

VARIABILIDADE DA UMIDADE ABSOLUTA DO AR: UMA ANÁLISE TOPOCLIMÁTICA NO PARQUE NACIONAL DE APARADOS DA SERRA, RIO GRANDE DO SUL

Jakeline Baratto

Universidade de São Paulo – USP
Departamento de Geografia, São Paulo SP, Brasil
jakelinebarattogeo@gmail.com

Emerson Galvani

Universidade de São Paulo – USP
Departamento de Geografia, São Paulo SP, Brasil
egalvani@usp.br

Ismael Luiz Hoppe

Universidade Federal de Santa Maria – UFSM
Departamento de Geociências, Santa Maria, RS, Brasil
ismael.hoppe@hotmail.com

Alécio Perini Martins

Universidade Federal de Jataí – UFJ
Unidade Acadêmica Especial de Estudos Geográficos, Jataí, GO, Brasil
alecioperini@ufj.edu.br

Cássio Arthur Wollmann

Universidade Federal de Santa Maria – UFSM
Departamento de Geociências, Santa Maria, RS, Brasil
cassio_geo@yahoo.com.br

RESUMO

O objetivo deste trabalho é calcular a umidade absoluta do ar a partir dos dados de temperatura e umidade do ar e entender a variabilidade da umidade absoluta do ar (UA) no perfil topoclimático no Parque Nacional de Aparados da Serra (PNAS), Rio Grande do Sul. Os valores de UA foram calculados a partir dos dados horários da temperatura do ar e umidade relativa do ar coletados em seis pontos com diferentes altitudes no período de 13/07/2017 à 30/11/2018. Os coeficientes de correlação e regressão foram usados para validar a influência da altitude na variação da umidade absoluta do ar. Utilizou-se a cokrigagem para estimar a umidade absoluta do ar em função da altitude. Os resultados comprovam a relação inversa da umidade absoluta do ar com a altitude. Os pontos com maior altitude registraram os menores valores de UA média, em oposição às menores altitudes. A altitude expressou maior relação com a umidade absoluta mínima do ar ($r=0,90$). Apesar dos valores de correlação entre a altitude e a umidade, a espacialização identificou que a UA não apresenta variabilidade pelo fato da área ser naturalmente úmida pela proximidade do oceano Atlântico e da atuação de brisa marítima frequente na região.

Palavras-chave: Variabilidade higrométrica. Cokrigagem. Altitude. Parque Nacional de Aparados da Serra.

ABSOLUTE AIR HUMIDITY VARIABILITY: A TOPOCLIMATIC ANALYSIS IN THE APARADO DA SERRA NATIONAL PARK, RIO GRANDE DO SUL

ABSTRACT

This research concerned in to calculate the absolute humidity of the air (AH) using temperature and humidity data and to understand the variability of the absolute air humidity in the topoclimatic profile at Aparados da Serra National Park. The AH values were calculated from hourly data of air temperature and relative humidity collected at six locations with different altitudes between July 13, 2017, and November 30, 2018. Correlation and regression coefficients were used to understand and validate the influence of surface elevation over the variation of absolute air humidity. Cokriging was used to estimate absolute air humidity as a function of altitude. Results prove the inverse relationship between absolute air humidity and altitude. The points with the highest altitude recorded the lowest average AH values, as

opposed to the lowest altitudes. Altitude expressed a greater relationship with minimum absolute air humidity ($r=0.90$). The correlation values show a strong relationship between altitude and humidity. Spatialization analysis identified that AH does not present variability due to the fact that the area is naturally humid, stemming from the proximity of the Atlantic Ocean and the presence of frequent sea breezes in the region.

Keywords: Hygrometric variability. Cokriging. Elevation. Aparados da Serra National Park.

INTRODUÇÃO

Um dos atributos climáticos influenciados pelo topoclima é a umidade do ar. Considerado como uma escala de abordagem, o topoclima busca entender a relação do relevo na variação do atributo climático (RIBEIRO, 1993). O teor de umidade na atmosfera não é medido apenas pela umidade relativa do ar, ele pode ser expresso por alguns índices como umidade específica, razão de mistura, temperatura do ponto de orvalho e umidade absoluta do ar (BARRY; CHORLEY, 2013).

A variação da umidade absoluta do ar, foco deste estudo, é pouco trabalhada em pesquisas climatológicas pelo equacionamento matemático e derivações da temperatura e umidade relativa do ar, além dos procedimentos de cálculo das pressões de vapor. A escolha da umidade absoluta também se deve em função dela não apresentar dependência com a temperatura do ar (GOBO et al., 2019). Nesse sentido, Barry e Chorley (2013) definem a umidade absoluta como sendo a massa total de vapor de água contida em um determinado volume de ar, e geralmente é expresso em g/m^3 . Alguns autores buscam trabalhar com a umidade absoluta em ambientes urbanos, como no caso de Masiero e Souza (2013) na área urbana de São José do Rio Preto (SP), Alves et al. (2016) na área urbana de Iporá (GO) e Leal, Biondi e Batista (2017) na área urbana de Curitiba (PR). Em Espírito Santo do Pinhal (SP), Gobo et al. (2019) estudaram o clima urbano a partir de dados locais de temperatura do ar e umidade absoluta do ar.

Em ambientes com elevadas altitudes, a variação da umidade absoluta do ar foi investigada por Cheyret et al. (2020). Os autores analisaram a oscilação da temperatura do ar e da umidade (absoluta e relativa) do ar em função da altitude em duas vertentes (Sul e Norte) da Cordilheira de Tianshan, localizada na Ásia Central, entre as altitudes de 1548 até 2990 metros. Os resultados apresentados pelos autores em relação à umidade absoluta mostraram que, na vertente norte, a umidade absoluta média diminuiu com o aumento da altitude. No entanto, na vertente sul, não foi observada nenhuma variação nos valores de umidade absoluta.

A água contida na atmosfera, representada pela umidade absoluta, torna-se importante para algumas aplicações, como na avaliação da estabilidade atmosférica e formação de nuvens (BARRERA-VERDEKO et al., 2016). Wood et al. (2019) também reconhecem que as diferentes medidas da umidade do ar podem ser utilizadas em aplicações meteorológicas, hidrológicas, biológicas e ecológicas. No entanto, os referidos autores exemplificam que as medidas de umidade específica e absoluta permitem calcular a água precipitável de uma coluna de ar e quantificar o transporte de vapor de água na atmosfera.

Rangwala (2012) enfatiza que a concentração atmosférica de vapor de água é variável no espaço e no tempo. Diante disso, para Barry e Chorley (2013), o transporte de umidade ocorre horizontalmente e verticalmente. Whiteman (2000) também ressalta que a umidade é o conteúdo de vapor de água, que varia ao longo do tempo e no espaço. A concentração de vapor d'água que o ar pode reter depende da temperatura do ar. Quanto mais quente o ar, maior a capacidade de retenção de vapor de água, em comparação com o ar mais frio. Dessa forma, em regiões quentes e equatoriais concentram-se altos valores de umidade. Segundo Pereira et al. (2002), a água contida na atmosfera tem papel relevante para vários processos físicos naturais, sendo eles: o transporte e a distribuição de calor na atmosfera, a evaporação e evapotranspiração e a absorção de ondas de radiação solar e terrestre.

Nesse contexto, em função dos poucos estudos sobre a umidade absoluta do ar no topoclima, o objetivo deste trabalho é calcular a umidade absoluta do ar a partir dos dados de temperatura e umidade do ar e entender a variabilidade da umidade absoluta do ar no perfil topoclimático no Parque Nacional de Aparado da Serra (PNAS).

