



MUDANÇAS CLIMÁTICAS E IMPACTOS SOBRE OS RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL

Carlos E. M. Tucci

A sociedade e o meio ambiente estão sujeitos a riscos naturais relacionados com o clima. Daí a relevância de pesquisas sobre os impactos da mudança climática em rios e bacias hidrográficas. A infra-estrutura dos recursos hídricos tem sido planejada com base em amostras do passado, projetando-se para o futuro o comportamento estatístico de séries estacionárias. Tais princípios consideram que o clima é naturalmente estável dentro do cenário de 100 anos futuros a contar dos projetos, tendo em vista a vida útil dos empreendimentos. Contudo, a observação de séries mais longas mostra que a variabilidade e também a modificação climática trazem consigo séries não-estacionárias que, associadas ao uso do solo, aumentam dúvidas e potencialmente o risco dos projetos. Sendo assim, convém analisar os principais componentes dessa incerteza no contexto hidrológico e a sua repercussão sobre a infra-estrutura dos recursos hídricos no Brasil.

Introdução

A condição singular do Brasil como nação com grande riqueza hídrica sempre nos levou a um acomodamento quanto aos riscos das variações naturais sobre o desenvolvimento da sociedade. A sofisticação do cenário nacional e internacional atual exige entretanto maior conhecimento técnico-científico sobre a variabilidade climática e seus impactos sobre os recursos hídricos, bem como sobre a vulnerabilidade dos diferentes setores socioeconômicos que dependem essencialmente desses recursos.

O desenvolvimento dos recursos hídricos ao longo do século vinte foi baseado em técnicas desenvolvidas por engenheiros para o dimensionamento e planejamento de sistemas hídricos. Essas técnicas estão fundamentadas na estatística da série histórica das vazões medidas nos rios. Portanto, admitem-se os seguintes princípios básicos: 1) As séries de vazões são homogêneas ou estacionárias, ou seja, as suas estatísticas não variam com o tempo. 2) As amostras utilizadas são estatisticamente representativas. A não-estacionariedade ou a representatividade podem ocorrer por um ou mais dos seguintes fatores: a) variabilidade climática no período de amostra; b) modificação climática; c) modificação do uso do solo; d) alterações nas características físico-químicas e biológicas da bacia hidrográfica, devido aos efeitos naturais e antrópicos.

Observa-se, assim, nos setores da sociedade que dependem dos recursos hídricos, uma vulnerabilidade intrínseca que contribui para aumentar os riscos de planejamento e gestão de águas no país.

Efeito do uso do solo

A ação do homem sobre o solo pode produzir alterações substanciais nos processos hidrológicos terrestres, como: redução ou aumento das vazões médias, máximas e mínimas de uma bacia hidrográfica, e alteração da qualidade da água. Um resumo dos argumentos que conduziram a essas conclusões é o seguinte:

– O desmatamento para culturas anuais aumenta o escoamento médio de uma bacia pela redução da evapotranspiração.¹ O impacto que isto tem sobre a vegetação e os sistemas hídricos depende dos efeitos de escalas nas bacias de maior porte. Na literatura existe pouca comprovação sobre o efeito do uso do solo sobre o escoamento em grandes bacias².

¹ SAHIN, M. J. & HALL, M. J. The effects of afforestation and deforestation on water yields. *Journal of Hydrology*, 178, 293-309, 1996.

BRUIJNZEEL, L. A. Predicting the hydrological impacts of tropical forest conversion: the need for integrated research. In: GASH, J. H. C.; NOBRE, C. A.; ROBERTS, J. M. & VICTORIA, R. L. (eds.). *Amazonian Deforestation and Climate*. Chichester, Inglaterra: John Wiley & Co., 1996.

² TUCCI, C. E. M. & CLARKE, R. T. Environmental Issues in the La Plata Basin. *Water Resources Development*, v. 14, n. 2, p. 157-173, 1998.

– Grande parte do conhecimento hidrológico é resultado de observações feitas a partir de pequenas bacias. No âmbito internacional e no Brasil, o conhecimento do comportamento ecohidrológico dos biomas nacionais é muito reduzido, devido à falta de monitoramento e aos efeitos antrópicos não-controlados.

– O desenvolvimento urbano produz aumento do volume hídrico, escoamento médio e máximo, erosão, sedimentos e deterioração da qualidade da água. Esses impactos geram condições extremamente desfavoráveis sobre os rios na vizinhança dos centros urbanos, além de inundações causadas por projetos de drenagem totalmente inadequados em quase todas as cidades da bacia.³

³ TUCCI, C. E. M. & BERTONI, J. C. *Inundações Urbanas na América do Sul*. ABRH GWP, 2003. 452 p.

⁴ IPCC. *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. A Report of Working Group II of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2001.

Variabilidade hidrológica

O *Intergovernmental Panel on Climate Change*⁴ define *modificação climática* como as mudanças de clima no tempo, devido à variabilidade natural e/ou como resultado das atividades humanas (ações antrópicas). Já a *United Nations Framework Convention on Climate Change* (convenção formulada na Rio-92) adota para o mesmo termo a significação de mudanças associadas direta ou indiretamente à atividade humana que alterem a variabilidade climática natural observada num determinado período. Neste texto, compreende-se por *variabilidade climática* as variações de clima em função dos condicionantes naturais do globo terrestre e suas interações; e por *modificação climática*, as alterações da variabilidade climática causadas pelas atividades humanas.

A variabilidade hidrológica, por sua vez, é entendida aqui como as alterações que possam ocorrer na entrada e na saída dos sistemas hidrológicos. As principais entradas são a precipitação e a evapotranspiração (que depende de outras variáveis climáticas), enquanto que as principais variáveis de saída são o nível e a vazão de um rio. Os efeitos mais importantes da variabilidade hidrológica estão relacionados com: a) a variabilidade natural dos processos climáticos; b) o impacto da modificação climática; c) os efeitos do uso da terra e a alteração dos sistemas hídricos.

