



Análise multivariada no estudo da variação do Índice de Aridez da Bahia e Pernambuco

Iug Lopes^{1(*)}, Juliana Maria Medrado de Melo², Ailton Alves de Carvalho², Geber Barbosa de Albuquerque Moura² e Brauliro Gonçalves Leal³

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano, Campus Bom Jesus da Lapa. Rodovia BR349, s/n, Zona Rural, CEP 47600-000 Bom Jesus da Lapa, BA. E-mail iug.lopes@ifbaiano.edu.br

²Universidade Federal Rural de Pernambuco - Departamento de Tecnologia Rural. Rua Dom Manoel de Medeiros, CEP 50710-470 Dois Irmãos. Recife, PE. E-mails: medrado.juliana@gmail.com, ailtonalvesst@hotmail.com e geber.moura@ufrpe.br

³Universidade Federal do Vale do São Francisco, Campus Juazeiro. Avenida Antonio Carlos Magalhães, 510, Country Club, CEP 48902-300 Juazeiro, BA. E-mail: brauliro.leal@univasf.edu.br

(*)Autor para correspondência.

INFORMAÇÕES

História do artigo:

Recebido em 5 de maio de 2018

Aceito em 20 de dezembro de 2018

Termos para indexação:

mudanças climáticas
evapotranspiração potencial
médias móveis
climatologia

RESUMO

A identificação de regiões vulneráveis à desertificação é necessária para o Nordeste brasileiro, que apresenta restrição hídrica e sensibilidade as alterações climáticas. Desta forma, através do Índice de Aridez (IA) é possível identificar estas alterações e os elementos climáticos que mais influenciam para estas mudanças em diferentes localizações geográficas. O objetivo foi identificar os principais elementos climáticos responsáveis pela variação temporal e espacial do IA nos estados da Bahia e Pernambuco por meio da análise multivariada. As localidades estudadas foram Salvador, Lençóis, Bom Jesus da Lapa, Recife, Garanhuns e Cabrobó. Foram calculados os Balanços Hídrico Climatológico, para cada estação, em cada média móvel de 30 anos no período de 1961 a 2015, com o auxílio do Software para o Cálculo do Balanço Hídrico de Thornthwaite[®]. Foi aplicada a análise de agrupamento hierárquica aos dados de séries temporal (S), temperatura (T), precipitação (P), evapotranspiração potencial (ETP) e IA. A Bahia passou por mudanças no IA, sendo possível evidenciar que o aumento da temperatura foi o principal elemento climático responsável. Em Pernambuco também foram maiores correlações da série temporal com as temperaturas. S, T e ETP exercem forte correlação para elevação da condição de aridez em todas as localidades estudadas.

© 2018 SBAgro. Todos os direitos reservados.

Introdução

As alterações dos fenômenos climáticos observadas no Brasil e no mundo têm sido intensamente debatidas nas últimas décadas. Algumas pesquisas tendem para as linhas

de mudanças nos ciclos naturais do planeta (Cruz et al., 2014) e outras tendem determinar as modificações provocadas pelas ações antrópicas (Berlato e Cordeiro, 2017; Solomon, 2010). Apesar da incerteza da origem de fontes das alterações de temperaturas globais, o aumento já é consta-

tado em diversas regiões (Nangombe et al., 2018; Manssigam et al., 2017; Lopes e Leal, 2015).

Alguns estudos já estão direcionados para a verificação das condições climáticas de regiões semiáridas, a exemplo de Almeida et al. (2014) para o Nordeste do Brasil, em que foi observado tendências significativa de aumento de temperatura média para o período de 2071 a 2100.

Segundo Cavalcanti et al. (2017), esse aumento de temperatura pode resultar na intensidade de eventos extremos e, também, em alteração do regime das chuvas, com maior ocorrência de secas e enchentes. Essa sequência de desequilíbrio natural do ecossistema pode originar o fenômeno da desertificação a partir do empobrecimento e degradação das terras nas zonas áridas, semiáridas e subúmidas (MMA, 2010; Almeida et al., 2014).

Para fins de classificação climática quanto a desertificação, recomenda-se o Índice de Aridez (IA), inicialmente elaborado por Thornthwaite (1941) e ajustado posteriormente por Penman (1953) e amplamente utilizado no Plano de Ação de Combate à Desertificação das Nações Unidas.

A relevância da obtenção do índice de aridez para observação de tendência a desertificação para diferentes condições climáticas pode ser recomendada, já que o método apresenta ótimo desempenho para regiões de clima seco e também para úmido. Santos et al. (2016) descreveu que o IA é de grande precisão na determinação das áreas vulneráveis à desertificação, sendo que é um dos únicos índices a que se utiliza de variáveis quantitativas para tal análise.

Souza et al. (2014) afirmam que conhecendo as séries temporais de parâmetros climáticos, a exemplo o IA, pode-se caracterizar a disponibilidade hídrica e assim fazer um planejamento para o uso racional da água em todas as atividades humanas. Além de poder justificar os períodos anuais que foram críticos, com perdas ou excedentes hídricos (Lopes et al., 2017).

Dessa forma, o conhecimento dos elementos climáticos que mais apresentam variações e, conseqüentemente, promoveram alterações no valor do IA em uma série temporal, são de suma importância para compreender as origens das modificações climáticas que ocorrem em uma determinada região (Milly e Dunne, 2016). Para compreensão destas modificações, as análises de influências e agrupamentos dos elementos climáticos em distintas regiões, são essenciais para entendimento das mudanças climáticas (Hui, 2017).

Levando em consideração a contextualização de Lopes e Leal (2015), em que o índice de aridez é um viés de compreensão da tendência a desertificação. Além do mais, pode-se constatar a ampla relação dos fenômenos integradores da aridez com os processos ambientais, socioeconômicos e climáticos.

Diante da necessidade de compreender melhor os cenários de IA, foi desenvolvido o estudo com o objetivo identificar os principais elementos climáticos responsá-

veis pela variação temporal e espacial do índice de aridez nos estados da Bahia e Pernambuco considerando Regiões de Litoral, Agreste e Sertão, por meio da análise multivariada de agrupamento pelo método de Ward.

Material e métodos

A área de estudo foi uma secção latitudinal para Bahia e outra para Pernambuco. Em termos de latitude, no estado da Bahia variou de $-12^{\circ} 33' 36''$ a $-13^{\circ} 12' 36''$ e para longitude foi de $-38^{\circ} 31' 48''$ a $-43^{\circ} 24' 36''$. Para o estado de Pernambuco variou de $-8^{\circ} 3' 2''$ a $-8^{\circ} 30' 36''$ e de $-34^{\circ} 1' 57''$ a $-39^{\circ} 19' 48''$, para latitude e longitude, respectivamente.