O PNAS é uma unidade de conservação e um atrativo turístico recebendo mais de 137.294 mil visitantes no ano de 2019 (ICMBio, 2021). Somado a sua importância geológica e biológica, a região foi reconhecida pela UNESCO como Geoparque (Global Geoparks Network – GGN) em 2022. Denominado Geoparque Cânions do Sul, o Geoparque abrange os municípios de Cambará do Sul, Mampituba e Torres, no Rio Grande do Sul; Praia Grande, Jacinto Machado, Timbé do Sul e Morro Grande, em Santa Catarina (MARTINS, 2022). Desse modo, o estudo sobre as variações da umidade do ar poderá contribuir para um melhor conhecimento da dinâmica climática da região, além de auxiliar no plano de manejo do PNAS.

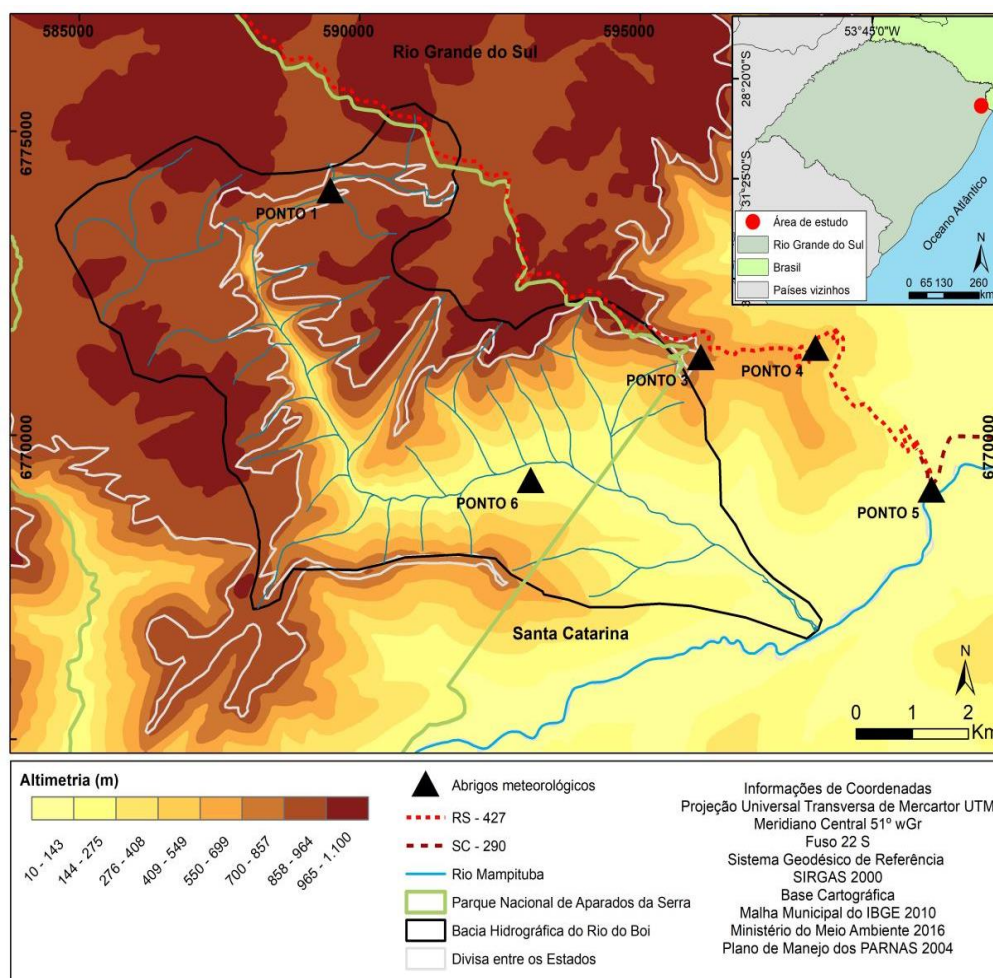
Além disso, o estudo sobre a umidade do ar tem um significativo impacto na região, pois a frequência de nevoeiros da região é intensa. Segundo Tubelis e Nascimento (1984), nessa região ocorrem de 40 a 100 dias com nevoeiros por ano. Estudos recentes têm apontando que a ocorrência de precipitação oculta em função dos nevoeiros é relevante, configurando como fonte de água para a região (BARATTO et al., 2022).

METODOLOGIA

Área de estudo

A área de estudo corresponde ao Parque Nacional de Aparados da Serra (PNAS) e a área do seu entorno. Essa região foi escolhida pois possui as maiores altitudes do estado e está localizada na região nordeste do Rio Grande do Sul, divisa com Santa Catarina (Figura 1). Para efeitos estatísticos e quantitativos, utilizou-se o recorte da Bacia Hidrográfica do Rio do Boi (BHRB) que está localizada dentro do PNAS e nas proximidades.

Figura 1 - Localização da bacia hidrográfica do Rio do Boi, Parque Nacional de Aparados da Serra, localização e a distribuição dos pontos no perfil topoclimático, 2024.



Fonte - Autores (2024).

O PNAS foi criado no ano de 1959 pelo Decreto Estadual nº 47.446, alterado em 17/03/1972 pelo Decreto Federal nº 70.296, e abrange uma área de 10.250 ha. O PNAS foi criado com o intuito de proteger as belezas naturais da região e para protegem uma área natural contínua e preservam ecossistemas dentro do bioma Mata Atlântica, como a Floresta Ombrófila Mista, Floresta Ombrófila

Densa Montana e Submontana, Floresta Nebular, Campos Secos, Campos Turfosos, Campos Rupestres e Vegetação Rupícola (MMA/IBAMA, 2004).

Os tipos climáticos encontrados na área de estudo, conforme a classificação climática do Köppen, são os subtropicais Cfa e Cfb (ÁLVARES et al., 2013; BECK et al., 2018). O tipo Cfa está presente na área de menor altitude e se caracteriza pela ausência de estação seca, com verão quente. O tipo climático Cfb localiza-se na área de maior altitude, mas apresenta temperaturas amenas no verão (ÁLVARES et al., 2013).

Além da elevada altitude, a área de estudo foi escolhida pois possui um gradiente altimétrico de 900 m em aproximadamente 7,0 km. No setor norte e nas bordas do cânion Itaimbezinho, encontram-se as maiores altitudes que variam de 890 m até 1030 m. As menores altitudes estão no setor sudeste e ao longo do Rio do Boi, cuja variação é de 41 m à 177 m. As maiores variações altimétricas estão localizadas na região central e se estendem ao longo do cânion Itaimbezinho.

Dados de temperatura e umidade relativa do ar

Para a análise higrométrica, foram utilizados dados de umidade relativa do ar e temperatura do ar para calcular a umidade absoluta do ar. Esses dados foram coletados nos *datalogger's* (marca Instrutherm e modelo HT500) inseridos em mini abrigos meteorológicos construídos com base no modelo de Armani e Galvani (2006) e Hoppe et al. (2015). Esses abrigos foram distribuídos em diferentes altitudes na serra entre o Rio Grande do Sul e Santa Catarina (Figura 1). O período de coleta de dados correspondeu de 13/07/2017 à 30/11/2018.

Os registros de temperatura do ar e umidade relativa do ar apresentaram falhas. Os pontos P3 e P6 tiveram 100% dos dados aproveitáveis (12072 dados horários cada ponto). O P2 registrou o menor número de dados aproveitáveis (8,6%), devido ao furto do equipamento. O P5, P4 e P1 tiveram taxas de falhas 22%, 38,5% e 55,2% respectivamente. Os horários dessas falhas foram descartadas para ambos os conjuntos de dados (Tabela 1).

Tabela 1 - Porcentagem de falhas dos abrigos meteorológicos nos pontos de coleta de dados. 2024.

