

**Universidade Federal de Santa Catarina  
Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental**

**IMPLEMENTAÇÃO DE UMA VERSÃO DISTRIBUÍDA DO  
HYCYMODEL: ESTUDO DE CASO DA BACIA DO RIO  
PEQUENO, REGIÃO METROPOLITANA DE CURITIBA, PR**

**Pedro Luiz Borges Chaffe**

**FLORIANÓPOLIS, (SC)  
NOVEMBRO/2007**

**Universidade Federal de Santa Catarina  
Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental**

**IMPLEMENTAÇÃO DE UMA VERSÃO DISTRIBUÍDA DO  
HYCYMODEL: ESTUDO DE CASO DA BACIA DO RIO  
PEQUENO, REGIÃO METROPOLITANA DE CURITIBA, PR**

**Pedro Luiz Borges Chaffe**

**Trabalho apresentado à Universidade  
Federal de Santa Catarina para Conclusão  
do Curso de Graduação em Engenharia  
Sanitária e Ambiental**

**Orientador  
Doutorando Roberto Valmir da Silva**

**FLORIANÓPOLIS, (SC)  
NOVEMBRO/2007**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL**

**IMPLEMENTAÇÃO DE UMA VERSÃO DISTRIBUÍDA DO HCYMODEL:  
ESTUDO DE CASO DA BACIA DO RIO PEQUENO, REGIÃO  
METROPOLITANA DE CURITIBA, PR**

**PEDRO LUIZ BORGES CHAFFE**

**Trabalho submetido à Banca Examinadora como parte dos requisitos  
para Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e  
Ambiental–TCC II**

**BANCA EXAMINADORA :**

---

**Doutorando Roberto Valmir da Silva**  
(Orientador)

---

**Prof. Dr. Davide Franco**  
(Membro da Banca)

---

**Prof. Dr. Masato Kobiyama**  
(Membro da Banca)

**FLORIANÓPOLIS, (SC)  
NOVEMBRO/2007**

**Dedico esse trabalho à minha família, pelo amor, dedicação, paciência e pela educação que me deram. Assim, pude fazer minhas escolhas.**

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Roberto Valmir da Silva, pela amizade, paciência e ajuda sem a qual seria impossível a realização deste trabalho.

Ao Prof. Masato Kobiyama, por ter me apresentado essa bela ciência chamada Hidrologia e cuja dedicação ao trabalho, amizade, simplicidade e histórias são uma fonte de inspiração. Como R. P. Feynman falou: "...o melhor ensino só pode ser praticado quando há uma relação individual direta entre um estudante e um bom professor."

Aos amigos do Laboratório de Hidrologia da UFSC, pela dedicação e companheirismo nas horas de trabalho e diversão.

A todos meus amigos e colegas que direta ou indiretamente me deram forças para a realização deste trabalho.

*“Não podemos esquecer que quando o [elemento] rádio foi descoberto, ninguém sabia que ele seria útil em hospitais [para tratar câncer]. Era um trabalho de ciência pura, e isso é prova de que um trabalho científico não deve ser avaliado do ponto de vista de sua utilidade direta. Ele precisa ser feito por si só, pela beleza da ciência.*

Marie Curie (1867-1934)

## SUMÁRIO

RESUMO .....	viii
ABSTRACT .....	ix
1. <b>INTRODUÇÃO</b> .....	1
2. <b>OBJETIVOS</b> .....	2
2.1. OBJETIVO GERAL .....	2
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	2
3. <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	3
3.1. MODELOS HIDROLÓGICOS .....	3
3.2. HCYMODEL .....	4
3.2.1 <i>Teoria do HCYMODEL</i> .....	5
3.2.1.1. Modelo de Vazão de Base .....	6
3.2.1.2. Modelo de Evaporação .....	7
3.2.1.3. Modelo de Transpiração .....	7
3.2.1.4. Modelo de Evaporação de Canal .....	8
3.2.1.5. Modelo de Chuva Efetiva para o Escoamento Direto .....	9
3.2.1.6. Armazenamento e Vazão .....	9
4. <b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	10
4.1. ÁREA DE ESTUDO .....	10
4.2. DADOS HIDROLÓGICOS .....	11
4.3. DESCRIÇÃO DO MODELO DISTRIBUÍDO .....	11
4.4. CALIBRAÇÃO .....	12
5. <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	13
5.1. DISCRETIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....	13
5.2. CALIBRAÇÃO DO MODELO CONCENTRADO .....	13
5.3. APLICAÇÃO DO MODELO DISTRIBUÍDO .....	15
6. <b>CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES</b> .....	18
7. <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	19

## RESUMO

O entendimento da distribuição espacial e temporal da água sobre os continentes (do ciclo hidrológico) é um dos fatores mais importantes no gerenciamento ambiental de áreas naturais e alteradas. Porém nem todos os processos podem ser medidos, devido à heterogeneidade do ambiente. Então, o uso de modelos matemáticos é uma ferramenta essencial para o estudo dos processos hidrológicos. O modelo concentrado HYCYMODEL pode simular diversos desses processos. Em geral a possibilidade de simulação espacial dos processos hidrológicos é muito importante. Portanto, o objetivo do presente trabalho foi elaborar uma versão distribuída espacialmente do modelo HYCYMODEL e compará-la com a versão original desse modelo. As versões concentrada e distribuída foram aplicadas na Bacia do Rio Pequeno, PR. O modelo concentrado foi usado para a calibração dos parâmetros e mostrou um bom ajuste. Já o modelo distribuído espacialmente não teve um ajuste tão bom, porém foi capaz de representar alguns fenômenos físicos. O tipo de solo da bacia foi usado como entrada do modelo distribuído. Com as saídas desse modelo pode-se ainda mapear espacialmente evapotranspiração e vazão.

**Palavras-Chave:** modelo distribuído; HYCYMODEL; Bacia do Rio Pequeno, PR.

## ABSTRACT

The understanding of the hydrologic cycle is one of the key factors for the environmental management of natural or disturbed areas. However, it is not possible to verify experimentally some of the processes related to the hydrologic cycle due to the heterogeneity of the environment. Hence, the use of mathematical models is an essential tool for the understanding of the hydrological processes. The lumped model HYCYMODEL can simulate many of those processes. Usually, the possibility of simulating those processes considering the spatial dimension is very important. Therefore, the objective of the present study was to elaborate a distributed version of the HYCYMODEL and compare it with the original model. Both models were applied to the Rio Pequeno Catchment, PR. The lumped model was used for parameter calibration and showed a good fitness measurement. On the other hand the spatially distributed model did not show such a goodness of fit but was able to represent some of the physical phenomena of the catchment. The soil type was used as an input for the distributed model. With the output of this model, evapotranspiration and discharge were mapped on the catchment.

**Key Words:** distributed model; HYCYMODEL; Rio Pequeno Catchment, PR.

## 1. INTRODUÇÃO

A água é um elemento dinâmico que altera o ambiente, participando de processos geomorfológicos, geoquímicos e biológicos nas mais diferentes escalas de tempo, que variam de segundos até eras geológicas. Portanto, o entendimento da distribuição espacial e temporal da água sobre os continentes é um dos fatores mais importantes no gerenciamento ambiental de áreas naturais e alteradas. Essas distribuições são descritas através do ciclo hidrológico e o seu estudo deve ser feito tendo como unidade fundamental a bacia hidrográfica.

O ciclo hidrológico pode ser descrito de diversas maneiras que dependem fundamentalmente da percepção que cada pessoa tem dos fenômenos envolvidos. Basicamente, a água que é evaporada dos continentes e oceanos chega à atmosfera. Dependendo das condições climáticas, ela pode condensar e precipitar voltando à superfície. Ainda antes de atingir o solo essa água pode ser interceptada pelas plantas. A parte que atinge o solo pode infiltrar, ser armazenada e escoar subsuperficialmente ou superficialmente até a exutória da bacia dependendo das condições prévias do solo. Novamente uma porção da água do solo é evaporada ou ainda transpirada pelas plantas e assim o ciclo se completa. Tudo ligado à ação da gravidade e da energia solar.