A relação entre as variáveis de entrada e saída dos sistemas hidrológicos apresenta um comportamento não-linear. A alteração da precipitação mostra impacto relativo diferenciado sobre a vazão da bacia hidrográfica. Os dados informam que, nos anos com valores extremos (inundações e secas), a resposta da bacia se amplifica com relação à variação adimensional da precipitação. Tal condição ocorre devido à proporcionalidade com que os valores de precipitação se

relacionam com os de vazão. Nos anos mais úmidos, o aumento de precipitação produz maior vazão, já que a infiltração cresce pouco e a evapotranspiração potencial diminui pela freqüência da chuva, o que aumenta proporcionalmente o escoamento. Nos anos secos, ao contrário, com a redução de precipitação, o aumento da evapotranspiração reduz sensivelmente a vazão. Portanto, a anomalia da vazão (resposta da bacia hidrográfica) amplifica seus efeitos na precipitação, se considerarmos apenas a anomalia da precipitação (figura 1). O processo é ainda mais marcante em climas tropicais, em que a evapotranspiração diminui ou aumenta de forma significativa com a existência ou não de precipitação. Este efeito é chamado de *elasticidade do escoamento*.⁵

⁵ SCHAAKE, J. C. From climate to flows. In: WAGONNER, P. E. et al. (ed.). *Climate changes and U. S. Water Resources*. New York: Wiley & Sons, 1990. p. 177-206.

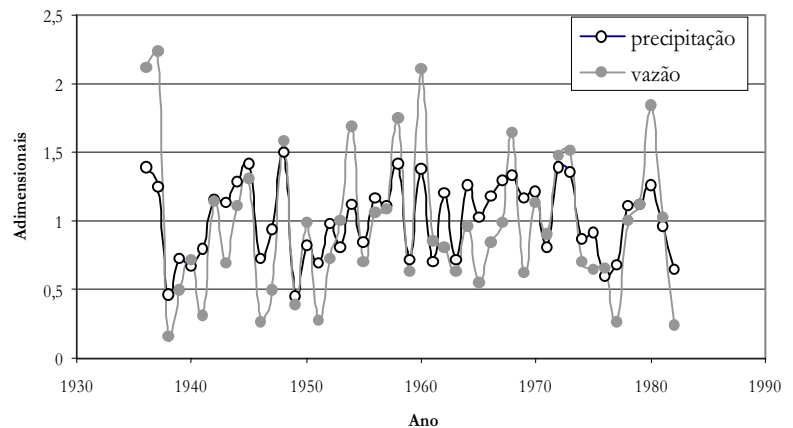


Figura 1: Precipitação e vazão no rio Verde Pequeno, na bacia do rio São Francisco (vazões obtidas por modelo hidrológico).

Considere dois períodos denominados aqui de 1 e 2. Para verificar a variação de vazão ($\Delta Q = Q_2 - Q_1$) entre os dois períodos com relação à vazão média do período 1 ($Q_1 = Q$), utilizou-se a variação da precipitação ($\Delta P = P_2 - P_1$) com relação à precipitação média do período 1 ($P_1 = P$). Considerando a equação do coeficiente de escoamento, é possível demonstrar o seguinte:

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \frac{C_2}{C_1} \left(1 + \frac{\Delta P}{P}\right) - 1$$

onde C_2 é o coeficiente de escoamento médio resultante do período 2; C_1 é o coeficiente de escoamento médio do período 1; ($C = P/Q$). Existirá uma função $C = f(P)$ para as condições de tipo e uso do solo; a função não é unívoca, mas apresenta uma tendência similar, quando não há grande

alteração no uso do solo. Através de tendência média, é possível estimar o coeficiente de escoamento em função da variação de P. Utilizando-se esta função média e a equação 1, pode-se calcular a variação da vazão em função da precipitação e de sua variação percentual.

A equação 1 incorpora toda a variabilidade hidrológica, devido tanto ao clima quanto ao uso do solo. Quando C_2 e C_1 provêm da mesma função, ou seja, não existe mudança no uso e tipo de solo, a anomalia depende essencialmente dos períodos climáticos. Quando os períodos fossem semelhantes, também as anomalias deveriam ser iguais. Ora, isso não ocorre, já que nunca os coeficientes de escoamento são iguais. Assim, a equação não capta as flutuações da não-linearidade do processo, apenas tem a utilidade de observar macro-variações além da não-linearidade.

Na figura 2, são apresentados os valores de precipitação e vazão da incremental Itaipu (a partir de Rosana até Itaipu), no rio Paraná, onde claramente se observam os efeitos da modificação do uso do solo, antes e depois de 1970 (1931-1969 e 1970-1994). Além do desmatamento da bacia diretamente contribuinte, houve a substituição do café pela soja no Norte do Paraná.⁶ O maior volume no escoamento não se deve somente ao uso do solo, mas também à associação dos dois fatores: variabilidade climática (combinada com mudança climática?) e uso do solo, já que nessa bacia incremental foram registrados um aumento de 10% na precipitação e um crescimento na vazão em torno de 44%. Para bacias consolidadas em termos de uso do solo, como a bacia do rio Grande, localizada entre os Estados de Minas Gerais e São Paulo, as alterações também tiveram acréscimo, ou seja, 18% para precipitação e 17% para vazão.

⁶ TUCCI, C. E. M. & CLARKE, R. T. *Op. cit.*

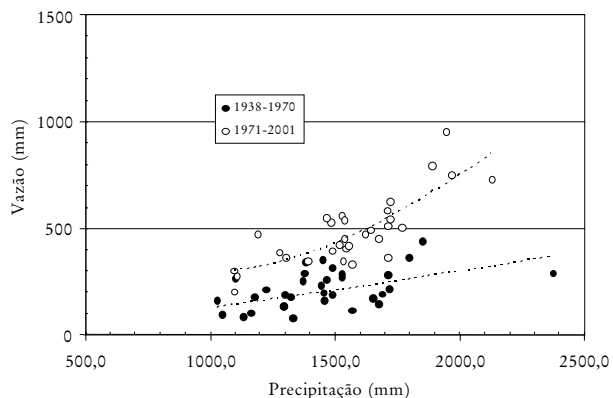


Figura 2: Relação entre escoamento e precipitação na bacia incremental de Itaipu.

Vulnerabilidade climática

⁷ DIAMOND, J. *Armas, Gemas e Aço: o destino das sociedades humanas*. Rio de Janeiro: Record, 1997. 472p.

A história tem mostrado que o clima é um condicionante fundamental no desenvolvimento da população em diferentes partes do globo.⁷ Mesmo considerando o avanço da tecnologia no último século, a variabilidade climática pode produzir impactos significativos no desenvolvimento dos países e comprometer a sustentabilidade das populações.

