

## **Estruturação multivariada de dados meteorológicos em duas cidades em regiões distintas do estado do Ceará**

Juarez Cassiano de Lima Júnior<sup>1</sup>, Francisco Airdesson Lima do Nascimento<sup>2</sup>, José Ribeiro de Araújo Neto<sup>3</sup>, Francisco Dirceu Duarte Arraes<sup>4</sup>, Joaquim Branco de Oliveira<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Mestrando em Agronomia – Solos e Nutrição de Plantas. Universidade Federal do Ceará - UFC, campus Pici. E-mail: limajr.soil@gmail.com

<sup>2</sup> Mestrando em Engenharia Agrícola. Universidade Federal do Recôncavo da Bahia - UFRB E-mail: airdessonpai@hotmail.com

<sup>3</sup> Doutorando em Engenharia Agrícola. Universidade Federal do Ceará – UFC, campus Pici. E-mail: junior.bg@bol.com.br

<sup>4</sup> Professor Dr. do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano – IFSERTÃO, Campus Salgueiro.

E-mail: dirceuarraes@gmail.com

<sup>5</sup> Professor Dr. do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE, Campus Iguatu. E-mail:

joaquimbrancodeoliveira@gmail.com

**Resumo:** Para identificar e avaliar a importância dos elementos meteorológicos aplicou-se a técnica de estatística multivariada Análise Fatorial/Análises de Componentes Principais. Essa técnica foi aplicada com o propósito de identificar a importância relativa das diferentes variáveis envolvidas nos processos meteorológicos de duas cidades, Fortaleza e Crateús, de características climáticas distintas localizadas no Ceará, Brasil. As cidades de Fortaleza e Crateús apresentam, respectivamente, clima do tipo Aw' tropical chuvoso quente-úmido e BSw'h' quente e semiárido. As séries históricas empregadas nesse estudo foram disponibilizadas pelo INMET, (Instituto Nacional de Meteorologia). Pelo emprego da Análise Fatorial/Análise de Componentes Principais foi identificado um modelo de melhor ajuste composto por três componentes, explicando 83,04% da variância total, para Fortaleza e por duas componentes, explicando 77,96% da variância total, para Crateús. O primeiro componente em Fortaleza está relacionado com o gradiente de pressão de vapor do ar, o segundo componente está vinculado ao aquecimento da atmosfera próximo à superfície e a pressão atmosférica, e o terceiro componente expressa o efeito aerodinâmico. Para Crateús, o primeiro componente está relacionado com o efeito acumulativo das principais características do processo de déficit da pressão de vapor do ar, aquecimento do ar próximo à superfície e efeito aerodinâmico, sendo o segundo componente representando a influência secundária da temperatura mínima e do efeito da pressão atmosférica na região de clima semiárido.

**Palavras-chave:** Meteorologia. Climatologia. Análise multivariada. Análise fatorial.

## **Multivariate structure of meteorological data in two cities in different regions of the state of Ceará**

**Abstract:** To identify and evaluate the importance of meteorological elements applied to multivariate statistical Factor Analysis / Principal Component Analyses. This technique was applied in order to identify the relative importance of the different variables involved in meteorological processes in two cities, Fortaleza and Crateús of different climatic conditions located in Ceará, Brazil. The cities of Fortaleza and Crateús respectively show climate type Aw' hot-humid tropical rainy and BSw'h' and semiarid. The time series used in this study were provided by INMET, (National Institute of Meteorology). By use of Factor Analysis/Principal Components Analysis model to better fit comprised of three components was identified, explaining 83.04 % of total variance for Fortaleza and two components, explaining 77.96 % of total variance for Crateús. Fortification The first component is related to the gradient of vapor pressure of the air, the second component is linked to the heating and near surface atmospheric pressure atmosphere, and the third component expressed aerodynamic effect. To Crateús, the first component is related to the cumulative effect of the main features of the process of the vapor pressure deficit of the air, warming the air near the surface and aerodynamic effect, the second component representing the secondary influence of minimum temperature and the effect atmospheric pressure in the region of semi-arid climate.

**Keywords:** Meteorology. Climatology. Multivariate analysis. Factor analysis.

## Introdução

Os elementos meteorológicos são parâmetros chave para se estimar ou medir qualquer comportamento climatológico e hidrológico em qualquer região, sendo de suma importância na agricultura irrigada para o correto manejo da mesma em função da estimativa da evapotranspiração ( $ET_0$ ) por exemplo. A mesma é utilizada para definir a perda de vapor d'água para atmosfera pelos efeitos dos dois processos combinados, transpiração das plantas, e evaporação da água não lixiviada nem transpirada, de acordo com Doorenbos & Pruitt (1977). Assim, a estimativa da evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) é de grande importância para a gestão dos recursos hídricos, para a previsão da produção agrícola, para a programação de irrigação e para a resolução de problemas no domínio da hidrologia e meteorologia (Lima, 2005; Popova et al., 2006; Gocic; Trajkovic, 2010; Almeida et al., 2010).

A taxa de evapotranspiração em uma área é determinada por dois fatores principais: a disponibilidade de umidade na superfície onde ocorre a evaporação e a capacidade da atmosfera de vaporizar água, remover e transportar o vapor. O primeiro fator dependerá sempre da umidade disponível na superfície onde ocorre a evaporação e o segundo estará em função de diversas outras variáveis climáticas (Allen et al., 1998; Andrade et al., 2003). Segundo Mohan & Arumugam (1996) Todos os eventos meteorológicos são aleatórios na natureza e podem ser medidos ou quantificados em diversos elementos, que são correlacionadas buscando identificar sua devida importância. Em geral os elementos estudados são: precipitação, velocidade do vento, razão de insolação, umidade relativa, temperatura máxima, média e mínima.