ID	Total de dados	Falhas (%)
Ponto 1	12072	55,2
Ponto 2	12072	91,4
Ponto 3	12072	0,0
Ponto 4	12072	38,5
Ponto 5	12072	22,0
Ponto 6	12072	0,0

Fonte - Autores (2024).

Os dados foram organizados em planilhas eletrônicas para manipulação e cálculo da umidade absoluta (UA). As equações (1), (2) e (3) (VIANELLO, 1991; PEREIRA et al., 2002 ALVES et al., 2016; GOBO et al., 2019) foram utilizadas, onde *Tar* representa a temperatura do ar, *UR* a umidade relativa do ar, *es* a pressão de saturação de vapor d'água e *ea* é a pressão atual do vapor de água.

$$es = 0,611 \cdot 10^{[(7,5 \cdot Tar)/(273,3 + Tar)]} \quad (\text{kPa}) \quad (1)$$

$$ea = UR \cdot es / 100 \quad (2)$$

$$UA = 2168 \cdot ea / (273 + Tar) \quad (\text{g/m}^3) \quad (3)$$

Análise estatística

Após obtenção dos valores horários da umidade absoluta, realizaram-se os cálculos das médias, máxima e mínima diárias para a análise da estatística descritiva. Optou-se por uma análise descritiva com a geração de gráficos e tabelas para avaliar a variabilidade temporal das médias diárias de umidade absoluta do ar. A análise estatística descritiva utilizada incluiu a média, máxima, mínima do conjunto de dados horários, além das medidas de dispersão como a amplitude e o desvio padrão para cada ponto, conforme descrito por Andriotti (2013). Essas medidas foram utilizadas para analisar a variabilidade dos dados (BUSSAB; MORETTIN, 2010). A amplitude corresponde à diferença entre o maior e o menor valor. O desvio padrão expressa os valores na mesma unidade que os dados. Dessa forma, o desvio padrão é uma medida relativa e afirma se dos dados tem desvios grandes ou pequenos (OGLIARI; ANDRADE, 2015). Todo esse processo foi realizado no WPS Office planilhas (2020).

Para melhor entender a influência da altitude na variação da umidade absoluta do ar, utilizou-se o coeficiente de correlação para quantificar a associação entre as duas variáveis quantitativas (OGLIARI; ANDRADE, 2015). A correlação expressa a intensidade da relação entre duas variáveis (X e Y). Quanto mais próximo de 1(-1), maior é a relação entre elas, sendo que -1 expressa a correlação inversa, +1, que expressa a correlação direta, conforme descrito por Andriotti (2013). Para análise mais confiável estatisticamente, utilizou-se regressão linear simples (BUSSAB; MORETTIN, 2010) para associar à variável dependente (umidade absoluta) com a variável independente (altitude), como também realizado no trabalho de Gheyret et al. (2020). A regressão linear simples prediz o valor da variável Y em função da variável x. A equação de regressão (4) descreve o relacionamento entre as variáveis. As constantes a e b presentes da equação representam o coeficiente regular da reta (a) e a ordenada do ponto em que a reta corta o eixo das ordenadas (b) (ANDRIOTTI, 2013). Esses coeficientes foram aplicados aos valores médios da umidade absoluta do ar média, máxima e mínima de todo o período analisado.

$$Y = aX + b \quad (4)$$

Estimativa da umidade absoluta do ar para a bacia hidrográfica do Rio do Boi

Em função do alto valor de correlação entre a umidade absoluta e a altitude, optou-se por utilizar a cokrigagem para estimar os valores umidade. A interpolação por cokrigagem vem sendo um método utilizado para estimar as variáveis meteorológicas por diversos pesquisadores (CUNHA et al., 2013; AHMED et al., 2014; CHAVES et al., 2018; AL-QINNA, 2018). Andriotti (2013) destaca que a cokrigagem é utilizada quando duas variáveis são correlacionadas, desta forma o método estima uma variável em função das informações da outra variável, buscando melhorar a estimativa. Oglari e Andrade (2015) ressaltam que a cokrigagem é utilizada quando duas variáveis são correlacionadas, sendo um método eficiente para estimar uma variável em função das informações da outra variável.

Assim, a cokrigagem permite a inserção de um parâmetro adicional na interpolação (AHMED et al., 2014). Al-Quinna (2018) resalta que a cokrigagem é um método flexível para a interpolação em relação à altitude. O autor também menciona que a cokrigagem é um aprimorado método para estimar diversas variáveis climáticas. A cokrigagem é aplicada quando as variáveis utilizadas são correlacionadas, enquanto a krigagem é empregada quando não tiver correlação espacial entre as variáveis utilizadas.

Para melhorar a estimativa da umidade absoluta, utilizou-se dados das estações meteorológicas automáticas de Cambará do Sul e de Torres, administradas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2023). A estação de Torres (CÓDIGO A808) está localizada entre as coordenadas geográficas 29° 20' 57.13" S e 49° 43' 48.04" O e a uma altitude de 5 metros. A estação de Cambará do Sul (A897) tem a maior altitude (1015m) e está localizada entre as coordenadas geográficas 29° 2'56.01" S e 50° 8' 57.99" O. Essas estações estão a uma distância de 50 km. Os dados de temperatura do ar e umidade relativa do ar, de ambas as estações, foram adquiridos do período de 13/07/2017 até 30/11/2018., para o cálculo da umidade absoluta do ar conforme as equações 1, 2 e 3. A porcentagem de falhas das estações foi de 2,8 % (352 dados horários) para a estação de Torres e 0,8% para a estação de Cambará do Sul (105 dados horários).

Com os valores horários de umidade absoluta do ar, calcularam-se as médias, máximas e mínimas diárias, para depois calcular as médias do período (média, máxima e mínima). Os valores das médias do período foram adicionados ao banco de dados para a realização da estimativa da umidade absoluta do ar. Em função dos locais de amostragem dos dados, utilizou-se como recorte da espacialização a bacia hidrográfica do Rio do Boi.

A interpolação foi realizada no ArcGIS 10.1 por meio da extensão Geostatistical Analyst. Realizou-se a interpolação para os valores de umidade absoluta média, máxima e mínima. As informações altimétricas foram extraídas do modelo digital do terreno (MDT), disponibilizado pelo United States Geological Survey (USGS, 2023).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Variabilidade da umidade absoluta do ar média diária

Os resultados mostraram que a umidade absoluta do ar variou entre $8,3 \text{ g/m}^3$ (P2) e $14,2 \text{ g/m}^3$ (P5). Observou-se que os menores valores médios da umidade absoluta ocorrem nos pontos de maior altitude (P5 e P6). Entretanto, os maiores valores ocorrem nos pontos de menor altitude (P1 e P2). Valores mais baixos de umidade absoluta do ar foram encontrados por Gheyhet et al. (2020) nas duas vertentes estudadas na montanha de Tianshan, na Ásia Central. Para a vertente norte, os valores médios foram $2,5 \text{ g/m}^3$ até $4,9 \text{ g/m}^3$, e para a vertente sul, os valores variaram entre $3,1 \text{ g/m}^3$ até $4,0 \text{ g/m}^3$. Esses valores mais baixos ocorrem devido ao fato da montanha de Tianshan ter maiores altitudes do que a área deste estudo.

Em relação à variação temporal dos dados em cada ponto, observou-se que o P2 teve o menor desvio padrão. Essa menor variação pode estar relacionada ao fato de ser o ponto com a menor amostragem de dados. Os pontos P5 e P6 apresentaram as maiores variações da umidade absoluta diária, com $3,3 \text{ g/m}^3$ e $3,0 \text{ g/m}^3$. Os pontos P1, P3 e P4 tiveram falhas na coleta dos dados e os desvios padrões variaram de $2,7 \text{ g/m}^3$, $2,7 \text{ g/m}^3$ e $2,5 \text{ g/m}^3$, respectivamente (Tabela 2).

