

## PCH AUTÓDROMO (RS): UM ESTUDO SOBRE A UMIDADE RELATIVA DO AR NO ENTORNO DE SEU RESERVATÓRIO HÍDRICO

### Fabio de Oliveira Sanches

Docente no Programa de Pós-graduação em Geografia (PPGEO) e no Programa de Pós-graduação em Ambiente Construído (PROAC) da Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF  
Juiz de Fora, MG, Brasil  
[fabio.sanches@ufjf.br](mailto:fabio.sanches@ufjf.br)

### Vinícius Machado Rocha

Docente no Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola (PPGEA) da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia – UFRB  
Cruz das Almas, BA, Brasil  
[vinimrocha@ufrb.edu.br](mailto:vinimrocha@ufrb.edu.br)

### Cássia de Castro Martins Ferreira

Docente no Programa de Pós-graduação em Geografia (PPGEO) da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) e no Programa de Pós-graduação em Geografia (PPGEO) da Universidade Federal de Viçosa – UFV. Juiz de Fora, MG, Brasil.  
[cassia.castro@ufjf.edu.br](mailto:cassia.castro@ufjf.edu.br)

### Thiago Alves de Oliveira

Doutorando no Programa de Pós-graduação em Geografia (Geografia Física) na Universidade de São Paulo – USP  
São Paulo, SP, Brasil  
[thiago.a.oliveira@usp.br](mailto:thiago.a.oliveira@usp.br)

### Matheus da Silva Frauches

Mestrando no Programa de Pós-graduação em Ambiente Construído (PROAC) na Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF  
Juiz de Fora, MG, Brasil  
[matheus.frauches@ich.ufjf.br](mailto:matheus.frauches@ich.ufjf.br)

### Alice Tavares Vieira

Graduada em Geografia pela Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF, Juiz de Fora, MG, Brasil  
[alicetvieirauff@gmail.com](mailto:alicetvieirauff@gmail.com)

### Gabriel Soalheiro Junior

Especialista em Gestão e Manejo Ambiental em Sistemas Florestais pela Universidade Federal e Lavras – UFLA.  
Gerente de Desenvolvimento da Quebec Engenharia S/A  
Belo Horizonte, MG, Brasil  
[gabriel.soalheiro@quebecengenharia.com.br](mailto:gabriel.soalheiro@quebecengenharia.com.br)

## RESUMO

Pesquisas sobre a influência de reservatórios hídricos no clima local remontam o início do século XX. O objetivo deste trabalho consistiu em avaliar as condições de Umidade Relativa do Ar no entorno da PCH Autódromo, no município de Guaporé-RS, após a formação de seu reservatório. Foram utilizados dados de reanálise do ERA-5, bem como dados de pluviosidade da Estação Meteorológica de Guaporé, fornecidos pela ANA. Técnicas estatísticas (Corr. Pearson, EMA, EMR, REQM) foram usadas para avaliar e validar os dados de reanálise. Testes de homogeneidade (Teste *t* de *Student*) foram aplicados nos dados organizados em dois períodos: pré-enchimento (2004-2011) e pós-enchimento (2012-2019). Estimativas de umidade relativa do ar foram obtidas correlacionando o Índice Hídrico (IH) com a Normal Climatológica de Umidade Relativa para Guaporé. Os resultados demonstraram que o reservatório da PCH Autódromo pouco, ou nada, influenciou na dinâmica das variáveis analisadas. Houve aumento de 4,4% na umidade relativa do ar nos meses de março e redução significativa da pluviosidade nos meses de novembro após a formação do reservatório. Sendo assim, acredita-se que as mudanças na climatologia observadas no entorno do reservatório estejam associadas à dinâmica atmosférica em macroescala, e não como consequência da formação do reservatório.

**Palavras-chave:** Lagos artificiais. Microclima. Testes estatísticos. Guaporé.

## **SHP AUTÓDROMO (RS): A STUDY ON THE RELATIVE HUMIDITY OF THE AIR AROUND ITS WATER RESERVOIR**

### **ABSTRACT**

Research on climate change in water reservoirs began in the early 20th century. The aim of this research was to evaluate the Relative Humidity conditions around the *Autódromo* SHP (Small Hydroelectric Plant), in Guaporé-RS, after the formation of its reservoir. ERA-5 reanalysis data were used, as well as rainfall data from the Guaporé Meteorological Station, provided by the National Water Agency (ANA in Portuguese). Statistical techniques (Pearson's correlation, Mean Absolute Error, Mean Relative Error, Root Mean Squared Error) were used to evaluate and validate the reanalysis data. Homogeneity tests (Student's t test) were applied to data organized in two periods: pre-filling (2004-2011) and post-filling (2012-2019). Estimates of relative air humidity were obtained by correlating the Water Index (HI) with the Climatological Normal of Relative Humidity for Guaporé. The results showed that the reservoir had little influence on the dynamics of the analyzed variables. There was 4.4% increase in relative humidity in March and significant reduction in rainfall in November after the formation of the reservoir. Thus, it is believed that the changes in climatology observed around the reservoir are associated with macro-scale atmospheric dynamics, and not as a consequence of the formation of the reservoir.

**Keywords:** Artificial lakes. Microclimate. Statistical tests. Guaporé.

### **INTRODUÇÃO**

No início do século XX, os trabalhos de Bigelow (1908), Bigelow (1910) e Henry (1920) demonstravam as primeiras preocupações sobre a influência da formação de reservatórios artificiais (lagos hidrelétricos) por meio das condições de evapotranspiração no *Salton Sea Lake*, sul da Califórnia, bem como em demais reservatórios no oeste e leste dos Estados Unidos.

Por sua vez, Baxter e Glaude (1980) estudaram os principais impactos ambientais decorrentes da formação de reservatórios hidrelétricos no Canadá, abordando seus efeitos na climatologia local e regional, demonstrando modificações nos valores de umidade relativa.

Pesquisas comparando diferentes métodos de estimativa de evaporação (*i*-balanços hídricos; *ii*-forçamento energético e, *iii*- aerodinâmica volumétrica) foram desenvolvidas por Sadek et al. (1997) no Lago Nasser (represa de Assuã, Egito), revelando variações interanuais nos valores de evaporação. Já em 2010, El Sawwaf et al. (2010) atualizaram tais estimativas de evaporação por meio de dados meteorológicos e hidrológicos locais, obtidos por meio de plataformas instrumentadas (estações meteorológicas flutuantes) em três locais no lago Nasser.

No Brasil, diversos estudos foram desenvolvidos visando a avaliar a influência da formação dos reservatórios de usina hidrelétricas (UHE) na climatologia local: Grimm (1988) para a UHE de Itaipu, Campos (1990) para UHE de Sobradinho (BA), Fisch, Januário, Senna (1990), Gunkel et al. (2003) para a UHE Curuá-Una (PA), Sanches e Fisch (2005) para a UHE de Tucuruí (PA), Souza e Galvani (2010) para UHE Porto Primavera (SP/MS); Rodrigues e Canônica (2006), Czarnobai et al. (2006) e Sanches et al. (2015) para UHE de Itá (RS/SC); Silva Filho e Rabelo (2012) e Dantas e Sales (2015) para o Açude (lago) Castanhão (CE), Sanches et al. (2017) para UHE de Passo Fundo (RS) e Frauches et al. (2020) para o reservatório Chapéu d'Uvas, em Minas Gerais.

No entanto, a maior parte desses trabalhos analisa apenas a possível influência desses reservatórios na pluviosidade local. Poucos foram os trabalhos que avaliaram a influência de seus reservatórios nas temperaturas, ventos e umidade relativa do ar nos seus entornos (GRIMM, 1988; GUNKEL et al., 2003;

RODRIGUES e CANÔNICA, 2006; CZARNOBAI et al., 2006; SOUZA e GALVANI, 2010 e DANTAS e SALES, 2015).

A inexistência de dados oficiais (observados) em localidades próximas a esses empreendimentos, sobretudo nos períodos anteriores às respectivas formações, mostra-se como o principal obstáculo para a execução desse tipo de estudo.