A variabilidade climática e a representatividade da amostra são condicionantes semelhantes, já que a falta de representatividade de uma amostra de dados observados pode não apontar todas as variabilidades da população estatística da série. Os dois últimos fatores representam efeitos antrópicos sobre o sistema.

Existem séries de variáveis climáticas que se fundamentam na temperatura obtida por correlação com amostras de gelo, ou nas precipitações estimadas a partir dos anéis de crescimento das árvores, no entanto os resultados constituem informações indiretas que permitem uma idéia do comportamento, mas se diferenciam dos valores efetivamente observados.

O comportamento climático tem sido avaliado com base em séries de dados, na maioria de 20 a 50 anos de dados hidrológicos. Nas últimas décadas cresceu, em diferentes partes do globo, o número de séries longas, evidenciando as características interdecadais dos processos climáticos e hidrológicos. Contudo, são raras as séries com tamanho próximo de 100 anos. Dessa forma, grande parte das pesquisas sobre variabilidade e comportamento do clima utiliza amostras de períodos curtos, que podem ser tendenciosos.

Na bacia do rio Uruguai e grande parte do Rio Grande do Sul, o período entre 1942 e 1951 foi muito mais seco, se comparado com o restante da série. Isso pode ser observado em diferentes locais do Estado. Utilizando-se a série após 1951, por exemplo, 1951-2000, com 50 anos para dimensionar o volume útil de um reservatório, o seu volume é 50% menor que o volume estimado considerando a série após 1942. O impacto, neste caso, ocorrerá sobre a infra-estrutura do Estado quando um período seco como este se repetir no futuro. Em tal situação, a amostra depois de 1950 não é representativa dos períodos úmidos e secos que aparecem em séries longas. Outro caso semelhante foi constatado na série do rio Paraguai em Ladário, quando na década de 60 (mais precisamente de 1960 a 1973) ocorreram níveis muito abaixo do período anterior, comprometendo a sustentabilidade da população do Pantanal.

Em Blumenau, Santa Catarina, desde 1852 são observadas as cotas máximas de inundação. A série de observação contínua iniciou-se em 1935, mas foram registradas todas as cotas acima de 9,0m (cota do leito maior) desde 1852, constituindo-se portanto a mais longa série contínua de cotas de inundação do país. No período de 1912 a 1982 as cotas ficaram muito abaixo (< 13,0m) das inundações que ocorreram antes e depois deste período (várias cotas entre 15 e 17,1m, a máxima em 1880). Analisando-se a série contínua de dados entre 1935-2000, a mesma poderia ser considerada estatisticamente não-estacionária, mas como se pode perceber, os condicionantes se referem à variabilidade de longo período e a uma amostragem pouco representativa (período de registro), conforme a figura 3.

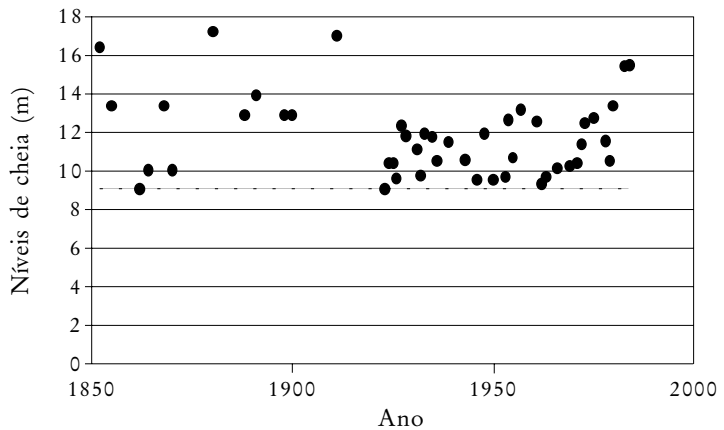


Figura 3: Níveis máximos em Blumenau acima de 9,0m (cota de extravasamento da calha do rio Itajaí-Açu).

Esse tipo de comportamento, atestado pelos hidrólogos ao longo do tempo, foi denominado *efeito de José*⁸. Geralmente tais observações se prendiam a décadas específicas, como realmente comprovam os dados de muitas regiões do globo. No entanto não tem sido observado se existem ciclos de prazo maior, porque a maioria das séries não é suficientemente longa.

Tucci e Clarke⁹ e Collischonn *et alii*¹⁰ mostraram que bacias de grande porte, na América do Sul (rio Paraguai e Paraná) e na África, apresentavam períodos longos com tendências diferentes. Enquanto na América do Sul ocorreu aumento de precipitação e vazão após 1970, na África houve redução substancial. Algumas questões se colocam. Por que a ciência tem dificuldade em identificar essas tendências de longo prazo? Pelo fato de serem curtos os períodos

⁸ A denominação “efeito de José” inspira-se na Bíblia (Genesis 41, 20-30), referindo-se aos sete anos de abundância seguidos por sete anos de fome. O fenômeno é quantificado pela equação empírica $R/S \propto k^H$ para $H > 1/2$ e tem sido considerada uma curiosidade estatística. O processo deve ser entendido no contexto das memórias longas das flutuações climáticas. Ver: MANDELBROT, B. B. & WALLIS, J. R. Noah, Joseph and operational hydrology. *Water Resources Res.*, 4(5), p. 909-918, 1968.

⁹ TUCCI, C. E. M. & CLARKE, R. T. *Op. cit.*

¹⁰ COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. & CLARKE, R. T. Further evidence of changes in the hydrological regime of the River Paraguay: part of a wider phenomenon of climate change? *Journal of Hydrology*, 245, p. 218-238, 2001.

de informação? Condições antrópicas como o uso do solo ou o aquecimento provocado pelo efeito estufa poderiam ter influenciado tal comportamento? As respostas requerem da ciência um esforço importante e uma visão integrada dos processos hidroclimáticos, em nível global e de mesoescala. Por outro lado, mesmo que não exista um entendimento completo e não seja possível prever com antecedência esses processos, é necessário conhecer os impactos a que a sociedade está sujeita devido a essas variabilidades, para que sejam planejadas medidas mitigadoras. Tucci e Damiani¹¹ estimaram o efeito da modificação climática sobre os recursos hídricos na bacia do rio Uruguai, considerando o prognóstico climático de 2xCO₂ na atmosfera pelo modelo GISS. Na figura 4, é possível observar a simulação dos cenários atual e futuro para a vazão específica na bacia.

