

ANÁLISE ESPACIAL E TEMPORAL DE EVENTOS DE SECAS NA REGIÃO HIDROGRÁFICA ALTO RIO PARANÁ DE 1990 A 2020

<https://doi.org/10.4215/rm2024.e23001>

Tokuda, E. N. ^{a*} - Lima, C. G. R. ^b - Oliveira, J. N. ^c

(a) Mestre em Engenharia Civil

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2863-8842>. **LATTES:** <https://lattes.cnpq.br/8962064903346709>.

(b) Doutor em Agronomia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1878-2912>. **LATTES:** <http://lattes.cnpq.br/4307049253982150>.

(c) Doutor em Engenharia Hidráulica e Sanitização

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4453-6347>. **LATTES:** <http://lattes.cnpq.br/7043050303044243>.

Article history:

Received 25 June, 2023
Accepted 20 October, 2023
Published 1 January, 2024

(*) CORRESPONDING AUTHOR

Address: São Paulo State University Júlio de Mesquita Filho, Av. 24 A, 1515 - Bela Vista, Rio Claro - SP, 13506-692
E-mail: eduarda.tokuda@unesp.br

Resumo

A Região Hidrográfica do Rio Paraná possui grande relevância socioeconômica para o Brasil. Devido ao histórico de secas na região, o objetivo do presente estudo foi avaliar a variabilidade espacial e temporal das chuvas, bem como analisar as características das secas com base no Índice de Porcentagem Normal (IPN) de modo a contribuir com a gestão da água no Alto Rio Paraná (ARP). A área de estudo compreendeu 14 unidades hídricas de planejamento, distribuídas nos estados de Goiás, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais e São Paulo. Os dados climáticos foram obtidos junto a Rede Hidrometeorológica Nacional. Efetuou-se a análise geostatística dos dados de precipitação, a partir das séries anuais de 408 estações, e posteriormente o cálculo do IPN para classificação da severidade das secas. Todos os períodos analisados (1990-2020) indicaram dependência espacial (moderada-alta), possibilitando a elaboração dos mapas de secas. Os períodos e áreas secas e chuvosas não indicaram influência direta do El Niño-Oscilação Sul (ENOS). Mato Grosso do Sul e São Paulo foram os maiores contribuintes nas secas. Os dados indicaram que 2010-2020 foi o decênio mais seco do período, com maior contribuição em 2019/2020, onde as secas superaram 60% da área, evento nunca identificado nas últimas 3 décadas. As curvas IPN referente a “seca inicial” e “suave” permitiram verificar anos de crise hídrica quando seus percentuais somados atingiram pelo menos 50% da bacia do ARP. A metodologia utilizada mostrou versatilidade permitindo seu uso em qualquer escala hidrográfica, apresentando-se como alternativa em regiões com escassez de dados.

Palavras-chave: Chuvas. Gestão hídrica. IPN. Krigagem.

Abstract / Resumen

SPATIAL AND TEMPORAL ANALYSIS OF DROUGHT EVENTS IN UPPER PARANÁ RIVER HYDROGRAPHIC REGION (BRAZIL) FROM 1990 TO 2020

The Paraná River Hydrographic Region is of great socioeconomic relevance for Brazil. Therefore, due to the history of droughts in the region, the aims of the current study were to assess rainfall spatial and temporal variability, as well as to analyze drought features based on using the Normalized Percentage Index (NPI) to contribute to water management processes in Upper Paraná River (UPR). The study area encompasses 14 Planning and Management Units, distributed in Goiás, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais and São Paulo states. Climate data were obtained from the National Hydrometeorological Network database. A geostatistical analysis of rainfall was carried out, based on the annual series of 408 stations, and subsequently the calculation of NPI for classifying the droughts severity. All periods analyzed (1990-2020) showed spatial dependence (moderate to high), allowing the elaboration of droughts maps. The dry and rainy periods and areas did not indicate direct influence of El Niño-Southern Oscillation (ENSO). Mato Grosso do Sul and São Paulo units were the main contributors to the identified droughts. The data showed that 2010-2020 was the driest decade of the period, with a greater contribution from the 2019/2020 period, where droughts exceeded 60% of the area for two consecutive years, an event never identified in the last 3 decades. The NPI curves referring to “initial drought” and “mild” allowed verifying years of water crisis when their summed percentages reached at least 50% of the region. The methodology used is versatile, allowing its use in any watershed.

Keywords: Rains. Water management. NPI. Kriging.

ANÁLISIS ESPACIAL Y TEMPORAL DE LOS EVENTOS DE SEQUÍA EN LA REGIÓN HIDROGRÁFICA DEL ALTO RIO PARANÁ DESDE 1990 HASTA 2020

La Región Hidrográfica del Río Paraná es de gran relevancia socioeconómica para Brasil. Debido a la historia de sequías en la región, el presente estudio tuvo como objetivo analizar la variabilidad espacial y temporal de las precipitaciones, así como las características de la sequía con base en el Índice Porcentual Normal (IPN) con el fin de contribuir a la gestión del agua en el Alto Río Paraná (ARP). El área de estudio comprende 14 unidades hídricas distribuidas en los estados de Goiás, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais y São Paulo. Los datos climático se obtuvieron de la Red Hidrometeorológica Nacional. Se realizó un análisis geoestadístico de las precipitaciones, a partir de la serie anual de 408 estaciones, y posteriormente el cálculo del IPN para clasificar la severidad de las sequías. Todos los períodos (1990-2020) mostraron dependencia espacial (moderada-alta), lo que permitió la elaboración de mapas de sequías. Los períodos y áreas secas y lluviosas no indicaron influencia directa de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS). Mato Grosso do Sul y São Paulo fueron las principales contribuyentes a las sequías. Los datos mostraron que 2010-2020 fue la década más seca, con mayor contribución del 2019/2020, donde las sequías superaron el 60% del área, evento nunca identificado en las últimas 3 décadas. Las curvas IPN referidas a “sequía inicial” y “leve” permitieron verificar años de crisis hídrica cuando sus porcentajes sumados alcanzaron al menos el 50% de la región. La metodología utilizada es versátil, permitiendo su uso en cualquier cuenca hidrográfica.

Palabras-clave: Lluvias. Administración del agua. IPN. Kriging.

INTRODUÇÃO

A gestão das águas implica a investigação e a compreensão de tendências e mudanças climáticas, que junto as alterações de uso e cobertura da terra, afetam diretamente o gerenciamento de bacias hidrográficas (KUMAR, et al., 2019; THOMAS & PRASANNAKUMAR, 2016). Tal investigação tem se tornado uma tarefa cada vez mais difícil, tendo em vista a frequência de eventos extremos que afetam a variabilidade natural dos processos hidrológicos, impactando o desenvolvimento econômico (BHATTI et al., 2016; DUTTA & MAITY, 2021).

Na atualidade são registrados diversos impactos oriundos de alterações atípicas nos padrões climáticos e regimes pluviométricos, como o aumento do aquecimento global e a ocorrência das fases quente (El Niño) ou fria (La Niña) do fenômeno El Niño - Oscilação Sul (ENOS) (ARYAL et al., 2018; MALLAKPOUR et al., 2018, 2019). Tais efeitos climáticos relacionados à circulação geral da atmosfera atingem vastas áreas, afetando a intensidade e a sazonalidade dos padrões hidrológicos em grandes escalas (ROCHA & SANTOS, 2018).

De acordo com Melo (2017), eventos climáticos e meteorológicos extremos, têm impactado de forma negativa a ocorrência de chuvas em diversas regiões do país, ocasionando problemas como o racionamento de água e a redução de geração de energia elétrica. À vista disso, diversos autores buscaram relacionar a ocorrência de mudanças climáticas e fenômenos oceano-atmosféricos às oscilações das condições hidrológicas e secas extremas no país, observadas na Amazônia (MARENGO et al., 2013; PEDREIRA JUNIOR et al., 2020), e nas regiões Nordeste (ALMEIDA, 2014), Sudeste (MINUZZI et al., 2006; ABOU RAFEE et al., 2019), e Sul do Brasil (BASSO, 2019).

Nos dias atuais, conforme constatado pelo Sistema Nacional de Meteorologia (SNM), desde outubro de 2019, a Região Hidrográfica Paraná (que compreende importantes usos da água, de influência econômica e social no país) tem apresentado déficit de precipitação mensal severo, levando a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) a declarar situação crítica de escassez quantitativa das águas, de acordo com a Resolução n° 77/2021 (ANA, 2021; AZEVEDO, 2021).

Dos vários índices de secas existentes, o Índice de Porcentagem Normal (IPN) descrito por Willeke, Hosking & Wallis (1994), destaca-se devido a sua simplicidade matemática, podendo ser aplicado para uma única região ou estação, empregando-se apenas dados de precipitação em escalas semanais, mensais, sazonais, anuais e decenais. Desta forma, o IPN tem sido considerado eficaz quando aplicado de forma regional, e frequentemente utilizado para caracterizar as secas meteorológicas (HAYES, 2006; TEIXEIRA et al., 2013; LIMA, 2016; SALEHNIA et al., 2017).

A Região Hidrográfica Alto Paraná (ARP), cuja extensão totaliza 254.896 km², apresenta uma crítica discrepância na disponibilidade de informações hidrológicas. Com exceção das unidades hídricas do estado de São Paulo, as sub-bacias localizadas nos demais estados (Goiás, Minas Gerais e Mato Grosso do Sul) apresentam rede pluviométrica com densidade até 4 vezes abaixo da recomendação da Organização Meteorológica Mundial (OMM, 2008), dificultando estimativas de dados de chuva para locais não amostrados.

O predomínio de pequenas escalas na hidrologia tem ocorrido, principalmente, devido à dificuldade em obter dados temporais e espaciais suficientes para a análise hidrológica em grandes bacias (ABOU RAFEE et al., 2019). De acordo com Acosta (2014) e Pruski et al. (2012), parte desta carência de informações vêm sendo contornada por meio de métodos de regionalização, que visam a transferência de variáveis, funções ou parâmetros, a partir da presunção da semelhança espacial em áreas homogêneas. Diante do problema da disponibilidade e qualidade das séries hidrológicas, a teoria das variáveis regionalizadas (KRIGE, 1951; MATHERON, 1962) pautada na geoestatística, tem sido utilizada com êxito em diversos estudos hidrológicos, que visam a espacialização de variáveis como temperatura e a precipitação (JOURNEL & HUIJBREGTS, 1993).

A geoestatística reúne características muito úteis para avaliar a distribuição de eventos naturais por permitir a análise de tendências espaciais e temporais (YAMAMOTO & LAMDIM, 2013). Assim, esta modalidade de análise tem sido largamente empregada em diversos estudos da espacialização das chuvas (HU et al., 2019), podendo citar como exemplo os trabalhos de Muthusamy et al. (2017) no Reino Unido e de Berndt & Haberlandt (2018) no norte da Alemanha. No que concerne ao Brasil, destaca-se também os trabalhos de Malfatti et al., (2018) na Bacia do Rio Paraná; de Medeiros et al.

(2019), no estado da Paraíba e, de Ricardi & Lima (2021) no estado de São Paulo.