Nesse sentido, a melhoria das características de obtenção dos dados de reanálise, os quais são processados a partir de informações oriundas de estações meteorológicas de superfície, de atividades de radiossondagens, de imagens de satélites de alta resolução, de radares meteorológicos e de modelos numéricos, tem fornecido informações (dados) com resoluções espaciais cada vez maiores e, conseqüentemente, com melhor acurácia de seus dados.

Essa melhoria nas condições técnicas tem tornado os dados de reanálise cada vez mais sensíveis à representação das variáveis meteorológicas (SIEFERT et al., 2021), garantindo a confiabilidade no uso desses recursos aos estudos climáticos com maiores resoluções espaciais. Os autores ressaltam ainda a maior acurácia dos dados ERA5 para estudos em climatologia regional no Brasil, permitindo assim, que os resultados apresentados sobre as possíveis mudanças que a instalação de reservatórios possa promover a uma determinada região sejam confiáveis e conclusivos.

Utilizando dados de reanálise do *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP), Degu et al (2011) desenvolveram análises das condições climáticas para o entorno dos grandes reservatórios da América do Norte. A partir do uso de dados de (1) *Energia Potencial Convectiva Disponível*; (2) *Umidade Específica* e (3) *Evaporação Superficial* para um período de 30 anos, os autores verificaram que tais reservatórios influenciaram no clima local, principalmente nos locais de climas mediterrâneos e semiáridos. Porém, para os reservatórios instalados em áreas de climas úmidos sua influência foi menos aparente.

As condições observadas no trabalho de Degu et al (2011) corroboram com a ideia descrita por Sanches e Fisch (2005) onde os resultados obtidos para um estudo de caso em um reservatório não devem ser extrapolados, ou mesmo generalizados, para outros reservatórios. No entanto, a metodologia utilizada pode e deve ser replicada em outros estudos.

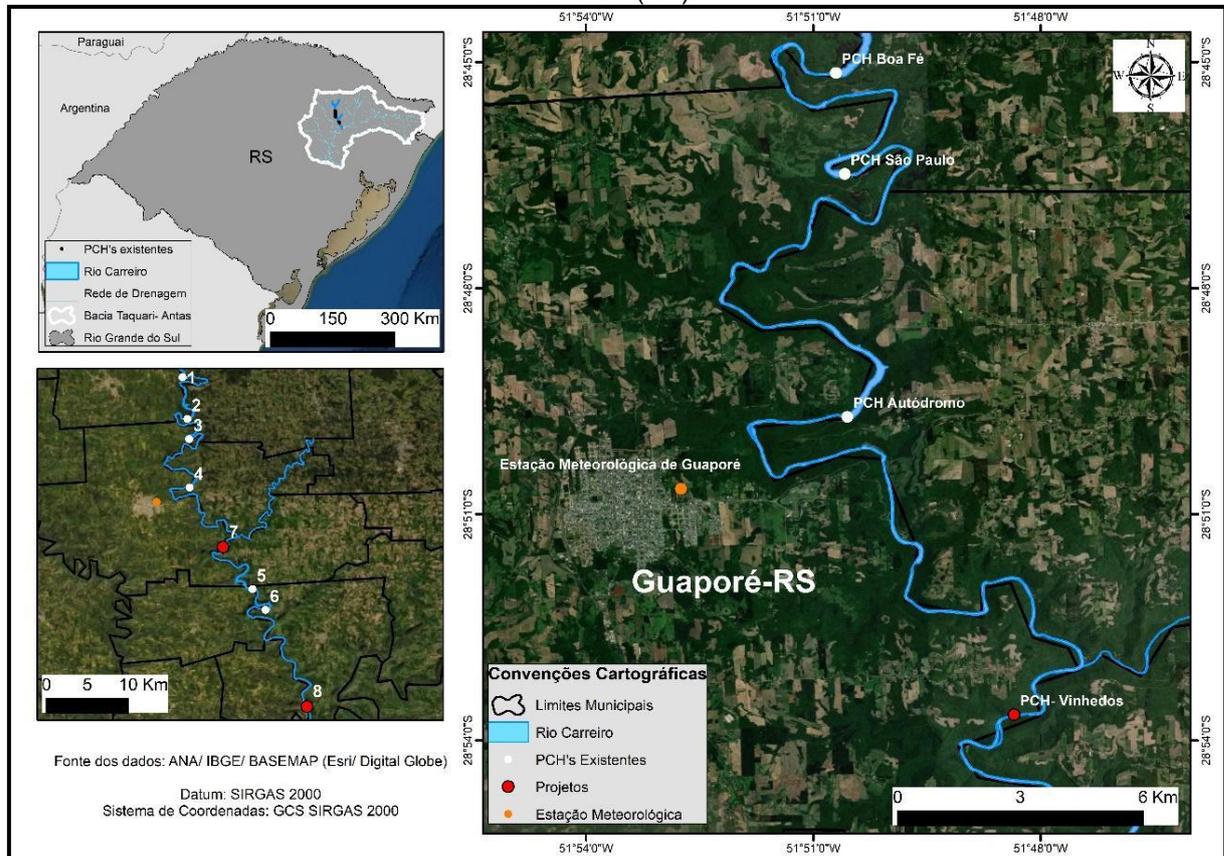
Dessa forma, tendo em vista a problemática relacionada à baixa disponibilidade de dados observados para estudos dessa natureza, associada à limitação das variáveis climáticas disponíveis e à melhoria das condições técnicas para a obtenção dos dados de reanálises, o presente trabalho pretende demonstrar uma proposta metodológica (técnicas e método) para avaliar as possíveis condições de Umidade Relativa do Ar no entorno da PCH Autódromo, no município de Guaporé (RS), em função da formação do seu reservatório.

## **METODOLOGIA**

### ***Localização da área de estudo e sua climatologia***

Localizada próxima à cidade de Guaporé (5 km), a PCH Autódromo (4) é um dos seis empreendimentos hidrelétricos - PCH Caçador (1), PCH Boa Fé (2), PCH São Paulo (3), PCH Linha Emília (5) e PCH Cotiporã (6) - atualmente instalados na calha do rio Carreiro, além de mais dois novos empreendimentos - projetos para as PCH Vinhedos (7) e PCH São Valentin (8) - em fase de licenciamento (Figura 1).

Figura 1 - Localização da Estação Meteorológica de Guaporé e da PCH Autódromo na calha do rio Carreiro (RS).



Elaboração - os autores.

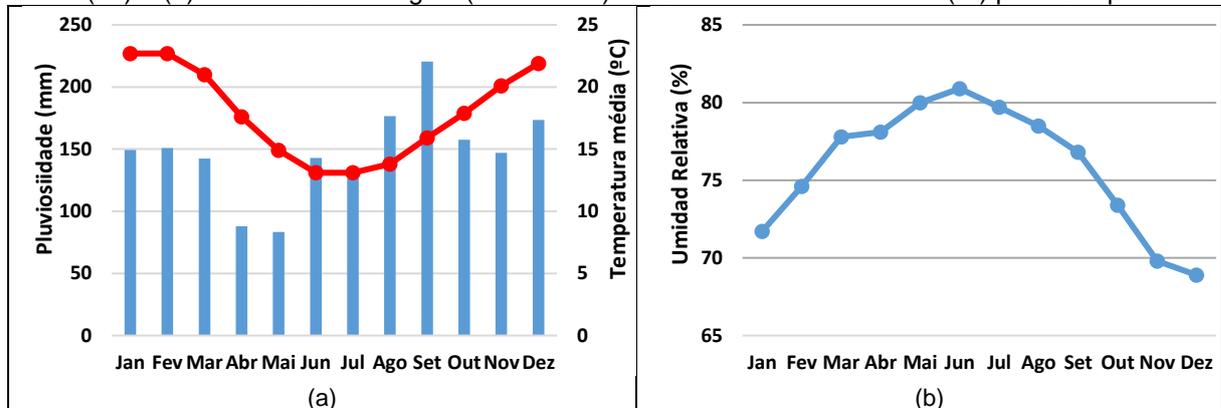
De acordo com seu empreendedor – *Bolognesi Engenharia S.A* – (<http://www.bolognesienergia.com.br/empreendimentos/pchs>), a PCH Autódromo iniciou sua operação em novembro de 2011 com uma área alagada de 410.000 m<sup>2</sup>, sendo concebida para funcionar “a fio d’água”.

