

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

Alterando a dinâmica: Análise da Influência Antrópica na Evolução dos Estados Hidrológicos da Bacia do Rio Grande, Bahia, Brasil

Carlos Eduardo Sousa Lima¹ & Cleiton da Silva Silveira¹

Abstract: Watersheds can be approached as dynamic hydrological systems where their different hydrological states evolve over time as a result of multiple energy and mass balance processes. In this approach, watersheds exhibit different equilibrium states, which act as attractors, allowing the system to return to its initial state after disturbances to its equilibrium cease. However, when disturbances are large enough to break the attraction basin of the initial state, the system undergoes a critical transition, moving to an alternative state different from the initial one. Both natural (e.g., climate variability) and anthropogenic stressors can perturb the hydrological state equilibrium of a watershed. During the Anthropocene, human activities have increasingly impacted a watershed's hydrological processes, to the extent that anthropogenic disturbances can sometimes be considered on par with those originating from natural stressors. In this context, the present study assessed the impact of anthropogenic activities on the temporal evolution of a watershed's hydrological states. The Rio Grande Basin, located in the Western Middle São Francisco, was adopted as a case study. For this assessment, a novel methodological framework based on Hidden Markov Models and Artificial Neural Networks was developed. Our results demonstrated that anthropogenic activities caused a 5-year earlier transition from the normal to the dry hydrological state in the Rio Grande River basin.

Resumo: As bacias hidrográficas podem ser abordadas como sistemas hidrológicos dinâmicos no qual seus diferentes estados hidrológicos evoluem com o tempo como resultado de múltiplos processos de balanço energético e de massa. Nessa abordagem, as bacias hidrográficas apresentam diferentes estados de equilíbrio, os quais operam como atratores, permitindo que o sistema retorne para seu estado inicial após as perturbações em seu equilíbrio serem cessadas. Entretanto, quando as perturbações são grandes o suficiente para romperem a zona de atração do estado inicial, o sistema passa por uma transição crítica, transitando para um estado alternativo diferente do inicial. Diferentes estressores são capazes de perturbar o equilíbrio do estado hidrológico de uma bacia hidrográfica, tanto naturais, como a variabilidade climática, quanto antrópicos. No antropoceno, as atividades antrópicas passaram a ter grande influência sobre os processos hidrológicos de uma bacia hidrográfica, de forma que as perturbações geradas por estressores antrópicos podem ser consideradas, em alguns casos, equivalentes às geradas por estressores naturais. Nesse contexto, o presente trabalho avaliou o impacto das atividades antrópicas na evolução temporal dos estados hidrológicos de uma bacia hidrográfica. A Bacia do rio Grande, situada no Oeste do Médio São Francisco, foi tomada como estudo de caso. Para essa avaliação, uma nova estrutura metodológica baseada em Hidden Markov Models e Redes Neurais Artificiais foi desenvolvida. Os resultados obtidos evidenciaram que as atividades antrópicas anteciparam em 5 anos uma transição entre o estado hidrológico normal para o estado hidrológico seco na bacia hidrográfica do rio Grande.

Palavras-Chave – Estados Hidrológicos, Atividades Antrópicas, Hidden Markov Models

1) Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA), Universidade Federal do Ceará (UFC), Centro de Tecnologia, Depto. de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Campus do Pici – Bloco 713, 60400-900, Fortaleza, Ceará, Brasil. Fone: +55 85 3366.9623; e-mail: eduardolima@alu.ufc.br; cleitonsilveira@ufc.br.

INTRODUÇÃO

Sistemas dinâmicos podem ser entendidos como sistemas em que seu estado evolui com o tempo, sendo esses estados definidos como resultado de um balanço entre diferentes processos. Um sistema dinâmico pode possuir um ou múltiplos estados de equilíbrio, os quais funcionam como atratores, pois permitem que o sistema tenda a retornar para seu estado inicial após as perturbações em seu equilíbrio serem cessadas. Entretanto, se essas perturbações forem grandes o suficiente para romperem a “zona de atração” do estado inicial, e assumindo a existência de múltiplos estados de equilíbrio, o sistema transitará para um estado alternativo diferente do inicial (transição crítica). Dá-se o nome de resiliência ao tamanho da zona de atração de um estado de equilíbrio, ou seja, a magnitude da perturbação que o sistema é capaz de absorver sem transitar para um estado de equilíbrio alternativo (Scheffer, 2009).

