

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

**SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DE CARBONO EM BACIAS
HIDROGRÁFICAS**

MINO VIANA SORRIBAS

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção de título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

Orientador: Walter Collischonn

Co-Orientador: David M. L. da Motta Marques

Banca Examinadora:

Prof. Cristovão Vicente Scapulatempo Fernandes PPGERHA/UFPR

Prof^a Nilza Maria dos Reis Castro IPH/UFRGS

Prof^o Juan Martín Bravo IPH/UFRGS

PORTO ALEGRE, RS

2011

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, a Deus pela oportunidade de experimentar a vida.

Ao meu pai, por sempre me ensinar e incentivar a busca de conhecimento nos dicionários, enciclopédias e livros.

À minha mãe, pelo abrigo, pela compreensão e carinho, pelo incentivo e por me ensinar que a vida deve ser levada com simplicidade e com otimismo.

Às minhas irmãs queridas, pelas pequenas brigas, brincadeiras e cumplicidade.

Aos meus orientadores, Walter Collischonn e David da Motta Marques. Foi uma satisfação conhecê-los e ter a oportunidade de trabalhar junto a eles. Cientistas e pessoas geniais. O entusiasmo de ambos torna o processo de aprendizado gratificante e motivador. Agradeço muito os ensinamentos, o incentivo e a confiança.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa de estudos.

A todos meus amigos e amigas de Curitiba que me apoiaram. Em especial, Gabriel Ferronato e Laís Ribas por estarem sempre do meu lado.

Aos novos amigos e colegas do Instituto de Pesquisas Hidráulicas que participaram da minha vida durante esse período. Os nomes são muitos, mas arrisco: Vitor, Paulo, Ingo, Rosane, Rodrigo, Ibraim, Diogo, Fausto e Lila, Marcelo, Federico e Margarita, Karen, Dani, Fernando Bike, Ester, Débora, Angélica, Fábio, Leandro, Davi, Tiago, Maria Cristina, Marla, Ruberto, Lúcia, Lucianas, Eliete, Rafael, Lário, Carlos, Adrien, Katiucia, Adalberto e Fabiano.

Aos membros da banca avaliadora pelas contribuições tanto na discussão do tema quanto na apresentação final do trabalho, Cristóvão Scapulatempo, Nilza Castro e Juan-Martín.

Aos demais professores, Edith Beatriz, Carlos André, Olavo, André Silveira, Carlos Ruberto Frago Jr. e Tucci, pelos ensinamentos em diferentes momentos ao longo do percurso.

Ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas, pela hospitalidade e pelo ambiente de trabalho.

Por fim, ao meu sobrinho Athos que ainda não fala, mas me faz lembrar que nós aprendemos aos poucos.

RESUMO

Na maior parte dos ecossistemas aquáticos a respiração excede a produção primária bruta autóctone, acarretando uma produção líquida de ecossistema negativa. Estudos recentes atribuem essa condição a processos de degradação de matéria orgânica alóctone, portanto o ciclo do carbono em corpos de água interiores deve estar pareado com o aporte de carbono orgânico originado na bacia hidrográfica. Este trabalho contribui para a melhor compreensão dos processos atuantes no ciclo de carbono em bacias hidrográficas, por meio de monitoramento de dados de campo, desenvolvimento e aplicação de modelagem matemática e simulação numérica. O estudo foi realizado utilizando dados de monitoramento na bacia hidrográfica do Rio Ijuí localizada no planalto meridional gaúcho. A exportação fluvial de carbono orgânico e inorgânico foi estimada a partir de dados de vazão e concentração. Um modelo baseado em processos para simulação da dinâmica de carbono, MGB-IPH-C, foi desenvolvido e acoplado ao modelo hidrológico MGB-IPH. O modelo hidrológico foi ajustado em diversos pontos de controle na bacia hidrográfica do Ijuí obtendo-se bons resultados, principalmente para as bacias de maior porte ($>1000 \text{ km}^2$). O modelo de carbono foi avaliado qualitativamente considerando a representação de processos conceituais e, quantitativamente, pela comparação das concentrações e fluxos simulados em relação aos obtidos pelos dados do monitoramento. Não foi possível identificar associações diretas entre as concentrações de carbono inorgânico ou orgânico e vazão, com base nos dados medidos em campo. As cargas médias de carbono nas bacias estudadas apresentaram valores abaixo da média global, na ordem de $25\text{-}40 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ e $8\text{-}10 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$, para as frações inorgânica e orgânica, respectivamente. O MGB-IPH-C representou processos conceituais esperados, em especial, a acumulação no solo e o efeito da lavagem das águas sobre a concentração dos rios. Foi possível obter bons ajustes em escala anual para as cargas e concentrações médias de carbono na bacia de estudo. A simulação da dinâmica de carbono em ecossistemas aquáticos em pareamento com a bacia hidrográfica utilizando modelos conceituais determinísticos contribui para o entendimento dos processos operantes nesses sistemas e deve ser complementada por meio de análise de dados de monitoramento, em frequência adequada à escala, com métodos empíricos.

Palavras chave: balanço de carbono, bacia hidrográfica, modelagem matemática, simulação hidrológica

ABSTRACT

In most aquatic ecosystems respiration exceeds autochthonous gross primary production leading to a negative net ecosystem production. Recent studies attributes this condition to allochthonous organic matter degradation processes, so the inland water carbon cycle should be linked to the input of organic carbon from the catchment. This work contributes to a better comprehension of processes operating in the carbon cycle in river basins, throughout development and application of mathematical modeling and numerical simulation. The study was conducted using data of the Ijuí river watershed, located in the Planalto Meridional Gaúcho. Fluvial exports of organic and inorganic carbon were estimated from data measured in field. A process-based model for carbon dynamics simulation, MGB-IPH-C, was developed and coupled to the hydrological model MGB-IPH. The hydrological model was calibrated to various control points in the Ijuí river basin with good results, especially in larger subwatersheds ($>1000 \text{ km}^2$). The carbon model was evaluated considering the representation of carbon dynamics conceptual processes and by comparison of observed carbon concentrations and export rates obtained by simulation and monitoring data. The estimates of annual export of carbon in the study area were below the global average, in magnitude of 25-40 kg/ha.yr and 8-10 kg/ha.yr for inorganic and organic carbon, respectively. The proposed carbon model, MGB-IPH-C, was able to simulate expected conceptual processes, in particular, the build-up on soil and the effect of wash-off on carbon concentration in river reaches. It was possible to obtain good fits for annual average carbon fluvial export rates and concentrations. The simulation of carbon dynamics in inland waters coupled with the watershed using conceptual deterministic models contributes to the understanding of processes operating on these systems and may be complemented throughout analysis of field data, at frequency appropriated to the scale, with empirical methods.

