

## Custo da Incerteza na Macrodrenagem Urbana II: Influência do Erro na Estimativa do CN Sobre o Custo de Investimento da Rede

Daniel G. Allasia

*Instituto de Pesquisas Hidráulicas – UFRGS*

*hidrologia@gmx.net*

Adolfo O. N. Villanueva

*Instituto de Hidrología de Llanuras*

*avillanueva@faa.unicen.edu.ar*

Recebido: 01/02/05 – revisado: 07/06/05 – aceito: 15/12/06

---

### RESUMO

*Este é o segundo de uma série de dois artigos que mostram como a inexistência de dados hidrológicos, ou a pobre qualidade dos mesmos, têm como consequência redes de macrodrenagem urbana mal dimensionadas, resultando em grandes custos para a sociedade.*

*A partir dos resultados obtidos no primeiro artigo concluiu-se que o parâmetro CN representa uma das mais importantes fontes de erros na estimativa das dimensões das redes de macrodrenagem urbana. Desta forma foi utilizada a análise da sensibilidade mediante a técnica de Montecarlo para quantificar melhor o efeito de erros na estimativa do parâmetro sobre a vazão e custo da rede. A utilização do custo da rede como indicador permitiu o estabelecimento de uma linguagem comum com profissionais de outras áreas, principalmente de tomadores de decisão. Também foi quantificado quanto seria gasto adicionalmente no caso em que a rede fosse dimensionada e construída com parâmetros errados (custo de construção de uma tubulação auxiliar que evite alagamentos quando a principal foi subdimensionada, custo adicional em concreto quando a obra foi superdimensionada, etc.). Os resultados da análise aleatória mostraram que o erro usualmente cometido na estimativa do CN pode ocasionar um erro na estimativa da vazão da ordem de 30-160% e no custo da rede de 15-80% dependendo do cenário. Caso se a rede fosse construída com os parâmetros errados, que implicassem no subdimensionamento da mesma, seriam necessários R\$ 0,50 a 1,10 por cada real investido para recuperar a capacidade da rede.*

**Palavras-chave:** Drenagem Urbana; Incerteza; Macrodrenagem.

---

### INTRODUÇÃO

Numa série de dois artigos mostra-se como a inexistência de dados hidrológicos, ou a pobre qualidade dos mesmos, têm como consequência redes de macrodrenagem urbana mal dimensionadas, resultando em grandes custos para a sociedade. Estes artigos formam parte de uma pesquisa muito maior, parte da qual pode ser encontrada em Allasia (2002), disponível em <http://galileu.ipb.ufrgs.br/> aguasurbanas/.

No primeiro artigo da série foi realizada a análise de sensibilidade dos parâmetros de algumas das metodologias usadas nos projetos de redes de macrodrenagem urbana. Foi analisada a sensibilidade do da vazão e custo da rede de macrodrenagem a erros na estimativa dos parâmetros em função de possíveis erros na informação utilizada. Os possíveis

erros na estimativa foram adotados segundo sugestão da bibliografia (vide discussão no primeiro artigo). Neste segundo artigo serão realizadas novas análises sobre o parâmetro parâmetro CN determinado como o mais sensível.

A utilização do custo da rede como indicador, permitiu o estabelecimento de uma linguagem comum com outros profissionais, especialmente com tomadores de decisão, de forma de descrever-lhes com maior clareza as consequências da carência de informação.

As metodologias analisadas no primeiro artigo foram selecionadas por serem usualmente empregadas pelos projetistas de drenagem urbana para situações de escassez de dados. Elas são:

- Métodos de Clark e Hidrograma Unitário Triangular (SCS) para a propagação de vazão.

- Blocos alternados e relação intensidade-duração-freqüência (IDF) na determinação da chuva de projeto;
- “Curva Número” do SCS para determinação da precipitação efetiva;
- Dentro destas metodologias os parâmetros analisados foram:
- Parâmetro de forma ( $n$ ) do HTA sintético (HEC, 1974) no método de Clark;
- Tempo de concentração nas metodologias de propagação do escoamento superficial do SCS (Hidrograma Unitário Instantâneo) e Clark;
- Parâmetro de propagação do reservatório linear simples ( $K$ ), no método de Clark;
- Posição do pico da chuva, na distribuição temporal da chuva;
- Relação IDF usada no cálculo;
- CN no método da Curva Número (SCS).

Por conveniência, os valores de base na comparação para cada sub-bacia foram idênticos aos utilizados na Bacia do Arroio da Areia no Plano Diretor de Drenagem Urbano de Porto Alegre (Porto Alegre, 2002), descrita em detalhe no primeiro artigo da série.

Os resultados da análise de sensibilidade mostraram que existe baixa sensibilidade na aplicação das metodologias analisadas a erros na estimativa dos 4 primeiros parâmetros mencionados ( $t_c$ ,  $n$ ,  $K$  e posição do pico da chuva), e por outro lado, alta sensibilidade a erros na escolha do parâmetro CN e da relação IDF para o cálculo do hidrograma de projeto.

A influência da IDF foi analisada comparando o efeito de dois diferentes padrões de chuva que existem na cidade de Porto Alegre sobre a vazão e custo da rede. A análise mostrou que a variação do custo de implementação de uma rede de macrodrenagem urbana quando a rede é alternativamente dimensionada com dados de chuvas de postos a menos de 10 km um do outro, pode chegar a 100%. Isto chama a atenção para o uso das relações IDF em regiões urbanas com baixa densidade de postos pluviográficos, onde em caso de existir muita variação espacial da precipitação, esta poderia não ser detectada pela falta de registradores de chuva.

A IDF é um dado que depende dos registros de chuva existentes, ou seja, adotada do posto mais próximo da bacia (ou quanto mais, interpolada mediante polígonos de Thiessen, em caso de existir mais de um posto vizinho). Desta forma, a relação IDF é o único dos parâmetros analisados que não

pode ser melhorado com outros dados a serem recolhidos durante um projeto normal de drenagem urbana; por exemplo, fotografias aéreas. Dentre os parâmetros nos quais a incerteza poderia ser diminuída o CN é o parâmetro de maior impacto na vazão, e, consequentemente, no custo da rede. Assim, neste segundo artigo serão realizadas novas análises sobre o parâmetro CN.