Diferentes sistemas naturais podem ser interpretados como um sistema dinâmico. As bacias hidrográficas, por exemplo, são sistemas hidrológicos na qual seu estado evolui com o tempo como resultado de múltiplos processos de balanço energético e de massa, ou seja, um sistema dinâmico (Santos e Slater, 2025; Peterson et al., 2021). Interpretando-as como sistemas dinâmicos, as bacias hidrográficas podem ter seu equilíbrio perturbado por diferentes estressores, tal como a variabilidade climática que, quando gera flutuações mais significativas nos padrões climáticos, é capaz de levar a bacia hidrográfica para um estado de equilíbrio alternativo, seja este um estado hidrológico úmido ou seco (Marengo et al., 2017).

No antropoceno, as atividades antrópicas passaram a exercer grande influência sobre os processos hidrológicos das bacias hidrográficas, de forma que os desequilíbrios gerados por essas atividades no estado hidrológico dessas últimas passaram a ser tão significantes quanto os gerados pela variabilidade climática. No tocante as secas hidrológicas, as atividades antrópicas passaram a ter papel fundamental no seu desenvolvimento e recuperação, modificando suas características (seca modificada pelo homem) ou até mesmo gerando tais eventos (secas induzidas pelo homem) (Aghakouchak et al., 2021; van Loon et al., 2016).

Assumindo a bacia hidrográfica como um sistema dinâmico que possui múltiplos estados de equilíbrio, o presente trabalho avaliou o impacto das atividades antrópicas na dinâmica dos estados hidrológicos de uma bacia hidrográfica. Uma nova estrutura metodológica baseada em *Hidden Markov Models* (HMM) e Redes Neurais Artificiais (RNA) foi desenvolvida para essa avaliação. A bacia hidrográfica do rio Grande foi utilizada como estudo de caso, permitindo que significativas mudanças antrópicas na bacia fossem observadas durante o período analisado, bem como a ocorrência de eventos extremos de seca. Destaca-se que as atividades antrópicas referidas acima englobam apenas aquelas realizadas em escala de bacia hidrográfica, tais como mudanças no uso e cobertura do solo e nos padrões de utilização dos recursos hídricos.

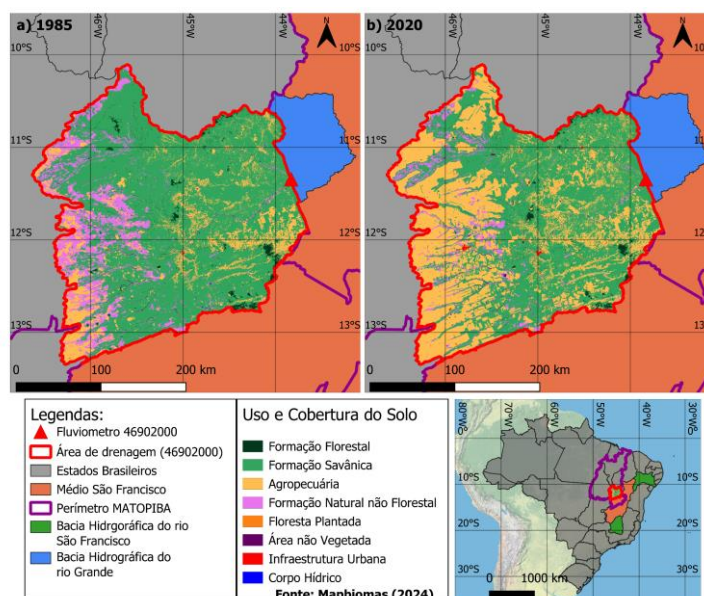
ÁREA DE ESTUDO

A Figura 1 apresenta a bacia hidrográfica do rio Grande, a qual foi tomada como área de estudo do presente artigo. Mais precisamente, a área de estudo do presente artigo corresponde a área de drenagem da estação fluviométrica 46902000, a qual está situada na calha principal da bacia hidrográfica do rio Grande, próximo ao seu exutório. Devido a essa proximidade, a bacia hidrográfica da estação fluviométrica 469020000 será, doravante, denominada bacia hidrográfica do rio Grande.

A bacia hidrográfica do rio Grande possui uma área de 70.296 km² e precipitação e Evapotranspiração Potencial (ETP) médias anuais de 1.168 mm e 1.401 mm, respectivamente. Situada na porção Oeste da bacia hidrográfica do médio São Francisco, mais precisamente no Oeste

Bahiano, essa bacia recebe contribuições do Aquífero Urucuia, o qual é a principal fonte do escoamento de base na região, atuando na não intermitência de suas vazões ao longo do ano (Lucas et al., 2020).

Figura 1 – Bacia Hidrográfica do rio Grande, destacado a estação fluviométrica 46902000 bem como a evolução do seu Uso e Cobertura do Solo entre a) 1985 e b) 2020.