Esses diversos mecanismos do ciclo hidrológico são muito complexos e a capacidade de verificá-los experimentalmente na maioria dos casos é muito limitada. Isso é devido principalmente à heterogeneidade do ambiente e à limitação dos instrumentos de medição. Então, o uso de modelos hidrológicos matemáticos é essencial para realizar experimentos, de uma maneira relativamente rápida e econômica, que interliguem os mais diferentes aspectos do ciclo hidrológico. Através do uso desses modelos pode-se fazer a extrapolação de dados monitorados (quando existirem) e também aumentar o conhecimento dos processos hidrológicos. Apesar de não podermos medir o futuro, o uso de modelos pode antecipar as possíveis conseqüências da transformação do ambiente.

O modelo concentrado HYCYMODEL (*Hydrological Cycle Model*) foi desenvolvido por Fukushima e Suzuki (1986) e Fukushima (1988) baseado em observações dos processos hidrológicos de uma pequena bacia florestal montanhosa no Japão. Ele pode simular diversos desses processos (escoamento direto, escoamento de base, transpiração e evaporação, por exemplo) apenas com o uso de dados de precipitação e vazão.

Em geral, o uso de poucos dados de entrada e a possibilidade de simulação espacial dos fenômenos hidrológicos é muito importante, principalmente em bacias com poucos dados monitorados. Além disso, nos últimos anos, a demanda por modelos distribuído tem aumentado pois eles são capazes de realizar balanço hídrico em escalas cada vez menores e também em simular padrões de inundação. Esses modelos podem ser usados para simulação de cenários que envolvam o aquecimento global, desenvolvimento regional e portanto são indispensáveis para o aumento de informação principalmente em regiões ou países pouco desenvolvidos e com baixo nível de monitoramento.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GERAL**

O objetivo do presente trabalho foi elaborar uma versão distribuída espacialmente do modelo HYCYMODEL e compará-la com a versão original do HYCYMODEL.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Implementar a versão distribuída do HYCYMODEL;
- Ajustar o modelo concentrado com a série de dados da Bacia do Rio Pequeno;
- Aplicar o modelo distribuído na mesma série de dados da Bacia do Rio Pequeno utilizando os parâmetros calibrados do modelo concentrado.
- Mapear vazão e evapotranspiração total na bacia.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. MODELOS HIDROLÓGICOS

Todo modelo é uma aproximação da realidade. Com eles, tentamos representar os aspectos que foram reconhecidos como fundamentais de um sistema. O ser humano usa modelos a todo instante para melhor representar, compreender ou ainda fazer previsões a respeito do mundo a sua volta. Ele pode ser um modelo mental de como mais rapidamente atravessar uma rua sem ser atropelado por exemplo; ou um modelo físico reduzido como quando uma criança monta uma ponte com blocos de *lego*; ou ainda matemático como quando um cientista tenta descrever o escoamento dos fluídos através de equações.

Os modelos hidrológicos também são usados para aumentar o conhecimento sobre os fenômenos hidrológicos ou ainda fazer previsões de como uma bacia hidrográfica responderá a diferentes cenários. Eles são normalmente matemáticos e podem ser classificados de diversas maneiras, conforme a: distribuição espacial dos parâmetros utilizados (distribuídos), base física (conceitual), linearidade, número de componentes, determinação do valor, entre outros.

O método racional é um exemplo de modelo simples que foi criado no século XIX pelo engenheiro Thomas James Mulvaney.. Ele foi o primeiro modelo hidrológico a ser amplamente usado. Ele é definido por uma equação baseada em considerações simples, daí vem o seu nome. Embora o método calcule apenas a vazão máxima de uma bacia, ele ainda é o método mais utilizado para dimensionamento de obras de enchente (LINSLEY, 1986).

Como foi mencionado anteriormente, os modelos podem ser classificados em concentrados (*lumped*) e distribuídos. Nos modelos concentrados, as variáveis são consideradas homogêneas no sistema. Nos modelos distribuídos as variáveis são consideradas como funções do espaço. Com o avanço da tecnologia, especialmente na área de geoprocessamento, vários modelos distribuídos vêm sendo propostos, como exemplo pode-se citar o modelo TOPMODEL (BEVEN et al, 1984) e TOPOG (O'LOUGHLIN, 1986).

Existe uma maneira de classificar modelos em base física (conceitual) e não-física (empírica). O modelo empírico corresponde ao modelo de caixa preta (*black box*), enquanto o modelo físico, de caixa branca (*white box*). Entretanto, HINO (1989) não concorda e faz críticas a classificação mencionada. Segundo o autor, qualquer modelo simples baseia-se na física, quando o modelo ajusta-se bem aos processos de chuva-vazão. Sem base física, seria impossível simular os processos hidrológicos com um bom ajuste.

O conceito de linearidade também é usado para classificação dos modelos. Os processos hidrológicos são fortemente não-lineares. Entretanto, modelos lineares tais como o método de hidrograma unitário (SHERMAN, 1932) e o modelo de Stanford (CRAWFOLD e LINSLEY, 1962), também podem realizar bom ajuste com fenômenos hidrológicos monitorados.

O fato de a vazão total possuir vários componentes (vários tipos de escoamentos) é necessário o reconhecimento dos seus componentes em um hidrograma. No caso de modelos uni-componente, por exemplo o método de hidrograma unitário (SHERMAN, 1932), não é possível estimar cada um dos componentes da vazão, entretanto, isso é possível utilizando modelos de multi-componentes, tais como o modelo de tanque (SUGAWARA, 1961 e SUGAWARA

et al., 1983) e o modelo auto-regressivo de separação de filtro (HINO e HASEBE, 1981, 1984, 1986).

Nas simulações hidrológicas que consideram variabilidade no tempo e espaço, e que introduz conceitos probabilísticos, são denominados estocásticos (um valor de entrada que gera valores de saída que seguem algum mecanismo aleatório). Os modelos onde a natureza probabilística não é considerada, são denominados modelos determinísticos, e um valor de entrada gera sempre um mesmo valor de saída (CHOW et al., 1988).

### 3.2. HYCYMODEL

Fukushima e Suzuki (1986) e Fukushima (1988) apresentaram o HYCYMODEL com base no monitoramento hidrológico de uma pequena bacia hidrográfica (0,0599 km<sup>2</sup>) durante 10 anos no Japão. Pelas diversas classificações, o HYCYMODEL pode ser considerado como determinístico, concentrado, conceitual, de multi-componentes, e não linear. O modelo necessita de nove parâmetros e pode estimar a evaporação, transpiração, escoamento direto e de base, com intervalo de tempo diário ou horário.

Através de simulação do modelo HYCYMODEL, Fukushima (1987) verificou a influência da idade da floresta sobre a vazão no período de 100 anos e mostrou esquematicamente a alteração nas taxas de evaporação, transpiração, e escoamentos direto e de base no contexto de balanço hidrológico.

Fukushima et al. (1988) fizeram comparação entre valores monitorados e simulados pelo HYCYMODEL nos processos chuva-vazão em uma bacia de floresta com área de 0,237 km<sup>2</sup> e outra de grama com área de 0,538 km<sup>2</sup>. Os autores concluíram que a porcentagem do escoamento direto sobre o escoamento total na bacia com cobertura grama foi maior. Aplicando o modelo HYCYMODEL em duas bacias com diferentes geologias com área de 0,7 km<sup>2</sup> e 0,0406 km<sup>2</sup>, Fukushima et al. (1989) verificaram efeito da geologia sobre a hidrologia.

Fukushima et al. (1991) modificou o HYCYMODEL para adaptá-lo na condição glacial e aplicou a versão modificada em uma bacia na região de Nepal (333 km<sup>2</sup>), onde foi possível avaliar o efeito glacial de derretimento da neve.