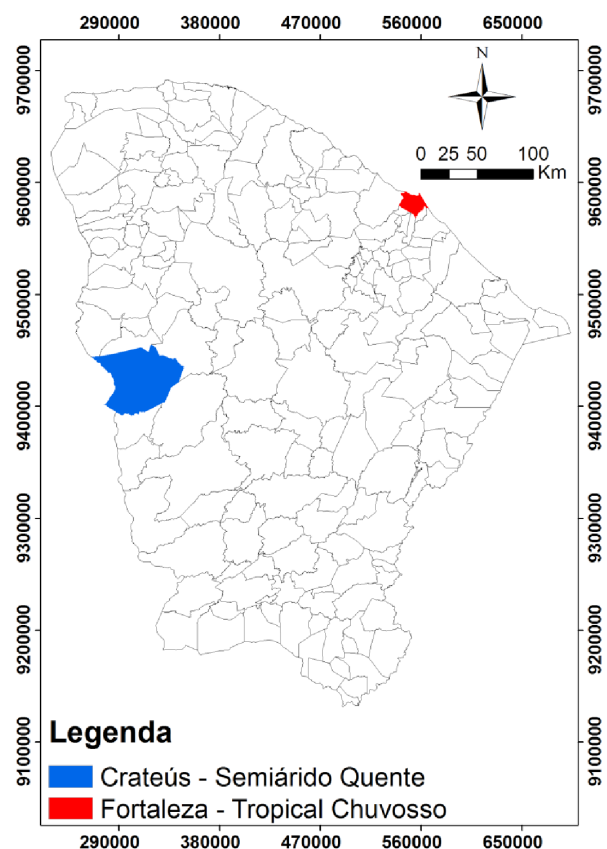
Com a quantidade muito grande elementos meteorológicos envolvidos no processo hidrológico, o número de relações entre elas é, também, muito grande para ser compreendido. Assim, torna-se necessário o emprego de técnicas que possam resumir, sistematicamente, a correlação significativa existente entre as variáveis (Mohan e Arumugam, 1996; Andrade et al., 2003; Malekinezhad, 2014). Uma das diversas técnicas de análise exploratória de dados utilizada é a análise multivariada, que corresponde a um grupo de técnicas estatísticas que buscam relacionar os elementos pesquisados, possibilitando, dentre outras funções, promover a redução do número de variáveis com o mínimo de perda de informações (Hair Jr. et al., 2005), e com isso conhecer características ou processos similares dentro de um fenômeno como a evapotranspiração, por exemplo. Na redução das

variáveis e investigação da estruturação multivariada do processo que influenciam o processo hidrológico, técnicas de estatística multivariada, como Análise Fatorial/Análise de Componentes Principais (AF/ACP) vêm sendo empregada com frequência por diversos pesquisadores (Mohan e Arumugam, 1996; Andrade et al., 2003; Dinpashoh et al., 2004; Malekinezhad, 2012 e Malekinezhad, 2014).

Assim, o conhecimento do comportamento das variáveis climáticas e suas relações são fundamentais para o estudo dos processos hidrológicos. Nesse contexto, para identificar e avaliar a importância dos diferentes elementos meteorológicos, em duas cidades, Fortaleza (litoral) e Crateús (sertão), localizadas no Ceará, Brasil, aplicou-se a técnica de estatística multivariada Análise Fatorial/Análises de Componentes Principais (AF/ACP).

## Material e Métodos

Para a identificação das variáveis mais significativas envolvidas nos processos climatológicos nas cidades de Fortaleza e Crateús, ambas no estado do Ceará (Figura 1) foi aplicada a técnica de estatística multivariada



**Figura 1.** Localização geográfica das estações meteorológicas utilizadas neste estudo, em Fortaleza no litoral e Crateús no sertão do estado do Ceará, Brasil

**Tabela 1.** Normais climatológicas e classificações climáticas das estações estudadas

Cidades	Temperatura máxima	Temperatura média	Temperatura mínima	Precipitação média	Classificação climática de Köppen
Fortaleza	30 °C	27 °C	23,6°C	1.500,0 mm	Aw'
Crateús	33 °C	27.5 °C	22 °C	731,2 mm	BSw'h'

(AF/ACP). A normal climatológica e as classificações climáticas das cidades estudadas encontram-se na Tabela 1.

Para a estruturação multivariada dos elementos meteorológicos de ambas as cidades foram utilizadas as seguintes variáveis: precipitação pluviométrica (P), temperatura do bulbo seco (TBS), temperatura do bulbo úmido (TBU), temperatura máxima do ar ( $T_{max}$ ), e mínima ( $T_{min}$ ), umidade relativa do ar (UR), pressão atmosférica (Pa), direção ( $D_v$ ) e velocidade ( $V_v$ ) do vento, e razão de insolação (n/N). Os dados foram disponibilizados pelo INMET, (Instituto Nacional de Meteorologia) e correspondente ao período de 1962 a 2012 para Crateús e de 1961 a 2012 para Fortaleza. Visto que no estado do Ceará existem poucas estações meteorológicas convencionais completas.