Keywords: carbon balance, catchment, mathematical model, hydrological simulation

SUMÁRIO

| | |
|---|------|
| LISTA DE TABELAS | vii |
| LISTA DE FIGURAS | viii |
| LISTA DE SÍMBOLOS | xi |
| 1 INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 Carbono, Recursos Hídricos e Hidrologia..... | 1 |
| 1.2 Carbono, Metabolismo e Mudanças Climáticas | 2 |
| 1.3 Justificativa e Contexto | 3 |
| 1.4 Hipótese | 4 |
| 1.5 Objetivo | 4 |
| 1.5.1 Objetivos específicos..... | 4 |
| 1.6 Métodos | 5 |
| 2 CICLO DO CARBONO EM BACIAS HIDROGRÁFICAS | 6 |
| 2.1 Compartimentos do Ciclo Global de Carbono | 6 |
| 2.2 Balanço de Carbono em Águas Interiores | 7 |
| 2.3 Generalidades sobre o Carbono Orgânico e Inorgânico..... | 10 |
| 2.4 Carbono no Solo | 10 |
| 2.5 Carbono na Água | 14 |
| 2.6 Modelos de Qualidade de Água e Balanço de Carbono | 21 |
| 2.7 Estudos de Quantificação de Exportação Fluvial de Carbono | 23 |
| 3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO | 25 |
| 3.1 Descrição geral | 25 |
| 3.1.1 Bacia hidrográfica do rio Ijuí..... | 25 |
| 3.1.2 Bacia hidrográfica do rio Potiribu, Taboão e Turcato | 28 |
| 3.2 Monitoramento hidrológico | 29 |
| 3.3 Monitoramento de Variáveis Físico-Químicas da Água | 31 |
| 4 SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA | 32 |
| 4.1 Modelo Hidrológico Distribuído – MGB-IPH | 32 |
| 4.1.1 Interceptação..... | 35 |
| 4.1.2 Balanço de Água no Solo | 36 |
| 4.1.3 Propagação na bacia hidrográfica: reservatórios lineares..... | 39 |
| 4.1.4 Propagação em canais: método de Muskingum-Cunge..... | 40 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 4.1.5 | Ajuste e Avaliação de Eficiência do Modelo Hidrológico | 42 |
| 4.1.6 | Módulo de Qualidade de Água | 43 |
| 4.2 | Aplicação do MGB-IPH na Bacia Hidrográfica do rio Ijuí | 45 |
| 4.2.1 | Discretização Espacial e Pontos de Controle | 45 |
| 4.2.2 | Mapeamento das Unidades de Resposta Hidrológica | 46 |
| 4.2.3 | Parâmetros Fixos e Calibráveis | 49 |
| 4.2.4 | Calibração e Validação | 51 |
| 5 | MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DE CARBONO | 70 |
| 5.1 | Estimativa dos Fluxos Fluviais de Carbono na área de estudo..... | 70 |
| 5.1.1 | Bacia do Rio Turcato | 70 |
| 5.1.2 | Bacia do Rio Taboão | 74 |
| 5.2 | Modelo para Dinâmica de Carbono em Bacias Hidrográficas: MGB-IPH-C | 80 |
| 5.2.1 | Modelagem do Carbono no Solo | 80 |
| 5.2.2 | Modelagem do Carbono na Água..... | 83 |
| 5.2.3 | Parametrização do Modelo de Carbono | 86 |
| 5.3 | Análise Qualitativa do Modelo de Carbono | 87 |
| 5.4 | Análise de Sensibilidade..... | 89 |
| 5.5 | Ajuste do Modelo de Carbono..... | 91 |
| 6 | CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES | 98 |
| 6.1 | Balanço de Carbono em Bacias Hidrográficas | 98 |
| 6.2 | Aplicação do modelo MGB-IPH na Bacia Hidrográfica do Ijuí | 98 |
| 6.3 | Exportação de Carbono nas Bacias do Taboão e Turcato | 99 |
| 6.4 | Desenvolvimento e Aplicação do Modelo de Carbono MGB-IPH-C | 99 |
| | Anexo A – Pontos de Monitoramento Hidrológico da Sub-Bacia 75 | 108 |
| | Anexo B – Tabelas da Análise de Sensibilidade dos Parâmetros do MGB-IPH-C..... | 114 |
| | Anexo C – Funções Erro para o Ajuste do Modelo de Carbono | 127 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 3.1 Descrição dos pluviômetros (PM) e pluviógrafos (PG) da sub-bacias embutidas do Potiribu..... | 29 |
| Tabela 4.1 Estações fluviométricas e pontos de controle exutórios de interesse | 45 |
| Tabela 4.2 Classificação da Bacia hidrográfica do rio Ijuí em URHs..... | 48 |
| Tabela 4.3 Parâmetros fixos do modelo MGB | 50 |
| Tabela 4.4 Parâmetros calibráveis das URHs no ajuste manual..... | 50 |
| Tabela 4.5 Parâmetros calibráveis gerais no ajuste manual | 51 |
| Tabela 4.7 Parâmetros calibráveis (URHs) após calibração automática..... | 53 |
| Tabela 4.8 Parâmetros calibráveis gerais após calibração automática | 53 |
| Tabela 4.9 Eficiência após calibração automática (01/01/1983-31/12/1988) | 53 |
| Tabela 4.10 Eficiência após calibração automática (01/01/1989-31/12/1994) | 57 |
| Tabela 4.11 Parâmetros calibráveis (URHs) após reajuste..... | 60 |
| Tabela 4.13 Parâmetros calibráveis (URHs) após reajuste no Potiribu..... | 60 |
| Tabela 4.14 Parâmetros calibráveis gerais após reajuste no Potiribu..... | 60 |
| Tabela 4.15 Eficiência após reajuste (Taboão)..... | 61 |
| Tabela 4.16 Eficiência do modelo: período (2008-2009)..... | 65 |
| Tabela 5.1 Concentrações observadas e cargas estimadas de carbono em Turcato | 71 |
| Tabela 5.2 Concentrações observadas e cargas estimadas de carbono em Taboão..... | 74 |
| Tabela 5.3 Carga de carbono anual média em Taboão e Turcato..... | 78 |
| Tabela 5.4 Parâmetros do módulo de carbono no solo e água | 86 |
| Tabela 5.5 Quantidade de carbono em diferentes tipo de solo..... | 87 |
| Tabela 5.6 Resumo de indicadores após ajuste do modelo de carbono com calibração automática e comparação com os valores obtidos pelos dados de monitoramento e calibração manual | 95 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 2.1 Ciclo global de carbono (armazenamento e fluxos)..... | 6 |
| Figura 2.2 Esquema de balanço de carbono simples em bacia hidrográfica | 8 |
| Figura 2.3 Balanço de massa de carbono nas águas interiores para o sistema global: fluxos em GtC/ano..... | 9 |
| Figura 2.4 Vias de fluxo de carbono no ecossistema terrestre | 11 |
| Figura 2.5 Perfil típico de coluna de solo e processos dominantes do carbono | 12 |
| Figura 2.6 Esquema simplificado do ciclo do carbono em corpos de água..... | 16 |
| Figura 2.7 Distribuição das formas de carbono inorgânico no sistema carbonato | 18 |
| Figura 2.8 Caminhos do dióxido de carbono e metano em reservatório. | 20 |
| Figura 3.1 Bacia hidrográfica do rio Ijuí e principais afluentes | 26 |
| Figura 3.2 Mapa exploratório de solos da região do Ijuí..... | 27 |
| Figura 3.3 Distribuição espacial e temporal da chuva na bacia hidrográfica do Ijuí. ... | 28 |
| Figura 3.4 Sub-bacias do Taboão e Turcato e pontos de monitoramento na região..... | 29 |
| Figura 3.5 Estações de monitoramento hidrológico no Ijuí..... | 30 |
| Figura 4.1 Balanço vertical de água no solo para uma URH do modelo MGB-IPH..... | 34 |
| Figura 4.2 Esquema de balanço nas URHs e propagação em reservatórios lineares | 34 |
| Figura 4.3 Esquema geral dos caminhos de água simulados no modelo MGB-IPH..... | 35 |
| Figura 4.5 Discretização espacial e pontos de controle na Bacia Hidrográfica do rio Ijuí | 46 |
| Figura 4.6 Composição de imagens Landsat 5 TM na região da bacia hidrográfica do rio Ijuí..... | 47 |
| Figura 4.7 Mapa de solos reclassificado para fins de simulação hidrológica na bacia do rio Ijuí | 47 |
| Figura 4.8 Mapa das URHs para a Bacia Hidrográfica do rio Ijuí | 49 |
| Figura 4.9 Projeção da aproximação da região de pareto no plano formado pelas funções-objetivo relativas ao E_{NSlog} e ΔV obtidas pela calibração automática. | 53 |
| Figura 4.10 Hidrogramas em Passo Faxinal-75155000 (01/01/1983-31/12/1983) | 54 |
| Figura 4.11 Hidrogramas em Conceição-75200000 (01/01/1983-31/12/1983) | 54 |
| Figura 4.12 Hidrogramas em Ponte Nova Conceição-75205000 (01/01/1983- 31/12/1983)..... | 55 |
| Figura 4.13 Hidrogramas em Santo Ângelo-75230000 (01/01/1983-31/12/1983) | 55 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.14 Hidrogramas em Colônia Mousquer-75295000 (01/01/1983-31/12/1983) | 56 |
| Figura 4.15 Hidrogramas em Ponte Mística-75320000 (01/01/1983-31/12/1983)..... | 56 |
| Figura 4.16 Hidrogramas em Passo Faxinal-75155000 (01/01/1993-31/12/1993)..... | 57 |
| Figura 4.17 Hidrogramas em Conceição-75200000 (01/01/1993-31/12/1993) | 57 |
| Figura 4.18 Hidrogramas em Ponte Nova Conceição-75205000 (01/01/1993-31/12/1993)..... | 58 |
| Figura 4.19 Hidrogramas em Santo Ângelo-75230000 (01/01/1993-31/12/1993) | 58 |
| Figura 4.20 Hidrogramas em Colônia Mousquer-75295000 (01/01/1993-31/12/1993) | 59 |
| Figura 4.21 Hidrogramas em Ponte Mística-75320000 (01/01/1993-31/12/1993)..... | 59 |
| Figura 4.22 Hidrogramas em Passo Faxinal-75155000 (01/01/2002-31/12/2003)..... | 61 |
| Figura 4.23 Hidrogramas em Conceição-75200000 (01/01/2002-31/12/2003) | 61 |
| Figura 4.24 Hidrogramas em Ponte Nova Conceição-75205000 (01/01/2002-31/12/2003)..... | 62 |
| Figura 4.25 Hidrogramas em Santo Ângelo-75230000 (01/01/2002-31/12/2003) | 62 |
| Figura 4.26 Hidrogramas em Colônia Mousquer-75295000 (01/01/2002-31/12/2003) | 63 |
| Figura 4.27 Hidrogramas em Ponte Mística-75320000 (01/01/2002-31/12/2003)..... | 63 |
| Figura 4.28 Hidrogramas em Taboão (01/01/2002-31/12/2003)..... | 64 |
| Figura 4.29 Hidrogramas em Turcato (01/01/2002-31/12/2003) | 64 |
| Figura 4.30 Hidrogramas em Passo Faxinal-75155000 (01/01/2008-01/05/2009)..... | 65 |
| Figura 4.31 Hidrogramas em Conceição-75200000 (01/01/2008-01/05/2009) | 66 |
| Figura 4.32 Hidrogramas em Ponte Nova Conceição-75205000 (01/05/2008-01/05/2009)..... | 66 |
| Figura 4.33 Hidrogramas em Santo Ângelo-75230000 (01/05/2008-01/05/2009) | 67 |
| Figura 4.34 Hidrogramas em Colônia Mousquer-75295000 (01/01/2008-01/10/2009) | 67 |
| Figura 4.35 Hidrogramas em Ponte Mística-75320000 (01/01/2008-01/05/2009)..... | 68 |
| Figura 4.36 Hidrogramas em Taboão (01/01/2008-01/05/2009)..... | 68 |
| Figura 4.37 Hidrogramas em Ponte Nova Jusante Potiribu 75186000 (01/01/2008-01/10/2009)..... | 69 |
| Figura 4.38 Relação E_{NSQ} x Área de Drenagem para as sub-bacias simuladas no Ijuí. . | 69 |
| Figura 5.1 Cargas médias mensais de carbono orgânico e inorgânico em Turcato..... | 72 |
| Figura 5.2 Série temporal de dados de vazão e carbono em Turcato | 72 |
| Figura 5.3 Relação DOC x DIC em Turcato | 73 |
| Figura 5.4 Concentração de carbono x Vazão em Turcato..... | 73 |