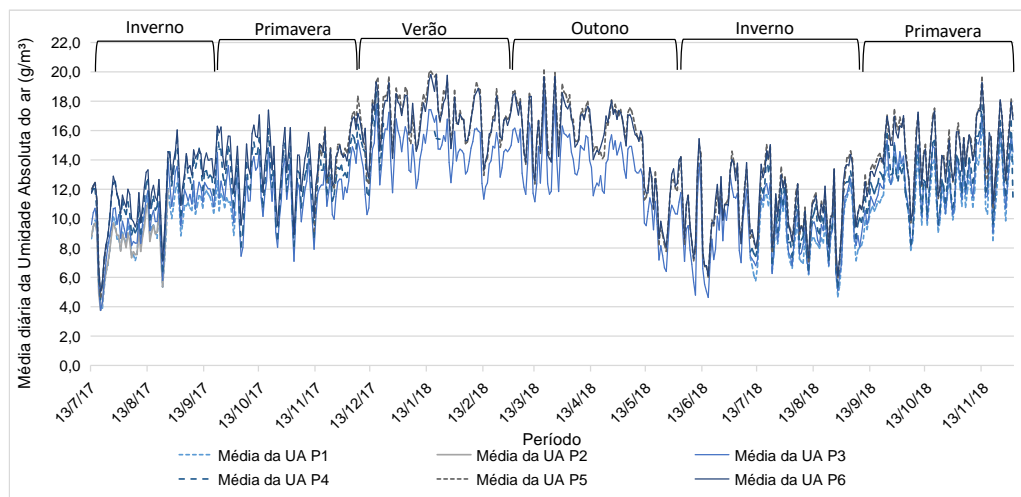
Tabela 2 - Bacia Hidrográfica do Rio do Boi: estatística descritiva a partir das médias diárias da umidade absoluta do ar em cada ponto no período de 13/07/2017 até 30/11/2018. 2024.

Estatística descritiva	UA P1	UA P2	UA P3	UA P4	UA P5	UA P6
Altitude (m)	923,0	1006,0	775,0	495,0	55,0	196,0
UA média (g/m^3)	10,2	8,3	11,9	12,0	14,2	13,9
UA máxima absoluta (g/m^3)	16,3	12,0	18,5	18,6	20,1	19,8
UA mínima absoluta (g/m^3)	3,9	3,8	3,7	4,5	4,7	5,0
Amplitude (g/m^3)	12,4	8,2	14,8	14,1	15,4	14,8
Desvio padrão (g/m^3)	2,3	1,7	2,7	2,5	3,3	3,0

Fonte - Autores (2024).

Essa variabilidade da umidade absoluta do ar nos diferentes pontos e durante o período de análise também é observada na Figura 2. Assim, verifica-se principalmente a variação sazonal da umidade absoluta, em que nos meses de verão e outono os valores da umidade absoluta foram mais elevados nos pontos. Para o período de inverno e primavera, os menores valores foram registrados. Resultados semelhantes foram encontrados por Gheyhet et al. (2020), em que no verão (do hemisfério norte) ocorrem os valores máximos, e os mínimos no inverno ou primavera.

Figura 2 - Bacia Hidrográfica do Rio do Boi: variação diária da umidade absoluta do ar para os pontos no período de 13/07/2017 até 30/11/2018. 2024.



Fonte - Autores (2024).

No estudo Gheyhet et al. (2020), o aumento da umidade absoluta ocorre no verão, devido às chuvas abundantes que se concentram nesse período, diferente do inverno e da primavera. Entretanto, para o local estudado verificou-se que as chuvas não têm interferência na variação da umidade absoluta. Porém, a temperatura do ar pode estar mais associada aos maiores registros de umidade absoluta no verão, tendo em vista a relação direta da umidade absoluta com a temperatura do ar (WHITEMAN, 2000; BARRY; CHORLEY, 2013; RANGWALA, 2012).

Dessa forma, os resultados desta pesquisa se assemelham com resultados obtidos por Leal et al. (2017) para Curitiba. Os referidos analisaram a variabilidade da umidade absoluta e identificaram que, durante o período de verão, ocorrem os maiores valores de umidade absoluta do ar, sendo também nesse período em que ocorreram as maiores diferenças higrométricas.

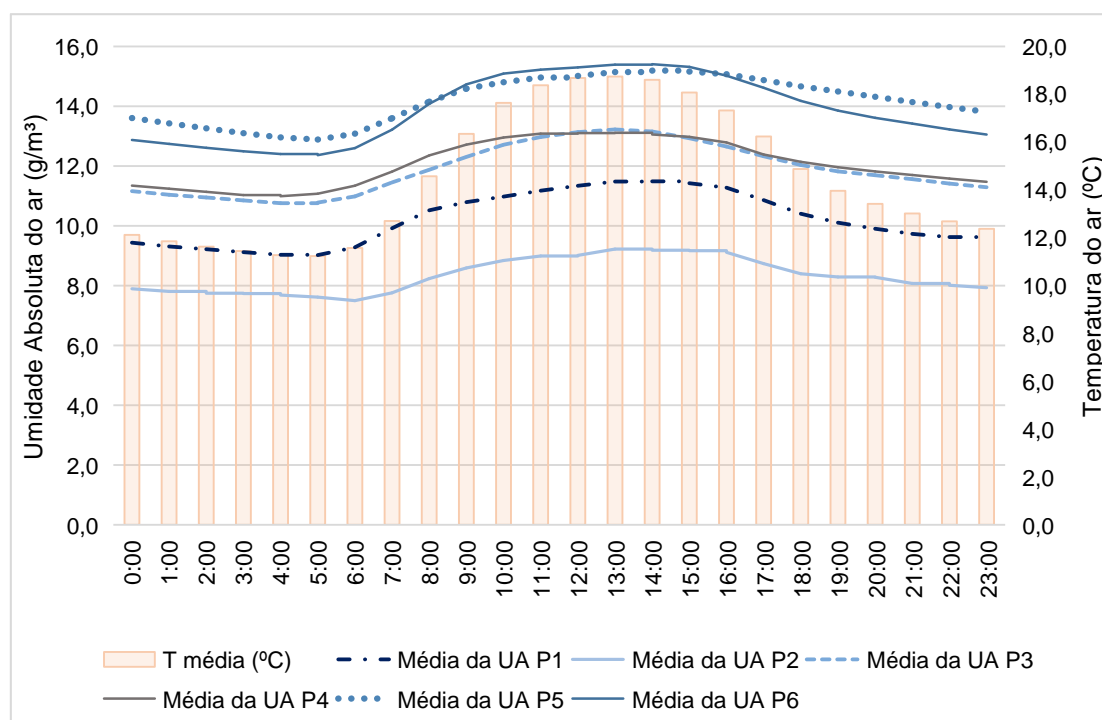
Na análise temporal dos dados de umidade absoluta do ar, observou-se que houve uma variação obedecendo às estações do ano. No período de inverno e primavera, ocorrem as maiores variações temporais e espaciais (entre as cotas altimétricas) da umidade absoluta. No verão essa variação não foi tão expressiva.

Variabilidade da umidade absoluta do ar média horária

De maneira geral, a variação da média da umidade absoluta do ar para todos os pontos do perfil topoclimático registrou oscilação similar ao longo das horas. No entanto, foi visível a influência da altitude na variação da umidade absoluta, sendo que os pontos com maior altitude registraram os menores valores, em oposição as menores altitudes tiveram os maiores valores. Essa variação ocorre conforme afirma Rangwala (2012), que a concentração de vapor d'água diminui com o aumento da altitude em decorrência da concentração de vapor de água ser proporcional à temperatura do ar.

