priori e depois de se conhecer E_V

Fonte: o autor

Anomalias de chuva no Outono e fenômeno ENOS				
Anomalias de chuva no Outono		ENOS no Outono		
Probabilidade a Priori		Probabilidade a Posteriori		
A_O	$P(A_O)$	EN_O	LN_O	\hat{E}_O
A_O^-	0,17	0,19	0,21	0,15

\hat{A}_O	0,67	0,57	0,64	0,71
A_O^+	0,16	0,24	0,14	0,14

Tabela 8 – Valores de probabilidade associados à variável A_O , a priori e depois de se conhecer E_O

Fonte: o autor

Anomalias de chuva no Inverno e fenômeno ENOS				
Anomalias de chuva no Inverno		ENOS no Inverno		
Probabilidade a Priori		Probabilidade a Posteriori		
A_I	$P(A_I)$	EN_I	LN_I	\hat{E}_I
A_I^-	0,15	0,05	0,10	0,20
\hat{A}_I	0,69	0,75	0,63	0,69
A_I^+	0,16	0,20	0,26	0,11

Tabela 9 – Valores de probabilidade associados à variável A_I , a priori e depois de se conhecer E_I

Fonte: o autor

Anomalias de chuva na Primavera e fenômeno ENOS				
Anomalias de chuva na Primavera		ENOS na Primavera		
Probabilidade a Priori		Probabilidade a Posteriori		
A_P	$P(A_P)$	EN_P	LN_P	\hat{E}_P
A_P^-	0,08	0,08	0,05	0,09
\hat{A}_P	0,81	0,85	0,86	0,79
A_P^+	0,11	0,08	0,10	0,12

Tabela 10 – Valores de probabilidade associados à variável A_P , a priori e depois de se conhecer E_P

Fonte: o autor

4.13.2 Influência do Fenômeno ENOS e de Anomalia de Chuva Entre as Estações do Ano

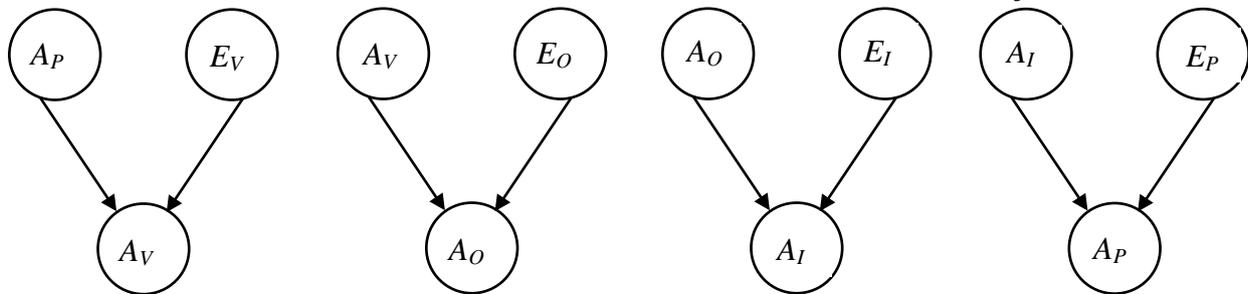


Figura 2 – Influência do Fenômeno ENOS e de Anomalia de Chuva Entre as Estações do Ano Contíguas

Fonte: o autor

Anomalias de Chuva no Verão		Anomalias de Chuva na Primavera no Período Anterior e Fenômeno ENOS no Período								
A_V	$P(A_V)$	A_P^-, EN_V	A_P^-, \hat{E}_V	A_P^-, LN_V	\hat{A}_P, EN_V	\hat{A}_P, \hat{E}_V	\hat{A}_P, LN_V	A_P^+, EN_V	A_P^+, \hat{E}_V	A_P^+, LN_V
A_V^-	11/100	0	1/6	1/1	2/11	6/52	1/17	0	0	0
\hat{A}_V	72/100	1/1	5/6	0	6/11	40/52	13/17	0	5/8	1/2
A_V^+	17/100	0	0	0	3/11	6/52	3/17	1/1	3/8	1/2

