

Distribuição Temporal de Descargas e Alterações Morfológicas em Rios Semiáridos: O Rio Jaguaribe no Ceará, Brasil

Temporary Distribution of Discharges and Morphological Changes at Semi-Arid Rivers: the Jaguaribe River in Ceará State, Brazil

Andrea Almeida Cavalcante¹

¹ Universidade Estadual do Ceará, andrea.cavalcante@uece.br

Recebido (Received): 06/12/2017

Aceito (Accepted): 02/03/2018

Resumo: Este trabalho objetiva analisar a frequência de fluxos e a distribuição temporal de descargas para verificar os fluxos responsáveis pelas maiores alterações na morfologia do rio Jaguaribe-Ce, considerando as interferências da barragem do Castanhão. Foram utilizados dados de vazões diárias de 7 estações na bacia do Jaguaribe, utilizando a distribuição estatística de Gumbel para análises dos intervalos de recorrência (IR). As permanências de fluxos foram calculadas pela compartimentação dos intervalos de vazões médias diárias. A descarga de sedimentos em suspensão correlacionada às permanências de fluxos mostrou uma ideia da descarga efetiva, aqui entendida como descarga morfológica. Os resultados para IR revelaram que as maiores vazões observadas nas estações estão em cotas relativas acima de 6m. Plotando as cotas nos perfis transversais verificou-se que $Q_{1,5}$ varia entre as cotas de 1,5m e 4,6m. Para $Q_{2,33}$ tais cotas variaram entre 3,7m e 5,5m, indicando que esta se aproxima da vazão de recorrência para *bankfull*. As permanências de fluxos indicaram que vazões abaixo de $10 \text{ m}^3/\text{s}$ predominam nas estações. Na estação Peixe Gordo foi observado que após a construção da barragem, fluxos entre 10 e $20 \text{ m}^3/\text{s}$ passaram a ser predominantes no canal. Isso refletiu em alterações na descarga efetiva nesse trecho que passou a ter uma condição favorável para transporte nesse intervalo. Nas demais estações, a vazão de descarga efetiva ficou no intervalo de 100-199 m^3/s . Assim, os resultados indicam que as descargas de *bankfull* não exerce papel fundamental na morfologia do rio Jaguaribe, sendo a vazão de 100-199 m^3/s as principais no transporte em suspensão.

Palavras-Chave: Descarga morfológica; Transporte de Sedimentos; Impacto de Barragens; Rios Semiáridos; Nordeste Brasileiro.

Abstract: This research aims to analyze flow frequency and temporal distribution of discharges in order to verify the discharges responsible for the major morphological changes in the Jaguaribe River, considering the Castanhão Dam interferences. Daily flow data from seven stations in the Jaguaribe river basin were used to analysis of the recurrence intervals (IR). The flow permanency was calculated by compartmentalization of intervals of the daily flow average. The suspended sediments discharge correlated to flow permanency showed an approach of the effective discharge, here understood as morphological discharge. The IR results revealed that the largest flows observed in the stations are in quotas above 6m. Quotas were plotting on the transversal profiles and it was observed that $Q_{1,5}$ varies between quotas of 1.5m and 4.6m. For $Q_{2,33}$ such quotas varied between 3.7m and 5.5m, indicating that this flow get closer of the flow recurrence to bankfull level. Flow permanency indicated that flows below $10 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ predominate in the stations. At the Peixe Gordo station was observed that after the construction of the Castanhão dam, flows between 10 and $20 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ became predominant in the channel. This reflected in changes in the effective discharge in this section, making favorable condition for transportation in this interval. In the other stations the effective discharge flow remained in the range of 100-199 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$. Thus, the results indicate that the bankfull discharge do not relevant in the Jaguaribe river morphology, being the flow between 100-199 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ the main ones in the suspended sediments transportation.

Keywords: Morphologic Discharge; Sediment Transport; Impact of Dams; Semi-Arid Rivers; Brazilian Northeast

1. Introdução

O comportamento de rios em áreas semiáridas no Brasil tem sido poucos estudados. De modo especial, conhecer e entender sua descarga efetiva, ou seja, a descarga sólida capaz de alterar os canais aluviais, pode ajudar no monitoramento do fluxo requerido para a estabilidade do canal (HESTER *et al.* 2006) e, conseqüentemente, na gestão dos recursos hídricos, especialmente em áreas com alto índice de barramentos, como é o caso do Nordeste Brasileiro. Orndorff e Whiting (1999) afirmam que a descarga efetiva pode ser um índice útil em projetos de restauração e manutenção de rios.

Estudos de magnitude e frequência de fluxos constituem importantes fatores nos processos de transporte de sedimentos, restaurando sistemas naturais fluviais (ROY e SINHA, 2014). Por outro lado, conhecer a probabilidade de cheias é importante na previsão do controle de inundações, principalmente, quando cidades estão localizadas em áreas bem próximas aos cursos d'água, como é o caso da maioria das cidades do vale do Jaguaribe, no semiárido cearense.

Análises clássicas quanto à recorrência de enchentes e a permanência de fluxos têm sido feitas a partir de estudos de probabilidade na Geomorfologia Fluvial, mediante análise de séries históricas de vazão. Tais análises são realizadas com base nas máximas observadas (que geram os intervalos de recorrência de enchentes) e na distribuição dos dados de vazão diária (série) por classes de intervalos de fluxos (que geram a permanência de um dado fluxo no canal).