Os erros de escala foram evitados através da normalização dos dados ( $x=0$ ,  $\sigma=1$ ) pela seguinte relação:

$$Y_{ij} = \frac{X_{ij} - \bar{X}_i}{S_i} \quad (1)$$

em que:

$X_{ij}$  – representa o valor da j-ésima observação da i-ésima variável;

$\bar{X}_i$  – média da variável  $X_{ij}$ ;

$S_i$  – desvio padrão da variável  $X_{ij}$ ;

$Y_{ij}$  – representação da j-ésima observação da i-ésima variável transformada.

A partir dos dados normalizados foi construída a matriz de correlação [R] (P x P), para P igual a 10 (que foram as 10 variáveis analisadas). Norusis (1990) mostra que: se as correlações entre os parâmetros forem pequenas, é possível que o modelo não se aplique. Esta matriz representa a base para a transformação das variáveis ortogonais observadas em fatores. A matriz de correlação foi calculada pela equação:

$$R = \frac{1}{n-1} \left( D^{-\frac{1}{2}} S D^{-\frac{1}{2}} \right) \quad (2)$$

em que:

$D^{-1/2}$  – uma matriz diagonal (10 x 10).

$$S = X'_d X_d \quad (3)$$

em que:

S – matriz dos quadrados das médias normalizadas;

$X'_d$  – a matriz transportada de  $X'_d$ ;

$X'_d$  – matriz normalizada dos dados.

Portanto foi utilizada a matriz de correlação [R] (P x P), para P igual a 10. Maiores esclarecimentos sobre o assunto podem ser encontrados por Hair Junior et al. (2005).

Antes de aplicar o método de extração de fatores, faz-se necessário verificar, a partir da matriz de correlação, a adequabilidade do conjunto de variáveis ao procedimento estatístico. Análise de adequabilidade das variáveis para a análise de fator foi realizada através do teste de Bartlett e o de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) proposto por Kaiser (1974) e citado por Norusis (1990). O Critério KMO verifica a adequabilidade da análise fatorial testando a consistência geral dos dados analisados. O método verifica se a matriz de correlação inversa é próxima da matriz diagonal, consiste em comparar os valores dos coeficientes de correlação linear observados com os coeficientes de correlação parcial. A medida da adequabilidade que fundamenta esse princípio é dada pela seguinte expressão (Manly, 2004).

$$KMO = \frac{\sum_{i=j} \sum_{i=j} r_{ij}^2}{\sum_{i=j} \sum_{i=j} r_{ij}^2 + \sum_{i=j} \sum_{i=j} a_{ij}^2} \quad (4)$$

em que:

$r_{ij}$  – coeficiente de correlação simples entre a variável i e j;

$a_{ij}$  – coeficiente de correlação parcial entre a variável i e j.

Se a soma dos coeficientes de correlação parciais, ao quadrado, entre todos os pares de variáveis for pequena, quando comparado a soma dos coeficientes de correlação simples ao quadrado, a medida de KMO será próxima de um. Valores pequenos para KMO indicam que o modelo de análise de fator não deve ser empregado. Os intervalos do teste podem ser vistos na Tabela 2.

**Tabela 2.** Intervalo de validade do critério KMO, para aplicação do modelo de análise de fator

Valor de KMO	Aplicação do modelo
$KMO \geq 0,9$	Excelente
$0,8 \leq KMO < 0,9$	Ótima
$0,7 \leq KMO < 0,8$	Boa
$0,6 \leq KMO < 0,7$	Regular
$0,5 \leq KMO < 0,6$	Medíocre
$KMO < 0,5$	Inadequada

Adaptada por Andrade & Silveira (2002)

O número de componentes extraídos seguiu os preceitos apresentados por Norusis (1990) em considerar somente aqueles fatores com variância que apresentarem autovalor superior a um, este critério fundamenta-se no fato de que qualquer componente deve explicar uma variância superior àquela apresentada por uma simples variável. As comunalidades medem a capacidade que têm as componentes retiradas de explicar a variação de cada variável original; apresentam valores variando de 0 a 1 (Norusis, 1990). “Zero” indica que as componentes não explicam nada da variância e “Um” indica que toda a variância é explicada pelas componentes que compõe o modelo. A comunalidade é estimada pela seguinte equação:

$$VX_{ij} = \sum C_{ij}^2 \quad (5)$$

em que:

$VX_{ij}$  – variância referente à variável  $X_{ij}$  ;

$C_{ij}$  – representa o valor da componente referente à variável  $X_{ij}$ .

Isto significa que  $VX_{ij}$  explica a variância contida na variável  $X_{ij}$  que são explicadas pelas componentes que compõem o modelo.

O objetivo da extração de fator ou componente neste estudo é determinar os componentes representativos no processo hidrológico, contida no total dos dados, com o mínimo de perda das informações.

Uma vez que a análise fatorial necessita que o número de fatores seja conhecido anteriormente, os fatores foram determinados pela ACP. Na Análise de Componentes Principais, combinações lineares das variáveis são formadas. A primeira componente principal é a combinação que explica a maior contribuição para a variância na amostra. A segunda componente principal explica a segunda maior contribuição para a variância, sem estar correlacionada com a primeira. Sucessivas componentes explicam porções progressivamente menores da variância da amostra total, sem apresentar correlação com as componentes anteriores (Hair Jr et al., 2005).

Segundo Norusis (1990), o modelo matemático para análise de fator apresenta semelhança com uma equação de regressão múltipla. Cada variável é expressa como uma combinação linear de fatores que não são observadas de fato.