Uma outra característica importante dessa bacia hidrográfica é que ela está situada em uma importante fronteira agrícola brasileira, o MATOPIBA. O MATOPIBA possui uma área de 730.000 km², abrangendo os estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia. A produção agrícola nessa região é caracterizada por sistemas intensivos, mecanizados e altamente produtivos, marcados por grandes colheitas de soja, milho e algodão. Essa região apresentou uma expansão agrícola significativa a partir da década de 1980, principalmente para o cultivo de grãos e, em 2005, tornou-se uma fronteira agrícola bem estabelecida no Brasil (EMBRAPA, 2023; Calmon, 2022).

Como apresentado na Figura 1, a área de estudo do presente artigo apresentou uma forte expansão agrícola em detrimento de formações naturais (florestais, savânicas e não florestais) entre 1985 e 2020. Além das mudanças antrópicas induzidas à bacia hidrográfica por essa expansão, houve um significativo aumento na demanda hídrica para irrigação em decorrência da instalação massiva de pivôs centrais de irrigação.

Segundo ANA (2021), a área irrigada por pivôs centrais no Oeste Bahiano foi igual a 1810 km² em 2019, com uma demanda hídrica estimada de 1.000 hm³/ano. Baseado nas informações fornecidas por ANA (2021), as quais foram atualizadas em 2024, estima-se que a bacia hidrográfica do rio Grande apresentou uma área irrigada de 1537 km² na safra de 2022/23, principalmente concentrada nas regiões de montante dessa bacia. O atendimento dessa grande demanda hídrica para irrigação ocorre, em grande parte, pelo bombeamento de águas subterrâneas do aquífero Urucuia (Lucas et al., 2020).

DADOS UTILIZADOS

No presente artigo foram utilizados dados de precipitação e vazão observadas na bacia hidrográfica do rio Grande. A série temporal de vazão observada foi obtida da estação fluviométrica

46902000 por meio da base de dados HIDROWEB da Agência Nacional de Águas (ANA). Essa estação fluviométrica apresenta medições diárias de vazão que se iniciam em 1934 e se estendem até dezembro de 2024, sem falhas diárias ao longo desse período.

Em relação aos dados de precipitação na bacia hidrográfica do rio Grande e em suas regiões circunvizinhas, constatou-se grandes períodos de falha ou períodos observados relativamente curtos em relação à série de vazão observada. De forma a não excluir dados de vazão para viabilizar a utilização das informações de precipitação observada, optou-se por utilizar as precipitações mensais estimadas para toda a superfície terrestre do *Global Precipitation Climatology Centre* (GPCC) (Schneider et al., 2022). Essas informações foram obtidas da grade de precipitações com 1° de resolução do *GPCC Full Data Monthly Product Version 2022* para o período entre 1934 e 2020 (2020 é o último ano com dados disponíveis nessa base de dados).

METODOLOGIA

A metodologia empregada no presente trabalho pode ser sintetizada em duas grandes etapas, as quais englobam a aplicação de Hidden Markov Models e de Redes Neurais Artificiais para identificação dos impactos das atividades antrópicas na dinâmica dos estados hidrológicos de uma bacia hidrográfica:

- i) Identificação dos estados hidrológicos observados: Aplicação de Hidden Markov Models para identificação dos estados hidrológicos da bacia hidrográfica do rio Grande e definição de sua sequência mais provável ao longo do período observado;
- ii) Determinação dos estados hidrológicos naturalizados: Aplicação de Redes Neurais Artificiais (RNA) para explorar a relação entre precipitação anual e estados hidrológicos durante o período pré-alteração antrópica, generalizando-a para o período pós-alteração antrópica. Essa generalização permitiu a definição dos estados hidrológicos naturalizados da bacia nesse último período, permitindo que o impacto das atividades antrópicas fosse estimado através da comparação entre estados naturalizados e observados.

Os estados hidrológicos naturalizados determinados na etapa ii) representam a evolução dos estados hidrológicos da bacia hidrográfica caso a influência das atividades antrópicas presente no período pós-alteração antrópica fosse minimizada. A opção por utilizar o termo “minimizada” se deve a utilização da série de precipitação acumulada anual observada no período pós-alteração antrópica para determinação desses estados. Tendo em visto que não se avaliou o impacto no microclima da bacia em decorrência das mudanças antrópicas no Uso e Cobertura do Solo, nem os impactos das mudanças climáticas no seu regime de precipitação, julgou-se cauteloso a utilização desse termo.