| | |
|--|-----|
| Figura 5.5 Concentração de carbono x Permanência da Vazão em Turcato | 74 |
| Figura 5.6 Cargas médias mensais de carbono orgânico e inorgânico de Taboão | 75 |
| Figura 5.7 Série temporal de dados de vazão e carbono em Taboão..... | 76 |
| Figura 5.8 Relação DOC-DIC em Taboão | 76 |
| Figura 5.9 Concentração de carbono x Vazão em Taboão | 77 |
| Figura 5.10 Concentração de carbono x Permanência da vazão em Taboão | 77 |
| Figura 5.11 Estrutura do modelo para os fluxos de carbono do solo para a água..... | 80 |
| Figura 5.12 Exemplo hipotético da variação temporal do carbono dissolvido no solo obtido por simulação: efeitos de acumulação e lavagem após eventos de precipitação. | 87 |
| Figura 5.13 Exemplo hipotético da variação temporal de carbono dissolvido na água obtido por simulação | 88 |
| Figura 5.14 Exemplo hipotético de distribuição espacial de carbono orgânico (concentração) em rios numa bacia obtido por simulação | 89 |
| Figura 5.15 Carbono orgânico e inorgânico simulados e observados em Taboão | 92 |
| Figura 5.16 Projeção da aproximação da região de pareto no plano formado pelo erro na Concentração de DOC e Carga de DOC após calibração automática no Taboão | 93 |
| Figura 5.17 Projeção da aproximação da região de pareto no plano formado pelo entre erro na Concentração de DIC e Carga de DIC após calibração automática no Taboão . | 93 |
| Figura 5.18 Projeção da aproximação da região de pareto no plano formado pelo erro na Concentração de DOC e Concentração de DIC após calibração automática no Taboão | 94 |
| Figura 5.19 Projeção da aproximação da região de pareto no plano formado pelo entre erro na Carga de DOC e Carga de DIC após calibração automática no Taboão..... | 94 |
| Figura 5.20 Resultados da simulação do modelo de carbono ajustado com algoritmo de otimização..... | 95 |
| Figura B.1 Sensibilidade dos parâmetros para concentração média de DOC | 124 |
| Figura B.2 Sensibilidade dos parâmetros para concentração média de DIC..... | 124 |
| Figura B.3 Sensibilidade dos parâmetros para carga de DOC acumulada | 124 |
| Figura B.4 Sensibilidade dos parâmetros para carga de DIC acumulada..... | 125 |
| Figura B.5 Sensibilidade dos parâmetros para concentração mínima de DOC..... | 125 |
| Figura B.6 Sensibilidade dos parâmetros para concentração mínima de DIC | 125 |
| Figura B.7 Sensibilidade dos parâmetros para concentração máxima de DOC | 126 |
| Figura B.8 Sensibilidade dos parâmetros para concentração máxima de DIC..... | 126 |

LISTA DE SÍMBOLOS

DOC – CARBONO ORGÂNICO DISSOLVIDO

DIC – CARBONO INORGÂNICO DISSOLVIDO

SOC – CARBONO ORGÂNICO NO SOLO

IPCC – PAINEL INTERGOVERNAMENTAL DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

APRESENTAÇÃO

O presente trabalho aborda o tema: dinâmica de carbono em bacias hidrográficas.

O capítulo I possui um caráter introdutório, no qual são apresentados aspectos científicos e práticos do tema, bem como o contexto, o objetivo e métodos da pesquisa.

No capítulo II são descritos os principais processos do ciclo do carbono, com ênfase nos compartimentos e fluxos na superfície terrestre (solo/vegetação e águas interiores). Esta etapa do trabalho tem um papel indispensável para a concepção do modelo matemático para a dinâmica de carbono descrito no capítulo V.

O capítulo III apresenta a caracterização da área de estudo, bem como informações sobre os monitoramento e os dados utilizados para a realização da pesquisa.

O capítulo IV descreve a aplicação do modelo hidrológico na bacia hidrográfica de estudo: a discretização espacial em mini-bacias, o mapeamento de unidades de resposta hidrológica, calibração e avaliação de eficiência.

O capítulo V é dedicado à quantificação e modelagem do fluxo fluvial de carbono na área de estudo. Nesse estudo é utilizado um método empírico – baseado em dados medidos – para estimativa das cargas exportadas por via fluvial. Um modelo matemático de carbono baseado em processos foi desenvolvido e acoplado ao modelo hidrológico. Nesse capítulo é realizada uma avaliação qualitativa da resposta do modelo, análise de sensibilidade dos parâmetros, calibração e análise crítica do modelo.