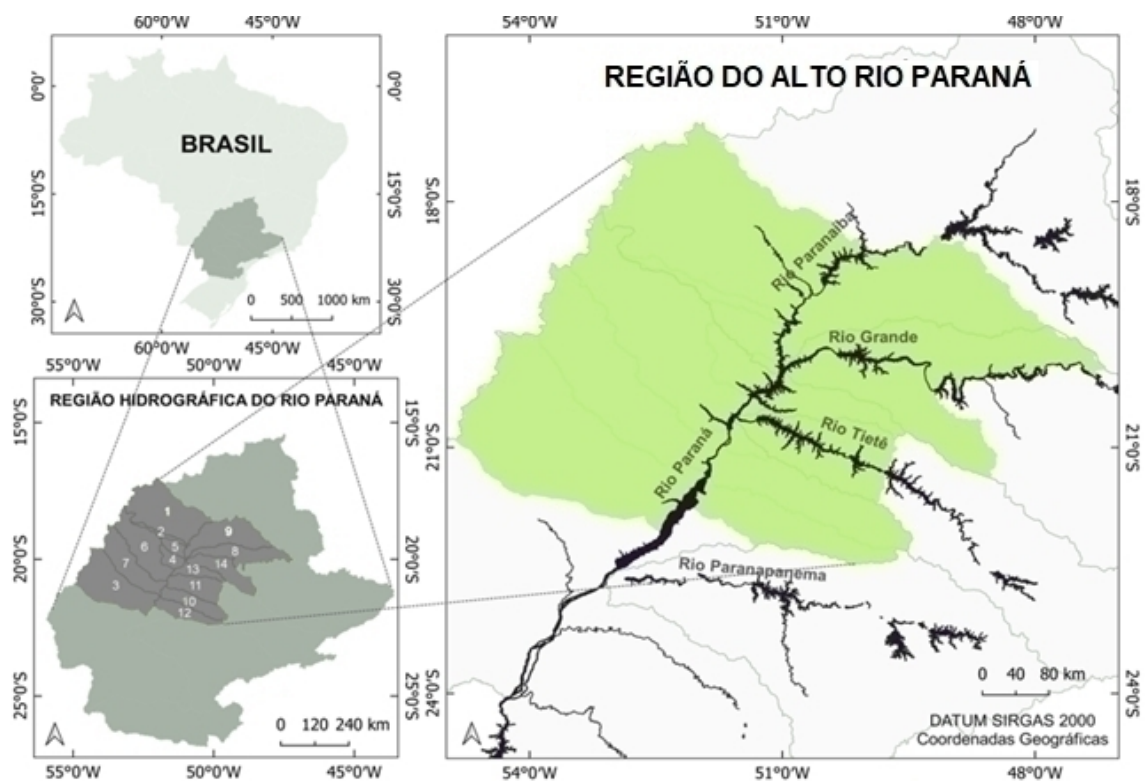
Assim, diante do exposto, o presente trabalho objetivou avaliar a variabilidade espacial e temporal da pluviometria, bem como analisar as características das secas, por meio do Índice de Porcentagem Normal (IPN) como subsídio a gestão hídrica na Região Alto Rio Paraná.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo e coleta de dados

A região ARP (Figura 1) abrange 14 Unidades Estaduais de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos (UEPGRHs), totalizando uma área de 254.896 km² (30% da Região Hidrográfica Paraná) e cerca de 5.358.974 de habitantes (ANA, 2019). A região enquadra-se no clima tropical úmido seco do Brasil Central, classificação Kopen tipo Aw, e tem como principais sistemas atuantes as massas de ar Tropical Atlântica (mTa), Polar Atlântica (mPa) e os rios voadores da Amazônia (AZEVEDO, 2021).

Figura 1 – Localização da região Alto Rio Paraná e sub-bacias constituintes



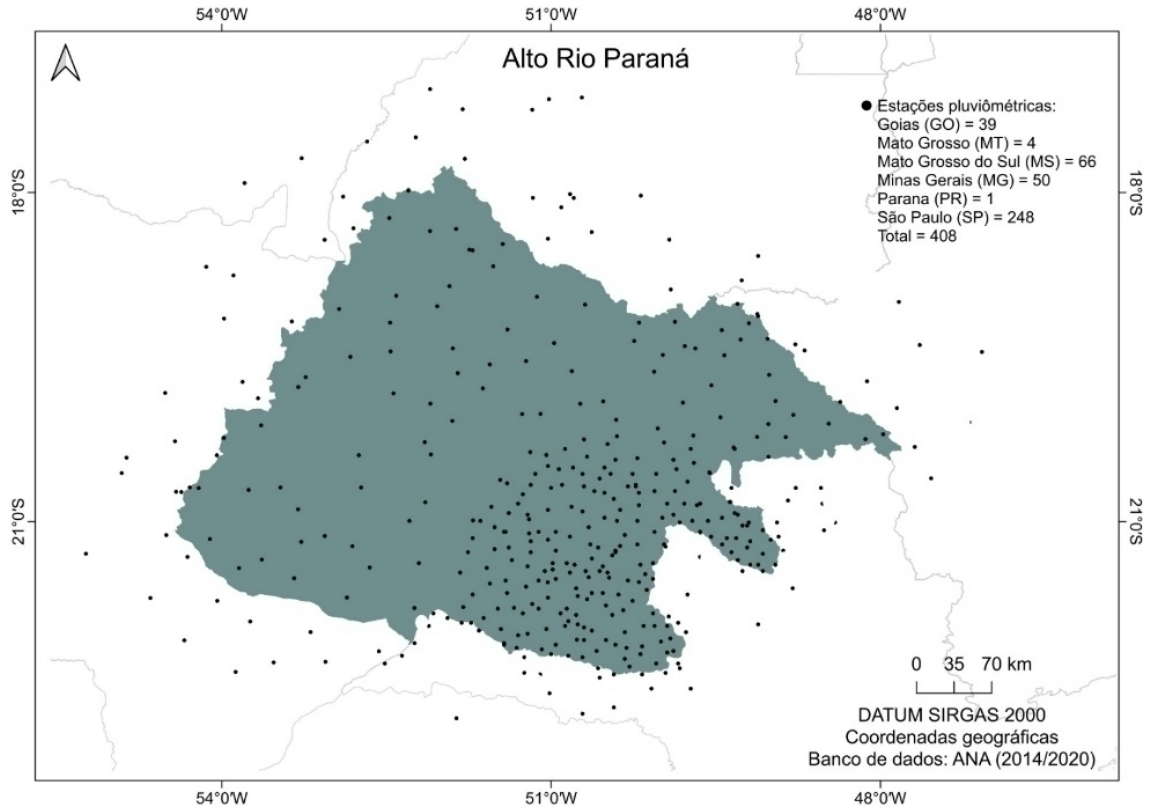
1=Baixo Paranaíba; 2=Aporé; 3=Pardo; 4=Quitéria; 5=Santana; 6=Sucuriú; 7=Verde; 8=Baixo Rio Grande; 9=Baixo Rio Paranaíba; 10=Aguapeí; 11=Baixo Tietê; 12=Peixe; 13=São José dos Dourados; 14=Turvo-Grande.

Fonte: ANA (2014) - Editado

Os dados das séries pluviométricas da área de estudo foram compilados a partir da ferramenta Hidroweb v.3.1.1 (SNIRH, 2021). Para tanto, foram consideradas as séries históricas que continham dados durante os anos de 1990 a 2020 (341 estações), além de um incremento de 67 estações (borda), compostas por séries completas de tamanho variado, assegurando a cobertura de toda área de estudo. No total foram utilizados dados de 408 postos pluviométricos distribuídos conforme Figura 2. Ressalta-se,

porém, que nem todos os postos apresentaram dados de monitoramento integral para todo o período estudado.

Figura 2 – Estações pluviométricas com dados entre 1990 e 2020



Fonte: ANA (2014); SNIRH (2021) – Editado

Tratamento dos dados

Para a caracterização inicial dos dados das chuvas, efetuou-se a análise estatística descritiva. Posteriormente os dados passaram pela análise de dependência espacial por meio do software *GeoStatistics for the Environmental Sciences - Gamma Design (GS+)* versão 7.0 (ROBERTSON, 2004). Assim, para cada ano foi calculado o semivariograma experimental, conforme Equação 1 (YAMAMOTO & LANDIM, 2013):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(X_i) - Z(X_i + h)]^2 \tag{1}$$

onde, $N(h)$ refere-se ao número de pares experimentais de observações $Z(X_i)$ e $Z(X_i + H)$ distantes entre si a uma medida regular h .

Para os ajustes semivariográficos foram observados inicialmente: a) a menor soma dos quadrados dos desvios (SQD); b) o maior coeficiente de determinação espacial (R^2) e, c) o maior avaliador da dependência espacial (ADE) conforme Equação 2. Onde “C” é a contribuição e “C0+C” o patamar, sendo considerado a seguinte interpretação para o ADE: $\leq 25\%$ fracamente dependente, $> 25\%$ e $\leq 75\%$ moderadamente dependente e $> 75\%$ altamente dependente (LIMA et al., 2020).

$$ADE = \left(\frac{C}{C_0 + C} \right) \cdot 100 \quad (2)$$

A definição final do modelo de ajuste, foi realizada tendo como parâmetro o maior coeficiente de correlação (r) entre os valores observados versus estimados da validação cruzada (VC). Após essa etapa, foi realizada a interpolação por krigagem ordinária, descrita na Equação 3 (YAMAMOTO & LANDIM, 2013):

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(X_i) \quad , \text{ with } \sum_{i=1}^N \lambda_i = 1 \quad (3)$$

onde, “Z*” é o valor a ser estimado no ponto não amostrado x_0 ; “N” o número de valores medidos $z(x_i)$ envolvidos na estimativa e “ λ_i ” os pesos associados a cada valor medido $z(x_i)$.

A partir dos mapas de chuvas anuais gerados, efetuou-se a aplicação do Índice de Porcentagem Normal (IPN), estimando-se o valor da medida do desvio da precipitação em relação ao valor normal. Tal medida é dada pela multiplicação do quociente, entre a precipitação atual de uma dada estação e a precipitação normal, por 100, conforme Equação 4 (LIMA, 2016).

$$P = \left(\frac{Pr_{p(atual)}}{Pr_{p(normal)}} \right) 100 \quad (4)$$

onde, P é a porcentagem da precipitação normal, Pr p(atual) equivale a chuva medida em um dado local ou estação e Pr p(normal) refere-se à média pluviométrica de longo prazo do local considerado, sendo as duas últimas expressas em mm. Por fim, o valor do IPN foi deduzido, subtraindo-se de P o valor de 100, para a classificação da intensidade das secas de acordo com a escala apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação do Índice de Porcentagem Normal

| IPN (%) | Intensidade |
|-----------------|---------------------------|
| 90 a \geq 100 | Umidade extremamente alta |
| 70 a 90 | Umidade alta |
| 50 a 70 | Umidade moderada |
| 30 a 50 | Umidade baixa |
| 10 a 30 | Umidade inicial |
| 0 a 10 | Normal+ |
| -10 a 0 | Normal- |
| -30 a -10 | Seca inicial |
| -50 a -30 | Seca suave |
| -70 a -50 | Seca moderada |
| -90 a -70 | Seca severa |
| -100 a -90 | Seca extrema |

Fonte: Adaptado de Gois (2005)

Fonte: Adaptado de Gois (2005)

Em ambiente *SPRING 5.3* (CAMARA et al., 1996) os valores de IPN foram quantificados a partir da Equação 4 aplicada aos mapas de chuvas anuais, com o uso da Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico (LEGAL). As classes do IPN (Tabela 1), foram adaptadas conforme Gois (2005) e Fernandes et al. (2009), e os mapas finais editados no *software* QGIS 3.4 (QGIS, 2021).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise estatística descritiva

As séries históricas de 1990 a 2020 das chuvas totais anuais na região do Alto Rio Paraná foram submetidas a análise estatística descritiva, onde foi observado que o valor médio da série variou entre 1.178,34 mm (1999) e 1.759,31 mm (2009), com médias próximas às registradas em áreas de clima tropical úmido seco do Brasil Central (MENDONÇA et al., 2007) e à média anual da Região Hidrográfica Paraná de 1.543 mm (ANA, 2015). Os períodos com totais abaixo de 1.300 mm foram os anos de 1999 (1.178,34 mm), 2002 (1.202,44 mm), 2019 (1.215,43 mm), 1994 (1.216,91 mm), 2014 (1.243,78 mm), 2010 (1.283,10 mm) e 2020 (1.298,51 mm), coincidindo com períodos hídricos críticos (ANA, 2021; MELO, 2017; ZAVATTINI, 2009).

Ainda, segundo classificação de Pimentel-Gomes & Garcia (2002), 26 anos (83,87%) do período analisado apresentaram média variabilidade dos dados ($10\% < CV < 20\%$) e 5 anos (16,13%) alta variabilidade ($20\% < CV < 30\%$), indicando viabilidade da análise geoestatística.

