

MODELAÇÃO MATEMÁTICA DE CHEIAS URBANAS ATRAVÉS DE UM ESQUEMA DE CÉLULAS DE ESCOAMENTO

Marcelo Gomes Miguez

*Escola de Engenharia/UFRJ
Departamento de Engenharia de Transportes*

Flávio Cesar Borba Mascarenhas

*COPPE/UFRJ - Programa de Engenharia Civil/Área de Recursos Hídricos
Caixa Postal 68506 - CEP 21944-970 Rio de Janeiro, RJ*

RESUMO

Este estudo tem por objetivo modelar matematicamente o comportamento do movimento de cheias em áreas urbanas, tendo por base a concepção do modelo de células de escoamento, que, à princípio, teve uso na representação de grandes planícies rurais alagáveis. Este conceito de modelação tem origem nos trabalhos de Zanobetti e Lorgeré (1968), Zanobetti, Lorgeré, Preissman e Cunge (1970), ambos sobre o delta do rio Mekong, e Cunge (1975), tendo encontrado par, no Brasil, na tese de mestrado defendida por Miguez (1994), esta com aplicação ao pantanal mato-grossense. A partir desta tese de mestrado são adaptados os conceitos envolvidos na modelação por células para aplicação a uma bacia urbana, mudando significativamente o foco inicial do modelo, visando contemplar o máximo possível da diversidade apresentada em um movimento de cheia em uma cidade. Este modelo foi aplicado ao estudo de cheias que ocorrem na cidade de Joinville, no Estado de Santa Catarina, sul do Brasil.

INTRODUÇÃO

O problema de enchentes urbanas que, na história recente, com frequência vem fazendo parte da rotina dos habitantes das grandes cidades tem, por vezes, como principal causa o próprio processo de urbanização. Durante séculos, a grande maioria da população concentrou-se nos campos, em áreas rurais, fato que começou a mudar após o advento da revolução industrial. Esse processo de mudança do perfil de distribuição da população vem se desenvolvendo muito rapidamente. Por sua vez, as grandes taxas de urbanização que vêm ocorrendo neste século, trazem junto a si problemas diversos de ocupação do solo urbano.

Nesse contexto, na maioria das vezes, a ocupação urbana ocorre de forma não ordenada, sem que haja o conseqüente acompanhamento

necessário da infra-estrutura, que deveria estar associada a esta ocupação, modificando e impactando o sistema de drenagem natural, tornando mais comum a ocorrência das cheias, fato que gera importantes reflexos sobre as comunidades que ocupam as áreas alagáveis.

A idéia aqui desenvolvida para a abordagem do problema de cheias urbanas é a do uso de um esquema de células de escoamento, em função da diversidade inerente a este processo. A modelação de cheias urbanas, em que águas de macro-drenagem, composta por rios naturais ou canais e galerias de drenagem, ganham as ruas, alagando-as juntamente com suas quadras, pode ser desenvolvida através de um enfoque bidimensional do plano de escoamento, que represente justamente esta interação entre os rios, canais e galerias, e as áreas alagadas.

Entretanto, não é necessariamente preciso trabalhar com equações bidimensionais. Pelo contrário, neste caso, fica difícil imaginar uma malha bidimensional de pontos regulares que possa representar a variedade da topografia urbana, com ruas, canais, galerias abertas ou fechadas, grandes áreas de acumulação, entradas d'água para a micro-drenagem, entre outros.

Porém, é possível imaginar a adoção de uma representação espacial que separe estruturas hidráulicas distintas, como trechos de um canal ou galeria, quadras ou praças alagadas atuando como reservatórios, de modo que se recrie a situação física através da "compartimentalização" da bacia em estudo, de forma que a integração destes "compartimentos" e a interação entre eles reproduza os padrões de escoamento, sendo as relações matemáticas entre diferentes compartimentos descritas por equações unidimensionais. Esta "compartimentalização" consiste na definição de áreas de características homogêneas, delimitadas por divisores de água, que podem ser elevações naturais por exemplo, sendo justamente estes "compartimentos" resultantes chamados de celas ou células de escoamento.

A possibilidade da concepção de diferentes tipos de células dá flexibilidade ao modelo e permite a reprodução de padrões vários de escoamento, que possuem uma grande multiplicidade. A adequada representação dos padrões de escoamento é fundamental para a obtenção de bons resultados neste tipo de modelação, pois é o padrão definido que irá orientar as direções para as quais se escrevem as equações unidimensionais de escoamento.

Um ponto importante, e que fortalece a ideia de desenvolvimento de um modelo deste tipo, que congregue em si próprio toda a diversidade de uma cheia urbana, de forma conjunta, é que o processo de controle de cheias urbanas passa, necessariamente, pelo entendimento de que a bacia funciona como um sistema, todo integrado, e que ações sem essa visão do conjunto, normalmente, apenas transferem os problemas.

Medidas estruturais, envolvendo obras hidráulicas sobre a rede de drenagem, bem como medidas não-estruturais, entre elas os mapas de inundação para o zoneamento urbano e a educação dos habitantes das cidades, para aprendizado de convivência harmônica com os rios e suas cheias naturais, aí se incluindo conceitos de preservação ambiental e não desmatamento, disposição adequada do lixo doméstico, entre outros, têm que ser compatibilizadas com o projeto de crescimento urbano.

A aplicação do modelo de células formulado neste trabalho se dará na cidade de Joinville, abrangendo a bacia do rio Cachoeira, em especial os seus afluentes Matias, Jaguarão e Bucarein, onde os efeitos de alagamento são maiores sobre a ocupação humana. Com este estudo, pretende-se avaliar a efetividade de um conjunto de obras propostas e as opções possíveis para a redução de níveis de alagamento.

A abordagem proposta neste artigo se pretende como uma primeira versão de uma ideia a ser desenvolvida em pesquisas posteriores. A consecução dos objetivos, no que concerne ao estudo de cheias na cidade de Joinville, servirá também como validação desta proposta de modelação, fornecendo o aval necessário para a sua continuidade e complementação. Assim sendo, algumas hipóteses simplificadoras, adotadas no texto que se segue, são justificadas por esta argumentação.

O modelo de células aplicado a bacias urbanas

As hipóteses básicas do modelo proposto são apresentadas a seguir:

- o sistema a simular pode ser representado por compartimentos homogêneos, interligados, chamados células de escoamento. A cidade e sua rede de drenagem são subdivididos em células, formando uma rede de escoamento bidimensional, com possibilidade de escoamento em várias direções nas zonas de inundação, a partir de relações unidimensionais de troca;
- a representação dos fenômenos físicos envolvidos no escoamento de cheias, e que valem da mesma forma para cheias urbanas, se faz, basicamente, pelos princípios de conservação de massa e de quantidade de movimento;
- na célula, o perfil da superfície livre é considerado horizontal e a área desta superfície depende da elevação do nível d'água no interior da mesma;
- cada célula comunica-se com células vizinhas, que são arranjadas em um esquema topológico, formado por grupos formais, onde uma célula de um dado grupo só pode se comunicar com células deste mesmo grupo, ou dos grupos imediatamente posterior ou anterior;
- o escoamento entre células pode ser calculado através de leis hidráulicas conhecidas, como por exemplo, a equação dinâmica simplificada de Saint-Venant, a equação de escoamento sobre vertedouros, livres ou afogados, a equação de escoamento através de orifícios, equações de escoamento através de bueiros, entre outras, sendo, neste trabalho, desprezados os efeitos de inércia, de forma a simplificar o sistema de equações governantes do escoamento, que passam a ser desacopladas em relação ao nível d'água em cada célula;
- o volume de água contido em cada célula está diretamente relacionado com o nível d'água Z_i no centro da mesma, ou seja, $V_i = V(Z_i)$;
- a vazão entre duas células adjacentes, em qualquer tempo, é apenas função dos níveis d'água no centro dessas células, ou seja, $Q_{i,k} = Q(Z_i, Z_k)$;
- o escoamento pode ocorrer simultaneamente em duas camadas, uma superficial e outra subterrânea, em galeria, estando as células da superfície e as da galeria associadas por uma ligação entre elas;
- o escoamento afogado em galerias não está sendo considerado sob pressão, mas sim livre à plena seção, por se supor a car-

ga pequena, sendo o excesso de água extravasado para a célula de superfície associada a esta galeria.

A modelação hidráulica e topográfica da bacia hidrográfica talvez seja a mais importante etapa da modelação matemática (Cuge, Holly e Verwey, 1980). Na modelação por células, esta etapa torna-se ainda mais importante, pois a capacidade de representação da realidade física e dos padrões de escoamento está diretamente relacionada com a possibilidade de obtenção de bons resultados pelo modelo, uma vez que as direções de fluxo devem ser pré-determinadas na construção da rede bidimensional de escoamento. Desta forma portanto, surge, para o caso de cheias urbanas, a necessidade de uma maior diversidade de tipos de células e de ligações entre elas, quando em comparação com uma bacia rural, para poder dar vida à maior riqueza de detalhes inerentes a uma área urbana.

Os primeiros passos para a modelação da bacia relacionam-se com a identificação de áreas alagáveis, das direções principais de escoamento, das características hidráulicas e geométricas das seções de escoamento em trechos de rio, bem como a definição geométrica de áreas homogêneas de armazenamento, além da definição das interações que ocorrem entre os diversos elementos topográficos ou estruturas hidráulicas identificados.

As células podem funcionar então, como unidades básicas, tijolos de construções maiores, que vão-se alinhando para montar a paisagem geral da bacia. Desse modo, uma célula pode representar um lago ou uma galeria, por exemplo, e um conjunto de células pode formar uma estrutura como a de um longo canal, ou uma confluência entre rios. A soma de estruturas simples com estruturas complexas forma, por sua vez, outras estruturas mais complexas como, pode-se citar, o sistema completo da macro-drenagem, ou o escoamento integrado de superfícies alagadas com galerias subterrâneas interligadas.

Neste contexto, surge então uma série de tipos de células para abranger a realidade da drenagem urbana e propiciar a sua adequada representação, conforme relação a seguir:

1. células tipo-rio ou canal: são, efetivamente, trechos de rios e de canais, cujo conjunto em seqüência normalmente forma a rede de macro-drenagem, exceto pela falta dos trechos em galeria;
2. células tipo-galeria: são trechos de canais fechados, subterrâneos, que junto com o

tipo anterior compõem a macro-drenagem. É interessante notar que a definição de células tipo-galeria, ou células tipo-rio, como no caso anterior, vem ao encontro da necessidade de representação de áreas homogêneas. A transição entre rio (ou canal) e galeria fica posicionada na seção de ligação entre células, dando origem a dois tipos distintos de ligação entre células, um para entrada em galerias, outro para saída destas (estreitamento e alargamento brusco do escoamento, respectivamente). Caso esta transição fosse colocada em um centro de célula, por exemplo, não haveria unicidade de cotas neste local, pois o escoamento teria restrição de um lado, pelo teto da galeria, e do outro estaria livre, no trecho do rio, havendo descontinuidade na linha d'água, conforme pode ser visto na Figura 1;

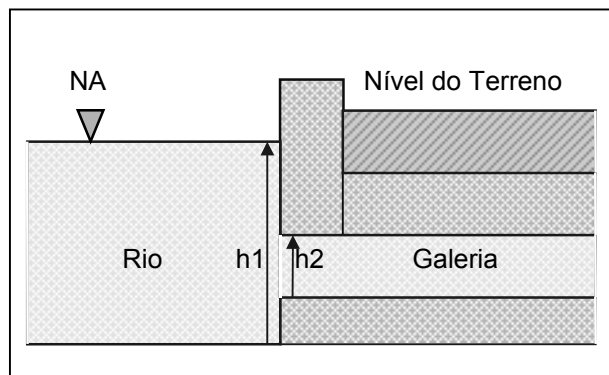


Figura 1. Descontinuidade do perfil da linha d'água na entrada da galeria.

3. células tipo-vertedouro: são áreas que margeiam os rios e canais, com pequena largura, sendo esta, no caso de cidades fortemente urbanizadas, da ordem de grandeza das calçadas que acompanham os canais, funcionando como soleiras espessas para o vertimento das cheias do canal para as margens. Este tipo de célula visa evitar distorções, pois ao se colocar uma célula com grande área superficial junto a um trecho de rio, o coeficiente de vertimento que aparece na equação de vazão do vertedouro, do rio para a planície, acaba por incorporar fatores diversos, tal como o retardo por atrito, no caminho por longas distâncias, da água que sai do rio até chegar ao centro da célula de planície adjacente;

4. células tipo-planície alagável: são áreas homogêneas alagáveis que juntas, normalmente, compõem áreas de reservação / acúmulo de água, tendo escoamento bem mais lento do que na rede principal de macro-drenagem. No caso da drenagem urbana, quando possível em função da escala de observação, estas células podem se referir a quadras edificadas, praças, parques, jardins, estacionamentos e outros. Entretanto, nos casos mais gerais, em que não se consegue chegar a este detalhamento de quadras, estas células referem-se a agrupamentos destas quadras, em áreas de características semelhantes, definindo pequenas sub-bacias. Esta situação, porém, é complexa em termos de escoamento, pois as ruas que dividem as quadras funcionam como canais, caminhos preferenciais, que vão trilhar rumos diversos dentro de uma única célula, conforme mostrado na Figura 2.