Kubota et al. (1996) aplicaram o HYCYMODEL para quatro bacias (10,88 km<sup>2</sup>, 10,6 km<sup>2</sup>, 10,4 km<sup>2</sup>, e 90,6 km<sup>2</sup>) localizadas em áreas vulcânicas no Japão e na Indonésia, onde foi possível demonstrar a peculiaridade da região vulcânica. Usando a equação de Priestly e Tyer (1972), Tanaka et al. (1998) aplicou o HYCYMODEL para três pequenas bacias chinesas (área média 0,1 km<sup>2</sup>) e obtiveram como resultado um bom ajuste.

Vários trabalhos vêm mostrando a aplicabilidade do modelo hidrológico para pequenas bacias aplicadas à diferentes condições climáticas, geológicas e vegetativa. Recentemente, Ma et al. (1999) propuseram e mostraram a aplicabilidade de um modelo fazendo a combinação entre o modelo SVAT (*Soil-Vegetation-Atmosphere-Transfer*) criado por Ma et al. (1998), e a versão modificada do HYCYMODEL. Em uma outra modificação, Ma et al. (2000) inseriram o modelo SVAT-HYCYMODEL em um sistema de geoprocessamento para gerar um novo modelo distribuído para possibilitar a simulação do processo chuva-vazão em uma grande bacia (2.488.000 km<sup>2</sup>).

Ariyakanon (2000) reprogramou, em FORTRAN90, o modelo HYCYMODEL com o objetivo de determinar parâmetros de maneira objetiva (automática), e avaliou a influência da cobertura florestal na.

Kobiyama e Duarte (1997) e Kobiyama et al. (1999) mostraram um bom ajuste do HYCYMODEL para processo chuva-vazão de bacia nos estados de Santa Catarina e Paraná, respectivamente. Kobiyama et al. (1996) modificou este modelo, considerando a evapotranspiração da área de pastagem.

Este modelo consiste basicamente em expressar quantitativamente o ciclo hidrológico, podendo simular os hidrogramas em função da precipitação ocorrida. Sua estrutura é composta por tanques que representam dois sistemas: de canal e de encosta. A precipitação é distribuída para o escoamento total e para a evapotranspiração através de subsistemas individuais de evaporação e transpiração.

### 3.2.1 Teoria do HYCYMODEL

O HYCYMODEL apresentado na Figura 4 possui cinco tanques (I-V), os tanques que apresentam a borda superior reta ou retangular representam um sistema linear e aqueles que apresentam bordas superiores abertas representam um sistema não linear. A precipitação  $R(t)$  é dividida macroscopicamente em fluxo de escoamento  $Q(t)$  e evaporação  $E(t)$  através de dois subsistemas individuais. A  $R(t)$  é distribuída no sistema de canais como uma área impermeável e para um sistema de floresta de encosta como uma área permeável, baseando-se em um parâmetro  $C$  (relação de área do canal).

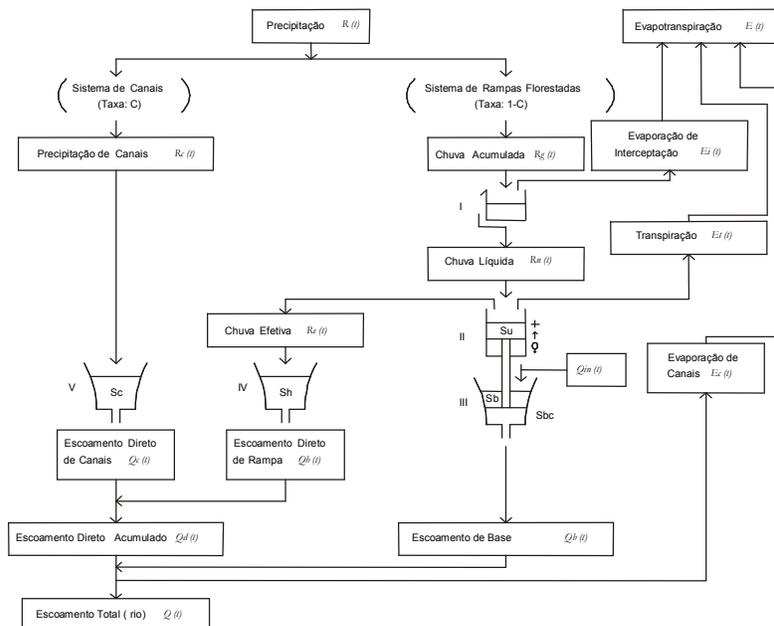


Figura 1. Representação esquemática das principais partes do modelo HYCYMODEL

No sistema de canal, a precipitação de canal  $R_c(t)$  iguala-se a  $R(t)$ , que abastece o Tanque V, que possui uma capacidade de armazenamento  $S_c(t)$ . O acúmulo de água resultante no Tanque V gera o escoamento direto de canal  $Q_c(t)$ . O escoamento direto aparente do canal  $Q_c^*(t)$  é calculado pela expressão,

$$Q_c^*(t) = C \cdot Q_{c(t)} \quad (1)$$

Em um ambiente de florestas de encostas, a chuva acumulada sobre a cobertura  $R_g(t)$  se iguala a  $R(t)$ , e na seqüência  $R_g(t)$  é interceptada parcialmente no Tanque I. O excesso do Tanque I cairá sobre a superfície como chuva líquida  $R_n(t)$ , que entrará no Tanque II. O Tanque II possui capacidade de armazenamento  $S_u(t)$  que é calculada conforme as equações,

$$S_u^*(t) = S_u(t-1) + R_n(t) - R_e(t) \quad (2)$$

$$S_u^{**}(t) = S_u^*(t) - Q_{in}(t) \quad (3)$$

$$S_u(t) = S_u^{**}(t) - E_t(t) \quad (4)$$

sendo,  $R_e(t)$  a chuva efetiva para fluxo de escoamento direto em uma floresta de encosta;  $Q_{in}(t)$  o escoamento da água no solo do Tanque II para o Tanque III;  $E_t(t)$  a transpiração das árvores. A obtenção do parâmetro  $R_e(t)$  é explicada no Item 3.2.1.5.

A  $R_e(t)$  é adicionada ao Tanque IV, sendo que este possui um armazenamento  $S_h(t)$  que é transformado em vazão direta (fluxo direto) em uma floresta de encosta ( $Q_h(t)$ ). A vazão direta aparente de encostas  $Q_h^*(t)$  é calculado pela expressão,

$$Q_h^*(t) = (1 - C) \cdot Q_h(t) \quad (5)$$

o fluxo de escoamento direto total  $Q_d(t)$  é obtido pela equação,

$$Q_d(t) = Q_c^*(t) + Q_h^*(t) \quad (6)$$

A Transpiração  $E_t(t)$ , que é o retorno da água do solo para a atmosfera por meio da vegetação, acontece no Tanque II. Logo abaixo do Tanque II está localizado o Tanque III que está conectado ao primeiro (Tanque II) por um tubo capilar. O Tanque II representa os macroporos e o Tanque III representa os microporos da superfície dos solos de floresta. Entre os Tanques II e III ocorre o escoamento da água no solo ou percolação  $Q_{in}(t)$ . A  $Q_{in}(t)$  é sucedida pela vazão de base (fluxo básico)  $Q_b(t)$  que é somado ao armazenamento  $S_b(t-1)$  do Tanque III. O armazenamento crítico  $S_{bc}$  está relacionado com a diminuição da transpiração durante uma seca. A evaporação de canal  $E_c(t)$  acontece após a coleta de todos os fluxos no canal. O fluxo básico aparente em uma estação de observação  $Q_b^*(t)$  é definido pela Equação 7,

$$Q_b^*(t) = (1 - C) \cdot Q_b(t) - E_c(t) \quad (7)$$

Assim, a vazão total do rio  $Q(t)$  é,

$$Q(t) = Q_d(t) + Q_b^*(t) \quad (8)$$

### 3.2.1.1. Modelo de Vazão de Base

Nem toda  $R(t)$  escoa, uma parte é armazenada e a relação entre armazenamento e vazão (escoamento) da água, normalmente usada em modelos com

tanques vem a ser,

$$S = K \cdot Q^P \quad (9)$$

sendo,  $S$  o armazenamento;  $Q$  a vazão;  $K$  e  $P$  são parâmetros. O parâmetro  $P$  é igual a 1 para modelos lineares e diferente da unidade para modelos não lineares.