De acordo com a classificação climática de *Köppen* (ALVARES et al., 2013), o clima da região de estudo configura-se como do tipo **Cfa** - mesotérmico, sem estação seca e com verões quentes. Por sua vez, Rossato (2020) destaca que tais condições climáticas estão associadas, basicamente, às participações das massas de ar Tropical Atlântica (*mTa*) (de 25% a 28% do ano) e Polar Atlântica (*mPa*) (de 45% a 48%) do ano.

Rossato (2020) ainda esclarece que os Sistemas Frontais são os principais responsáveis pela dinâmica das chuvas, as quais apresentam totais anuais em torno de 1700mm a 1800mm. Já a temperatura média anual pode variar entre 17-20°C. A temperatura média do mês mais frio oscila entre 11-14°C e a temperatura média do mês mais quente varia entre 23-26°C.

De acordo com o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) (<https://clima.inmet.gov.br/>), a partir das informações sobre a Normais Climatológicas (1961-1990) para Temperatura média, precipitação (Figura 2a) de Umidade Relativa do Ar (Figura 2b) para Guaporé, observa-se que os maiores valores de Umidade Relativa do Ar ocorrem durante o período mais frio do ano (inverno), podendo, eventualmente, promoverem a formação de neblina/névoa no período da manhã em decorrência das temperaturas mais baixas, *cf.* sugere Borges (2016).

Figura 2 - Gráficos com (a) Normais Climatológicas (1961-1990) de Pluviosidade (mm) e Temperatura do Ar (°C) e (b) Normal Climatológica (1961-1990) de Umidade Relativa do Ar (%) para Guaporé-RS.



Fonte - INMET, 2021. Elaboração: os autores.

### Dados observados

Inicialmente, foram utilizados dados pluviométricos mensais (observados) da Estação Meteorológica de Guaporé (cod: 02851044), obtidos da plataforma HIDROWEB (<http://www.snirh.gov.br/hidroweb>) da Agência Nacional de Águas (ANA) para o período de 2004 a 2019. Instalada nas dependências da Escola Técnica Agrícola de Guaporé (ETAG), a estação meteorológica dista, aproximadamente, 4 km da barragem da PCH Autódromo, conforme destaque na Figura 1.

Os dados de temperatura média mensal do ar foram obtidos da Estação Meteorológica de Bento Gonçalves (cod: A840), fornecidos pelo INMET por meio de seu Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) (<https://bdmep.inmet.gov.br/>).

Embora a Estação Meteorológica de Bento Gonçalves (*campus* da Embrapa Uva e Vinho) localize-se a uma distância linear de 30 km da PCH Autódromo, as condições de temperatura média do ar pouco sofrem alteração, uma vez que tal elemento atmosférico assume, fisicamente, uma condição de *variável contínua*, diferentemente do comportamento das chuvas que se comportam como *variável discreta*.

Por outro lado, segundo recomendações da Organização Meteorológica Mundial (OMM), guardadas certas peculiaridades ambientais, uma estação meteorológica de superfície pode representar as condições sinóticas em um raio de 100 km (WMO, 2012).

### Dados de reanálise

Foram utilizados dados da reanálise ERA-5, provenientes do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), disponíveis em: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>.

Foram analisados dados mensais de Pluviosidade (mm), Radiação de Ondas Curtas ( $W/m^2$ ), Fluxo de Calor Latente ( $W/m^2$ ) e Umidade Relativa do Ar (%), com uma resolução de  $0.125^\circ$  latitude  $\times$   $0.125^\circ$  longitude, que corresponde a 14 km, aproximadamente.

Cabe esclarecer que a Radiação de Ondas Curtas para baixo compreende a radiação solar direta e difusa que atinge a superfície sendo essa variável semelhante aos dados de radiação solar observados em um piranômetro. Já o Fluxo de Calor Latente corresponde à energia utilizada no particionamento à superfície (processo turbulento) que é destinada à mudança de fase da água de seu estado líquido para o gasoso, sendo considerada a energia subtraída da superfície do solo (HARTMANN, 1994; CUNHA et al., 2002).

Da mesma forma como os dados observados, os dados de reanálise utilizados correspondem ao período de 2004 a 2019.

### **Tratamento estatístico preliminar**

Inicialmente adotou-se por validar o uso dos dados de reanálise ERA-5 a partir dos dados observados da Estação Meteorológica de Guaporé. Para isso, um conjunto de técnicas estatísticas foram aplicadas: Correlação de Pearson ( $r$ ), Erro Médio Absoluto (EMA), o Erro Médio Relativo (EMR) e a Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM) como sugerem Anjos et al. (2017), Saraiva et al. (2017) e Quina et al. (2020).

Uma vez consistidos os dados pluviométricos oriundos de reanálise com os dados pluviométricos observados, passou-se para a etapa de avaliação dos períodos de pré e pós-enchimento a partir dos demais produtos (variáveis) da reanálise do ERA-5.

### **Análise dos dados**

Com base na metodologia desenvolvida nos trabalhos de Grimm (1988), Campos (1990), Sanches e Fisch (2005), Silva-Filho e Rabelo (2012), Sanches et al. (2017) e Frauches et al. (2020), os dados de reanálise foram organizados em dois períodos distintos - *pré-enchimento (2004-2011)* e *pós-enchimento (2012-2019)* - para aplicação do Teste  $t$  de *Student* e verificação de suas homogeneidades. Nesses trabalhos, o Teste  $t$  de *Student* – o qual é um teste de homogeneidade estatística - é usado para se avaliar se há (ou não) diferenças significativas entre os dados anteriores (pré-enchimento) e posteriores (pós-enchimento) a formação dos reservatórios analisados.

O Teste  $t$  de *Student* consiste em um teste paramétrico e de forte robustez estatística. Por tratar-se de um teste de hipótese, inicialmente assume-se que ambos os conjuntos de dados sejam, estatisticamente, homogêneos ( $H_0$ ), contra uma hipótese alternativa ( $H_1$ ), na qual os conjuntos de dados seriam heterogêneos (SPIEGEL, 1993).

A descrição metodológica referente à aplicação do Teste  $t$  de *Student* pode ser detalhadamente encontrada nos trabalhos de Sanches et al. (2017) e Frauches et al. (2020).

A comparação dos dados por meio de gráficos *Box plot* permitiu visualizar as diferenças e as semelhanças entre os dados de cada variável analisada em ambos os períodos.

### **Índice Hídrico e estimativa de Umidade Relativa do Ar**

A partir dos dados observados de temperatura média mensal (Estação Meteorológica do INMET em Bento Gonçalves) e de pluviosidade mensal (Estação Meteorológica de Guaporé) foram extraídos todos os componentes do Balanço Hídrico Climático (BHC) proposto por Thornthwaite e Mather (1955).

Por sua vez, a partir de informações do BHC [Evapotranspiração Potencial (ETP); Deficiência Hídrica (DEF); Excedente Hídrico (EXC)], foi possível extrair os componentes para a obtenção do Índice Hídrico (IH).

Teixeira (1999) e Silva et al. (2004) descrevem que o IH (Eq. 1) é obtido por meio da diferença entre os Índices de Umidade (IU) (Eq. 2) e Índices de Aridez (IA) (Eq. 3).

$$IH = IU - IA \quad (\text{Eq. 1})$$

onde

$$IU = (100.EXC)/ETP \quad (\text{Eq. 2})$$

e

$$IA = (100.DEF)/ETP \quad (\text{Eq. 3})$$

Para a estimativa da Umidade Relativa do Ar no local de estudo, os valores mensais do Índice Hídrico obtidos foram correlacionados com os valores da Normal Climatológica de Umidade Relativa do Ar para Guaporé (1961-1990), disponível no site do INMET (<https://portal.inmet.gov.br/normais>), gerando uma equação de regressão logarítmica do tipo ( $y=a \log(x)+b$ ), bem como seu Coeficiente de Determinação ( $R^2$ ).