Uma vez que o ciclo do carbono envolve processos físicos, químicos e biológicos que abrangem diferentes disciplinas, o autor buscou descrever alguns conceitos e termos relacionados a áreas mais específicas do tema (e.g. ecologia, limnologia) de forma simples para facilitar a compreensão do texto.

1 INTRODUÇÃO

1.1 CARBONO, RECURSOS HÍDRICOS E HIDROLOGIA

O carbono representa cerca de 50% da massa (seca) viva do planeta, sendo o principal elemento químico na constituição dos compostos orgânicos. O carbono entra na cadeia alimentar pelo processo de fotossíntese que é realizado por organismos autotróficos (e.g. plantas verdes e algas). Através da fotossíntese o carbono na forma de dióxido de carbono (CO_2) encontrado na atmosfera é transformado em compostos orgânicos (e.g. carboidratos e proteínas) que podem então ser assimilados pelos outros organismos da cadeia alimentar (Wetzel, 1993, Wetzel, 2002). Dessa forma, o estudo das transformações e vias de fluxo do carbono possui um papel importante na avaliação de aspectos relacionados à transferência de massa e energia nas redes alimentares.

O aporte de carbono em corpos de água modifica as características do meio, tais como o equilíbrio químico, a transparência da água, o transporte de nutrientes e metais e a formação de gases (Evans et al. 2006). Dentre os elementos que constituem a matéria orgânica - composta por carbono (inorgânico e orgânico) e nutrientes - o carbono orgânico dissolvido (DOC, do inglês, *dissolved organic carbon*) representa, em geral, o fator de maior impacto sobre o metabolismo dos corpos de água (Wetzel, 1993). Uma vez que as redes alimentares aquáticas são movidas em grande parte pelo material oriundo das bacias adjacentes, quaisquer mudanças no fluxo de DOC da superfície terrestre para as águas superficiais podem afetar a ecologia de lagos e rios (Findlay e Sinsabaugh, 2002).

Os processos do ciclo do carbono estão associados ao ciclo hidrológico, pois as transformações e o transporte deste elemento entre os compartimentos – atmosfera, vegetação, solo e água – dependem diretamente da magnitude e das vias de fluxo de água e também da sua ação sobre processos biogeoquímicos associados (Evans, 2006; Dawson e Smith, 2007; Cole e Caraco, 2001; Cole et al. 2007). Do ponto de vista do saneamento vale lembrar também que a presença de material orgânico na água pode favorecer o processo de formação de trihalometanos (compostos potencialmente cancerígenos) ao reagir com cloro em estações de tratamento de água e redes de distribuição (Evans, 2006).

1.2 CARBONO, METABOLISMO E MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Nas últimas décadas houve um grande aumento de interesse, tanto da comunidade científica quanto das autoridades políticas, sobre o entendimento dos fatores que controlam o ciclo do carbono. Isso decorre do fato que os países podem utilizar mecanismos de armazenamento (ou seqüestro) de carbono para auxiliar no alcance das metas de redução de emissões de carbono produzidas pela queima de combustível fóssil, previstas no Protocolo de Kyoto. Em vista disso, existe uma grande contingência entre os fatores político-econômicos e o entendimento dos processos que controlam as entradas e saídas de carbono dos ecossistemas.

Nos ecossistemas aquáticos, o balanço de carbono caracteriza o metabolismo, pelo qual se determina se o mesmo é fonte ou sumidouro de gases de efeito estufa. Os ecossistemas aquáticos continentais não são meros condutos de carbono de ecossistemas terrestres para o oceano, sendo agora proposto como um compartimento adicional ao oceano-terrestre-atmosfera para a descrição do ciclo de carbono global. A acumulação de carbono no sedimento de lagos e/ou reservatórios e a liberação para atmosfera na forma de gases – por exemplo, dióxido de carbono (CO_2) e metano (CH_4) – provenientes do processo de respiração/decomposição fazem dos sistemas aquáticos continentais importantes transformadores de carbono (Cole e Caraco, 2001; Cole et al., 2007). Os processos biogeoquímicos associados ao ciclo do carbono ocorrem de maneira semelhante em rios e córregos, porém, a quantificação dos fluxos é menos conhecida, e mais recente, em relação aos estudos limnológicos.

De acordo com o relatório do IPCC (2008) existe uma necessidade de se aprimorar o entendimento e a modelagem do efeito das mudanças climáticas e suas associações tanto no ciclo hidrológico quanto nos ciclos biogeoquímicos, em diversas escalas. Sendo assim, existe atualmente uma grande preocupação no que diz respeito às mudanças climáticas globais, seus condicionantes, impactos e meios de mitigação. Considerando, a existência de uma preocupação sobre o potencial dos reservatórios de água na emissão de gases de efeito estufa e suas implicações sobre o sistema climático, o entendimento dos processos ecológicos que atuam nos corpos de água interiores se faz necessário.

1.3 JUSTIFICATIVA E CONTEXTO

A principal justificativa para o estudo do tema proposto diz respeito à formação de conhecimento sobre processos do ciclo do carbono em bacias hidrográficas visando à quantificação dos fluxos de carbono, o desenvolvimento de modelos e a análise de ecossistemas aquáticos na escala de bacia hidrográfica.

No Brasil ainda existe uma lacuna no que diz respeito à compreensão dos forçantes ambientais, fontes, caminhos e mecanismos que afetam os fluxos de carbono nos ecossistemas aquáticos e o que podemos esperar em termos de estado desses sistemas mediante mudanças nos processos hidrológicos e climáticos. Apesar de bem documentados, os processos em estudos feitos na Europa ou Estados Unidos, usualmente em regiões de clima temperado e boreal, não são representativos de regiões de clima tropical e sub-tropical.

Nos últimos anos, ambos os grupos de pesquisa em Clima e Recursos Hídricos e de Ecotecnologia do IPH vem dedicando esforços à compreensão dos processos que integram hidrologia, clima e ecologia, utilizando ferramentas de modelagem matemática e monitoramento. Para simulação hidrológica de bacias, o modelo MGB-IPH foi aplicado em diversas bacias hidrográficas na América Latina em estudos de balanço e disponibilidade hídrica, previsão de vazão, qualidade de água, efeitos de mudanças climáticas sobre recursos hídricos, entre outros. O modelo IPH-ECO desenvolvido inicialmente para simular a hidrodinâmica, qualidade de água e estrutura trófica em lagos e reservatórios rasos é hoje uma das ferramentas de destaque internacional da área. Atualmente módulos para transporte de sedimentos na coluna de água e ciclagem completa do carbono estão sendo desenvolvidos. A modelagem do ciclo do carbono e balanço metabólico é uma proposta recente para análise de emissão de gases de efeito estufa de lagos.

A modelagem matemática de processos hidrológicos e ecológicos de bacias hidrográficas pode ser utilizada para melhorar o entendimento das associações entre hidrologia e limnologia e realizar previsão de estados futuros de ecossistemas aquáticos mediante diferentes cenários. A integração de modelos de rio e lagos pode contribuir para a avaliação integrada dos aspectos relativos ao metabolismo de lagos, sendo importante para o entendimento na avaliação da emissão de gases de efeito estufa. Sendo assim, essa pesquisa representa mais um passo para a integração de partes dentro de um contexto muito maior.

1.4 HIPÓTESE

A concentração e fluxos de carbono em bacias hidrográficas apresentam variações espaciais e temporais. A variabilidade decorre de pressões ambientais vinculadas aos processos hidrológicos que atuam na bacia hidrográfica e podem ser representadas por modelos matemáticos, ainda que simplificados.

1.5 OBJETIVO

O objetivo do trabalho é melhorar a compreensão dos processos atuantes no fluxo fluvial de carbono em bacias hidrográficas e a representação dos mesmos utilizando modelos matemáticos.