Análise geoestatística das chuvas

Conforme as medidas de ajuste dos semivariogramas, apresentadas na Tabela 3, verificou-se que a pluviometria na região Alto Rio Paraná apresentou dependência espacial para todo o período de 1990 a 2020. O modelo esférico foi o melhor ajuste para 14 dos 31 anos analisados, indicando um comportamento do alcance espacial intermediário/médio (YAMAMOTO & LANDIM, 2013). Já os modelos gaussiano e exponencial, geralmente responsáveis por alcances mais curtos e mais distantes, foram os melhores ajustes em 9 e 8 anos, respectivamente.

Os ajustes semivariográficos ainda indicaram coeficientes de determinação espacial (R^2) variando entre 0,848 e 0,992, além de alcances entre 112.800 m (1998) e 824.456 m (1995). Os períodos de menor alcance (1998 e 2017) constituem eventos mais isolados, com aspecto espacial mais heterogêneo, ao contrário dos períodos de maior alcance observados em 1995, 1997 e 2008.

Em um estudo realizado em Minas Gerais, Caram (2007), observou melhores ajustes para o modelo esférico, com alcances variando entre 189.600 m e 1.040.000 m. No estado de São Paulo, Carvalho, Assad e Pinto (2012), também apontaram o modelo esférico como melhor ajuste para a interpolação da precipitação anual, com alcance de 45.000 m, considerando dados de 1957 a 1997. Ainda nesse sentido, na identificação de regiões pluviométricas homogêneas (durante o período de 1980 a 2010) para a bacia do Rio Paraná, Malfatti et al. (2018), obteve boa acurácia para os modelos teóricos esférico e gaussiano, além de menores erros e maior dependência espacial para o modelo exponencial.

Conforme a Tabela 3, o Avaliador de Dependência Espacial (ADE) indicou, segundo classificação de Zimback (2001), alta dependência espacial ($>75\%$) em 23 dos 31 anos analisados e uma moderada dependência espacial nos outros 8 anos ($>25\%$ e $\leq 75\%$), enquanto a Validação Cruzada (VC) apresentou coeficiente de correlação (r) entre 0,44 e 0,81. Em síntese, os parâmetros dos ajustes semivariográficos, expostos na Tabela 2, indicaram que as estimativas realizadas por krigagem ordinária atendem aos princípios da geoestatística, resultando em apreciáveis mapas de distribuição das chuvas totais anuais na região ARP.

Tabela 2 - Medidas de ajuste dos semivariogramas

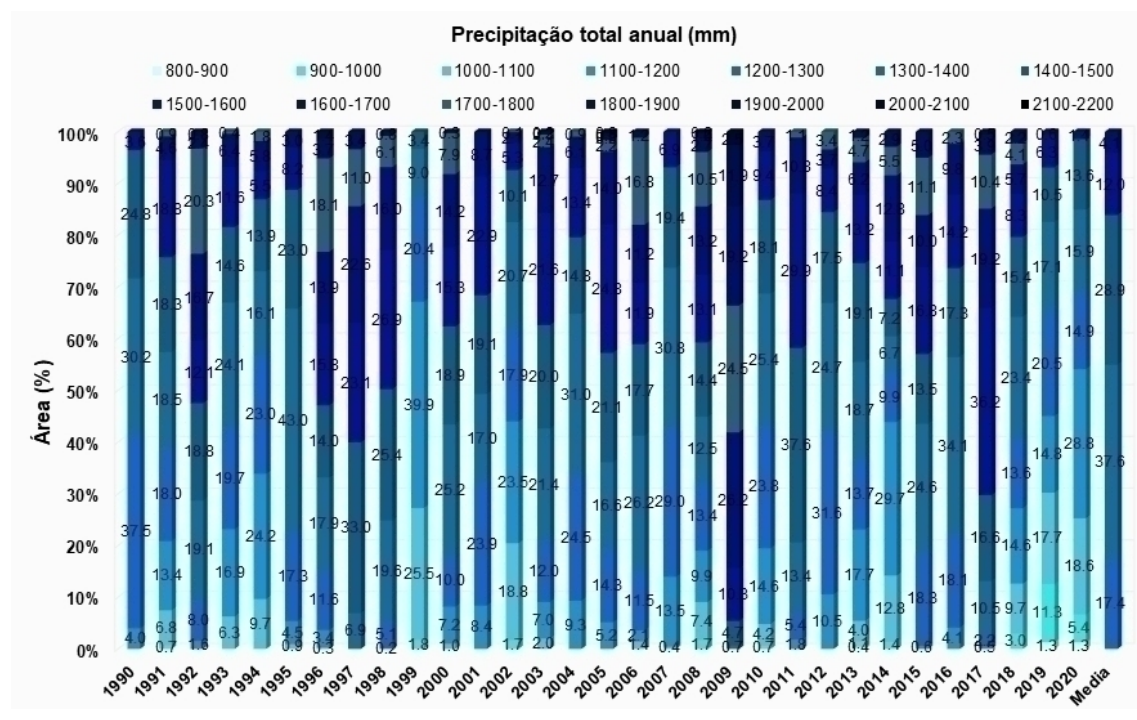
| Ano ^(a*) | Modelo ^(b) | Co | Co+C | A(m) | R ² | SQR | ADE (%) | Validação Cruzada | | |
|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|---------|----------------|----------------------|---------|-------------------|-------|------|
| | | | | | | | | a | B | r |
| 1990 ⁽³³⁰⁾ | gau | 1,52x10 ⁴ | 6,50x10 ⁴ | 599.289 | 0,990 | 5,22x10 ⁷ | 76,6 | 171,44 | 0,868 | 0,44 |
| 1991 ⁽³⁴⁷⁾ | gau | 1,92x10 ⁴ | 8,91x10 ⁴ | 478.046 | 0,986 | 1,67x10 ⁸ | 78,4 | 59,55 | 0,958 | 0,61 |
| 1992 ⁽³⁵⁴⁾ | gau | 1,52x10 ⁴ | 1,15x10 ⁵ | 505.759 | 0,972 | 7,74x10 ⁸ | 86,8 | 115,04 | 0,920 | 0,63 |
| 1993 ⁽³⁶⁰⁾ | esf | 1,37x10 ⁴ | 5,35x10 ⁴ | 424.000 | 0,982 | 5,16x10 ⁷ | 74,4 | 76,24 | 0,943 | 0,57 |
| 1994 ⁽³⁶⁹⁾ | gau | 1,36x10 ⁴ | 7,94x10 ⁴ | 507.491 | 0,964 | 4,03x10 ⁸ | 82,9 | 69,36 | 0,942 | 0,59 |
| 1995 ⁽³⁷⁴⁾ | gau | 1,62x10 ⁴ | 1,02x10 ⁵ | 824.456 | 0,876 | 3,59x10 ⁹ | 84,2 | -8,69 | 1,008 | 0,54 |
| 1996 ⁽³⁸⁰⁾ | esf | 1,26x10 ⁴ | 7,48x10 ⁴ | 415.000 | 0,936 | 4,69x10 ⁸ | 83,2 | 99,82 | 0,928 | 0,62 |
| 1997 ⁽³⁷⁴⁾ | gau | 1,46x10 ⁴ | 9,78x10 ⁴ | 763.834 | 0,875 | 2,55x10 ⁹ | 85,1 | -52,56 | 1,031 | 0,63 |
| 1998 ⁽³⁷⁷⁾ | exp | 4,50x10 ³ | 3,98x10 ⁴ | 112.800 | 0,961 | 1,51x10 ⁷ | 88,7 | 374,98 | 0,747 | 0,46 |
| 1999 ⁽³⁶²⁾ | gau | 1,81x10 ⁴ | 5,87x10 ⁴ | 677.232 | 0,964 | 1,78x10 ⁸ | 69,2 | -120,92 | 1,101 | 0,59 |
| 2000 ⁽³⁶⁴⁾ | esf | 1,72x10 ⁴ | 7,11x10 ⁴ | 533.000 | 0,983 | 1,04x10 ⁸ | 75,8 | 40,49 | 0,971 | 0,66 |
| 2001 ⁽²⁸²⁾ | esf | 1,55x10 ⁴ | 5,07x10 ⁴ | 518.000 | 0,848 | 5,21x10 ⁸ | 69,4 | 40,51 | 0,970 | 0,60 |
| 2002 ⁽²⁷⁶⁾ | esf | 9,10x10 ³ | 4,99x10 ⁴ | 408.000 | 0,979 | 5,99x10 ⁷ | 81,8 | 43,26 | 0,964 | 0,68 |
| 2003 ⁽²⁸¹⁾ | exp | 1,55x10 ⁴ | 7,90x10 ⁴ | 600.000 | 0,958 | 2,30x10 ⁸ | 80,4 | 135,83 | 0,902 | 0,59 |
| 2004 ⁽²⁷⁶⁾ | esf | 9,60x10 ³ | 5,60x10 ⁴ | 524.000 | 0,992 | 2,97x10 ⁷ | 82,9 | 52,08 | 0,961 | 0,72 |
| 2005 ⁽²⁷⁹⁾ | esf | 1,06x10 ⁴ | 6,97x10 ⁴ | 456.000 | 0,980 | 1,41x10 ⁸ | 84,8 | 104,58 | 0,925 | 0,65 |
| 2006 ⁽²⁷⁴⁾ | gau | 1,67x10 ⁴ | 9,20x10 ⁴ | 471.118 | 0,969 | 3,93x10 ⁸ | 81,9 | -3,14 | 1,001 | 0,80 |
| 2007 ⁽²⁶⁷⁾ | esf | 1,29x10 ⁴ | 4,04x10 ⁴ | 377.000 | 0,980 | 2,15x10 ⁷ | 68,1 | 25,33 | 0,981 | 0,55 |
| 2008 ⁽²⁷⁰⁾ | esf | 1,70x10 ³ | 1,41x10 ⁵ | 747.000 | 0,981 | 9,46x10 ⁸ | 98,8 | 92,59 | 0,932 | 0,78 |
| 2009 ⁽²⁷¹⁾ | exp | 1,77x10 ⁴ | 6,08x10 ⁴ | 450.000 | 0,937 | 1,41x10 ⁸ | 70,9 | 180,99 | 0,898 | 0,48 |
| 2010 ⁽²⁷²⁾ | exp | 6,50x10 ³ | 6,22x10 ⁴ | 594.000 | 0,974 | 1,08x10 ⁸ | 89,5 | 137,57 | 0,893 | 0,60 |
| 2011 ⁽²⁶⁸⁾ | esf | 1,24x10 ⁴ | 4,85x10 ⁴ | 471.000 | 0,962 | 1,03x10 ⁸ | 74,4 | 132,39 | 0,909 | 0,55 |
| 2012 ⁽²⁷²⁾ | exp | 1,02x10 ⁴ | 4,75x10 ⁴ | 408.000 | 0,950 | 8,38x10 ⁷ | 78,5 | 10,90 | 0,991 | 0,63 |
| 2013 ⁽²⁷⁰⁾ | exp | 7,60x10 ³ | 6,30x10 ⁴ | 339.000 | 0,977 | 7,72x10 ⁷ | 87,9 | 156,78 | 0,887 | 0,64 |
| 2014 ⁽²⁶⁹⁾ | gau | 1,09x10 ⁴ | 1,45x10 ⁵ | 651.251 | 0,975 | 1,07x10 ⁹ | 92,5 | -1,94 | 1,00 | 0,81 |
| 2015 ⁽¹⁷⁷⁾ | esf | 2,26x10 ⁴ | 9,24x10 ⁴ | 600.000 | 0,960 | 4,48x10 ⁸ | 75,5 | 93,33 | 0,936 | 0,65 |
| 2016 ⁽¹⁷⁴⁾ | esf | 2,00x10 ⁴ | 6,40x10 ⁴ | 489.000 | 0,930 | 3,21x10 ⁸ | 68,8 | 67,53 | 0,952 | 0,64 |
| 2017 ⁽¹⁷⁴⁾ | exp | 1,13x10 ⁴ | 4,74x10 ⁴ | 197.700 | 0,88 | 8,90x10 ⁷ | 76,2 | 120,81 | 0,920 | 0,57 |
| 2018 ⁽²¹³⁾ | esf | 1,21x10 ⁴ | 1,11x10 ⁵ | 596.000 | 0,963 | 8,36x10 ⁸ | 89,1 | 150,85 | 0,885 | 0,69 |
| 2019 ⁽²⁰⁶⁾ | esf | 2,57x10 ⁴ | 8,79x10 ⁴ | 553.000 | 0,955 | 3,68x10 ⁸ | 70,8 | 93,42 | 0,921 | 0,56 |
| 2020 ⁽¹²⁰⁾ | exp | 1,23x10 ⁴ | 6,98x10 ⁴ | 423.000 | 0,900 | 4,46x10 ⁸ | 82,4 | 27,62 | 0,977 | 0,65 |

(a*)=número de postos utilizados (todos os períodos foram processados com n. > que 30 pares no primeiro lag); (b) = ajuste, sendo: esf=esférico; exp=exponencial; gau=gaussiano; Co=efeito pepita; C=variância; Co+C=patamar; A=alcance; R²=coeficiente de determinação espacial; SQR=soma dos quadrados dos desvios; ADE=avaliador da dependência espacial; a=y intercept; B=Coefficiente de regressão; r=coeficiente de correlação.