Estados Hidrológicos Observados

A identificação dos estados hidrológicos da bacia hidrográfica do rio Grande foi realizada com a utilização de Hidden Markov Models (HMM) na sua série de vazão média anual observada. HMM são um tipo de modelo em espaço de estado com variáveis latentes discretas que seguem a propriedade de Markov. Podem ser interpretados como uma extensão de uma mistura de distribuições na qual a escolha do componente da mistura de uma observação depende apenas da componente da observação anterior. A distribuição de probabilidade conjunta das variáveis latentes e observadas de uma HMM é apresentada na Equação 1 (Santos e Slater, 2025; Bishop, 2009):

$$p(X, Z | \theta) = p(z_1 | \pi) \left[\prod_{n=2}^N p(z_n | z_{n-1}, A) \right] \prod_{m=1}^N p(x_m | z_m, \phi) \quad (1)$$

Em que: X é conjunto de variáveis observadas $\{x_1, \dots, x_n\}$; Z o conjunto de variáveis latentes, doravante estados ocultos, $\{z_1, \dots, z_n\}$ e θ é o conjunto de parâmetros que governa a distribuição condicional de X $\{\pi, A, \phi\}$ para um determinado estado Z .

No HMM, assume-se que cada valor observado x_n está associado a um estado oculto do modelo, o qual não pode ser observado, mas apenas inferido com base nas observações. Ademais, a distribuição do valor observado depende apenas do seu estado atual, o qual evolui com o tempo segundo a propriedade de Markov. Em outras palavras, para um estado oculto z_t , o sistema gera um valor observado x_t com base na distribuição de probabilidade associada ao estado atual (emissão), transitando para um novo estado do sistema (z_{t+1}) com base em uma matriz de probabilidades que depende apenas de z_t .

A aplicação de HMM à série de vazão média anual da bacia hidrográfica do rio grande permitiu, além de identificar a quantidade de estados ocultos dessa série temporal, a definição da sequência mais provável desses estados ao longo do período observado, dando origem a uma série temporal de estados hidrológicos da bacia.

A definição do número de estado ocultos da série temporal de vazão média anual tomou como base o critério de informação de Akaike (AIC, do inglês *Criterion Akaike Information*). O AIC é uma métrica estatística que permite avaliar um modelo com base no seu desempenho e sua complexidade, penalizando os modelos com muitos parâmetros, os quais podem levar a *overfitting*. A Equação 2 apresenta o AIC.

$$AIC = 2 \ln(L) + 2k \quad (2)$$

em que: L é a máxima verossimilhança estimada do modelo e k é o número de parâmetros estimados do modelo. Na presente aplicação o número de parâmetros representa a quantidade de estados ocultos considerados. Quanto menor o AIC, mais parcimonioso é o modelo.

Vale ressaltar que o AIC não avalia a qualidade absoluta do modelo, apenas compara diferentes modelos entre si. Nesse contexto, avaliou-se diferentes composições de HMM, as quais variavam apenas o número de estados óculos de 1 até 10. Em todos os casos, considerou-se um HMM com emissões Guassianas. Além disso, para cada composição, o modelo foi ajustado aos dados de vazão observada 20 vezes, variando o estado aleatório de inicialização em cada uma delas. Por fim, foi selecionado, dentre as diferentes composições e os diferentes estados aleatórios, o modelo mais parcimonioso (menor AIC), ou seja, o modelo que melhor se ajustou aos dados utilizando o menor número de parâmetros (estados ocultos). O número de estados ocultos do modelo mais parcimonioso foi tomado como o número de estados hidrológicos presentes na série de vazão média anual.

Uma vez definido o número de estados hidrológicos, a sequência de ocorrência mais provável desses estados ao longo do período observado foi determinada com base no algoritmo de Viterbi. Esse algoritmo permite encontrar a sequência de estados ocultos mais prováveis em um HMM, dado uma sequência de valores observados. Ele opera buscando uma sequência de estados que maximiza a probabilidade conjunta com os valores observados, ou seja, a probabilidade que uma certa sequência de estados ocultos tenha gerado a sequência observada (Bishop, 2009).

Estados Hidrológicos Naturalizados

A definição dos estados hidrológicos naturalizados, ou seja, com influência antrópica minimizada consistiu em duas etapas:

- i) Treinamento e validação de uma Rede Neural Artificial (RNA) para o período pré alteração antrópica, buscando descrever como os estados hidrológicos da bacia evoluíram ao longo desse período em função de sua precipitação acumulada anual e do seu estado hidrológico inicial.
- ii) Determinação dos estados hidrológicos naturalizados da bacia para o período pós-alteração antrópica por meio da rede neural treinada na etapa i), considerando a precipitação acumulada anual e os estados hidrológicos naturalizados predecessores da bacia desse período como preditores.

Em resumo, a estratégia metodológica esboçada nos itens i) e ii) busca responder o seguinte questionamento: Como seria a evolução dos estados hidrológicos da bacia hidrográfica caso fosse mantido os processos e características físicas do período pré-alteração antrópica que influenciam a transformação chuva-vazão da bacia?