Em geral, o modelo para  $i$ -ésima variável normalizada é escrito como:

$$X_j = A_{i1}F_1 + A_{i2}F_2 + \dots + A_{ik}F_k + U_i \quad (6)$$

em que:

F – fatores comuns;

A – constantes combinadas dos fatores  $k$ ;

U – erro experimental.

O modelo assume que os erros experimentais não têm correlação com os fatores comuns. Os fatores são deduzidos das variáveis observadas e podem ser calculados como combinações lineares. É possível que todas as variáveis contribuam para o fator nos processos hidrológicos, no entanto, espera-se que um único subconjunto de variáveis climatológicas caracterize esse processo, como o indicado pelos grandes coeficientes. A expressão geral para a estimativa do fator  $k$ -ésimo  $F_k$  é:

$$f_k = \sum_{i=1}^p W_{ki}X_i = W_{k1}X_1 + W_{k2}X_2 + \dots + W_{kp}X_p \quad (7)$$

em que:

W – coeficiente de contagem de cada fator;

p – número de variáveis.

A matriz das componentes obtidas na fase de extração pode apresentar, às vezes, resultados de difícil interpretação com relação aos fatores significantes. Para superar esta limitação, a transformação da matriz em outra de mais fácil interpretação pode ser efetuada utilizando a rotação da análise de fator (Hair Jr et al., 2005). A rotação não afeta o valor de ajuste de uma solução de fator, de maneira que a comunalidade e a percentagem de variância total explicada não são alteradas. A percentagem de variância considerada por cada um dos fatores faz, porém, a mudança.

O método de rotação minimiza a contribuição dos parâmetros de menor significância no fator, de modo que os parâmetros passam a apresentar pesos próximos a zero ou à unidade, eliminando os valores intermediários responsáveis por dificultar a interpretação.

Entre os dois modelos de rotação (ortogonal e oblíquo) selecionou-se o primeiro tomando-se por base os trabalhos apresentados por Mohan e Arumugam

(1996), Andrade et al. (2003), Dinpashoh et al. (2004), Malekinezhad (2012) e Malekinezhad (2014) onde empregaram a ACP para identificar as variáveis com maior relevância no processo de evapotranspiração. O método Varimax tem por finalidade minimizar a contribuição das variáveis com menor significância no fator. Com o método, as variáveis passam a apresentar pesos próximos a um ou zero, eliminando os valores intermediários, que dificultam a interpretação dos fatores.

## Resultados e Discussão

As variáveis: P, TBS, TBU,  $T_{\max}$ ,  $T_{\min}$ , UR, Pa,  $D_v$ ,  $V_v$  e n/N atingiram no teste de esfericidade de Bartlett o valor igual a 4.754,6 e 4.491,9 para respectivamente, Fortaleza e Crateús, demonstrando significativo nas duas cidades, permitindo rejeitar a hipótese de que a matriz de correlação é uma matriz-identidade, isto é, que as variáveis não são correlacionadas. Pelo teste de adequacidade Kaiser-Meyer-Olkin (KMO), aplicado para comparar a magnitude dos coeficientes, foi encontrado um valor igual a 0,680 para Fortaleza considerado regular e 0,760 para Crateús considerado bom conforme a Tabela 2, indicando que o modelo

fatorial pode ser aplicado aos dados das 10 variáveis sem restrições, uma vez que a limitação do modelo começa quando KMO é inferior a 0,5 (Andrade e Silveira, 2002; Andrade et al., 2003). Resultados semelhantes foram encontrados por Andrade et al. (2003) estudando a estrutura multivariada da evapotranspiração no estado do Ceará, onde observou teste de KMO de 0,618 (regular) para Iguatu, 0,691 (regular) para Tauá e 0,764 (bom) para Quixeramobim.

A partir das 10 variáveis meteorológicas estudadas envolvidas nos processos hidrológicos elaborou-se a matriz de correlação para Fortaleza (Tabela 3) e Crateús (Tabela 4). Pelas referidas matrizes, observa-se que os coeficientes de correlação das variáveis de cada cidade apresentam valores absolutos superiores 0,3 em 57,5% e 75,5% das combinações totais ocorridas para as cidades de Fortaleza e Crateús respectivamente. Tal fato expressa um alto índice de correlação entre as variáveis aqui analisadas. Altas correlações com valores absolutos superiores a 0,3 foram observados também por Andrade et al. (2003) em 54%, 80% e 86% respectivamente nas cidades de Iguatu, Tauá e Quixeramobim.

As variáveis que apresentaram os mais altos valores absolutos dos coeficientes de correlação (>0,80) foram

**Tabela 3.** Matriz de correlação das variáveis envolvidas no processo meteorológico para a cidade de Fortaleza

	P	TBS	TBU	$T_{\max}$	$T_{\min}$	UR	Pa	$D_v$	$V_v$	n/N
P	1									
TBS	-0,45	1								
TBU	0,47	0,28	1							
$T_{\max}$	-0,49	0,86	0,10	1						
$T_{\min}$	-0,20	0,79	0,49	0,59	1					
UR	0,77	-0,53	0,64	-0,55	-0,20	1				
Pa	-0,22	-0,34	-0,56	-0,11	-0,51	-0,20	1			
$D_v$	0,17	-0,15	0,13	0,03	-0,25	0,28	0,14	1		
$V_v$	-0,56	0,34	-0,16	0,40	0,14	-0,43	0,11	0,30	1	
n/N	-0,86	0,38	-0,55	0,46	0,11	-0,79	0,34	-0,17	0,58	1