Dados utilizados

Como pode-se observar na Figura 1, as estações meteorológicas da secção da Bahia, estão situadas nos municípios de Salvador, Lençóis e Bom Jesus da Lapa. Para Pernambuco estão em Recife, Garanhuns e Cabrobó. Os dois Estados possuem grandezas de áreas diferentes, porém com regiões climáticas semelhantes e características bem definidas pelo afastamento da região litorânea, permitindo assim a obtenção da observação das mudanças nas condições de aridez em diferentes ambientes.

Os dados normais de temperatura média condensada e precipitação foram obtidos junto ao INMET, referentes às estações e o período de 1961 a 2015. No período considerado, foram identificadas 25 séries de 30 anos consecutivos e realizado médias móveis para cada. Conforme recomenda a *World Meteorological Organization* (WMO, 1989), que é um tempo longo o suficiente para filtrar as variações interanual ou anomalias, mas também curto o suficiente para ser capaz de mostrar mais as tendências climáticas.

Na Tabela 1 consta nomeação pelo Instituto Nacional de Meteorologia e quanto a sua localização, sendo em regiões de litoral, zona de transição e sertão. As respectivas localidades foram escolhidas por formarem secção latitudinal nos seus respectivos estados, da Bahia e de Pernambuco.

Processamento de dados

Das séries temporais, os dados de Temperatura Média ($^{\circ}\text{C}$) e Precipitação Média Anual (mm) foram convertidos de diários para mensais, descartando os dias com falhas nas leituras e descartando os meses que não possuíam a totalidade das medições.

Posteriormente esses dados mensais foram utilizados de forma direta no cálculo do Balanço Hídrico Climatológico (BHC), segundo metodologia proposta por Thornthwaite e Matter (1955). Esse cálculo foi realizado com o auxílio do Software para o Cálculo do Balanço Hídrico de Thornthwaite⁶, elaborado por Lopes e Leal (2016).

Foram calculados os BHC por cada série de 30 anos, 25 para cada estação, para o período de 1961 a 2015, conforme

Figura 1. Localização dos municípios que estão as estações meteorológicas.

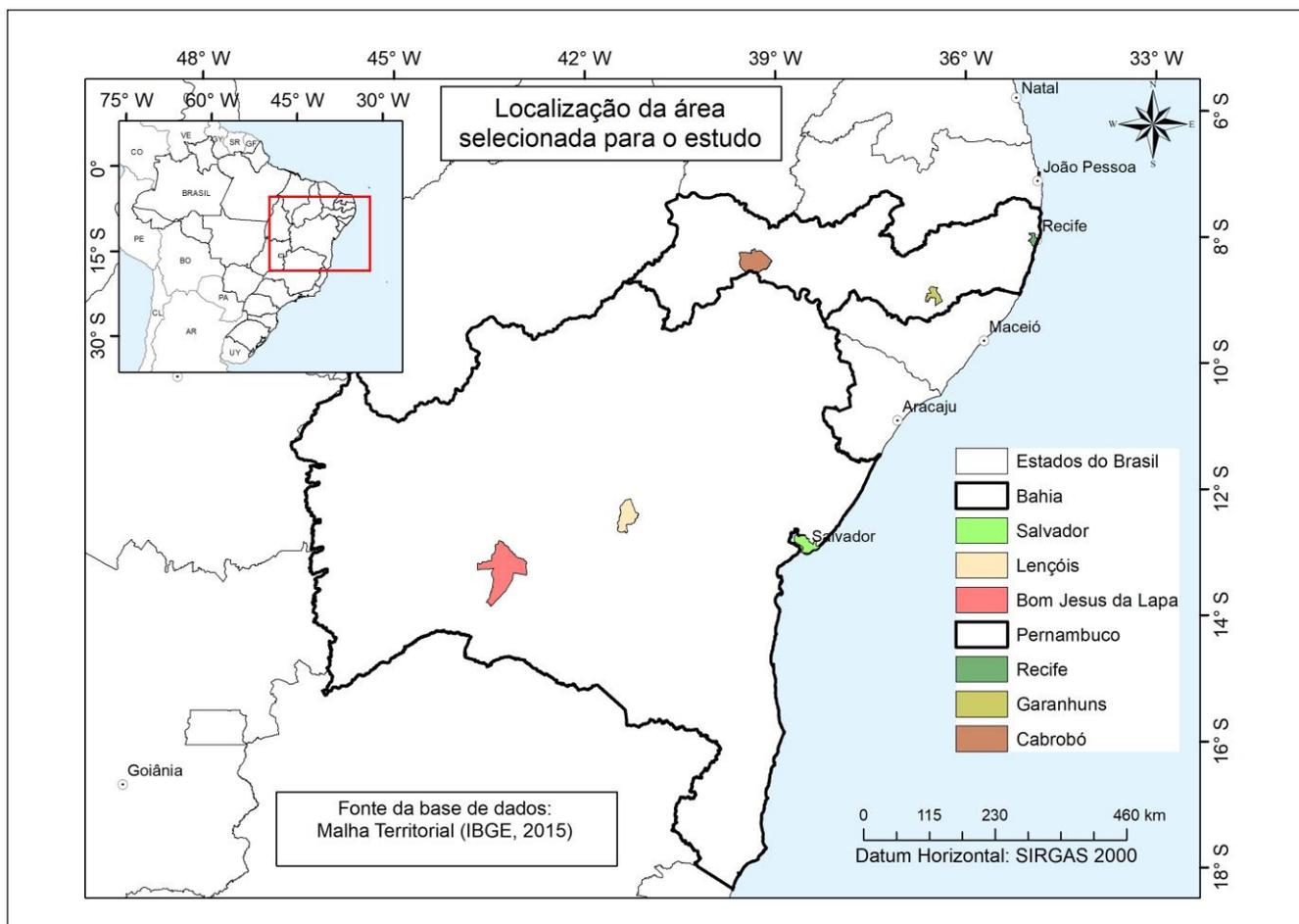


Tabela 1. Localização geográfica das estações meteorológicas utilizadas análise do índice de desertificação.