De posse dessa equação, foi possível estimar a Umidade Relativa do Ar mensal no período de 2004-2019 para o local de estudo (Estação Meteorológica da ANA em Guaporé).

### **Estimativa de valores de Umidade Relativa do Ar ao longo da série**

Para a última etapa do trabalho, passou-se a analisar as tendências dos dados de Umidade Relativa do Ar estimados, associando-os aos dados de Pluviosidade e Radiação de Ondas Curtas para baixo. Inicialmente foram extraídas as tendências mensais de Umidade Relativa do Ar para os conjuntos de dados, bem como suas respectivas equações lineares. De posse das equações lineares e das tendências, estimou-se o quanto a Umidade Relativa do Ar aumentou (ou diminuiu), mês a mês, ao longo do período analisado (16 anos).

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Devido à Estação Meteorológica de Guaporé dispor apenas de dados de pluviosidade, os procedimentos adotados para validação dos dados de reanálise foram desenvolvidos comparando-se os dados observados com os dados de pluviosidade do ERA-5 no período de 2004-2019.

A Tabela 1 traz o resultado do tratamento estatístico preliminar aplicado aos conjuntos de dados.

Tabela 1 - Resumo da avaliação estatística entre os dados de reanálise e os dados observados de pluviosidade para Guaporé.

	Parâmetros Estatísticos						
	$R^2$ (a)	r (a)	$R^2$ (b)	r (b)	EMA	EMR	REQM
Reanálise							
x	0,47	0,69	0,96	0,98	-0,49	14,65	12,10
Observado							

(a) Referente à correlação de dados “ponto a ponto”

(b) Referentes à correlação do conjunto dos dados organizados “em ordem crescente”.

De acordo com Hinkle et al (2003), o coeficiente de correlação de dados “ponto a ponto” ( $r=0,69$ ) pode ser considerado como uma correlação “moderada”. Já o coeficiente de correlação dos dados “em ordem crescente”, ( $r=0,98$ ) apresenta uma correlação “Muito Forte”. A análise dos dados discrepantes (EMA, EMR e REQM), da mesma forma, sugere que os conjuntos de dados apresentam poucas diferenças em seus valores dispersivos.

Os trabalhos de Anjos et al. (2017), Saraiva et al. (2017) e Quina et al. (2020) afirmam que resultados mais próximos de “zero” indicam uma correlação perfeita e que, à medida que o valor dos parâmetros aumenta, as diferenças entre os conjuntos de dados são maiores. Para uma amostra de 384 dados avaliados (192 pares) – considerada uma amostra pequena – os valores da análise de erro são considerados bem aceitáveis.

Sendo assim, a partir dos resultados descritos na Tabela 1, é possível considerar que os dados de reanálise ERA-5 apresentam uma boa correspondência com os dados observados na Estação Meteorológica de Guaporé.

### Análise dos dados de Reanálise

O resultado da aplicação do Teste *t* de *Student* aos dados de reanálise do ERA-5 podem ser observados na Tabela 2.

Considerando um nível de significância de 95% ( $p\text{-value}=0,05$ ) e que a série de dados possui 16 anos, a hipótese  $H_0$  (de que os dados de pré-enchimento são, estatisticamente, iguais ao de pós-enchimento), deverá ser aceita caso seu escore ( $z$ ) esteja entre  $-2,36$  e  $2,36$  ( $-2,36 \leq z \leq 2,36$ ). Caso contrário, o resultado da estatística ( $z$ ) considerará que as ambas as séries são, estatisticamente, diferentes.

Tabela 2 - Escore ( $z$ ) do Teste *t* de *Student* para os dados de reanálise ERA-5.

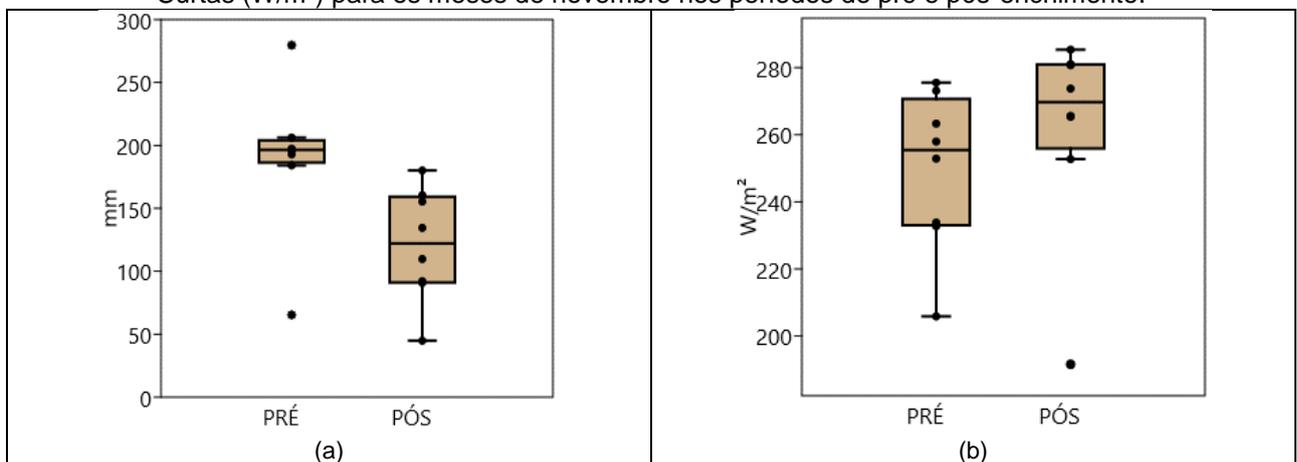
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
<b>Pluvio</b>	0,08	-1,49	-0,54	0,13	-0,20	-0,65	0,79	0,29	0,87	-0,14	<b>*2,48</b>	-1,80
<b>ROC</b>	0,92	-0,63	2,01	0,06	0,21	-0,66	-0,56	-1,37	-0,82	0,17	-0,75	0,40
<b>FCL</b>	-0,59	-1,02	0,74	-1,04	0,04	0,32	-0,59	-0,93	-0,88	-0,75	-0,77	0,67
<b>UR</b>	0,49	0,48	-0,34	-0,30	-0,39	-0,67	0,19	1,41	0,60	0,68	0,95	-0,51

Legenda - *Pluvio*: Pluviosidade Mensal; *ROC*: Radiação de Ondas Curtas; *FLC*: Fluxo de Calor Latente; *UR*: Umidade Relativa do Ar.

\*Significativo para diferenças.

De acordo com os resultados da estatística de *Student* indicados na Tabela 2, apenas as chuvas mensais de novembro é que podem ser consideradas significativas para mudanças, comparando-se as séries pré e pós-enchimento (Figura 3a).

Figura 3 - Comparação dos dados de (a) Pluviosidade mensal (mm) e de (b) Radiação de Ondas Curtas ( $W/m^2$ ) para os meses de novembro nos períodos de pré e pós-enchimento.



Elaboração - os autores.

Observa-se que houve redução nos totais pluviométricos no período de pós-enchimento. Tal comportamento não pode ser considerado como decorrente da influência do reservatório da PCH Autódromo, uma vez que a formação de uma lâmina d'água poderia criar condições favoráveis ao aumento da pluviosidade como observado no trabalho de Campos (1990), e não sua redução conforme a Figura 3a. Nesse mesmo sentido, a redução nos valores pluviométricos pode ser associada ao aumento da incidência de Radiação de Ondas Curtas no período de pós-enchimento (Figura 3b), sendo este, um provável efeito da dinâmica atmosférica em macroescala.

Já os resultados das demais variáveis (Tabela 2), tanto os escores positivos (redução) como os escores negativos (aumento) das variáveis analisadas não podem ser considerados como significativos para mudanças, reduzindo tal possibilidade em função da formação do reservatório da PCH.