\*P = precipitação, TBS = Temperatura do bulbo seco, TBU = Temperatura do bulbo úmido,  $T_{\max}$  = Temperatura máxima do ar,  $T_{\min}$  = Temperatura mínima do ar, UR = Umidade relativa, Pa = Pressão atmosférica,  $D_v$  = Direção do vento,  $V_v$  = Velocidade do vento, n/N = Razão de insolação

**Tabela 4.** Matriz de correlação das variáveis envolvidas no processo meteorológico para a cidade de Crateús

	P	TBS	TBU	$T_{\max}$	$T_{\min}$	UR	Pa	$D_v$	$V_v$	n/N
P	1									
TBS	-0,54	1								
TBU	0,59	-0,43	1							
$T_{\max}$	-0,57	0,91	-0,49	1						
$T_{\min}$	0,00	0,54	0,19	0,56	1					
UR	0,68	-0,88	0,79	-0,85	-0,24	1				
Pa	-0,08	-0,30	-0,29	-0,32	-0,63	0,00	1			
$D_v$	0,48	-0,45	0,41	-0,37	0,02	0,54	-0,32	1		
$V_v$	-0,64	0,72	-0,75	0,72	0,19	-0,85	-0,07	-0,41	1	
n/N	-0,68	0,57	-0,72	0,61	-0,06	-0,76	0,28	-0,53	0,67	1

para a cidade de Fortaleza os pares: TBS –  $T_{\max}$  (0,86) e P – n/N (0,86) e para a cidade de Crateús os pares: TBS –  $T_{\max}$  (0,91); TBS – UR (0,88);  $T_{\max}$  – UR (0,85) e UR –  $V_v$  (0,85). Altas correlações positivas entre as temperaturas de bulbo seco e temperatura máxima foram observadas em ambas as cidades estudadas, Fortaleza e Crateús, representando o processo de aquecimento do ar próximo a superfície terrestre, essas altas correlações deve-se ao fato das temperaturas TBS e  $T_{\max}$  apresentarem variações no mesmo sentido, ou seja, como aumento da temperatura máxima ocorre aumentos da temperatura do bulbo seco. No entanto, altas correlações negativas para a cidade de Fortaleza foram verificadas entre as variáveis (P e n/N), essa relação era esperada, uma vez que, Fortaleza é uma cidade litorânea com altos índices pluviométricos (>1500 mm ano<sup>-1</sup>), apresentando de acordo com Koppen (1948) clima do tipo Aw' - tropical chuvoso quente-úmido, portanto, espera-se que nos meses de maiores precipitações pluviométricas, a tendência devido a maior nebulosidade é a ocorrência de menores razões de insolação. Já para a cidade de Crateús, que apresenta classificação climática de acordo com Koppen (1948) do tipo BSw'h' clima quente e semiárido, elevadas correlações negativas foram verificadas entre a umidade relativa do ar (UR) com as variáveis: TBS,  $T_{\max}$  e  $V_v$ , ou seja, com a diminuição das temperaturas e da velocidade dos ventos, ocorre um aumento significativo da umidade relativa do ar. Altas correlações entre no processo da  $ET_o$  e as variáveis temperatura, umidade relativa do ar e velocidade dos ventos também foram encontradas por Almedeij (2012) em regiões de clima árido no Kuwait, por Malekinezhad (2012) no Irã e por Reddy et al. (2011) e Mallikarjuna et al. (2013) em cidades da Índia. Tais resultados expressam a não homogeneidade das cidades em estudo em relação às variáveis que influencia no processo hidrológico.

### Componentes principais

Na Tabela 5, apresenta-se resultados que indicam que um modelo com três componentes foi adequado para representar os dados empregados e explicar 83,04% da variância total para a cidade de Fortaleza, concentrando em três dimensões as informações diluídas em 10 variáveis. A seleção de três componentes fundamenta-se nos critérios apresentando por Norusis (1990) em considerar somente aqueles fatores com variância que apresentarem autovalor superior a um, ou seja, qualquer componente deve explicar uma variância superior àquela apresentada por uma simples variável. Para suplantarem as dificuldades na identificação das variáveis mais significativas na matriz de pesos

**Tabela 5.** Valores das comunalidades, variância explicada e dos pesos fatoriais dos componentes do modelo após a rotação pelo algoritmo varimax para a cidade de Fortaleza, Ceará

Variáveis	Comunalidades	CP1	CP2	CP3
P	0,828	-0,899	-0,136	-0,039
TBS	0,931	0,408	0,874	0,038
TBU	0,881	-0,677	0,629	0,163
$T_{\max}$	0,788	0,509	0,693	0,221
$T_{\min}$	0,856	0,084	0,913	-0,121
UR	0,892	-0,923	-0,134	0,146
Pa	0,632	0,399	-0,664	0,180
$D_v$	0,892	-0,206	-0,142	0,910
$V_v$	0,730	0,570	0,171	0,613
n/N	0,873	0,932	0,030	0,049
Autovalor		3,95	3,00	1,35
Variância Explicada (%)		39,48	30,02	13,55
Variância Acumulada (%)		39,48	69,50	83,04

fatoriais, em decorrência de valores muito próximos entre si, aplicou-se a transformação ortogonal pelo emprego do algoritmo varimax, para a maximização e minimização dos maiores e menores autovalores, respectivamente. Pesquisadores como Mohan e Arumugam (1996), Andrade et al. (2003), Dinpashoh et al. (2004), Malekinezhad (2012) e Malekinezhad (2014), aplicando análises de componentes principais nas variáveis interferentes no processo da  $ET_o$ , também obtiveram uma matriz de mais fácil interpretação com a aplicação do algoritmo varimax na elaboração da matriz transformada. Os pesos fatoriais atribuídos a cada fator, as comunalidades de cada variável e a variância explicada após a aplicação do algoritmo varimax podem ser observados na Tabela 5. Após a rotação, os três fatores explicaram respectivamente 39,48, 30,02 e 13,55% da variância total dos dados para a cidade de Fortaleza.