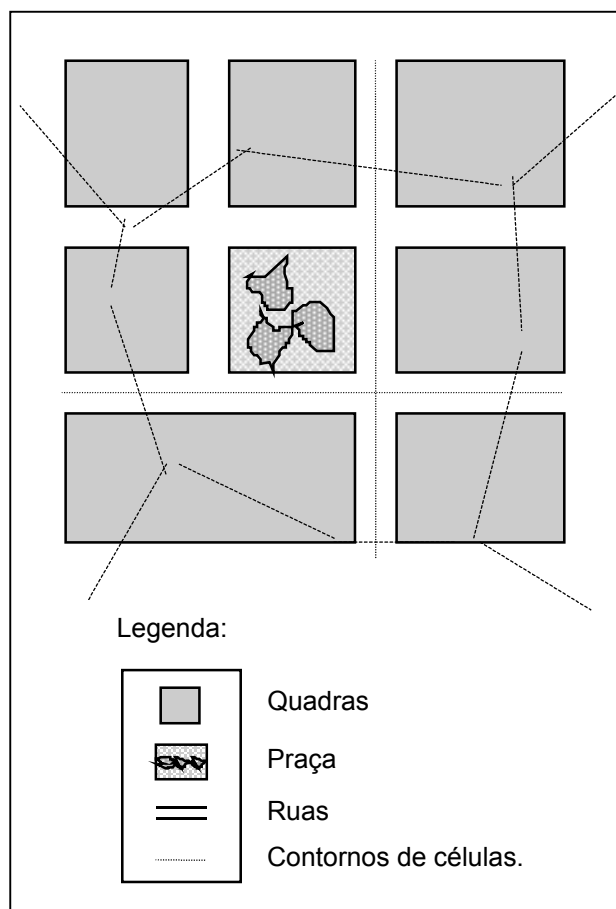


Figura 2. Divisão de uma planície alagável comportando várias ruas e quadras.

Para contornar este problema, gerado pela existência de caminhos preferenciais diversos de escoamento dentro das próprias células, quando na verdade o que se deseja reproduzir é o padrão geral do escoamento sobre a bacia alagada, define-se uma dada área, que por determinadas características, pode ser agrupada como uma única célula. Deve-se considerar, de forma geral, esta área como um reservatório de água que é abastecido e drenado pelas principais ruas, consideradas em termos de capacidade de escoamento, ou seja, aquelas ruas que têm cotas menores e para onde converge a maioria das demais ruas, condição esta ditada pela topografia urbana local.

Assim, ficam definidas as direções principais de escoamento, que definem o padrão, ou mais precisamente, o macro-padrão de escoamento. Desta forma, o centro da célula fica definido pela convergência dos escoamentos das células vizinhas, estando necessariamente sobre uma rua e, muito provavelmente, em um cruzamento. Passa-se a ter então, as principais ruas funcionando como canais e as demais áreas da célula funcionando como planícies alagadas. A Figura 3 mostra esta situação.

5. Células tipo-encosta: são áreas elevadas, em termos de cotas topográficas, que têm a finalidade de conduzir água das chuvas para dentro do modelo. Em termos matemáticos e numéricos este tipo de célula não recebe nenhum tratamento particular, mas na divisão da bacia em células, ou seja, na modelação topográfica e topológica, cabe ressaltar que, em termos práticos, ao se definir o uso destas células, tem-se que ter consciência que não haverá interação destas com as demais células do modelo, pois a própria cota só permitirá o escoamento em um único sentido, ou seja, afluindo para a área modelada. Este tipo de célula é normalmente definido nas bordas da bacia em estudo e em áreas elevadas de encosta.

A partir da caracterização dos tipos de células, feita acima, passa-se a discutir a combinação das mesmas, conforme possibilidade citada anteriormente, para representar estruturas hidráulicas, tais como canais, galerias, junções, entre outras, em arranjos mais complexos, que começarão a compor o modelo da bacia.

A representação dos rios e canais principais pode ser feita pela composição da rede de macro-drenagem com as células de canal, margeadas por células de vertedouro, que recebem o

extravasamento do rio na cheia, sendo estas células, por sua vez, ladeadas por células de planície, alagáveis, para onde fluem as águas que saíram dos rios, podendo estas, a partir daí, seguir seu próprio caminho.

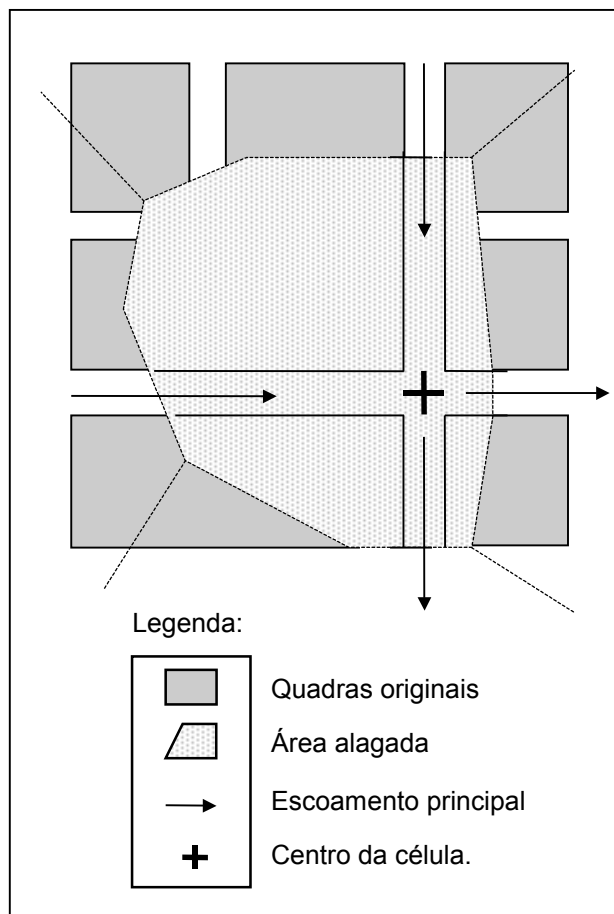


Figura 3. Definição de caminhos preferenciais e áreas de reservação em uma célula com várias ruas e quadras.

Na Figura 4 é apresentada uma vista em corte de um curso d'água e uma de suas margens, numa representação por células, que mostra o escoamento das encostas para a região alagável e as interações entre estas, os vertedouros e os rios.

A definição do limite das áreas alagáveis, por exemplo, pode-se dar por marcas de inundações históricas mapeadas para a bacia.

O tratamento das confluências de rios é feito através de uma célula especial, em forma de "Y", à qual são anexadas células adjacentes de vertimento e de alagamento, como a seguir, num arranjo especial, de forma que esta região possa receber a vazão que vem dos dois trechos de montante, ou seja, do rio principal e do seu afluente, e

equilibre naturalmente o balanço de massa neste local a fim de não haver descontinuidades ou transições bruscas. A Figura 5 mostra a representação genérica adotada como padrão para uma confluência qualquer. Vale notar que esta concepção leva a uma estrutura composta por um conjunto de sete células por confluência.

As mudanças de declividade do fundo são feitas nos centros de célula, conforme a Figura 6. Isto evita situações de transição não graduais ao longo do escoamento.

De forma geral, as pontes, ou outras seções de controle, devem ser sempre tomadas como seções de ligação entre células, por serem capazes de definir ou limitar a capacidade de vazão de um determinado trecho que culmina nesta seção de controle, gerando, normalmente, alagamento à montante.

No tratamento de galerias surge um conceito diferente na modelação por células, que é o da modelação por camadas. Assim, num mesmo local, o escoamento pode estar ocorrendo em dois níveis: um superficial, sobre ruas ou quadras alagadas, e outro subterrâneo, em galerias, ligadas ao nível superficial através de bueiros. De forma esquemática, ter-se-ia uma representação como a que se mostra na Figura 7, ocorrendo uma superposição de células com uma ligação vertical entre elas e escoamentos superficial e subterrâneo seguindo em paralelo.

Com o conjunto de tipos de célula definido e, portanto, com a capacidade de representação da bacia estabelecida, parte-se agora para a consideração da interrelação entre células, suas ligações e a estrutura matemática do modelo.

A equação da Continuidade, escrita para uma célula i , na forma diferencial, em um dado intervalo de tempo, tem a forma apresentada na Equação (1), onde a variação do volume em uma célula i , em um intervalo de tempo t , é dada pelo balanço de entrada e saída de água nesta célula, através da precipitação que ocorre sobre sua superfície e das vazões de troca com todas as células vizinhas k .

$$A_{s_i} \frac{dZ_i}{dt} = P_i + \sum_k Q_{i,k} \quad (1)$$

onde A_{s_i} é a área do espelho d'água superficial na célula i ; Z_i é a cota do nível d'água no centro da célula i ; P_i é a vazão superficial decorrente da transformação de parte da precipitação direta sobre a célula i em escoamento superficial; $Q_{i,k}$ é a va-

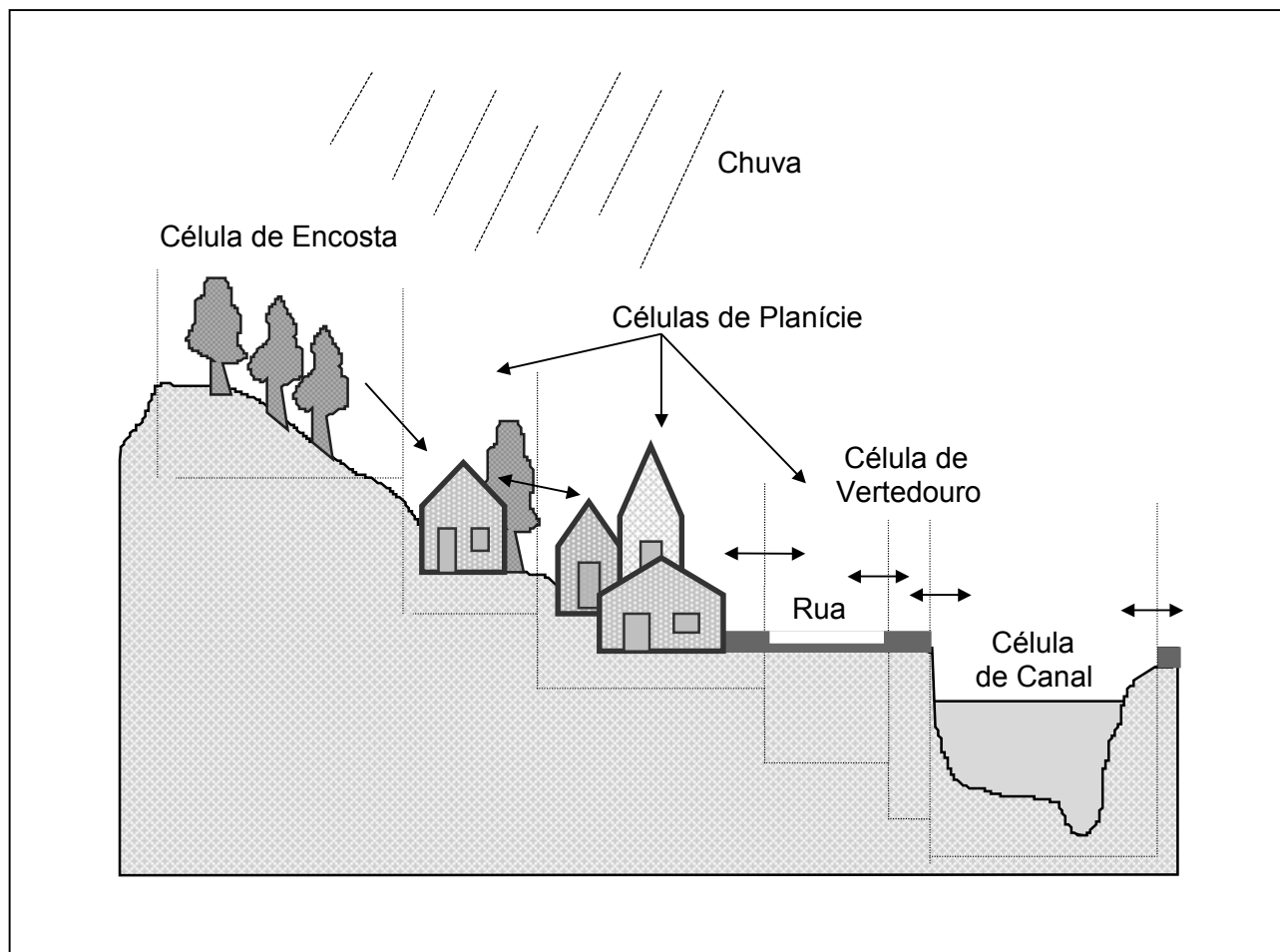


Figura 4. Vista de um rio e sua margem ocupada na modelação de uma bacia por células.

ção entre a célula i e uma célula k adjacente à célula i , considerada positiva da célula k para a i .

Considerando a Equação (1) em termos discretos, tem-se:

$$A_{S_i} \frac{\Delta Z_i}{\Delta t} = P_i + \sum_k Q_{i,k} \quad (2)$$

Considera-se, por convenção, ao se analisar qualquer termo desta equação, que o intervalo de tempo $(n+1)\Delta t$ corresponde ao tempo de cálculo onde as variáveis são desconhecidas, de forma que o intervalo de tempo $n\Delta t$ indicará o intervalo anterior, onde todas as variáveis já foram calculadas.

No primeiro membro da Equação (2), ΔZ_i é a variável que se deseja conhecer. Conhecendo o valor de ΔZ_i^{n+1} , automaticamente obtém-se o valor de Z_i^{n+1} , uma vez que $Z_i^{n+1} = Z_i^n + \Delta Z_i^{n+1}$. A área superficial do espelho d'água, A_{S_i} , dentro de uma célula, é considerada como função do nível Z_i^n . Esta consideração

corresponde a uma aproximação de 1ª ordem, onde se considera $(\Delta A_{S_i}/A_{S_i}) \ll 1$.