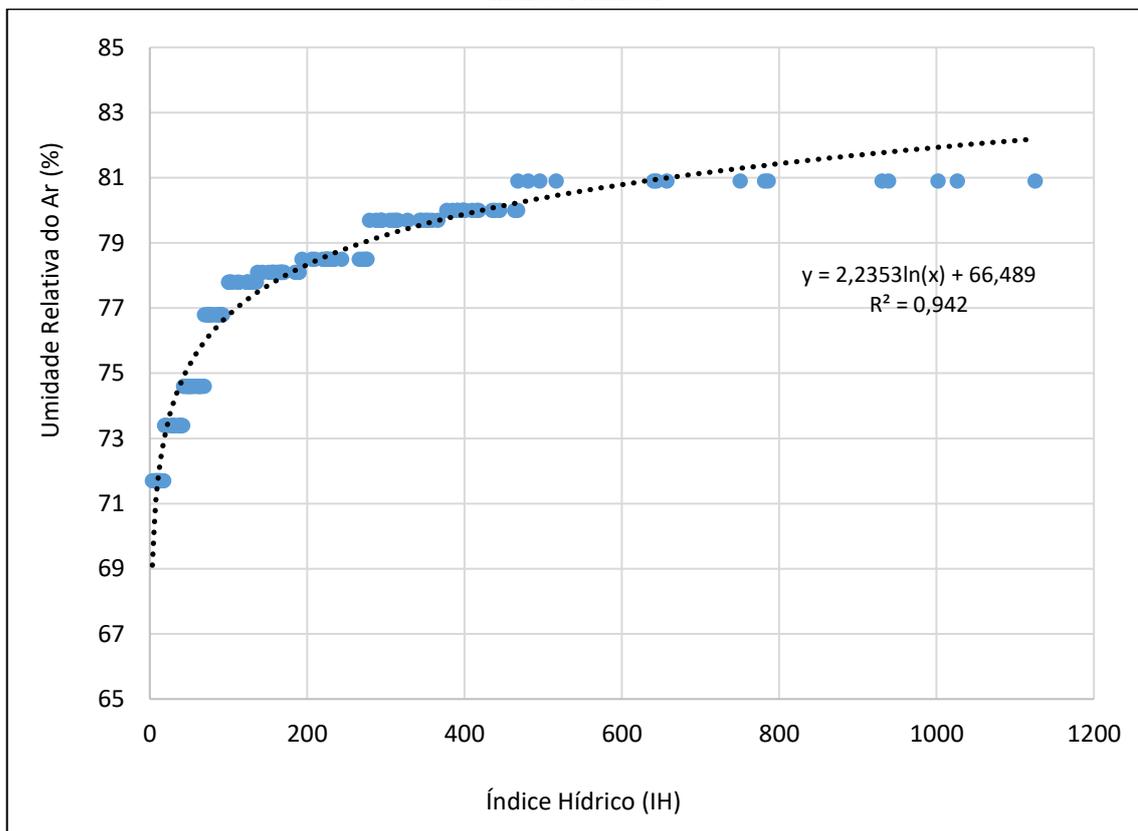
Dessa forma, os resultados dos dados de reanálise ERA-5 sugerem que reservatório da PCH Autódromo não modificou, significativamente, as condições climáticas locais após sua formação.

### **Estimativa de Umidade Relativa do Ar**

A aplicação do BHC, a partir dos dados pluviométricos observados da Estação Meteorológica de Guaporé e de temperatura média mensal da Estação Meteorológica de Bento Gonçalves, permitiu que se extraíssem informações sobre a Evapotranspiração Potencial (ETP), o Excedente hídrico (EXC) e a Deficiência hídrica (DEF), essenciais para se obter o Índice Hídrico (IH).

A correlação de dados entre o IH e as Normais Climatológicas de Umidade Relativa do Ar para Guaporé possibilitou, a partir da equação de regressão logarítmica (Figura 4), estimar a Umidade Relativa do Ar *cf.* sugerem os trabalhos de Teixeira (1999) e Silva et al. (2004).

Figura 4 - Correlação entre a Normal Climatológica de Umidade Relativa do Ar para Guaporé e o Índice Hídrico.

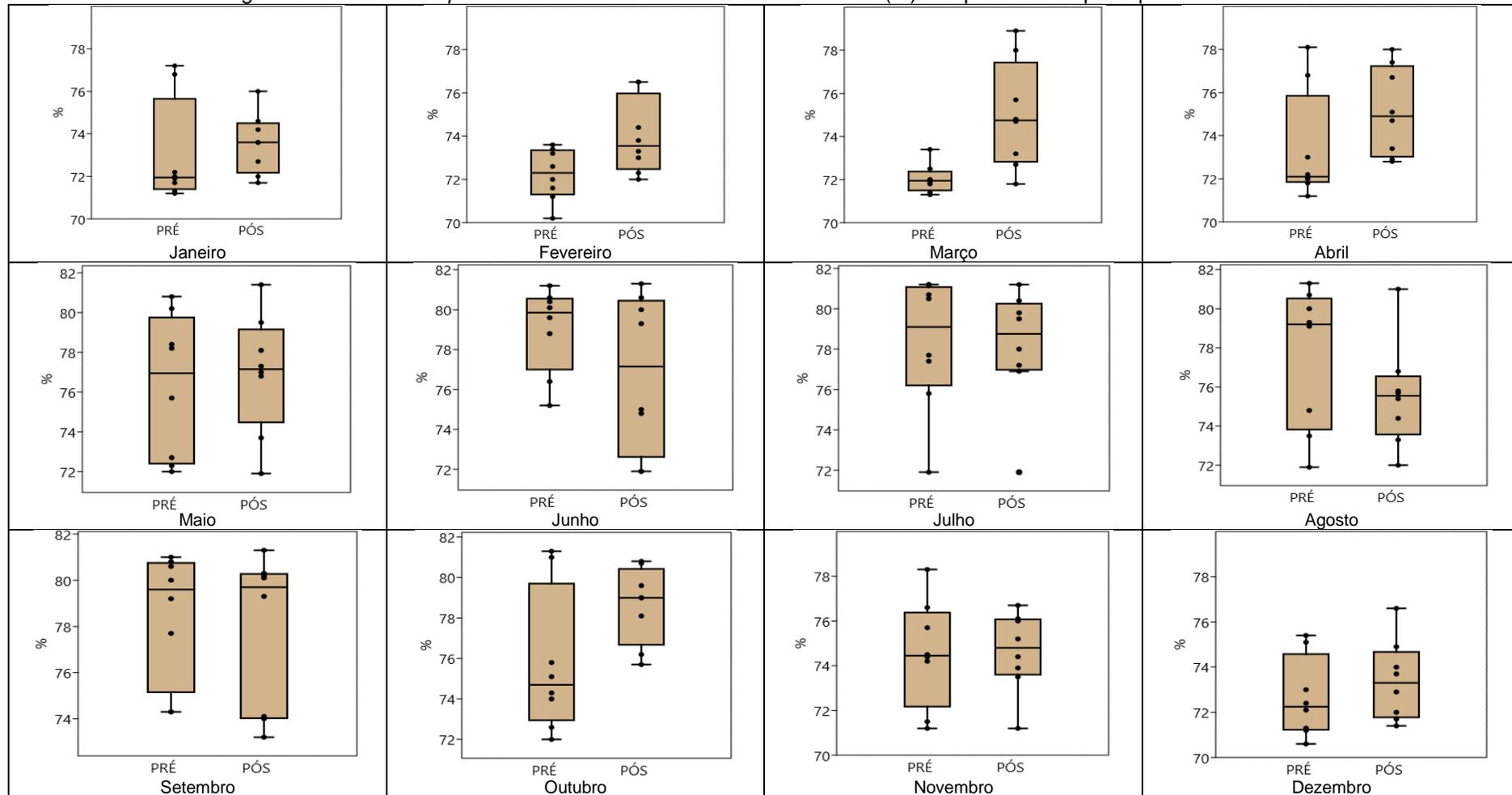


Elaboração - os autores.