1.5.1 Objetivos específicos

Mais especificamente, pretende-se responder as seguintes questões:

- Quais os principais fatores físicos, químicos e biológicos associados aos processos do ciclo do carbono, considerando a escala de bacia hidrográfica?
- É possível representar processos hidrológicos e ecológicos que atuam no fluxo fluvial de carbono em bacias hidrográficas, por meio de modelagem matemática?

Considerando os dados de monitoramento das bacias hidrográficas embutidas no rio Potiribu – Taboão (84 km²) e Turcato (19 km²) – afluente da margem esquerda do Rio Ijuí que deságua no Rio Uruguai, no Rio Grande do Sul:

- Qual o fluxo médio de carbono, ou ainda, a taxa de exportação de carbono por via fluvial nas bacias embutidas do Potiribu?
- Existe relação funcional entre vazão e concentração de carbono nas bacias do rio Potiribu?

1.6 MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido em etapas: (i) revisão de literatura, para identificar possíveis compartimentos e processos do ciclo do carbono, fundamentos para a idealização do modelo conceitual para a dinâmica de carbono; (ii) aplicação do modelo hidrológico MGB-IPH na bacia hidrográfica do Ijuí para fins de representação dos processos hidrológicos da região por meio de simulação; (iii) aplicação de método empírico para estimativa de fluxo fluvial de carbono a partir de amostras de vazão e concentração medidas em dois pontos de monitoramento; (iv) concepção e desenvolvimento do modelo matemático para representar dinâmica de carbono em bacia hidrográfica, MGB-IPH-C; (v) implementação da solução numérica do modelo de carbono, acoplada à estrutura do modelo hidrológico; (vi) análise qualitativa da resposta do modelo de carbono desenvolvido; (vii) ajuste do modelo de carbono e análise quantitativa considerando os fluxos estimados pelo método empírico e análise crítica.

2 CICLO DO CARBONO EM BACIAS HIDROGRÁFICAS

Este capítulo tem como objetivo principal a investigação de compartimentos, processos de transformação e vias de fluxo de carbono no solo e corpos de água interiores.

2.1 COMPARTIMENTOS DO CICLO GLOBAL DE CARBONO

O ciclo global do carbono costuma ser representado por três grandes compartimentos, sendo dois deles biologicamente ativos, a saber, o oceano e o sistema terrestre (solo e vegetação), conectados à atmosfera por via de fluxo gasosa.

A Figura 2.1 apresenta estimativas de armazenamento de carbono (GtC ou PgC) nos principais compartimentos e fluxos anuais entre eles (GtC/ano ou PgC/ano) para condições ditas naturais ou não-perturbadas, representadas pelas linhas escuras, bem como as alterações para a condição atual em linhas vermelhas.

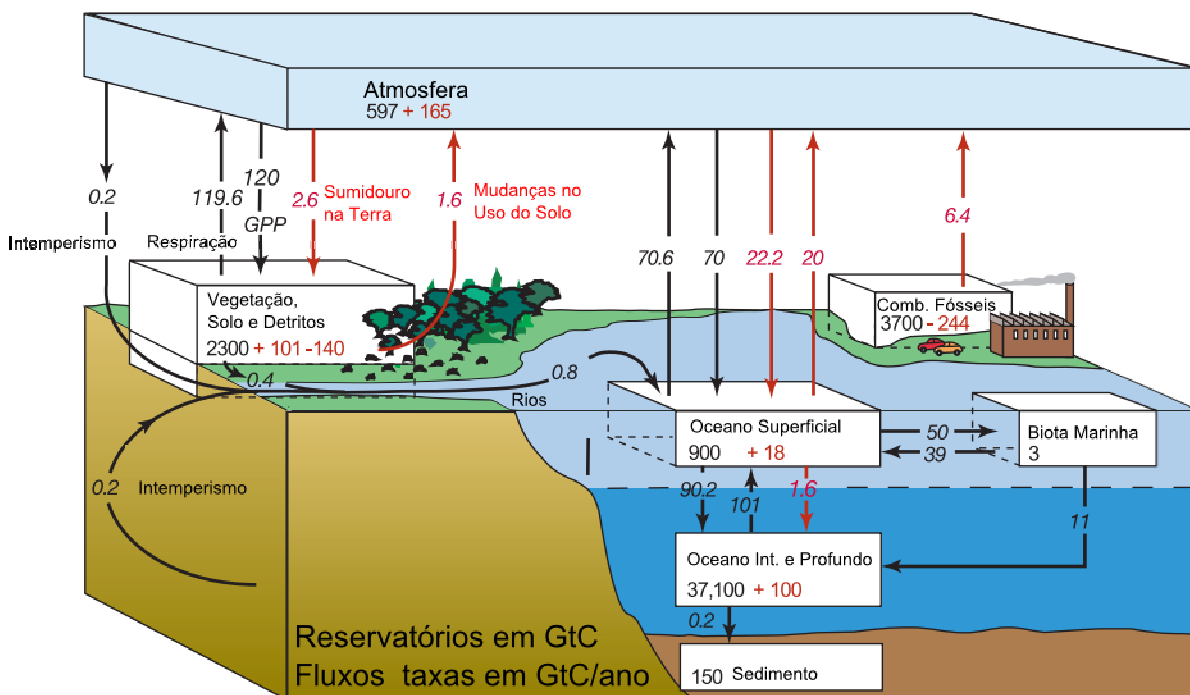


Figura 2.1 Ciclo global de carbono (armazenamento e fluxos)

Fonte: Adaptado de IPCC (2007)

Os principais componentes do fluxo de carbono na atmosfera são: na biosfera terrestre,

a produção primária bruta (GPP, do inglês, gross primary production) que representa o carbono assimilado pela biomassa através da fotossíntese, e a respiração; e as trocas físicas entre o oceano e atmosfera. O fluxo bruto entre a biosfera terrestre e a atmosfera e, entre os oceanos e atmosfera, é da ordem de 120 GtC/ano e 90GtC/ano (~70+20) , respectivamente. A quantidade de carbono necessária para a manutenção da vida das plantas é aproximadamente igual a da GPP, sendo que a cerca da metade é utilizada na formação de biomassa e metade é convertida de volta para a atmosfera na forma de CO₂, devido à própria respiração das plantas. Existe assim, um fluxo estimado de 0.4 GtC/ano (120 – 119.6) de carbono assimilado como CO₂ pelas plantas para carbono no solo. Globalmente, o solo armazena cerca de 2300 GtC e representa um sumidouro de carbono.

De acordo com Figura 2.1, o carbono transportado da superfície terrestre para os oceanos por meio de águas interiores é de 0.8 GtC/ano, uma média de longo período. Essa média inclui duas parcelas, sendo metade na forma de carbono orgânico oriundo do solo (0.4 GtC/ano), e metade de carbono inorgânico decorrente de processos de intemperismo sobre rochas carbonatadas (0.2 GtC/ano) e deposição atmosférica (0.2 GtC/ano). Considerando a exportação de 0.8 GtC/ano da continente para os oceanos, estima-se que cerca de 0.6 GtC/ano é transferido de volta para a atmosfera e 0.2 GtC/ano é armazenado nos sedimentos. Estudos recentes permitiram uma melhor estimativa dos fluxos de carbono das águas interiores, conforme descrito a seguir.

2.2 BALANÇO DE CARBONO EM ÁGUAS INTERIORES

O modelo global do ciclo do carbono estruturado em três compartimentos é consistente com a escala de interesse e a ordem de grandeza dos armazenamentos e fluxos. Esse modelo, no entanto, representa os fluxos fluviais passivamente, desconsiderando processos de armazenamento e as perdas para a atmosfera nesses sistemas. Cole et al. (2007) apresentaram uma revisão dos fluxos considerando esses dois processos e sugerindo que os ecossistemas dos corpos de água interiores representam um componente metabolicamente ativo no ciclo do carbono global.

De acordo com Cole et al. (2007), o balanço de massa de carbono entre sistemas aquáticos e terrestres pode ser modelado de forma simples (Equação 2.1). O carbono que entra nos sistemas aquáticos (I) pode ser estimado considerando o balanço líquido do fluxo de gases entre o sistema aquático e a atmosfera (G), o armazenamento nos sedimentos e

biomassa (S) e a exportação pela rede de drenagem (E), em unidades de massa de carbono por unidade de tempo.