Chuvas na Região ARP

Conforme a Figura 3, a distribuição da intensidade de chuva (considerando a média entre 1990 a 2020) ao longo da bacia pode ser dividida em 5 intervalos, variando entre 1.200 mm e 1.700 mm. A área de menor pluviometria (1.200 - 1.300 mm) corresponde a 17,4% da área total e abrange o leito do Rio Paraná e parte das UEPGRHs do estado de São Paulo (10, 11, 12, 13 e 14). Já as áreas de maior volume de chuva (1.500 - 1.700 mm) foram identificadas sobre a parcela oeste/noroeste das UEPGRHs 1, 2 e 6, além da área leste da UEPGRH 8, totalizando 16,1% da área total.

Figura 3 - Percentuais da área da região ARP por intervalo de precipitação total anual (1990-2020)



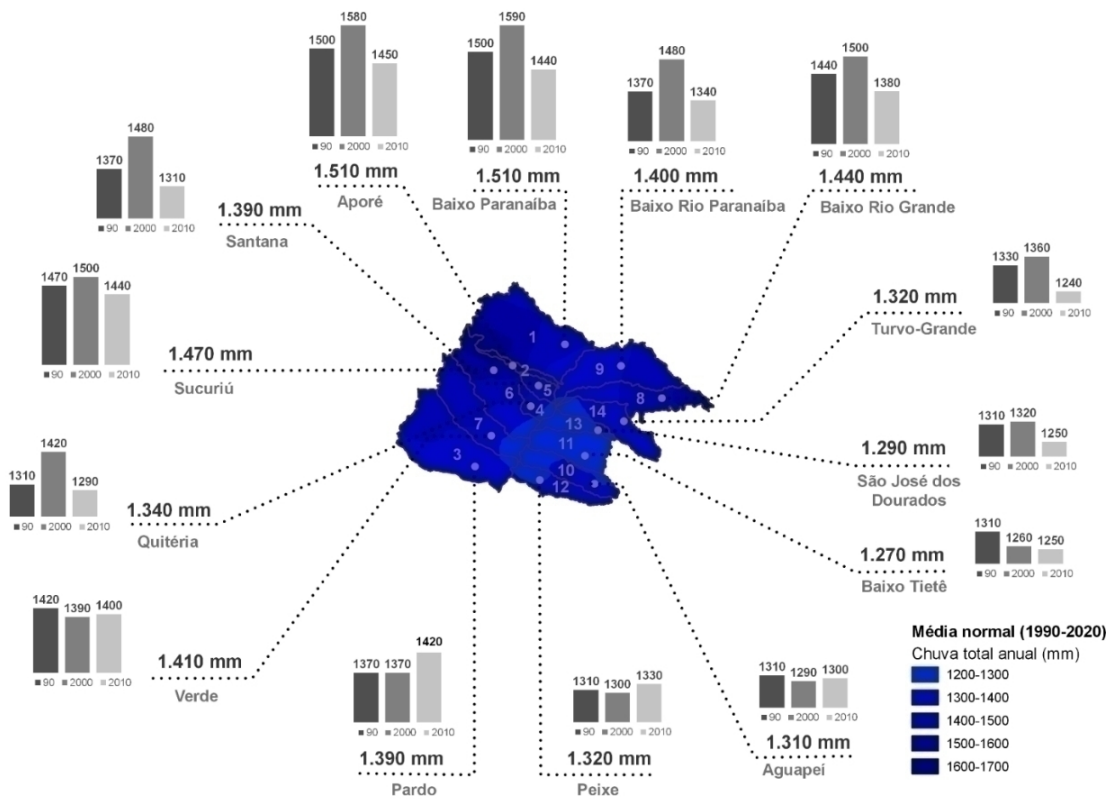
Em comparação à média normal para todo período (que indicou 1.400 mm), identificou-se 2009 como o ano mais chuvoso da série histórica com precipitação média anual equivalente a 1.740 mm (24,3% acima da média geral registrada). No período estudado, observou-se que em 58,1% da região Alto Rio Paraná choveu acima do intervalo médio registrado (1.200 mm - 1.700 mm). Em 1997 e 2017 os totais anuais registrados foram de 1.560 mm, ambos com chuva 11,4% acima da média (Figura 3).

Como ano mais seco do período analisado, identificou-se o ano de 1999 com precipitação 16,43% abaixo da média geral (Figura 3). Como períodos críticos, observou-se os anos de 2002 com chuva total anual de 1.250 mm (44% da área com chuva inferior à média), e o ano de 2014 (1.340 mm) totalizando 43,9% de área com valores de chuva abaixo da média. Por outro lado, nas demais áreas da bacia, as chuvas em 2014 se concentraram nos limites mais elevados da média, compensando a falta de precipitação observada, portanto não sendo considerado um ano crítico para toda a região Alto Rio Paraná.

A evolução das áreas de menores faixas de chuva (800 a 1.000 mm) em 2019 e 2020, são responsáveis por causar uma queda gradual na chuva total anual, referente a 12,86% em 2019 (1.220 mm) e 13,57% em 2020 (1.210 mm) em relação à média geral, onde 45% e 54,1% da área, respectivamente, manteve-se com índices anuais abaixo da média por dois anos consecutivos. Do ponto de vista espacial os anos de 2019 e 2020 foram os mais críticos dos últimos 31 anos, caracterizados pela abrangência dos intervalos de chuva (800 a 1.000 mm) não observada anteriormente.

A fim de verificar o comportamento das chuvas nas UEPGRHs que compõem a região ARP, na Figura 4 são apresentadas as médias normais de total anual para cada UEPGRH com seus respectivos gráficos de variação das médias de chuva (mm) para os decênios de 90, 2000 e 2010.

Figura 4 - Precipitação total anual da média normal nas UEPGRHs da região ARP e médias decenais (1990-2020)



Conforme a Figura 4, considerando a precipitação média normal dos últimos 31 anos (1990 a 2020), as UEPGRHs 1 (Baixo Paranaíba) e 2 (Aporé) apresentaram maior pluviosidade que as demais sub-bacias, ambas totalizando 1.510 mm de chuva total anual. Tais valores condizem com a precipitação média anual estimada por Cardoso et al. (2014) para o estado de Goiás, referente a 1.500 mm.

Na Figura 4, Mato Grosso do Sul foi o estado em que as UEPGRHs apresentaram maior variação de chuva anual (1.340 mm a 1.510 mm). Zavattini (2009), identificou diferentes áreas pluviométricas no eixo do Alto Paraná, onde as regiões de Paranaíba (leste da UEPGRH 5) e Três Lagoas (leste da UEPGRH 7), apresentaram semelhança rítmica das chuvas com índices menos expressivos (média de 1.400 mm) e tendência decrescente. Já na região do Planalto Divisor (oeste das UEPGRHs 3, 6 e 7) as chuvas máximas atingiram entre 1.700 mm e 2.000 mm.

As UEPGRHs de São Paulo (Figura 4) apresentaram os piores índices pluviométricos de média normal, variando entre 1.270 mm (Baixo Tietê) e 1.320 mm (Peixe), seguidas pelas UEPGRHs de Mato Grosso do Sul, 4 (Quitéria - 1.340 mm) e 5 (Santana - 1.390 mm), adjacentes a cabeceira do Rio Paraná, e 3 (Pardo - 1.390 mm) situada na parte inferior da região ARP. Os valores estimados para as UEPGRHs paulistas encontram-se no limiar de chuva determinado para a região oeste/noroeste de São Paulo por Wolf et al. (2014), com chuvas entre 1.197 e 1396 mm e por Marcuzzo (2013) para a mesma área (1.360 mm).

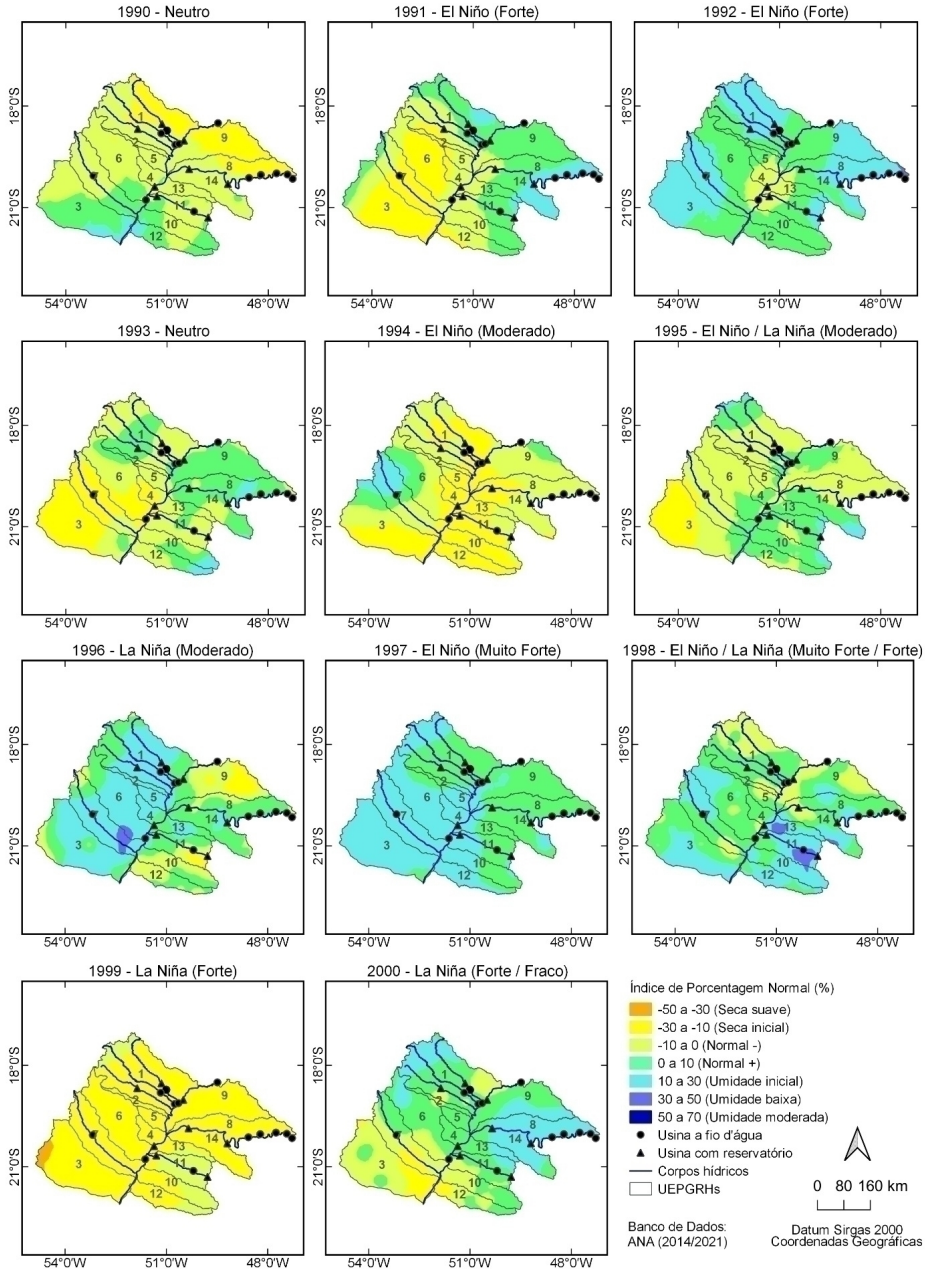
Mapeamento do Índice de Porcentagem Normal (IPN)

Os mapas de Índice de Porcentagem Normal (IPN) são apresentados nas Figuras 5, 6 e 7. De acordo com mapas de IPN apresentados, no decorrer dos 31 anos analisados observou-se uma maior incidência de seca inicial à suave nas unidades hídricas localizadas no Mato Grosso do Sul, especialmente na UEPGRH 3 (Pardo), e São Paulo, em particular nas UEPGRHs 10 (Aguapeí), 11 (Baixo Tietê) e 12 (Peixe). Menores valores de desvios negativos de precipitação ocorreram nas extremidades das UEPGRHs de Minas Gerais (8 e 9) e Goiás (1), respectivamente, resultando em

intensidades de IPN mais próximas da média normal.