De maneira prévia a etapa de treinamento da RNA, fez-se necessário a normalização dos dados de vazão e precipitação, bem como a separação do período pré- e pós-alteração antrópica da série temporal de dados hidrometeorológicos observados (1935-2020). O procedimento de normalização desses dados, trazendo-os para uma escala numérica que varia entre 0 e 1, foi adotado para reduzir o impacto das diferentes escalas de variação dos dados, melhorando a convergência e estabilidade do treinamento, bem como a generalização para valores diferentes da base de treinamento.

Em relação a definição dos períodos pré- e pós-alteração antrópica, destaca-se que a produção de soja na porção Oeste do estado da Bahia, onde se situa a área de estudo do presente artigo, apresentou uma forte tendência de crescimento a partir de 1985, com um rápido aumento em sua participação na produção agrícola entre 1985 e 1995 (Calmon, 2022; Pimentel et al., 2012). Dessa forma, optou-se por dividir a série temporal de variáveis hidrometeorológicas observadas em: i) período pré-alteração antrópica (1935-1984) e período pós-alteração antrópica (1985-2020).

No presente trabalho, a RNA do tipo Multi-Layer Perceptron (MLP) foi treinada com dados do período pré-alteração antrópica para explorar a relação entre precipitação anual e estado hidrológico, sendo posteriormente utilizada para generalizar essa relação no período pós-alteração antrópica. Na etapa de treinamento e validação, utilizou-se os dados do período pré-alteração antrópica (1935-1984), subdividindo-o em 75% (1934-1972) para treinamento e 25% (1973-1984) para validação. Para essa etapa, diferentes combinações de hiperparâmetros da MLP foram avaliadas, inclusive variando o estado aleatório inicial para uma mesma combinação, buscando definir a melhor configuração da MLP para os dados considerados, a qual é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Hiperparâmetros da MLP utilizada para definição dos estados hidrológicos naturalizados

Camadas Ocultas	Nº neuronios	Função de ativação	Taxa de aprendizado	Otimização
3	(500, 1000, 500)	Rectified Linear Unit (ReLU)	Adaptativa 0,0001	Adam

Os dados de entrada da MLP proposta para determinação do estado hidrológico no passo de tempo t (z_t) foram as precipitações acumulada anuais (P) nos passos de tempo t até $t - 4$ e os estados hidrológicos do passo de tempo $t - 1$ e $t - 2$. Dessa forma, o vetor de entrada dessa MLP foi: $[P_t, P_{t-1}, P_{t-2}, P_{t-3}, P_{t-4}, z_{t-1}, z_{t-2}]$. A definição da defasagem temporal dos dados de entrada em relação a previsão foi realizada empiricamente, testando-se diferentes combinações, desde um cenário

sem defasagem, até um cenário com defasagem de 5 anos, tanto para precipitação, quanto para o estado hidrológico.

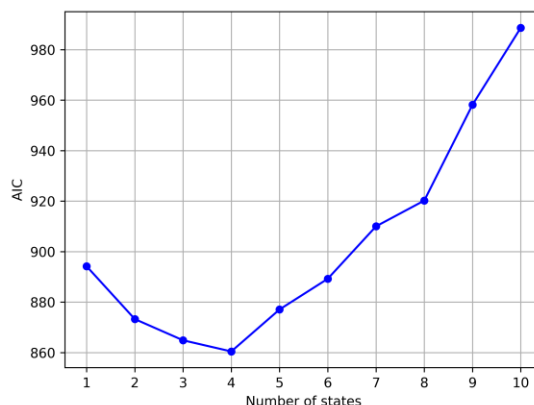
A definição dos estados hidrológicos naturalizados do período pós-alteração antrópica (1985-2020) com a referida estratégia foi realizada de forma recursiva (previsão recursiva), pois o estado hidrológico previsto para o passo de tempo t , foi utilizado como dado de entrada para previsão do estado hidrológico no passo de tempo $t + 1$. Note que, adotando tal estratégia, a definição dos estados hidrológicos naturalizados não utilizará os estados hidrológicos ou as vazões médias anuais observadas no período pós-alteração antrópica, as quais estariam “contaminadas” pela influência antrópica na bacia hidrográfica, podendo mascarar o real impacto das atividades antrópicas na evolução dos estados hidrológicos da bacia. Entretanto, é digno de nota que a utilização da precipitação acumulada anual observada no período pós-alteração antrópica pode representar resquícios de influência antrópica na dinâmica dos estados hidrológicos, tendo em vista que não foram avaliadas as possíveis mudanças no regime de precipitação em decorrência das mudanças climáticas nem as possíveis mudanças em decorrência das alterações antrópicas capazes de alterar o balanço energético da bacia, por exemplo, a expansão agrícola em detrimento de formações naturais.