Através dos valores apresentados pelas comunalidades das variáveis, pode-se avaliar como o modelo descreve as variáveis originais. A comunalidade expressa a variância referente a cada variável, que pode ser explicada pelos fatores através da análise da componente principal. Verifica-se para a cidade de Fortaleza que apenas a variável TBS, obteve valor de comunalidade superior a 0,900; indicando que mais de 90% da variância contida nessa variável foi explicado pelos três componentes do modelo.

Os valores elevados dos pesos fatoriais, em módulo, indicam as variáveis mais significativas em cada componente. Analisando os componentes após a rotação (Tabela 5), percebe-se que, para a cidade de Fortaleza no primeiro componente (CP1), as variáveis de maior importância foram: precipitação pluviométrica (P), temperatura do bulbo úmido (TBU), umidade relativa do

ar (UR) e razão de insolação (n/N). A associação destas variáveis ao CP1 indica uma componente relacionada com uma região de clima chuvoso, o que era esperado, visto que a cidade de Fortaleza encontra-se na região do litoral do Ceará e segundo a classificação de Köppen (1948) apresenta clima do tipo Aw'- tropical chuvoso quente-úmido. Variáveis como a precipitação e a umidade relativa do ar, apresentando maior influência nos processos hidrológicos na primeira componente, em região de clima tropical chuvoso, também foi verificado por Andrade et al. (2003) na região Centro Sul do Ceará. Analisando o CP1, pode-se afirmar que as variáveis com alto peso nesse componente (P, TBU, UR e n/N), apresentam uma estreita correlação com o déficit da pressão de vapor do ar, que é responsável pelo gradiente que impulsiona o processo da  $ET_0$ , portanto, podendo ser determinado como componente de gradiente de pressão de vapor.

O componente que detém o segundo maior percentual da variância total dos dados para a cidade de Fortaleza (CP2) está relacionada com as variáveis: TBS,  $T_{max}$ ,  $T_{min}$  e Pa. Esse componente, expressa basicamente dois efeitos, o aquecimento da atmosfera próximo à superfície e a pressão atmosférica. O efeito da temperatura no segundo componente também foi verificado por Mohan e Arumugam (1996) na Índia. A presença das temperaturas máxima e mínima do ar nesse segundo fator, mostra que essas variáveis tem secundária relevância para estimativa para estimativa da  $ET_0$  na região estudada. Tais resultados mostram que equações empregadas na estimativa da evapotranspiração, que tenham como base somente a temperatura devem ser usadas com cautela. O que se confirma com resultados obtidos por Almeida et al. (2010) em estudo comparativo de métodos de estimativa da  $ET_0$  em escala mensal também na cidade de Fortaleza, Ceará, em que verificou que métodos de estimativa de evapotranspiração com base nas temperaturas como Hargreaves & Samani (1985) e Blaney & Criddle (1950) eles apresentaram péssimo desempenho com elevado erro padrão de estimativa quando comparados com o método padrão de Penman-Montheith FAO 56.

Para o terceiro componente (CP3) extraído na AF/ACP para cidade de Fortaleza, as variáveis de maior relevância para processos climáticos foram a direção dos ventos ( $D_v$ ) e a velocidade dos ventos ( $V_v$ ) sendo esse componente, notadamente, expressando o efeito aerodinâmico ligada a circulação da atmosfera. A ação dos ventos na evapotranspiração consiste em deslocar as parcelas de ar mais úmidas encontradas na camada limite superficial, substituindo-as por outras mais secas, não existindo ventos o ar atingiria a saturação

e a evapotranspiração cessaria, uma vez que sua capacidade de absorver ar estaria esgotada (Popova et al., 2006; Almedeij, 2012). Segundo Lima (2005), a velocidade do vento é um elemento climático relevante no cálculo da evapotranspiração, pois o processo de remoção do vapor de água depende, em grande parte, do vento e da turbulência que transfere o ar sobre a superfície evaporante, principalmente em regiões áridas e semiáridas. Na cidade de Fortaleza os ventos atingem normalmente de 12 a 14 km h<sup>-1</sup>, no entanto, durante os meses de agosto, setembro e outubro acontecem forte variação na intensidade, nesses meses, a velocidade média dos ventos fica em torno de 40 km h<sup>-1</sup>. Após o período das chuvas, os chamados ventos alísios ficam mais próximos ao Equador, provocando ventanias, a média dos ventos nessa época do ano em Fortaleza é de 40 km h<sup>-1</sup>, mas também há registros de rajadas de vento de até 70 km h<sup>-1</sup> durante todo o dia (Leal Jr et al., 2013). Apesar da importância desses ventos no processo hidrológico para a cidade de Fortaleza, esse efeito representa terceira relevância. Resultados semelhantes foram observados por Wei et al. (2011) aplicando análises de componentes principais na estruturação da  $ET_0$  em Xinjiang na China, que observaram uma terceira componente relacionada com o fator aerodinâmico. Menor relevância no processo da  $ET_0$  para o fator aerodinâmico também foram observado por Malekinezhad (2012) aplicando análises de componentes principais para o comparativo dos parâmetros climáticos que afetam a  $ET_0$  nas zonas costeiras do centro e sul do Irã, os autores observaram que nas regiões quentes e úmidas costeiras as variáveis relacionadas com a temperatura ( $T_{max}$  e  $T_{min}$ ) apresentaram maiores relevâncias do que a velocidade dos ventos.