¹¹ TUCCI, C. E. M. & DAMIANI, A. Potenciais Modificações Climáticas no rio Uruguai, RBE. *Caderno de Recursos Hídricos*, vol. 12, n. 2, junho 1994.

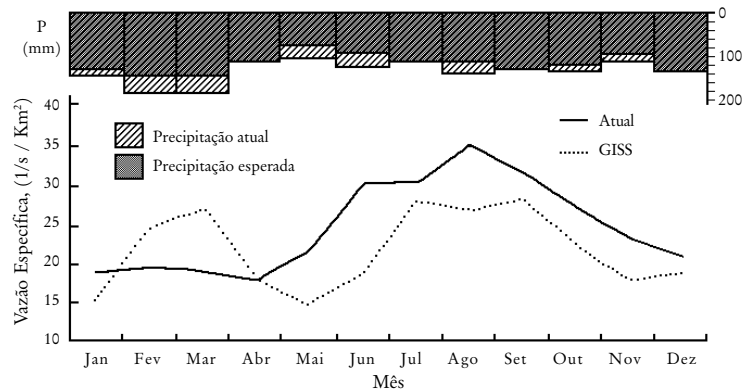


Figura 4: Cenário atual e previsto para a vazão específica mensal na bacia do rio Uruguai, com base nas estimativas do modelo GISS com a duplicação do CO₂ na atmosfera.

Vulnerabilidade dos setores dos recursos hídricos

A variabilidade climática afeta em maior ou menor grau todos os usos dos recursos hídricos e a conservação ambiental associada. Na história das civilizações é comum a identificação do movimento e da sustentabilidade de povos a partir da disponibilidade hídrica ou da combinação de fatores relacionados a clima, solo, água, entre outros fatores físicos. As freqüentes secas que ocorrem no Nordeste brasileiro explicam muito da história desta região, inclusive sobre o movimento da população atingida em outras partes do país. O efeito existe, mas é necessário analisar quais são as principais fragilidades em cada setor dos recursos hídricos, associadas ao desenvolvimento econômico das regiões, o que será discutido a seguir.

Abastecimento urbano

O abastecimento de água para comunidades de até 5.000 habitantes pode ser realizado através de poços, por pequenas bacias, de acordo com a disponibilidade e demanda a fio d'água; ou por regularização; ou ainda por grandes bacias em função da localização da demanda. A fragilidade maior diante da variabilidade climática está nas comunidades que atualmente possuem seu abastecimento nas seguintes condições: a) regiões semi-áridas onde a disponibilidade é pequena, independentemente da regularização; b) localidades abastecidas por rios de pequena bacia sem regularização, mesmo tendo uma vazão média alta. Nas cabeceiras do rio Uruguai é comum encontrar, nessas condições, comunidades que sofrem freqüente racionamento por falta de regularização; c) mananciais urbanos com demanda acima da capacidade da disponibilidade hídrica, como em parte da região metropolitana de São Paulo, onde a demanda retirada para abastecimento é superior à disponibilidade de alguns mananciais; d) redução da disponibilidade pela poluição dos sistemas hídricos devido ao ciclo de contaminação urbano.¹²

A fragilidade dos sistemas de abastecimento urbanos está relacionada com a falta de monitoramento, por parte da maioria das companhias de abastecimento, da disponibilidade hídrica dos mananciais, que fica sempre sujeita à variabilidade interanual e ao racionamento. As companhias priorizam o tratamento da água e de alguma forma se preocupam com o tratamento de esgoto (com pouco sucesso), mas geralmente não tratam de conhecer a disponibilidade do seu insumo básico, que é a água. Este cenário gera maiores incertezas com relação à sustentabilidade da quantidade e qualidade da água de abastecimento, pois qualquer anomalia maior sobre o sistema hídrico poderá gerar impactos significativos. A forma de mitigar tais cenários é desenvolver estudos que proponham alternativas emergenciais eficazes e mecanismos de segurança para atender aos problemas.

Irrigação

Com a implementação da regulamentação do uso da água e da cobrança, poderão ocorrer dois processos opostos na área rural: a) redução da demanda de irrigação nos projetos existentes devido à cobrança e à racionalização do uso da água, criando melhores oportunidades para a sustentabilidade regional da atividade, em obediência aos acordos e às decisões dos comitês de bacia; b) aumento de conflitos, com dificuldades na implementação das decisões dos

¹² TUCCI, C. E. M. Gerenciamento da Drenagem Urbana. *RBRH*. v. 7, n. 1, março 2002.

comitês e restrições de diferentes naturezas. Provavelmente, o país deverá registrar os dois tipos de processos, mas é esperado que o primeiro predomine.

A irrigação é um dos grandes consumidores de água, principalmente no sul do país com a irrigação de arroz, que consome o equivalente a cerca de 800 pessoas/hectare, com pouca racionalização do seu uso. A tendência é de que, num cenário crítico de disponibilidade hídrica, aumente o conflito entre a irrigação e o abastecimento de água, o que já acontece. Como a irrigação geralmente ocorre distribuída pelas propriedades, e as empresas de abastecimento de água apresentam maior inércia e estão a jusante das propriedades, o abastecimento, num período crítico, será penalizado e exigirá medidas fortes para inverter a prioridade prevista na legislação, que é atender ao consumo humano.

No nordeste do Brasil, grande parte da irrigação é realizada a partir do rio São Francisco, que por ser uma bacia muito grande, normalmente não apresenta limitações de disponibilidade, apesar do conflito com a energia. No entanto, o cenário será sempre crítico para os perímetros fora do São Francisco, onde as garantias de sustentabilidade são limitadas e dependentes da variabilidade interanual. Para reverter o processo, são necessários reservatórios que assegurem a disponibilidade entre anos secos; entretanto, reservatórios de maior volume, se comparados com a vazão média, possuem grande tempo de residência nos anos secos, o que tende a salinizar a água devido à alta evaporação. O problema pode ser minimizado em parte por conjuntos de reservatórios ou práticas locais, como reservatórios subterrâneos. Aqui também o conflito entre o uso humano e o fornecimento de energia é significativo.