O resultado de uma curva de frequência de enchente (intervalo de recorrência) mostra o intervalo de tempo médio que um dado tamanho de enchente pode ocorrer como uma máxima anual (LEOPOLD, 1994). Historicamente alguns períodos de recorrência de descargas têm sido considerados especiais (descarga de *bankfull*, enchente média anual e enchente de 100 anos). Entretanto, como foram estudados a partir de regiões úmidas, Graf (1988) avalia como sendo de difícil aplicação para áreas semiáridas, em especial pelo fato de muitas áreas áridas e semiáridas experimentarem anos sem vazão. Além disso, a ausência de registros nestas áreas se constitui em outro obstáculo para esse tipo de avaliação.

Leopold *et al.* (1964) sugerem um comum período de retorno ou Intervalo de recorrência para débito de margens plenas (*bankfull*) de 1,5 anos, podendo variar entre 1-2 anos. Em canais da Espanha o período de retorno de 1,5-7 anos se acomoda melhor com altos valores na maior parte de regimes irregulares. Para Williams (1978) este pode variar de 1,01-32 anos.

Por outro lado, a análise da distribuição temporal dos fluxos, vista através de curvas de permanência, indica o percentual de tempo que um dado fluxo permaneceu durante o ano. Esse é um dado importante para verificar quais intervalos de vazões predominam num dado canal fluvial, podendo ser importantes para entender a condição morfológica daquele canal e sua capacidade de resposta mediante um evento de máxima, e ainda na análise de hidrogramas ecológicos.

Tanto as vazões de recorrência como as permanências de fluxos inter-relacionam-se diretamente com a descarga efetiva do canal, que seria àquela responsável pelas maiores alterações morfológicas. De acordo com Knighton (1998), descargas dominantes têm sido definidas em vários caminhos: fluxo que determina parâmetros particulares do canal, como a capacidade da seção transversal (WOLMAN e LEOPOLD, 1957) ou comprimento de meandros (ACKERS e CHARLTON, 1970); ou ainda o fluxo que produz mais trabalho, onde este é definido em termos de transporte de sedimentos (WOLMAN e MILLER, 1960).

Em sua derivação original, Wolman e Miller (1960) consideraram a carga de sedimentos suspensas como relevante na determinação da descarga efetiva. Inclusive, pesquisas realizadas por Roy e Sinha (2014) para o rio Ganges e Ma *et al.* (2010) têm considerado a descarga efetiva para transporte de sedimentos em suspensão. Entretanto, efetivamente, a descarga de fundo é considerada como a mais relevante no ajuste do canal.

A descarga efetiva é definida pelo produto entre frequência de fluxo e descarga de fundo, e frequentemente está associada a descarga de *bankfull* para canais em equilíbrio dinâmico (CARLING, 1988; KNIGHTON, 1998; BARRY, 2008), cujo período de recorrência tem sido atribuído a um intervalo de 1-2 anos (LEOPOLD *et al.*, 1964). Todavia, a vazão de *bankfull* pode não significar a vazão de descarga efetiva em relação ao transporte de sedimentos (KNIGHTON, 1998) podendo as maiores taxas de transporte ocorrerem em vazões menores devido a frequência de fluxos. Em áreas semiáridas, cuja variabilidade de fluxos é elevada, as taxas de transporte podem ocorrer em vazões intermediárias ou baixas, dependendo das taxas de concentração e sedimento de fundo predominantes.

Considerando a discussão em foco, este trabalho objetiva analisar a frequência de fluxos e a distribuição temporal de descargas, líquida e sólida, a fim de verificar as descargas responsáveis pelas maiores alterações na morfologia do rio Jaguaribe, considerando as interferências provocadas pela inserção da Barragem do Castanhão, maior barragem para fins de abastecimento humano da América Latina e que está localizada no rio em estudo.

2. Área de Estudo

A bacia do rio Jaguaribe (74.000 km²) localiza-se na porção leste do Estado do Ceará, entre as latitudes 4° 25' e 7° 39' S e longitudes 38° 17' e 40° 10' O, e abrange cerca de 50% deste Estado (**Figura 1**). Esta bacia representa a maior fonte hídrica para o Ceará, em que a barragem do Castanhão (concluída em 2002) possui importante papel na regularização do deste rio.

