

UM COEFICIENTE DE REGULARIZAÇÃO DA VAZÃO: QUANTIFICANDO A QUALIDADE DE CONDIÇÕES DE SUPERFÍCIES

Luiz Renato D'Agostini e Luiz Carlos Pittol Martini

Departamento de Engenharia Rural – CCA – UFSC

Rod. Admar Gonzaga, 1346 – Itacorubi – Caixa Postal 476 – CEP 88034-001 Florianópolis, SC

dagostin@mbox1.ufsc.br e lmartini@cca.ufsc.br

RESUMO

Pressupõe-se que as condições de manejo e de cobertura vegetal das terras são significantes para o regime da vazão em pequenas bacias hidrográficas. Então, e em analogia às relações entre energia e trabalho mecânico, as relações entre o padrão geométrico da bacia, as características de estímulos meteorológicos e as respostas hidrológicas têm seus significados sintetizados em um coeficiente de regularização da vazão: uma quantificação da qualidade das condições de superfície.

A QUESTÃO

A dinâmica hidrológica de superfície e sub-superfície é altamente afetada pelas características físicas da bacia hidrográfica, pelas características de estímulos meteorológicos e, com especial significação para os objetivos deste trabalho, também pelas condições de superfície, que cada vez mais resultam da intervenção humana sobre o meio.

A bacia hidrográfica é um sistema aberto e em regime termodinâmico afastado do equilíbrio. A magnitude de cheias e de estiagens representa, para o sistema aberto bacia hidrográfica, uma medida de distanciamento do estado estacionário. Do que é estabelecido pelo Teorema da Produção Mínima de Entropia (Nicolis & Prigogine, 1977), o custo entrópico de sustentação de um sistema reduz-se a um mínimo na medida que o sistema alcança o estado estacionário. Então, por analogia, tanto maiores e melhores serão as possibilidades à sustentação dos processos biofísicos que constituem e investem de significação o sistema bacia hidrográfica, quanto mais regulares forem os fluxos de entrada e de saída de matéria-energia.

Quando então as características físicas da bacia e o regime de eventos meteorológicos são dados, seria natural concordar que um desejável comportamento hidrológico da bacia hidrográfica, em função dessas condições de superfície, se refletisse em menores flutuações da vazão na foz.

Enfim, os cursos d'água integram, em seu comportamento, tanto os efeitos das razões que concorrem para maiores amplitudes e maiores durações de flutuações da vazão – maior distanciamento do estado estacionário de determinado sistema bacia hidrográfica – assim como integram os efeitos de causas que concorrem para a desejável regularização da vazão. Inclui-se, nessas razões e nessas causas, as decorrentes do uso e manejo das terras e as condições de superfície resultantes.

A responsabilidade pela qualidade e correspondentes implicações do uso e manejo das terras são, evidentemente, do mesmo ser humano que se percebe com direitos sobre o meio que usa e maneja. Então, e mesmo que apenas em termos relativos, identificando em quanto concorrem as condições de superfície para a promoção ou atenuação de flutuações de vazão em determinada bacia e sob determinado regime meteorológico, também ter-se-ia uma objetiva avaliação da qualidade das relações direitos/responsabilidade que os humanos mantém com esse meio.

É corrente inferir-se uma diferença de qualidade nas relações entre estímulos meteorológicos e comportamento hidrológico a partir dos hidrogramas a e b da Figura 1. A questão é poder atribuir dimensões objetivas a essa diferença, assim como investi-la de adequada significação para a bacia genérica e independentemente das particularidades dos estímulos meteorológicos. Assim, a partir de já bem compreendidas relações entre causas, resultados hidrológicos e fatores que afetam essas relações, o objeto desse trabalho é construir um indicador da qualidade de relações homem-meio físico. Essas relações homem-meio dizem respeito a toda e qualquer intervenção humana sobre o meio e que possa afetar a dinâmica hidrológica na bacia hidrográfica.

A ANALOGIA E A PRESSUPosiÇÃO

Admita-se tomar a vazão, assim como suas possíveis flutuações, como resultados de um processo. Então, como sugere a Figura 2, não se teria dificuldades em identificar causas ou razões para

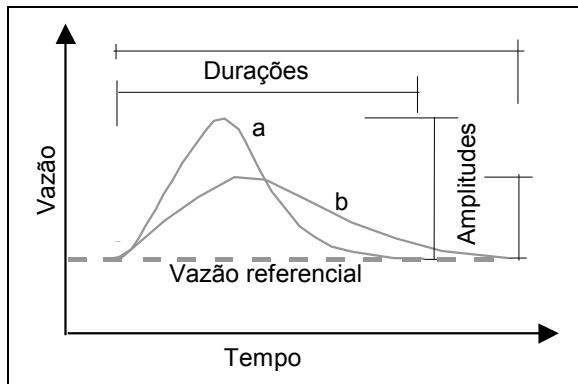


Figura 1. Amplitudes e durações de flutuações de vazão.

esses resultados. Essas causas ou razões – como a gravitação, a água de precipitação e de escoamento, entre outras – podem ser percebidas como capacidades de um sistema em produzir maiores ou menores resultados-vazão. Pode-se, então, por analogia, tomar esses resultados como sendo quantidades de trabalho que o sistema aberto bacia realiza sobre o meio externo, enquanto que aquelas causas podem ser tomadas como energia interna do sistema e a partir da qual ele pode produzir esse trabalho.

Parâmetros da bacia como a área, a declividade média, a altitude média, o comprimento médio da trajetória do escoamento superficial, assim como o comprimento dos cursos d'água, todos sabidamente importantes na determinação do comportamento hidrológico da bacia, já são estimados com aproximação aceitável (Strahler, 1964; Cristofolletti, 1974). Mas mesmo com a popularização de técnicas de modelagem digital de superfícies, essas estimativas sempre serão idealizações de planos e respectivas especificidades geométricas. Contudo, independentemente da forma, da declividade ou de qualquer outro parâmetro de uma bacia hidrográfica, certamente se pode, mesmo que só idealizadamente, pensar essa bacia como um conjunto de planos ideais (Figura 3a).