## ANÁLISE DE SENSIBILIDADE MEDIANTE A TÉCNICA DE MONTECARLO

A análise da incerteza mediante a técnica de Montecarlo consistiu em gerar uma grande quantidade de valores do parâmetro CN para todas as sub-bacias da rede analisada, dentro do intervalo usual de variação do parâmetro, de forma de encontrar distintas combinações de condições na rede. Os valores do CN foram obtidos da superposição do valor de base do CN em cada sub-bacia com valores de erros aleatoriamente gerados.

Este tipo de análise permite obter uma idéia mais precisa da incerteza envolvida nos projetos de macro-drenagem. Na simulação aleatória é reproduzindo o processo de simulação de uma bacia sem dados: o hidrólogo estima o valor do parâmetro a partir da literatura e escassas informações, cometendo erros na estimativa por excesso e por defeito.

A principal limitação da metodologia de Montecarlo para o caso analisado reside na inexistência de conhecimento sobre a forma em que se distribuem os erros cometidos na estimativa do parâmetro. Por causa disso, foram supostas diversas alternativas de distribuição dos erros. As distribuições analisadas foram simétricas (normal e triangular) que levam em conta que existe a mesma possibilidade de superestimar que de subestimar o parâmetro, e assimétricas (triangular de baixa e alta assimetria) que levam em conta a idéia, comumente aceita, que na falta de dados é “melhor superestimar um pouco e ficar do lado da segurança”.

O valor do CN foi limitado superiormente em 97, devido a que raramente existem CN superiores em uma sub-bacia urbana tradicional (valores superiores correspondem a áreas completamente impermeabilizadas, que geralmente são pequenas e tratadas em forma distinta), no entanto, não se limitou inferiormente este valor.

Para a simulação adotou-se basicamente o mesmo intervalo de variação que na análise de sensibilidade analisado no primeiro artigo da série (variação para o CN de  $\pm 10\%$  do valor de referência),

com pequenas variações de acordo com a distribuição adotada.

Foram realizadas 600 simulações em toda a bacia do arroio da Areia a partir de igual número de conjuntos de parâmetros dentro do intervalo (cada conjunto é constituído por um valor de CN aleatoriamente gerado para cada sub-bacia). Foi verificado que um maior número de simulações não tinha efeitos visíveis sobre os resultados.

Foram analisados 3 cenários (Tabela 1): cenário de impermeabilidade média (IM), de impermeabilidade alta (IA), impermeabilidade alta com reservatório (IAR); ainda nos cenários de impermeabilidade alta com e sem reservatório foram consideradas duas possibilidades: que a rede fosse implantada sobre uma área sem canalização previa (IASr e IARsr), ou que a rede fosse uma ampliação da rede de macrodrenagem existente no cenário de impermeabilidade média (IAar e IARar).

Tabela 1 – Cenários analisados.

Sigla	Cenário
IM	Impermeabilidade Média (CNmédio=83)
IA	Impermeabilidade Alta (CNmédio=90)
IAR	Impermeabilidade Alta com Reservatório
IASr/IARsr	Impermeabilidade Alta sem e com Reservatório numa área sem canalização prévia ou onde seja substituída completamente a canalização existente
IAar/IARar	Impermeabilidade Alta sem e com Reservatório numa área na qual se amplia a capacidade da rede existente onde necessário.

Em muitos casos da vida prática, a rede atual já é insuficiente em diversos trechos para escoar as vazões, existindo nestes casos uma situação intermediária entre as aqui definidas como instalação de uma nova rede e a ampliação da mesma.

Os cenários IM e IA estão baseados nos cenários atuais e futuros de ocupação da bacia do arroio da Areia previstos no Plano Diretor de drenagem Urbana de Porto Alegre. Os cenários possuem um valor médio de CN (média do valor de todas as sub-bacias) de CN=83 e CN=90 respectivamente.

### Distribuições simétricas

Na análise das distribuições simétricas de erros foi considerada que os erros na estimativa dos parâmetros foram cometidos conforme as distribuições simétricas *normal* e *triangular*. Os resultados obtidos mostraram uma grande semelhança na res-

posta para ambas distribuições, obtendo valores ligeiramente menores (diferença inferior a 5%) para a distribuição triangular simétrica. Este fato permite a análise dos resultados obtidos com a distribuição normal, sendo a análise também válida para a distribuição triangular simétrica que consequentemente não será descrita em detalhe.

Para a simulação de erros normalmente distribuídos na estimativa do CN foi adotado a média igual a erro zero ( $\mu = 0$ ), e 95% de probabilidade de que o erro seja menor a 10%; já na distribuição triangular (onde os limites da distribuição são finitos) limitou-se o triângulo que caracteriza a distribuição com 10% de erro no CN.

Uma vez definidas as distribuições foi realizada a simulação chuva vazão nas bacias em cada um dos cenários analisados, para cada um dos conjuntos dos parâmetros. A média das vazões de pico de todas as simulações ficou levemente acima dos valores de referência (apesar de que foi suposto que os erros gerados teriam média 0) como consequência da resposta não-linear da metodologia a variações do CN.

A Figura 1 mostra como as vazões geradas nas sub-bacias vão propagando-se dentro do curso principal. Na Figura 1 é possível observar que conforme cresce o tamanho da rede a amplitude decresce, sendo isto consequência da compensação de erros por excesso e por defeito na estimativa do CN. Neste trabalho a amplitude é definida como a diferença entre os valores situados a  $\pm 1,96$  vezes o desvio padrão da média.

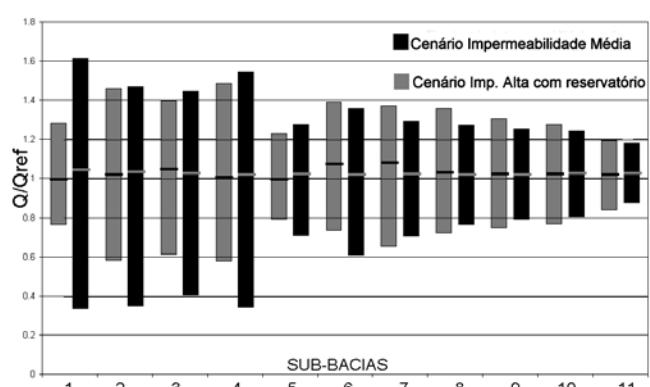


Figura 1 – Valor esperado (traço central) e amplitude da variação da vazão em distintos pontos da rede - simulação aleatória de erros no CN com distribuição normal para 600 simulações.