Assim, o ponto de maior altitude (P2) registrou a menor concentração de vapor de água, oscilando de 7,9 g/m³ até aproximadamente 9,5 g/m³. Dessa forma, observou-se que a umidade absoluta horária variou de forma similar a média da temperatura do ar horária. O horário de mínima umidade absoluta ocorre às 06h00min e a máxima umidade absoluta ocorre próximo das 13h00min às 14h00min, embora que o valor máximo não seja muito acentuado (Figura 3).

Figura 3 - Bacia Hidrográfica do Rio do Boi: variação da umidade absoluta do ar média horária para os pontos no período de 13/07/2017 até 30/11/2018.2024.



* Os dados de temperatura do ar foram adquiridos da estação meteorológica automática instalada no PNAS a uma altitude de 923 m.

Essa mesma variação horária dos valores máximos e mínimos da umidade absoluta do ar não foi encontrada por Gheyret, Mohammad e Tang (2020). Para esses autores, os maiores valores de umidade absoluta diária para a encosta sul apareceram à meia-noite, e o menor valor apareceu à tarde. Cabe ressaltar que os dados de Gheyret et al. (2020) foram mensurados em maiores altitudes e em diferentes tipos de vegetação, o que pode resultar nessa diferença entre os pontos de máximo e mínima umidade absoluta diária.

À medida que a altitude diminui, a umidade absoluta do ar tende a aumentar. Esta variação também foi observada por Gheyret et al. (2020) nas duas vertentes (norte e sul) da montanha de Tianshan, na Ásia Central. Entretanto, para esses autores, na vertente norte, essa variação é mais definida do que em relação à vertente sul.

Para o PNAS, observou-se que entre as cotas 774 m e 445 m, pontos P3 e P4, a umidade absoluta foi muito semelhante. A umidade absoluta desses pontos variou próximos dos 11,0 g/m³ no período de mínima umidade. Para a máxima umidade absoluta, nesses pontos, também variam pouco e tiveram os máximos valores próximo das 13h00min.

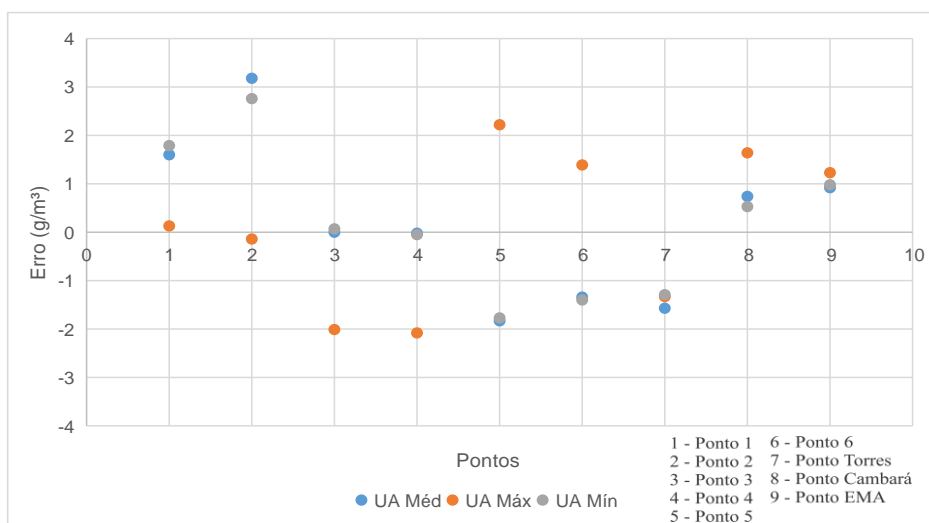
Os pontos de menores altitudes (P5 e P6), diferentemente dos pontos P3 e P4, registraram no período de resfriamento do ar maiores diferenças entre seus valores. No entanto, durante o período de aquecimento, essa diferença não foi observada. No período de resfriamento a umidade absoluta do P6 é menor variando de 13,0 g/m³ até 12,0 g/m³. No P5, a umidade absoluta variou de 14,0 g/m³ até 13,0 g/m³. No horário de máximo aquecimento, a umidade absoluta chegou a ser superior a 15,0 g/m³.

Em ambiente urbano, Alves et al. (2016) também encontram os maiores valores de umidade absoluta, no horário de máximo aquecimento, chegando próximo dos 18 g/m³. Além do ambiente urbano ter a maior temperatura, o que ocasiona nos maiores volumes de umidade absoluta, a localização da área de estudo de Alves et al. (2016) pode ter influência nessa diferença. Para os referidos autores, o local de estudo está inserido na região tropical, enquanto a área de estudo apresentada nesta pesquisa está localizado na área subtropical. Nesse sentido, Viers (1975) coloca que a umidade absoluta é menor em climas frios e maior em climas quentes.

Relação entre a umidade absoluta do ar média, máxima e mínima com a altitude e estimativa dos seus valores para a bacia hidrográfica do Rio do Boi

A estimativa da umidade absoluta apresentou diferentes valores de erros para cada ponto analisado. De acordo com Landim (2006), o erro está associado à estimativa da variável. Os valores dos erros estimados para a umidade absoluta do ar foram plotados na Figura 4. Observa-se que o Ponto 2, tem os maiores erros para a umidade média e mínima. Esses erros podem estar associados ao período de amostragem dos dados, que é inferior aos demais, conforme relatado anteriormente. Os demais erros ficaram entre -2,0 g/m³ e + 2,0 g/m³. Apesar de ser esperado um menor erro, admite que esses valores podem estar relacionados aos números de pontos utilizados. Observou-se também que, para alguns pontos, o modelo superestimou os valores, enquanto para outros pontos o modelo subestimou os valores nos pontos.

Figura 4 - Erros entre os valores reais e os estimados de umidade absoluta pela técnica da cokrigagem em cada ponto amostrado período de 13/07/2017 até 30/11/2018.2024.



Fonte - Autores (2024).

O erro quadrático médio para as três variáveis foi de 1,56, 1,54 e 1,44 para a umidade absoluta média, máxima e mínima, respectivamente. O valor do erro quadrático é importante, pois retoma a precisão do método utilizado. Na literatura, observou-se que os trabalhos abordam a utilização da cokrigagem para dados de temperatura do ar e umidade absoluta do ar têm erros aproximados dos erros encontrados na área de estudo (AHMED et al., 2014; AL-QUINNA, 2018).

Por exemplo, no estudo de Ahmed, Shahid e Harun (2014), o erro médio quadrático para a temperatura do ar variou de 1,95 (cokrigagem universal) até 3,3 (cokrigagem disjunctive). Para a Jordânia, Al-Quinna (2018) também encontrou os erros médios quadráticos baixos de 5,4 para a umidade relativa do ar e 2,3, 1,9 e 1,5 para a temperatura média, máxima e mínima, respectivamente.

Após a geração das isoígras de umidade absoluta do ar, foi realizada a reclassificação, gerando 10 classes de intervalos iguais de 0,9 g/m³ entre elas. O intervalo começou de 6,9 e foi até 16,8 g/m³. As classes foram estabelecidas com base nos valores de umidade absoluta mínima, média e máxima. Finalizando a interpolação, os mapas da umidade absoluta média, mínima e máxima foram formatados e incluídos os topônimos pertinentes a área de estudo e os elementos cartográficos obrigatórios.