Equação 2.1

$$I = G + S + E$$

O modelo proposto pode ser a qualquer unidade de estudo, por exemplo, um lago, uma bacia hidrográfica, um trecho de rio, ou ainda, à biosfera terrestre. Explicitando o armazenamento (S) é mais fácil interpretar o modelo em termos de perdas e ganhos. Ou seja, balanço de carbono é calculado pela diferença entre o aporte via fotossíntese (I) e perdas por via gasosa para a atmosfera (G) e exportação fluvial (E) (Equação 2.2).

Equação 2.2

$$S = I - G - E$$

Em uma bacia hidrográfica, o aporte de carbono ocorre principalmente via biótica, através da fotossíntese. As perdas ocorrem via respiração, combustão e processos hidrológicos. O armazenamento ocorre na vegetação e na matéria orgânica do solo e nos sedimentos dos corpos de água (Figura 2.2). Em bacias hidrográficas que recebem contribuição de montante, o carbono que entra por via fluvial também deve ser considerado. Uma descrição mais detalhada dos processos da fase terrestre e aquática é apresentada nas próximas seções deste texto.

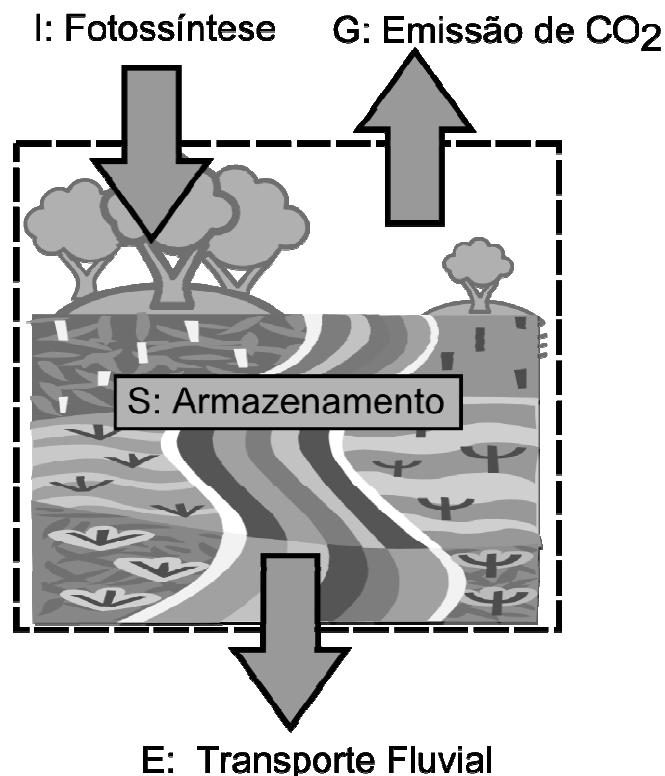


Figura 2.2 Esquema de balanço de carbono simples em bacia hidrográfica

Quando aplicado ao sistema terrestre global, as perdas são representadas pelo transporte de carbono dos rios para os oceanos (E) e pela emissão de carbono para a atmosfera (G), enquanto a importação (I) é o total de carbono de origem terrestre que aporta nos ecossistemas aquáticos. De acordo com o modelo: se $I = E$, os ecossistemas aquáticos funcionam como condutos passivos (ou neutros); se $I > E$, a perda de carbono excede a exportação, portanto os ecossistemas aquáticos devem funcionar como condutos (metabolicamente) ativos. Isso significa que existe armazenamento de carbono ou perdas para a atmosfera durante o trânsito através de ecossistemas aquáticos.

Considerando estimativas recentes de armazenamento de carbono, emissão de gases em águas interiores (e.g. rios, lagos, reservatórios, banhados, estuários, planícies de inundação e águas subterrâneas) e exportação fluvial, Cole et al. (2007) utilizaram o modelo apresentado para testar a hipótese do conduto ativo. O estudo indicou que o carbono originado nos sistemas terrestres e que aporta para as águas interiores deve ser de pelo menos 1.9 GtC/ano, ao contrário dos 0.9 GtC/ano (sendo 0.7, via águas superficiais e 0.2, via águas subterrâneas) considerados anteriormente (Figura 2.3). Dessa forma, o carbono transportado da superfície terrestre para os corpos de água interiores deve representar pelo menos o dobro do carbono que aporta no oceano e que as perdas para atmosfera devem representar cerca de três vezes a quantidade armazenada nos sedimentos de corpos de água interiores. Além disso, a perda de carbono para atmosfera a partir de corpos de água é cerca de 10% o valor das emissões de combustíveis fósseis.

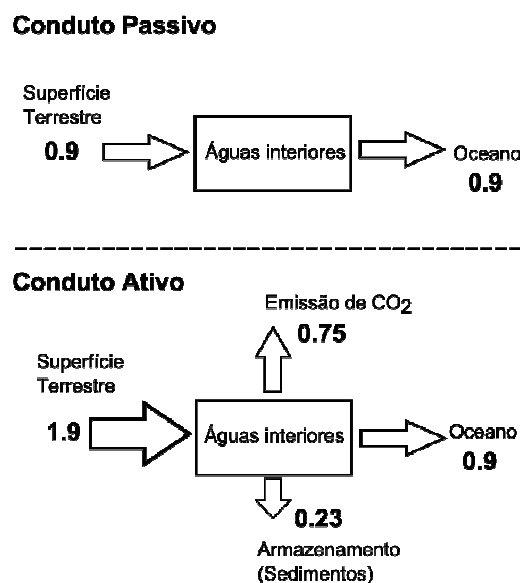


Figura 2.3 Balanço de massa de carbono nas águas interiores para o sistema global: fluxos em GtC/ano.

Fonte: Cole et al. (2007)

2.3 GENERALIDADES SOBRE O CARBONO ORGÂNICO E INORGÂNICO

Do ponto de vista ecológico, o estudo do ciclo do carbono costuma separar os compostos formados por esse elemento em duas grandes classes: carbono orgânico e carbono inorgânico.

O carbono orgânico compõe a estrutura molecular dos seres vivos e, uma vez disponibilizados para o meio, representam uma fonte de alimentação para os processos metabólicos (respiratórios) nas redes alimentares, tendo grande importância no fluxo de energia nos ecossistemas. Além disso, decomposição do carbono orgânico morto (ou detrital), dissolvido ou particulado, tem um papel importante nos processos de geração de gases como o metano e gás carbônico (Cole et al., 2000; Hanson et al., 2003; Tranvik, 1998; Del Giorgio et al., 1997; Del Giorgio e Peters, 1993; Jonsson et al., 2001).

O carbono inorgânico ocorre na natureza principalmente na forma de gás carbônico, sendo oriundo da atmosfera, chuva, águas subterrâneas, processos respiratórios e decomposição de material orgânico. Na água, o carbono inorgânico ocorre em três formas principais: carbono inorgânico livre ou ácido carbônico ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{CO}_3$), íons bicarbonato (HCO_3^-) e íons carbonato (CO_3^{2-}), sendo elas relacionadas com o pH do meio. Sua distribuição na água depende de processos biológicos, da temperatura e alcalinidade (Snoeyink, 1980).

As próximas seções apresentam um melhor detalhamento dos compartimentos, fluxos e particularidades do carbono, na forma orgânica e inorgânica, na superfície terrestre e águas interiores.

2.4 CARBONO NO SOLO

Globalmente, o solo armazena cerca de 2300 Gt de carbono, o que corresponde a cerca de três vezes a quantidade estocada na atmosfera (Schlesinger, 2001; IPCC, 2007). O destino do carbono terrestre depende de processos que ocorrem dinamicamente entre diferentes compartimentos (Figura 2.4).