Nessa região do país, desde os últimos treze anos, observa-se a tendência a uma média móvel de precipitação declinante e de aumento da evapotranspiração, agravando ainda mais a sustentabilidade da população considerando o clima e a disponibilidade de água. A avaliação da tendência interdecadal e dos efeitos climáticos são fundamentais ao planejamento de ações para a região.

Na região semi-árida, a tendência para a vizinhança dos grandes mananciais é que seja voltada ao plantio de produtos de maior rentabilidade, enquanto que para as áreas de pouca disponibilidade de água é previsto que se dediquem à agricultura de subsistência. A fruticultura e o café, em algumas regiões, têm mostrado rentabilidade, principalmente pelo maior número de safras em um mesmo ano. Por outro lado, esses empreendimentos exigem regularização da

água sem falhas durante períodos longos, já que o plantio é permanente. De qualquer modo, pode-se esperar investimentos de empresas agrícolas e outros investimentos privados na região do São Francisco, incentivando o seu crescimento econômico. A sustentabilidade desse processo de longo prazo dependerá do aprimoramento tecnológico. Nas áreas agrícolas fora da cobertura da disponibilidade hídrica sem riscos, onde os rios não foram perenizados, o potencial de água é pequeno, sendo pouco eficiente e conflituoso o recurso sistemático à irrigação de baixo valor agregado. De acordo com as condições atuais, o desenvolvimento se dará muito mais no sentido de buscar a sustentabilidade da população por meio da melhora dos indicadores sociais, a partir de investimentos não necessariamente relacionados à água. Em resumo, o cenário potencial é de gradual solução de alguns problemas críticos de sustentabilidade social, por meio de investimentos externos à região, proporcionando atendimento a uma demanda maior por água para irrigação, sobretudo para a fruticultura irrigada praticada no raio de ação dos rios perenes ou perenizados.

Nas regiões sul e sudeste do país, a irrigação não abrange grandes áreas, até porque os períodos secos não têm sido muito longos desde a década de 70, o que leva parte dos agricultores a não optarem pela irrigação. No entanto, se houver uma modificação de tendência, poderá crescer a demanda por irrigação, tornando-se viável a sua implantação em função de melhores resultados econômicos e de menor disponibilidade de água nos períodos secos. O centro-oeste, onde se encontra grande parte do cerrado brasileiro, área de grande potencial agrícola, depende muito da regularização da água, pois o lençol freático é profundo (planalto) e a sazonalidade anual da precipitação mostra vários meses (maio a agosto) praticamente sem precipitação. Portanto, a viabilidade da expansão agrícola desta área está relacionada com a disponibilidade hídrica e sua regularização.

Quanto aos programas de conservação do solo, deve-se observar que ainda ocorrerão grandes discrepâncias regionais de ações. As regiões em que o agricultor é mais bem treinado e em que há uma ação mais presente da extensão rural deverão apresentar resultados bons, como já acontece hoje. Em outras regiões, prevê-se uma ação federal mais efetiva para garantir investimentos em capacitação do homem do campo, em pesquisa aplicada e em extensão rural. Os grandes desafios deverão envolver o controle da ocupação dos limites da Amazônia e o desenvolvimento do Cerrado. Esse processo dependerá muito das políticas governamentais.

Energia

a) Planejamento de longo prazo

O Brasil é um dos grandes produtores de energia hidrelétrica, representando 10% da produção mundial. Mais de 90% da energia elétrica brasileira são provenientes de usinas hidrelétricas, sendo o restante complementado por energia térmica. Uma parte das térmicas é mantida desligada para assegurar a produção nos períodos críticos, mas existem limites. O sistema é fortemente dependente da disponibilidade hídrica de médio e longo prazos, para a produção de energia firme, tendo sido projetado com base na probabilidade de falha estimada através do uso de séries históricas de vazão, que iniciaram em 1930 e vêm incorporando mais informações anualmente.

Silveira e Guerra¹³ avaliaram a atual crise de energia do setor elétrico e mostraram que os investimentos no setor, entre 1985 e 1995, foram inferiores à demanda, o que resultou no rebaixamento do reservatório do sistema sudeste e centro oeste (como pode ser observado na figura 5), transformando um sistema de regularização interanual em um sistema de regularização intra-anual.

¹³ SILVEIRA, CARLOS. A. C. & GUERRA, HÉLVIO. N. A crise energética e o monitoramento de reservatórios hidrelétricos. *XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Aracaju, 2001.

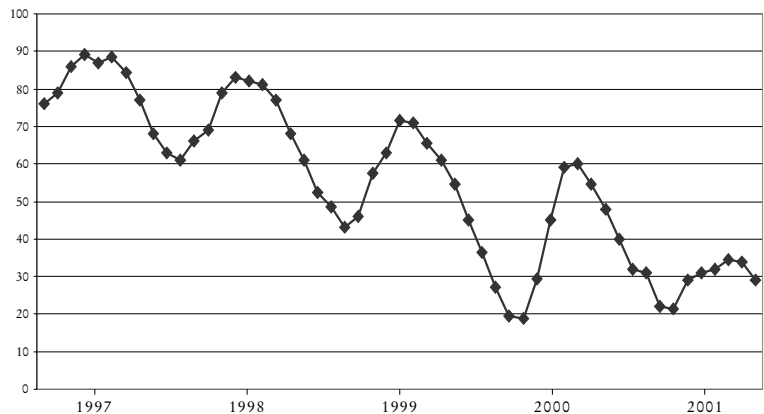


Figura 5: Nível (em %) de armazenamento do reservatório equivalente do sistema SE/CO de janeiro de 1997 a junho de 2001.

Fonte: SILVEIRA & GUERRA. *Op. cit.*

Apesar de o sistema hidrelétrico apresentar uma grande interligação energética, o que reduz o risco de falha do sistema como um todo, grande parte das usinas hidrelétricas está localizada na região sudeste, o que concentra o risco de falha do ponto de vista espacial, porque as diversas usinas estão sujeitas a variabilidades climáticas simultâneas.

Desde 1970, as regiões centro-oeste, sul e sudeste apresentam vazão média cerca de 30% superior à do período anterior, o que significa que, para a mesma capacidade instalada, é possível gerar mais energia, com menor risco de falha. Isso tem permitido, ao longo do tempo, aumentar a energia firme das usinas. O aumento de vazões ocorre, pelo menos parcialmente, como consequência de um aumento simultâneo, mas menos intenso, de precipitações na mesma região do Brasil. Enquanto isso, algumas regiões da África, como a bacia do rio Congo e a região sub-sahariana, experimentam um longo período menos úmido do que o anterior, além de redução das vazões.