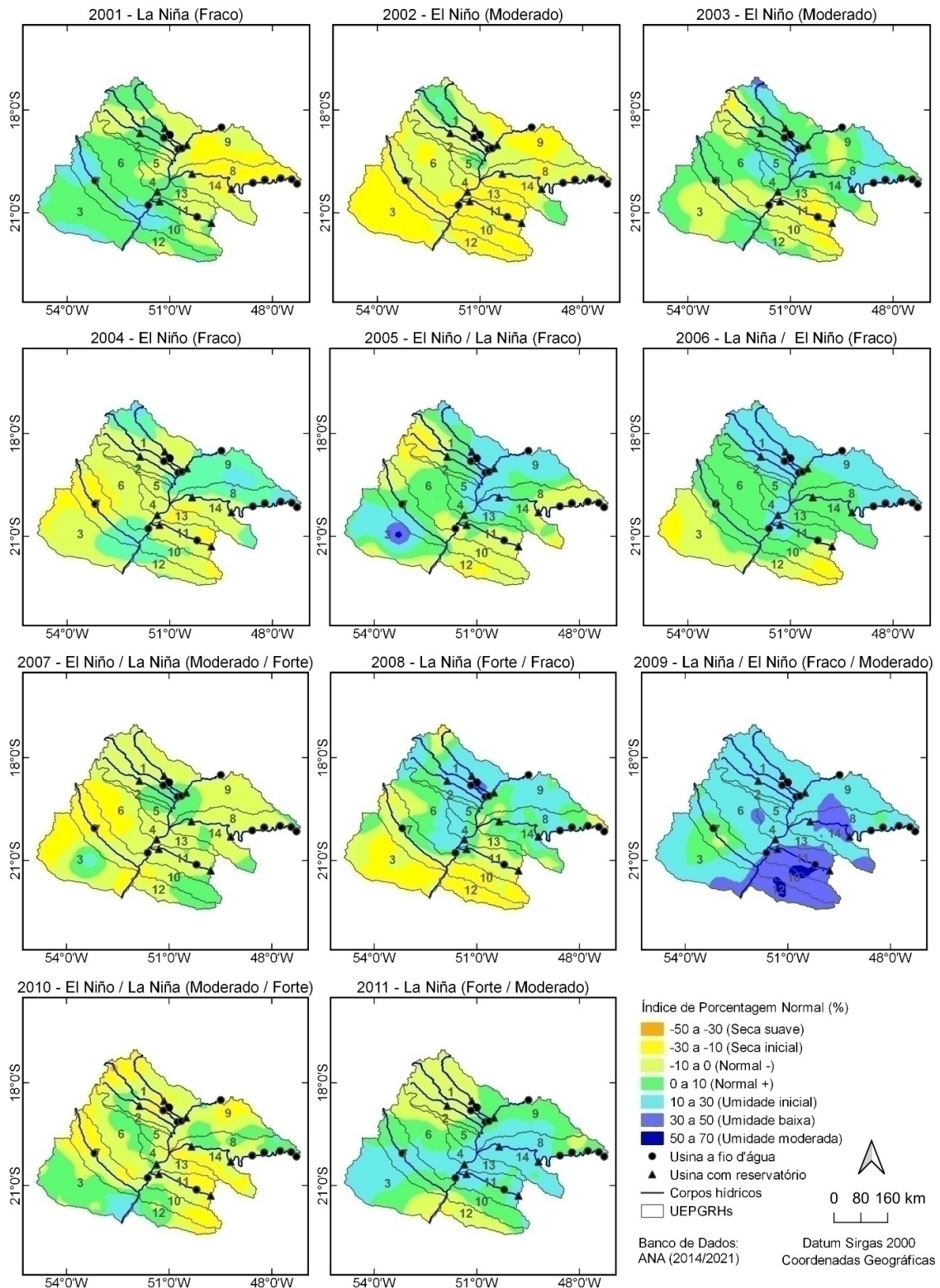
Como pode ser observado na Figura 8, considerando que 2009 foi identificado como ano mais chuvoso (Figura 3), observou-se a ocorrência de umidade inicial à moderada (desvio >10 a 70%) em 90,5% da região Alto Rio Paraná, caracterizado por um período de transição de La Niña fraco para El Niño moderado. Os demais períodos com maior umidade em mais de 50% da área de estudo foram apenas nos anos de 1997 (54,02%) e 2017 (59,31%) com ocorrência de umidade inicial à baixa (desvio > 10 a 50%), nas regiões centro-oeste e centro-sul do Alto Rio Paraná.

Figura 5 - Índice IPN na região Alto Rio Paraná de 1990 a 2000



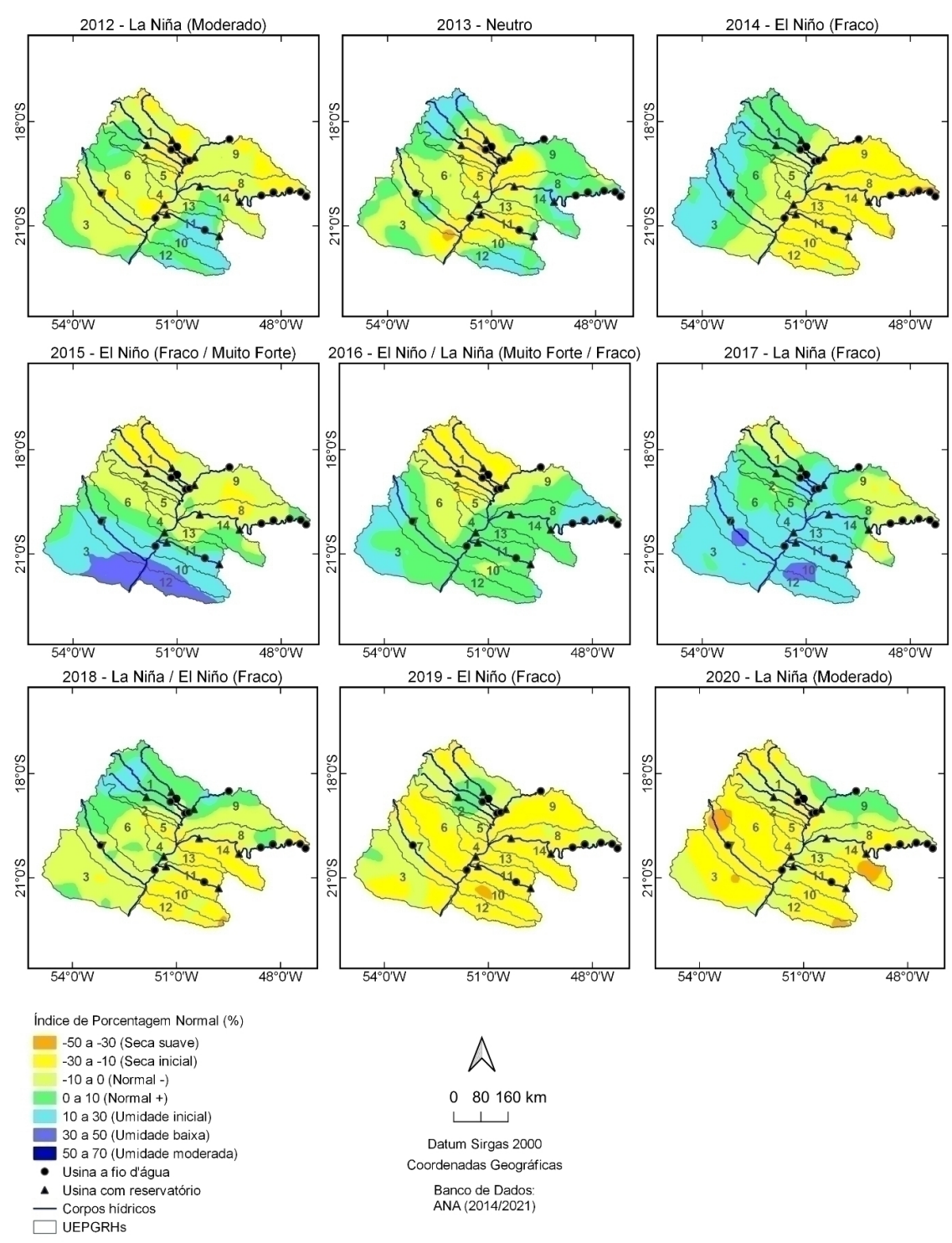
1=Baixo Paranaíba; 2=Aporé; 3=Pardo; 4=Quitéria; 5=Santana; 6=Sucuriú; 7=Verde; 8=Baixo Rio Grande; 9=Baixo Rio Paranaíba; 10=Aguapeí; 11=Baixo Tietê; 12=Peixe; 13=São José dos Dourados; 14=Turvo-Grande.

Figura 6 - Índice IPN na região Alto Rio Paraná de 2001 a 2011



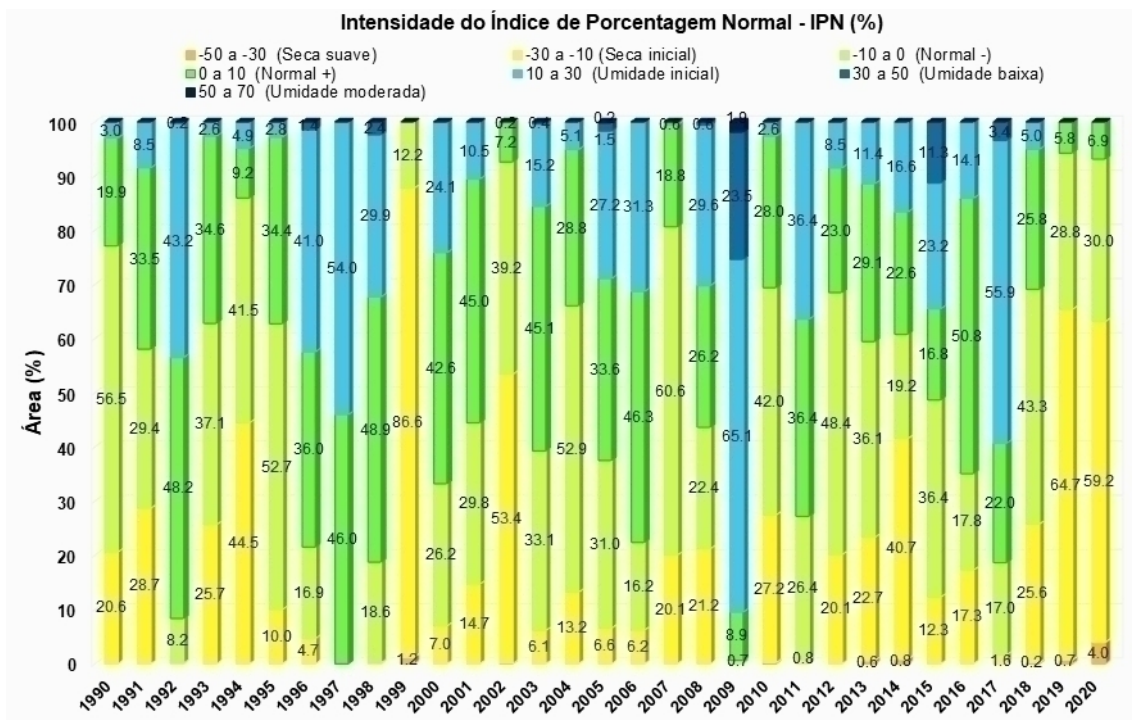
1=Baixo Paranaíba; 2=Aporé; 3=Pardo; 4=Quitéria; 5=Santana; 6=Sucuriú; 7=Verde; 8=Baixo Rio Grande; 9=Baixo Rio Paranaíba; 10=Aguapeí; 11=Baixo Tietê; 12=Peixe; 13=São José dos Dourados; 14=Turvo-Grande.