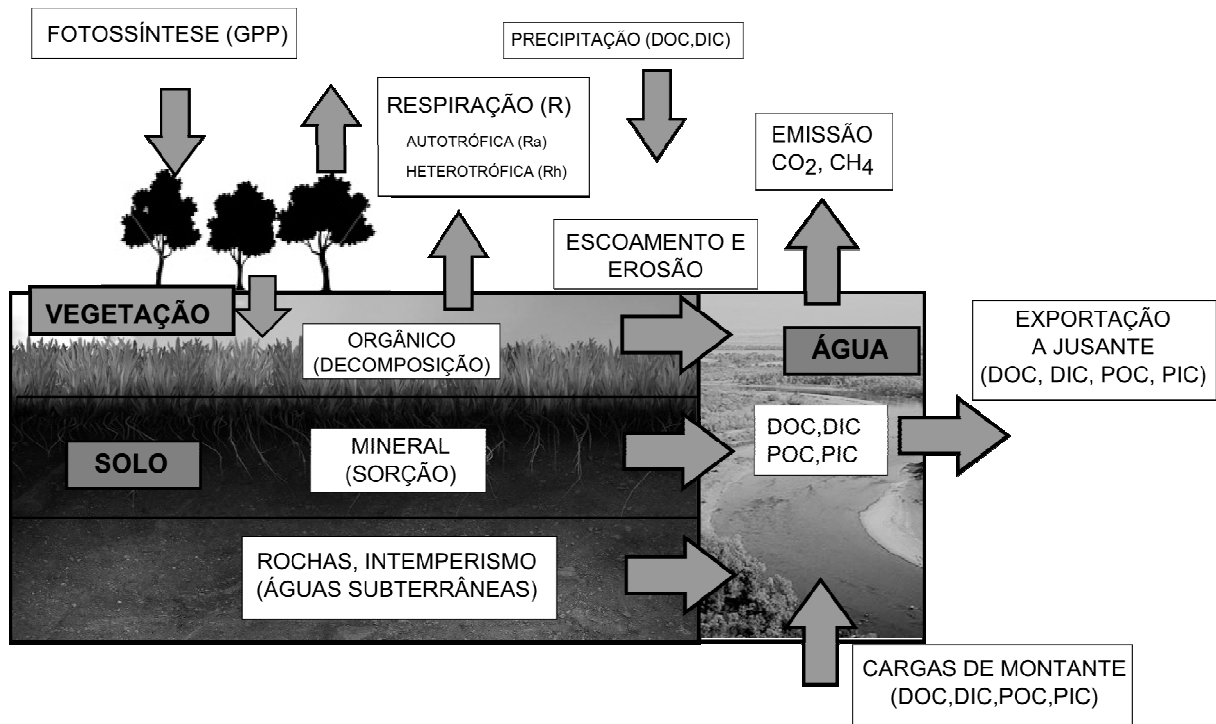


Figura 2.4 Vias de fluxo de carbono no ecossistema terrestre

Na grande parte dos ecossistemas terrestres o carbono entra na parte biológica do sistema via assimilação fotossintética de CO₂ atmosférico. Esse processo é denominado produção primária bruta (Gross primary production, GPP). O aporte de carbono pode ocorrer também via precipitação e o intemperismo sobre rochas que contém carbonato de cálcio (CaCO₃), mas nesses casos o caminho é abiótico.

O carbono assimilado liga-se a outras formas inorgânicas (e.g. nutrientes) formando a biomassa da vegetação. Esse carbono assimilado – agora orgânico – consiste a base que sustenta a vida dos organismos no solo. Em média, 40 a 50% do carbono que entra como GPP é utilizado para a respiração autotrófica (Ra) retornando para a atmosfera como CO₂. A parcela restante, chamada de produção primária líquida (Net primary production, NPP = GPP – Ra) é fixada como biomassa na vegetação. Este fluxo de carbono varia com o clima, eficiência de assimilação da espécie vegetal e a sazonalidade.

O carbono na biomassa vegetal pode ser transferido para o solo na forma de carbono orgânico pela decomposição de detritos (e.g. galhos, raízes, troncos, folhas e sementes). Uma vez no solo, o carbono orgânico pode ser convertido novamente em carbono inorgânico através de processos respiratórios de organismos heterotróficos (Rh) e liberados para a atmosfera. A liberação de carbono por processos de oxidação, tais como queimadas entram no balanço como termo de perda adicional, contabilizado na respiração.

A diferença entre a GPP e a respiração total do ecossistema representa a parcela disponível de carbono orgânico é chamada de produção líquida do ecossistema (Net ecosystem production, $NEP = GPP - R_a - R_h$) e tem dois possíveis destinos: exportação ou armazenamento (Cole et al., 2007).

A transferência de carbono do solo para as águas superficiais ocorre primeiramente através do movimento da matéria orgânica do solo para as águas do solo. Na bacia hidrográfica, a água do solo percorre caminhos determinados pela geologia (escoamento subterrâneo) e topografia (escoamento superficial) e pelo tipo do solo, modificando sua composição à medida que se movimenta entre os diferentes horizontes do solo antes de chegar à rede de drenagem (Evans et al., 2005; Dawson e Smith, 2007).

As atividades químicas e biológicas do solo ocorrem principalmente nas camadas superiores que constituem a liteira (material vegetal depositado) e o húmus, respectivamente, os horizontes O (0-10 cm) e A (10-15 cm) (Figura 2.5). Grande parte das perdas de carbono do solo ocorre na forma de CO_2 que é gerado a partir da mineralização, principalmente via atividade microbiana de matéria orgânica. A emissão global de CO_2 gerados por processos de decomposição do carbono orgânico no solo (SOC, do inglês, *soil organic carbon*) aproximam-se de 60 GtC/ano, o que equivale a cerca de nove vezes o valor das emissões de carbono liberadas pela queima de combustível fóssil (Coleman, 2004). Sendo assim, a decomposição de material orgânico no solo apresenta um papel importante na ciclagem global de carbono.

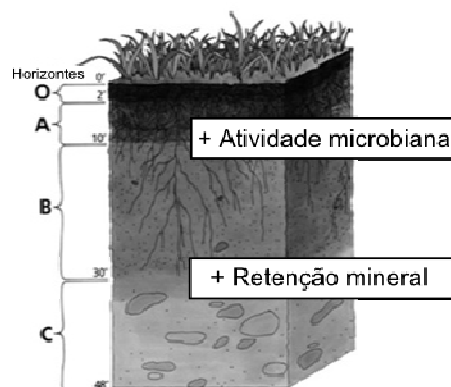


Figura 2.5 Perfil típico de coluna de solo e processos dominantes do carbono

Fonte: Adaptado de National Resources Conservation Services(2010)

A velocidade dos processos microbianos de decomposição da matéria orgânica do dependem da temperatura, composição dos detritos e nutrientes. Estes parâmetros interagem com fatores físico-químicos do solo como umidade, pH, potencial redox que influenciam a atividade da comunidade de decompositores no solo (e.g. fungos, bactérias, invertebrados) e

das enzimas extracelulares que contribuem para a degradação da matéria orgânica (Coleman, 2004). Em temperaturas mais altas, as taxas de decomposição tendem a ser mais altas (Hope et al., 2004; Jones e Mullholand, 1998), porém após o consumo das frações orgânicas de fácil decomposição as taxas devem ser reduzidas (Costa et al., 2008).

A composição da biomassa das plantas (e.g. conteúdo de celulose, lipídios e proteínas) que é dependente da espécie e da idade deve afetar as taxas de decomposição. Os detritos provenientes de estruturas vegetais podem ser classificados qualitativamente pela razão Carbono/Nitrogênio (C/N) que é um indicador de susceptibilidade à decomposição – quanto maior, mais difícil de decompor – pois o carbono, particularmente, na forma de lignina é de difícil decomposição (Dawson e Smith, 2007). Além disso, a susceptibilidade da matéria orgânica à degradação no solo depende fortemente de processos de estabilização (ou sorção) do material dentro de micro ou macroagregados de solo (Six et al., 2002 apud Coleman, 2004). A proteção pode ocorrer fisicamente como matéria orgânica agregada a partículas de silte e argila, bem como bioquimicamente formando material orgânico recalcitrante – de degradação lenta – no solo. O tempo de residência do material agregado fisicamente costuma ser da ordem decadal, enquanto o material recalcitrante pode demorar de centenas a milhares de anos para se decompor. A fração de matéria orgânica que não se agrupa aos agregados – cerca de 3-5% da matéria orgânica do solo – fica desprotegida e geralmente é mais susceptível à degradação microbiana. As taxas de decomposição de matéria orgânica são determinadas principalmente pela acessibilidade da comunidade microbiana do solo à matéria orgânica.