### 3.2.1.2. Modelo de Evaporação

A estrutura do Tanque I mostrada na Figura 5 (SUZUKI et al, 1979), representa a cobertura vegetal e possui capacidade máxima de armazenamento  $S_1$ . Quando a chuva acumulada  $R_g(t)$  ultrapassa a capacidade máxima de armazenamento  $S_1$  o excesso de água do Tanque I é distribuído sobre a superfície do solo para outro tanque, que representa a capacidade máxima de armazenamento nos talos e troncos ( $S_2$ ). A distribuição da água entre os tanques é controlada através das taxas  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  que representam, respectivamente, a água interceptada pela vegetação que chegou a superfície do solo diretamente ou escoou pelos talos e troncos. Quando a água da chuva permanece em ambos os tanques, sua taxa de evaporação é  $e_i$  (mm/h). Os valores de  $S_1$  e  $S_2$  relacionam-se com a densidade e a idade da floresta, tipo de árvores e área foliar.

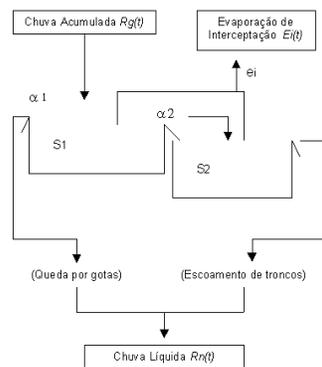
A chuva líquida  $R_n(t)$  corresponde ao excesso de  $S_1$  e  $S_2$ , e a soma de ambos define a quantia máxima de armazenamento. A evaporação da chuva interceptada  $E_i(t)$  é dado pelas equações,

$$E_i(t) = e_i \quad \text{se } S_1 + S_2 \geq e_i \quad (10)$$

$$E_i(t) = S_1 + S_2 \quad \text{se } S_1 + S_2 < e_i \quad (11)$$

A evaporação aparente  $E_i^*(t)$  é dada por,

$$E_i^*(t) = (1 - C) \cdot E_i(t) \quad (12)$$



**Figura 2. Estrutura do Tanque I.**

### 3.2.1.3. Modelo de Transpiração

Para uma mesma área, as variações sazonais da transpiração relacionam-se com as diferenças anuais da evaporação, isto porque as árvores controlam a transpiração através da resistência estomática. Porém, as taxas de transpiração

diminuem em condições de déficit de água no solo. Na condição de déficit hídrico, a variação sazonal da transpiração é denominada transpiração potencial  $e_p(i)$ , onde  $i$  é o  $i$ -ésimo mês.

Quando há o armazenamento nos Tanques II e III, a transpiração atual  $E_t(t)$  pode ser estimada por uma das seguintes equações apresentadas,

$$E_t(t) = e_{p(i)} \quad \text{se } S_u \geq 0 \quad (13)$$

$$E_t(t) = e_{p(i)} \quad \text{se } S_u < 0 \text{ e } S_b \geq S_{bc} \quad (14)$$

$$E_t(t) = e_{p(i)} \cdot \frac{Q_b(t)}{Q_{bc}} \quad \text{se } S_u < 0 \text{ e } S_b < S_{bc} \quad (15)$$

sendo,  $Q_{bc} = f(S_{bc})$

Na Equação 13,  $E_t(t)$  iguala-se a  $e_p(i)$  e a transpiração consome o equivalente a  $S_u$  de água, conforme a Equação 5. Na Equação 14 a perda da transpiração no Tanque II é recuperada rapidamente através do tubo capilar do Tanque III. Aparentemente neste caso, a transpiração acontece da seguinte forma: ao invés da Equação 4 para o Tanque II, tem-se,

$$S_u(t) = S_u^{**}(t) \quad (16)$$

e para o Tanque III,

$$S_b(t) = S_b^{**}(t) - E_t(t) \quad (17)$$

sendo,

$$S_b^*(t) = S_b(t-1) + Q_{in}(t) \quad (18)$$

$$S_b^{**}(t) = S_b^*(t) - Q_b(t) \quad (19)$$

Na Equação 15 a diminuição na taxa de transpiração acontece “devido ao corte parcial fora do tubo capilar”. Assume-se que na Equação 15 há uma relação que expressa este fenômeno. A transpiração neste caso também pode ser expressa no Tanque II usando-se a Equação 5, porque o tubo capilar está cortado. Neste caso,  $S_u$  gradualmente diminui para valores menores que zero e a transpiração aparente  $E_t^*(t)$  é dada por,

$$E_t^*(t) = (1-C) \cdot E_t(t) \quad (20)$$

#### 3.2.1.4. Modelo de Evaporação de Canal

Com a determinação da variação sazonal da evaporação no canal, a evaporação atual  $E_c(t)$  pode ser calculado pela equação,

$$E_c(t) = j \cdot C \cdot e_p(i) \quad (21)$$

sendo,  $j$  um parâmetro.

### 3.2.1.5. Modelo de Chuva Efetiva para o Escoamento Direto

O modelo para calcular a precipitação efetiva utilizado no *HYCYMODEL* foi proposto por Fukushima (1984). Neste modelo a chuva efetiva  $R_c(t)$  é determinada pelo armazenamento no Tanque II,  $S_u(t-1)$ , e pela chuva líquida  $R_n(t)$  que é expressa no modelo pelas Equações 22 a 25. São determinados dois parâmetros de profundidade ( $D_{16}$  e  $D_{50}$ ), definidos como a profundidade efetiva do solo superficial, na qual a relação da área de contribuição equivale a 16% e 50 %, respectivamente, sendo  $\sigma$  o desvio padrão,

$$\sigma = \log\left(\frac{D_{50}}{D_{16}}\right) \quad (22)$$

e  $\xi$  uma variável,

$$\xi = \frac{1}{\sigma} \cdot \log\left\{\frac{[S_u(t-1) + R_n(t)]}{D_{50}}\right\} \quad (23)$$

assim, o valor da relação da área de contribuição  $m$  será,

$$m = \int_{-\infty}^{\xi} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{\xi^2}{2}\right) d\xi \quad (24)$$

então,

$$R_c(t) = m \cdot R_n(t) \quad (25)$$

sendo que a chuva líquida  $R_n(t)$  é usado para igualar  $S_u$  à zero, quando o seu valor for menor que zero. Tal condição expressa, no modelo, um fenômeno no qual o valor de  $m$  diminui com a ocorrência de uma chuva após um período de seca. Então,  $S_u$  relaciona-se com a transpiração e a chuva efetiva.

### 3.2.1.6. Armazenamento e Vazão

Em geral, a relação entre armazenamento e vazão é expressa pela Equação 4.9, e alguns dos parâmetros do *HYCYMODEL* que usam a mesma devem ser determinados. Analisando os processos do Tanque II para o Tanque V, ocorrem quatro transformações, sendo que nos Tanques IV e V são produzidos a vazão direta acumulada e os parâmetros da Equação 9, isto é  $P_c$  e  $P_h$ . Os parâmetros  $P_c$  e  $P_h$  igualam-se a 0,6, usando os resultados do modelo de rampa paralela (FUKUSHIMA & TAKEI, 1981). Assim, os únicos parâmetros desconhecidos são  $K_c$  e  $K_h$ .