Para a cidade de Crateús verifica-se na Tabela 6 os pesos fatoriais atribuídos a cada componente, as

**Tabela 6.** Valores das comunalidades, variância explicada e dos pesos fatoriais dos componentes do modelo após a rotação pelo algoritmo varimax para a cidade de Crateús, Ceará

Variáveis	Comunalidades	CP1	CP2
P	0,629	-0,793	-0,004
TBS	0,902	0,741	0,594
TBU	0,763	-0,848	0,209
$T_{max}$	0,916	0,744	0,602
$T_{min}$	0,820	0,030	0,905
UR	0,945	-0,939	-0,251
Pa	0,783	0,208	-0,860
$D_v$	0,463	-0,661	0,160
$V_v$	0,781	0,853	0,230
n/N	0,794	0,883	-0,121
Autovalor		5,32	2,47
Variância Explicada (%)		53,22	24,74
Variância Acumulada (%)		53,22	77,96

comunalidades de cada variável e a variância explicada após a aplicação do algoritmo varimax. Os resultados indicam que um modelo composto por duas componentes foi adequado para representar os dados empregados e explicar 77,96% da variância total concentrando em duas dimensões as informações antes diluídas em 10 variáveis. A seleção do modelo apresentando dois componentes teve como base o critério descrito por Norusis (1990). Os resultados mostram que após a rotação, os dois fatores explicaram respectivamente 53,22 e 24,74% da variância total dos dados. Verificase ainda na Tabela 6 que os parâmetros TBS, UR e  $T_{max}$  tiveram valores de comunalidade superiores a 0,900; indicando que mais de 90% da variância contida em cada uma desses parâmetros foi explicado pelos dois fatores que compõem o modelo.

Analisando os componentes após a rotação para a cidade de Crateús, percebe-se que na primeira componente (CP1) as variáveis de maior importância foram: precipitação pluviométrica (P), temperatura do bulbo seco (TBS), temperatura do bulbo úmido (TBU), temperatura máxima ( $T_{max}$ ), umidade relativa do ar (UR), direção dos ventos ( $D_v$ ), velocidade dos ventos ( $V_v$ ) e razão de insolação (n/N). Esse resultado, de uma maneira geral, revela que o processo da  $ET_0$  na cidade de Crateús de clima semiárido é um efeito acumulativo das principais características do processo de déficit da pressão de vapor do ar, aquecimento do ar próximo à superfície e efeito aerodinâmico. Estudos realizados por Malekinezhad (2012), Nafarzadegan et al. (2013) e Malekinezhad (2014) aplicando técnicas multivariadas, também observou em regiões áridas e semiáridas no Irã, a influência das temperaturas, velocidade dos ventos e umidade relativa do ar, como variáveis de maiores relevâncias no processo da evapotranspiração. A identificação das variáveis relacionadas com a temperatura, umidade relativa do ar, velocidade dos ventos e razão de insolação como principais parâmetros climáticos que influencia no processo da evapotranspiração em cidades da Índia também foi verificado por Reddy et al. (2011) e Mallikarjuna et al. (2013).

Para o segundo componente (CP2) extraído na AF/ACP para cidade de Crateús as variáveis temperatura mínima ( $T_{min}$ ) e pressão atmosférica (Pa) foram as mais significativas. Esse componente, notadamente, expressa a influência secundária da temperatura mínima e do efeito da pressão atmosférica na região de clima semiárido. Temperatura mínima e pressão atmosférica também foram observados no mesmo componente por Wei et al. (2011) em Xinjiang na China, no entanto no primeiro componente. Segundo estes autores a relação entre essas variáveis ocorre, devido ao fato da pressão

atmosférica ser determinada pelo estado de ar quente ou frio, conforme o ar vai resfriando suas moléculas começam a ficar mais próximas umas das outras, então com a temperatura baixa a atividade das moléculas diminui e a distância entre elas também, assim, quanto menor a temperatura maior a pressão atmosférica. Portanto, esse efeito apresentou para a cidade de Crateús de clima semiárido, secundária relevância no processo de estimativa da  $ET_0$ .

## Conclusões

1. O emprego da Análise Fatorial/Análise de Componente Principal promoveu a redução de dez variáveis climatológicas relacionadas com os processos meteorológicos para três componentes em Fortaleza, explicando 83,04% da variância total, e para dois componentes em Crateús, explicando 77,96% da variância total;

2. Para a cidade de Fortaleza de clima tropical chuvoso, o primeiro componente em está relacionado com o gradiente de pressão de vapor do ar, o segundo componente está vinculado ao aquecimento da atmosfera próximo à superfície e a pressão atmosférica, e o terceiro componente expressa o efeito aerodinâmico;

3. Para Crateús de clima semiárido quente, o primeiro componente está relacionado com o efeito acumulativo das principais características do processo de déficit da pressão de vapor do ar, aquecimento do ar próximo à superfície e efeito aerodinâmico, e o segundo componente representando a influência secundária da temperatura mínima e do efeito da pressão atmosférica;

4. O conhecimento dos componentes mais importantes que afetam os processos hidrológicos em cada região, seja de clima tropical chuvoso ou semiárido, podem ser utilizados para uma melhor gestão dos recursos hídricos e planejamento agricultura na região.