Em relação às médias das medidas da umidade absoluta do ar nos pontos analisados, observou-se que elas tiveram a relação inversa com a altitude (RANGWALA, 2012; GHEYRET et al., 2020). Essa relação foi comprovada estatisticamente, com um nível de significância inferior a 0,05 (nível de confiança de 95%) para as três variáveis de umidade absoluta do ar média, máxima e mínima. Na Tabela 3, verificam-se os coeficientes da correlação e regressão para a umidade absoluta do ar.

Tabela 3 - Análise estatística a partir do modelo de regressão para a umidade absoluta do ar média, máxima e mínima para o período de 13/07/2017 até 30/11/2018. 2024.

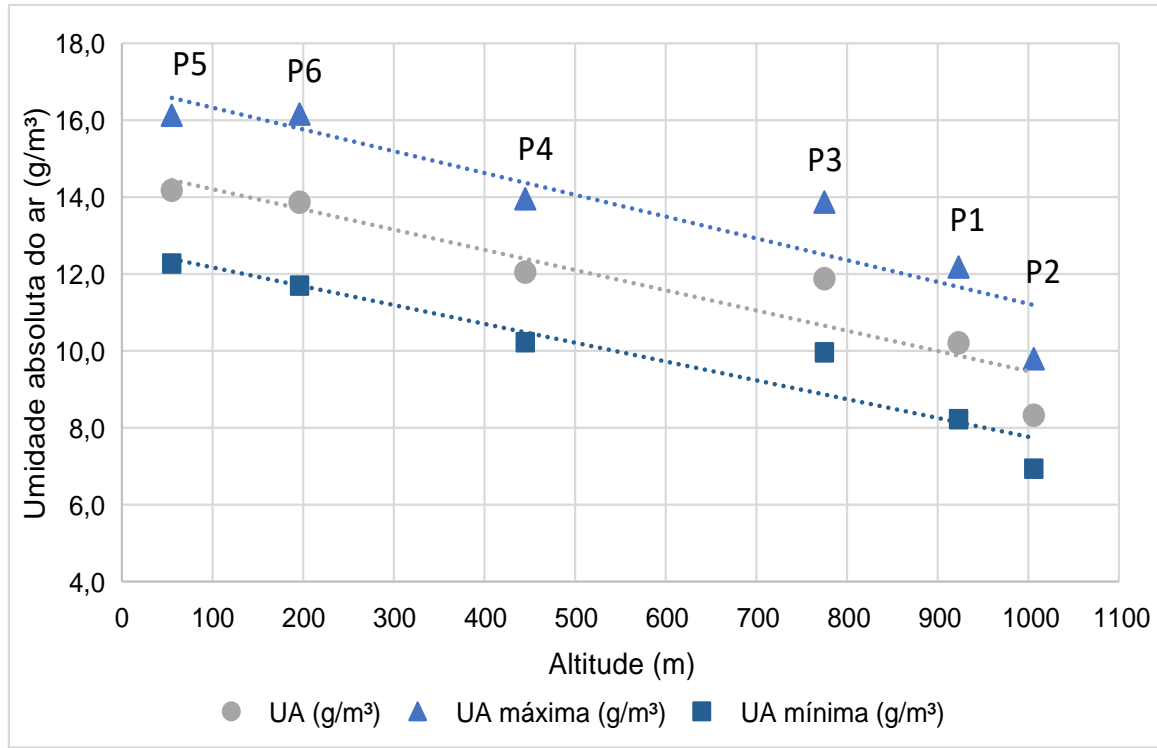
Médias de Umidade absoluta (g/m ³)	Reta de regressão	Coefficient e de correlação (r)	Coefficiente de determinação (R ²)	Erro Padrão
Umidade absoluta média	Y=- 0,0052*A+14,70	-0,94	0,87	0,88
Umidade absoluta máxima	Y=- 0,0056*A+16,89	-0,92	0,84	1,09
Umidade absoluta mínima	Y=- 0,0049*A+12,64	-0,95	0,90	0,71

Fonte - Autores (2024).

Nesse contexto, a altitude expressou maior relação com a umidade absoluta mínima do ar, com uma correlação de -0,95 e um coeficiente de determinação com valor de 0,90. A umidade absoluta máxima foi a que registrou a menor correlação com a altitude, embora continue sendo uma alta correlação (-0,92). A umidade absoluta média do ar também se observou elevada correlação com a altitude, sendo de -0,94, e o coeficiente de determinação também foi elevado, de 0,88.

Por meio do coeficiente de correlação comprova-se a relação inversa da umidade absoluta com a altitude. Dessa forma, as três variáveis apresentam essa mesma relação. Os dados médios da umidade absoluta do ar para o perfil topoclimático, corroboram com os dados médios anuais apresentados por Gheyhet et al. (2020), na vertente norte da montanha de Tianshan, na Ásia Central. No gráfico (Figura 5) de dispersão dos valores médios da umidade absoluta média, máxima e mínima, observa-se claramente a influência da altitude na variação destas variáveis.

Figura 5 - Bacia Hidrográfica do Rio do Boi: gráfico de dispersão dos valores médios de umidade absoluta média, máxima e mínima do ar nas cotas altimétricas analisadas para o período de 13/07/2017 até 30/11/2018. 2024.



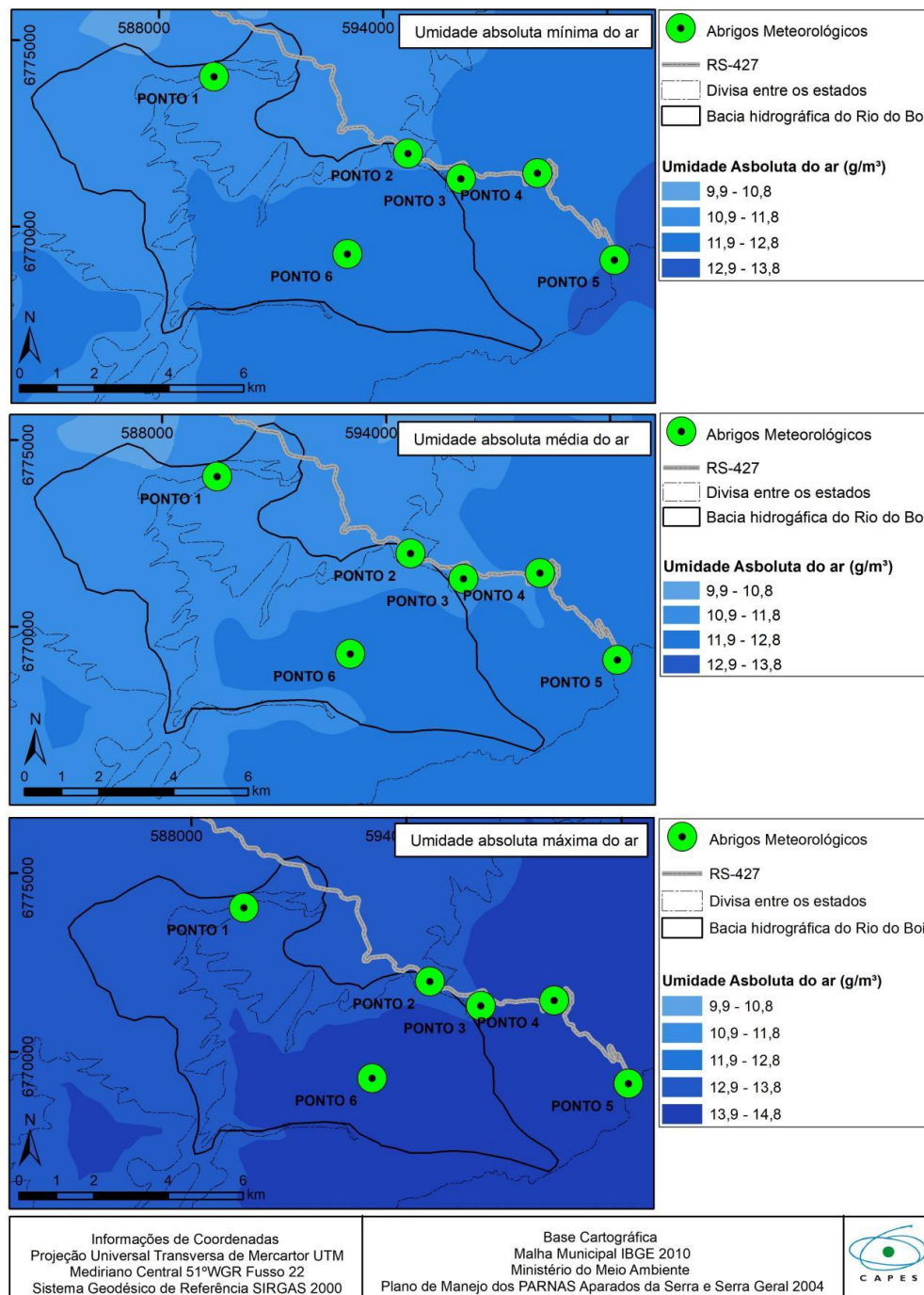
Fonte - Autores (2024).