Então e como se pressupõe, também pode-se idealizar um plano com área A, altura média h , comprimento médio λ (e, portanto, comprimento total 2λ) e inclinação θ_λ (Figura 3b), que sintetizaria o significado de todos os planos ideais que se pode distinguir numa bacia e que se investem de significação às relações entre estímulos meteorológicos e comportamento hidrológico.

Definido o plano ideal e representativo da bacia tomada como um conjunto de planos ideais, toda a razão para a produção de flutuação de vazão que não resultar em efetiva flutuação, em con-

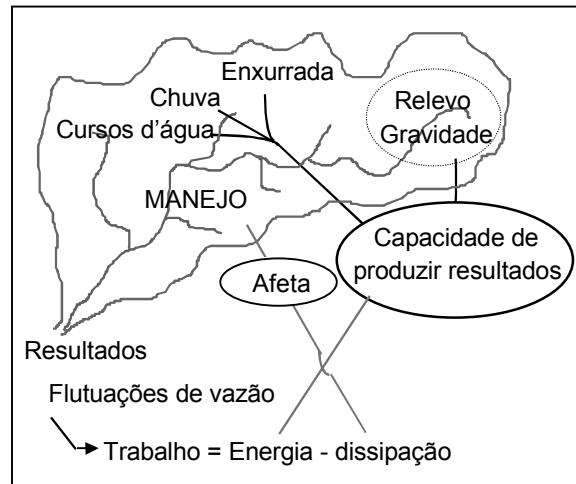


Figura 2. Relações entre estímulos, processos e resultados afetados pelas condições de superfície, em analogia às relações entre energia e trabalho.

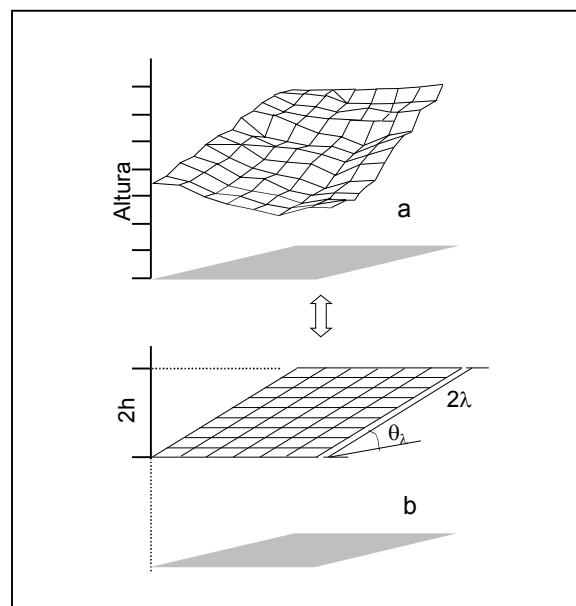


Figura 3. Planos idealmente caracterizáveis em uma bacia hidrográfica (a) e o plano ideal com altura média h , inclinação θ_λ e comprimento médio λ que os sintetiza em significado (b).

dições reais, então terá sido dissipada em decorrência das condições de superfície. Ou seja, quanto mais as condições reais de superfície afastarem-se da condição de plano ideal, que se define a partir das características morfológicas da bacia,

melhores serão os efeitos dessas condições reais de superfície para a atenuação da flutuação potencialmente possível. Igualmente melhores, então, serão os procedimentos que os humanos mantêm em sua relação com o meio e que afetam sua hidrologia.

CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS

Sabe-se que em processos reais não se pode verificar toda a energia E convertida em trabalho útil W. Analogamente, não se verifica toda a capacidade potencial ϕ de produzir vazão convertida em vazão Q e flutuação de vazão ΔQ . Então, assim como:

$$W = E - \eta \quad (1)$$

em que η é uma fração da energia E que não se converte em trabalho W:

$$Q + \Delta Q = (\phi + \Delta \phi) - (\omega + \Delta \omega) \quad (2)$$

em que ω e $\Delta \omega$ são, respectivamente, frações da capacidade potencial ϕ e de incrementos de capacidade $\Delta \phi$ que não se concretizam em vazão referencial Q e flutuação de vazão ΔQ .

É claro que tanto a vazão referencial Q quanto suas flutuações ΔQ são afetadas pelo módulo da capacidade ϕ e de seus incrementos $\Delta \phi$. Também é claro que tanto para a capacidade ϕ quanto para seus incrementos $\Delta \phi$, há uma indissociabilidade entre seus módulos e as características da bacia e o regime dos estímulos meteorológicos. Mas como o interesse aqui é poder-se inferir sobre a qualidade das condições de superfície cada vez mais decorrentes de intervenções humanas, e que podem afetar as relações entre estímulos meteorológicos e resultados hidrológicos, as relações a serem sistematizadas dizem respeito às flutuações ΔQ e incrementos $\Delta \phi$ e $\Delta \omega$, pois os módulos de Q, ϕ e ω dependem de condições que não decorreriam de intervenções rotineiras do ser humano. Ou seja, as relações de grandeza entre Q, ϕ e ω decorrem de razões permanentemente em expressão, em função do regime histórico de estímulos, das características físicas da bacia e da irreversibilidade de todos os processos reais. Então, para as relações de interesse:

$$\Delta Q = \Delta \phi - \Delta \omega \quad (3)$$

em que ΔQ , $\Delta \phi$ e $\Delta \omega$ representam, respectivamente, flutuações de vazão, de estímulo à produção de vazão e de dissipação desse estímulo.

Na Equação (1) tanto o trabalho W quanto a dissipação η de energia são frações dessa energia E. Então, dividindo-se a Equação (1) por E e assumindo-se que $(1 - \eta/E) = \beta$, pode-se reescrever aquela equação como:

$$W = E\beta \quad (4)$$

em que $0 \leq \beta < 1$ é um coeficiente de conversão de energia E em trabalho W. Então, por analogia, se reescreve a Equação (3) como:

$$\Delta Q = \Delta \phi \beta_h \text{ ou } \beta_h = \frac{\Delta Q}{\Delta \phi} \quad (5)$$

em que $0 \leq \beta_h < 1$ é um coeficiente de conversão de incrementos de causas de flutuações em efetivas flutuações de vazão.