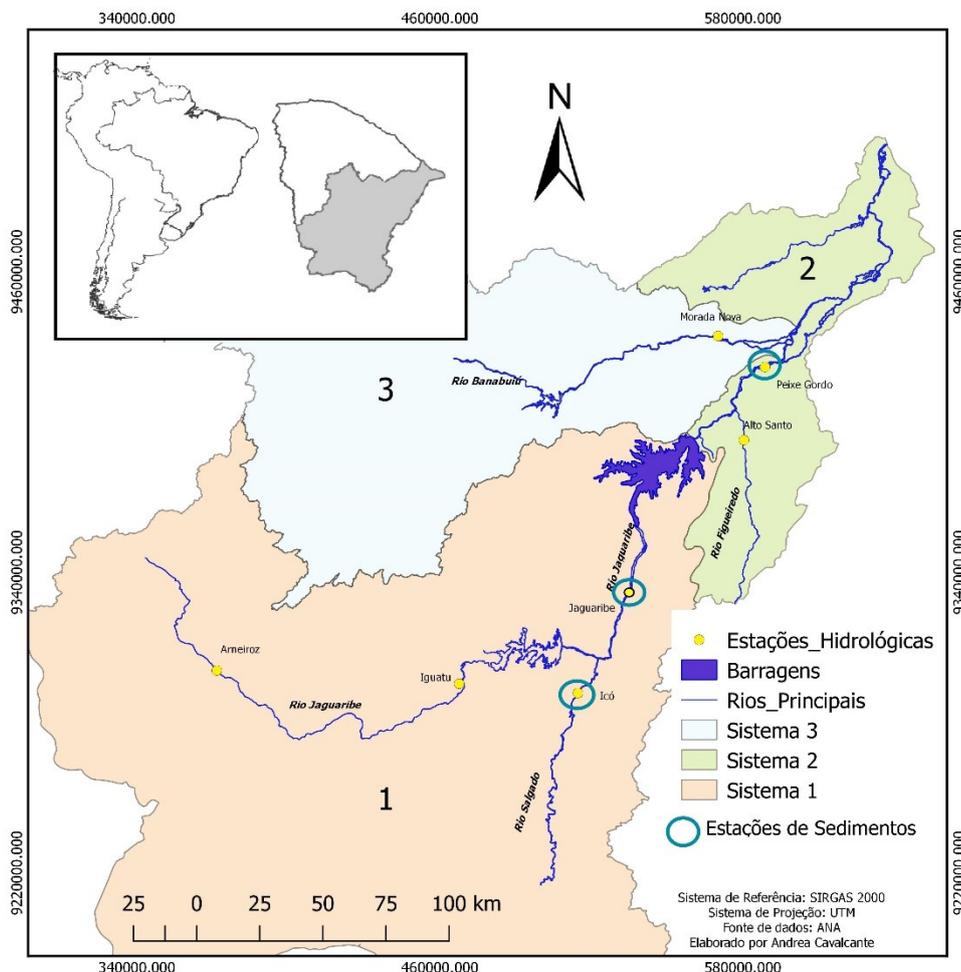


Figura 1: Localização da área e distribuição das estações de análises hidrológicas e sedimentológicas.
 Fonte dos dados: ANA/CPRM.

A pluviosidade do semiárido Brasileiro gira em torno de 750 mm ano⁻¹, podendo variar de 250 mm ano⁻¹ a 800 mm ano⁻¹ dentro da região Nordeste. Tal característica faz deste semiárido um dos mais chuvosos do planeta. Nas planícies do Nordeste da Austrália, por exemplo, chove em média 300 mm ano⁻¹, com taxas de evapotranspiração de 3.000 mm ano⁻¹ (TOOTH, 2000).

O Estado do Ceará possui mais de 93 % de sua área total inserida no semiárido brasileiro (ARAÚJO *et al.*, 2006). O clima tropical quente semiárido nessa região é caracterizado pela concentração de chuvas entre os meses de fevereiro e maio, tendo precipitação média anual de 600 a 900 mm ano⁻¹.

O rio Jaguaribe nasce na Serra da Joanhina, município de Tauá, possui uma extensão de 610 km, cujas declividades variam entre 1-0,3 m km⁻¹ do alto ao baixo curso, enquanto a largura varia de 60 m a 450 m. A descarga líquida média varia entre 6 m³ s⁻¹ (alto curso) e 50 m³ s⁻¹ (médio-baixo curso), estando caracterizada pela alta variabilidade de descargas, uma vez que o regime de precipitações se concentra entre os meses de fevereiro a maio (CAVALCANTE e CUNHA, 2011). Do ponto de vista geológico, a bacia se caracteriza pela predominância de terrenos cristalinos que induzem o alto poder de escoamento e baixa infiltração. A barragem do Castanhão localiza-se no médio curso do rio Jaguaribe (**Figura 1**) possui capacidade de 6,7 bilhões de m³, estando, na atualidade, responsável pelo controle de vazões no baixo curso, inclusive no controle de inundações que ocorriam com frequência nesta área.

2. Materiais e Métodos

2.1. Frequência de Fluxos

Foram utilizados dados de vazões diárias de sete estações na bacia do Jaguaribe, sendo quatro no rio Jaguaribe e três nos afluentes principais deste rio. As análises quanto aos intervalos de recorrência (IR) dos fluxos foram realizadas com base em Wolman e Leopold (1957), Leopold *et al.* (1964), Leopold (1994), utilizando a distribuição estatística de Gumbel Tipo I, cujos valores extremos são dados a partir de:

$$IR = n + 1/m$$

Onde: n é o número de vazões da série e m é a ordem de magnitude de cada vazão (LEOPOLD *et al.* 1964). IR é dado em anos.

2.2. Permanência de Fluxos

As permanências de fluxos foram calculadas a partir da compartimentação de classes de intervalos de vazões médias diárias para a verificação da frequência de cada intervalo, utilizando a metodologia aplicada por Aquino (2007). A priori os dados de vazões médias diárias da série foram compartimentados e organizados numa tabela por intervalos (definidos previamente por ordem de grandeza) sem levar em conta a cronologia da ocorrência. Feito isso, registrou-se o número de dados contidos em cada intervalo, os quais foram colocados em uma curva acumulada de frequência, gerando-se um gráfico (intervalo X percentual de tempo por ano). Com isso, mediante a aplicação de uma regra de três simples, obteve-se o número de dias do fluxo de cada intervalo por ano.

2.3. Descarga Efetiva para Transporte de Sedimentos em Suspensão

Embora a descarga de fundo seja considerada como principal na definição da descarga efetiva, neste trabalho utilizou-se a carga em suspensão nas análises a fim de observar o comportamento do transporte em suspensão em relação à frequência de fluxo, podendo esta descarga representar a descarga efetiva para cargas em suspensão.