Figura 7 - Índice IPN na região Alto Rio Paraná de 2012 a 2020



1=Baixo Paranaíba; 2=Aporé; 3=Pardo; 4=Quitéria; 5=Santana; 6=Sucuriú; 7=Verde; 8=Baixo Rio Grande; 9=Baixo Rio Paranaíba; 10=Aguapei; 11=Baixo Tietê; 12=Peixe; 13=São José dos Dourados; 14=Turvo-Grande.

Figura 8 – Percentuais das áreas do ARP por intensidade do Índice de Porcentagem Normal



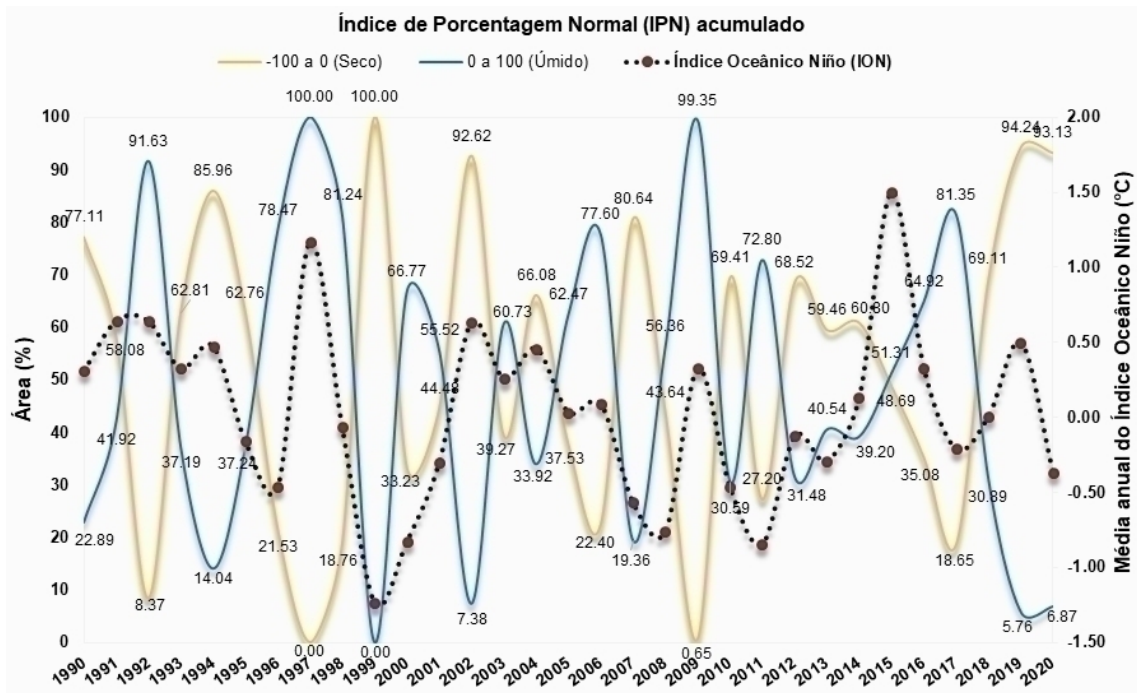
Com relação aos eventos de seca, 1999 (período de La Niña forte) foi identificado como ano mais seco da série histórica, com ocorrência de seca inicial (-10 a -30%) nas 14 UEPGRHs, acometendo as unidades 1, 10, 11, 12 e 13 de forma parcial, além de seca suave (-30 a -50%) a sudoeste da unidade 3, atingindo 87,8% da região ARP (Figura 8).

Após 1999 (Figura 8), os períodos com abrangência de seca maior que 50% da região Alto Rio Paraná, foram os anos de 2019 e 2020, quando, respectivamente, 65,4% e 63,16% da região apresentou seca de intensidade inicial a suave, seguido por 2002 com 53,44%. Esses anos destacados coincidem com cenários de seca histórica, como os eventos de 1999/2002, 2013/2014 e 2019/2020, destacados por Melo (2017) e ANA (2021a), ocorrendo regularmente sobre as UEPGRHs localizadas nos estados de São Paulo e Mato Grosso do Sul.

Para uma melhor compreensão, as curvas dos percentuais secos e úmidos acumulados, normal-seco (0 a -100) e normal-úmido (0 a 100), do índice IPN são apresentadas na Figura 9, em conjunto com a variação anual do Índice Oceânico Niño (ION).

Conforme Figura 9, foi verificado que na década de 2010 houve uma mudança no comportamento dos índices IPN na região Alto Rio Paraná, caracterizada por uma maior persistência na ocorrência de desvios negativos, que alteraram o padrão de comportamento das curvas acumuladas. Notadamente, os períodos de seca de 2019 e 2020, ambos com somatória de desvios negativos superior a 90% da área, retrataram um agravamento na abrangência das secas na região ARP. O mesmo limiar foi atingido durante os anos de 1999 e 2002, já determinados como anos críticos anteriormente.

Figura 9 - Variação dos percentuais de área acumulada do IPN na região ARP (1990 a 2020)



Do mesmo modo, a ocorrência de umidade positiva acumulada em mais de 90% da região ARP (Figura 9), indicou 1992, 1997 e 2009 como anos mais chuvosos. No entanto, no ano de 1992 o percentual de 90% é composto por 56,4% de área com umidade normal (-10 a 10%) e apenas 43,2% de umidade inicial (10 a 30%).

De forma geral, a variação do Índice Oceânico Niño aparenta relação com as secas (Figura 9) e chuvas anuais (Figura 3) da região ARP, ora na similaridade de períodos com maiores índices de chuva (1997 e 2015), coincidindo com maiores intensidades de El Niño (ION médio anual > 1°C) e ora em anos de pluviometria abaixo da média normal (1999, 2012 e 2020) com ocorrência de La Niña.

Considerando o contexto apresentado na Figura 9, remetendo à Figura 4, a década de 2010 foi identificada como decênio mais seco da série histórica com alta ocorrência de La Niña, com contribuição em especial da região Sudeste do país. Na última década a maioria dos estudos de seca realizados na região Sudeste do Brasil se concentraram nos eventos de 2013/2014 (COELHO et al., 2016; JARDIM, 2015; MARENGO et al., 2015; MARENGO & ALVES, 2016; BRAGA & MOLION, 2018), cujos resultados já indicavam um cenário de diminuição de chuvas, também relatado pelas projeções do IPCC e INPE (MARENGO & ALVES, 2016), indicando a ocorrência de secas mais severas e duradouras para os anos posteriores, que se concretizaram durante os eventos de 2019 e 2020.

Caracterização das secas anuais nas UEPGRHs da região ARP

A fim de identificar as UEPGRHs mais impactadas pelas secas ao longo da série histórica (1990 a 2020), as áreas de seca inicial a suave (-10 a -50%) de cada unidade hídrica foram quantificadas e apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Extensão territorial das secas acumulada UEPGRHs da região ARP (1990 a 2020)

| UEPGRH | Área (km ²) | Seca acumulada (inicial a suave) | | Seca média (1990-2020) | |
|------------------------|-------------------------|----------------------------------|--------------------|------------------------|------------------------------------|
| | | (%) | (km ²) | %.ano ⁻¹ | km ² .ano ⁻¹ |
| 1 | 43.814,0 | 536,5 | 235.062,1 | 17,306 | 7.582,6 |
| 2 | 2.756,7 | 437,8 | 12.068,9 | 14,123 | 389,3 |
| 3 | 39.419,4 | 757,7 | 298.680,8 | 24,442 | 9.634,9 |
| 4 | 5.372,1 | 645,8 | 34.693,0 | 20,832 | 1.119,1 |
| 5 | 4.181,6 | 563,0 | 23.542,4 | 18,161 | 759,4 |
| 6 | 27.193,0 | 561,5 | 152.688,7 | 18,113 | 4.925,4 |
| 7 | 24.184,0 | 734,0 | 177.510,6 | 23,677 | 5.726,1 |
| 8 | 26.882,0 | 621,5 | 167.071,6 | 20,048 | 5.389,4 |
| 9 | 18.750,0 | 654,1 | 122.643,8 | 21,100 | 3.956,3 |
| 10 | 13.196,0 | 853,1 | 112.575,1 | 27,519 | 3.631,5 |
| 11 | 15.588,0 | 774,4 | 120.713,5 | 24,981 | 3.894,0 |
| 12 | 10.769,0 | 868,0 | 93.474,9 | 28,000 | 3.015,3 |
| 13 | 6.783,0 | 712,0 | 48.295,0 | 22,968 | 1.557,9 |
| 14 | 16.007,0 | 668,2 | 106.958,8 | 21,555 | 3.450,3 |
| Alto Rio Paraná | 254.896 | 669,3 | 1.705.979,1 | 21,590 | 55.031,5 |

1=Baixo Paranaíba; 2=Aporé; 3=Pardo; 4=Quitéria; 5=Santana; 6=Sucuriú; 7=Verde; 8=Baixo Rio Grande; 9=Baixo Rio Paranaíba; 10=Aguapeí; 11=Baixo Tietê; 12=Peixe; 13=São José dos Dourados; 14=Turvo-Grande.

1=Baixo Paranaíba; 2=Aporé; 3=Pardo; 4=Quitéria; 5=Santana; 6=Sucuriú; 7=Verde; 8=Baixo Rio Grande; 9=Baixo Rio Paranaíba; 10=Aguapeí; 11=Baixo Tietê; 12=Peixe; 13=São José dos Dourados; 14=Turvo-Grande.

Conforme a Tabela 4, confirmaram-se as UEPGRHs paulistas, 12 (868% = 28%.ano⁻¹), 10 (853,10% = 27,52%.ano⁻¹) e 11 (774,4% = 24,98%.ano⁻¹), além das unidades 3 (757,7% = 24,44%.ano⁻¹) e 7 (734% = 23,68%.ano⁻¹), localizadas em Mato Grosso do Sul, como unidades com maior ocorrência de seca acumulada, indicando uma menor pluviosidade na baixa região ARP. Já as sub-bacias do extremo noroeste, 2 (437,8% = 14,12%.ano⁻¹) e 1 (536,5% = 17,31%.ano⁻¹), acumularam os menores percentuais de seca. No total 1.705.979,1 km² de área acumulada da região Alto Rio Paraná foram impactados pelas secas durante o período de 1990 a 2020, equivalente à média de 55.031,5 km² por ano (21,63% da área total).

Nas Figuras 10 e 11 são representadas as variações anuais de porcentagem de seca acumulada na região Alto Rio Paraná por UEPGRH e por unidades federativas, durante o período de 1990 a 2020, a fim de verificar as unidades/estado com maior contribuição nas secas.

Embora as UEPGRHs do estado de São Paulo, 12, 10 e 11 apresentem os maiores percentuais de área acumulada (respectivamente, 867,98%, 853,07% e 774,4%), indicando uma maior evolução das secas com relação a suas áreas totais, tais unidades representam apenas 4,2%, 5,2% e 6,1% da região ARP, respectivamente. Logo, as UEPGRHs que mais contribuíram com a extensão de área seca acumulada em toda a área de estudo foram as unidades 3, 1 e 7, com abrangência de seca em, respectivamente, 298.680,8 km² (757,71%), 235.062,1 km² (536,54%) e 177.510,6 km² (734,04%).