Já no segundo membro, P_i é considerado um dado de entrada, pois a chuva é considerada conhecida em todos os intervalos de tempo. No somatório das vazões entre as células vizinhas e a célula considerada, a vazão $Q_{i,k}$ é escrita no tempo $(n+1)\Delta t$, de forma que tem-se um esquema totalmente implícito, sendo a computação incondicionalmente estável, sob o ponto de vista formalmente numérico. Porém, para evitar a introdução de um termo não-linear na Equação (2), pode-se desenvolver a vazão $Q_{i,k}^{n+1}$ em série de Taylor e desprezar os termos de maior ordem:

$$Q_{i,k}^{n+1} = Q_{i,k}^n + \frac{\partial Q_{i,k}^n}{\partial Z_i} \Delta Z_i^{n+1} + \frac{\partial Q_{i,k}^n}{\partial Z_k} \Delta Z_k^{n+1} \quad (3)$$

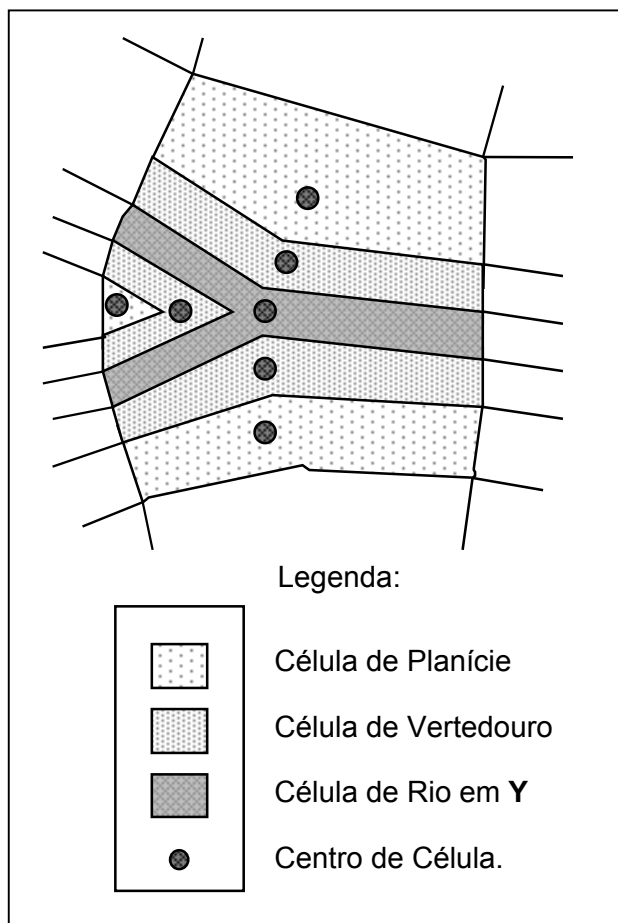


Figura 5. Representação de uma confluência entre rios.

Levando em conta a discussão anterior e reescrevendo a Equação (2) pode-se obter, por fim, a seguinte equação em termos discretos:

$$A_{S_i}^n \frac{\Delta Z_i^{n+1}}{\Delta t} = P_i^n + \sum_k Q_{i,k}^n + \sum_k \frac{\partial Q_{i,k}^n}{\partial Z_i} \Delta Z_i^{n+1} + \sum_k \frac{\partial Q_{i,k}^n}{\partial Z_k} \Delta Z_k^{n+1} \quad (4)$$

As variáveis relativas aos níveis d'água Z_i^{n+1} e Z_k^{n+1} , que aparecem na Equação (4), que deve ser escrita para cada célula, são as únicas incógnitas, sendo relacionadas apenas com a própria célula e com as células adjacentes à mesma. Portanto, o sistema resultante da aplicação da equação da continuidade é capaz de solucionar o problema, desde que sejam introduzidas as relações matemáticas que representem as vazões de troca entre células.

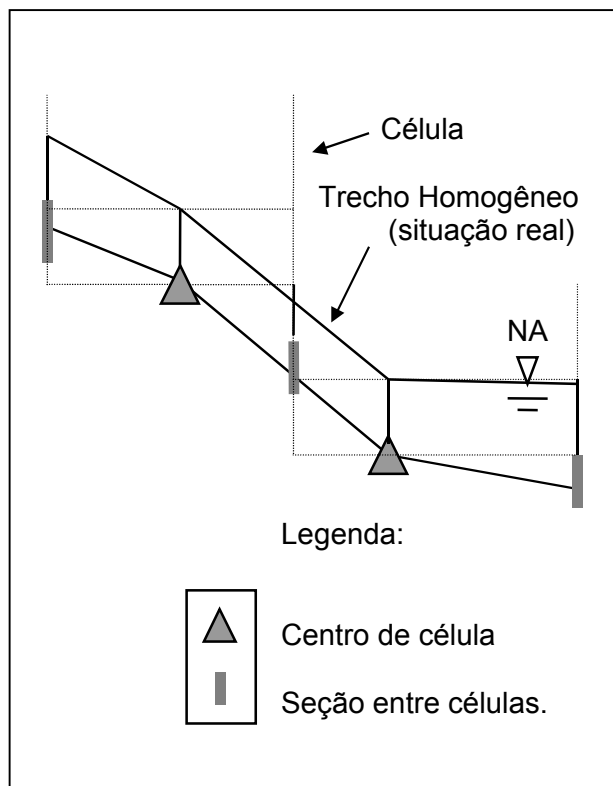


Figura 6. Representação de mudança de declividade do fundo do leito.

As leis hidráulicas de descarga entre células podem ser de vários tipos e é justamente esta versatilidade de introdução de leis variadas que inspira o uso do modelo de células para a representação do fenômeno de cheias urbanas, com toda a sua diversidade. Os tipos de ligação considerados neste estudo, que, por sua vez, definem leis hidráulicas que descrevem a relação de troca entre células, são apresentados a seguir:

Ligação tipo-rio: representa a lei de escoamento com superfície livre e deve ser utilizada para definir o escoamento entre trechos de rios ou canais, entre células da planície, sem obstáculos locais ao fluxo, e para o escoamento em ruas. Como não está sendo considerada a possibilidade de escoamento sob pressão em trechos de galeria, este tipo de ligação também é utilizado na representação nos mesmos. Porém, neste último caso, há que se lembrar que existe uma restrição de cota superior de escoamento, que é o próprio teto da galeria. Neste caso, usa-se a equação dinâmica de conservação da quantidade de movimento, desprezando-se os termos de inércia, ou seja, as acelerações local e advectiva, e utilizando a fórmula de Manning para a aproximação da declividade da linha de energia:

$$\frac{\Delta h + \Delta Z_f}{\Delta x} = - \frac{Q_{i,k}^2 \eta^2}{A_{i,k}^2 R_{i,k}^{4/3}} \quad (5)$$

onde Δh é a diferença de profundidades entre os centros das células i e k ; ΔZ_f é a diferença entre as cotas de fundo das células i e k ; Δx é a distância entre os centros das células i e k ; $A_{i,k}$ é a área molhada da seção transversal de escoamento entre as células i e k ; $R_{i,k}$ é o raio hidráulico da seção transversal de escoamento entre as células i e k ; η é o coeficiente de rugosidade de Manning no trecho entre os centros das células i e k .

Tomando $\Delta h + \Delta Z_f = Z_k - Z_i$, ou seja, igualando a variação do nível d'água à diferença entre os níveis d'água nos centros das células i e k e explicitando a vazão de troca, tem-se:

$$Q_{i,k} = \left(\frac{A_{i,k} R_{i,k}^{2/3}}{\eta \Delta x^{1/2}} \right) \left(|Z_k - Z_i| \right)^{1/2} \frac{Z_k - Z_i}{|Z_k - Z_i|} \quad (6)$$

A última fração da Equação (6) fornece o sinal para a vazão, que é considerada positiva, se entra na célula, e negativa, se sai. Os parâmetros η , $A_{i,k}$ e $R_{i,k}$, representativos da seção transversal de escoamento entre as células i e k , são calculados com o nível d'água obtido para esta seção, através de uma ponderação entre os níveis d'água das células i e k .

Ligação tipo-transição canal/galeria: também representa a lei de escoamento com superfície livre, apesar de, na prática, esta ser uma simplificação, pois, uma galeria com entrada d'água afogada por exemplo, trabalha, na verdade, como um túnel submerso sob pressão. Esta ligação deve ser utilizada para trechos de galeria com comunicação com o exterior, ou seja, nas transições para o escoamento em rios ou canais, lembrando que há o limite superior de escoamento definido pelo teto da galeria e, ainda, com uma consideração de perda de carga localizada, relativa a um alargamento ou estreitamento brusco da seção.

A perda de carga localizada, nos alargamentos e estreitamentos bruscos, pode ser representada da seguinte forma:

$$S_l = \frac{k(v_1 - v_2)^2}{2g\Delta x} \quad (7)$$

onde k é o coeficiente de perda de carga.

As velocidades V_1 e V_2 são as velocidades antes e depois da contração ou alargamento, no escoamento que ocorre de um centro de célula a outro. Estas velocidades devem ser obtidas nos próprios centros de célula, pela divisão da vazão que ocorre entre as células do trecho em que existe a perda de carga localizada pela área transversal de escoamento nos centros destas células, na direção considerada.

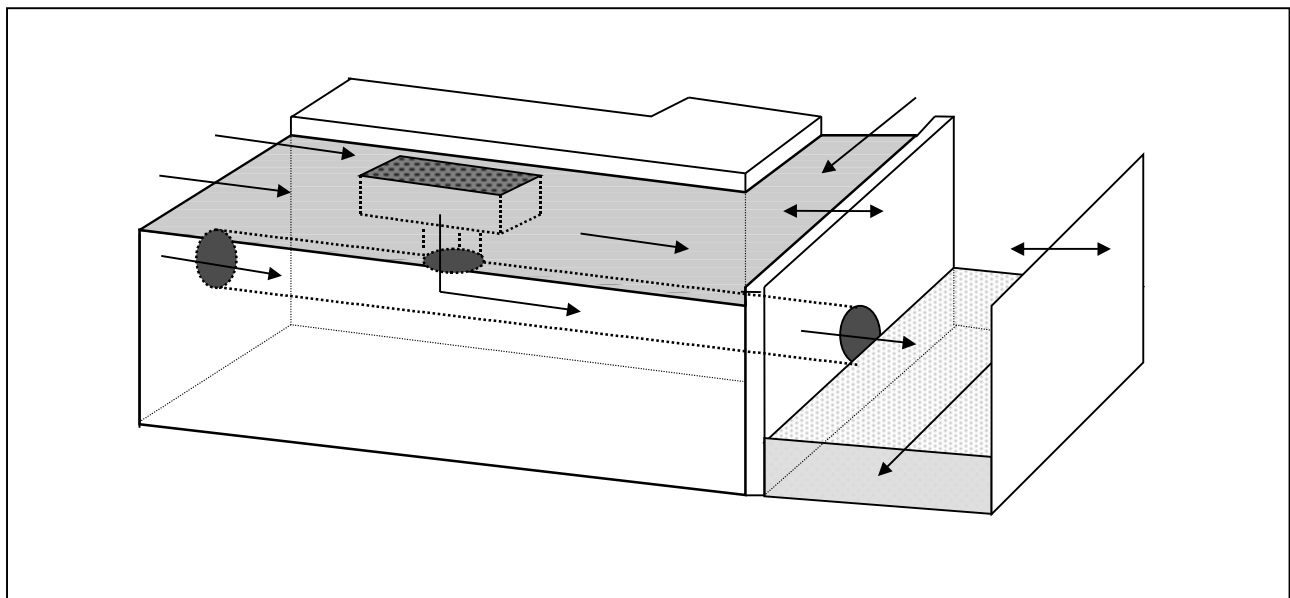


Figura 7. Representação de uma galeria e do escoamento em duas camadas.

A partir dos mesmos princípios considerados na relação tipo-rio, considerando a introdução da perda localizada somada a perda de carga normal por atrito, distribuída ao longo do trecho, a expressão para a vazão $Q_{i,k}$ muda para a forma da Equação (8).

$$Q_{i,k} = \left[\frac{1}{\frac{\Delta x \eta^2}{A_{i,k}^2 R_{i,k}^{4/3}} + \frac{k}{2g} \left(\frac{A_k - A_i}{A_k A_i} \right)^2} \right]^{1/2} \times (Z_k - Z_i)^{1/2} \frac{Z_k - Z_i}{|Z_k - Z_i|} \quad (8)$$

Ligação tipo-bueiro: representa o vertimento de água de uma célula de superfície para uma célula de galeria associada àquela e sob ela.

No caso de escoamento em bueiros, considerou-se as seguintes equações (Tucci, Porto, Barros, 1995):

Para uma lâmina d'água de até 12 cm sobre o bueiro:

$$Q_{i,k} = N_B \phi_{B1} (Z - Z_F)^{3/2} \quad (9)$$

Para uma lâmina d'água superior a 12 cm sobre o bueiro:

$$Q_{i,k} = N_B \phi_{B2} (Z - Z_F)^{1/2} \quad (10)$$

onde N_B é o número de bueiros; ϕ_{B1} , ϕ_{B2} é o coeficientes de descarga; $(Z - Z_F)$ é a carga sobre a entrada do bueiro.

Ligação tipo-vertedouro de soleira espessa: representa o vertimento por transbordamento do rio para a planície ou entre células da planície, em locais onde existem barreiras ao escoamento. No caso da drenagem urbana, podem ser associadas às calçadas que margeiam o rio. Na ligação tipo-vertedouro, a fórmula clássica de vertedouro de soleira espessa é utilizada. O escoamento sobre vertedouros pode ser do tipo livre ou afogado. A distinção entre estas duas situações é feita pelo seguinte critério: se $Z_k > Z_i$, o escoamento é livre se $(Z_i - Z_c) < (2/3)(Z_k - Z_c)$, onde Z_c é a cota da crista do vertedouro. Caso contrário, o escoamento é afogado. No caso de $Z_i > Z_k$, o procedimento é análogo.

Para o escoamento livre, tem-se:

$$\text{se } Z_k > Z_i, Q_{i,k} = \phi_L (Z_k - Z_c)^{3/2} \quad (11)$$

$$\text{se } Z_i > Z_k, Q_{i,k} = \phi_L (Z_i - Z_c)^{3/2} \quad (12)$$

Para o escoamento afogado, tem-se:

$$\text{se } Z_k > Z_i, Q_{i,k} = \phi_A (Z_i - Z_c) \sqrt{Z_k - Z_i} \quad (13)$$

$$\text{se } Z_i > Z_k, Q_{i,k} = \phi_A (Z_k - Z_c) \sqrt{Z_i - Z_k} \quad (14)$$

onde ϕ_L é o coeficiente de descarga livre sobre vertedouro; ϕ_A é o coeficiente de descarga afogada sobre vertedouro.