Esta é a principal diferença encontrada com os resultados fornecidos com a análise de sen-

sibilidade. Nesta última os parâmetros CN foram modificados uniformemente em todas as sub-bacias, não sendo observada nenhuma diferença na sensibilidade com o incremento do tamanho da rede. Na análise aleatória como o erro adota distintos valores nas sub-bacias (em algumas se subestima e em outras se superestima), as variações no hidrograma acabam-se compensando, reduzindo o efeito dos erros conforme aumenta o tamanho da bacia analisada.

No cenário IA (não incluído na figura) os resultados foram muito similares aos encontrados no cenário IM. No cenário IAR a vazão de pico foi menos sensível a erros na estimativa do parâmetro CN nas sub-bacias em que existe possibilidade de construção de reservatórios de detenção de grande porte. Entende-se por reservatórios de grande porte a aqueles cujo volume supera:

$$V \geq 0,02 \cdot A_{\text{Areabacia}} \cdot 2m$$

O custo de uma rede onde se utilizam reservatórios de detenção do tipo analisado (gramados e em locais públicos) é aproximadamente a metade do custo de uma rede sem reservatórios (este valor também foi encontrado durante o desenvolvimento dos Planos Diretores de Drenagem Urbana de Porto Alegre e Caxias do Sul (Porto Alegre, 2002; Caxias do Sul, 2001) já que o custo de amortecimento de vazão é significativamente inferior ao custo da rede de drenagem necessária para escoar a vazão amortecida. Isso sugere que nos cenários com reservatórios o impacto de erros na estimativa do CN não depende tanto do tamanho da sub-bacia, como do grau de controle da vazão mediante reservatórios.

Os resultados obtidos na análise da variabilidade da vazão de pico em função dos erros na estimativa do CN podem ser estendidos, de maneira geral, à análise do custo, levando simplesmente em conta que o custo da rede teve variações aproximadamente 50% menores que a vazão de pico analisada anteriormente.

Outros cenários testados correspondem a aqueles em que a rede futura é simplesmente uma ampliação da existente. Nestes cenários a capacidade da rede é incrementada adicionando uma tubulação paralela à existente com a capacidade necessária. Desta forma, devido à combinação de situações em que a rede devia ser ampliada muito (combinação de erros em excesso) com situações onde a rede devia ser ampliada muito pouco (combinação de erros por defeito) o resultado foi bastante variável, embora sempre mostrando que os custos da rede são sempre maiores na rede afetada por erros (como mínimo 30%). Este valor é ainda maior no cená-

rio de ampliação de uma rede com reservatórios de detenção (cenário IARar). Isto é importante devido ao fato de ser usual hoje em dia o projeto de reservatórios de detenção ou "piscinões" para o controle das enchentes, principalmente pelo seu baixo custo a respeito de outras opções. Os resultados aqui apresentados mostram que pequenos erros no CN poderiam falsificar estes valores.

### Distribuições assimétricas.

As distribuições assimétricas representam melhor a forma em que os parâmetros são escolhidos pelos projetistas quando existe escassez de informação devido a que existe uma clara tendência a superestimar os parâmetros (ou assimetria positiva na distribuição).

A assimetria introduzida na análise foi classificada, em função dos limites do intervalo de variação dado aos valores, em:

- Assimetria leve: Foi considerado que erro poderia adotar valores entre -7,5 e +12,5%.
- Assimetria forte: Foi considerado que erro poderia adotar valores entre -5% e +15%.

Na Figura 2 são comparados os valores resultantes da simulação chuva-vazão nas sub-bacias com os parâmetros CN gerados mediante as distribuições triangulares simétricas e assimétricas.

Conforme esperado, a medida que cresce a assimetria o valor médio da vazão de pico cresce, mantendo-se quase constante a amplitude.

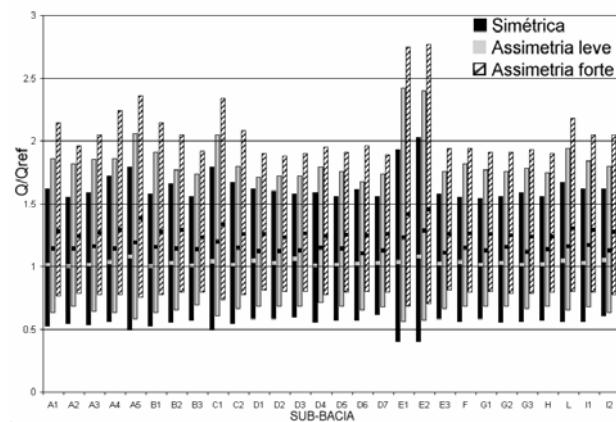
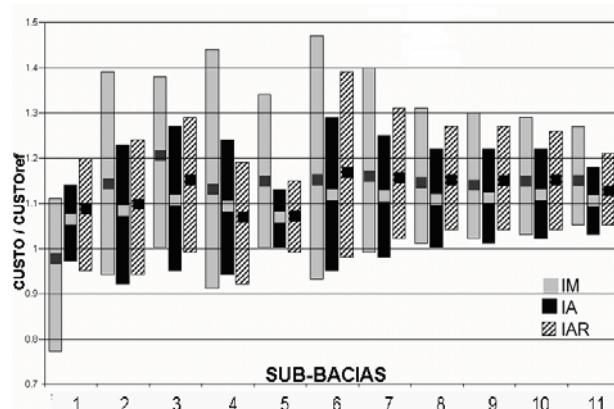


Figura 2 - Comparação dos valores esperados das vazões e amplitude das simulações para as distribuições simétricas e assimétricas no exutório das sub-bacias simuladas (bacias de menos de 1 km<sup>2</sup>) para 600 simulações.