Figura 10 - Variação anual das áreas secas acumuladas nas UEPGRHs na região ARP (1990-2020)

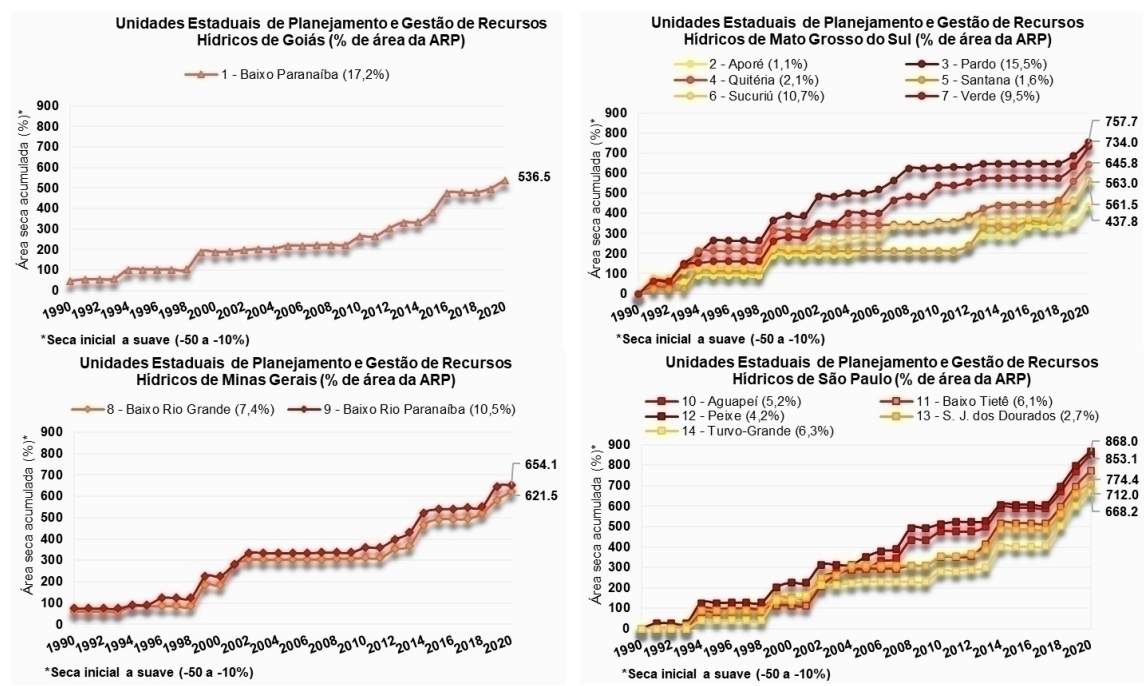


Figura 11 - Variação anual das secas acumuladas nas unidades federativas na região ARP (1990-2020)

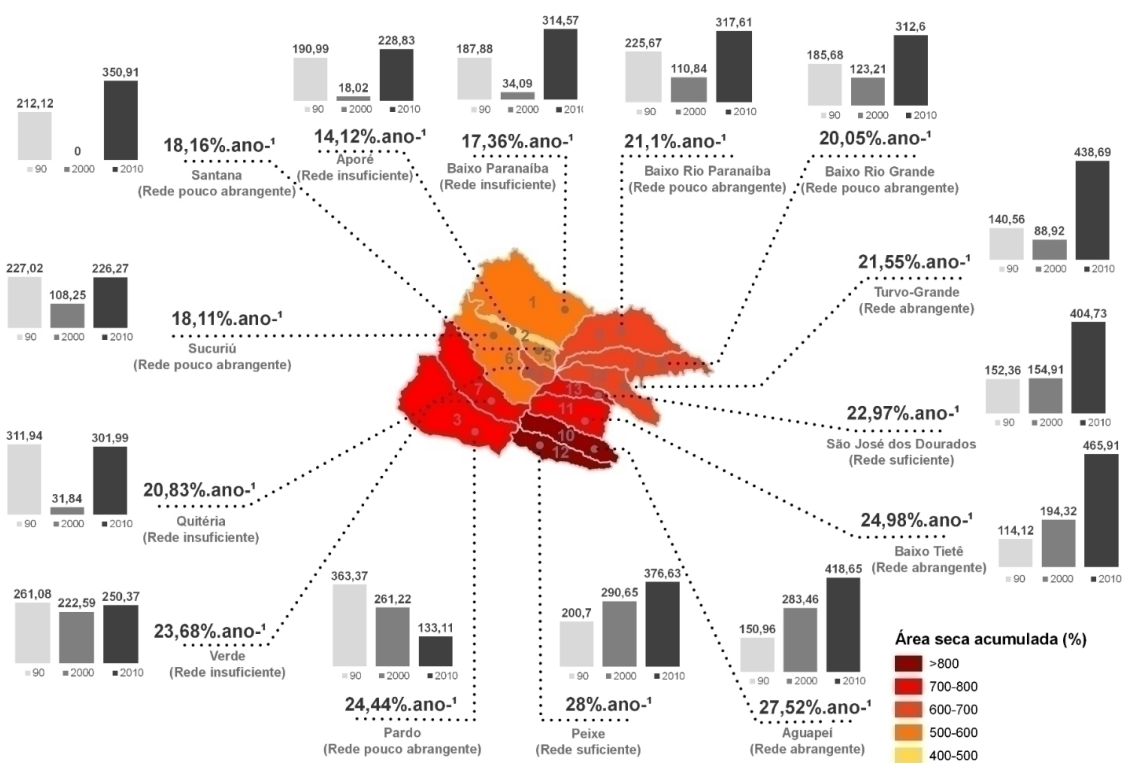
f11.jpg

De forma análoga, com base na Figura 11, foi averiguado que juntas as UEPGRHs paulistas representam 24,46% da região Alto Rio Paraná (62.343 km²), acumulando o maior percentual de área seca (75,1%) do estado, ou seja, a maior progressão de secas da região Alto Rio Paraná, ultrapassando a porcentagem de seca acumulada no Mato Grosso do Sul, com área equivalente a 40,45% da área de estudo (103.106,8 km²), a partir de 2013.

Todavia, quando analisada a porcentagem de área seca acumulada em km², verificou-se que embora a evolução das secas nos estados de São Paulo (775,1%) e Minas Gerais (637,8%) tenha sido maior que nas demais unidades federativas, Mato Grosso do Sul (616,7%) foi o maior contribuinte para a região ARP em termos de extensão territorial (Figura 11), atingindo 635.813 km² (cerca de 37,2% do total acumulado), seguido pelas unidades de São Paulo (28,27%), Minas Gerais (17,03%) e Goiás (13,75%). A vista disto a UEPGRH 1, localizada em Goiás foi a unidade com menor evolução de seca ao longo do tempo e que menos contribuiu com a seca total da região Alto Rio Paraná.

Uma vez identificado um maior acúmulo de áreas secas na região ARP durante a década de 2010, as secas acumuladas durante os decênios de 90, 2000 e 2010 de cada unidade hídrica foram quantificadas e apresentadas na Figura 12, em conjunto com a seca acumulada durante todo o período.

Figura 12 - Secas médias decenais e acumulada nas UEPGRHs da região ARP (1990-2020)



A variação interdecenal das áreas de seca identificadas, apresentada na Figura 12, permitiu constatar que na década de 2010, determinada como decênio mais seco da série histórica, com exceção das UEPGRHs 3 (Pardo), 4 (Quitéria), 6 (Sucuriú) e 7 (Verde), localizadas no Mato Grosso do Sul, as demais unidades hídricas apresentaram valores de áreas secas acumuladas superiores às décadas de 90 e 2000, além de um agravamento na intensidade das secas em 8 das 14 sub-bacias analisadas. A partir dos valores de seca acumulada e média (Tabela 4), as UEPGRHs mais críticas (com maior ocorrência de seca) foram classificadas em 5 categorias conforme a Figura 13, onde é destacada a classificação da rede pluviométrica das UEPGRHs.

As UEPGRHs que mais contribuíram com o cenário de seca na década de 2010 (Figura 12), foram as sub-bacias 11 (Baixo Tietê), com área média acumulada de 42,35%, 14 (Turvo-Grande) com 39,88%, 10 (Aguapeí) com 38,06% e 13 (São José dos Dourados) com 36,79%, sendo as UEPGRHs 14 e 10, as unidades acometidas com maior severidade, além da UEPGRH 7, devido a incidência de áreas com maior intensidade de seca (desvio de -50 a -30%) nos anos de 2019 e 2020. Verifica-se que as secas sobre as unidades hídricas de São Paulo vêm se intensificando na última década, fazendo com que as áreas de menor pluviosidade na região ARP se concentrem na região Noroeste Paulista.

Por outro lado, considerando a seca acumulada de 1990 a 2020, as UEPGRHs 10 e 12 foram as unidades mais críticas com mais de 800% de seca acumulada, enquanto na unidade 2 a área seca variou entre 400 e 500%, indicando menor ocorrência de seca. Com exceção das UEPGRHs paulistas as demais unidades apresentaram rede pluviométrica não abrangente ou inferior, trazendo um alerta para as unidades com ocorrência de seca expressiva e rede insuficiente (Figura 12).

CONCLUSÕES

As chuvas da Região ARP analisadas apresentaram dependência espacial para todo o período estudado (1990-2020), possibilitado a espacialização das chuvas e geração dos mapas de IPN. Do ponto de vista geoestatístico, os dados de chuvas apresentaram dependência espacial entre moderada a alta, com coeficientes de determinação espacial (R^2) variando entre 0,848 e 0,992, além de alcances entre 112.800 m (1998) e 824.456 m (1995).

A análise comparativa entre os valores de chuvas anuais e as fases do ENOS não indicou influência direta na variação pluviométrica da região ARP durante o período de 1990 a 2020. Contudo, os eventos chuvosos de 1997 e 2015 coincidiram com maiores intensidades de El Niño, enquanto anos mais secos como 1999, 2012 e 2020 coincidiram com ocorrência de La Niña.

As unidades de Mato Grosso do Sul e São Paulo foram identificadas como maiores contribuintes nas secas identificadas na região ARP, além de 2010 como decênio mais seco do período analisado, com maior contribuição do período de 2019/2020, onde as secas atingiram mais de 60% da área por dois anos consecutivos, evento nunca identificado nas últimas 3 décadas. Quando as curvas do IPN (referente as classes “seca inicial” e “suave”) atingem juntas pelo menos 50% da área total da bacia, constatou-se a ocorrência de crise hídrica na região ARP. Logo, pode-se constatar que a metodologia aplicada no presente estudo apresentou grande versatilidade e pode ser aplicada em qualquer bacia hidrográfica.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABOU RAFEE, S.A.; UVO, C.B.; MARTINS, J.A.; DOMINGUES, L.M.; RUDKE, A.P.; FUJITA, T.; FREITAS, E.D. Large-Scale Hydrological Modelling of the Upper Paraná River Basin. **Water**, v. 11, 882. 2019. 1-20 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/w11050882>

ALMEIDA, A. T. **Impactos do fenômeno El Niño Oscilação Sul na variabilidade climática e seus efeitos na produtividade da cultura da cana-de-açúcar em diferentes regiões brasileiras**. 2014. 101 f. Dissertação (Mestrado em Ciências – Engenharia de Sistemas Agrícolas) – Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2014.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO - ANA. **Catálogos de Metadados**. Unidade Hidrográfica, Região Hidrográfica, Gestão, Comitê de Bacia, 2014. GEOFT_UNIDADE_HIDRO_ESTADUAL. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/home>. Acesso em: 10 fev. 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO - ANA. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: regiões hidrográficas brasileiras – Edição Especial**. Brasília: ANA, 163 p, 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2019: informe anual**. Brasília: ANA, 100 p, 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. **Resolução nº 77, de 1 de junho de 2021, da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA**, “Declara situação crítica de escassez quantitativa dos recursos hídricos na Região Hidrográfica do Paraná”, Diário Oficial da União em 01/06/2021, Brasília, DF. 2021.

ARYAL, Y. N.; VILLARINI, G.; ZHANG, W.; VECCHI, G. A. Long term changes in flooding and heavy rainfall associated with North Atlantic tropical cyclones: Roles of the North Atlantic Oscillation and El Niño-Southern Oscillation. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 559, p. 698-710. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.02.072>. Acesso em: 10 fev. 2022.

AZEVEDO, A. L. La Niña e desequilíbrio na Amazônia dificultam saída da crise hídrica. **O Globo**. São Paulo, 2021. Disponível em: <https://infoglobo.pressreader.com/o-globo>. Acesso em: 10 fev. 2022.

BASSO, R. E. **Estimativa de chuvas intensas em locais sem dados no Rio Grande do Sul**. 2019. 190 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Santa Maria, 2019.