Assumindo-se que ocorra uma transformação linear no Tanque II,  $K_{in}$  é o parâmetro desconhecido que está sob  $P_{in} = 1$ . E os parâmetros  $P_b$  e  $K_b$  são considerados desconhecidos para o Tanque III. Embora os parâmetros sejam transformados adequadamente em cada sistema de unidade na realização dos cálculos, a unidade mm/h é considerada como o sistema de unidade padrão (FUKUSHIMA, 1988).

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. ÁREA DE ESTUDO

A área de aplicação é uma parte da bacia do Rio Pequeno, considerando a exutória na seção de medição da estação fluviométrica Fazendinha (65010000) (Figura 1). A área de aplicação é aproximadamente de 104 km<sup>2</sup>. Esta área está totalmente inserida no município de São José dos Pinhais, região metropolitana de Curitiba, Paraná. Na divisão das grandes bacias do estado, esta área pertence a bacia do Rio Iguaçu. Essa bacia sofreu uma acelerada urbanização devido ao desenvolvimento econômico da região. Portanto, os estudos envolvendo os recursos hídricos da região são extremamente necessários para o planejamento ambiental da mesma. Santos (2001) procurando estudar a hidrogeomorfologia e Silva (2005) comparando as diferenças entre três versões do TOPMODEL aplicaram a série de dados monitorados na bacia no TOPMODEL e obtiveram bons ajustes.

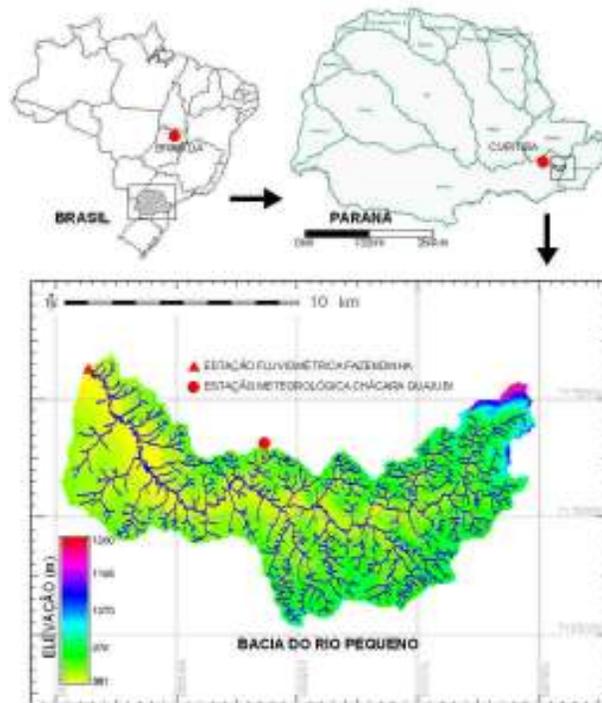


Figura 3. Localização da Bacia do Rio Pequeno.

A topografia da bacia é pouco acidentada e suas altitudes variam de 895 m a 1.270 m. Segundo Santos (2001), os tipos de solos encontrados na bacia são: Organossolos, latossolos, argilissolos e cambissolos (Figura 2). Uma completa descrição da área de estudo é encontrada em Santos (2001).

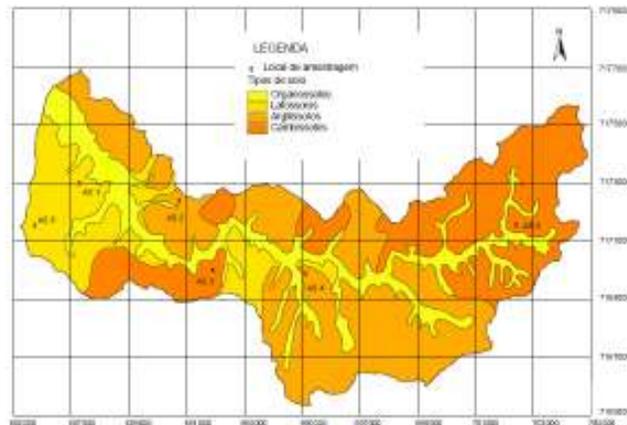


Figura 4. Mapa de Solos da Bacia do Rio Pequeno (SANTOS, 2001).

#### 4.2. DADOS HIDROLÓGICOS

A série de dados de vazão (Figura 3a) são da estação fluviométrica Fazendinha. Já a série de precipitação (Figura 3b) e evapotranspiração foram as da estação pluviométrica Chácara do Guajubi (02549123). Os dados são horários, e a série tem 8784 dados medidos correspondentes ao período de um ano de observações (de 31/12/1999 a 31/12/2000).

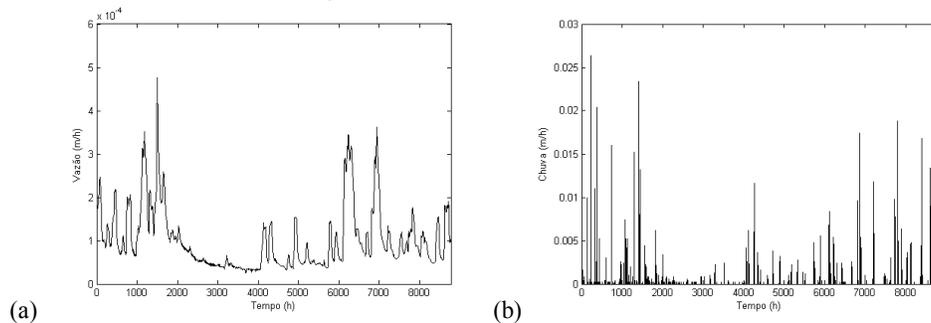


Figura 5. (a) Série de vazão; (b) precipitação.

#### 4.3. DESCRIÇÃO DO MODELO DISTRIBUÍDO

Para a distribuição espacial do modelo optou-se por uma abordagem simples e baseada na forma concentrada do modelo original. A área de estudo deve ser discretizada e então cada célula é representada por uma versão concentrada do modelo HCYMODEL. As saídas de cada célula são divididas em três escoamentos: escoamento de base ( $Q_b$ ), escoamento direto de rampa ( $Q_h$ ) e escoamento de canal ( $Q_c$ ). O escoamento de base passa para a próxima célula em forma de armazenamento no Tanque III. O escoamento direto de rampa passa sob a forma de chuva-efetiva para a célula seguinte e o escoamento de canal como chuva total. O esquema simplificado da distribuição do modelo por células está representado na Figura 6. A vazão de saída de cada Tanque na célula  $k$  é corrigida através da equação:

$$Q_k = Q_k' \cdot \chi_k \quad (26)$$

Onde  $Q_k$  é o valor corrigido da vazão da célula  $k$ ;  $Q_k'$  é o valor original da vazão na célula e  $\chi_k$  equivale ao valor da área acumulada até a célula sobre a área total da bacia.

Para os Tanque IV e V a Equação 25 na Célula k+1 pode ser representada por:

$$R_{e(k+1)}(t) = m \cdot R_n(t) + Q_{x(k)}(t)' \quad (27)$$

Onde  $R_{e(k+1)}$  é a chuva efetiva na célula (k+1) e  $Q_{x(k)}(t)'$  é a vazão que contribui para aquela célula corrigida por  $\chi_k$ . No caso do Tanque V  $Q_{x(k)}(t)'$  é a vazão de canal e para o Tanque IV é a vazão de encosta.

Já o armazenamento do Tanque III na Célula k+1 passa a receber além de  $Q_{in}(t)$ ,  $Q_{b(k)}(t)'$ . Essa é a vazão de base que chega até a Célula K+1 corrigida por  $\chi_k$ .

A versão em FORTRAN do HCYMODEL original foi reprogramada em MATLAB nesse trabalho. A implementação da rotina de reconhecimento de cada célula e propagação de escoamento também foi feita no MATLAB.