A análise dos custos (Figura 3) mostra que no caso de cometer erros com distribuição assimétrica forte na estimativa do parâmetro CN o custo da rede é incrementado 10 a 20%, ou, dito de outra forma, o custo da rede estimado sem levar em conta os erros estaria subestimado em média entre 10 e 20%. O desvio deste valor é particularmente importante nas regiões de cabeceira (bacias mais à esquerda na Figura 3, embora a primeira sub-bacia de cabeceira analisada teve comportamento atípico devido que originalmente o conduto estava sobre-dimensionado devido a que os tubos comercialmente seguem um escalonamento de diâmetros)



**Figura 3 - Valor esperado e amplitude da variação do custo da rede quando é modificado o valor do parâmetro CN segundo uma distribuição assimétrica forte (simulação concentrada.- 11 sub-bacias)**

Para o caso de leve assimetria foi encontrada uma situação intermediária entre a mostrada nas distribuições com assimetria forte e nas simétricas (o custo da rede estimado sem levar em conta os erros estaria subestimado em média 8%).

#### Comparação dos resultados da simulação aleatória

A análise da incerteza mediante técnicas de geração de números aleatórios foi particularmente útil nas sub-bacias maiores para mostrar a forma em que a compensação de erros diminui o impacto de erros na estimativa do CN, embora tenha confirmado que existe alta sensibilidade da simulação em macrodrenagem urbana (utilizando a metodologia já descrita) a erros na estimativa do CN.

Se considerarmos que a simulação aleatória representa melhor o que acontece na realidade, pode afirmar-se para os erros normalmente cometidos na estimativa do CN, existe uma superestimativa no valor do custo de investimento da rede de:

dos na estimativa do CN, existe uma superestimativa no valor do custo de investimento da rede de:

- 18% para a instalação de uma nova rede no cenário de impermeabilidade média (cenário IMsr) (isto significa aproximadamente R\$ 8.000.000 para a bacia do arroio da Areia com 12km<sup>2</sup> de área e investimento em tubulação avaliado em R\$ 42.000.000 e considerando um erro de 10%);
- 15% (R\$ 9.000.000) para instalação de uma nova rede no cenário de alta impermeabilidade (custo de referência R\$ 65.000.000);
- 30% (R\$ 9.000.000) para ampliação da rede existente no cenário de alta impermeabilidade (custo de referência R\$ 32.000.000);
- 20% (R\$ 10.000.000) para redes novas com reservatórios de detenção no cenário de alta impermeabilidade (custo de referência R\$ 47.000.000);
- entre 50 e 80% (6.000.000 a 8.000.000) para ampliação de redes com reservatórios no cenário de alta impermeabilidade (custo de referência R\$ 12.000.000).

#### ANÁLISE DO IMPACTO DA INCERTEZA NO CUSTO DE INVESTIMENTO DE UMA REDE DE MACRODRENAGEM URBANA

A análise do impacto da incerteza no custo de uma rede de macrodrenagem procura quantificar quanto seria gasto adicionalmente no caso em que a rede fosse dimensionada e construída com parâmetros errados. Este valor será aqui denominado “sobrecusto”. O sobrecusto é apresentado como percentagem do custo da rede “corretamente” projetada.

Esta análise diferencia-se da análise da sensibilidade (tanto simples como aleatória) porque a análise de sensibilidade avalia simplesmente como muda o custo ao variar o CN, e não qual é o impacto no custo de tomar a decisão errada na escolha do CN. Dentro deste item podem mencionar-se por exemplo, custo de construção de uma tubulação auxiliar que evite alagamentos quando a principal foi subdimensionada, gasto a mais em concreto desnecessariamente, etc. No final da análise poderá ser respondido qual é o investimento adicional por cada real investido numa obra mal dimensionada devido a erros na estimativa do CN.

A quantificação foi realizada estimando:

- Quanto seria gasto por construir uma seção maior que a necessária (no caso que essa estimativa equivocada do parâmetro tenha significado o superdimensionamento da seção). Neste caso o resultado pode ser entendido como centavos investidos erroneamente por cada real investido na rede de macrodrenagem;
- Quanto deveria ser gasto para instalar uma nova tubulação que corrija a deficiência da instalada (no caso em que tenha ocorrido o subdimensionamento da seção devido à estimativa errada do parâmetro). Neste caso o resultado pode ser entendido como centavos a ser investidos para instalar a nova tubulação por cada real já investido.

Nesta análise não foram incluídos na estimativa do custo: os eventuais danos nas construções, tempo perdido, custos de limpeza, desgaste político por ter que reconstruir uma obra, o agravamento da situação para Tr maiores aos de projeto, etc., devido à inexistência de dados para sua avaliação. A não inclusão destes valores implica uma subestimativa do sobrecusto.

O custo relativo de construção de uma seção maior que a necessária foi avaliado como a relação entre o custo estimado para a rede dimensionada com as vazões de pico superestimadas e os custos de rede para os valores "certos" (nota: neste estúdio a vazão de projeto "certa" é a vazão de referência) conforme a expressão 1 (o numerador é o sobrecusto indicado acima):

$$\frac{\text{Custo da rede com vazões maiores à referência} - \text{Custo rede com vazões ref}}{\text{Custo rede com vazões ref}} \quad (1)$$

Para os casos em que a vazão de pico ou o volume foram subestimados, deve-se avaliar o custo adicional causado pelo sub-dimensionamento de um sistema de drenagem pluvial. De forma simplificada, se considera que esse custo é igual ao custo de construir a rede necessária para escoar a diferença entre a capacidade do sistema construído ( $Q_{dim}$ ), e a vazão de projeto "certa" ( $Q_{proj}$ ).

No entanto, como esse custo vai acontecer em algum momento no futuro, deve ser transformado para valores atuais utilizando a formula de valor presente líquido (equação 2).

$$VPL_i = F \cdot \frac{1}{(1+d)^N} \quad (2)$$

onde:  $VPL_i$  é o valor presente,  $F$  o valor futuro (ou custo no tempo em é detectada a falha),  $d$  a taxa de desconto ou valor de depreciação do dinheiro (adotada d=12% por ser o valor exigido pelos organismos internacionais de investimento), e  $N$  tempo em anos entre o "presente" e o tempo "futuro".

Para transformar os valores futuros em valores atuais, seria necessário conhecer em que momento no futuro acontece esse custo. A seguir é descrito o procedimento a ser utilizado para lidar com isso.

A primeira simplificação introduzida consiste em admitir que o custo vai acontecer no ano em que o erro no projeto seja detectado. No entanto, é impossível prever em que ano o erro no projeto será detectado. De esta forma, será considerado de que em cada ano existe uma determinada probabilidade de detecção do erro no projeto.