RESULTADOS

Estados Hidrológicos Observados

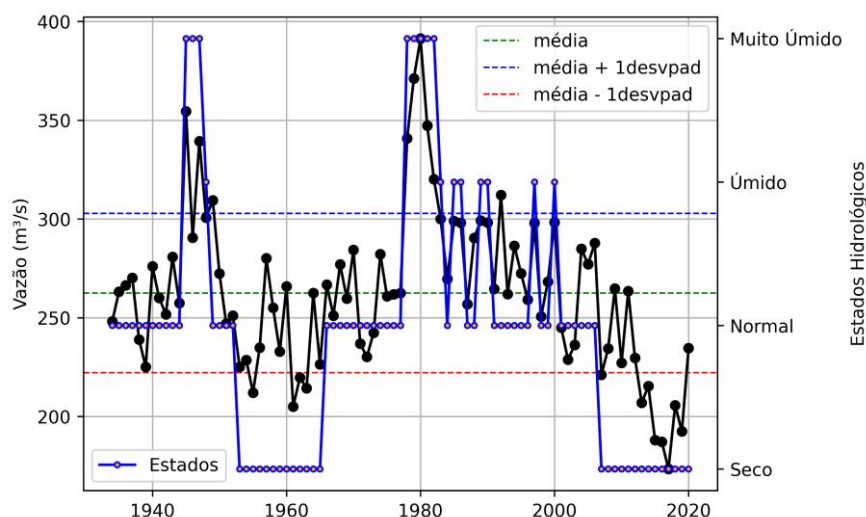
A Figura 2 apresenta a evolução do AIC em função do número de estados hidrológicos do modelo HMM com emissões Gaussianas utilizado para identificação dos estados hidrológicos da série temporal de vazão média anual e para a definição da sequência mais provável desses estados ao longo do período observado.

Figura 2 – Critério de Informação de Akaike (AIC) em função do número de estados hidrológicos do modelo HMM aplicado à série de vazão média anual da bacia hidrográfica do rio Grande.



Baseado na Figura 2, observa-se que o modelo HMM com 4 estados ocultos é o mais parcimonioso, ou seja, o modelo que melhor equilibra performance e complexidade. Dessa forma, assumiu-se que a série temporal de vazões médias anuais da bacia hidrográfica do rio grande apresentou 4 diferentes estados hidrológicos ao longo do período entre 1934 até 2020. Partindo dessa premissa, aplicou-se o algoritmo de Viterbi para definir a sua sequência mais provável de ocorrência ao longo do período observado, em outras palavras, a evolução temporal dos estados hidrológicos identificados ao longo desse período. A Figura 3 apresenta a evolução temporal dos estados hidrológicos da bacia hidrográfica do rio Grande ao longo do período observado da série temporal de vazão média anual. Comparando a evolução temporal desses estados com a série de vazão média anual, pode-se rotular esses estados em: Muito úmido, úmido, normal e seco.

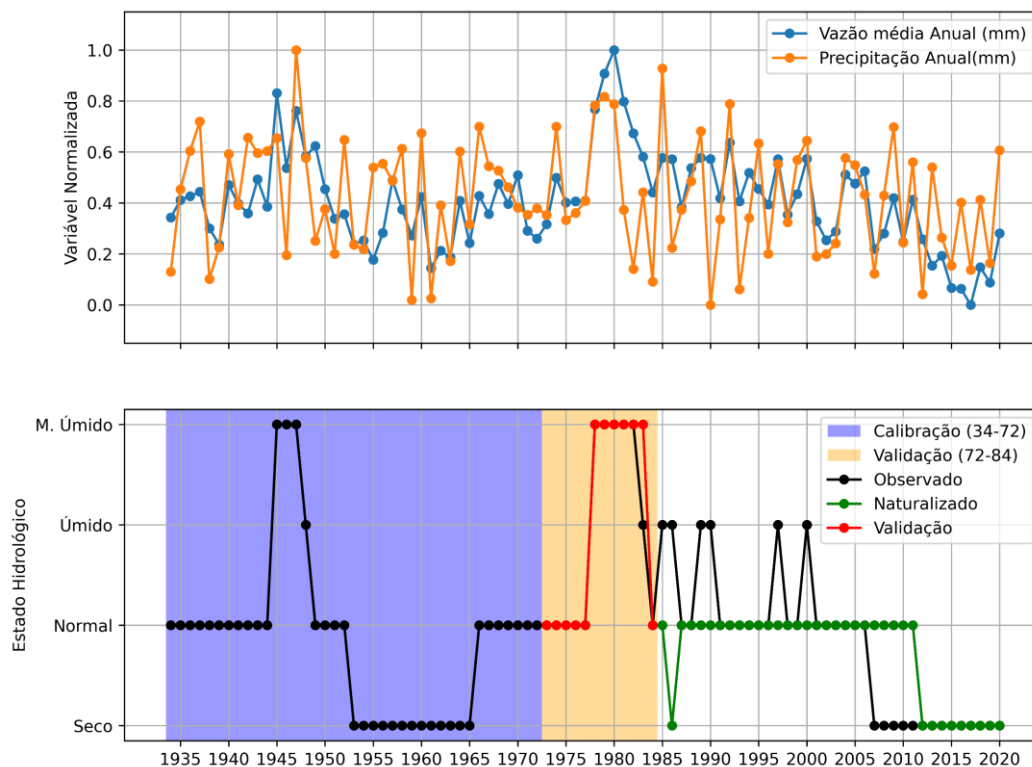
Figura 3 – Estados Hidrológicos observados na série temporal de vazão média anual da bacia hidrográfica do rio Grande no período entre 1934 e 2020.