A equação obtida [ $UR=2,2353\log(IH)+66,48$ ] apresentou um coeficiente de determinação de 94% de explicação dos dados por meio da linha de regressão, comprovando ser possível estimar, com confiança, a Umidade Relativa do Ar para a Estação Meteorológica de Guaporé nos períodos de pré-enchimento e pós-enchimento.

A Figura 5 mostra os gráficos comparativos da Umidade Relativa do Ar para Guaporé, estimados por meio da regressão logarítmica entre o Índice Hídrico e as Normais Climatológicas de Umidade Relativa do Ar para Guaporé.

Figura 5 - Gráficos *box plot* da estimativa de Umidade Relativa do Ar (%) nos períodos de pré e pós-enchimento.



Elaboração - os autores.

A comparação dos valores estimados de Umidade Relativa do Ar para Guaporé (Figura 5) mostra que houve aumento na umidade nos meses de janeiro, fevereiro, março, abril, outubro e dezembro no período de pós-enchimento.

Já nos meses de junho e agosto, observou-se que houve redução nos valores de umidade relativa no período posterior à formação do reservatório. Nos demais meses (maio, julho, setembro e novembro), praticamente não houve mudanças nos padrões distributivos (mediana e quartis) comparando-se os períodos.

A aplicação do Teste *t* de *Student* aos dados de Umidade Relativa do Ar estimados para Guaporé (Tabela 3) sugere significância estatística para mudança apenas para o mês de março ( $z=-2,77$ ). Tal escore *z* mostrou-se fora do limite de aceitação da estatística *t* para a série ( $-2,36 \leq z \leq 2,36$ ), indicando que os dados observados após o enchimento do reservatório são, significativamente, diferentes aos dados do período anterior.

Tabela 3 - Escore (z) do Teste *t* de *Student* para a estimativa da Umidade Relativa do Ar.

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
<b>Escore z</b>	-0,98	-0,44	<b>*-2,77</b>	-1,90	-0,77	0,90	1,03	0,37	0,77	-1,88	-0,30	-0,05

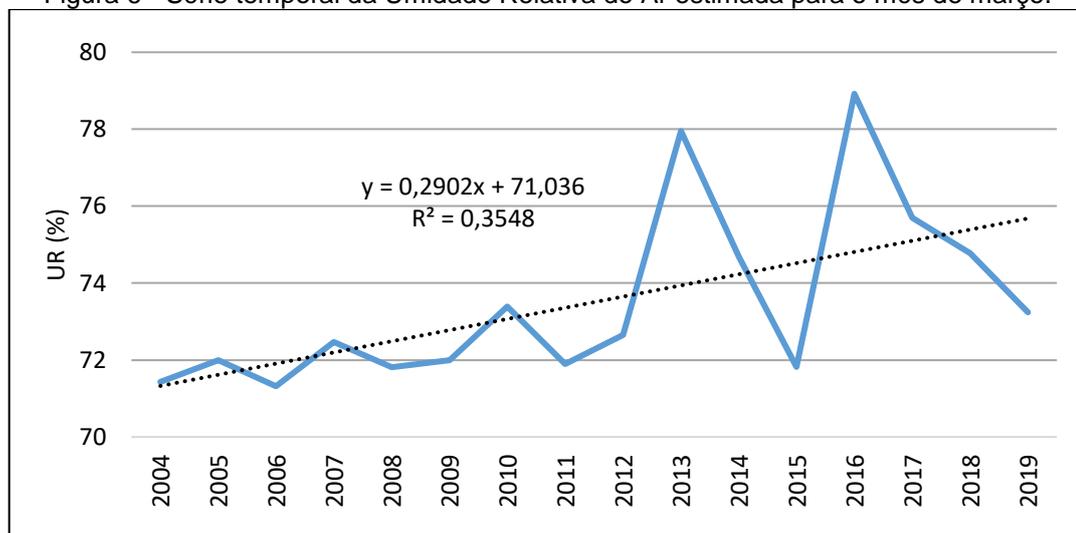
Nível de confiança de 95% ( $p\text{-value}=0,05$ ).

\*Significativo para diferenças

Dessa forma, a partir desses resultados, é possível considerar que houve aumento significativo da Umidade Relativa do Ar nos meses de março no período de pós-enchimento.

A Figura 6 mostra a série temporal da Umidade Relativa do Ar estimada para o mês de março, a tendência de aumento observada no período de 2004-2019.

Figura 6 - Série temporal da Umidade Relativa do Ar estimada para o mês de março.



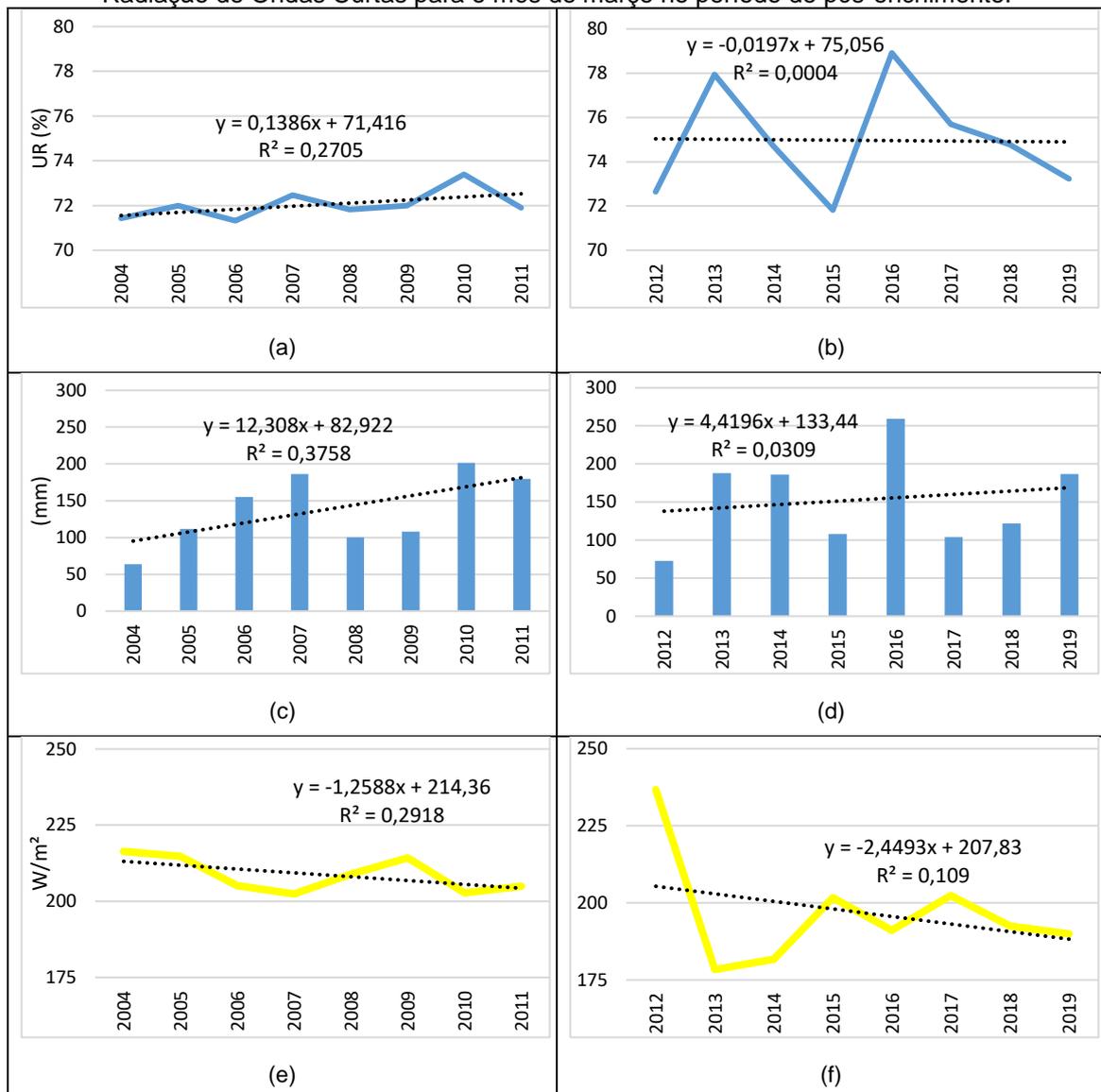
Elaboração - os autores.