A somatória (durante a vida útil da rede), do produto da probabilidade de detecção da falha vezes o custo em valores presentes líquidos, fornece o "valor esperado do custo causado pelo subdimensionamento de um sistema de drenagem pluvial" em valores presentes líquidos (VECVPL – equação 3).

$$VECVPL = \sum_{i=1}^{\text{vida útil}} PDi * VPLi \quad (3)$$

onde  $PDi$  é a probabilidade de que a falha seja detectada no ano  $i$ , e  $VPLi$  é o valor presente líquido de um custo no ano  $i$ .

O VECVPL pode ser entendido como o valor mais provável do custo de construir a rede necessária para escoar a diferença entre a capacidade do sistema construído ( $Q_{dim}$ ), e a vazão de projeto "certa" ( $Q_{proj}$ ), dado que a falha seja detectada pelo menos uma vez durante a vida útil da estrutura.

Vejamos então como se calcula a probabilidade  $PDi$ . O primeiro passo é definir que significa detectar a falha. Um critério comum é considerar que um sistema de drenagem pluvial falhou quando não foi capaz de escoar a vazão gerada por uma tormenta com tempo de retorno menor que o de projeto. Em outras palavras, se o alagamento é produzido por uma tormenta com um tempo de retorno maior que o de projeto, não é falha.

Portanto, para que o erro no projeto seja detectado em um ano determinado, devem simultaneamente acontecer varias coisas:

- 1) Em esse ano tem que acontecer uma tormenta capaz de produzir uma vazão maior que aquela para a qual foi dimensionado o sistema (Qdim). Se todas as vazões forem menores, não haveria alagamento. Como a urbanização avança impermeabilizando o solo, a chuva que produz Qdim num determinado ano é menor ou igual à chuva que produz Qdim no ano anterior. Para conhecer o valor exato desta chuva deve-se conhecer como evolui a urbanização no tempo.

Chamado de TRTD ao tempo de retorno da tormenta que produz Qdim nesse ano, obtémse a probabilidade dessa chuva como ( $PTD=1/TRTD$ ), (probabilidade de uma tormenta maior ou igual);

- 2) Essa tormenta tem que ter um tempo de retorno menor ou igual que o de projeto (TRTP,  $PTP=1/TRTP$ ), (probabilidade de uma tormenta maior ou igual), já que do contrário, o alagamento não seria considerado falha de projeto e sim parte do risco aceito no dimensionamento;
- 3) Uma tormenta com essas características ( $TRTD < TR < TRTP$ ) não pode ter acontecido em anos anteriores, ou a falha já teria sido detectada.

A probabilidade de que a falha seja detectada no ano i pode então ser escrita como:

$$PD_i = \underbrace{(P_{TD,i} - P_{TP})}_{\text{Probabilidade 1}} * \underbrace{[1 - (P_{TD,i-1} - P_{TP})]}_{\text{Probabilidade 2}} * \dots * [1 - (P_{TD,1} - P_{TP})] \quad (4)$$

onde: PTP = probabilidade da tormenta de projeto; PTD<sub>i</sub> = probabilidade da tormenta que produz Qdim no ano i; Probabilidade 1 = Probabilidade de que aconteça no ano i, a chuva que produz a falha do sistema; Probabilidade 2 = Probabilidade de que NÃO aconteça nos anos anteriores a i, a chuva que produz a falha do sistema.

Considerações:

- 1) Para uma determinada chuva, (neste caso chuva de igual TR) as vazões de pico crescem no tempo como consequência do cres-

cimento da urbanização (aumento da impermeabilidade); ou, enunciado de outra forma, por causa do acréscimo da urbanização ao longo do tempo (dos anos) uma determinada vazão vai sendo gerada por tormentas cada vez menores (menores TR).

É assim, que PTD<sub>i</sub> = probabilidade da tormenta que produz Qdim, cresce no tempo.

- 2) Existe uma relação bi-univoca entre vazão e chuva (uma determinada chuva gera uma determinada vazão, o qual é uma simplificação da realidade, onde a vazão depende de outros fatores, como por exemplo a umidade inicial).
- 3) A série de precipitações é estacionária, e, portanto, a relação IDF não muda no tempo.

## Resultados

Foi avaliado o impacto da distribuição uniforme de erros na estimativa do CN na bacia. Isto significa quantificar qual é o impacto sobre o custo quando são cometidos os mesmos erros em todas as sub-bacias na estimativa do parâmetro. Embora seja uma situação difícil de acontecer na prática, a análise serve para fornecer uma idéia do impacto das incertezas no custo de uma rede de macrodrenagem.

Por comodidade foram avaliados os mesmos cenários que na análise de sensibilidade com os métodos aleatórios.

### a) Cenário de impermeabilidade média

No Cenário de impermeabilidade média (IMsr), procurou-se avaliar quanto seria gasto erradamente na implantação de uma rede de macrodrenagem, quando no momento do projeto existe um cenário de impermeabilidade baixa e é considerado um cenário futuro de IM. Foi considerado que a passagem de um cenário de impermeabilidade baixa a um cenário IM em 25 anos (vida útil da rede) acontece com taxas de crescimento da população menores a 5% ao ano.

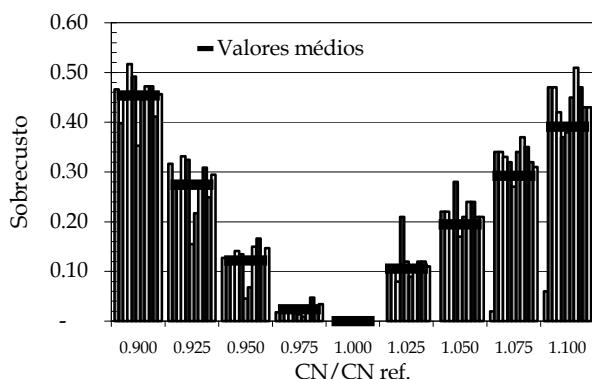
A figura 4 apresenta o impacto no custo da rede de macrodrenagem causado pelo erro no CN. É possível ver que nas situações extremas (erro de 10% na estimativa do CN), é necessário investir 45 centavos por cada real já investido (o que representaria R\$ 19.250.000 na rede da bacia do arroio da Areia).