Para definição das cargas em suspensão utilizou-se dados de concentração disponíveis de três estações (**Figura 1**), a partir dos quais foram definidas curvas de sedimentos, cujas equações geradas pelas mesmas foram correlacionadas às vazões diárias dos anos amostrados para obter a descarga em suspensão a partir da equação abaixo. Assim, a descarga efetiva, aqui entendida como morfológica, foi feita a partir da correlação entre permanência de fluxos e descarga de sedimentos em suspensão para os anos amostrados.

$$Q_{ss} = 0,0864 \times Q_{md} \times C_{ss} \quad (\text{t dia}^{-1})$$

Sendo: Q_{ss} , descarga sólida em suspensão; 0,0864, constante derivada a partir do tempo; Q_{md} , vazão média diária; C_{ss} , concentração de sedimentos em suspensão.

3. Resultados e Discussões

3.1. Frequência de Fluxos

O intervalo de $Q_{1,5}$ anos para recorrência de vazão de margens plenas tem sido referenciado pela grande maioria dos autores. Entretanto, acredita-se que esse intervalo não se aplique para as vazões de margens plenas (*bankfull*) na bacia do Jaguaribe, tendo em vista que os picos de cheia observados variam entre $900 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e $5.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, e no período de retorno sugerido (1,5 anos), as vazões estariam abaixo de $900 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, não caracterizando nível de margens plenas.

O intervalo de $Q_{2,33}$ anos tem sido usado, com frequência, para enchente média anual (LEOPOLD *et al.*, 1964) que é considerada a média de uma série que identifica a máxima de cada ano.

Para todas as estações observou-se que $Q_{2,33}$ mostra-se cerca de duas vezes mais elevada do que $Q_{1,5}$, o que não é comum observar na maioria dos rios, sendo estes valores sempre muito próximos. Acredita-se que essa variação possa estar relacionada à grande variabilidade de fluxo observada na bacia. De acordo com Heras (1973), a distribuição estatística de Gumbel tem sido aplicada em diversos canais efêmeros na região Mediterrânea. Entretanto, os valores extremos de Gumbel tipo I podem ser um tanto restritivos, podendo divergir no caudal da distribuição e no alto período de retorno em particular (LÓPEZ-BERMUDEZ *et al.*, 2002).

Como dados reais de vazão de margens plenas (*bankfull*) não foram coletados para as estações em análise, as cotas de $Q_{1,5}$ e $Q_{2,33}$ foram plotadas no perfil transversal de cada estação a fim de observar os limites dessas vazões no canal. Vale ressaltar que a vazão de *bankfull*, aqui analisada, pressupõe que seja àquela capaz de cobrir as barras

arenosas comumente observadas ao longo do canal, conforme sugerido por Wolman e Leopold (1957) e aplicado por Rocha (2002) para definir a planície aluvial ativa e o nível de margens plenas (Figura 2).