Tabela 11 – Valores de Frequências Relativas Relacionadas à Estação Verão

Fonte: o autor

Anomalias de Chuva no Outono		Anomalias de Chuva no Verão e Fenômeno ENOS no Outono								
A_O	$P(A_O)$	$A_{\bar{V}, EN_O}$	$A_{\bar{V}, \hat{E}_O}$	$A_{\bar{V}, LN_O}$	\hat{A}_{V, EN_O}	\hat{A}_{V, \hat{E}_O}	\hat{A}_{V, LN_O}	A_{V^+, EN_O}	A_{V^+, \hat{E}_O}	A_{V^+, LN_O}
$A_{\bar{O}}$	17/100	1/2	0	1/1	2/13	8/49	1/10	1/6	2/8	1/3
$\hat{A}_{\bar{O}}$	67/100	0	5/8	0	8/13	36/49	8/10	4/6	5/8	1/3
$A_{\bar{O}}^+$	16/100	1/2	3/8	0	3/13	5/49	1/10	1/6	1/8	1/3

Tabela 12 – Valores de Frequências Relativas Relacionadas à Estação Outono

Fonte: o autor

Anomalias de Chuva no Inverno		Anomalias de Chuva no Outono e Fenômeno ENOS no Inverno								
A_I	$P(A_I)$	$A_{\bar{O}, EN_I}$	$A_{\bar{O}, \hat{E}_I}$	$A_{\bar{O}, LN_I}$	\hat{A}_{O, EN_I}	\hat{A}_{O, \hat{E}_I}	\hat{A}_{O, LN_I}	A_{O^+, EN_I}	A_{O^+, \hat{E}_I}	A_{O^+, LN_I}
$A_{\bar{I}}$	15/100	1/3	3/12	1/2	0	9/40	1/15	0	0	0
$\hat{A}_{\bar{I}}$	69/100	2/3	9/12	1/2	10/12	28/40	10/15	3/5	5/9	1/2
$A_{\bar{I}}^+$	16/100	0	0	0	2/12	3/40	4/15	2/5	4/9	1/2

Tabela 13 – Valores de Frequências Relativas Relacionadas à Estação Inverno

Fonte: o autor

Anomalias de Chuva na Primavera		Anomalias de Chuva no Inverno e Fenômeno ENOS na Primavera								
A_P	$P(A_P)$	$A_{\bar{I}, EN_P}$	$A_{\bar{I}, \hat{E}_P}$	$A_{\bar{I}, LN_P}$	\hat{A}_{I, EN_P}	\hat{A}_{I, \hat{E}_P}	\hat{A}_{I, LN_P}	A_{I^+, EN_P}	A_{I^+, \hat{E}_P}	A_{I^+, LN_P}
$A_{\bar{P}}$	8/100	indefinida	1/14	0	1/11	5/42	1/16	0	0	0
$\hat{A}_{\bar{P}}$	81/100	indefinida	11/14	1/1	10/11	33/42	14/16	1/2	8/10	3/4
$A_{\bar{P}}^+$	11/100	indefinida	2/14	0	0	4/42	1/16	1/2	2/10	1/4

Tabela 14 – Valores de Frequências Relativas Relacionadas à Estação Primavera

Fonte: o autor

CONCLUSÃO

O Foco principal deste trabalho foi o estudo da interdependência entre as ocorrências de fenômenos ENOS e eventuais mudanças nos padrões de precipitação pluviométrica na região metropolitana de Maceió. Apesar dos dados de chuva observados se referir a um único ponto de coleta, o que por isso limita a validade de nossas conclusões, cabe realçar a significativa amplitude do horizonte de tempo observado.

No âmbito dos indícios das propaladas mudanças climáticas cabe observar que, ao longo dos últimos cem anos, todas as estações do ano apresentaram uma tendência comum, choveu mais na segunda metade do século do que na primeira.

Verificou-se que em todas as estações do ano, a maior quantidade de anomalias positivas de chuva ocorreu na segunda metade do século.

Para a estação Verão, a série climatológica utilizada neste trabalho caracteriza alguma assimetria nas situações de anomalia, mostrando que, quando existe anomalia de chuva no Verão, é mais provável que essa anomalia seja positiva do que negativa.

No âmbito da informação que se ganha sobre chuvas futuras ao se observar a precipitação de uma estação em curso cabe destaque à interdependência realçada entre as estações da Primavera e do Verão. Por serem as estações do ano com menor precipitação pluviométrica, o conhecimento sobre essas estações se reveste de particular importância para o interesse econômico da agricultura regional, para a construção civil e o turismo.

Na série pluviométrica estudada, nunca se observou um Outono chuvoso com um subsequente Inverno com pouca chuva. Como também, nunca se observou um Outono seco com um subsequente Inverno com muita chuva.