O significado de uma flutuação de vazão, seja em relação as suas consequências ou em relação à qualidade das condições de uso e manejo do meio que concorrem a sua produção, não se reduz ao que está implicado em sua amplitude. Para os objetivos deste trabalho, a adequada significação de uma flutuação de vazão surge de uma adequada ponderação do produto entre sua amplitude e sua duração, quando também se puder levar em conta a amplitude e a duração do incremento de causas à flutuação. Dependendo do contexto em que uma flutuação de vazão se revela de interesse, poder-se-ia atribuir diferentes e relativas significações aos hidrogramas a e b da Figura 1. No entanto, e para simplificar, pressupõe-se aqui que o incremento relativo na amplitude se invista de maior significação do que o incremento na duração da flutuação. Ou seja, mesmo que possa não ser verdade para todas as situações em que o interesse humano se manifesta, seria menos desejável uma flutuação de elevada amplitude e curta duração do que o contrário. Implica, assim, que aqui valorizar-se-á distintamente o caráter intensivo e o caráter extensivo das relações entre estímulos meteorológicos, os fatores que os afetam e o comportamento hidrológico.

A incorporação da dimensão temporal ao resultado e às suas causas requer que se reescreva a Equação (5) como:

$$\beta_h = \frac{\Delta Q \cdot D_{\Delta Q}}{\Delta \phi \cdot D_{\Delta \phi}} \quad (6)$$

em que $D_{\Delta Q}$ é a duração da flutuação de vazão, $D_{\Delta \phi}$ é a expressão da duração de componentes do incremento $\Delta \phi$ e β_h agora incorpora também as relações entre essas durações.

As formas mais evidentes de incrementos $\Delta\phi$ positivos e negativos são, respectivamente, chuvas e déficit de chuva. Essas formas de $\Delta\phi$ possuem uma temporalidade facilmente quantificável. Mas, como a vazão na foz é resultado instantâneo de um processo de concentração de fluxos de escoamento, a amplitude e a duração de $\Delta\phi$ também devem ser caracterizadas como decorrentes de uma dinâmica em que parâmetros geométricos da bacia são importantes componentes desse incremento. Então, na medida que se reconheça que os incrementos $\Delta\phi$ estão representados não apenas por quantidades de água que entram ou deixam de entrar, mas também pela dinâmica de processos a que essas quantidades de água resultam submetidas uma vez no interior da bacia, impõe-se que também se reconheça correspondentes temporalidades naqueles processos.

Desde logo fica implícito, portanto, que a duração implicada em $\Delta\phi D_{\Delta\phi}$ envolve duas temporalidades distintas: uma diz respeito à duração do evento meteorológico (da chuva, por exemplo); a outra diz respeito à duração do processo de aceleração do escoamento na direção da foz. Então, reescreve-se a Equação (6) na forma:

$$\beta_h = \frac{\Delta Q \cdot D_{\Delta Q}}{\Delta\phi D_{\Delta\phi E} \cdot \Delta\phi D_{\Delta\phi A}} \quad (7)$$

em que $D_{\Delta\phi E}$ é a duração do incremento de entradas de água na bacia e $D_{\Delta\phi A}$ é expressão de temporalidades do processo de aceleração da água na direção da foz e que serão discutidas mais adiante.

É claro que um incremento $\Delta\phi$ tanto se investe de significação pela sua extensão quanto pela sua intensidade. Ou seja, os produtos $\Delta\phi D_{\Delta\phi E}$ e $\Delta\phi D_{\Delta\phi A}$ são expressões de produtos entre correspondentes componentes extensivos e componentes intensivos. No incremento de entrada, a extensão e a intensidade podem ser facilmente e respectivamente associadas ao produto da lâmina d'água de chuva pela área da bacia, e pelo produto da intensidade da chuva por essa mesma área. Já para a dinâmica de aceleração da água na direção da foz, o componente extensivo está associado à energia mecânica implicada na altitude média h da água sujeita ao escoamento, enquanto que o componente intensivo está associado a propensão da água em converter suas coordenadas de posição em coordenadas de velocidade. Propensão essa que, idealmente, só seria função da componente efetiva da aceleração gravitacional (relevo).

Componentes extensivo e intensivo também podem ser identificados e caracterizados no

resultado (flutuação de vazão). O intensivo corresponde simplesmente ao incremento da vazão; o extensivo corresponde à integração do incremento de vazão ao longo de toda a duração da flutuação. Então, o numerador e o denominador da Equação (7) incorporam significados que poderiam ser assim e respectivamente melhor explicitados:

$$\Delta Q D_{\Delta Q} \Rightarrow \Delta Q D_{\Delta Q_{\text{extensivo}}} \cdot \Delta Q D_{\Delta Q_{\text{intensivo}}}$$

e

$$\Delta\phi D_{\Delta\phi} \Rightarrow \Delta\phi (D_{\Delta\phi E_{\text{extensivo}}} D_{\Delta\phi E_{\text{intensivo}}} D_{\Delta\phi A_{\text{extensivo}}} D_{\Delta\phi A_{\text{intensivo}}})$$

É importante lembrar que, para a analogia em que as relações são sistematizadas (Equações 1 a 5), impõe-se poder reconhecer um significado de trabalho no produto $\Delta Q D_{\Delta Q}$, e de energia que produz esse trabalho no produto $\Delta\phi D_{\Delta\phi}$, independentemente de outros significados e correspondentes expressões que se puder reconhecer.

Caracterização de $\Delta\phi D_{\Delta\phi}$ como uma quantidade de energia

Conforme já se apontou, para poder-se inferir sobre as condições de superfície da bacia a partir de uma adequada caracterização do regime de vazão, também é necessário poder-se adequadamente caracterizar as causas desse regime e os componentes que nelas se possa identificar. Uma vez que na vazão tanto se reconhece importância na amplitude quanto na duração de uma flutuação, impõe-se que, analogamente, se caracterize nas causas as correspondentes capacidades em promover amplitudes e durações para interesses de sistematização de relações entre estímulos meteorológicos e resultados hidrológicos pode-se distinguir componentes intensivos e componentes extensivos, os quais podem assumir distintas importâncias àqueles interesses. Então, do que já se disse, e lembrando que a precipitação é um fenômeno de corrente de ações entre massas:

$$\Delta\phi D_{\Delta\phi E_{\text{intensivo}}} = \frac{d(iA)}{dt} \rho = \frac{dM}{dt} \quad (8)$$

e

$$\Delta\phi D_{\Delta\phi E_{\text{extensivo}}} = \frac{d(iA)}{dt} \rho \cdot D_{\Delta\phi} = \Delta M \quad (9)$$

em que i é a taxa de entrada de água ou intensidade do evento, ρ é a massa específica da água, A é a área da bacia e M é massa de água.