Secção do estado da Bahia					
E	Localidade	Característica	Lat. (°)	Long. (°)	Alt. (m)
83229	Salvador	Litoral	-13,01	-38,53	51,41
83242	Lençóis	Transição	-12,56	-41,38	438,74
83288	Bom Jesus da Lapa	Sertão	-13,26	-43,41	439,96
Secção do estado de Pernambuco					
E	Localidade	Característica	Lat. (°)	Long. (°)	Alt. (m)
82900	Recife	Litoral	-8,05	-34,95	10,00
82893	Garanhuns	Transição	-8,88	-36,51	822,76
82886	Cabrobó	Sertão	-8,51	-39,33	341,46

metodologia recomendada (Ufoegbune et al., 2011; Francisco et al., 2015; Carvalho et al., 2015). Como exemplo da aplicação das médias móveis, temos para a série de dados tem início em 1961 e fim em 1990, indo até 1986 a 2015. Dessa forma, num total de 25 séries.

Para o estudo em questão foi utilizado o valor de CAD igual a 100 mm que, segundo Sentelhas et al. (1999), quando o cálculo é realizado para fins climatológicos, ou seja, para caracterização da disponibilidade hídrica regional, é comum a adoção de valores variando entre 75 a 125 mm.

No Software para o Cálculo do Balanço Hídrico de Thornthwaite[®], a Evapotranspiração Potencial (mm) é obtida pelas seguintes equações (Eq. 1, Eq. 2 e Eq. 3):

$$ETP = 16,2 * [10 * \frac{T}{T_0}]^a \quad (\text{Se } 0 \leq T < 26,5 \text{ } ^\circ\text{C}) \quad \text{Eq. 1}$$

$$a = 6,750 * 10 - 3I - 7,711 * 10 - 5I + 1,792 * 10 - 2I + 0,492 \quad \text{Eq. 2}$$

$$ETP = -415,85 + 32,24 * T - 0,43 * T^2 \quad (\text{Se } T \geq 26,5 \text{ } ^\circ\text{C}) \quad \text{Eq. 3}$$

sendo: o “ETP” correspondente a evapotranspiração po-

tencial, “T” a temperatura média do ar compensada (°C) e “I” ao índice de calor. O valor do índice “a” é determinado em função do I, que foi obtido de acordo com a seguinte equação (Eq. 4 e Eq. 5)

$$I = \sum i_n \quad \text{Eq. 4}$$

$$i = \left(\frac{T_a}{5}\right)^{1,514} \quad \text{Eq. 5}$$

sendo: “Ta” correspondente a temperatura média do ar mês (°C) e i_n ao índice térmico do mês “n”.

Com os cálculos usando as equações acima, obteve-se o valor da precipitação e da evapotranspiração no formato anual, para o cálculo do índice de aridez.

Cálculo de índice de aridez e da tendência à desertificação

O IA é uma razão entre as médias anuais da precipitação pluvial (P) e evapotranspiração potencial (ETP), onde essa última, é dependente da temperatura média condensada mensal do ar (°C). O IA calculado a partir de dados indiretos de localização e temperatura, obtendo as ETPs desenvolvido por Thornthwaite e Mather (1955), e precipitação que utilizada de forma direta. O IA é considerado um instrumento agrometeorológico de utilidade e praticidade na caracterização do clima (Camargo e Camargo, 1993; Sentelhas et al., 1999; Basso et al., 2015).

Para a obtenção do Índice de Aridez (IA) foi utilizado a equação abaixo (Eq. 6), desenvolvido por Thornthwaite (1941) e complementado por Penman (1953):

$$IA = P/ETP \quad \text{Eq. 6}$$

Dessa forma, com a obtenção do IA nas estações, realizou-se a classificação climática (Tabela 2) segundo a metodologia do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP, 1992).

Também com a obtenção do IA, foi possível classificar o nível de suscetibilidade à desertificação, adaptado da classificação proposta por Matallo Júnior e Schenkel (2003) (Tabela 3).

Processamento estatístico

Para avaliar o grau de dependência entre as variáveis, os dados foram submetidos a correlação de Pearson (Eq. 7), que segundo Moore (2007), a correlação mensura a direção e o grau da relação linear entre duas variáveis quantitativas.

$$r = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2 * \sum_i (y_i - \bar{y})^2}} \quad \text{Eq. 7}$$

Sendo: “r” o valor da correlação de pearon, $\{x_i\}$ os valores de um conjunto e $\{y_i\}$ um outro conjunto de dados.

Os dados utilizados foram S, T, P, ETP e IA, e correlacionados todos entre si, individualmente. Para a avaliação do resultado, Figueiredo Filho et al. (2014) descreveu que os valores do coeficiente variam de -1 a 1, e o sinal indica se a correlação é negativa ou positiva, e seu valor informa a magnitude da dependência. Desta forma, quanto mais perto de 1 ou -1, mais forte é o nível de associação linear entre as variáveis, e quanto mais perto de zero, menor é o nível de associação (ausência de correlação).

Para identificar qual fator apresentou maior influência na variação do IA, foi aplicada a análise de agrupamento hierárquica pela distância Euclidiana (simplesmente é a distância geométrica no espaço) aos dados de S (período correspondente à série temporal), T, P, ETP e IA correspondentes às médias móveis de 30 anos de cada estação meteorológica.

Foi utilizado a distância euclidiana como método de agrupamento, juntamente com o critério de Ward (1963), que indica a proximidade entre elementos por meio do coeficiente de dissimilaridade, desta forma, quanto maior o valor deste, menor será a semelhança entre objetos correspondentes.

Sendo o Método de Ward, o mais indicado para análise em componentes principais climatológicos (Guedes et al., 2010; Fechine e Galvêncio, 2008), a análise de agrupamento foi realizada com auxílio do programa STATISTICA 7.0 (STATSOFT, INC).

Tabela 2. Classificação climática utilizando-se do IA.

Classes Climáticas	Índice de Aridez (IA)
Úmido	IA ≥ 1,00
Subúmido Úmido	0,65 < IA < 1,00
Subúmido Seco	0,50 < IA ≤ 0,65
Semiárido	0,20 < IA ≤ 0,50
Árido	0,05 < IA ≤ 0,20
Hiperárido	IA ≤ 0,05

Fonte: adaptado do UNEP (1992)

Tabela 3. Classificação quanto ao nível de suscetibilidade à desertificação com o auxílio do Índice de Aridez.