Para a estação Primavera, ficou caracterizada que quando há anomalia de chuva, é mais provável que essa anomalia seja positiva do que negativa.

Na série climatológica utilizada neste trabalho, que representa as condições pluviométricas da região Leste do Estado de Alagoas, não ficou caracterizada a significativa interferência do fenômeno ENOS no regime climatológico da região.

Este trabalho de pesquisa revelou como subproduto, algum conhecimento sobre indícios de mudanças climáticas e também sobre as possibilidades de se ganhar informação, com base nas chuvas observadas numa estação, sobre as possibilidades de chuvas na estação subsequente.

Embora o foco principal deste trabalho tenha revelado pouca influência dos fenômenos ENOS nas precipitações em Maceió, esta pesquisa revelou, como subproduto, algum conhecimento sobre indícios de mudanças climáticas e também sobre as possibilidades de se ganhar informação, com base nas chuvas observadas numa estação, sobre as possibilidades de chuvas na estação subsequente.

6 REFERÊNCIAS

- ACEITUNO, P. El Niño, the Southern Oscillation, and ENSO: Confusing names for a complex ocean-atmosphere interaction. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 73. p. 483-485. 1992
- CHAN, S. C. Análises de distúrbios ondulatórios de leste sobre o Oceano Atlântico Equatorial Sul. São José dos Campos. 1990. 104 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. 1990.
- DRACUP, J.A.; LEE, K.S.; PAULSON, E.G. On the Definition of Droughts, *Water Resources Research*, v. 16, n. 2, p. 297-302, 1980
- GLANTZ, M. H., *Currents of Change: El Niño's Impacto in Climate and Society*. Cambridge University Press, 194 p. 1996.
- GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. L. *Otimização Combinatória e Programação Linear*. 2 ed., Elsevier. Rio de Janeiro, RJ, 2005.
- KOUSKY, V.E.. Frontal influences on Northeast Brazil. *Monthly Weather Review* 107: 1979.
- LOPES, P. A. *Probabilidade & Estatística*. Reichmann & Affonso Editores, Rio de Janeiro, 2001.
- MAGALHÃES, M. N; LIMA, A. C. P. de. *Noções de Probabilidade e Estatística*. 7 ed. Edusp. São Paulo, 2010.
- MCKEE, T. B., DOESKEN, N. J., KLEIST, J. The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales. In: *Proceedings... of the 8th ed. Conference on Applied Climatology*. MAS, Boston, MA, PP. p. 179-184. 1993.
- MOLION, L. C. B., BERNARDO, S. O. Uma revisão da dinâmica das chuvas no nordeste brasileiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*. v. 17, n1, p1-10. São José dos Campos. 2002.
- NIEDERMAYER, D. Na Introduction to Bayesian Networks and their Contemporary Applications. I.S.P., ITCP, PMP, B.A., B.Sc., M.Div., M.Ed.1998. Disponível em <<http://www.niedermayer.ca/papers/Bayesian>> Acesso em: 04/01/2011.
- OLAPIDO, E. O. A comparative performance analysis of three meteorological drought indices. *J. Climatology*, v.5, p. 655-664. 1985
- OLIVEIRA, G. S. de. *O El Niño e você: o fenômeno climático*. Transtec. São Paulo, 1999.
- ORTOLANI, A. A.; CAMARGO, M. B. P. Influência dos fatores climáticos na produção. *Ecofisiologia da produção agrícola*. Piracicaba: Potafos, 249 p., 1987.
- RUSSELL, S.; NORVIG, P. *Inteligência Artificial*. Campus. 3ed. São Paulo, 2004.
- SILVA, J. de. F. da. *El Niño, o Fenômeno Climático do Século*. Thesaurus. Brasília, 2000.
- SOONG, T. T. *Modelos Probabilísticos em Engenharia e Ciências*. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. São Paulo, 1986.
- SPIEGEL, M. R. *Estatística*. 3 ed. Makron Books, São Paulo, 1994.
- TRENBERTH, KELVIN E. The Definition of El Niño. *Bulletin of the American Meteorological Society*. Colorado, v. 78, n.12, p. 2771-2777. 1997.
- WILHITE et al. Planning for drought toward a reduction of societal vulnerability. Colorado: Westview, p. 11-14. 1987.
- YAMAZAKI, Y., RAO, V.B. Tropical cloudiness over the South Atlantic Ocean. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. Ed. 55: 1977.