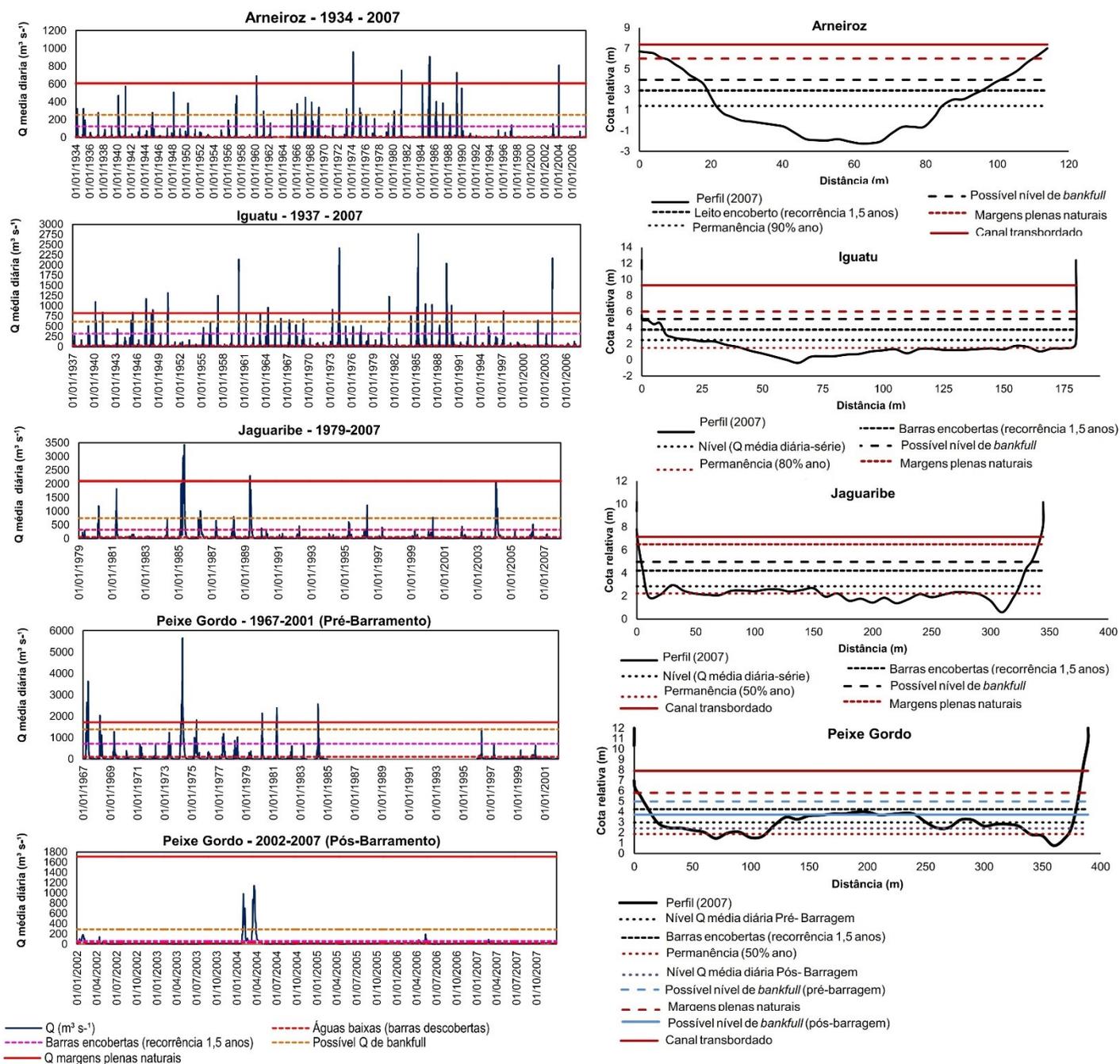


Figura 2: Correlações entre vazões e cotas pré-estabelecidas para diversos níveis plotados nas seções das estações do canal principal do rio Jaguaribe. Observar feições morfológicas encobertas em cada nível de vazão para cada seção. Os mesmos níveis estão plotados nos respectivos hidrogramas à esquerda. Fonte: Dados da pesquisa.

As maiores vazões observadas nas estações estão em cotas relativas acima de 6 m, enquanto $Q_{1,5}$ varia entre as cotas de 1,5 m e 4,6 m, dependendo da estação. Para $Q_{2,33}$ tais cotas variaram entre 3,7 m e 5,5 m (Figura 2).

Observando a estação de Peixe Gordo (Figura 2) como exemplo, tem-se que esta apresenta cota máxima observada acima de 7 m. Em 1974, maior vazão da série, esta atingiu $5.648 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ numa cota de 7,91 m.

O ano de 1985 também apresenta cota máxima acima de 7,50 m para a mesma estação. Para essa estação tem-se, ainda, que o intervalo de 1 a 3 anos apresenta vazões entre $600 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e $1400 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ no período pré-barramento, e de $36 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ a $235 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ no período pós-barramento, mostrando que esse intervalo de cheias deve ocorrer pelo menos a partir dos três anos.

Cabe destacar que a análise de recorrência, tanto de $Q_{1,5}$ como $Q_{2,33}$ para o período pós-barramento (segundo período), é mascarada pelo controle exercido pela barragem do Castanhão que só tem permitido abertura de comportas para efeito de segurança, quando da ocorrência de chuvas acima das normais. Por isso, a mesma apresenta certa inconsistência, uma vez que a recorrência passa a ser aleatória e dependente do controle da barragem.

Nesse sentido, a vazão máxima de $1.143 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, na cota 5,12 m observada no segundo período (pós-barramento), está relacionada a uma fase em que a barragem do Castanhão esteve com comportas abertas. Registros de vazões máximas medidas em campo em 2009 mostraram $1.500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ em cota de 5,74 m, o que nos leva a crer que esta seria uma possível cota de *bankfull* para a estação de Peixe Gordo.

Embora a maior parte das estações tenham os bancos arenosos cobertos em $Q_{1,5}$, considerou-se apropriado definir para todas as estações que a vazão de *bankfull* seria a de $Q_{2,33}$, uma vez que esta representaria uma média das máximas. Entretanto, por ser um dado de extrema relevância na análise da dinâmica morfológica de canais, é necessário que este possa ser coletado em campo para análise e comparação posterior.

3.2 Permanência de Fluxos

A partir das análises realizadas, observou-se que os fluxos abaixo de $10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ predominam em quase todas as estações, como é o caso da estação Arneiroz que passa cerca de 339 dias por ano com baixas vazões. Observando a **Figura 3**, nota-se que as médias diárias estão acima das vazões que de fato predominam no canal ($<10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) na maior parte do ano (50% a 90%), deixando a maior parte do leito exposto principalmente nas estações de Iguatu, Jaguaribe e Peixe Gordo (**Figura 2**).

As estações que aparecem com vazões abaixo de $10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, em cerca de 90% do ano, são Arneiroz e Alto Santo que estão em áreas de maior declividade e menor pluviometria. A estação de Jaguaribe aparece com vazões como estas em 50% do ano, dado que a partir dessa estação o rio se torna regularizado (**Figura 3**).

Com relação às máximas, em geral, as estações apresentam permanências em possíveis vazões de *bankfull* no intervalo de 1-3 dias, podendo variar para mais ou para menos de acordo com o ano. Como a vazão tende a aumentar com a área de drenagem é natural que a permanência de fluxos mais elevados seja também maior no baixo curso do rio com a entrada dos afluentes. Nesse caso, nas estações de Jaguaribe e Peixe Gordo (**Figura 1**) ocorre a diminuição de vazões mínimas que passam a dar lugar às vazões um pouco mais elevadas. Por essa razão, de montante para jusante, há uma tendência à diminuição do número de dias com vazões abaixo de $10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Para Peixe Gordo (pré-barragem), 60% das vazões estão abaixo de $10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, enquanto no segundo período (pós-barragem) este percentual é reduzido para 46%, denotando o aumento das mínimas. Esse fato é justificado quando se observa o intervalo seguinte ($10\text{-}19 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) em que a diferença entre os períodos pré e pós-barramento é ainda mais significativa. Note que antes da construção do barramento o rio detinha uma permanência de 11% no intervalo de fluxo de $10\text{-}19 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, enquanto no período pós-barramento o rio passa a ter uma permanência de fluxo de 43% no mesmo intervalo. Nesse sentido, o intervalo de vazões entre $5\text{-}19 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ passa a ter permanência em 90% do ano para essa estação (**Figura 3**).