Nível de susceptibilidade à desertificação	Índice de Aridez (IA)
Inferior a moderada	IA > 0,65
Moderada	0,51 < IA ≤ 0,65
Alta	0,21 < IA ≤ 0,50
Muito alta	0,05 < IA ≤ 0,20
Superior a muito alta	IA ≤ 0,05

Resultados e discussão

Os resultados dos cálculos de Índice de Aridez (IA) e Evapotranspiração (ETP) e, das variáveis meteorológicas, Temperatura (T) e Precipitação (P), em uma Série Temporal (S) obtidas nas estações meteorológicas selecionadas para área de estudo estão agrupados por estado e subgrupos por cidades, assim como suas devidas análises dispostas em figuras e tabelas.

Para a última série temporal (média móvel de 1986 a 2015), estação localizada em Salvador, verificou-se que os valores do IA de 1,35, com classificação de úmido para aridez e inferior a moderada para tendência a desertificação. Em Lençóis o IA foi 0,86 com classificação subúmido úmido e inferior a moderada, para Bom Jesus da Lapa o IA foi de 0,49 classificada como semiárido e alta.

Para a estação de Recife o IA foi de 1,59 e para Garanhuns 1,05, ambas com mesma classificação de úmido para aridez e inferior a moderada para tendência a desertificação. Já para Cabrobó o IA foi de 0,35 com classificação semiárida para a aridez e alta para tendência a desertificação.

Por meio da matriz de correlação de Pearson foi possível observar uma elevada correlação entre as séries temporais (S) e as demais variáveis climáticas para a maioria das estações meteorológicas (Tabela 4), evidenciando uma variação climática com o tempo. Com essa verificação, observa-se que todas as três regiões da Bahia estão passando

por mudanças nos padrões do IA desde 1961 a 2015. Explicações pelas mudanças no clima do Brasil podem estar relacionadas com os quantitativos de desflorestamento de locais essenciais para manutenção do equilíbrio ecológico e consequente maior emissão de CO₂, relatados por Hamilton e Friess (2018).

Em termos da série temporal (S), houve correlação positiva com todas as variáveis de T em todas as regiões da Bahia e para ETP em Lençóis e Bom Jesus da Lapa. Estes resultados são oriundos da elevação da temperatura e evapotranspiração potencial observada na série temporal avaliada. Santos et al. (2010) identificaram, para cenário atual e para o ano de 2050, tendências do aumento da temperatura média anual e da ETP em quase todas as estações da região nordeste do país.

Observou-se que, à medida que a temperatura aumenta a precipitação tende a diminuir de acordo com o grau de correlação fortemente negativo para Salvador (-0,898), Lençóis (-0,990) e Bom Jesus da Lapa (-0,920), evidenciando a ocorrência de mudanças climáticas nas regiões do Estado da Bahia.

Estas mudanças podem provocar consequências negativas na região como: maior incerteza na produção agrícola, principalmente no cultivo de sequeiro, onde a adoção de sistemas de irrigação ainda é impossibilitada, devido a questões econômicas e de disponibilidade hídrica; e redução do volume de água disponível ao consumo doméstico

Tabela 4. Valores médios, desvio padrão e Matriz de correlação de Pearson das variáveis climáticas, período da série temporal (S) e Índice de Aridez de cada estação meteorológica automática para as cidades da Bahia.

Salvador							
	Média	Desvio padrão	S	T	P	IA	ETP
S	2002,500	7,648	1,000				
T	25,496	0,138	0,889	1,000			
P	1950,210	81,157	-0,948	-0,898	1,000		
IA	1,396	0,048	-0,880	-0,875	0,939	1,000	
ETP	1396,974	20,727	-0,578	-0,444	0,578	0,265	1,000
Lençóis							
	Média	Desvio padrão	S	T	P	IA	ETP
S	2002,500	7,648	1,000				
T	23,417	0,301	0,966	1,000			
P	1278,506	135,559	-0,961	-0,994	1,000		
IA	1,066	0,144	-0,972	-0,988	0,990	1,000	
ETP	1204,448	41,415	0,897	0,868	-0,858	-0,920	1,000
Bom Jesus da Lapa							
	Média	Desvio padrão	S	T	P	IA	ETP
S	2002,500	7,648	1,000				
T	25,466	0,399	0,993	1,000			
P	840,411	31,762	-0,897	-0,920	1,000		
IA	0,583	0,042	-0,974	-0,981	0,957	1,000	
ETP	1446,490	57,515	0,968	0,962	-0,857	-0,968	1,000

Sendo: S - Série Temporal; IA - Índice de Aridez; T - Temperatura; P - Precipitação; ETP - Evapotranspiração Potencial.

e industrial. Segundo Angelotti et al. (2015) consequências negativas destas mudanças para a agricultura podem ser observadas e possivelmente, com longos períodos, não superadas com estratégias de adaptação.

Para Lençóis e Bom Jesus da Lapa, o IA apresentou elevada correlação negativa para S, ETP e T e positiva para P. Para Salvador, a ETP apresentou baixa correlação negativa com o IA.

Considerando que o IA de uma região consiste na razão entre a precipitação (entrada de água no sistema solo-planta através de chuvas) e as potenciais perdas de água desse sistema para a atmosfera através da evapotranspiração, e que a temperatura exerce grande influência e é diretamente proporcional a ETP, justifica-se a alta correlação negativa encontrada entre essas variáveis e o IA e a alta correlação positiva desta com a P. Evidenciando dessa forma, tendências nas variáveis climáticas, de redução para P e elevação para T, bem como a ETP e a S tem forte influência na redução do IA.

A baixa correlação positiva encontrada entre o IA e a ETP para a cidade de Salvador, pode estar associado ao maior equilíbrio promovido pela região litorânea entre a saída e entrada de água do sistema solo-planta, ou seja, possuem maiores precipitações e menores valores de ETP quando comparadas com regiões de agreste e sertão. Desta