Cabe ressaltar que os coeficientes de vertimento, neste caso, não são equivalentes aos coeficientes clássicos, e devem ser ajustados. Isto ocorre porque na representação deste modelo os vertimentos são normalmente laterais ao escoamento principal e se dão por largas extensões.

Para a solução numérica do problema, basicamente se considera o mesmo procedimento adotado nas referências: Zanobetti e Lorgeré (1968); Zanobetti, Lorgeré, Preissman e Cunge (1970) e; Mascarenhas e Miguez (1993 e 1994).

Vale notar que as variáveis relativas aos níveis d'água Z_i^{n+1} e Z_k^{n+1} da Equação (4), são relacionadas apenas com a própria célula para a qual a equação foi escrita e com as células adjacentes à esta. O sistema resultante, portanto, possui uma matriz de coeficientes esparsa. Outra característica que se ressalta, relaciona-se com o fato de que cada equação só leva em conta, como incógnitas, o nível d'água da célula a que se refere e os níveis d'água das células vizinhas adjacentes, configurando uma situação em que cada célula de uma dada posição, tomada como central, está ligada apenas a células em linha com esta posição, a células da linha de baixo ou a células da linha de cima. Cada linha convencionou-se chamar de grupo e os grupos são numerados a partir de jusante. O grupo de baixo é então o grupo anterior $j-1$, o grupo de cima é o posterior $j+1$, enquanto o grupo de referência é o grupo central j .

O arranjo das células em grupos é o que compõe o modelo topológico. A definição das células por si só, em termos de tipos e quantidade, é capaz de modelar o terreno, mas não compõe o

esquema topológico. A partir de uma célula, tem-se vários graus de liberdade para o posicionamento das células vizinhas nos grupos anterior, central e posterior. A restrição fica por conta dos elos criados entre as células, pois a definição de uma dada célula em um grupo anterior, por exemplo, traz as vizinhas desta célula para próximo de si. A organização dos grupos, definindo o modelo topológico, é mais uma etapa da modelação como um todo. Uma das preocupações desta etapa é procurar obter uma distribuição de células que leve ao menor número de células por grupo, mesmo que em um número maior de grupos, desde que respeitado o princípio fundamental do agrupamento, em que uma célula só se comunica com células do seu próprio grupo ou dos grupos anterior e posterior. Visto que o número de células por grupo repercute na ordem dos sub-sistemas a serem resolvidos, como será visto na sequência da modelação numérica, objetiva-se com isto reduzir este valor, para aumentar a velocidade computacional de solução.

Aproveitando-se estas características, de esparsidade da matriz e de possibilidade de agrupamento das células, usa-se um método de solução do sistema do tipo dupla varredura sobre o modelo topológico de células: a primeira varredura, de jusante para montante, tem o objetivo de agrupar o sistema em sub-matrizes; a segunda varredura, de montante para jusante, vai resolvendo os sub-sistemas resultantes do agrupamento da primeira varredura.

Para fins de melhor compreensão da sequência lógica aqui desenvolvida, apresenta-se, a seguir, em linhas gerais, a modelação numérica pertinente, que se encontra detalhada nas referências citadas. Reorganizando a Equação (4), a fim de agrupar seus termos, tem-se para uma célula:

$$\Delta Z_i^{n+1} \left(-\frac{A_{s_i}^n}{\Delta t} + \sum_k \frac{\partial Q_{i,k}^n}{\partial Z_i} \right) + \sum_k \left(\frac{\partial Q_{i,k}^n}{\partial Z_k} \Delta Z_k^{n+1} \right) + L_i^n = 0 \quad (15)$$

onde:

$$L_i^n = P_i^n + Q_{i,k}^n \quad (16)$$

Escrevendo, agora, a Equação (15) para todas as células de um grupo j , chega-se a uma equação matricial para este grupo, contendo como incógnitas os vetores de incrementos de nível do grupo central, para o qual a equação foi montada, e dos grupos anterior e posterior.

$$[M_j] \{\Delta Z_j\} + [M_{j+1}] \{\Delta Z_{j+1}\} + [M_{j-1}] \{\Delta Z_{j-1}\} + \{L_j\} = 0 \quad (17)$$

onde $[M_j]$, $[M_{j+1}]$, $[M_{j-1}]$ são matrizes de coeficientes, respectivamente, para os incrementos de nível das células dos grupos central, posterior e anterior; $\{\Delta Z_j\}$, $\{\Delta Z_{j+1}\}$, $\{\Delta Z_{j-1}\}$ são vetores de incógnitas, respectivamente, dos incrementos de nível dos grupos central, posterior e anterior; $\{L_j\}$ é o vetor dos termos livres do grupo central, que não multiplicam incógnitas.

Nota-se na Equação (17), que os incrementos de nível incógnitos $\{\Delta Z_1\}$ do primeiro grupo, de jusante, tomado como grupo central, podem ser escritos em função dos incrementos de nível incógnitos $\{\Delta Z_2\}$, do grupo posterior, uma vez que não há grupo anterior neste caso. A partir desta constatação, dando prosseguimento à primeira varredura e usando-se a relação resultante de forma recorrente, pode-se sempre explicitar o vetor de incógnitas de um grupo como função do vetor de incógnitas do grupo posterior. Observe-se que as condições de contorno são sempre diretamente introduzidas nas equações, não sendo escrita nenhuma relação particular para as mesmas. A forma desta relação de recorrência é apresentada na Equação (18).

$$\{\Delta Z_j\} = [E_j] \{\Delta Z_{j+1}\} + \{F_j\} \quad (18)$$

onde $[E_j]$ e $\{F_j\}$ são, respectivamente, a matriz e o vetor resultantes da operação de termos conhecidos e que definem uma relação linear entre os incrementos de nível dos grupos j e $j+1$.

Por sua vez, as expressões para $[E_j]$ e $\{F_j\}$ podem ser generalizadas, conforme a seguir:

$$[E_j] = -([M_j] + [M_{j-1}][E_{j-1}])^{-1} \times [M_{j+1}] \quad (19)$$

$$\{F_j\} = -([M_j] + [M_{j-1}][E_{j-1}])^{-1} \times ([M_{j-1}]\{F_{j-1}\} + \{L_j\}) \quad (20)$$

Para o grupo de montante I não existe $\{\Delta Z_{I+1}\}$ e $[M_{I+1}]$ é nulo, uma vez que não existem ligações posteriores, tornando também nulo $[E_I]$. Assim:

$$\{\Delta Z_i\} = \{F_i\} = -([M_i] + [M_{i-1}][E_{i-1}])^{-1} \times ([M_{i-1}][F_{i-1}] + \{L_i\}) \quad (21)$$

Desta forma, o valor dos incrementos de nível do grupo de montante i está determinado. A partir de então, começa-se a fazer uma segunda varredura, de montante para jusante, e determinam-se, sequencialmente, os valores de todos os incrementos $\{\Delta Z_j\}$. Os valores de $\{\Delta Z_j\}$, já computados, devem então ser simplesmente adicionados aos níveis $\{Z_j^n\}$, conhecidos no tempo $n\Delta t$, para a determinação do “estado” da planície modelada no tempo $(n+1)$.

Aplicação à cidade de Joinville

O primeiro passo para a aplicação do modelo de células à bacia do rio Cachoeira e seus afluentes, que percorrem a cidade de Joinville, no estado de Santa Catarina, constitui-se na divisão desta bacia em células. Este trabalho foi feito com base em mapas de escala 1:10.000, resultantes de restituição aerofotogramétrica, com data de 1989 e 1990. Como base complementar às informações cartográficas foram utilizadas também informações hidrológicas e hidráulicas de estudos anteriores realizados pelo CEHPAR (1985) e pelo IPH (1979, 1981). Um panorama geral da cidade é fornecido na Figura 8, onde apresenta-se um mapa da cidade de Joinville em que pode-se perceber o seu grau de urbanização. Os diferentes tons de cinza representam as áreas dos bairros. Destaca-se também a sua rede de drenagem e sete pontos específicos, nomeados de A até G, escolhidos entre áreas passíveis de inundação. Para estes pontos serão apresentados hidrogramas comparativos de alagamento, para a situação atual e para uma situação simulada, considerando uma série de obras propostas para a macro-drenagem.

As áreas potencialmente alagáveis foram definidas conforme manchas de inundação históricas disponíveis. Áreas mais elevadas, que praticamente apenas conduzem a água das chuvas para as planícies baixas alagáveis, foram definidas como células de encosta. As células de rios, vertedouros e planícies foram consideradas completamente interligadas, formando uma rede de escoamento capaz de trocar água em qualquer sentido, nas direções de fluxo pré-estabelecidas como padrões de escoamento, conforme as características do movimento da cheia que se desenvolva sobre a bacia.

A divisão final da bacia em células é apresentada na Figura 9, culminando em 240 células. A esta divisão associa-se um esquema topológico que ordena as células em grupos que as interrelacionam para alimentar o modelo matemático. A Figura 10, apresenta este esquema topológico.

As seções transversais de escoamento foram consideradas aproximadamente retangulares. Para compensar irregularidades do fundo, presença de vegetação e deposição de lodo e lixo, foram considerados dois níveis de coeficientes de Manning, sendo o coeficiente para uma profundidade de até 0,20 m acrescido de 0,01 em relação ao estimado para a seção com nível d'água pleno. Esta composição foi levada em conta no cálculo dos coeficientes de descarga. A definição dos coeficientes de Manning foi feita a partir de fórmula apresentada por Chow (1959), que pondera uma série de fatores: tipo de leito, irregularidades e obstruções da calha, variação de seção, vegetação e meandros.

Algumas sub-bacias, que não apresentam alagamentos ou que já tiveram os problemas de cheias resolvidos, foram modeladas de modo simplificado, em célula única, funcionando analogamente a uma célula de encosta.

As condições de contorno impostas foram as seguintes, em função dos dados disponíveis para o estudo:

- *no rio Cachoeira*: cotas medidas em postos fluviométricos, transpostas à montante e à jusante, na fase de calibração; e vazões, à montante, e um hidrograma de maré, à jusante, na fase das simulações. As vazões de montante foram estimadas por aplicação do método racional às chuvas de projeto no trecho superior da bacia;
- *nos rios Matias, Jaguarão e Bucarein*: vazões à montante, dadas pela aplicação do método racional nas bacias contribuintes, tanto na calibração quanto na simulação.

Neste estudo de cheias em Joinville, pôde-se contar com informações de dois postos de medição para a calibração, um deles localizado no rio Matias, na rua Visconde de Taunay, e outro localizado no rio Jaguarão, na rua Rio Grande do Sul, ambos com informações relatadas em estudo do IPH, do início da década de 80. Não houve disponibilidade de informação para verificação de resultados no rio Bucarein e os dados disponíveis no rio Cachoeira foram transformados em condições de contorno. Não houve, também, disponibilidade de dados para a calibração da planície, cuja referência para a verificação de

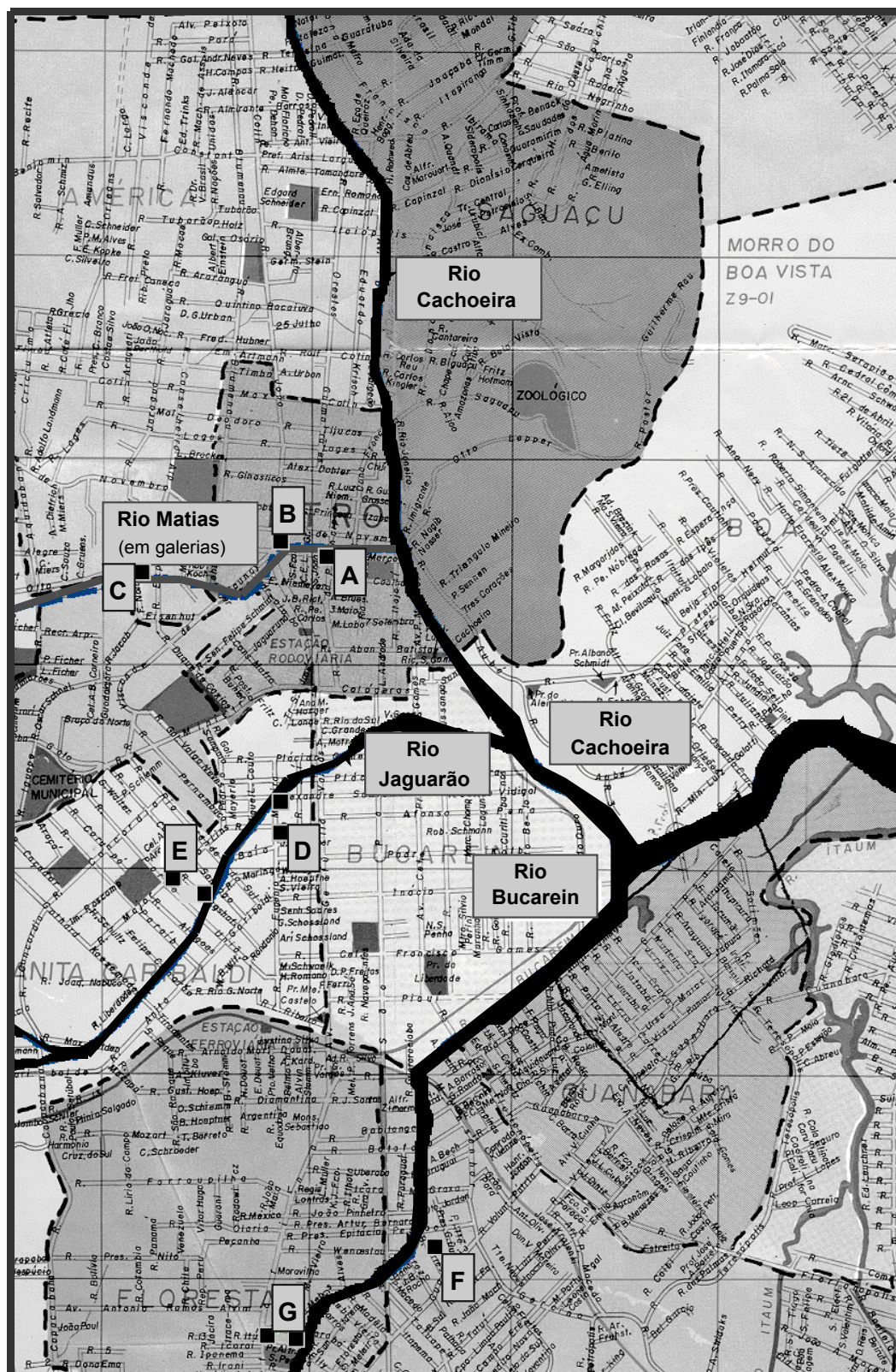


Figura 8. Mapa da cidade de Joinville - ruas e quadras por bairros e rede de macro-drenagem.