Por meio da equação da reta ( $y=0,2902x+71,036$ ), é possível estimar que houve um aumento de 4,4% ao longo do período. O gráfico (Figura 6) ainda mostra que os dois maiores valores observados (78% e 78,9%) ocorreram no período posterior à formação do reservatório, respectivamente nos anos de 2013 e 2016.

Tais resultados poderiam sugerir que o aumento da umidade relativa no período de pós-enchimento estivesse relacionado à formação do reservatório da PCH Autódromo.

No entanto, a análise conjunta dos dados de Umidade Relativa do Ar estimada, da Pluviosidade e da Radiação de Ondas Curtas nos períodos de pré e pós-enchimento (Figura 7), é possível observar que a tendência de aumento (da pluviosidade e da umidade relativa) ocorreu direta e simultaneamente na fase pré-enchimento e, inversamente à incidência de Radiação de Ondas Curtas (aumento da nebulosidade).

Figura 7 - (a) Tendência da Umidade Relativa do Ar para o mês de março no período de pré-enchimento; (b) Tendência da Umidade Relativa do Ar para o mês de março no período de pós-enchimento; (c) Tendência da pluviosidade para o mês de março no período de pré-enchimento; (d) Tendência da pluviosidade para o mês de março no período de pós-enchimento; (e) Tendência da Radiação de Ondas Curtas para o mês de março no período de pré-enchimento; (f) Tendência da Radiação de Ondas Curtas para o mês de março no período de pós-enchimento.



Elaboração - os autores.

O comportamento destas variáveis corrobora com a atuação de sistemas sinóticos formadores de chuva, de aumento da nebulosidade (redução da Radiação de Ondas Curtas) e, conseqüentemente, de aumento da umidade relativa do ar.

Já no período pós-enchimento, o comportamento das variáveis observadas sugere que tal comportamento (da pluviosidade, da nebulosidade e da umidade relativa do ar) mantenha-se relacionado, uma vez que, quando os valores pluviométricos estão mais baixos (2012, por exemplo), os valores de Umidade Relativa do Ar mostram-se, igualmente, mais baixos.

Tal dinâmica se coloca inversamente aos dados de Radiação de Ondas Curtas, uma vez que os baixos valores de pluviosidade e de umidade relativa do ar observados para o ano de 2012 corroboram com a elevada incidência de radiação solar.

Para os anos seguintes, os (anos) que apresentaram umidade relativa mais elevada foram os mesmos em que a pluviosidade foi, igualmente, elevada e com menores valores de Radiação de Ondas Curtas, indicando aumento da nebulosidade.

Sendo assim, com base na análise dos dados, é possível considerar que a dinâmica da umidade relativa do ar para os meses de março esteja mais associada à participação de sistemas atmosféricos de macroescala do que, propriamente, à participação do reservatório da PCH Autódromo.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

As técnicas estatísticas para validação ao uso dos dados de reanálises garantiram a confiabilidade necessária aos dados de reanálise ERA-5 aos estudos comparativos.

Os resultados das comparações estatísticas aplicadas aos dados de pluviosidade, à radiação de ondas curtas, ao fluxo de calor latente e à umidade relativa do ar entre os períodos de pré e pós-enchimento revelaram pouquíssimas diferenças entre as séries de pré e pós-enchimento.

Também não se observou parametrização estatística para associar a diminuição de Radiação de Ondas Curtas (decorrente do aumento da nebulosidade) à influência do reservatório da PCH Autódromo.

No entanto, a redução de tal parâmetro nos meses de março seria um indicativo de uma possível influência, principalmente quando associado ao aumento nos valores de Umidade Relativa do Ar verificado tanto nos dados de reanálise (sem qualquer significância estatística), como no aumento verificado nos dados estimados (com significância estatística).

Os dados de Fluxo de Calor Latente corroboram com a ideia de que não há influência do reservatório neste aumento, pois, além de não apresentar significância estatística para nenhuma das análises, seus dados para o meses de março indicaram redução na transferência de calor latente para a atmosfera, sugerindo assim que o reservatório tenha armazenado mais energia.

Os dados de Umidade Relativa do Ar (estimados) permitiram estimar o aumento observado ao longo da série. Novamente, o destaque para o aumento ocorrido nos meses de março sugerindo um aumento de 4,4% no decorrer dos 16 anos da série.

A análise sistemática dos dados de Umidade Relativa do Ar (estimados), da Pluviosidade observada em Guaporé e de Radiação de Ondas Curtas, nos períodos de pré e pós enchimento, revelou que a dinâmica climática de macroescala se sobressaiu em relação à possível influência do reservatório, influenciando diretamente nos resultados obtidos.

A redução significativa observada para a pluviosidade nos meses de novembro, associadas ao aumento de Radiação de Ondas Curtas (diminuição da nebulosidade) no período de pós-enchimento reforça a condição de que os sistemas atmosféricos de macroescala (atuação das massas de ar) são os principais responsáveis pelas mudanças observadas na região de estudo.

Sendo assim, tendo em vista o objetivo de apresentar uma proposta metodológica (técnica e método) para estudos sobre a umidade relativa e nebulosidade no entorno de reservatórios hídricos, as análises desenvolvidas no presente estudo permitiram afirmar que a formação do reservatório da PCH Autódromo pouco contribuiu para o aumento da umidade relativa do ar no seu entorno em determinados meses do ano. No entanto, o aumento da umidade relativa observado teve sua gênese associada à dinâmica atmosférica regional, a qual é responsável pela pluviosidade no local, bem como pelo aumento da nebulosidade nos primeiros meses do ano.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à empresa Quebec Engenharia pela autorização para publicação do estudo. Ao CNPq pela concessão da bolsa de produtividade e pesquisa ao primeiro autor (Processo: 308228/2021-9) e à CAPES pela concessão de bolsa de mestrado ao quinto autor.

## REFERÊNCIAS

- ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M.; SPAROKEV, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.22, n.6, 711–728, 2013. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- ANJOS, R.S.; NÓBREGA, R.S.; CANDEIAS, A.L.B. Possíveis causas para erros de estimativas do satélite TRMM – estudo e caso na microrregião de Itaparica-PE. **Revista Brasileira de Climatologia**, v.21, Jul/Dez, 2017. <https://doi.org/10.5380/abclima.v21i0.53241>
- BAXTER, R.M.; GLAUDE, P. **Environmental effects of dams and impoundments in Canada: experience and prospects**. Ottawa: Department of Fisheries and Oceans, 1980. 34p.
- BIGELOW, F.H. Studies on the phenomena of the evaporation of water over lakes and reservoirs. **Monthly Weather Review**. 35. p, 311–316, 1908. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1907\)35<311:SOTPOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1907)35<311:SOTPOT>2.0.CO;2)
- BIGELOW, F.H. Studies on the phenomena of the evaporation of water over lakes and reservoirs. **Monthly Weather Review**. 38. 307–313. 1910. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1910\)38<307:SOTPOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1910)38<307:SOTPOT>2.0.CO;2)
- BORGES, B.P. Campus Universitário UNIVALES Guaporé. 2016. **Monografia de Graduação**. Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal do Rio do Grande do Sul, Porto Alegre (RS), 2016. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/164065/001025662.pdf?sequence=1>. Acesso em 15/01/2020.
- CAMPOS, F.S. **Estudo de variabilidade de precipitação**. 1990. Monografia de Graduação, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP. 1990.
- CUNHA, A.R.; ESCOBEDO, J.F.; KLOSOWSKI, E.S. Estimativa do fluxo de calor latente pelo balanço de energia em cultivo protegido de pimentão. **Pesq. Agropec. Bras.**, Brasília, v.37, n.6, p. 735-743, jun. 2002. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2002000600001>
- CZARNOBAI, A.F.; PRUDENCIO, R.S.; RODRIGUES, M.L.G. A circulação atmosférica local na região da Usina Hidrelétrica de Itá. In: XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia. **Anais...** Florianópolis, 2006.
- DANTAS, S.P.; SALES, M.C.L. A Influência do Açude Castanhão no Clima Local de Jaguarema - Ceará – Brasil: Uma análise no campo térmico e higrométrico. **Revista Equador**. v.4, p. 2-17, 2015. <https://doi.org/10.26694/equador.v4i02.3279>
- DEGU, A.M.; HOSSAIN, F.; NIYOGI, D.; PIELKE SR, R.; SHEPHERD, J.M.; VOISIN, N.; CHRONIS, T. The influence of large dams on surrounding climate and precipitation patterns. <https://doi.org/10.1029/2010GL046482>
- Geophysical Research Letters**, v.38, L04405, 2011.
- ELSAWWAF, M.; WILLEMS, P.; PAGANO, A.; BERLAMONT, J. Evaporation estimates from Nasser Lake, Egypt, based on three floating station data and Bowen ratio energy budget. **Theoretical and Applied Climatology**. 100. 439-465. 2010. <https://doi.org/10.1007/s00704-009-0168-z>
- FERNANDEZ, W.; CHACÓN, R. E.; MELGAREJO, E.E.J.W. Modifications of Air Flow Due to the Formation of a Reservoir. **Journal of Climate and Applied Meteorology**. 25. 982–988. 1986. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1986\)025<0982:MOAFDT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1986)025<0982:MOAFDT>2.0.CO;2)
- FISCH, G.F.; JANUÁRIO, M.; SENNA, R.C. Impacto ecológico em Tucuruí (PA): Climatologia. **Acta Amazônica**, 20: 49 – 60, 1990. <https://doi.org/10.1590/1809-43921990201060>