Do que se pressupõe anteriormente, uma elevada amplitude ΔQ da flutuação de vazão sempre será indesejável, com qualquer duração $D_{\Delta Q}$, e será ainda mais indesejável na medida que essa duração se estender. Significa que na caracterização de uma flutuação de vazão como um evento de interesse, o componente intensivo assume importância que se potencializa no significado que se quer atribuir ao produto $\Delta Q D_{\Delta Q}$. Portanto, também em relação às causas impõe-se que se possa reconhecer uma importância que se potencializa no produto entre os correspondentes componentes intensivo e extensivo. De fato, o significado de $\Delta \phi D_{\Delta \phi E}$ tomado como produto das Equações (8) e (9) sugere uma potencialização de importância do componente intensivo, uma vez que o mesmo é termo do componente extensivo também. Contudo e como trata-se de uma "potencialização de importância" na forma que se verá mais adiante, convém, por hora, que $\Delta \phi D_{\Delta \phi E}$ seja expresso simplesmente como:

$$\Delta \phi D_{\Delta \phi E} = \sum_{k=1}^n (i_k - i_m) \cdot \rho \cdot A \cdot \Delta t_k \quad (10)$$

em que Δt é a respectiva duração do evento com intensidade uniforme i_k ($k = 1, 2, \dots, n$) e i_m é a intensidade média de i . Propõe-se tomar i_m como a razão entre a lâmina historicamente precipitada ao longo de um ano e o tempo de um ano. O somatório de Δt_k define o módulo da duração $D_{\Delta \phi E}$.

Ao entrar no sistema bacia, a massa M de água implicada no incremento de entrada assume uma altitude média h em relação à foz. Essa altitude implica, por sua vez, uma quantidade de energia potencial ou, na analogia que se traça, uma capacidade de produzir vazão. Pela ação de gravitação, essa quantidade de energia é, por definição, potencialmente suscetível de ser convertida em energia cinética. A propensão à conversão dessa energia potencial em energia de movimento, quando desconsiderados os efeitos das condições de superfície, é função do Seno da inclinação θ_λ do plano sobre o qual a água potencialmente pode converter coordenadas mecânicas. Note-se que sobre um plano inclinado a componente efetiva da aceleração g será apenas uma fração dessa aceleração. Mas note-se também que, idealmente – inexistência de atrito decorrente de condições não-ideais de superfície – a quantidade de energia convertida, expressa na velocidade final da água sobre o plano de comprimento médio λ e inclinação θ_λ , também seria unicamente função de h . Enfim, reduções de efetividade da aceleração g na conversão ideal de coordenadas de posição em coordenadas de velocidade se traduzirão em aumentos da duração do processo de aceleração, de modo que a energia mecânica seria conservada. Ou seja, a quantidade de energia de velocidade no final de um plano inclinado

ideal de altura média h independe da inclinação θ_λ . Assim, de fato, um adequado significado para $\Delta \phi D_{\Delta \phi A}$, tanto para o componente extensivo quanto para o intensivo, pode ser derivado a partir de relações entre a ação gravitacional g , altura h , comprimento λ e inclinação θ_λ . No entanto, o seu significado como causa de flutuação de vazão não pode ser assimilado ao significado de uma simples quantidade de energia, uma vez que para a unidade de massa essa quantidade é dada de uma vez por todas a partir da altura relativa h . Mas o significado de $\Delta \phi D_{\Delta \phi A}$, ao qual se quer incorporado o significado físico da propensão à conversão de coordenadas mecânicas da água no interior da bacia hidrográfica, pode ser assimilado ao de uma relação temporal implicada em distintas e idealmente possíveis trajetórias desses fluxos de energia. Intuitivamente é fácil compreender-se que a propensão à conversão de coordenadas aumenta na medida que o ângulo de inclinação θ_λ aumenta, assim como então também é fácil inferir que aumenta a amplitude e diminui a duração da flutuação de vazão.

Para a água que assume uma altura relativa h no interior de determinada bacia hidrográfica, pode-se distinguir três durações de processos através dos quais se poderia pensar a água convertendo a sua energia potencial – implicada naquela altura – em energia de movimento. Uma primeira duração seria aquela associada a um processo em que a conversão de coordenadas ocorresse na vertical, ou seja, num processo em que a propensão à conversão de coordenadas é máxima. Essa duração – a menor "possível" – é aqui referida como duração referencial t_h e, de acordo com as equações fundamentais do movimento, é idealmente dada como:

$$t_h = \sqrt{\frac{2h}{g}} \quad (11)$$

em que t_h é tempo, h é altura e g é a gravidade.

Uma segunda duração seria aquela associada ao processo de conversão das mesmas coordenadas mecânicas h da água, mas agora sobre um plano ideal de comprimento λ e inclinação θ_λ . Essa duração será referida como duração ideal t_λ . Dado que então a componente efetiva da aceleração gravitacional seria função Seno do ângulo de inclinação θ_λ , a duração ideal seria dada como:

$$t_\lambda = \sqrt{\frac{2\lambda}{g \cdot \text{Sen} \theta_\lambda}} \quad (12)$$

em que t_λ é tempo e θ_λ é o ângulo de inclinação do plano de comprimento λ .

Uma vez que as relações de grandezas relativas entre a altura h , o comprimento λ e a inclinação θ_λ são dadas como:

$$\lambda = \frac{h}{\operatorname{Sen}\theta_\lambda} \quad (13)$$

pode-se reescrever a Equação (12) como:

$$t_\lambda = \sqrt{\frac{2h}{g \operatorname{Sen}^2 \theta_\lambda}} \quad (14)$$

permitindo definir uma relação de grandezas entre as durações t_λ e t_h como:

$$\frac{t_\lambda}{t_h} = \frac{\sqrt{\frac{2h}{g \operatorname{Sen}^2 \theta_\lambda}}}{\sqrt{\frac{2h}{g}}} = \operatorname{Sen}^{-1} \theta_\lambda \quad (\theta_\lambda \neq 0), \quad (15)$$

relação essa que é específica para determinado plano de altura relativa h , comprimento λ e ângulo de inclinação θ_λ .