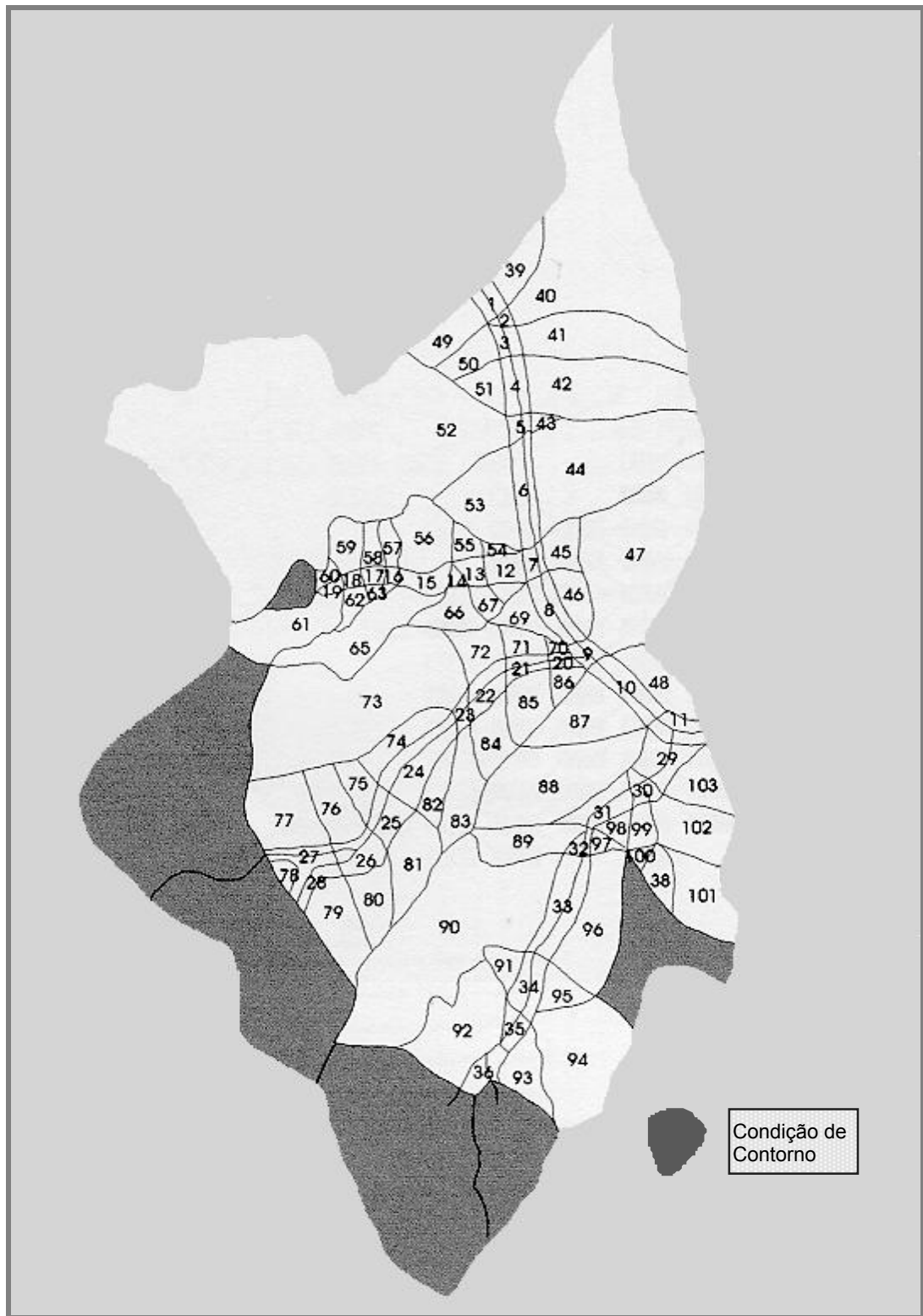


Figura 9. Divisão da bacia do rio Cachoeira em células.

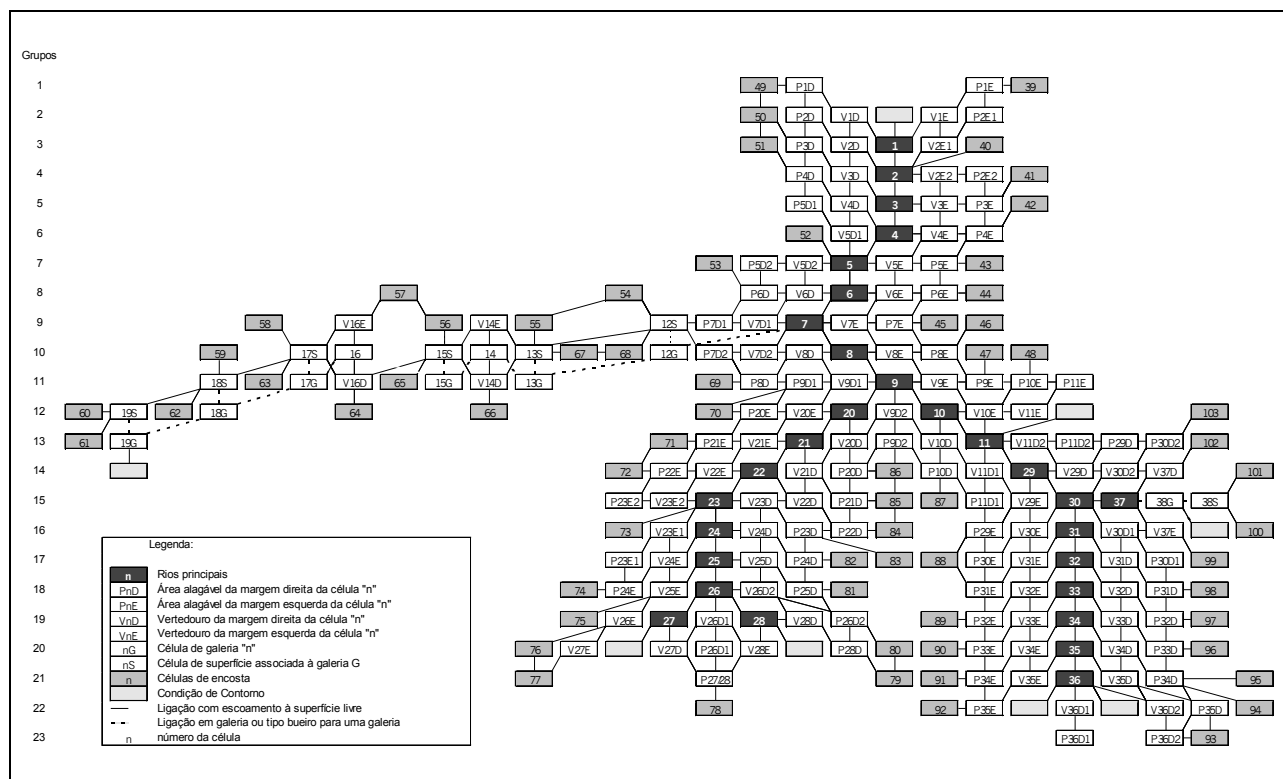


Figura 10. Esquema topológico associado à divisão da bacia em células.

resultados foram manchas de inundação qualitativamente relatadas. O evento chuva/cheia observado usado para a calibração do modelo foi um período de 23 horas, do meio-dia de 21/02/81 até 11:00 h do dia seguinte, com um total de 114,7 mm de precipitação. Os resultados obtidos na calibração podem ser observados nas Figuras 11 e 12.

Após concluído o processo de calibração, o modelo ficou apto a realizar simulações, com o intuito de prever resultados de obras projetadas para a bacia, a fim de minimizar o efeito das cheias. Para essas simulações, adotou-se um período de recorrência de 10 anos para a chuva de projeto, considerada com duração de 3 horas, tempo este definido como crítico para a bacia do rio Cachoeira, em estudo anterior do CEHPAR (1985). A intensidade da chuva de projeto foi então estimada em 0,62 mm/min, a partir de uma curva intensidade x duração x frequência apresentada também pelo CEHPAR, neste mesmo estudo. A condição de contorno de jusante, no rio Cachoeira passou a ser um hidrograma de maré de sizígia, com alturas variando de menos 0,65 m até mais 0,95 m. Para tornar a situação simulada mais crítica, fez-se o pico do hidrograma de maré coincidir com o final da chu-

va, de forma a ter-se a maior restrição de jusante após toda a chuva simulada estar disponível para escoamento na bacia.

As obras a serem realizadas sobre a macro-drenagem compunham um conjunto de obras propostas pela própria Prefeitura Municipal, que, entretanto, não tinha como avaliar a eficiência destas obras funcionando em conjunto, ao longo da bacia. Dentre estas obras, que foram o objeto das simulações realizadas, têm-se uma série de alargamentos de vãos de pontes, eliminando pontos de contração de calha, canalizações por longos trechos e construções de novas galerias, chegando-se a ter mais do que a duplicação da capacidade de descarga em vários pontos. Todas estas obras propostas tiveram suas dimensões balizadas pelas limitações da urbanização existente, a fim de interferir o mínimo possível na comunidade instalada nas margens dos rios, evitando problemas de ordem social. Esta era uma diretriz proposta pela própria Prefeitura Municipal.

A primeira simulação mostrou deficiências no primeiro conjunto de obras proposto, que em determinados locais transferia e até agravava as cheias, concentrando-as. Uma segunda simulação fez ajustes sobre este conjunto de

obras, obtendo-se os resultados aqui apresentados. Nas Figuras 13 e 14, é mostrada a situação esquemática de alagamento, em termos de profundidades de água, sobre a topologia modelada. Esta representação não é de fácil visualização, pois não se tem o mapa da bacia. Qualitativamente, porém, pode-se perceber as manchas de inundação. Nessas duas figuras, mostra-se a situação atual e a situação após a introdução da configuração final das obras propostas. Para uma melhor visualização do fenômeno, as Figuras 15 a 21 mostram os hidrogramas de níveis de alagamento para determinados pontos da cidade, escolhidos entre os mais críticos, em ruas alagáveis, conforme a marcação de A até G sobre o mapa, vista na Figura 8.

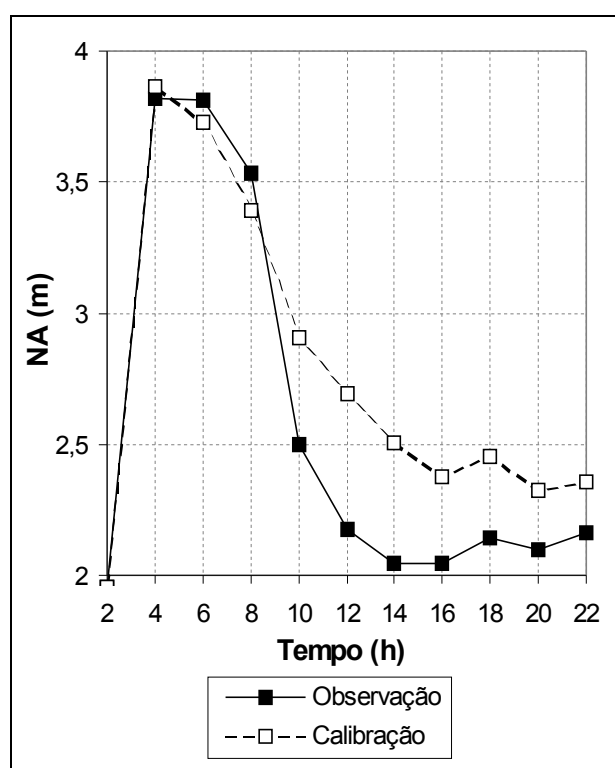


Figura 11. Calibração no rio Matias.

Uma observação direta destas figuras permite verificar que a melhoria dos níveis de alagamento é generalizada. Porém, sobram ainda alagamentos residuais em parte das planícies. Observando o mapa esquemático da planície, notam-se alagamentos na confluência dos rios Bucarein e Cachoeira, que por ser uma região mais baixa acaba acumulando a água drenada de pontos mais altos do relevo, e na confluência dos rios Helling e Jaguarão, numa faixa limitada ao conjunto de células que compõe a própria confluência destes rios. Parte dos alagamentos residuais, porém,

pode-se dever também à simplificada representação da contribuição da micro para a macro-drenagem, tirando água da superfície das ruas, que foi considerada apenas nas células que se superpunham às galerias. Assim, parte da água superficialmente escoada estava super-avaliada. Também não existiam dados que permitissem calibrar as equações de vazão ligando os bueiros às galerias, o que pode ter provocado interferência na retenção de água por mais tempo nas ruas, contribuindo nos resíduos de alagamento. Nesse contexto, esta simulação já mostra resultados de significativa melhoria nas condições de drenagem para os conjuntos de obras propostos.