No caso de subestimativa do parâmetro, o impacto do erro no custo resulta ligeiramente superior ao caso de superestimativa do parâmetro. A diferença de custo poderia ser muito maior por quanto não foram computados uma série de itens: por exemplo, danos à infra-estrutura, tempo perdido, custos de limpeza, desgaste político por ter que reconstruir uma obra, etc. por falta de dados para sua avaliação.

*b) Cenário de impermeabilização alta*

*b1) Crescimento a taxas normais da impermeabilização*

Para a passagem de um cenário de impermeabilização média a um cenário de impermeabilização alta (IA) os valores foram muito similares aos encontrados no caso anterior. Este último caso é mais comum em áreas periféricas de cidades situadas em solos relativamente impermeáveis, por exemplo Caxias do Sul – RS, onde o cenário de planejamento inicial é de alta impermeabilização.



**Figura 4 - Impacto no custo de do erro no CN no cenário atual (IM) para as 11 sub-bacias analisadas. A linha horizontal indica o valor médio.**

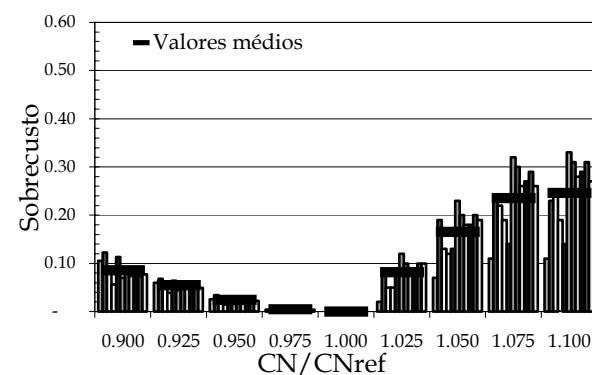
*b2) Crescimento a taxas altas da impermeabilização*

Outro cenário possível é aquele determinado por altas taxas de crescimento da impermeabilização. Foi considerado que a evolução da impermeabilização com taxas de crescimento de população superiores a 5% ao ano; em outras palavras, se prevê a passagem de uma situação de impermeabilização baixa a outra de impermeabilização alta em pouco tempo.

Esta situação embora tenha acontecido no passado como consequência do forte processo de urbanização, é difícil de acontecer novamente no futuro em grandes áreas, no entanto, pode aconte-

cer em pequenas bacias, por exemplo, devido à implantação de um grande empreendimento que acelera a ocupação. Também poderia acontecer o aumento rápido da impermeabilização sem crescimento de população, como é o caso da construção de um estacionamento asfaltado.

Na Figura 5 é apresentado o impacto do erro no custo para este cenário. Pode-se observar que dada a grande diferença de impermeabilidade entre os cenários inicial e projetado, os erros na estimativa do CN levam muito tempo até serem evidentes, e consequentemente têm probabilidade muito baixa de ser detectados.



**Figura 5 - Impacto no custo do erro no CN no cenário IAsr - crescimento explosivo da impermeabilização.**

Este cenário também exemplifica o caso em que a rede atual é composta de tubulações pequenas e a rede projetada de tubulações muito grandes, de forma que as vazões geradas pela tormenta de projeto demorarão tempo em superar à de dimensionamento, se o dimensionamento estiver errado.

Novamente é necessário lembrar que os valores baixos para o caso de subestimativa do parâmetro CN podem ser consequência de ter subestimado os custos, por falta de informação para avaliar uma série de impactos indiretos como ser os transtornos ao tráfego, custo político, indenizações, etc.

*b3) Ampliação da rede*

Os cenários anteriores consideraram a substituição da rede existente por uma nova sem aproveitamento da capacidade existente. Nos casos em que rede existente é ampliada para atender os aumentos de urbanização (figura 6) para um erro de superestimativa de 10% no CN seriam investidos sem necessidade 60 centavos por cada real de custo

da rede (isto significa R\$ 19.500.000 no total da rede do Arroio da Areia), e no caso de subestimativa de 10% no parâmetro CN, serão necessários 70 centavos por real de custo da rede para recuperar a capacidade da mesma (R\$ 21.000.000 na totalidade da rede).

Também é gasto 60 centavos por real investido se é cometida uma superestimativa de 10% no valor do CN se a ampliação da rede acontece num cenário de rápido crescimento da impermeabilidade.

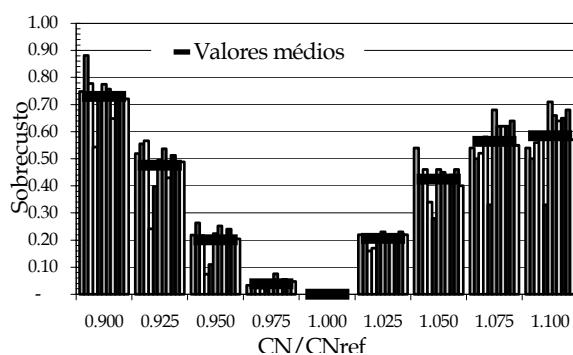


Figura 6 - Impacto no custo do erro no CN no cenário IAAr - crescimento normal da impermeabilidade.

Já no caso de subestimativa de 10% no valor de CN há um sobrecusto de somente 15 centavos por real investido devido à grande diferença de impermeabilidade entre os cenários inicial e projetado. Lembrando que possivelmente este valor pequeno devido à não consideração de alguns itens no custo pela falta de dados para sua avaliação.

#### b4) Redes com reservatórios de detenção.

Um outro cenário importante de se analisado é o cenário configurado por redes que utilizam reservatórios de detenção para amortecer os picos das cheias. Se as vazões foram subestimadas devem considerar-se duas novas alternativas possíveis: os casos nos quais existe possibilidade de aumento da capacidade dos reservatórios (ou construção de novos) para corrigir os erros de dimensionamento; e os casos onde não há esta possibilidade. O caso em que não há possibilidade de ampliação da capacidade dos reservatórios provavelmente é a situação mais comum nas redes de drenagem das cidades brasileiras, onde o espaço urbano é escasso.

A situação analisada na Figura 7 corresponde àquela em que não existe possibilidade de au-

mento dos reservatórios; ou seja, devido a que os reservatórios foram dimensionados no limite do espaço físico disponível, no caso em que aconteceu a subestimativa da vazão e consequente subdimensionamento da rede, a ampliação da capacidade da rede para corrigir o erro deverá ser realizada mediante a instalação de uma rede auxiliar paralela.