Assim, o termo $\Delta\phi D_{\Delta\phi A}$ da Equação (7), como expressão de relações entre causas e possibilidade potencial de propensão ao movimento da unidade de massa de água na direção da foz, resulta proposto na seguinte equivalência:

$$\Delta\phi D_{\Delta\phi A} \Leftrightarrow hg \operatorname{Sen}^{-1} \theta_\lambda \quad (16)$$

ou seja, um produto entre uma quantidade de energia potencial (h) da unidade de massa e uma relação temporal de processos de conversão dessa energia de posição em energia de movimento, que é a inversa da propensão ($\operatorname{Sen}\theta_\lambda$) desse processo.

A terceira duração é aquela do processo real de conversão de coordenadas, ou seja, $D_{\Delta Q}$. É claro que essa duração é maior que as anteriores e decorre de complexas relações entre as características morfológicas da bacia, que levaram a determinada relação t_λ/t_h , assim como decorre das condições reais de superfície que o ser humano afeta. Nas relações aqui sistematizadas, essa duração só pode ser obtida empiricamente.

Então, para a capacidade potencial de produção de flutuação de vazão:

$$\Delta\phi D_{\Delta\phi} = \sum_{k=1}^n (i_k - i_m) \cdot A \cdot \rho \cdot \Delta t_k \cdot h \cdot g \cdot \operatorname{Sen}^{-1} \theta \quad (\text{Joule}) \quad (17)$$

em que todos os termos já foram definidos.

A Equação (17) caracteriza uma quantidade de energia, uma capacidade de produzir flutuações de vazão, nas quais identificamos amplitudes e durações. Significa que nessa equação pode-se distinguir taxas de entradas (amplitudes) e duração de "entradas" que causam e sustentam flutuações de vazão. O produto $(i_k - i_m)\rho A$ caracteriza uma taxa de entrada de massa. Claro que quanto maior o módulo dessa taxa de entrada, maiores as razões para elevadas taxas de saída (vazão). Já o produto $(i_k - i_m)\rho A \Delta t_k$, apesar de ser dimensionalmente extensivo, tanto contribui na definição de uma capacidade em produzir duração da flutuação, quanto contribui na definição da capacidade de produzir amplitudes da flutuação. É claro que quanto maior o tempo de entrada, maior poderá ser a duração da flutuação de saídas. Mas é também importante notar que na medida que o tempo de entrada aumenta, as razões para incrementos nas taxas de saídas também aumentam até um limite vinculado ao tempo em que toda a bacia estivesse contribuindo na composição do resultado vazão. O termo $\operatorname{Sen}^{-1} \theta_\lambda$, por sua vez, refere-se a um coeficiente de retardo ideal e implicitamente decorrente da forma da bacia idealizada como um plano de comprimento médio λ e inclinação θ_λ . Note-se, por exemplo, que para uma situação hipotética de $\theta_\lambda = 90^\circ$, idealmente então não existiria qualquer retardo e $t_h = t_\lambda = D_{\Delta\phi A} = D_{\Delta Q}$. Já quando $0 < \theta_\lambda < 90^\circ$, mesmo idealmente então $t_h < t_\lambda = D_{\Delta\phi A} < D_{\Delta Q}$.

Caracterização de $\Delta QD_{\Delta Q}$ como um trabalho

Do que já se disse:

$$\Delta QD_{\Delta Q_{\text{intensivo}}} = \frac{dV}{dt} \rho = \frac{dM}{dt} \quad (18)$$

em que V é volume, ρ é a massa específica da água, t é tempo e M é massa; e:

$$\Delta QD_{\Delta Q_{\text{extensivo}}} = \frac{dV}{dt} \rho D_{\Delta Q} = \Delta M \quad (19)$$

em que $D_{\Delta Q}$ é o tempo de duração da flutuação de vazão. Ressalte-se que, analogamente ao que ocorre com o produto entre $\Delta\phi D_{\Delta\phi \text{intensivo}}$ e $\Delta\phi D_{\Delta\phi \text{extensivo}}$, é clara a sugestão de uma potencialização do componente intensivo $(dV/dt)\rho$ quando do produto entre as Equações (18) e (19).

Já se disse também que a vazão ou flutuação de vazão na foz é um resultado instantâneo de um processo de acúmulo de escoamentos, cuja única razão causal é a gravitação. Equivale compreender-se a vazão como resultado da ação gravitacional g sobre uma massa M , levando-a a converter suas coordenadas de posição h em coordenadas de velocidade, e seguindo uma trajetória de comprimento médio λ e inclinação θ_λ . Então:

$$\Delta Q D_{\Delta Q} = \sum_{j=1}^n (Q_j - Q) \rho g D_{\Delta Q_j} \text{ (Joule)} \quad (20)$$

em que n é o número de vezes que ao longo de durações $D_{\Delta Q_j}$ ($j = 1, 2, \dots, n$) a vazão verificada Q_j é diferente da vazão referencial Q .

De acordo com a Equação (7) e com a analogia em que as relações são aqui sistematizadas, a razão entre as Equações (20) e (17) de fato seria um coeficiente de transformação de uma quantidade de energia (causas) em trabalho efetivo (flutuação de vazão). Porém, o significado que se quer atribuir a essa razão não se reduz ao de um coeficiente entre duas simples quantidades. Enfim, o significado de um distanciamento do estado estacionário de um sistema aberto, e ao qual se quer associar o regime de entradas e saídas de água na bacia hidrográfica, não se caracteriza pela quantidade de energia que circunstancialmente flui na sustentação do sistema, mas sim pelo regime de fluxo de energia que se verifica, tomado em relação ao fluxo mínimo e suficiente àquela sustentação. Assim, a razão entre os produtos amplitude x duração de resultados (flutuação) e amplitude x duração de causas deve expressar o significado de um grau de distanciamento, de "desvio" em relação a um referencial. Antes, porém, e como já se apontou, impõe-se caracterizar uma forma de expressar a diferença de importância que se reconhece entre os fatores do produto genérico amplitude x duração.