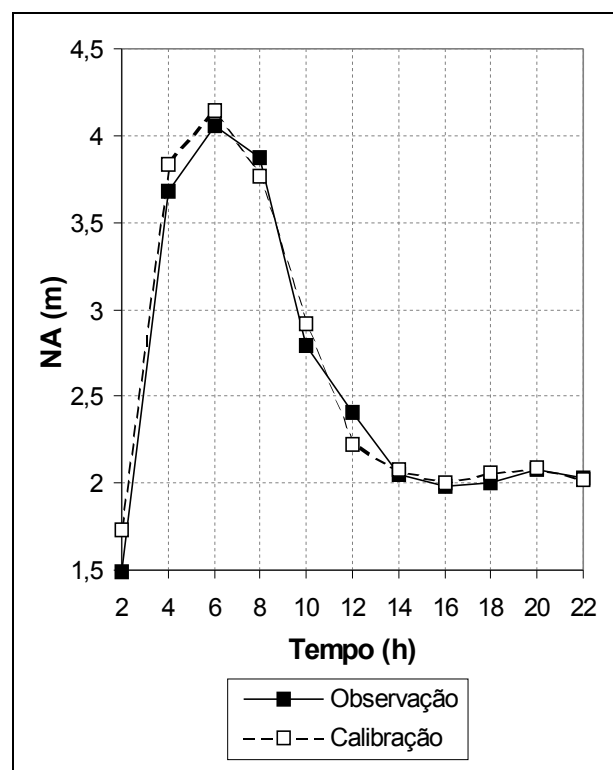


Figura 12. Calibração no rio Jaguarão.

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos mostraram que o caminho proposto para a modelação de uma cheia urbana, através da construção de um modelo baseado na adaptação da abordagem do modelo de células, pode render bons frutos. A reprodução do movimento da cheia sobre a bacia do rio Cachoeira, na cidade de Joinville, produziu bons resultados na calibração e, posteriormente, foi capaz de gerar vários cenários de simulação, quando foi possível mapear a evolução dos níveis de alagamento,

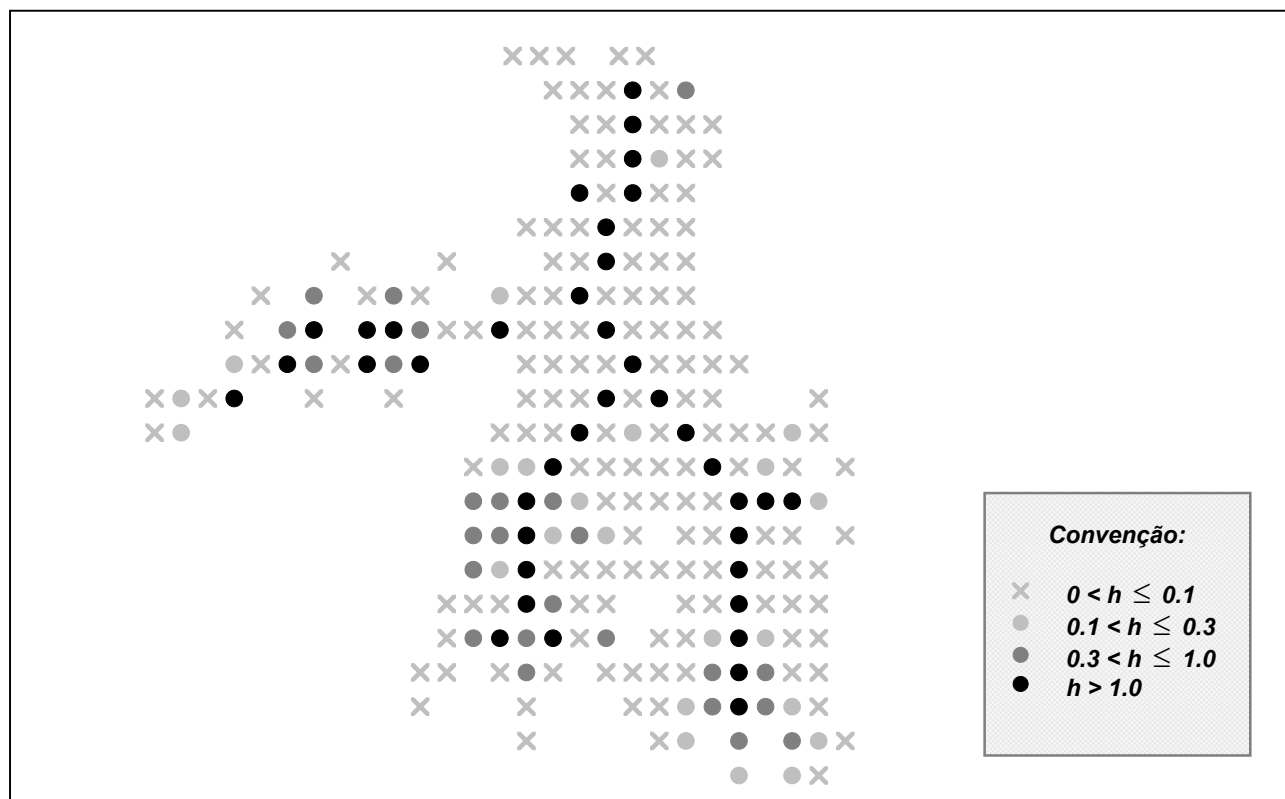


Figura 13. Alagamento em Joinville, mapa esquemático sobre a sua topologia - situação atual.

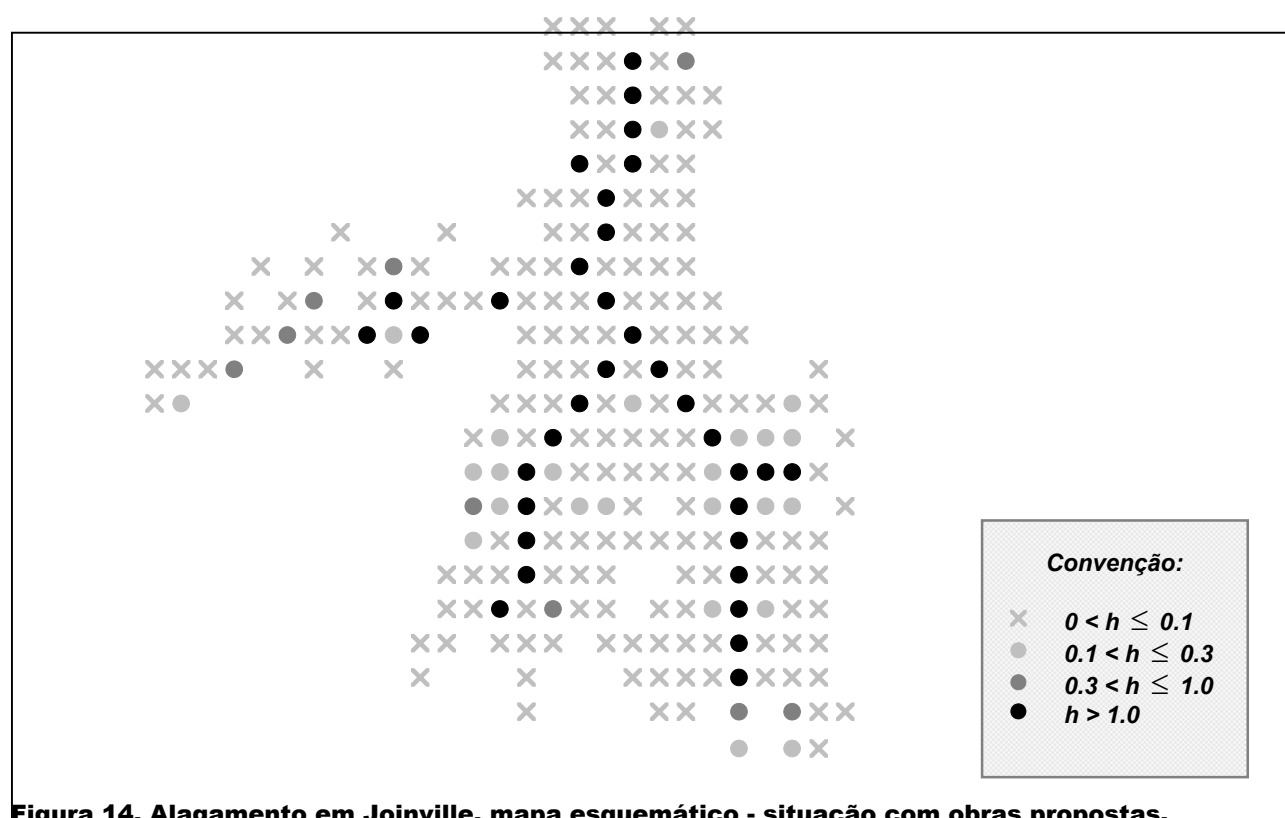


Figura 14. Alagamento em Joinville, mapa esquemático - situação com obras propostas.

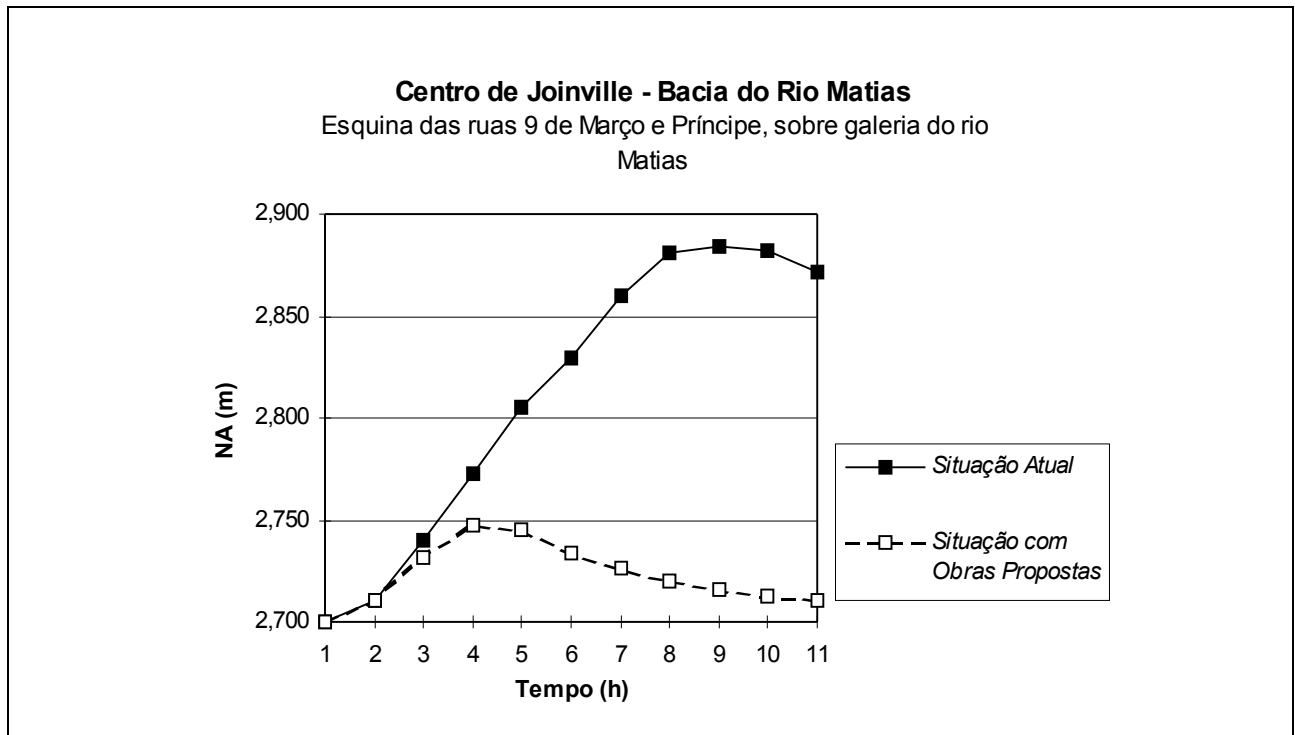


Figura 15. Resultado da simulação comparativa entre a situação atual e a situação com obras propostas, correspondente ao ponto A da Figura 8.

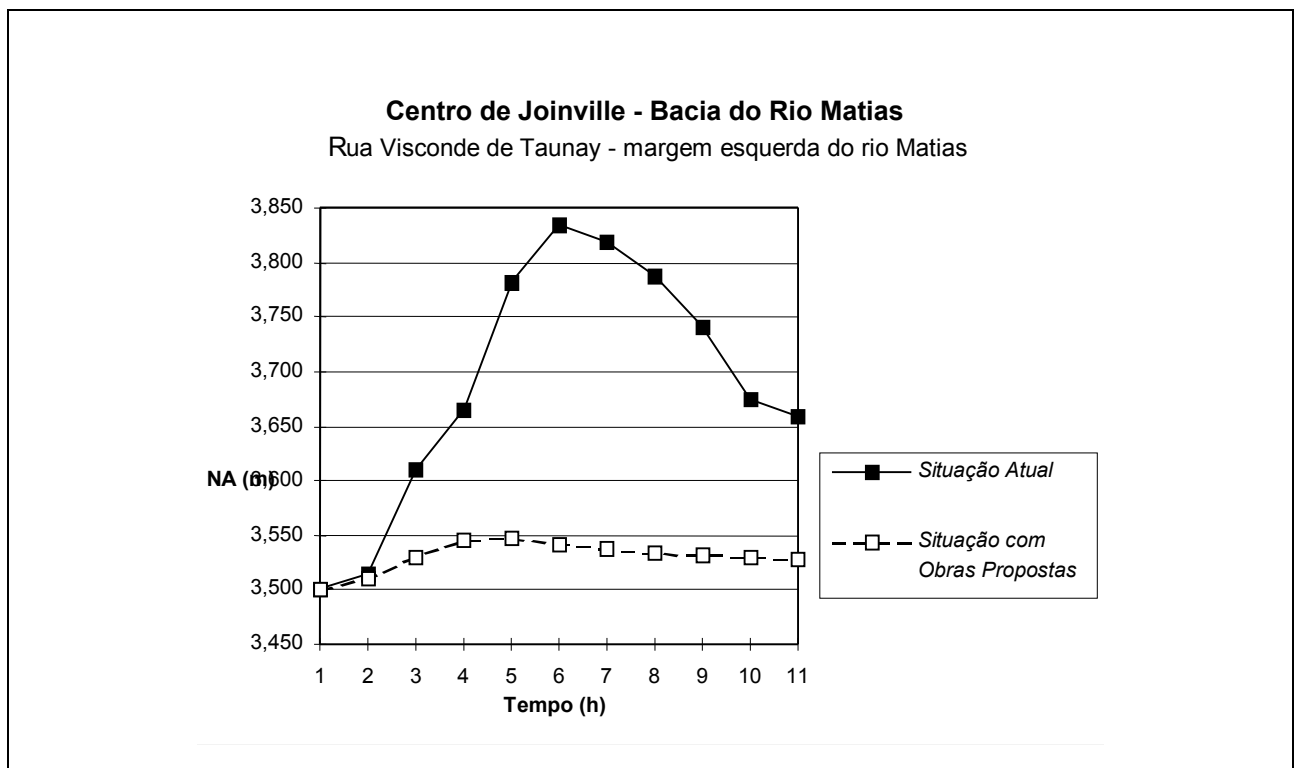


Figura 16. Resultado da simulação comparativa entre a situação atual e a situação com obras propostas, correspondente ao ponto B da Figura 8.

conforme alguns conjuntos de obras propostas. O comportamento identificado no movimento das cheias, nesta fase de simulações, confere, em linhas gerais, com uma análise preliminar em que se procurou definir, de forma qualitativa, os resultados que seriam produzidos por estas obras propostas.