Variações significativas são observadas com relação às vazões mais elevadas na estação Peixe Gordo que está à jusante do último grande barramento deste rio. A partir da série histórica, constatou-se também que vazões acima de $1000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ podiam ser experimentadas de 3-80 vezes por ano no período pré-barramento, dependendo do ano, podendo também ter ausência de vazões nos anos de seca. Para o período pós-barramento, vazões zero passam a ser inexistentes. Entretanto, vazões mais elevadas passam a ser controladas, não tendo sido registradas vazões acima de $1000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ por mais de 5 dias.

Ademais, observe que nas estações de Iguatu, Peixe Gordo e Icó as curvas apresentam forma bastante ascendente no final, o que representam as vazões de picos, mostrando que tais vazões acontecem em intervalos muito reduzidos, que muitas vezes não chegam a durar um dia inteiro (**Figura 3A**).

Correlacionando a frequência de fluxo às permanências verificou que, em média, a vazão de margens plenas naturais (nível das margens) é alcançada uma vez a cada 10 anos, podendo esse ritmo ser variável de modo a ocorrer décadas sem eventos ou décadas com mais de um evento dessa magnitude. Observe ainda que as margens plenas naturais são alcançadas na cota entre 6 e 6,5 m. Mesmo sendo eventos de muito curta duração (as vezes menos de um dia), tais registros estão entre os mais importantes para a geomorfologia fluvial (**Figura 2**).

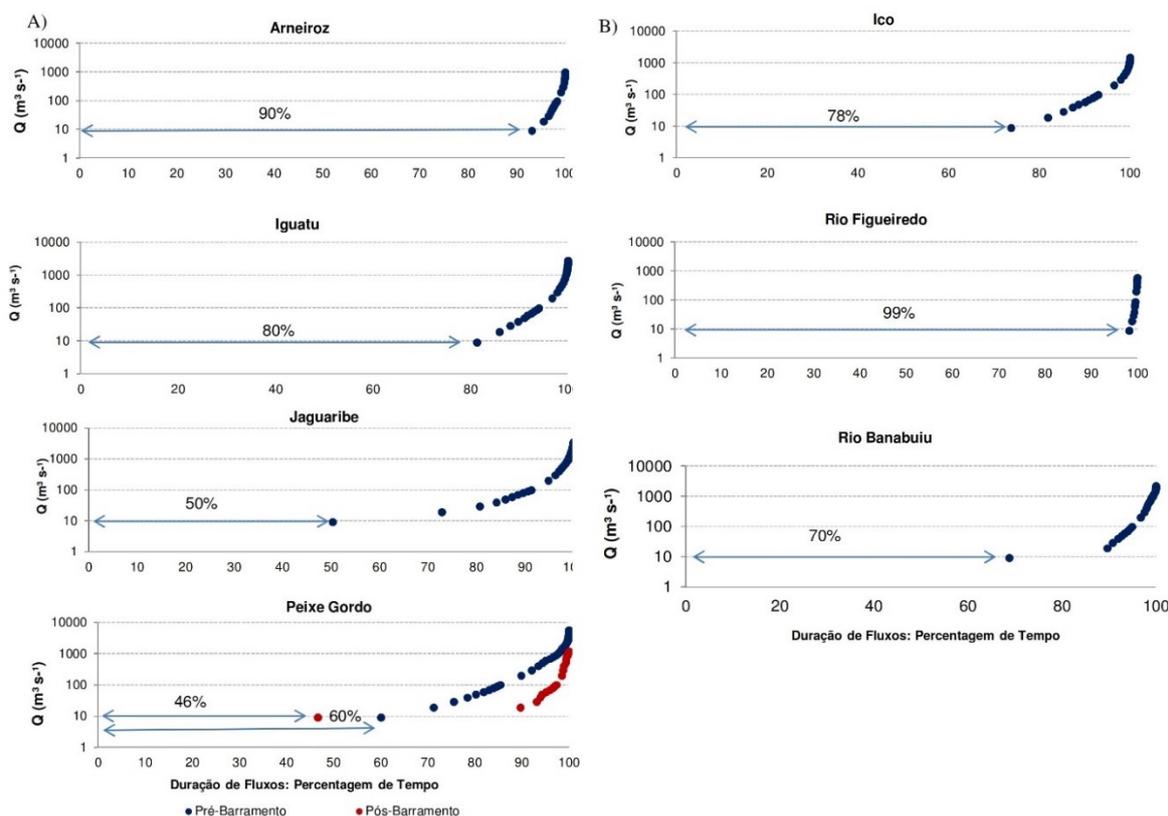


Figura 3: Permanências para os dois períodos distintos. A) Curvas de Permanência para as estações do canal principal do rio Jaguaribe B) Curvas de Permanência para as estações dos principais afluentes do rio Jaguaribe. Fonte: Baseado no histórico de vazões máximas – CPRM/ANA.

3.3. Descarga Efetiva (Transporte em Suspensão)

A correlação entre frequência de fluxos e descarga sólida em suspensão mostrou que a descarga efetiva (morfológica) para esse tipo de transporte concentra-se no intervalo de vazões entre 100-199 $m^3 s^{-1}$ (Figura 4). Entretanto, a análise da descarga de fundo necessita ser avaliada para melhor compor o quadro real de comportamento da descarga efetiva.

Foi observado que vazões mais baixas ($< 20 m^3 s^{-1}$) tendem a apresentar concentrações variadas num mesmo intervalo de vazão (Q), de modo especial à jusante da barragem. O que parece relevante é que até $20 m^3 s^{-1}$ as concentrações variam até um limite de $\sim 15 mg L^{-1}$ e após esse limite, começam a crescer até atingir um outro limite no qual se estabilizam. Isso pode ser visto na estação de Iguatu, na qual as taxas de concentração ao atingirem uma determinada vazão passam a ter valores relativamente constantes. O mesmo pode ser observado também para a estação de Peixe Gordo pós-barramento (Figura 1).