Diferenciando importâncias entre amplitude e duração

Uma diferença de importância é uma expressão de juízos de valor e, portanto, dimensionável de acordo com percepções e critérios adequados ao contexto. Significa que é arbitrário, por exemplo, atribuir-se maior importância à amplitude do que à duração de uma flutuação de vazão. A subjetividade do arbítrio, no entanto, não exclui a possibilidade de assegurar uma adequada significação e objetividade à construção conceitual e

metodológica que a encerre. Para o objetivo deste trabalho, basta que o artifício que permita atribuir diferenças de importância entre a amplitude e a duração da flutuação da vazão não produza distorções conceituais ou dimensionais.

Um pressuposto neste trabalho é o de que a significação de uma flutuação de vazão sempre será assimilável, de alguma forma, ao produto entre os módulos da amplitude e da duração da flutuação. A partir de um determinado volume implicado em uma flutuação, os módulos da amplitude e da duração dessa flutuação são, evidentemente, interdependentes, ou seja, uma redução de amplitude só é possível mediante um correspondente aumento de duração. Mas a questão agora é poder-se atribuir diferentes significados ao produto, quando alternativamente a amplitude ou a duração aumenta, e vice-versa, enquanto o módulo desse produto é conservado.

Ainda que se refira a um volume, o produto amplitude x duração pode ser assimilado a uma área A (Figura 4). É fácil notar que na medida que a forma da figura com área A se afasta do retângulo especial (quadrado), mais distante da proporcionalidade linear resultam os aumentos de uma das dimensões (duração l_d') e as correspondentes reduções da outra (amplitude l_a'), que é condição à conservação do módulo do produto amplitude x duração. Mas na medida que se admite poder-se atribuir diferentes significações a um mesmo volume implicado em flutuações de vazão com diferentes amplitudes e durações (Figura 1), impõe-se poder-se atribuir diferentes significados à mesma área A em função dos diferentes módulos dos lados l_a' e l_d' . Significa que, apesar do que é imposto pela geometria, uma eventual redução do "lado amplitude" com correspondente aumento do "lado duração" tem significado distingível de um eventual e igual aumento do "lado amplitude" e correspondente redução do "lado duração". Enfim, um incremento de duração da flutuação como custo de uma redução da sua amplitude pode ter um significado muito distinto de um incremento da amplitude como custo de uma menor duração. Já admitiu-se que, normalmente, um incremento de amplitude se investe de maior significação do que um proporcional incremento de duração. Significa que além de poder-se atribuir significação adequada a uma sempre desejável redução de amplitude da flutuação, mesmo que implicando aumentos de duração, também se quer assegurar maior importância relativa às variações do lado l_a' em relação às variações do lado l_d' . Isso remete à necessidade de identificar-se uma consistente relação entre grandezas relativas dos lados l_a' e l_d' em decorrência de correspondentes dilatações e contrações do quadrilátero $l_a' \times l_d'$. É necessário, portanto, introduzir um fator que opere de forma a produzir um valor decrescente no produto amplitude x duração na medida que a amplitude diminui e a duração aumenta.

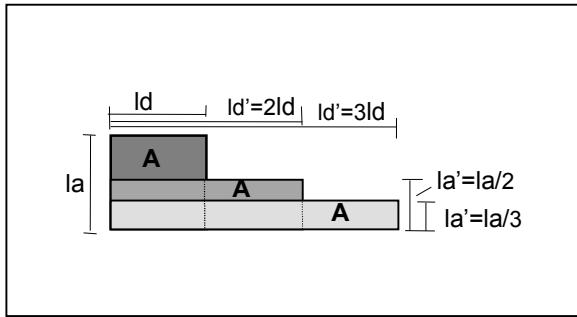
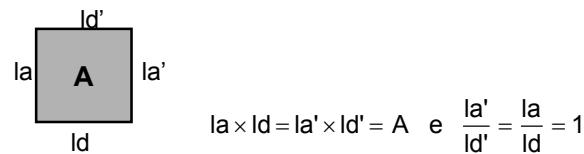
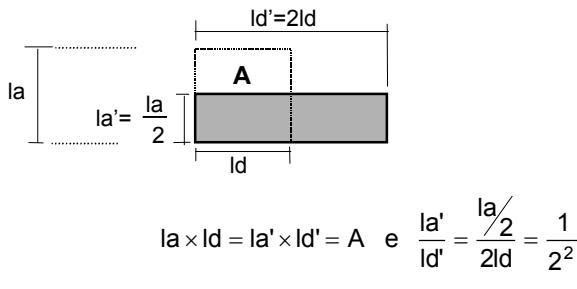


Figura 4. Conservação da área A do quadrilátero com lados referenciados em la e ld , quando, respectivamente, um lado contrai (la') e o outro dilata (ld').

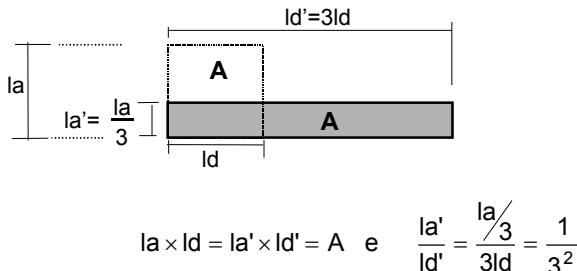
Retome-se, em favor da simplicidade, a situação em que o módulo geométrico da amplitude é igual ao da duração ($la' = ld'$). Admita-se, ainda, que nessa condição a importância relativa (la'/ld') é igual, ou seja:



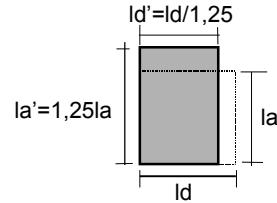
Para uma flutuação de vazão com igual volume implicado e assimilável à área A, mas com uma amplitude reduzida à metade de la, então:



ou então, para uma maior redução da amplitude:



Analogamente, para um aumento da amplitude:



$$la \times ld = la' \times ld' = A \quad \text{e} \quad \frac{la'}{ld'} = \frac{1,25la}{ld/1,25} = 1,25^2$$