## Literatura Citada

- Allen, R. G.; Pereira, L.; Raes, D.; Smith, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. Irrigation and Drainage Paper, 56.
- Almedej, J. Modeling Pan Evaporation for Kuwait by Multiple Linear Regression. The Scientific World Journal, v. 2012, p. 1-9, 2012.
- Almeida, B. M.; Araújo, E. M.; Cavalcante Junior, E. G.; Oliveira, J. B.; Araújo, E. M.; Nogueira, B. R. C. Comparação de métodos de estimativa da  $ET_0$  na escala mensal em Fortaleza-CE. Revista Brasileira de Agricultura Irrigada, v. 4, n. 2, p. 93-98, 2010.



- Andrade, E. M.; Silveira, S. S. Análises de componentes principais na investigação da estrutura da evapotranspiração. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v. 22, n. 2, p. 171-177, 2002.
- Andrade, E. M.; Silveira, S. S.; Azevedo, B. M. Investigação da estrutura multivariada da evapotranspiração na região centro sul do Ceará pela análise de componentes principais. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 8, n. 1, p. 39-44, 2003.
- Blaney, H. F.; Criddle, W. D. Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. In *ISDA Soil Conserv.Serv., SCS-TP-96*, 1950.
- Gocic, M.; Trajkovic, S. Software for estimating reference evapotranspiration using limited weather data. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 71, p. 158-162, 2010.
- Hair Junior, J. F.; Anderson, R. E.; Tatham, R. L.; Black, W. C. Análise multivariada de dados. Tradução de Adonai Schlup Sant'Anna e Anselmo Chaves Neto, 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005. 593p.
- Dinpashoha, Y.; Fakheri-Farda, A.; Moghaddamb, M.; Jahanbakhsh, S.; Mirniad, M. Selection of variables for the purpose of regionalization of Iran's precipitation climate using multivariate methods. *Journal of Hydrology*, v. 297, p. 109-123, 2004.
- Doorenbos, J.; Pruitt, W. O. Guidelines for predicting crop water requirements. *FAO, Technical note 24*. Roma: FAO, 1977. 114 p.
- Hargreaves, G.H.; Samani, Z. A. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Engine Agric.*, v. 1, n. 2, p. 96-99, 1985.
- Köppen, W. *Climatologia: com um estudo de los climas de latierra*. PublicationsIn: *Climatology*. Laboratory of Climatology, NewJersey. 104p., 1948.
- Leal Junior, J. B. V.; Pellegrini, C. C.; Almeida, G. P.; Fisch, G.; Lyra, R. F. F.; Silva Junior, R. S. Avaliando parametrizações da camada limite planetária do WRF utilizando dados de velocidade e direção do vento do projeto chuva em Fortaleza. *Revista Ciência e Natura*, ed. Especial, p. 236-238, 2013.
- Lima, E. P. Evapotranspiração de referência de Penman-Monteith, padrão FAO 1998, a partir de dados de temperatura máxima e mínima de Minas Gerais. 2005. 67f. Departamento de Engenharia Agrícola, UFV. Dissertação de Mestrado em Meteorologia Agrícola –
- Manly, B.F. *Multivariate Statistical Methods: a primer*, Chapman & Hall. London, UK, 2004.
- Malekinezhad, H. Comparative study of climatic parameters affecting evaporation in central and southern coastal areas in Iran. *Water Resources and Wetlands*, p. 290-295, 2012.
- Malekinezhad, H. Regionalization Approach for Modeling of Monthly Evaporation Based on Cluster Analysis. *Natural Resources and Conservation*, v. 2, n. 2, p. 25-32, 2014.
- Mallikarjuna, P.; Jyothy, S. A.; Reddy, K. C. S. Daily Reference Evapotranspiration Estimation using Linear Regression and ANN Models. *Journal of The Institution of Engineers India: Series A*, v. 93, n. 4, p. 215-221, 2013.
- Mohan, S.; Arumugam, N. Relative Importance of Meteorological Variables in Evapotranspiration: Factor Analysis Approach. *Water Resources Management*, v. 10, p. 1-20, 1996.
- Nafarzadegan, A. R.; Ahani, H.; Singh, V. P.; Kherad, M. Parametric and Non-Parametric Trend of Reference Evapotranspiration and its key influencing climatic variables (Case study: Southern Iran). *Ecopersia*, v. 1, n. 2, p. 123-144, 2013.
- Norusis, M.J. *SPSS Base System User's Guide*. Chicago: SPSS Inc, 1990. 520p.
- Popova, Z.; Kercheva, M.; Pereira, L. S. Validation of the FAO methodology for computing ETo with limited data. *Application to South Bulgaria*. *Irrigation and Drainage*, v. 55, n. 2, p. 201-215, 2006.
- Reddy, K. C. S.; Jyothy, S. A.; Mallikarjuna, P. Estimation of Weekly Reference Evapotranspiration using Linear Regression and ANN Models. *ACEE International Journal on Civil and Environmental Engineering*, v. 1, n. 1, p. 31-35, 2011.
- Wei, G.; Dong, X.; Hu, A. Discuss on Reference Crop Evapotranspiration in Arid Zone Based on Principal Component Analysis. *International Symposium on Water Resource and Environmental Protection ISWREP*, Xi'an, China, v. 4, p. 2900-2903, 2011.