BERNDT, C.; HABERLANDT, U. Spatial interpolation of climate variables in Northern Germany - Influence of temporal resolution and network density. **Journal of Hydrology**, v.15, 184-202 p. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.02.002>.

- BHATTI, A. M.; KOIKE, T.; SHRESTHA, M. Climate change impact assessment on mountain snow hydrology by water and energy budget-based distributed hydrological model. **Journal of Hydrology**, v.543, B, p. 523-541, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.10.025>
- BRAGA, H. A.; MOLION, L. C. B. A seca de 2013/2014 na região Sudeste do Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências**. v. 41, n. 1. 2018. DOI: https://doi.org/10.11137/2018_1_100_107.
- BRITO, S. S. B. et al. Frequency, duration and severity of drought in the Semiarid Northeast Brazil region. **International Journal of Climatology**, v.38, n.2, p. 517- 529, 2018.
- CAMARA, G.; SOUZA, R. C. M.; FREITAS, U. M.; GARRIDO, J. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. **Computers & Graphics**,v. 20, n. 3, p. 395-403, 1996.
- CARAM, R. O. **Reconstrução de séries e análise geostatística da precipitação no estado de Minas Gerais**. 2007. 107 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2007.
- CARDOSO, M. R. D.; Marcuzzo, F. F. N.; Barros, J. R. Classificação climática de Köppen-Geiger para o estado de Goiás e o Distrito Federal. **Acta Geográfica**, v. 8, n. 16, 2014, 40-55 p. DOI: <https://doi.org/10.18227/2177-4307.acta.v8i16.1384>
- CARVALHO, J. R. P.; ASSAD, E. D.; PINTO, H. S. Interpoladores geostatísticos na análise da distribuição espacial da precipitação anual e de sua relação com altitude. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 47, n. 9. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2012000900008>.
- COELHO, C. A. S.; CARDOSO, D. H. F.; FIRPO, M. A. F. A seca de 2013 a 2015 na região sudeste do Brasil. **Revista Climanalise**. 2016.
- DAI, A. Drought under global warming: a review. **WIREs Clim Change**, 2011, v. 2, p. 45-65, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1002/wcc.81>
- DUTTA, R.; MAITY, R. Time-varying network-based approach for capturing hydrological extremes under climate change with application on drought. **Journal of Hydrology**, v. 603, part B, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126958>.
- FERNANDES, D. S.; HEINEMANN, A. B.; PAZ, R. L.; AMORIM, A. O.; CARDOSO, A. S. **Índices para a quantificação da seca**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 48 p, 2009.
- GOIS, G. **Caracterização da seca e seus efeitos na produção da cultura do milho para as diferentes regiões do estado de Minas Gerais**. 2005. 81 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2005.
- HAYES, M. J. 2006. Drought Indices. **Van Nostrand's Scientific Encyclopedia**. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc. .
- HU, Q.; LI, Z.; WANG, L.; HUANG, Y.; WANG, Y.; LI, L. Rainfall Spatial Estimations: A Review from Spatial Interpolation to Multi-Source Data Merging. **Water**, London, v. 11, n. 579, p. 1-30, 2019. DOI: [doi:10.3390/w11030579](https://doi.org/10.3390/w11030579).
- JARDIM, C. H. A crise hídrica no sudeste do Brasil: aspectos climáticos e repercussões ambientais. **Revista Tamoios**, São Gonçalo, v. 11, n. 2, 67-83 p. 2015. DOI: [10.12957/tamoios.2015.16517](https://doi.org/10.12957/tamoios.2015.16517).
- JOURNAL, A. G.; HUIJBREGTS, C. J. **Mining Geostatistics**. New York: Academic Press. 1993.
- KRIGE, D. G. A statistical approach to some basic mine evaluation problems on the Witwatersrand. **Journal South African**. Institute. Minning Mettall, n. 52, p. 119-139, 1951.
- KUMAR, P.; LIU, W.; CHU, X.; ZHANG, Y.; LI, ZHIHUI. Integrated water resources management for an inland river basin in China. **Watershed Ecology and the Environment**, Beijing, v. 1, 2019, p. 33-38, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wsee.2019.10.002>.
- LIMA, R. P. C. **Avaliação de Índices de severidade de seca na bacia do rio Doce visando ao desenvolvimento de sistema de classificação de secas**. 2016. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.

LIMA, C.G.R.; LOLLO, J. A.; BACANI, V. M.; COSTA, N. R. Variabilidade espaço-temporal das águas subterrâneas do aquífero Bauru impróprias para o consumo humano: concentrações de Bário, Crômio Total e Vanádio. **Pesquisa em Geociências**, v. 47, n. 2, 2020. DOI: doi.org/10.22456/1807-9806.108582

MALFATTI, M. G. L.; CARDOSO, A. O.; HAMBURGER, D. S. Identificação de regiões pluviométricas homogêneas na Bacia do Rio Paraná. **Geociências**, v. 37, n. 2, 409-421 p. São Paulo, 2018.

MALLAKPOUR, I.; AGHAKOUCHAK, A.; SADEGH, M. (2019). Climate-induced changes in the risk of hydrological failure of major dams in California. **Geophysical Research Letters**, v. 46, 2130-2139. DOI: <https://doi.org/10.1029/2018GL081888>

MALLAKPOUR, I.; SADEGH, M.; AGHAKOUCHAK, A. (2018). A new normal for streamflow in California in a warming climate: Wetter wet seasons and drier dry seasons. **Journal of Hydrology**, 567, 203-211. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.10.023>

MARCUZZO, F. F. N.; ROMERO, V. Influência do El Niño e La Niña na precipitação máxima diária do estado de Goiás. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 4, p. 429-440, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0102-77862013000400009>.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; SOARES W. R.; RODRIGUEZ, D. A.; CAMARGO, H.; RIVEROS, M. P.; PABLÓ, A. D. Two contrasting severe seasonal extremes in tropical South America in 2012: flood in Amazonia and drought in northeast Brazil. **Journal of Climate**, v. 26, p. 9137-9154, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00642.1>

MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A.; SELUCHI, M. E.; CUARTAS, A.; ALVES, L. M.; MENDIONDO, E. M.; OBREGÓN, G.; SAMPAIO, G. A seca e a crise hídrica de 2014-2015 em São Paulo. Rede Clima. INCT. Mudanças Climáticas. 2015. DOI: <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9036.v0i106p31-44>

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M. Crise hídrica em São Paulo em 2014: seca e desmatamento. **Geosp - Espaço e Tempo**, v. 19, n. 3, p. 485-494, 2016.

MATHERON, G. **Traité de Géostatistique Appliquée** - Tome I. Paris, Editions Technip. 333 p. 1962.

MEDEIROS, E. S.; LIMA, R. R.; OLINDA, R. A.; SANTOS, C. A. C. Modeling spatiotemporal rainfall variability in Paraíba, Brazil. **Water**, Switzerland, v. 11, P. 1843. 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/w11091843>

MELO, D. C. D. **Propagação de secas na bacia do rio Paraná: do evento climático ao impacto hidrológico**. 2017. 182 f. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, 2017.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil**. Oficina de Textos, São Paulo, 2007.

MINUZZI, R. B. et al. Influência do fenômeno climático El Niño no período chuvoso da região Sudeste do Brasil. **Geografia**, [s. l.], v. 15, n. 2, jul./dez. 2006. 5-19 p.

MUTHUSAMY, M.; SCHELLART, A.; TAIT, S.; HEUVELINK, G. B. M. Geostatistical upscaling of rain gauge data to support uncertainty analysis of lumped urban hydrological models. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 21, p. 1077-1091, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-21-1077-2017>

ORGANIZAÇÃO METEOROLÓGICA MUNDIAL - OMM. **Methods of observation**. In: Guide to Hydrological Practices: hydrology from measurement to hydrological information. 6. ed. Geneva, Switzerland, 2008. v. 1, cap. 2, p. 24-27. (WMO - n. 168). Disponível em: http://www.whycos.org/chy/guide/168_Vol_I_en.pdf. Acesso em: 10 fev. 2022.

PEDREIRA JUNIOR, A. L.; QUERINO, C. A. S.; BIUDES, M. S.; MACHADO, N. G.; SANTOS, L. O. F.; IVO, I. O. Influence of El Niño and La Niña phenomena on seasonality of the relative frequency of rainfall in southern Amazonas mesoregion. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 25, e. 24, p. 1-8, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/2318-0331.252020190152>

PIMENTEL-GOMES, F.; GARCIA, C.H. **Estatística aplicada a experimentos agronômicos e florestais**: exposição com exemplos e orientações para uso de aplicativos. Piracicaba: Fealq, 2002. 309 p.

PRUSKI, F. F.; NUNES, A. A.; REGO, F. S.; SOUZA, M. F. Extrapolação de equações de regionalização de vazões mínimas: Alternativas para atenuar os riscos. **Water Sources and Irrigation Management**, v. 1, n. 1, p. 51-59, 2012.

QGIS. Equipe de Desenvolvimento, 2021. **Sistema de Informação Geográfica QGIS**. Fundação Geoespacial de Código Aberto. <http://qgis.org>.

RICARDI, A. M.; LIMA, C. G. R. Variabilidade espacial e temporal da erosividade das chuvas (EI30) no estado de São Paulo, Brasil. **Geociências**, v. 40, n. 4, p. 965 - 985, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5016/geociencias.v40i04.15492>

ROBERTSON, G. P. **GS+: geostatistics for environmental sciences**. 7.ed. Michigan: Gamma Desing Software, 2004. 159 p.

ROCHA, P. C.; SANTOS, A. A. Hydrological analysis in water basins. **Mercator**, v. 17, e17025, 2018. 1-18 p. DOI: <https://doi.org/10.4215/rm2018.e17025>.

SALEHNIA, N.; ALIZADEH, A.; SANAEINEJAD, H; BANNAYAN, M.; ZARRIN, A.; HOOGENBOOM, G. Estimation of meteorological drought indices based on AgMERRA precipitation data and station-observed precipitation data. **Journal of Arid Land**, v. 9, n. 6, p. 797-809, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40333-017-0070-y>.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE RECURSOS HÍDRICOS - SNIRH. **Hidroweb**. v. 3.2.6. Sistema de informações hidrológicas. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>. Acesso em: dez. 2021.

TEIXEIRA, C. F. A.; DAMÉ, R. C. F.; BACELAR, L. C. S.; SILVA, G. M.; COUTO, R. S. Intensidade da seca utilizando índices de precipitação. **Ambiente & Água**, v. 8, n. 3, p. 203-213, 2013. DOI: [doi:10.4136/1980-993X](https://doi.org/10.4136/1980-993X).

THOMAS, J.; PRASANNAKUMAR, V. Temporal analysis of rainfall (1871-2012) and drought characteristics over a tropical monsoon-dominated State (Kerala) of India. **Journal of Hydrology**, v. 534, 2016, p. 266-280 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.013>.

WILLEKE, G.; HOSKING, J. R. M.; WALLIS, J. R. **The national drought atlas**. In: Institute for Water Resources Report 94-NDS-4. U.S Army Corp of Engineers. Norfolk, VA. 1994.

WOLFF, W.; DUARTE, S.N.; MINGOTI, R. Nova metodologia de regionalização de vazões, estudo de caso para o Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 19, n. 4, p.21-33, 2014.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geostatística**: conceitos e aplicações. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. 215 p.

ZAVATTINI, J. A. **As chuvas e as massas de ar no estado de Mato Grosso do Sul**: estudos geográficos com vista à regionalização climática. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2009.

ZIMBACK, C. R. L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade do solo**. 2001. 114f. Tese (Livre-Docência) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

Afiliação dos Autores

Tokuda, E. N. - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho

Lima, C. G. R. - Professor da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho

Oliveira, J. N. - Professor da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho

Contribuição dos Autores

Tokuda, E. N. - Oa autora contribuiu na elaboração, realização e manipulação dos dados e redação.

Lima, C. G. R. - O autor contribuiu na elaboração, realização e manipulação dos dados e redação.

Oliveira, J. N. - O autor contribuiu na elaboração, realização e manipulação dos dados e redação.

Editores Responsáveis

Alexandra Maria Oliveira
Alexandre Queiroz Pereira