Note-se que para a conservação do produto A, a grandeza relativa entre as dimensões dilatante e contractante varia com o quadrado do incremento. Novamente por analogia, o somatório de quadrados de vários incrementos pode ser tomado como o somatório de quadrados de diferenças que caracterizam um desvio, uma medida de dispersão com significado bem compreendido: o desvio padrão. Então, para assegurar uma diferença de importância relativa entre componentes intensivo e extensivo, na forma que já sugeriam os produtos entre Equações (8)x(9) e (18)x(19), é razoável propor-se que:

$$\text{significação de } \Delta QD_Q \Leftrightarrow \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (Q_j - \bar{Q})^2 \cdot D_{\Delta Q_j}}{n} \rho g h} \quad (21)$$

e, por simetria:

$$\Delta \phi D_{\Delta \phi} \Leftrightarrow \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n [(i_k - i_m)A]^2 \Delta t_k}{n} \rho g h \text{Sen}^{-1} \theta_\lambda}. \quad (22)$$

Note-se que somente termos de incremento com caráter intensivo (amplitude) são elevados ao quadrado. Vale também lembrar que o componente intensivo do processo de aceleração ($\Delta \phi D_{\Delta \phi A}$) agora é parte da relação temporal (duração) $\text{Sem}^{-1} \theta_\lambda$.

Mas agora o quociente da razão entre os termos das Equações (21) e (22) já não é matematicamente o mesmo daquele produzido pelos termos da Equação (7), ainda que refiram-se a uma mesma relação entre resultados (flutuações de vazão) e suas causas potenciais. Então, a razão entre as Equações (21) e (22), agora tomada só em analogia à Equação (7), pode ser compreendida como:

$$\beta_{hs} = \frac{\sqrt{\frac{n}{\sum_{j=1}^n (Q_j - \bar{Q})^2 \cdot D_{\Delta Q_j}}}}{\sqrt{\frac{n}{\sum_{k=1}^n [(i_k - i_m) \cdot A]^2 \Delta t_k}} \cdot \operatorname{Sen}^{-1} \theta_{\lambda}} \quad (23)$$

em que β_{hs} é um coeficiente da eficiência de fatores capazes de produzir flutuações de vazão, mas que agora também incorpora significação de importância arbitrada. Quanto mais próximo de zero o valor de β_{hs} , maior a eficiência das condições de superfície em atenuar o significado de flutuações de vazão potencialmente possíveis. E à medida que é derivado de relações entre incrementos de resultados ΔQ e correspondentes incrementos de causas $\Delta \phi$, β_{hs} revela-se uma objetiva referência da qualidade de relações que afetam as condições de superfície. Uma vez que tanto o numerador quanto o denominador da Equação (23) resultam de correspondentes divisões por $\rho g h$, não se pode pretender ainda e explicitamente reconhecer as dimensões de trabalho ou energia. As unidades de Q , D , λ , A e i são, respectivamente, $m^3 s^{-1}$, s , m , m^2 e ms^{-1} .

Expressão do coeficiente de regularização de vazão

Ao contrário do que pode sugerir o quociente β_{hs} e apesar de sua mensagem já não ser puramente física, a noção de eficácia de um processo – regularização de vazão – é mais facilmente associada à unidade do que ao valor zero. Assim, uma expressão mais inteligível para a adequada significação de um Coeficiente de Regularização da Vazão (CRV) seria:

$$CRV = 1 - \beta_{hs}$$

significando que quanto mais próximo da unidade resultar o valor de CRV, mais próxima do estado estacionário estará a dinâmica hidrológica de uma bacia hidrográfica. Claro que um valor unitário para CRV não pode representar uma meta, mas sim um referencial na caracterização de distanciamentos de um estado que o Teorema da Produção Mínima de Entropia reconhece como sendo termodinamicamente mais parcimonioso na “dissipação” de matéria-energia.

CONSIDERAÇÕES COMPLEMENTARES

Todo o significado da morfologia de uma bacia de área A resulta, para as relações de interesse deste trabalho, sintetizado nos termos de $\operatorname{Sem}^{-1} \theta_{\lambda}$. Essa síntese de significados não pode surpreender, mesmo porque é decorrente, e portanto coerente, com a pressuposição ilustrada na Figura 3. A função $\operatorname{Sem}^{-1} \theta_{\lambda}$ resulta de claras relações de grandezas entre comprimentos λ , inclinações θ_{λ} , alturas relativas h e durações vinculadas a esses parâmetros que, de acordo com a pressuposição apontada, sintetizam o padrão geométrico da bacia composta de muitos planos. Mesmo a densidade de drenagem, à qual se pode associar um maior ou menor tempo que a água leva para alcançar a foz, também já está considerada na derivação da altura relativa h e do comprimento λ , que se pressupõe serem deriváveis com exatidão suficiente por métodos disponíveis. De qualquer forma, a intenção não é se poder descrever processos com máxima fidelidade, e nem quantificar com exatidão parâmetros a eles associados. Interessa aqui muito mais poder-se investir de adequada e suficiente significação o que se pode pensar e medir da melhor forma possível. Em outras palavras, a intenção não é apontar para uma nova e importante questão ou complexas relações ainda por serem compreendidas, mas sim, pela forma que uma antiga questão é recolocada, assegurar ainda mais significação a relações cuja compreensão já não pode surpreender.

De um ponto de vista menos conservador, se poderia mesmo dizer que, mediante medidas suficientemente exatas e precisas, o CRV proposto permitiria comparar graus de adequação das condições de superfície em diferentes bacias hidrográficas. Mas, certamente, a proposição pode investir-se de maior significação se aplicada para pequenas bacias e em períodos de tempo adequadamente longos. Sublinhe-se, então, que, coerente com os objetivos, a proposição se revelaria adequada à avaliação e monitoramento da qualidade de relações homem-meio (uso e manejo das terras) em programas de desenvolvimento como aquele proposto em ICEPA/SC (1988) e habitualmente denominado “Projeto Microbacias”.