As estimativas espaciais realizadas para cada medida da umidade absoluta do ar mostraram que a umidade expressa bem essa relação com a altitude. Para fins de análises, a estimativa espacial da umidade absoluta do ar foi realizada com base na bacia hidrográfica do Rio do Boi, conforme limites apresentados na Figura 6.

Os menores valores de umidade absoluta encontram-se nas maiores altitudes, e como consequência, os maiores valores localizam-se nas menores altitudes. Essa variação também expressa a relação da umidade absoluta com a temperatura do ar. Rangwala (2012) explica que, em geral, a umidade tende a diminuir com a altitude, devido à relação proporcional com a temperatura do ar. Assim, quando ocorre a menor a temperatura do ar, menor a concentração de vapor de água, ao passo que, quando maior a temperatura, maior a concentração. Estudos anteriores mostraram que os valores elevados de correlação entre a temperatura do ar média ($r=-0,97$), máxima ($r=-0,99$), e mínima ($r=-0,93$) e a altitude para o Parque Nacional de Aparados da Serra.

Mediante a estimativa da umidade absoluta do ar em relação à altimetria, observou-se que as diferentes medidas de umidade absoluta possuíram variação similar. A umidade absoluta mínima variou entre 9,9 g/m³ até 10,8 g/m³ em uma pequena área no limite norte da área de estudo, até 10,9 g/m³ até 11,8 g/m³ no setor sudeste. Porém, verificou-se que ocorre uma divisão entre as classes de 9,9 g/m³ até 10,8 g/m³ e 10,9 g/m³ até 11,8 g/m³, em torno dos 800 metros de altitude.

Figura 6 - Bacia Hidrográfica do Rio do Boi: Estimativa da umidade absoluta do ar média, máxima e mínima para o período de 13/07/2017 até 30/11/2018. 2024.



Fonte - Autores (2024).

Para a umidade absoluta média do ar, verificou-se também essa divisão em dois setores de classes na bacia hidrográfica, entretanto essa variação ocorreu em cotas mais baixas, próxima dos 300 metros. Os valores de umidade absoluta média do ar foram mais elevados e abrangeram intervalos de 10,9 g/m³ até 11,8 g/m³ nas maiores cotas altimétricas, concentradas na metade norte da área de estudo. Nas menores cotas, inferiores a 300 metros, os valores de umidade absoluta foram maiores, variando entre 11,9 g/m³ até 13,8 g/m³.

Essa mesma variação na divisão ocorreu para os valores da umidade absoluta máxima, porém em cotas próximas dos 600 metros de altitude. Os valores da umidade absoluta foram maiores que as outras medidas, variando entre 12,9 g/m³ até 13,8 g/m³ e 13,9 g/m³ até 14,9 g/m³. Conforme as outras variáveis da umidade, os menores valores da umidade máxima se localizam nas maiores cotas altimétricas e os maiores valores nas menores cotas (Figura 6).

Dessa forma, observou-se que, especialmente, a umidade absoluta não tem uma grande variabilidade, uma vez que é uma bacia hidrográfica de pequena ordem de grandeza, com e 57,3 km de extensão. A principal influência nessa variabilidade foi a altimetria, sendo que cada medida estabeleceu uma relação diferente com a altitude. Essa variação também pode ser influenciada pela temperatura do ar, que tem relação direta com a altitude e por consequência na umidade, conforme apontam Rangwala (2012) e Gheyret et al. (2020).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados mostraram que a altitude influencia na variação diária e horária da umidade absoluta do ar no PNAS. Assim, os menores valores ocorrem nos pontos de maior altitude (P1 e P2), enquanto os maiores valores ocorrem nos pontos de menor altitude (P5 e P6). Além disso, os dados diários apresentaram que a umidade absoluta do ar varia obedecendo às estações do ano. Durante período de inverno e primavera, foram observadas as maiores variações temporal e espacial (entre as cotas altimétricas) da umidade absoluta. Por outro lado, no verão, essa variação não foi tão expressiva.

A média da umidade absoluta do ar para todos os pontos do perfil topoclimático registrou oscilação similar ao longo das horas (entrada de radiação solar). No entanto, foi visível a influência da altitude na variação da umidade absoluta, sendo que os pontos com maior altitude registraram os menores valores, em oposição as menores altitudes tiveram os maiores valores. Além disso, observou-se que fatores locais de cada ponto também podem influenciar na amplitude higrométrica.

Assim, conclui-se que a umidade absoluta do ar tem a altitude como o seu maior controlador para o período analisado e para o desnível altimétrico presente no PNAS. A relação entre a altitude e a umidade absoluta foi precisa, apresentando valores de correlação negativa o que é explicado pelas correlações para a umidade absoluta máxima, média e mínima, respectivamente. Essa relação ficou clara com a espacialização dos dados, utilizando a técnica da cokrigagem com a altitude como variável interdependente.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio do Programa Nacional de Cooperação Acadêmica da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES/Brasil (Nº Processo: nº 071/2013 CAPES/PROCAD). A primeira autora agradece ao apoio do programa de bolsa de Demanda Social (DS-CAPES) (2015-2017) e à FAPESP por intermédio da bolsa de Pós-Doutorado (Processo: 2022/02383-3). O segundo autor agradece ao CNPq pela concessão da Bolsa de Produtividade de Pesquisa nível 2. O terceiro autor agradece ao apoio do programa de bolsa de Demanda Social (DS-CAPES). O quarto autor agradece ao CNPq pela concessão da Bolsa de Produtividade de Pesquisa nível 2. O quinto autor agradece ao CNPq por meio do auxílio via bolsa de pesquisa e produtividade nível 2.

REFERÊNCIAS

AL-QINNA, M. Analyses of Climate Variability in Jordan using Topographic Auxiliary Variables by the Cokriging Technique. **Jordan Journal of Earth and Environmental Sciences**, v. 9, n.1, p. 67–74, 2018.