FRAUCHES, M.S.; OLIVEIRA, T.A.; SANCHES, F.O.; FERREIRA, C.C.M. Chapéu D'Uvas: um estudo sobre as chuvas locais em reservatórios em Minas Gerais. **Revista Brasileira de Climatologia**, ano 16, v. 27, JUL/DEZ, 2020.

GRIMM, A.M. Verificação de Variações Climáticas na área do Lago de Itaipu. In: V Congresso Brasileiro de Meteorologia, **Anais...** Rio de Janeiro: Universidade Federal do Paraná, 1988.

GUNKEL, G.; LANGE, U.; WALDE, D.; ROSA, J. W. C. The environmental and operational impacts of Curuá-Una, a reservoir in the Amazon region of Pará, Brazil. **Lake & Reservoirs: Research and Management**, v. 8, n. 3-4, p. 201-220, 2003.

<https://doi.org/10.1111/j.1440-1770.2003.00227.x>

HARTMANN, D.L. **Global Physical Climatology**. International Geophysics Series, v.56, Academic Press, 1994.

HENRY, A. J. Would a larger reservoir increase rainfall? **Monthly Weather Review**. 48.31–32. 1920.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. **Normais Climatológicas**. 2021. Disponível em: <https://clima.inmet.gov.br/>. Acesso em: 30 maio 2021

[https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1920\)48<31:WALRIR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1920)48<31:WALRIR>2.0.CO;2)

**Projeto de MDL Complexo Carreiro II. MECANISMO DE DESENVOLVIMENTO LIMPO: FORMULÁRIO DO DOCUMENTO DE CONCEPÇÃO DO PROJETO (MDL-DCP)**, 2011.

HINKLE, D.E.; WIERSMA, W, JURIS, S.G. **Applied Statistics for the Behavioral Sciences**. 5th ed. Boston: Houghton Mifflin, 2003.

QUINA, R.R.; COSTA, R.M.; SANCHES, F.O.; GOMES, F.C.M; ZAIDAN, R.T. Comparação de produtos altimétricos dos sensores Palsar/Alos e Lidar, a partir do modelo Sinmap. **Research, Society and Development**, v. 9, p. e27391211149-26, 2020.

<https://doi.org/10.33448/rsd-v9i12.11149>

RODRIGUES, M.L.G.; CANÔNICA, E. Análise preliminar do impacto do reservatório de Itá no clima local. In: XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia. **Anais...** Florianópolis. 2006.

ROSSATO, M.S. Os climas do Rio Grande do Sul: uma proposta de classificação climática. **Entre Lugar**, v.11, n.22, 2020. <https://doi.org/10.30612/el.v11i22.12781>

SADEK, M. F.; SHAHIN, M.M.; STIGTER, C. J. Evaporation from the reservoir of the High Aswan Dam. Egypt: A new comparison of relevant methods with limited data. **Theoretical and Applied Climatology**. 56.57-66. 1997. <https://doi.org/10.1007/BF00863783>

SANCHES, F.; FISCH, G. As possíveis alterações microclimáticas devido à formação do lago artificial da hidrelétrica de Tucuruí-PA. **Acta Amazônica**, vol. 35 n.1, 2005.

<https://doi.org/10.1590/S0044-59672005000100007>

SANCHES, F.O.; BIAVATTI, A.; SOUZA, D.O.; SILVA, R.V.; FERREIRA, R.V. Chuvas e Marcelino Ramos (RS): influência do lago da UHE de Itá ou do ENOS? **Revista Ciências Humanas**, Viçosa, v.15, n.2, 2015. p.338-348.

SANCHES, F.O.; FERRAZO, S.T., SILVA, R.V., CHECHI, L., FERREIRA, R.V. Influence of the Hydroelectric Power Plant of Passo Fundo Lake (RS, Brazil) on local rainfall pattern. **Revista Brasileira de Climatologia**, ano 13, v.20, 2017.

<https://doi.org/10.5380/abclima.v20i0.46939>

SARAIVA, G.S.; BONOMO, R.; SOUZA, J.M. Avaliação de interpoladores geoestatísticos e determinísticos da evapotranspiração de referência diária para o estado do Espírito Santo. **Revista Agro@mbiente On-line**, v. 11, n. 1, p. 21-30, janeiro-março, 2017.

<https://doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v11i1.3647>

SIEFERT, C. A. C.; NETTO, N. D.; MARANGON, F. H. S.; SCHULTZ, G. B.; dos REIS SILVA, L. M.; FONTENELLE, T. H.; dos SANTOS, I. Avaliação de Séries de Velocidade do Vento de Produtos de Reanálises Climáticas para o Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 36, n. 4, p. 689-701, 2021. <https://doi.org/10.1590/0102-7786360026>

SILVA FILHO, V.; RABELO, J.K.L. Detecção de possíveis diferenças ocorridas no comportamento da atmosfera local, como consequência da introdução do lago Castanhão no estado do Ceará. In: XVII Congresso Brasileiro de Meteorologia, **Anais...** Gramado-RS, 2012.

SILVA, T.G.F.; MOURA, M.S.B.; TURCO, S.H.N.; PADILHA, C.V. da S.; TEIXEIRA, A. H. de C. Estimativa e espacialização da umidade relativa do ar no Estado do Piauí. In: XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia. **Anais...** Fortaleza: 2004.

SOUZA, M.B.; GALVANI, E. Formação de reservatórios e influências no microclima: estudo da cidade de Presidente Epitácio, Estado de São Paulo, Brasil. In: VI Seminário Latino-Americano de Geografia Física e II Seminário Ibero-Americano de Geografia Física. **Anais...** Universidade de Coimbra, Portugal, 2010.

SPIEGEL, M.R. **Estatística**. 3.ed. São Paulo: Pearson Makron Books/McGraw-Hill do Brasil, 1993.

TEIXEIRA, A.H. de C. Estimativa de umidade do ar no estado de Pernambuco. In: XI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia; II Reunião Latino-americana de Agrometeorologia, **Anais...** Florianópolis: 1999.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. The water balance. **Laboratory of Climatology**, Centerton, v. 8, n. 1, p. 1-14, 1955.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO) - **GuidetoMeteorologicalInstrumentsandMethodsofObservation**. n.8, 2008 edition, Updated in 2010, 2012.

---

Recebido em: 27/04/2021

Aceito para publicação em: 19/04/2022