Exemplo: aplicação idealizada

Considere-se duas condições (a e b) de superfície de bacias hidrográficas geometricamente idênticas, submetidas a uma mesma e espacialmente uniforme precipitação sobre toda a sua área A de 800 ha e com um padrão geométrico que implica $\theta_{\lambda} = 8,5^{\circ}$. Dos registros de precipitações (Figura 5), tem-se que:

$i_l (\text{mmh}^{-1})$	ou	$i_l (\times 10^{-6} \text{ms}^{-1})$
25		6,94
40		11,11
35		9,72
50		13,89
35		9,72
50		13,89
25		6,94

como incremento de entrada de estímulo necessário à obtenção do denominador da Equação (23) e:

duração (h)	ΔQ_a	ΔQ_b
0,5	1,0	0,5
1,0	3,0	1,5
1,5	5,0	3,0
2,0	8,0	4,0
2,5	10,0	6,0
3,0	9,0	7,0
3,5	7,0	8,0
4,0	4,0	7,0
4,5	2,0	5,0
5,0	1,0	4,0
5,5		2,0
6,0		1,0
6,5		1,0

como flutuações de vazão, necessárias à obtenção do numerador da mesma Equação (23). Perceba-se que, com o intuito de tornar-se o exemplo ainda mais conservador, as condições de superfície não alterariam o volume do escoamento superficial.

Então, tomando-se ainda i_m como negligenciável diante dos valores de i_l ($i_l - i_m \approx i_l$):

$$\beta_{hs_a} = \sqrt{\frac{1^2 + 3^2 + 5^2 + \dots + 2^2 + 1^2}{10} \cdot 18 \times 10^3}$$

$$\sqrt{\frac{(6,94 \times 10^{-6} \cdot 8,0 \times 10^6)^2 \cdot 300 + \dots + (6,94 \times 10^{-6} \cdot 8,0 \times 10^6)^2 \cdot 300}{7} \cdot \frac{1}{0,148}} \approx 0,21$$

implicando que:

$$CRV_a = 1 - 0,21 = 0,79$$

e:

$$\beta_{hs_b} = \sqrt{\frac{0,5^2 + 1,5^2 + 3^2 + \dots + 1^2 + 1^2}{13} \cdot 23,4 \times 10^3}$$

$$\sqrt{\frac{(6,94 \times 10^{-6} \cdot 8,0 \times 10^6)^2 \cdot 300 + \dots + (6,94 \times 10^{-6} \cdot 8,0 \times 10^6)^2 \cdot 300}{7} \cdot \frac{1}{0,148}} \approx 0,18$$

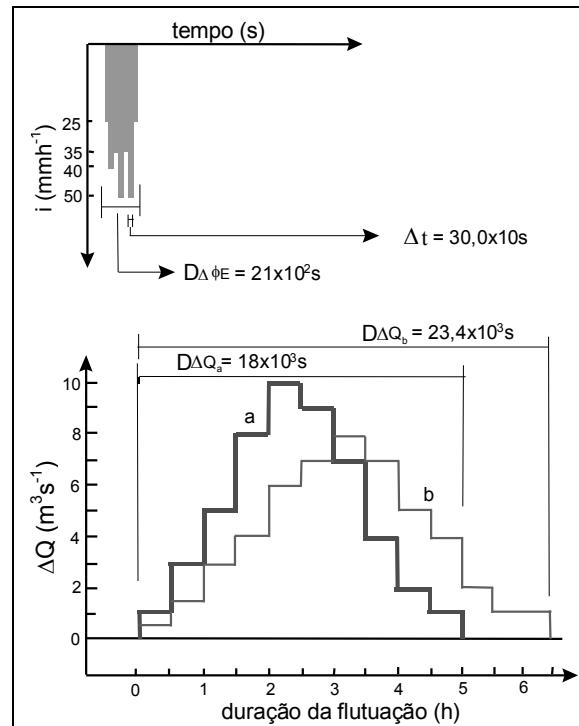


Figura 5. Estímulos e respectivas respostas a e b, para duas condições distintas e hipotéticas de superfície de bacias hidrográficas geometricamente iguais e apresentando o mesmo coeficiente de escoamento superficial.

implicando que:

$$CRV_b = 1 - 0,18 = 0,82$$

Então, para uma situação em que se reconhece uma maior importância relativa da amplitude da flutuação de vazão em relação à duração dessa flutuação, como foi assumido ao longo deste texto, a condição a revela-se uma condição de superfície que manteria o sistema bacia hidrográfica mais afastado do estado estacionário do que aquele que seria mantido no caso b. Em outras palavras, no que diz respeito à dinâmica hidrológica e suas implicações, as condições de superfície no caso b são mais desejáveis do que aquelas no caso a. A diferença de condição de manejo certamente já podia ser inferida a partir do próprio hidrograma (Figura 5), mas apenas qualitativamente.

Mais que prematuro, seria mesmo despropositado à abordagem aqui apresentada, pretender concluir desde já e para todas as situações que valores do CRV seriam adequadamente elevados

ou excessivamente baixos. Mas bastaria obter-se valores de CRV em bacias hidrográficas com “boas” e “má” condições de superfície para que, no contexto em que essas “boas” e “má” condições fossem percebidas, se pudesse identificar o que seriam “bons” valores de CRV.

REFERÊNCIAS

- CRISTOFOLLETTI, A. (1974) *Geomorfologia*. São Paulo, Edgar Blücher, Ed. USP.
- ICEPA/ESTADO DE SANTA CATARINA. (1988) *Projeto de recuperação, conservação e manejo dos recursos naturais em microbacias hidrográficas. Florianópolis*.
- NICOLIS, G. & I. PRIGOGINE (1977) *Self-organization in nonequilibrium systems*. New York, John Wiley & Sons, Cap. 3.
- STRAHLER, A. N. (1964) Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. In: Chow, V. T. *Handbook of Applied Hydrology*. New York, McGraw-Hill.

A Flow Regulation Index: The Quantification of Surface Quality

ABSTRACT

It is assumed that the status of both plant management and soil cover are significant in the flow regime for small watersheds. Therefore, and in analogy to the relationship between energy and mechanical work, the significances of relationships between the geometric pattern of the basin, the characteristics of meteorological stimuli and the potential and real hydrologic responses are expressed in a single factor: the quantification of surface quality resulting from man-environment relationships.