Trata-se, talvez, de períodos interdecadais de 30 anos de variabilidade climática, associada ou não a mudança climática. O primeiro período observado se estendeu de 1940 a 1970; nele ocorreram seqüências de El Niño de fraca intensidade e de La Niña de forte intensidade, o que indica períodos mais secos em parte das regiões da América do Sul. O segundo período se estende de 1970 até 2000, quando ocorreram fenômenos de El Niño mais intensos e de La Niña menos intensos.

Tal comportamento somente poderia ser identificado estatisticamente, com séries suficientemente longas, por isso foi pouco percebido. Somente agora, com mais conhecimento sobre o clima e com séries de dados hidrometeorológicos que se aproximam dos 100 anos, é possível reconhecê-lo.

Em algum grau, parte da variabilidade climática tem sido prevista com base em modelos de circulação atmosférica, em horizontes de aproximadamente seis meses. Esses métodos permitem antecipar, com relativo sucesso, se as variáveis climáticas estarão superiores ou inferiores à média climática de uma estação ou seqüência de meses. Mais recentemente, tais modelos mostraram que é possível reduzir as incertezas nas previsões de até seis meses, no rio Uruguai.¹⁴

O sistema elétrico brasileiro, mesmo com o atual período de vazões altas, está no limite de atendimento da demanda. Condições climáticas mais desfavoráveis resultariam em condicionantes críticos ao desenvolvimento econômico brasileiro, mantidas as tendências de aumento da demanda e de reduzida ampliação da oferta. O mercado *spot* de energia depende da previsão das condições climáticas de curto e longo prazo. Provavelmente haverá um importante desenvolvimento tecnológico neste setor, em função do prêmio do conhecimento prévio dos condicionantes que

¹⁴ TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T.; COLLISCHONN, W.; DIAS, P. L. S. & SAMPAIO, G. O. Long term flow forecast based on climate and hydrological modeling: Uruguay river basin. *Water Resources Research*, v. 39, n. 7, p. 3, (1-11), 2003.

norteiam os preços. Da mesma forma que existe a previsão de safras agrícolas, em função das condições climáticas e do plantio, a agência reguladora poderá especializar-se para informar as condições previstas, para curto e médio prazo, do volume dos reservatórios, informações que deverão regular os preços do setor.

A pergunta que naturalmente surge é a seguinte: se soubermos antecipadamente o que vai ocorrer, poderá esse conhecimento trazer algum benefício, já que a instalação de sistemas de produção de energia requer anos para sua implantação? Ora, o benefício da avaliação preditiva é o de permitir investigar os riscos e minimizá-los a tempo, através de ações planejadas, como, por exemplo, providenciar uma reserva técnica energética para a garantia do sistema, ou definir quando iniciar o uso das térmicas e estocar água nos reservatórios.

b) Previsão de curto prazo e volume de espera

Os reservatórios de hidrelétricas operam com base na programação de geração e previsão de vazões, dentro de cenários mensais e semanais, com correções diárias. Conforme essa programação, ficam estabelecidos, nos reservatórios de maior porte, *volumes de espera* para controle de enchentes a jusante dos mesmos, tornando-os um sistema de uso múltiplo. O volume de espera implica redução de níveis do reservatório para amortecimento de cheias durante o período chuvoso. Quanto maior o volume, maior é a redução da energia produzida, em detrimento do controle de inundações. A sua determinação é realizada com base nas estatísticas das séries de vazões históricas afluentes do reservatório.

Essa metodologia tem o agravante de sub ou superdimensionar o volume, quando os valores ficam abaixo ou acima das condições esperadas (flutuação estatística). Os resultados das incertezas produzem, por um lado, maiores riscos de inundação e insegurança do sistema; e por outro lado, existem riscos de ineficiência com perda de energia gerada, na medida em que o nível é rebaixado e que, durante o período chuvoso, o reservatório não consegue recuperar o nível máximo normal. A previsão de curto prazo pode contribuir para a redução do volume de espera, permitindo: a) maior segurança às barragens e aos trechos de jusante da mesma; b) melhoria da produtividade da usina, mantendo a mesma condição de risco a jusante e para a barragem.

Atualmente, os reservatórios hidrelétricos no Brasil não utilizam a previsão de curto prazo para reduzir o volume

de espera. Os procedimentos são puramente hidrológicos e dependem da ocorrência de precipitação, portanto possuem uma antecedência máxima correspondente ao tempo de concentração da bacia. Além disso, agregam incertezas pela falta de conhecimento de precipitação futura sobre a bacia. A previsão da precipitação e sua inclusão (ou não) no modelo hidrológico permitem ampliar o tempo de antecedência da previsão de vazões afluentes aos reservatórios do sistema. Com essa previsão é possível gerenciar de modo mais eficiente a disponibilidade de energia. Collishonn *et alii*¹⁵ mostraram que a otimização do volume de espera, com base na previsão de vazão de afluência ao reservatório de Três Marias, utilizando-se um modelo hidroclimático (meteorológico+hidrológico), poderia economizar dois milhões de dólares por ano.

c) Segurança das barragens

Devem ser analisadas a eventualidade do rompimento da barragem, a área que pode ser atingida e a velocidade do escoamento, como base para um plano de defesa civil a jusante do empreendimento. Cerca de 35% das falhas ocorridas no mundo se devem a sub-dimensionamento do vertedor em função da representatividade das séries de vazão. O risco de rompimento das barragens geralmente é da ordem de 10^{-4} (baseado na probabilidade de dimensionamento do vertedor). Dessa forma, uma barragem, durante sua vida útil de 100 anos, teria a chance de 1% de romper-se. Nas últimas décadas, com o aumento da informação hidrológica, a melhoria dos métodos construtivos, a previsão e o alerta de ocorrência das enchentes, é de se esperar que este risco seja menor.¹⁶ Marengo¹⁷ mostra que, de acordo com o período de construção e a idade da barragem, o risco de falha diminui, convergindo para valores de 10^{-5} .