Estados Hidrológicos Naturalizados

A Figura 4 apresenta os estados hidrológicos observados e naturalizados da bacia hidrográfica do rio Grande e as suas séries de precipitação acumulada anual e vazão média anual normalizadas, as quais foram usadas como dados de entrada na MLP considerada para determinação dos estados hidrológicos naturalizados. Ademais, também apresenta os períodos de calibração e validação dessa RNA, destacando os valores previstos no processo de validação.

Figura 4 – Estados Hidrológicos observados e naturalizados da bacia hidrográfica do rio Grande e as suas séries de precipitação acumulada anual e vazão média anual normalizadas



No tocante a validação da MLP utilizada para previsão dos estados hidrológicos, a Figura 4 constata que ela obteve um excelente desempenho, pois, além de capturar a transição do estado normal para o estado muito úmido ocorrido entre 1977 e 1978, ela divergiu em apenas 1 ano dentre os 12 considerados no seu período de validação, atingindo uma acurácia de 91,67% (11 acertos em 12 valores).

Para ambas séries temporais de estados hidrológicos (observados e naturalizados), houve uma constância de estados hidrológicos secos nos anos finais dessas séries, entretanto, esse estado iniciou-se em 2007 para os estados hidrológicos observados, enquanto que para os estados hidrológicos naturalizado teve início apenas em 2012. Dessa forma, pode-se afirmar que as atividades antrópicas desenvolvidas na bacia hidrográfica do rio Grande foram capazes de antecipar o estado hidrológico seco em 5 anos no período pós-alteração antrópica.

Essa constatação é plausível, visto que houve uma forte expansão da atividade agrícola de grande escala ao longo do período pós-alteração antrópica, resultando em uma maior demanda para irrigação, a qual é atendida principalmente pelo bombeamento de águas subterrâneas. O aumento na exploração de águas subterrâneas, por sua vez, diminui o nível do lençol freático, reduzindo a contribuição do escoamento de base para o rio ou até mesmo transformando-o em um rio perdedor, no qual suas águas infiltram em direção ao aquífero, reduzindo o volume escoado superficialmente (Uchôa et al., 2024; Lucas et al., 2020). Além disso, o comportamento dos estados hidrológicos naturalizados, transitando para o estado hidrológico seco apenas em 2012 é coerente, pois coincide com o início da grande seca pluriannual ocorrida no Nordeste Brasileiro entre 2012 e 2018 (Pontes Filho et al., 2020; Cunha et al., 2019).

Vale destacar que o início da constância do estado hidrológico seco na série temporal observada, 2007, coincide com o período em que as vazões médias anuais começam a apresentar uma maior divergência das precipitações acumuladas anuais. Como pode ser observado na Figura 4, a partir de 2007 os picos ocorridos na série temporal de precipitação acumulada anual não resultam em picos de vazão média anual semelhante aos observados anteriormente.

CONCLUSÕES

O presente trabalho avaliou o impacto das atividades antrópicas na dinâmica dos estados hidrológicos da bacia hidrográfica do rio Grande. Para isso, foi desenvolvida uma estrutura metodológica baseada na aplicação de Hidden Markov Models (HMM) e Redes Neurais Artificiais (RNA) para determinação dos estados hidrológicos naturalizados dessa bacia ao longo do período tomado como pós-alteração antrópica (1985-2020). Uma vez determinados os estados hidrológicos naturalizados nesse período, o impacto das atividades antrópicas na dinâmica dos estados hidrológicos da bacia pode ser aferido pela sua comparação com os estados hidrológicos observados.

Os resultados obtidos sugerem uma antecipação de 5 anos no estado hidrológico seco ao longo do período pós-alteração antrópica. Enquanto que os estados hidrológicos naturalizados transitaram de um estado hidrológico normal para seco apenas em 2012, coincidindo com o início da seca pluriannual que impactou o Nordeste Brasileiro entre 2012-2018, os estados hidrológicos observados evidenciaram essa transição já em 2007 (5 anos antes).