AHMED, K.; SHAHID, S.; HARUN, S.B. Spatial interpolation of climatic variables in a predominantly arid region with complex topography. **Environment Systems And Decisions**, v. 34, n. 4, p. 555-563, 2014. <https://doi.org/10.1007/s10669-014-9519-0>

ALVES, E. D. L.; VECCHIA, F. A. S.; MARIANO, Z. de F.; LIMA, E. A. de; ANJOS, M. W. B. dos. A temperatura do ar e umidade absoluta em cidade de pequeno porte: características espaciais e temporais. **Acta Scientiarum. Human And Social Sciences**, v. 38, n. 2, p. 219, 2016. <https://doi.org/10.4025/actascihumansoc.v38i2.31468>

ANDRIOTTI, J.L.S. **Fundamentos de Estatística e Geoestatística**. 2ª reimpressão. São Leopoldo: Editora Unisinos, 2013.

ARMANI, G.; GALVANI, E. Avaliação do desempenho de um abrigo meteorológico de baixo custo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 14, n. 1, p.116-129, 2006.

BARATTO, J.; SANTOS, D. D. dos; TERASSI, P.M. de B.; GALVANI, E.; WOLLMANN, C. A. AVALIAÇÃO DA CONTRIBUIÇÃO DA PRECIPITAÇÃO OCULTA NO PARQUE NACIONAL APARADOS DA SERRA, RIO GRANDE DO SUL. **Raega - O Espaço Geográfico em Análise**, [S.L.], v. 55, p. 133, 2022. <https://doi.org/10.5380/raega.v55i0.81890>

BARRERA-VERDEJO, M.; CREWELL, S.; LÖHNERT, U.; ORLANDI, E.; GIROLAMO, P. di. Ground-based lidar and microwave radiometry synergy for high vertical resolution absolute humidity profiling. **Atmospheric Measurement Techniques**, [S.L.], v. 9, n. 8, p. 4013-4028, 2016. <https://doi.org/10.5194/amt-9-4013-2016>

BARRY, G.; CHORLEY, R.J. Atmosfera, tempo and clima. 9 ed, Bookman, 2013. p.512.

BUSSAB, W. O.; MORETTIN, P. A. **Estatística Básica**. 6. ed. – São Paulo: Saraiva, 2010, p.557.

BRASIL. **Decreto federal nº 70.296** de 17 de março de 1972. Diário Oficial da União, Poder Executivo, Brasília, DF. 17 março.1972. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/Antigos/D70296.htm. Acesso em: 20 abr. 2021.

CHAVES, M. E. D.; CONCEIÇÃO, K. V. da; GUERRERO, J. V. R. Geostatistical analysis for temperature monitoring in the State of Bahia, Brazil. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, [S. l.], v. 13, n. 5, p. 652–660, 2018. <https://doi.org/10.18378/rvads.v13i5.6203>

CUNHA, A. de M.; LANI, J. L.; SANTOS, G. R. dos; FERNANDES FILHO, E. I.;

TRINDADE, F. S.; SOUZA, E. de. Espacialização da precipitação pluvial por meio de krigagem e cokrigagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 9, p. 1179-1191, 2013. FapUNIFESP (SciELO). <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2013000900001>

ESRI -Environmental Systems Research Institute. ArcGIS Desktop 10.1 Redlands, 2012.

GHEYRET, G.; MOHAMMAT, A; TANG, Z. Elevational patterns of temperature and humidity in the middle Tianshan Mountain area in Central Asia. *Journal Of Mountain Science*, [S.L.], v. 17, n. 2, p. 397-409, fev. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1007/s11629-019-5481-0>

GOBO, J.P.A.; BIBIANO, B.H.; Galvani E. Zonas Climáticas Urbanas em Cidade de Pequeno Porte. *Revista Brasileira de Geografia Física* v.06, n.06, pp.2066-2079, 2019. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v12.6.p2066-2079>

HOPPE I. L.; IENSSE, A. C.; SIMIONI, J. P. D.; WOLLMANN, C. A. Comparação Entre Um Abrigo Meteorológico De Baixo Custo e a Estação Meteorológica Oficial Do Inmet em Santa Maria (RS). **Ciência e Natura**, Santa Maria, [s.l.], v. 37, p. 132-137, 2015. <https://doi.org/10.5902/2179460X16228>

ICMBio. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. Dados do PARNA de Aparados da Serra e Serra Geral. 2021. Disponível em: http://qv.icmbio.gov.br/QvAJAXZfc/opendoc2.htm?document=painel_corporativo_6476.qvw&host=Local&anonymous=true. Acesso em 19 jan. 2021.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. **Banco de dados meteorológicos**. 2023. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br>. Acesso em: 14 abr. 2023.

LANDIM, P. M. B. Sobre geoestatística e mapas. **Terra e Didática**, v.2, n.1, p.19-33, 2006. DOI: 10.20396/td.v2i1.8637463. <https://doi.org/10.20396/td.v2i1.8637463>

LEAL, L.; BIONDI, D.; BATISTA, A. C. Variação higrométrica na cidade de Curitiba-PR: análise da umidade absoluta do ar. *Acta Ambiental Catarinense*. Vol. 14, N.1/2, 2017. OGLIARI, P.S; ANDRADE, D.F. de. **Estatística Básicas para as ciências Agronômicas e Biológicas**: Noções de Experimentação. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2005.

MASIERO, E.; SOUZA, L.C.L. de. Variação de umidade absoluta e temperatura do ar intraurbano nos arredores de um corpo d'água. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 13, n. 4, p. 25-39, 2013. <https://doi.org/10.1590/S1678-86212013000400003>

Martins, K. (ed.). **Unesco chancela Caminhos dos Cânions do Sul como Geoparque Mundial**. 2022. Disponível em: <https://uergs.edu.br/unesco-chancela-caminhos-dos-canions-do-sul-como-geoparque-mundial>. Acesso em: 04 jul. 2023.

MMA. Ministério do Meio Ambiente. **Plano de Manejo**:Parque Nacional de Aparados da Serra e Serra Geral. SOCIOAMBIENTAL-Consultores Associados Ltda. Brasília, BR, 2004.

OGLIARI, P.S; ANDRADE, D.F. de. **Estatística Básicas para as ciências Agronômicas e Biológicas**: Noções de Experimentação. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2005.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: Fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478p.

RANGWALA, I. Amplified water vapour feedback at high altitudes during winter. *International Journal Of Climatology*, [S.L.], v. 33, n. 4, p. 897-903, 2012. <https://doi.org/10.1002/joc.3477>

RIBEIRO, A. G. As escalas do Clima. **Boletim de Geografia Teórica**, v..23, p. 45-46, 1993.

USGS - United States Geological Survey. **Earth Exlore. Digital Elevation**. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov>. Acesso em 10 jun. 2023.

TUBELIS, A.; NASCIMENTO, F. J. L. **Meteorologia descritiva**: fundamentos e aplicações brasileiras. São Paulo: Nobel, 1984, 374 p.

VIANELLO, R. L. ALVES, A. R.; Meteorologia básica e aplicações. Viçosa: UFV, 1991.

VIDE, J. M. **Fundamentos de Climatologia Analítica**. Madrid: Sínteses, 1999.

VIERS. G. Climatología. Espanha: Oikos TAU. 1975, 320p

VIANELLO, R. L. ALVES, A. R.; Meteorologia básica e aplicações. Viçosa: UFV, 1991.

WHITEMAN, C. D. **Mountain Meteorology**: Fundamentals and Applications, 355 pp., Oxford Univ. Press, New York, 2000. <https://doi.org/10.1093/oso/9780195132717.001.0001>

WOOD, WENDY H; MARSHALL, SHAWN J; FARGEY, SHANNON E. Daily measurements of near-surface humidity from a mesonet in the foothills of the Canadian Rocky Mountains, *Earth System Science Data*, v. 11, n. 1, p. 23-34, 2019. <https://doi.org/10.5194/essd-11-23-2019>

WPS - WPS SOFTWARE. **WPS office**. 2020.

Recebido em: 30/05/2023

Aceito para publicação em: 06/02/2024