Segundo Lave *et alii*¹⁸ e Serafim¹⁹, o uso de um sistema de alerta com pelo menos duas horas de antecedência pode reduzir o número de mortes a zero. Paté-Cornell e Tagaras²⁰ advertem que um sistema de monitoramento pode diminuir em 12% a chance de rompimento da barragem, o número de mortes em 44% e os prejuízos em 12%. Brown e Graham²¹ identificaram dois tipos de enchentes: a) a de tempo superior à evacuação, estimado em 90 minutos; b) a de tempo inferior a 90 minutos. No primeiro caso, a perda de vidas é estimada em 0,04% da população ameaçada e, no segundo, 13%. Deve-se considerar que na seção de passagem da cheia, quando as velocidades são maiores, existem os maiores riscos.

¹⁵ COLLISHONN, W.; MARTIN, J.; TUCCI, C. E. M. & SILVA, B. C. *Avaliação de Benefícios da Previsão Meteorológica na Operação de Reservatórios com Usos Múltiplos*. 1º Prêmio INMET de Estudos sobre Benefícios da Meteorologia para o Brasil. INMET, 2006.

¹⁶ SERAFIM, J. L. Safety of Dams judged from failures. *Water Power and Dam Construction Sutton*, v. 33, n. 12, p. 32-35, December 1981.

¹⁷ MARENGO, H. M. Análisis de riesgo de falla en presas, estadísticas y parámetros de referencia. *Ingeniería Hidráulica en México*, v. XI, n. 2, p. 65-77, 1996.

¹⁸ LAVE, L. B.; RESENDIZ-CARRILLO, D. & MICHAEL, F. C. Safety goals for high-hazard dams: are dams too safe? *Water Resources*, v. 26, n. 7, p. 1383-1391, July 1990.

¹⁹ SERAFIM, J. L. *Op. cit.*

²⁰ PATÉ-CORNELL, M. E. & TAGARAS, G. Risk costs for new dams: Economic analysis and effects of monitoring. *Water Resources Research*, v. 22, n. 1, p. 5-14, January 1986.

²¹ BROWN, C. A. & GRAHAM, W. J. Assessing the threat to life from dam failure. *Water Resources Bulletin*, v. 24, n. 6, p. 1303-1309, December, 1988.

São poucos os países que possuem um sistema legal que obrigue os empreendimentos à prevenção deste tipo de ocorrência. Na Argentina, o processo iniciou com a privatização do sistema elétrico. No Brasil, ainda não há nenhuma regulação para prevenção dos impactos resultantes dessa situação. Na França, um decreto de 1968 obriga a realização de um plano de emergência para todas as barragens com mais de 20m de altura ou reservatórios com capacidade superior a 15hm³.²² Nos Estados Unidos, existem barragens sob legislação federal e outras sob legislação estadual. Apenas as barragens administradas por órgãos federais ou barragens particulares que participam de projetos hidrelétricos estão sob lei federal. Na década de 90, o governo federal desenvolveu um padrão para segurança das barragens visando unificar as leis estaduais.

A segurança e o risco das barragens estão diretamente relacionados com a série hidrológica utilizada no dimensionamento do seu vertedor ou dos condicionantes climáticos adotados para estimativa da Precipitação Máxima Provável. Portanto, o aumento da incerteza climática produz um cenário que exige maior regulação para um reservatório ou uma cascata de reservatórios numa bacia hidrográfica.

Navegação

O sistema brasileiro de transporte concentra-se atualmente na malha rodoviária, mas a capacidade deste sistema está no limite. Na medida em que o país se sofisticava e cresce, a tendência é que outros meios de transporte se ampliem. Portanto, o transporte hidroviário interior deverá ser incrementado, principalmente em função das grandes áreas de produção agrícola no centro-oeste. Trata-se de uma das importantes alternativas de escoamento da produção, devido a sua economia de escala. No entanto, é fortemente dependente da variabilidade dos níveis dos rios e de sua previsão a curto e médio prazo, além das estatísticas destes níveis.

A carga transportada por um barco depende fundamentalmente do calado do rio. Como o transporte pode demorar vários dias em rios como o Paraná, Paraguai, Jacuí, Amazonas, entre outros, é necessário prever com antecedência os seus níveis para estabelecer a carga adequada. Da mesma forma, em termos de condições médias futuras, é possível avaliar os custos de transporte em função dos níveis de água e a capacidade de carga das embarcações. Como a maioria dos rios não possui regularização para navegação (com poucas exceções, como o Tietê e o Jacuí,

²² BENOIST, G. Les études d'ondes de submersion des grands barrages d'EDF. *La Houille Blanche*, n. 1, p. 43-54, 1989.

ainda em conflitos com outros usos), o impacto de períodos longos acima ou abaixo dos conhecidos pode comprometer o preço e a viabilidade do transporte hidroviário.

Qualidade da água e meio ambiente

A qualidade da água depende da vazão nos rios. Quanto maior a vazão, maior será a capacidade de diluição dos corpos de água. No entanto, deve-se considerar outro efeito, que é o aumento da demanda bentônica (carga no fundo dos rios), quando a vazão aumenta e a erosão do fundo incorpora esta carga no volume transportado pelo rio, reduzindo a sua qualidade. Também durante as inundações, ocorre o maior transporte de poluição difusa agregada aos sedimentos, tanto na área rural como urbana. Na maioria dos sistemas hídricos, as condições críticas de qualidade da água ocorrem durante as estiagens, quando diminui a vazão nos rios e com ela sua capacidade de diluição das cargas urbanas e rurais. Nas áreas urbanas, com as inundações, a carga do escoamento pluvial também gera condições críticas de qualidade da água.

Nesse contexto, quais são as condições que podem ser agravadas com a variabilidade climática? a) Períodos mais secos, como os que ocorreram antes de 1970, podem representar menor capacidade de diluição e piora da qualidade da água dos rios; b) por outro lado, intensificando-se as precipitações nos centros urbanos, devido ao aquecimento das superfícies urbanas e processos convectivos, as cargas pluviais representarão custos maiores para melhoria da qualidade da água; c) o desmatamento e a expansão das áreas agrícolas tenderão a ampliar a carga difusa rural sobre os sistemas hídricos, além de reduzir a capacidade de regularização natural das bacias.