Como o aumento de capacidade no caso de subestimativa do valor do CN é realizado sobre a rede de drenagem, os valores resultam similares aos encontrados em redes sem reservatórios (investimento adicional 40 centavos por real para um erro de 10%). No segundo caso, em que existe possibilidade de ampliação da capacidade dos reservatórios, o sobrecusto é influenciado pelo próprio custo dos reservatórios. Desta forma o menor custo possível acontece na possibilidade de construção de reservatórios simplesmente escavados, com fundo de grama e localizados em áreas públicas (10 centavos por cada real investido para um erro de 10% no CN – Figura 8). Se a ampliação acontece sobre reservatórios em locais expropriados ou reservatórios subterrâneos, com custo 3 e 7 vezes superior aos anteriores os valores pulam para 15 e 25 centavos por real investido para um erro de 10% no CN.

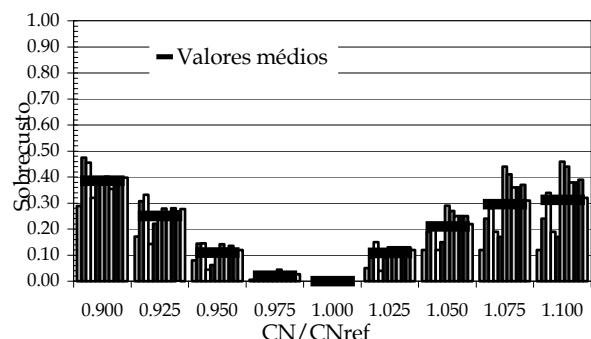
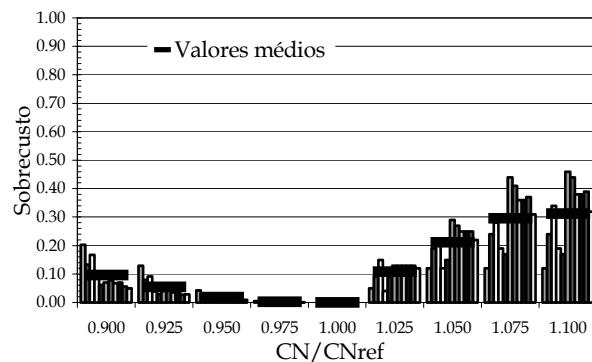


Figura 7 - Impacto no custo do erro no CN no cenário IARsr - crescimento normal da impermeabilidade.

Desta forma é possível observar que ainda com os reservatórios significativamente mais caros (7 vezes o valor dos reservatórios gramados), é vantajoso tentar aproveitar ao máximo a capacidade dos mesmos para o controle dos excessos, pois resultam uma opção mais barata que ampliar a rede. Isto sem considerar a vantagem adicional de não transferir os impactos a jusante. No entanto, a ampliação dos reservatórios nem sempre é possível. Na análise observou-se que no caso de erros na estimativa do CN superiores a 5%, o volume necessário para a

ampliação dos reservatórios supera o volume utilizado pelos reservatórios já existentes. Por exemplo, numa sub-bacia analisada o volume necessário para compensar uma subestimativa de 5% no volume é de aproximadamente 7.500m<sup>3</sup>, sendo este volume igual aos utilizados pelos reservatórios já existentes. Este fato torna muito difícil encontrar tal quantidade de espaço para ser utilizada com reservatórios, visto que na maioria das cidades o espaço urbano livre disponível é escasso, devendo consequentemente proceder a ampliação da rede de macrodrenagem.

É importante destacar que na análise econômica não foi levado em conta o custo de manutenção dos reservatórios nem das redes de macrodrenagem por falta de dados para sua avaliação.



**Figura 8 - Impacto no custo do erro no CN no cenário IARsr – impacto absorvidos por reservatórios.**

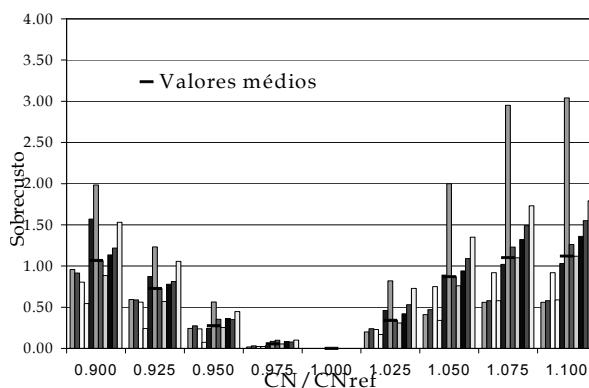
Também pode ser observado na figura 8 que pequenas subestimativas do CN são compensadas com custo praticamente nulo com o aumento dos reservatórios e que a maior incidência no custo da ampliação dos reservatórios foi nas sub-bacias menores.

Nos casos de superestimativa do CN e consequente superestimativa das vazões numa rede com reservatórios, o impacto no custo das incertezas foi significativamente mais baixo que no caso sem reservatório (entre a metade e um terço dos valores) tanto em valores absolutos como relativos. Isto é consequência que a rede superdimensionada possui um custo significativamente menor que uma rede sem reservatórios. Neste caso 30 centavos são gastos erroneamente por cada real investido, contra 45 a 60 centavos nas redes sem reservatórios.

Nos cenários em que a rede futura é uma ampliação da existente, acontece algo similar ao observado na análise de sensibilidade mediante técnicas aleatórias. Devido à combinação de situa-

ções em que a rede devia ser ampliada muito com situações onde a rede devia ser ampliada pouco, o resultado foi bastante caótico, embora sempre indicando o alto custo a ser pago por cometer erros na estimativa do CN (Figura 9). Entre as causas do comportamento caótico citamos as diferentes capacidades de ampliação de reservatórios, em função do espaço disponível; redes com mistura de necessidades de pequenas e grandes ampliações; redes de pequenas dimensões, onde qualquer aumento de dimensões das tubulações devido ao escalonamento comercial representa um alto custo, etc.

Pode ser observado na Figura 9 que quando são cometidos erros de 10% na estimativa do CN, é preciso investir R\$ 1,1 por cada real investido para recuperar a capacidade da rede. Isto significa R\$ 12.000.000 na bacia.