Este trabalho é considerado como uma primeira etapa, que procura validar esta abordagem para que ela possa continuar a ser desenvolvida em passos posteriores. Dentro deste escopo, este objetivo foi considerado plenamente alcançado e, mesmo abstraído o fato de que este ainda é o ponto de partida, os resultados foram bastante satisfatórios, apesar de algumas simplificações maiores aqui consideradas, tais como a não consideração de escoamento sob pressão em galerias afogadas e a não consideração dos termos de inércia nos canais e rios principais.

Considerando as simplificações citadas acima, o tratamento das galerias trouxe algumas dúvidas, durante a aplicação do modelo, que foram dissipadas ao longo dos trabalhos. Foi difícil, a princípio, ajustar a relação de troca entre uma célula superficial e uma galeria, quando esta enchia e transbordava, ou seja, quando a cota do nível d'água calculada para a galeria superava a cota máxima do teto da galeria, pois não se tinha a quantificação exata de bueiros, nem as suas dimensões, assim como não se dispunham de informações para a calibração dos valores dos coeficientes de vazão dos bueiros, que foram tomados da literatura. Foram notadas algumas oscilações eventuais, com as células superficiais recebendo a água de volta, em um passo de tempo, e depois devolvendo-a de uma única vez. Em vários locais, porém, a velocidade do escoamento superficial, sobre as células de galeria, provocava uma distorção: coeficientes de escoamento superficial exagerados, cuja falta de informação também não fornecia possibilidade de uma calibração imediata, faziam a célula "secar", por passar toda a sua água disponível para as células de jusante. Isso dava a falsa impressão de problema na relação de troca galeria/superfície, parecendo que a água que vertia pelo bueiro para a galeria "secava" a célula num dado momento, para ser retornada à superfície num momento seguinte, devido ao excesso não comportado pela galeria. Na verdade, coeficientes de escoamento superficial exagerados levavam toda a água para fora da célula e, quando coincidia de parte da água retirada da célula também fazer ultrapassar o limite máximo da galeria associada, a galeria devolvia o excesso para a superfície. Esse excesso, cujo volume normalmente era muito menor do que o volume associado ao

escoamento superficial, era facilmente levado por ação do coeficiente de escoamento superficial exagerado, secando de novo a célula, não tendo nenhuma relação com oscilações computacionais de troca de vazão entre galeria e superfície.

Uma observação interessante, que se pôde notar com mais ênfase nesta aplicação, foi a versatilidade natural do modelo em poder realizar o escoamento em qualquer direção e sentido, conforme a diferença de cotas. Num primeiro momento, houve uma preocupação com o fato de que a área de aplicação do modelo estava sujeita ao efeito de marés e havia inversão no escoamento do rio Cachoeira por larga extensão. Isto, porém, acabou não representando problema. A definição de uma condição de contorno de jusante, que representasse o movimento da maré, e que em seu pico fizesse a inversão do escoamento, foi naturalmente compreendida pelo modelo, reproduzindo a situação real. Neste ponto, um cuidado que foi tomado, e acrescentado ao modelo original, referiu-se à verificação da declividade do fundo, para distinguir o escoamento no sentido natural do escoamento no sentido reverso. Tal cuidado é destacado pois o escoamento no sentido reverso tem que ter um coeficiente de escoamento minorado, pois o coeficiente de rugosidade de Manning, que faz parte do cálculo do coeficiente de escoamento e é inversamente proporcional a este, cresce à medida que crescem os obstáculos, fato que claramente ocorre no escoamento rio acima.

Não houve nenhum teste no sentido de verificar a importância dos termos de inércia desprezados. Pela situação de uma cheia urbana, porém, em que o processo se desenvolve rapidamente, mesmo com intervalos de tempo de cálculo pequenos, é possível que os termos de inércia tenham certa importância.

Além destas observações, cumpre destacar, como já verificado na aplicação original do modelo de células para áreas rurais, que a modelação do terreno e a definição dos padrões de escoamento continuam fundamentais para uma correta aplicação do modelo, pois o mesmo é totalmente dependente das direções de fluxo pré-definidas, sendo as equações unidimensionais escritas para estas direções, o que molda a rede bidimensional que representa o plano do escoamento.

Outro problema presente, mas que é inerente à realidade histórica brasileira, com poucas exceções, é o da disponibilidade de dados, especialmente em planícies. Nesta aplicação, apesar da colaboração da Prefeitura, ainda assim não se dispunha de um conjunto de dados realmente adequados. Havia relatórios que se complementa-

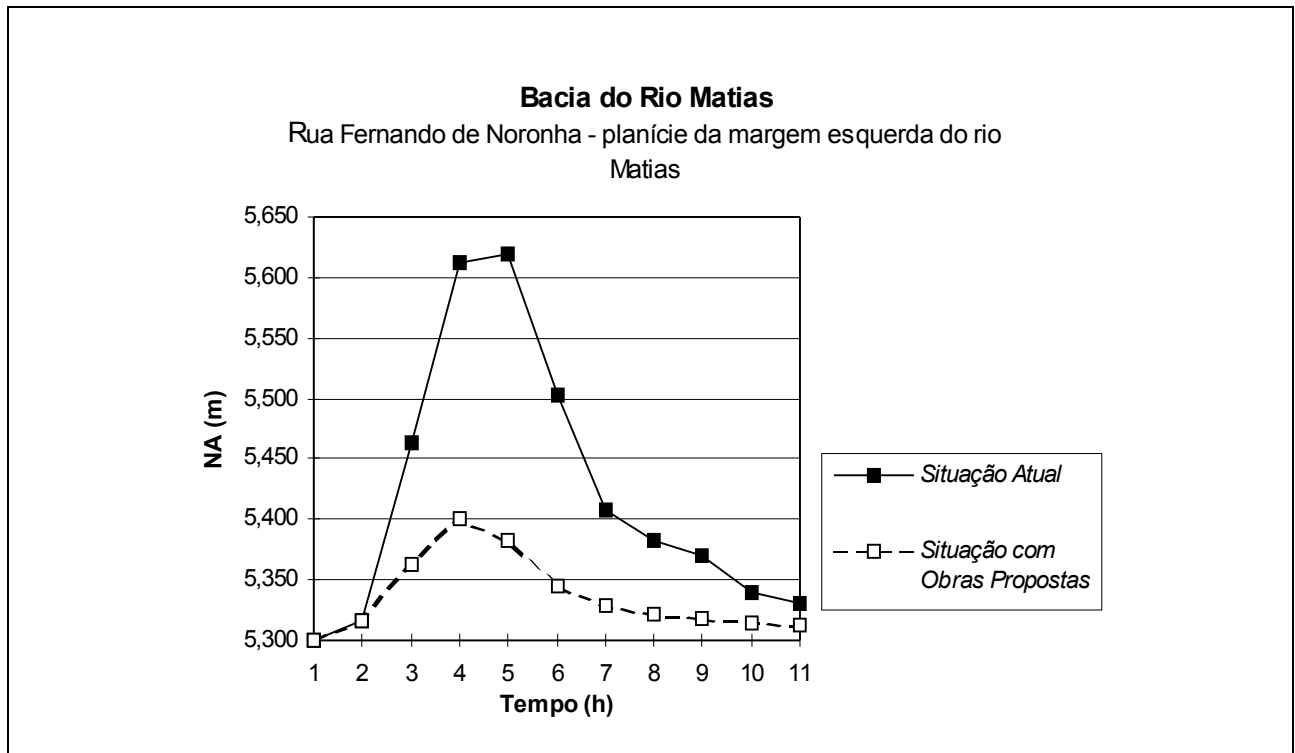


Figura 17. Resultado da simulação comparativa entre a situação atual e a situação com obras propostas, correspondente ao ponto C da Figura 8.

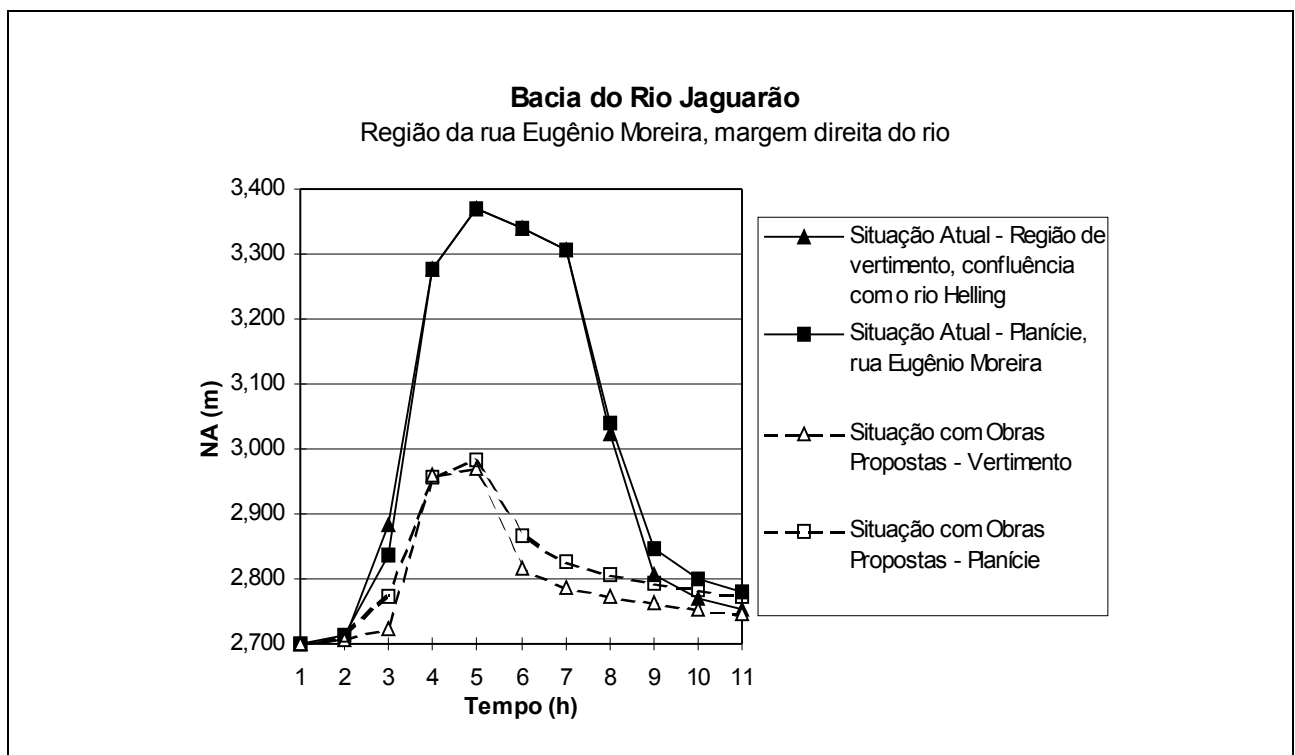


Figura 18. Resultado da simulação comparativa entre a situação atual e a situação com obras propostas, correspondente ao ponto D da Figura 8.