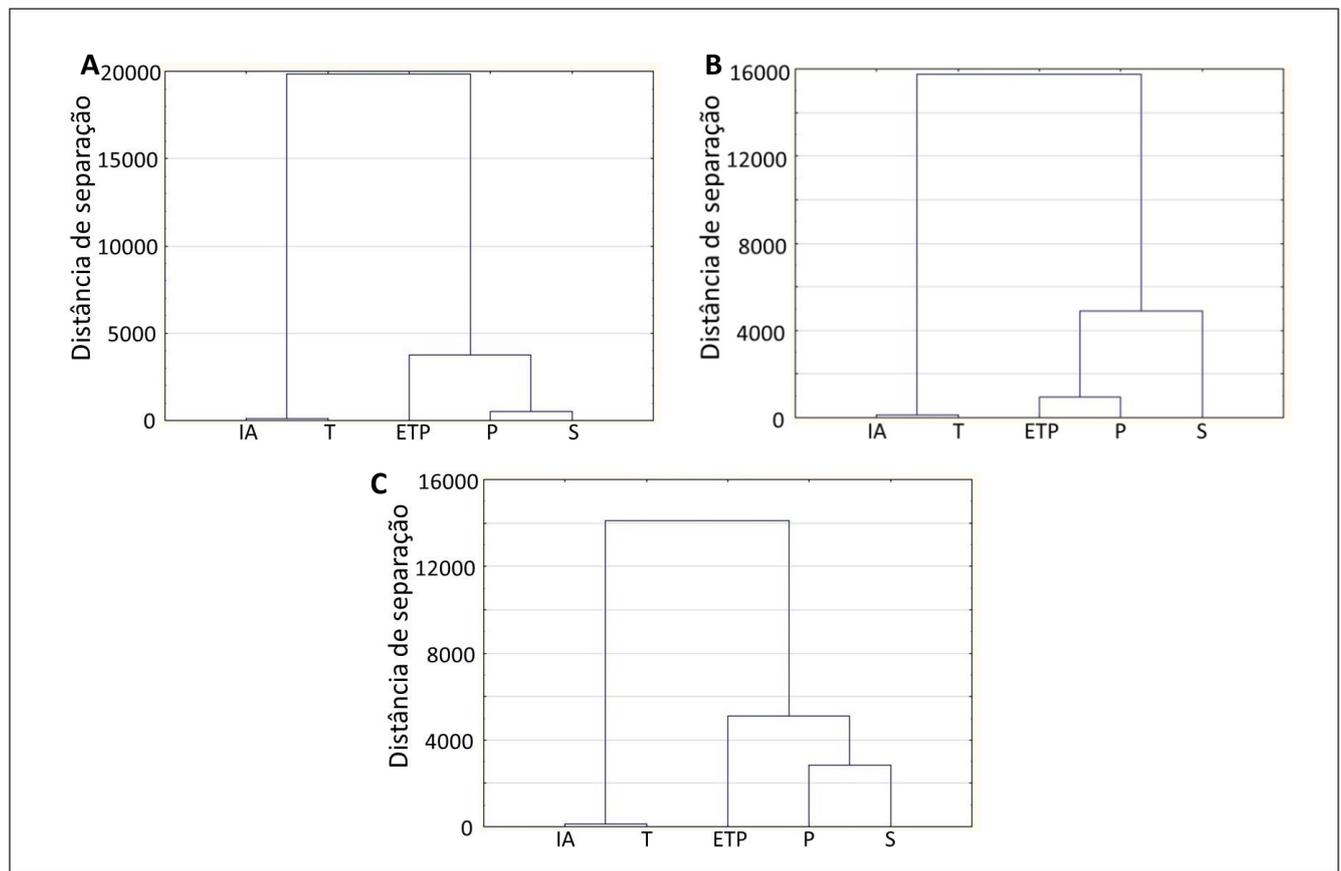
forma, indicando que a ETP exerce pouca influência na variação temporal do Índice de aridez.

De forma complementar a análise de correlação entre as variáveis estudadas segue apresentação de dendogramas (Figura 2) obtidos na análise de agrupamento que, considerando a linha de divisão de grupos na distância euclidiana correspondente a 1000, apontam a formação de dois grupos de variáveis, denominados Classe I e Classe II, para as três cidades do estado da Bahia, a Classe I formada pelas variáveis IA e T e a Classe II formada pelas variáveis S, ETP e P.

A partir da Distância Euclidiana entre as variáveis no Estado da Bahia, ao identificar os menores valores de distância entre T e IA (Classe I) (Tabela 5), sendo possível evidenciar que o aumento da temperatura foi o principal elemento climático responsável pela mudança do IA nas regiões avaliadas. Prado et al. (2016) com aplicação da Multivariada também conseguiu visualizar a influência da temperatura na variação do comportamento climático na cidade de Uberlândia (MG).

As variáveis ETP, P e S se estabeleceram na Classe II devido a maior similaridade entre eles para as cidades estudadas, os quais mostram que a P e a ETP foram os elementos que apresentaram mudanças de maior amplitude com o passar do tempo nas regiões.

Figura 2. Dendograma de componentes climáticos para o Estado da Bahia, para as cidades de Salvador (A), Lençóis (B) e Bom Jesus da Lapa (C), através do método de Ward utilizando a distância euclidiana como medida de parença, sendo: S - Série Temporal; IA - Índice de Aridez; T - Temperatura; P - Precipitação; ETP - Evapotranspiração Potencial. Os eixos verticais não possuem a mesma graduação.



Os municípios do Estado de Pernambuco contemplam as regiões da Zona da Mata, Agreste e Sertão apresentaram maiores correlações da Série Temporal (S) com as temperaturas (T) e posteriormente com precipitação (P), em que podem ser observados na matriz de correlação de Pearson. Ilustrando com isso, assim como a Bahia, este é um estado susceptível a ocorrência de mudanças climáticas capazes de comprometer as diversas atividades agrícolas de pequenos, médios e grandes produtores, afetando sua sustentabilidade econômica.

Nas três cidades de Pernambuco, o IA apresentou alta correlação negativa com a S e a T e alta correlação positiva com P. Quando relacionada com a ETP, o IA também apresentou uma correlação negativa, no entanto, observou-se menores dependências, comprovando ao observar as maiores distâncias nos dendogramas, principalmente para a cidade do Recife, a qual podemos considerar que a ETP exerce baixa dependência com relação ao IA.

Menores valores de ETP promove o aumento do valor de IA, que indica na redução da aridez local. Diante disso, fica comprovado que regiões litorâneas apresentam menores possibilidades a variação climática em relação ao IA, diferentemente do Agreste e Sertão, susceptíveis a aridez.

Considerando a linha de divisão de grupos na distância euclidiana correspondente a 1000 foi observado a formação de dois grupos de variáveis, denominados Classe I e Classe II, para as três cidades do estado de Pernambuco,

nesse caso, a Classe I para as cidades de Recife e Garanhuns foi formada pelas variáveis IA e T e a Classe II formada pelas variáveis S, ETP e P. Evidenciando com isso que a temperatura é a variável que maior relação tem com o IA e que existe maiores amplitudes da ETP e da P ao longo da Série temporal (Figura 3).