A hipótese que as bacias hidrográficas apresentam múltiplos estados hidrológicos, os quais evoluem com o tempo e tem sua dinâmica impactada pelas atividades antrópicas, abre algumas questões pertinentes no âmbito da modelagem hidrológica: i) os parâmetros calibrados de um modelo hidrológico para uma bacia hidrográfica são capazes de representar, adequadamente, os regimes de vazão dos seus múltiplos estados hidrológicos? ii) a estacionariedade desses parâmetros em

cenarizações de longo prazo é adequada, tendo em vista que as atividades antrópicas são capazes de alterar a dinâmica desses estados hidrológicos frente às variáveis de entrada, tais como a precipitação?

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científica e Tecnológico (FUNCAP) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

REFERÊNCIAS

- AghaKouchak, A., Mirchi, A., Madani, K., ... ,Wanders, N. (2021). “*Anthropogenic drought: Definition, challenges, and opportunities*”. *Reviews of Geophysics* 59. doi:10.1029/2019rg000683.
- ANA (2021). “*ATLAS IRRIGAÇÃO: uso da água na agricultura irrigada*”. Agência Nacional de Águas., Brasília. Disponível em <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/1b19cbb4-10fa-4be4-96db-b3dcd8975db0>, acesso em: (22/06/2025)
- BISHOP, C.M. (2006). “*Pattern Recognition and Machine Learning*”. Springer.
- Calmon, D. (2022). “*Shifting frontiers: the making of Matopiba in Brazil and global redirected land use and control change*”. *The Journal of Peasant Studies*, 49(2), 263–287.
- Cunha, A.P.M.A., Zeri, M., Deusdará Leal, K., ..., Ribeiro Neto, G. (2019). “*Extreme drought events over Brazil from 2011 to 2019*”. *Atmosphere* 10 (11), 642.
- EMBRAPA (2023). “*Sobre o MATOPIBA*”. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/tema-matopiba/sobre-o-tema> (Acesso em 22/06/25)
- Lucas, M. C., Kublik, N., Rodrigues, D. B. B., ... Oliveira, P. T. S. (2020). “*Significant baseflow reduction in the Sao Francisco River Basin*”. *Water*, 13(1), 2.
- MapBiomas (2024). “*Coleção 9 da série annual de Uso e Cobertura do Solo do Brasil*”, acessado em 25/04/2025 através do link: <http://mapbiomas.org>
- Marengo, Jose A., Torres, R. R., & Alves, L. M. (2017). “*Drought in Northeast Brazil—past, present, and future*”. *Theoretical and Applied Climatology*, 129(3–4), 1189–1200.
- Peterson, T. J., Saft, M., Peel, M. C., & John, A. (2021). “*Watersheds may not recover from drought*”. *Science* 372(6543), 745–749. <https://doi.org/10.1126/science.abd5085>
- Pimentel, M.L., Souza, T.C.L., Távora, G.S.G., Turetta, A.P.D. (2011). “*Mudanças de uso da terra e expansão da agricultura no Oeste da Bahia*”. 1ª ed. Rio de Janeiro : Embrapa Solos. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/87973/1/BPD-201-Mudanca-uso-Oeste-Bahia.pdf>
- Pontes Filho, J. D., Souza Filho, F. de A., Martins, E. S. P. R., Studart, T. M. de C. (2020). “*Copula-based multivariate frequency analysis of the 2012–2018 drought in Northeast Brazil*”. *Water*, 12(3), 834.
- Santos, M. S., & Slater, L. J. (2025). “*Integrating Hidden Markov and Multinomial models for hydrological drought prediction under nonstationarity*”. *Advances in Water Resources*, 200(104974),
- Scheffer, M. (2009). “*Critical Transition in Nature and Society*”. Princeton University Press. 400 p.
- Schneider, U., Hänsel, S., Finger, P., Rustemeier, E., Ziese, M. (2022). “*GPCC full data monthly version 2022 at 1.0°: Monthly land-surface precipitation from rain-gauges built on GTS-based and historic data*”. Global Precipitation Climatology Centre (GPCC) doi:10.5676/DWD_GPCC/FD_M_V2022_100.
- Uchôa, J. G. S. M., Oliveira, P. T. S., Ballarin, A. S., ..., Wendland, E. C. (2024). “*Widespread potential for streamflow leakage across Brazil*”. *Nature Communications*, 15(1).
- Van Loon, A. F., Stahl, K., Di Baldassarre, G., ... Van Lanen, H. A. J. (2016). “*Drought in a human-modified world: reframing drought definitions, understanding, and analysis approaches*”. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(9), 3631–3650.