Como condicionante ambiental para a conservação da fauna e flora, é muito mais importante a manutenção da variabilidade sazonal do que efetivamente um valor limite, como o discutido na qualidade da água. Evidentemente que um valor limite baixo pode comprometer a fauna do rio, mas a duração de valores acima ou abaixo de determinados patamares pode alterar significativamente a flora. No rio Paraguai, a sustentabilidade do Pantanal depende muito mais da ocorrência do extravasamento da calha do rio, onde este volume alimenta os baixios com água e sedimentos que permitem a sustentabilidade destas áreas como banhado. Alterando-se a magnitude das inundações, as áreas inundadas ficarão reduzidas e o banhado pode-se transformar em cerrado, devido ao balanço hídrico negativo desta área, como de certa forma ocorreu entre 1960 e 1973.

A construção de um reservatório que regulariza a vazão a jusante, reduzindo sua amplitude, altera os ambientes condicionantes a jusante, em função da redução da amplitude de variação dos níveis e vazões. Neste sentido, o impacto potencial da variabilidade climática pode produzir mudanças na paisagem e alteração ecológica de alguns ambientes. Somando-se a isso as ações antrópicas, torna-se imprescindível conhecer as conseqüências da complexa realidade que o homem pode produzir.

O comprometimento ambiental de regiões como Amazônia, Pantanal, Cerrado, entre outras, pela variabilidade climática e pelas ações antrópicas, deve ser examinado para que medidas preventivas e mitigadoras possam ser planejadas, principalmente no zoneamento ecológico em desenvolvimento pelo governo.

Inundações

Existem dois tipos de inundações: a) inundação ribeirinha; b) inundação devido à urbanização no interior das cidades. A primeira é um processo natural em que o rio inunda o seu leito maior, de acordo com a intensidade e a duração das precipitações, em função das condições iniciais de umidade. Os principais impactos sobre a população ocorrem devido à falta de: a) conhecimento sobre a ocorrência dos níveis de inundações e ocupação do leito de inundação; b) planejamento da ocupação do espaço de acordo com os riscos de ocorrência das inundações. Já as inundações urbanas ocorrem devido à impermeabilização e canalização do escoamento nas cidades, ampliando os volumes e picos.

No Brasil, não existe nenhum programa sistemático de gerenciamento de inundações, apenas ações isoladas de construção de obras de proteção. Observa-se, em alguns trechos de rios, o alerta de inundação pela simples informação dos níveis ou sua previsão a curto prazo, como no trecho inferior do rio Paraná, no trecho do Pantanal do rio Paraguai e no rio Iguaçu, entre outros. A cidade de São Paulo possui um sistema de previsão de alerta, com base em radar meteorológico.

No caso das inundações ribeirinhas, o cenário comum de impacto é decorrência do seguinte: a população ocupa a várzea de inundação quando ocorre uma seqüência de anos de níveis anuais máximos pequenos, uma vez que áreas planas são propícias ao assentamento. Quando retornam os anos com maiores inundações, os prejuízos são significativos e a população exige dos governos a construção de obras de controle como barragens etc. Na figura 6, pode-se ob-

servar os níveis de enchentes do rio Iguazu, em União da Vitória, estado do Paraná. Num período longo, as inundações ficaram abaixo de cinco anos de tempo de retorno (Tr). As enchentes após 1982 produziram prejuízos significativos na comunidade (tabela 1). Dessa forma, a variabilidade climática condiciona a ocupação do espaço rural e urbano quando não existe um programa preventivo de controle de inundações, acarretando grandes prejuízos a parte importante da sociedade brasileira que ocupa áreas de risco. No caso das inundações devido à urbanização, além do aumento da vazão causado pela impermeabilização, tem sido observada nos últimos anos maior intensidade de chuvas, que pode ser explicada pelo efeito térmico das áreas impermeáveis ou pelo aumento da intensidade das precipitações, com duração de até 3 horas (condições críticas para estes eventos) por variabilidade ou modificação climática. Tais condicionantes ainda estão pouco claros.

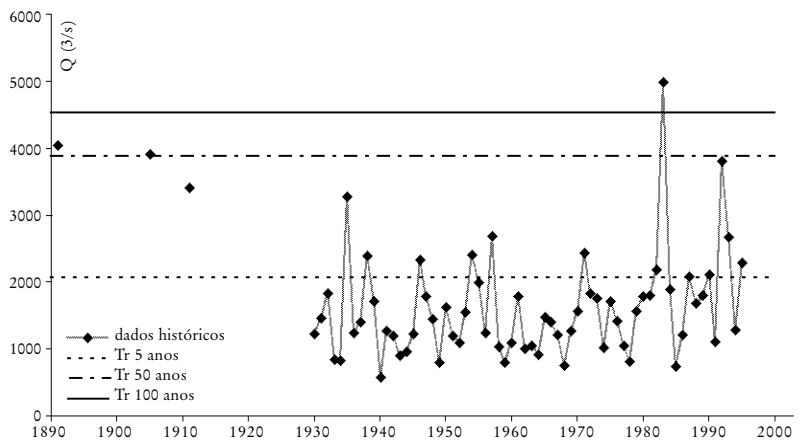


Figura 6: Níveis máximos de enchentes no rio Iguazu em União da Vitória (bacia de cerca de 25.000 km²)²³.

²³ TUCCI, C. E. M & VILLANUEVA, A. *Controle de enchentes das cidades de União da Vitória e Porto União*. CORPRERI, 1997. 117 p.

²⁴ JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY (JICA). *The Master Plan study on the utilization of water resources in Paraná State*. vol. 1. Tokio: JICA, 1995.

Tabela 1: Perdas por inundações em União da Vitória e Porto União. Fonte: JICA²⁴

Ano	Prejuízos US\$ milhões
1982	10.365
1983	78.121
1992	54.582
1993	25.933

Carlos E. M. Tucci é engenheiro civil, doutor em Recursos Hídricos e professor do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
tucci@iph.ufrgs.br

De qualquer modo, fica evidente a variabilidade hidrológica e climática ao longo do tempo, tornando as séries não-estacionárias. Mas quais são as principais causas desse fenômeno? Como identificar as incertezas na avaliação de risco e mitigar o efeito negativo sobre os recursos hídricos? Estas são questões que necessitam de respostas consistentes e que trazem consigo desafios técnicos e científicos para reduzir a vulnerabilidade ao risco climático, visando a sustentabilidade humana e ambiental.