Para a cidade de Cabrobó-PE, a Classe I foi formada pelas variáveis IA, T, P e a Classe II formada pelas variáveis S, ETP. Nessa mudança, foi possível evidenciar que não só o aumento da temperatura, mas também os baixos valores de P foram os principais elementos climáticos responsável pela mudança do IA no sertão pernambucano.

Conclusões

A técnica hierárquica de agrupamentos constitui-se uma ferramenta importante na identificação dos componentes que contribuem para alteração no IA para as estações dos estados da Bahia e Pernambuco.

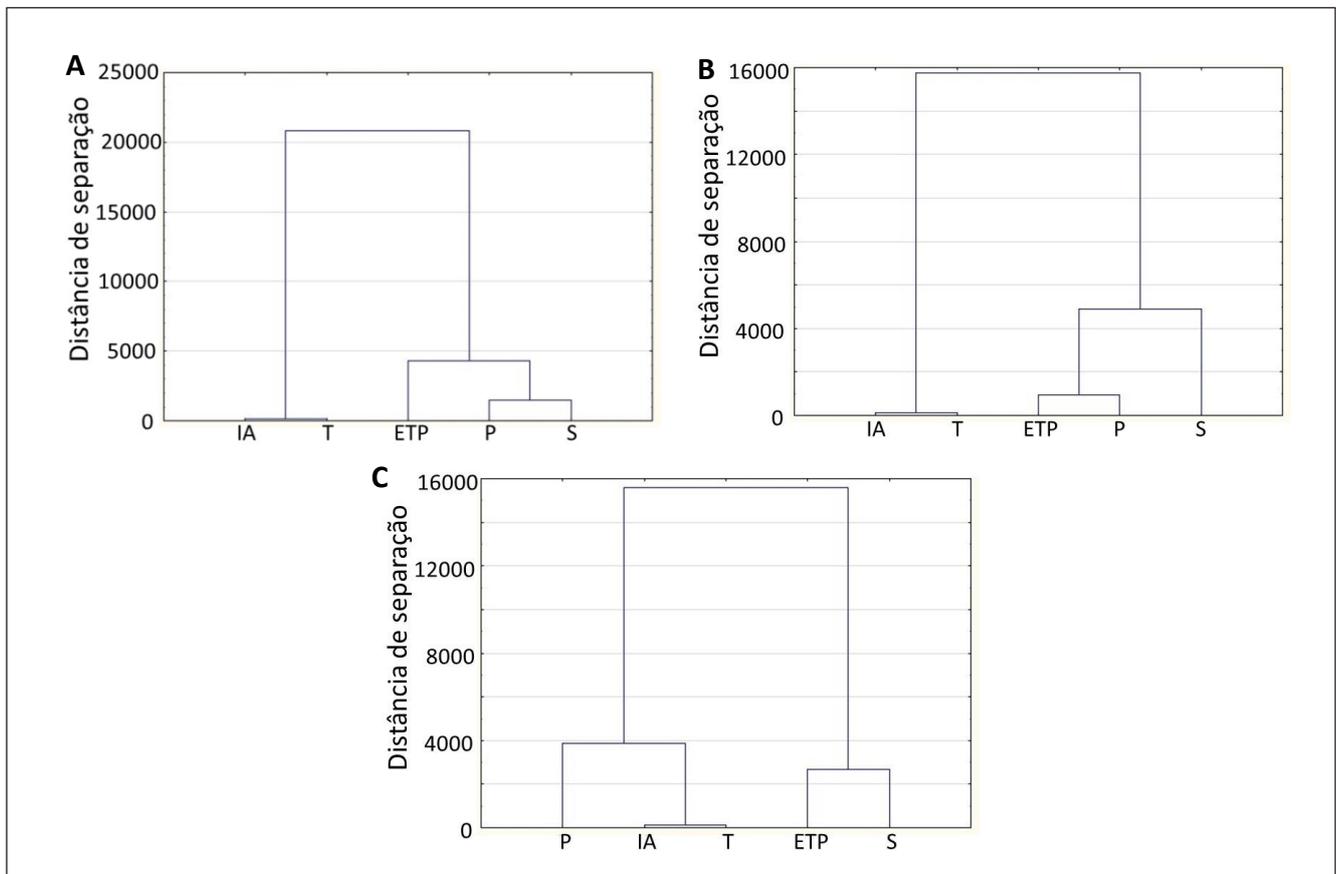
A elevação das temperaturas pode ser explicada pela série histórica, sendo o principal fator climático responsável pela redução do índice de aridez na região central do Semiárido brasileiro. Para o sertão pernambucano as altas temperaturas e baixos índices pluviométricos exercem maiores relações com o índice de aridez. Em avaliação conjunta, a variação da temperatura explica o aumento das condições de aridez.

Tabela 5. Valores médios, desvio padrão e Matriz de correlação de Pearson das variáveis climáticas, o período da série temporal (S) e Índice de Aridez de cada municípios do Estado de Pernambuco.

Recife							
	Média	Desvio padrão	S	T	P	IA	ETP
S	2002,500	7,648	1,000				
T	25,711	0,162	0,991	1,000			
P	2291,520	50,397	-0,686	-0,747	1,000		
IA	1,592	0,029	-0,743	-0,776	0,830	1,000	
ETP	1439,445	17,6212	-0,086	-0,146	0,520	-0,042	1,000
Garanhuns							
	Média	Desvio padrão	S	T	P	IA	ETP
S	2002,500	7,648	1,000				
T	20,755	0,127	0,849	1,000			
P	1224,395	57,822	-0,736	-0,892	1,000		
IA	1,244	0,090	-0,951	-0,872	0,802	1,000	
ETP	987,070	47,054	0,747	0,440	-0,218	-0,756	1,000
Cabrobó							
	Média	Desvio padrão	S	T	P	IA	ETP
S	2002,500	7,648	1,000				
T	26,395	0,281	0,983	1,000			
P	590,621	28,545	-0,766	-0,805	1,000		
IA	0,399	0,027	-0,886	-0,877	0,907	1,000	
ETP	1482,404	47,775	0,729	0,651	-0,408	-0,753	1,000

Sendo: S - Série Temporal; IA - Índice de Aridez; T - Temperatura; P - Precipitação; ETP - Evapotranspiração Potencial.