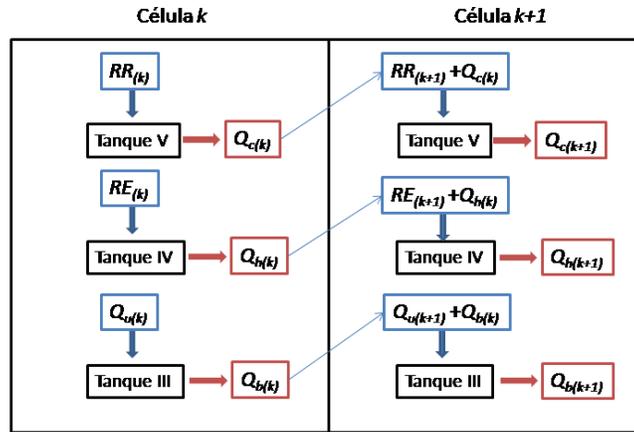


Figura 6. Diagrama esquemático da distribuição do HCYMODEL.

#### 4.4. CALIBRAÇÃO

A calibração foi feita usando o método Monte Carlo para gerar valores dos parâmetros. Esse método gera valores aleatórios baseado em uma distribuição uniforme de probabilidade pois considera-se que todo o intervalo de amostragem dos parâmetros tem a mesma probabilidade. O intervalo amostral dos parâmetros pode ser determinado baseado em observações em campo, consulta bibliográfica ou simulações prévias. A função objetivo deve ser escolhida dependendo da natureza do problema. No presente trabalho, o coeficiente de Nash que é sensível aos picos do hidrograma foi usado.

$$E(\Theta) = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N (o(t) - \hat{o}(t | \Theta))^2}{\sum_{t=1}^N (o(t) - \bar{o})^2} \quad (28)$$

onde  $E(\Theta)$  é o coeficiente de Nash para o conjunto de parâmetros  $\Theta$ ;  $o(t)$  é a variável observada no tempo  $t$ ;  $\hat{o}(t|\Theta)$  é a variável calculada no tempo  $t$  usando o conjunto de parâmetros  $\Theta$ ;  $\bar{o}$  é o valor médio da variável observada; e  $N$  é o número de passos de tempo.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. DISCRETIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Usou-se como dado de entrada do modelo distribuído a matriz com os pontos discretizados da área de estudo baseado no modelo *WADI* (SILVA, 2005). Nessa discretização, uma malha TIN (*Triangulated Irregular Network*) foi gerada sobre uma malha regular uniforme de resolução de 1000 metros. Cada célula foi numerada, e mapeou-se a célula para a qual a mesma contribui com o escoamento. A área acumulada em cada célula pode ser vista na Figura 7a e a declividade é representada na Figura 7b.

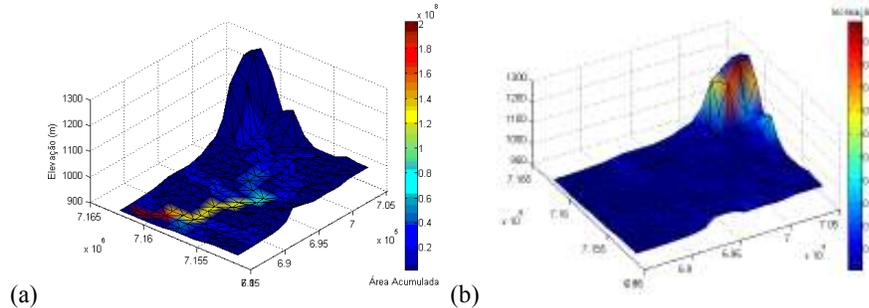


Figura 7. Discretização da área de estudo: (a) área acumulada por célula; (b) declividade.

Foi gerado também um mapa de uso de solos sobre a área discretizada (Figura 8), baseado no mapa de Santos 2001. Os quatro tipos de solo são representados por: 1-Cambissolo; 2-Argissolo; 3-Latossolo; e 4-Organossolo.

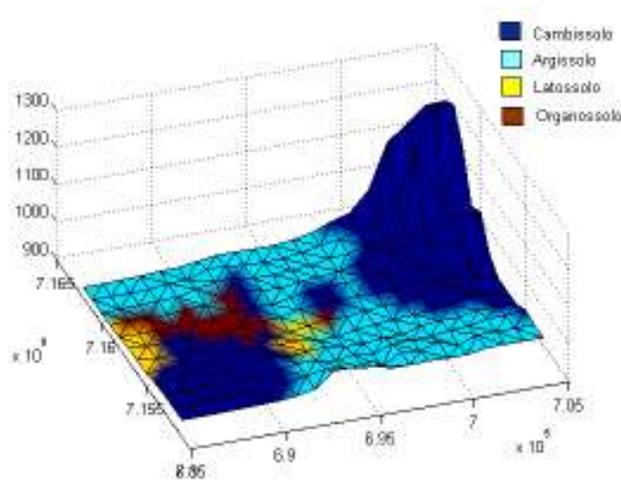


Figura 8. Mapa discretizado com Tipos de solo.

### 5.2. CALIBRACAO DO MODELO CONCENTRADO

Dezesseis parâmetros do HYCYMODEL precisaram ser calibrados. O intervalo de calibração para cada parâmetro foi escolhido baseado em simulações prévias. A descrição dos parâmetros e intervalos usados na calibração do HYCYMODEL encontram-se na Tabela 1 e 2 respectivamente.

**Tabela 1. Descrição dos parâmetros do modelo.**

Parâmetro	Descrição
$C$	Taxa de área de canais
$D_{16}$ (mm)	Espessura efetiva do solo superficial em que a taxa de contribuição é 16%
$D_{50}$ (mm)	Espessura efetiva do solo superficial em que a taxa de contribuição é 50%
$K_c$ ( $\text{mm}^{2/5}\text{h}^{3/5}$ )	Coefficiente de armazenamento em canal
$K_h$ ( $\text{mm}^{2/5}\text{h}^{3/5}$ )	Coefficiente de armazenamento da camada superficial da rampa
$K_u$ (h)	Coefficiente de armazenamento da camada não saturada do solo
$K_b$ ( $\text{mm}^{9/10}\text{h}^{1/10}$ )	Coefficiente de armazenamento da camada saturada do solo
$\alpha_1$	Taxa de interceptação de chuva pela copa
$\alpha_2$	Taxa de escoamento de tronco
$S_1$ (mm)	Armazenamento máximo de copa
$S_2$ (mm)	Armazenamento máximo de tronco
$EVI$ (mm/h)	Intensidade de evaporação da chuva interceptada
$P_{ta}$ (mm)	Valor médio da distribuição mensal de transpiração
$P_{tb}$ (mm)	Varição da distribuição mensal de transpiração
$IG$	Retardo da distribuição mensal de transpiração
$Q_{bc}$ (mm/dia)	Escoamento crítico para redução de transpiração

**Tabela 2. Parâmetros calibrados e intervalos de amostragem.**

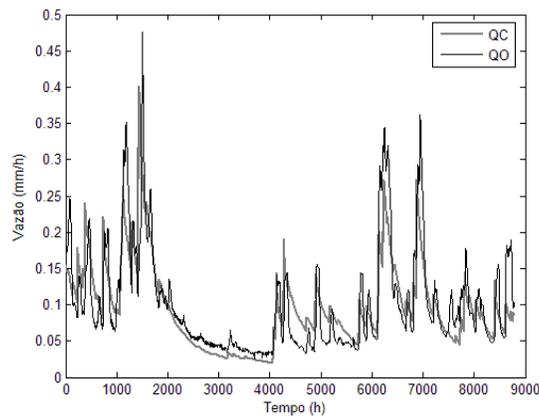
Parâmetro	Intervalo	Parâmetro	Intervalo
$C$	0,010 -- 0,100	$\alpha_2$	0,100 -- 0,900
$D_{16}$ (mm)	10,0 -- 40,0	$S_1$ (mm)	1,000 -- 1,800
$D_{50}$ (mm)	50,0 -- 80,0	$S_2$ (mm)	0,100 -- 0,900
$K_c$ ( $\text{mm}^{2/5}\text{h}^{3/5}$ )	1,0 -- 100,0	$EVI$ (mm/h)	0,010 -- 0,800
$K_h$ ( $\text{mm}^{2/5}\text{h}^{3/5}$ )	1,0 -- 100,0	$P_{ta}$ (mm)	10,00 -- 50,00
$K_u$ (h)	5,0 - 500,0	$P_{tb}$ (mm)	10,00 -- 50,00
$K_b$ ( $\text{mm}^{9/10}\text{h}^{1/10}$ )	50,0 -- 1000,0	$IG$	9,0 -- 14,0
$\alpha_1$	0,100 -- 0,900	$Q_{bc}$ (mm/dia)	0,6 -- 2,0

O modelo foi aplicado a série de 8784 dados observados e foram feitas 5000 simulações. Os parâmetros da melhor simulação do HYCYMODEL estão na Tabela 3.