Na estação Peixe Gordo foi observado que após a construção da barragem, fluxos entre 10 e $20 m^3/s$ passaram a ser predominantes no canal. Isso refletiu em alterações na descarga efetiva nesse trecho que passou a ter, nesse intervalo, uma condição favorável para transporte.

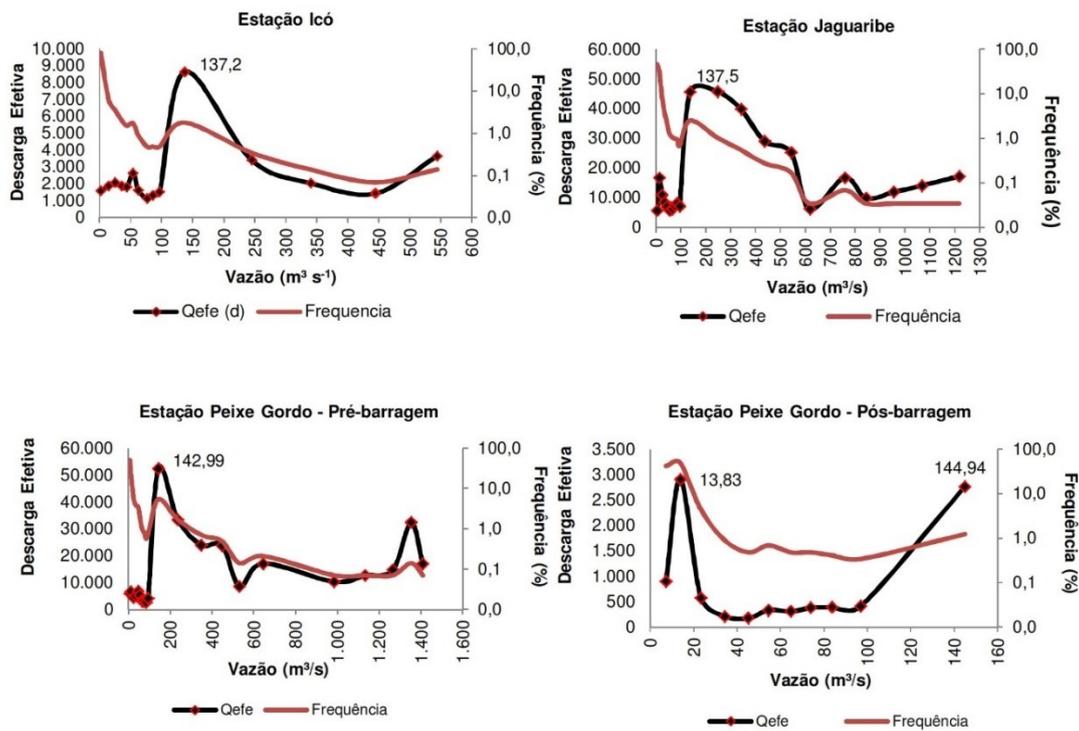


Figura 4: Descarga efetiva, considerando taxa de transporte em suspensão para estações no rio Jaguaribe. Ver **Figura 1** para localização das estações na bacia.

4. Conclusões

O estudo mostrou que a análise hidrológica e sua consequência nos processos de transporte e sedimentação servem diretamente ao entendimento do comportamento do canal, ajudando a prever e dirimir os problemas de uso e gestão dos recursos hídricos na bacia, a exemplo das questões relacionadas às inundações.

Embora as vazões com intervalos de 2,33 anos tenham mostrado maior aproximação para a recorrência de *bankfull*, aqui considerada como a vazão capaz de encobrir os bancos arenosos no meio do canal, no caso em torno de $\sim 1.500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, as análises históricas apontam para que esta recorrência ocorra a partir de três anos. Acredita-se que essa variação possa estar relacionada à grande variabilidade de fluxo observada na bacia, reflexo direto do padrão climático semiárido.

Em razão da alta variabilidade de descarga, há predominância de permanências abaixo de $10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ em praticamente todo o canal. Entretanto, com a inserção do Castanhão, tais permanências aumentaram para o intervalo de $10\text{-}19 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ no baixo curso deste rio, passando a permanecer desta forma em cerca de 90% do ano. Essa realidade, por um lado garante maior disponibilidade hídrica aos usos, mas por outro, altera os processos deposicionais e de transporte a médio-longo prazo.

Do ponto de vista do papel da descarga em suspensão na morfologia do canal, considerando os processos de transporte e deposição vinculados a este, os resultados indicam que as descargas de *bankfull* não são as maiores responsáveis por esse tipo de transporte, sendo o intervalo de vazão entre $100\text{-}199 \text{ m}^3/\text{s}$ o principal para os maiores volumes de sedimentos transportados em suspensão. Isso ocorre devido ao fato desse rio apresentar um atraso no pico de concentração de sedimentos suspensos em detrimento ao pico de vazão, evidenciando um efeito de histerese anti-horária nesse estudo. Tal fato se dá devido as particularidades morfológicas da bacia (arredondada), bem como da condição semiárida climática da área (forte irregularidade e má distribuição das precipitações), fazendo com que o tempo de permanência da vazão de *bankfull* ($\sim 1.500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) seja rápido ($\sim 3\text{-}5$ dias), não havendo tempo suficiente para o alcance do pico de concentração. Por essa razão, tais picos são alcançados quando a vazão já está em níveis de descida mais baixos. Além disso, com a inserção da barragem do Castanhão essa dinâmica passa a ser alterada, inserindo o intervalo de $10\text{-}19 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ como segundo maior responsável por esse transporte. Ressalta-se que além da barragem do Castanhão, uma sequência de outros pequenos barramentos (passagens molhadas) já existentes, acaba provocando um efeito de retroalimentação alterando o comportamento do rio, o que poderá levar à aceleração dos processos de assoreamento do canal a médio-longo prazo dada a nova condição de vazão que, embora tenha aumentado as mínimas, reduziu drasticamente os picos de descarga líquida. Com isso, a capacidade do canal tende a

ser diminuída, aumentando as taxas deposicionais e, conseqüentemente, a maior incidência de enchentes em períodos críticos de chuvas.