Figura 3. Dendograma de componentes climáticos para o Estado de Pernambuco, para as cidades de Recife (A), Garanhuns (B) e Cabrobó (C), através do método de Ward utilizando a distância euclidiana como medida de parença, sendo: S – Série Temporal; IA - Índice de Aridez; T - Temperatura; P - Precipitação; ETP - Evapotranspiração Potencial. Os eixos verticais não possuem a mesma graduação.



Não há influência da precipitação na variação do IA, em que está acentuando-se as condições de aridez. Os parâmetros S, T e ETP exercem forte correlação para elevação das condições de aridez (coeficiente de correlação próximo de -1) em todas as estações meteorológicas avaliadas, com destaque para os do estado da Bahia que apresentaram grau de correlação mais forte.

Agradecimentos

À CAPES e FACEPE, pelas bolsas de doutorado dos autores, e ao INMET pela disponibilização dos dados climatológicos histórico através do BDMET.

Referências

ALMEIDA, H. A.; AGUIAR, D. B.; SILVA, J. N.; DAMASECENO, J. Indicadores hídricos do núcleo de desertificação da Microrregião do Seridó Ocidental da Paraíba. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 7, n. 5, p. 1-10, 2014.

ANGELOTTI, F.; SIGNOR, D.; GIONGO, V. Mudanças Climáticas no Semiárido Brasileiro: Experiências e Oportunidades para o Desenvolvimento. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 08, n. especial IV SMUD, p. 484-495, 2015.

BASSO, R.; ALLASIA, D.; TASSI, R.; BAYER, D. M. 2015. Sub-daily extreme events distribution and changes in Northeastern Brazil in the 20th century. *International Association for Hydro-Environment Engineering and Research*, n. 369, p. 135-140, 2015.

BERLATO, M. A.; CORDEIRO, A. P. A. Sinais de mudanças climáticas

globais e regionais, projeções para o século XXI e as tendências observadas no Rio Grande do Sul: uma revisão. *Agrometeoros*, v. 25, p. 273-302, 2017.

CAMARGO, M.B.P.; CAMARGO, A.P. Representação gráfica informatizada do extrato do balanço hídrico de Thornthwaite & Mather. *Bragantia*, v. 52, p. 169-172, 1993.

CARVALHO, A. L.; MENEZES, R. S. C.; NÓBREGA, R. S.; PINTO, A. S.; OMETTO, J. P. H. B.; RANDOW, C. Impact of climate changes on potential sugarcane yield in Pernambuco, northeastern region of Brazil. *Renewable Energy*, n. 78, p. 26-34, 2015.

CAVALCANTI, IRACEMA F. A.; NUNES, L. H.; MARENGO, J. A.; GOMES, J. L.; SILVEIRA, V. P.; CASTELLANO, M. S. Projections of Precipitation Changes in Two Vulnerable Regions of São Paulo State, Brazil. *American Journal of Climate Change*, v. 06, p. 268-293, 2017.

CRUZ, F. R. M.; SILVA, L. A.; PEREIRA, E. M.; LUCENA, R. L. Discussões sobre as mudanças climáticas globais: os alarmistas, os céticos e os modelos de previsão do clima. *GeoTextos*, v. 10, n. 1. p. 243-258, 2014.

FECHINE, J. A. L.; GALVÍNIO, J. D. Agrupamento da precipitação mensal da Bacia Hidrográfica do Rio Brígida-pe, através da multivariada. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 01, p. 39-46, 2008.

FIGUEIREDO FILHO, D. B.; ROCHA, E. C.; SILVA JÚNIOR, J. A.; PARANHOS, R.; NEVES, J. A. B.; SILVA, M. B. Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson: o Retorno. *Revista Leviathan*, n. 8, p. 66-95, 2014.

FRANCISCO, P. R. M.; MEDEIROS, R. M.; MATOS, R. M.; BANDEIRA, M. M.; SANTOS, D. Analysis and mapping of moisture indices, water and aridity through the BHC for the Paraíba state. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 8, p. 1093-1108, 2015.

GREASBY, T. A.; SAIN, S. R. Multivariate spatial analysis of climate change projections. *Journal of Agricultural Biological and Environmental Statistics*, n. 16, p. 571-585, 2011.

GUEDES, R. V. S.; LIMA, F. J. L.; AMANAJÁS, J. C.; BRAGA, C. C. Análise em componentes principais da precipitação pluvial no estado do Piauí e pelo método de ward. *Revista de Geografia*, v. 27, n. 1, 2010.