**Tabela 3. Valores dos parâmetros para a melhor simulação.**

Parâmetro	Valor Calibrado	Parâmetro	Valor Calibrado
$C$	0,097	$\alpha_2$	0,496
$D_{16}$ (mm)	10,1	$S_1$ (mm)	1,714
$D_{50}$ (mm)	69,8	$S_2$ (mm)	0,200
$K_c$ ( $\text{mm}^{2/5}\text{h}^{3/5}$ )	43,8	$EVI$ (mm/h)	0,013
$K_h$ ( $\text{mm}^{2/5}\text{h}^{3/5}$ )	99,2	$P_{ta}$ (mm)	16,38
$K_u$ (h)	41,0	$P_{tb}$ (mm)	19,37
$K_b$ ( $\text{mm}^{9/10}\text{h}^{1/10}$ )	579,2	$IG$	9,1
$\alpha_1$	0,245	$Q_{bc}$ (mm/dia)	1,5

A Figura 9 apresenta a melhor simulação feita para o modelo concentrado. O melhor valor de Nash para o HCYMODEL foi 0,71.

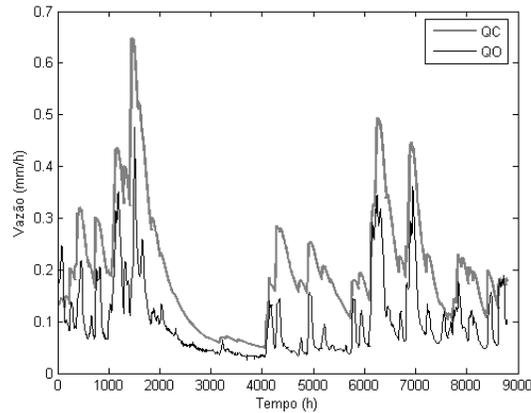


**Figura 9. Vazão observada (QO), vazão calculada com o HCYMODEL concentrado (QC) para a melhor simulação.**

### 5.3. APLICAÇÃO DO MODELO DISTRIBUÍDO

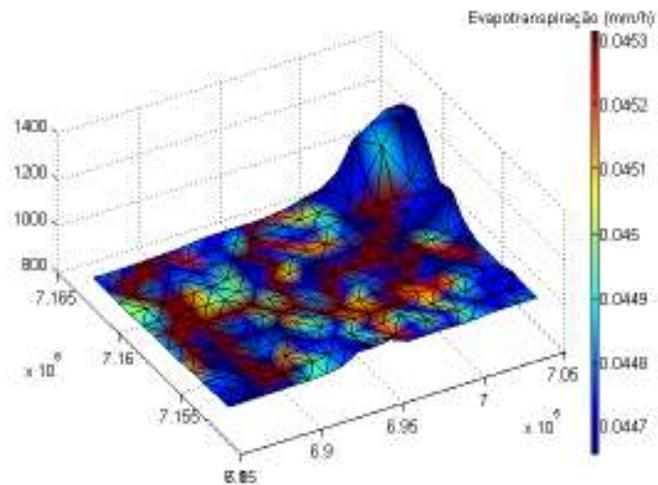
Usou-se o mapa de solo para variar o valor de  $K_b$  calibrado no modelo concentrado. Isso foi devido ao fato que ambos estão relacionados ao escoamento de base. O valor de  $K_b$  utilizado foi de 80%, 90%, 110% e 120% do valor de  $K_b$  original para as células caracterizadas por Cambissolo, Argissolo, Latossolo e Organossolo respectivamente. Esses valores foram adotados apenas para observar o comportamento do modelo com uma entrada distribuída de uso de solo. Facilmente, outras características físicas da bacia – uso do solo e inclinação por exemplo - podem ser usadas como entrada do modelo.

O hidrograma gerado com o modelo distribuído encontra-se na Figura 10. O valor do coeficiente de Nash ficou abaixo de 0, o que significa que o modelo é pior do que um modelo representado pela média dos dados. Porém, pode-se ver que o comportamento do hidrograma é razoável e por isso o modelo consegue representar o processo de uma maneira aceitável para um estudo preliminar.



**Figura 10. Hidrograma gerado com o modelo distribuído, onde QO é a vazão observada e QC a vazão calculada com o novo modelo.**

O modelo distribuído permite que se separe os diversos componentes do ciclo hidrológico em cada célula para cada instante de tempo. Com isso, é possível mapear a evapotranspiração e o escoamento superficial na bacia por exemplo, isso em qualquer instante de tempo simulado. A Figura 11 mostra a distribuição espacial da evapotranspiração para o tempo 8000. Pode-se perceber que a evapotranspiração é maior nas áreas de canal, o que está de acordo com o esperado, uma vez que essas áreas tem mais água armazenada. Na Figura 12 pode-se ver a vazão calculada em cada célula para o tempo 8000.



**Figura 11. Mapeamento da Evapotranspiração no instante h=8000.**

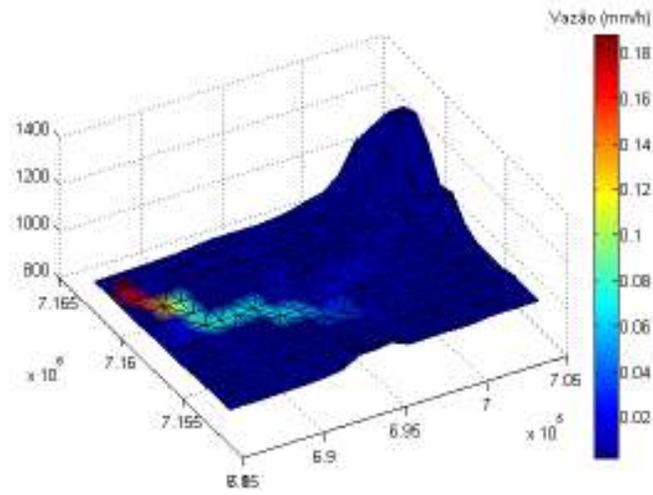


Figura 12. Mapeamento da vazão calculada por célula para o instante de tempo  $h=8000$ .

## **6. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES**

O presente trabalho apresentou uma proposta de distribuição espacial do modelo hidrológico concentrado HYCYMODEL. Ambos os modelos, concentrado e distribuído, foram aplicados na bacia do Rio Pequeno. Os parâmetros usados foram calibrados com o modelo concentrado apenas. Esse modelo apresentou um bom ajuste e o valor de Nash foi de 0,71. O modelo distribuído apesar de mostrar um valor de Nash abaixo de 0, mostrou estar representando alguns dos processos físicos da bacia de maneira razoável. O tipo de solo foi usado como uma entrada do modelo, e com ele pode-se simular um comportamento heterogêneo do escoamento de base na bacia. Com esse novo modelo pode-se fazer o mapeamento dos processos hidrológicos como a vazão calculada em cada área discreta da bacia assim como a distribuição espacial da Evapotranspiração.