**Figura 9 - Impacto no custo do erro no CN no IARsr - crescimento normal da impermeabilidade.**

## Conclusões

Na série de dois artigos apresentada foi analisada a incerteza associada aos distintos parâmetros de algumas das mais utilizadas metodologias de simulação de macrodrenagem urbana.

Dos parâmetros analisados, no primeiro artigo foi indicado que o CN e a IDF utilizada para a geração da chuva de projeto foram os parâmetros mais sensíveis a erros na sua estimativa. Como geralmente a IDF é um "dado" que depende dos registros de chuva existentes, e que não pode ser melhorado na duração normal de um projeto de drenagem urbana, pode-se considerar que o CN é o parâmetro de maior impacto na vazão, e consequentemente no custo da rede, dentre todos os analisados.

Foi então analisada em detalhe a incerteza associada à estimativa do parâmetro CN mediante técnicas de geração de números aleatórios. Esta técnica consistiu em gerar 600 estimativas de valores do parâmetro CN para todas as sub-bacias da rede analisada, dentro do intervalo usual de variação do parâmetro. Com a simulação aleatória se procura reproduzir o processo normal de dimensionamento de uma rede de macrodrenagem sem dados: o hidrólogo estima o valor do parâmetro a partir da literatura e escassas informações, cometendo erros na estimativa por excesso e por defeito.

Como consequência resultou que, para os erros usualmente cometidos na estimativa do CN, a vazão de pico varia entre 30 e 160% e os custos da rede variam entre 15 e 80% dependendo do cenário. Estes valores são significativamente menores aos encontrados na análise de sensibilidade tradicional, em que os parâmetros CN de todas as sub-bacias são modificados em forma uniforme. No entanto, verificam que as metodologias analisadas são muito sensíveis a erros na estimativa do parâmetro CN.

Por outro lado foi realizada a quantificação do que seria gasto adicionalmente no caso em que a rede fosse dimensionada e construída com parâmetros errados (custo de construção de uma tubulação auxiliar que evite alagamentos quando a principal foi subdimensionada, custo adicional em concreto quando a obra foi superdimensionada, etc.)

Em função dos resultados obtidos na análise do impacto da incerteza no custo da rede de macrodrenagem, pode afirmar-se que por cada 1 real investido numa rede de macrodrenagem urbana, um erro de 10% na estimativa do CN custa aos cofres públicos:

- a) 45 centavos na instalação de uma rede de macrodrenagem numa área com impermeabilidade média - IMsr;
- b) 40 centavos na instalação de uma rede numa área com impermeabilidade alta - IAsr;
- c) 60 centavos na ampliação de uma rede numa área que passou de ter impermeabilidade média a ter impermeabilidade alta- IAar
- d) 30 a 40 centavos na instalação de uma rede com reservatórios de detenção - IARsr;
- e) R\$ 1,1 na ampliação de uma rede com reservatórios de detenção – IARar.

Estes valores foram calculados considerando que foram cometidos os mesmos erros em todas as sub-bacias na estimativa do parâmetro. Se é realizada uma analogia com a análise de sensibilidade aleatória e simples, poderíamos considerar que para o

erro normalmente cometido na estimativa do CN (erro aleatório de até 10%) são gastos:

- a) 20 centavos na instalação de uma rede de macrodrenagem em áreas com impermeabilidade média (IMsr) e alta (IAsr)
- b) 30 centavos na ampliação de uma rede numa área que passou de ter impermeabilidade média a ter impermeabilidade alta- IAar
- c) 15 a 20 centavos na instalação de uma rede com reservatórios de detenção - IARsr;
- d) 60 centavos na ampliação de uma rede com reservatórios de detenção – IARar.

Desta forma é possível concluir que cometer erros na escolha do CN resulta em grandes custos para a sociedade. Como comparação pode mencionar-se que um erro na estimativa de 10% do CN representaria aproximadamente R\$ 10.000.000 na instalação da rede de macrodrenagem da bacia do Arroio da Areia de Porto Alegre (2% da área da cidade).

## REFERÊNCIAS

- ALLASIA, D. G. 2002. Impacto das incertezas no custo de uma rede de macrodrenagem urbana. Dissertação de Mestrado. IPH-UFRGS. Porto Alegre. Disponível em <http://galileu.ipb.ufrgs.br/aguasurbanas/>
- HYDROLOGICAL ENGINEERING CORPS. 1974. Training Course on Urban Hydrology. Exército dos EUA.
- PORTO ALEGRE. Prefeitura Municipal. Departamento de Esgotos Pluviais. 2002. Plano Diretor de Drenagem Urbana de Porto Alegre - Volume IV: Bacia do Arroio Areia. Porto Alegre, RS. 205p.
- SILVEIRA, A. L. LOPES da. 1997. Provável efeito urbano nas relações IDF das chuvas de Porto Alegre. In: Rbh : Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Porto Alegre, RS vol. 2, n. 2 (jul./dez.1997), p. 93-107
- TUCCI, C.E.M. 1998. Modelos Hidrológicos. Porto Alegre. Editora da Universidade. ABRH/UFRGS 669p.

## *The Cost Of Uncertainty In Urban Macro-Drainage II: Influence Of Errors In The Determination Of CN In Network Cost*

### ABSTRACT

*This is the second of a series of two papers that shows how the lack or poor quality of hydrologic data leads*

*to badly designed urban macro-drainage networks, resulting in higher costs.*

*Based on the results obtained in the first paper it was concluded that parameter CN is one of the most important sources of uncertainty in designing an urban macro-drainage network. For this reason, the Monte Carlo technique was used to better quantify the impact of errors in estimating the parameter of discharge and the cost of the urban drainage network. The use of network cost as an indicator allowed to establish a common language with professionals from other areas, especially decisions-makers and managers. How much would be spent additionally if a drainage network is designed and built according to mistaken parameters (cost of construction of an auxiliary network to prevent flooding when the main one was underestimated; additional cost of concrete when the network was overestimated, etc.) was also quantified. The results of the sensibility analysis showed that the error usually made in estimating CN could cause an error of 30-160% in estimating flow, and of about 15-80% in cost of network, depending on the scenario. If the network were built according to the wrong parameters, R\$ 0.50 to 1.10 would be needed for each Real(R\$) already invested in order to recover network capacity.*

*Key-words: Urban Drainage, Uncertainty, Macrodrainage.*