- HAMILTON, S. E.; FRIESS, D. A. Global carbon stocks and potential emissions due to mangrove deforestation from 2000 to 2012. *Nature Climate Change*, v. 8, n. 2, p. 240-244, 2018.
- HUI, F. K. Model-based simultaneous clustering and ordination of multivariate abundance data in ecology. *Computational Statistics & Data Analysis*, v. 105, p. 1-10, 2017.
- LOPES, I., LEAL, B. G. Índice de aridez e tendência a desertificação para estações meteorológicas nos estados da Bahia e Pernambuco. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 17, p. 155-172, 2015.
- LOPES, I.; LEAL, B. G. L. **Software para o cálculo do balanço hídrico de Thornthwaite - Patente BR 51 2016 001060-6**. 2016.
- LOPES, I.; SANTOS, S. M. dos; TAURA, T. A.; OLDONI, H.; LEAL, B. G. Desertification climatic susceptibility to the Center-North region of Brazilian Semi-Arid. *Journal of hyperspectral remote sensing*, v. 7, p. 101-110, 2017.
- LOPES, I.; SANTOS, S. M. dos; LEAL, B. G.; MELO, J. M. M. Variação do índice de aridez e tendência climática à desertificação para a região semiárida do nordeste brasileiro. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 10, p. 81-96, 2017.
- MANSSIGNAM, A. M. ; PANDOLFO, C. ; SANTI, A. ; CARAMORI, P. H. ; VICARI, M. B. Impact of climate change on climatic zoning of common bean in the South of Brazil. *Agrometeoros*, v. 25, p. 313-321, 2017.
- MATALLO JÚNIOR, H.; SCHENKEL, C. S. **Desertificação**. Brasília, DF: UNESCO, 2003. 82p.
- MILLY, P. C. D.; DUNNE, K. A. Potential evapotranspiration and continental drying. *Nature Climate Change*, v. 6, n. 4, 946-949 2016.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Atlas das áreas susceptíveis à desertificação do Brasil**. Secretaria de Recursos Hídricos, Brasília: MMA, 2010.
- MOORE, D. S. **The Basic Practice of Statistics**. New York, Freeman, 2007. 728p.
- NANGOMBE, S.; ZHOU T.; ZHANG, W.; WU, B.; HU, S.; ZOU, L.; LI, D. Record-breaking climate extremes in Africa under stabilized 1.5 °C and 2 °C global warming scenarios. *Nature Climate Change*, v. 8, n. 4, p. 1-8, 2018.
- PENMAN, H.L. The physical bases of irrigation control. In: International horticultural Congress, 13, 1952, London. **Book of Royal Horticultural Society**, p.913-924, 1953.
- PRADO, B. Q. M.; FERNANDES, H. R.; ARAÚJO, T. G.; LAIA, G. A.; BIASE, N. G. Avaliação de variáveis climatológicas da cidade de Uberlândia (MG) por meio da análise de componentes principais. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 21, p. 407-413, 2016.
- SANTOS, D.N. DOS; SILVA, V DE P.R. DA; SOUSA, F. DE A.S.; SILVA, R.A. Estudo de alguns cenários climáticos para o Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 14, n. 5, p. 492-500, 2010.
- SANTOS, S. M. dos; LEAL, B. G.; TAURA, T. A. Determinação da suscetibilidade climática à desertificação para os municípios baianos de Juazeiro, Casa Nova, Sobradinho e Curaçá. *Okara: Geografia em Debate*, v. 10, n. 1, p. 171-184, 2016.
- SENTELHAS, P. C.; PEREIRA, A. R.; MARIN, F. R.; ANGELOCCI, L. R.; ALFONSI, R. R.; CARAMORI, P. H.; SWART, S. **Balanços Hídricos Climatológicos de 500 localidades brasileiras**. Piracicaba: Departamento de Ciências Exatas, 1999.
- SOLOMON, S.; DANIEL, J. S.; SANFORD, T. J.; MURPHY, D. M.; PLATTNER, G.-K.; KNUTTI, R.; FRIEDLINGSTEIN, P. Persistence of climate changes due to a range of greenhouse gases. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 107, n. 43, p. 18354-18359, 2010.
- SOUZA, S. O.; CÔRREA, W.; FILETI, R.; VALE, C. C. Balanço Hídrico da Bacia do Rio Caravelas (BA) como Subsídio ao Planejamento Agrícola. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 7, n. 1 (2014).
- THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical review*, v.38, p.55-94, 1948.
- THORNTHWAITE, C. W. **Atlas of climatic types in the United States 1900-1939**. Department of Agriculture Miscellaneous Publications, n. 421, 48 p., 1941.
- THORNTHWAITE, C. W., MATTER, J. R., **The water balance**. Publications in climatology, new jersey, drexel institute of thecnology, 104p. 1955.
- UFOEGBUNE, G. C.; YUSUF, H. O.; ERUOLA, A. O.; AWOMESO, J. A. Estimation of Water Balance of Oyan Lake in the North West Region of Abeokuta, Nigeria. *British. Journal of Environment & Climate Change*, v. 1, p. 13-27, 2011.
- UNEP. **United Nations Environment Programme. World Atlas of Desertification**. Londres: UNEP/Edward Arnold. 69 p., 1992.
- WARD, J.H. Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal American Statistical Association*, v. 58, p. 236-244, 1963.
- WMO. Calculation of monthly and annual 30-year standard normals, **WCDP No. 10, WMOTD No. 341**. World Meteorological Organization, Geneva. 1989.

REFERENCIAÇÃO

- LOPES, I.; MELO, J. M. M.; CARVALHO, A. A.; MOURA, G. B. A. M.; LEAL, B. G. Análise multivariada no estudo da variação do índice de aridez da Bahia e Pernambuco. *Agrometeoros*, Passo Fundo, v.26, n.1, p.93-102, 2018.



Multivariate analysis in the study of variation of the aridity index in the Bahia and Pernambuco states, Brazil

Iug Lopes^{1(*)}, Juliana Maria Medrado de Melo², Ailton Alves de Carvalho², Geber Barbosa de Albuquerque Moura² e Brauliro Gonçalves Leal³

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano, Campus Bom Jesus da Lapa. Rodovia BR349, s/n, Zona Rural, CEP 47600-000 Bom Jesus da Lapa, BA, Brazil. E-mail iug.lopes@ifbaiano.edu.br

²Universidade Federal Rural de Pernambuco - Departamento de Tecnologia Rural. Rua Dom Manoel de Medeiros, CEP 50710-470 Dois Irmãos. Recife, PE, Brazil. E-mails: medrado.juliana@gmail.com, ailtonalvesst@hotmail.com e geber.moura@ufrpe.br

³Universidade Federal do Vale do São Francisco, Campus Juazeiro. Avenida Antonio Carlos Magalhães, 510, Country Club, CEP 48902-300 Juazeiro, BA, Brazil. E-mail: brauliro.leal@univasf.edu.br

(*)Corresponding author.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 5 May 2018

Accepted 20 December 2018

Index terms:

climate changes
potential evapotranspiration
moving averages
climatology

ABSTRACT

The identification of regions vulnerable to desertification is necessary for the Brazilian Northeast, which presents water restriction and sensitivity to climate change. In this way, through the Aridity Index (AI) it is possible to identify these changes and the climatic elements that influence the changes in different geographic locations. The objective was to identify the main climatic elements responsible for temporal and spatial variation of AI in the states of Bahia and Pernambuco through multivariate analysis. The studied locations were Salvador, Lençóis, Bom Jesus da Lapa, Recife, Garanhuns and Cabrobó. The Climatological Water Balance was calculated for each station in each moving average of 30 years from 1961 to 2015, with the aid of Thornthwaite® Water Balance Calculation Software. The hierarchical grouping analysis was applied to the data of time series (S), temperature (T), precipitation (P), potential evapotranspiration (PWT) and AI. Bahia underwent changes in AI, and it was possible to show that the increase in temperature was the main responsible climatic element. In Pernambuco there were also higher correlations of the time series with temperatures. S, T and PWT exerted a strong correlation to increase the aridity condition in all the studied locations.

© 2018 SBAGro. All rights reserved.

CITATION

LOPES, I.; MELO, J. M. M.; CARVALHO, A. A.; MOURA, G. B. A. M.; LEAL, B. G. Análise multivariada no estudo da variação do índice de aridez da Bahia e Pernambuco. *Agrometeoros*, Passo Fundo, v.26, n.1, p.93-102, 2018.