Vale ressaltar que a calibração não foi feita utilizando-se o modelo distribuído. Portanto, recomenda-se que em um próximo trabalho essa etapa seja feita. Facilmente pode-se incluir rotinas que levem em consideração o uso do solo e outras características físicas da bacia - como a inclinação - como dados de entrada do modelo. Isso pode ajudar em estudos sobre influência do manejo do solo nos processos hidrológicos, o que seria de grande uso para gestores de recursos hídricos.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARIYAKANON, N. **Studies on long-term trend in discharge characteristics in forested watersheds**. Tokyo: University of Tokyo, 2000. 161p. (Tese de Doutorado)
- BEVEN, K.J.; KIRKBY, M.J.; SCHOFIELD, N.; TAGG, A.F. Testing a Physically-based flood forecasting model (Topmodel) for three U.K. catchments. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 69, p. 119 – 143, 1984.
- CHOW, V.T.; MAIDMENT, D.R.; MAYS, L.W. **Applied hydrology**. New York: McGraw-Hill, 1988. 572p.
- CRAWFOLD, N.H.; LINSLEY, R.K. The synthesis of continuous stream flow hydrographs on a digital computer. **Stanford Univ.-Dept. Civil Eng., 1962**.
- FUKUSHIMA, Y. Effect of reforestation on the hydrological cycle of granite mountainous catchments. **Suiri-Kagaku (Water science)**, n.177, p.17-34, 1987.
- FUKUSHIMA, Y. A model of river flow forecasting for small forested mountain catchment. **Hydrological Processes**, Chichester, v.2, p.167-185, 1988.
- FUKUSHIMA, Y.; SUZUKI, M. Hydrological cycle model for mountain watersheds and its application to the continuous 10 years records at intervals of both a day and an hour of Kiryu Watershed, Shiga Prefecture. **Buletim University Forest-Kyoto Univ.**, Kyoto, p.162-185, 1986.
- FUKUSHIMA, Y.; SUZUKI, M.; TAKEI, A. Differences of hydrological characteristics between lawn and forest. **J.Jap.Soc.Erosion Control Eng.**, v.40, n.5, p.4-13, 1988. (em japonês com sumário inglês)
- FUKUSHIMA, Y. TAKEI, A. A model for storm runoff in several small mountainous basins. In: **Proc. Jap. Conf. on Hydraul.**, 25. 1981, p. 229-236.
- FUKUSHIMA, Y.; TOMOMURA, M.; SUZUKI, M.; KUBOTA, J. Rain and snow runoff from a warm-temperate mountain catchment underlain by Paleozoic Era formations (I) Characteristics of streamflow during a non-snow season. **J.Jap.For.Soc.**, v.71, p.187-195, 1989. (em japonês com sumário inglês)
- FUKUSHIMA, Y.; WATANABE, O.; HIGUCHI, K. Estimation of streamflow change by global warming in a glacier-covered high mountain area of the Nepal Himalaya. In **Proceedings of the Vienna Symposium**. IAHS Publ., n.205, p.181-188, 1991.
- HINO, M. On runoff models. In: HINO, M. OHTA, T.; SUNADA, K.; WATANABE, K. **Numerical forecast of floods: A first step**. Tokyo: Morikita Pub., 1989. p.6-13. (em japonês).
- HINO, M.; HASEBE, M. Analysis of hydrologic characteristics from runoff data – A hydrologic inverse problem. **J. Hydrol.**, Amsterdam, v.49, p.287-313, 1981.
- HINO, M.; HASEBE, M. Identification and prediction of nonlinear hydrologic systems by the filter-separation autoregressive (AR) method: Extension to hourly hydrologic data. **J. Hydrol.**, Amsterdam, v.68, p.181-210, 1984.
- HINO, M.; HASEBE, M. Separation of a storm hydrograph into runoff components by both filter-separation AR method and environmental isotope tracers. **J. Hydrol.**, Amsterdam, v.85, p.251-264, 1986.

- KOBIYAMA, M.; DUARTE, C. Aplicação do modelo HYCYMODEL para análise de chuva-vazão da bacia Cubatão-Sul no Estado de Santa Catarina. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (12: 1997: Vitória) **Anais**, Vitória, 1997. p.589-596.
- KOBIYAMA, M.; DUARTE, C. OLIVEIRA, S.M. Análise da relação floresta, rio e ecossistema costeiro através de simulação numérica. In: Reunião Especial da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência (3: 1996: Florianópolis) **Anais**, Florianópolis, 1996. p.214.
- KOBIYAMA, M.; MANFROI, O.J.; MINELLA, J.P.G.; BITTENCOURT, J. Processo chuva-vazão nas bacias dos rios Tagaçaba e Guaraqueçaba no litoral paranaense. In: Congresso Brasileiro em Engenharia Agrícola (28: 1999: Pelotas) **Anais**, Pelotas, 1999.
- KUBOTA, J.; OHTA, T.; SHIBANO, H. An analysis of runoff characteristics on volcanic areas using the HYCYMODEL. **J.Jap.Soc.Erosion Cotrol Eng.**, v.48 (Special Issue), p.77-89, 1996.
- LINSLEY, R.K. Flood estimates: how good are they? **Water Resour. Res.**, Washington, v.22, n.9, supplement, p.159S-164S, 1986.
- MA, X.; FUKUSHIMA, Y.; HASHIMOTO, T.; HIYAMA, T.; NAKASHIMA, T. Application of a simple SVAT model in a mountain catchment under temperate humid climate. **J. Jap. Soc. Hydrol. Water Resour.**, Tokyo, v.12, p.285-294, 1999.
- MA, X.; FUKUSHIMA, Y.; HIYAMA, T.; HASHIMOTO, T.; OHATA, T. A macro-scale hydrological analysis of the Lena River basin. **Hydrological Processes**, Amsterdam, v.14, p.639-651, 2000.
- MA, X.; HIYAMA, T.; FUKUSHIMA, Y.; HASHIMOTO, T. A numerical model of the heat transfer for permafrost regions. **J. Jap. Soc. Hydrol. Water Resour.**, Tokyo, v.11, p.346-359, 1998.
- O'LOUGHLIN, E.M. Prediction of surfacre saturation zones in natural catchments by topographic analysis. **Water Resour. Res.**, Washington, v.22, n.9, p.794-804, 1986.
- PRIESTLY, C.H.B.; TAYLER, R.J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. **Monthly Weather Rev.**, v.100, n.2, p.81-92, 1972.
- SANTOS, I. **Modelagem geobiohidrológica como ferramenta no planejamento ambiental: Estudo da bacia hidrográfica do Rio Pequeno, São José dos Pinhais – PR.** Paraná, 2001. 93 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.
- SHERMAN, L.K. Streamflow from rainfall by unit-graph method. **Engineering News-Record**, New York, v.108, p.501-505, 1932.
- SILVA, R.V. **Análise comparativa de três formulações do TOPMODEL na bacia do Rio Pequeno - PR.** Florianópolis, 2005. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina.
- SUGAWARA, M. On the analysis of runoff structure about several Japanese rivers. **Jap. J. Geophysics**, Tokyo, v.2, p.1-76, 1961.

SUGAWARA, M.; WATANABE, I.; OZAKI, E.; KATSUYAMA, Y. **Tank Model with snow component**. Tsukuba: National Research Center for Disaster Prevention, 1983. 293p. (Research notes of the national research center for disaster prevention. n.65)

SUZUKI, M., KATO, H., TANI, M., FUKUSHIMA, Y., , Throughfall, stemflow and rainfall interception in Kiryu experimental catchment (1) Throughfall and stemflow', **J. Jap. For. Soc.**, v. 61, p. 202-210, 1979.

TANAKA, H.; FUKUSHIMA, Y.; LI, C.; KUBOTA, J.; OHTA, T.; SUZUKI, M.; KOSUGI, K. Water discharge properties of evergreen broad-leaved forest river basin – Jiulianshan, Jiangxi Province, China. **J. Jap. Soc. Of Hydrology and Water Resources**, Tóquio, v. 11, n.3, p.240-252, 1998.