REFERÊNCIAS

- ACKERS, P.; CHARLTON, F.G. The slope and resistance of small meandering channels. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers**. 47, Supplementary Paper 7362S, 1970. p. 349-70.
- AQUINO, S. **Mecanismos de Transmissão de Fluxos de Água e Sedimentos em dois Grandes Rios Aluviais Impactados pela Atividade Humana: o Araguaia e o Paraná**. Maringá, 2007, 142p. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Maringá-UEM. 2007. 142p.
- ARAÚJO, J. C.; GUENTNER, A.; BRONSTERT, A. Loss of reservoir volume by sediment deposition and its impact on water availability in semiarid Brazil. **Hydrological Sciences Journal-Journal des Sciences Hydrologiques**. Wallingford, v. 51, nº 1, 2006. p.157-170.
- BARRY, J.J.; BUFFINGTON, J.M.; ASCE, P.G.M.; KING, J.G.; EMMETT, W.W. Performance of bed-load transport equation relative to geomorphic significance: predicting effective discharge and its transport rate. **Journal of Hydrology Engineering**. 2008. p. 601-615.
- CARLING, P. The concept of the dominant discharge applied to two gravel-bed streams in relation to channel stability thresholds. **Earth Surface Processes Landforms**, 13, 1988.p.355-367.
- CAVALCANTE, A. A.; CUNHA, S.B. Dinâmica Fluvial no Semiárido e Gestão dos Recursos hídricos: enfoques sobre a bacia do Jaguaribe-Ce. In: MEDEIROS, C.N.; GOMES, D.D.M.; ALBUQUERQUE, E.L.S.; CRUZ, M.L.B. (Org.). Os Recursos Hídricos do Ceará: integração, Gestão e Potencialidades. 1 ed. Fortaleza: IPECE, 2011, v. 1, p. 83-112.
- GRAF, W. **Fluvial Processes in Dryland Rivers**. The Blackburn Press. New Jersey, USA, 1988. 346p.
- HERAS, R. **Estudio de máximas crecidas de la zona de Alicante-Almeria-Málaga e de las lluvias torrenciales de octubre de 1973**. Madrid, Centro de Estudios Hidrográficos. Memeria diciembre. 1973. 12p.
- HESTER, G., CARSELL, K., FORD, D. Benefits of USGS Stream Gauging Program—Users and Uses of USGS Stream Flow Data. **National Hydrologic Warning Council**. 2006. (17 pp.).
- KNIGHTON, D. **Fluvial Forms and Processes: a new perspective**. London: Arnold, 1998. 383p.
- LEOPOLD, L.B. **A view of the River**. Harvard University Press. Cambridge, Massachusetts. London, England. 1994. 298p.
- LEOPOLD, L.B.; WOLMAN, M.Gordon; MILLER, John P. **Fluvial Processes in Geomorphology**. S. Chand and Company LTD. Ram Nagar, New Delhi-55. 1964. 536p.
- LÓPEZ-BERMEUDEZ, F.; CONESA-GARCIA, C.; ALONSO-SARRIA, F. Floods: Magnitude and Frequency in Ephemeral Streams of the Spanish Mediterranean Region. In: BULL, L.J.; KIRKBY, M.J. **Dryland Rivers – hydrology and Geomorphology of Semi-Arid Channels**. John Wiley e Sons, LTD. 2002, 388p.
- MA, Y.; HUANG, H.Q.; XU, J.; BRIERLEY, G.J.; YAO, Z. Variability of effective discharge for suspended sediment in a large semi-arid river basin. **Journal of Hydrology**. 388, 2010. p.357-369.
- ORNDORFF, R.L., WHITING, P.J. Computing effective discharge with S-Plus. **Comput. Geosci**. 25, 1999. 559565.
- ROCHA, P.C. **Dinâmica dos Canais no Sistema Rio-Planície Fluvial do Alto Paraná, nas proximidades de Porto Rico-PR**. Maringá, 2002. Tese de Doutorado. Programa de Ecologia de Ambientes Aquáticos Continentais da Universidade Estadual de Maringá – UEM, Maringá, 2002.
- ROY, N.G.; SINHA, R. Effective discharge for suspended sediment transport of the Ganga River and its geomorphic implication. **Geomorphology**. 227 (2014). P.18-30.
- TOOTH, S. Process, form and change in dryland rivers: a review of recent research. **Earth-Science Reviews**, 51, 2000. p.67-107.
- WILLIAMS, G.P. Bankfull discharge of rivers. **Water Resources Research**. 14 (6), 1978. p.1141-1153.
- WOLMAN, M.G. and LEOPOLD, L.B. River Flood Plains: some observations of their formation. **U.S. Geological Survey Professional Paper**. 282-C, 1957. p.87-107.
- WOLMAN, M.G.; MILLER, J.P. Magnitude and Frequency of forces in geomorphic processes. **J Geol.**, 68, 1960. p. 54-74.