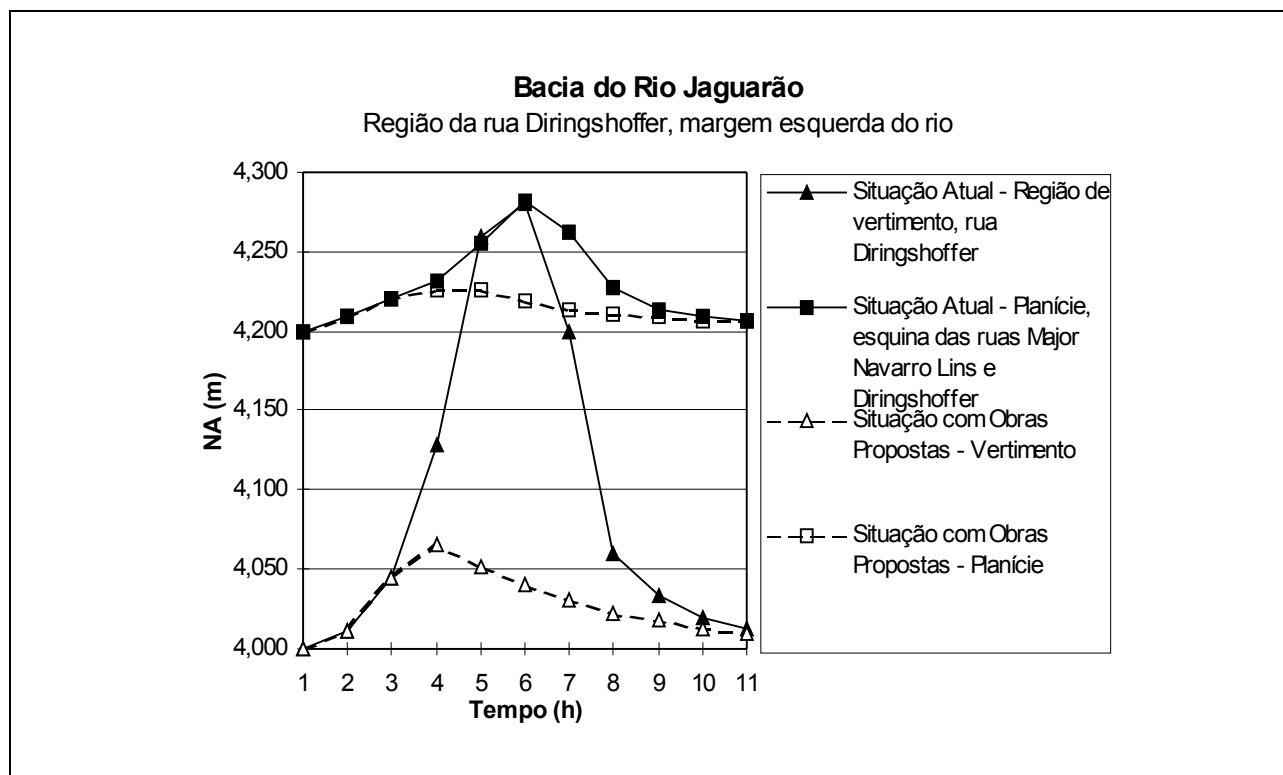


Figura 19. Resultado da simulação comparativa entre a situação atual e a situação com obras propostas, correspondente ao ponto E da Figura 8.

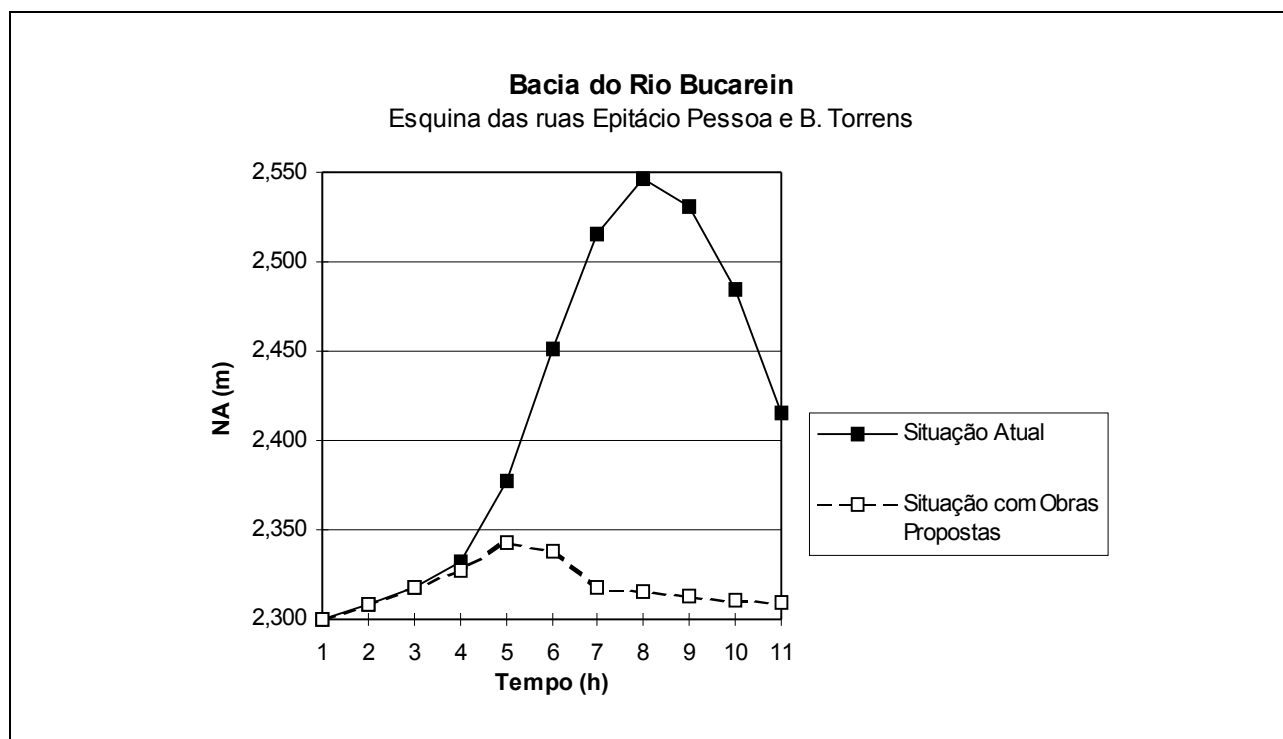


Figura 20. Resultado da simulação comparativa entre a situação atual e a situação com obras propostas, correspondente ao ponto F da Figura 8.

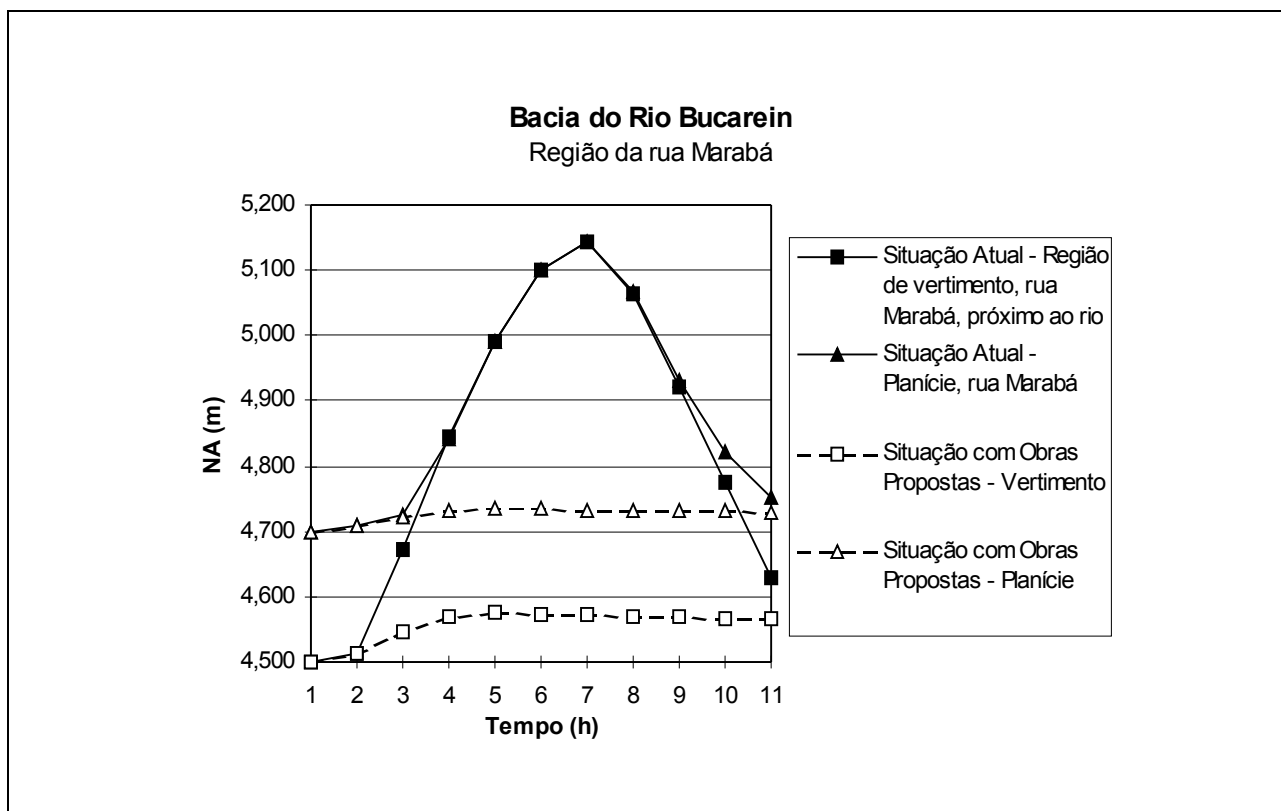


Figura 21. Resultado da simulação comparativa entre a situação atual e a situação com obras propostas, correspondente ao ponto G da Figura 8.

vam, mas de épocas diferentes. As informações de alagamento na cidade eram qualitativas e não quantitativas, tendo como melhor referência uma mancha de inundação máxima, levantada de eventos anteriores, e a informação do pessoal local que indicava as piores áreas, em termos de alagamento, e davam uma estimativa da lâmina d'água. Também foi difícil identificar exatamente quais as condições reais da macro-drenagem quando da época da calibração, pois várias obras vinham e vêm sendo implantadas na bacia e às vezes ficava difícil situá-las em relação àquela época.

Em termos de desenvolvimento futuro, para complementação deste trabalho, os autores propõem algumas discussões mais detalhadas. Entre elas, são citadas:

- a consideração de escoamento sob pressão em galeria, a partir do momento em que a equação de escoamento em rio (à superfície livre) indicar o primeiro valor de cota acima da cota do teto desta;
- a verificação da possibilidade de introduzir-se uma variação da massa específica do fluido escoado, pela mistura de lama, água e até lixo, que normalmente ocorrem em

cheias urbanas, onde há desmatamento de encostas, ocupações irregulares do próprio leito dos rios e, por vezes, disposição inadequada do lixo;

- a possibilidade de introdução dos termos de inércia nas equações que descrevem o escoamento em rios, canais e grandes galerias, distinguindo a ligação tipo-rio da ligação tipo-planície, esta última mantendo a simplificação dos termos de inércia, isto representado em um modelo único, de forma integrada, procurando manter a estrutura original da solução numérica. Ressalta-se que a introdução dos termos de inércia, separando-se o escoamento do canal do escoamento das planícies já foi objeto de modelação por outros pesquisadores.

Além disso, cabe uma discussão complementar sobre a necessidade de detalhamento maior da micro-drenagem, bem como uma revisão geral dos conceitos e estruturas hidráulicas inerentes a uma rede de drenagem urbana, com a finalidade de tornar o modelo o mais abrangente possível.

AGRADECIMENTO

Os autores deste trabalho gostariam de externar o seu agradecimento à Fundação José Bonifácio (FUJB) que, através de auxílio relativo ao processo nº 7631-7, forneceu infra-estrutura básica ao Laboratório de Hidráulica Computacional (LHC) da UFRJ, onde foi desenvolvida parte deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- CEHPAR (1985). *Estudos de Simulação do Escoamento do Rio Cachoeira em Joinville* - Relatório Final - Projeto HG56, Maio.
- CHOW, V. T. (1959). "Open Channel Hydraulics", McGraw-Hill International Book Company.
- CUNGE, J. A. (1975). Two-Dimensional Modelling of Flood Plains, in: *Unsteady Flow in Open Channels*, cap. 17. Colorado, Water Resources Publications.
- CUNGE, J. A.; HOLLY Jr., F. M.; VERWEY, A. (1980). *Practical Aspects of Computational River Hydraulics*. London, Pitman Advanced Publishing Program.
- IPH (1979). *Enchentes na Cidade de Joinville/SC* - Estudo Preliminar, IPH/UFRGS.
- IPH (1981) *Inundações na Cidade de Joinville* - Proteção do Centro Comercial, IPH/UFRGS.
- MASCARENHAS, F. C. B., MIGUEZ, M. G. (1993). *Large Flood Plains Modeling by a Cell Scheme: Application to the Pantanal of Mato Grosso*. Second International Symposium on Engineering Hydrology - Hydraulics Division of the American Society of Civil Engineering (ASCE). San Francisco/California, USA, July.
- MASCARENHAS, F. C. B., MIGUEZ, M. G. (1994). Modelação de Grandes Planícies de Inundação por um Esquema de Células - Aplicação ao Pantanal de Mato-Grosso. *Revista Brasileira de Engenharia (RBE), Caderno de Recursos Hídricos*, v12, n.2, dezembro.
- MIGUEZ, M. G. (1994). *Modelação Matemática de Grandes Planícies de Inundação, através de um Esquema de Células de Escoamento, com Aplicação ao Pantanal Mato-Grossense*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, abril.
- TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L.; BARROS, M. T. DE. (1995). *Drenagem Urbana*. Porto Alegre, ABRH, Editora da Universidade/UFRGS.
- ZANOBETTI, D. & LORGERÉ, H. (1968). "Le Modele Mathématique du Delta du Mékong", *La Houille Blanche*, n.1, 4 e 5.

ZANOBETTI, D.; LORGERÉ, H.; PREISSMAN, A.; CUNGE, J. A. (1970). Mekong Delta Mathematical Program Construction. *Journal of the Waterways and Harbours Division*, ASCE, v96, n.WW2, p181-199.

Mathematical Model of Urban Floods Using a Flow Cell Scheme

ABSTRACT

The main purpose of the present study is modeling flood behavior in urban areas. The starting point is the flow cell scheme, which has been historically used to represent great flood plains in rural areas. This concept had its origin in the works of Zanobetti, Lorgeré, Preissman and Cunge to develop a model of Mekong River Delta, in the late sixties'. Recently, in Brazil, this concept was used to model the Pantanal Matogrossense, a large marsh watershed of great ecological importance (Miguez, 1994). That work is here being adapted to model urban reality, aiming at the simulation of all diversity concealed with in the representation of urban drainage. The resultant model is applied to the city of Joinville, in the State of Santa Catarina, Southern Brazil. The correct mathematical modeling of urban drainage is a very important goal to be achieved in developing an effective general system for urban flood control.