Considerando os aspectos já referidos a respeito dos horizontes do solo, da atividade microbiana e dos processos de agregação, é esperado que as concentrações de carbono apresentem uma distribuição vertical particular no solo. A água das camadas superficiais do solo geralmente apresenta concentrações elevadas de DOC, variando na faixa de 2-30 mg/L, devido à solubilização de material orgânico da liteira (Thurman, 1985 apud Allan, 1995). À medida que o DOC penetra nos horizontes, os microorganismos metabolizam esta fonte de energia e as concentrações decaem nos horizontes mais profundos. Ao longo do perfil do solo ocorre também a remoção de carbono orgânico dissolvido da água por adsorção da matéria orgânica na superfície de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, principalmente nos horizontes minerais. Tal processo depende de fatores como pH, textura e composição do solo. Em solos bastante orgânicos, ocorre pequena redução nas concentrações de carbono orgânico dissolvido na água do solo, devido à baixa disponibilidade e capacidade de retenção em meio mineral (Fiebig et al., 1990, Grieve et al., 1990a apud Dawson e Smith, 2007).

O carbono na forma de gás é perdido para a atmosfera por difusão, convecção ou

através do sistema vascular das plantas. O fluxo de carbono na forma gasosa depende da taxa de geração de CO_2 e CH_4 durante a respiração no sistema solo-planta, da taxa de difusão do gás e fluxos de água na interface da atmosfera e solo. Em solos com agricultura e campos pouco orgânicos, as taxas de emissão devem variar substancialmente de acordo com as práticas de uso e manejo do solo em cada local, porém é esperado que os as perdas sejam maiores em sistemas mais perturbados. A emissão na forma de CH_4 ocorre, especialmente, em solos de banhados, porém mesmo neste tipo de sistema as perdas de carbono na forma de CO_2 são até cem vezes maiores do que de CH_4 , isso ocorre porque cerca de 20-55% do CH_4 é oxidado nos horizontes superficiais antes de passar para a atmosfera (Dawson e Smith, 2007).

Foi citado anteriormente que o carbono pode aportar no solo a partir da atmosfera pela precipitação. Em zonas temperadas, a chuva contém DOC em concentrações que variam entre 0,82 e 2,00 mg/L, sendo que a concentração costuma ser de aproximadamente 1 mg/L acima do dossel e de 2-3 mg/L abaixo do mesmo. Parte do carbono proveniente da precipitação pode ser interceptada pela vegetação, porém a parcela da precipitação que chega à superfície do solo (“*throughfall*”) geralmente apresenta concentrações de DOC mais elevadas provenientes da própria vegetação. Ao escoar pela vegetação, a chuva retira quantidades significativas de carbono e as gotas podem apresentar concentração de DOC de até 25 mg/L (Thurman, 1985 apud Allan, 1995).

Em resumo, o equilíbrio entre o aporte de carbono nos ecossistemas terrestres como GPP e as perdas nas diferentes vias de fluxo (e.g. respiração, exportação para os rios, fluxos para a atmosfera, queimadas e desmatamento) determinam se o ecossistema terrestre age como uma fonte ou sumidouro de carbono. O transporte e a variabilidade espacial das perdas de carbono do solo para a atmosfera e para os corpos d’água devem estar vinculados à resposta aos eventos de precipitação e às mudanças nos caminhos e fluxos de água através dos diferentes tipos de solo e cobertura vegetal que compõe as bacias hidrográficas.

2.5 CARBONO NA ÁGUA

Na superfície terrestre grande parte do carbono assimilado pela fotossíntese é retorna

para a atmosfera. Por outro lado, nos ecossistemas aquáticos é comum a respiração exceder a produção primária. Isso ocorre porque existe a degradação de material orgânico de origem externa ao corpo de água, de fato, oriundo da bacia hidrográfica. Esse aporte de material tem impacto sobre as redes alimentares aquáticas e sobre a geração e emissão de dióxido de carbono. Nos últimos anos, houve um aumento da preocupação sobre o potencial de reservatórios de água na emissão de gases de efeito estufa e implicações sobre o sistema climático. Portanto o entendimento dos processos ecológicos que atuam nos corpos de água interiores se faz necessário.

As redes alimentares constituem a principal via de fluxo de carbono nos ecossistemas de águas interiores e podem ser separadas com base na fonte de energia e de carbono, a saber, a rede de pastejo (do inglês, *grazing*) e a rede de detritos. A rede de pastejo tem como base energética a produção fotossintética (ou autotrófica) de matéria orgânica que uma vez incorporada ao sistema (e.g. na biomassa do fitoplâncton e macrófitas aquáticas) é transferida para os outros níveis tróficos por via de consumo (e.g. herbivoria e carnivoria) na cadeia alimentar. Os detritos, por outro lado, representam a parcela de carbono orgânico morto, distinguível do carbono orgânico na biomassa dos organismos vivos e do carbono nas formas inorgânicas, disponibilizada por meio não predatório por processos na cadeia trófica (e.g. excreção ou células mortas) ou de origem externa ao ecossistema e que representa o maior compartimento de matéria orgânica em meio aquático (Vahatalo, 2000). A decomposição dos mesmos representa mais de 50% do fluxo de carbono nos ecossistemas aquáticos e ocorre principalmente através do metabolismo microbiano e por reações fotolíticas (Hedges 1992 apud Vahatalo 2000). Os processos de decomposição apresentam papel decisivo no fluxo de material e energia nas cadeias alimentares e na mineralização de carbono orgânico (geração de CO₂). A Figura 2.6 apresenta um esquema com os principais compartimentos e vias de fluxo do carbono na água.

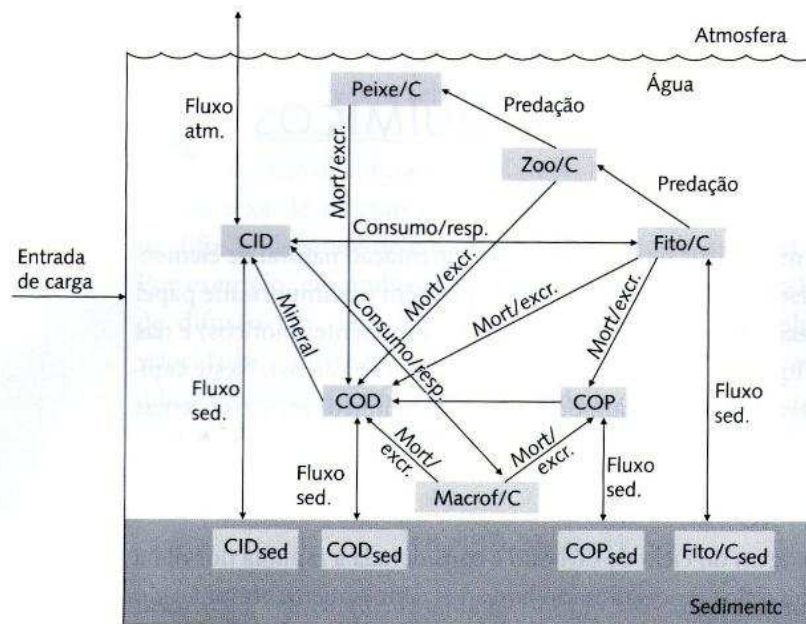


Figura 2.6 Esquema simplificado do ciclo do carbono em corpos de água

Fonte: Fragoso Jr. C. R. et al. (2009)

A matéria orgânica pode ser gerada dentro do ecossistema (produção autóctone) pelos produtores primários, pela excreção direta e pela quebra do tecido das macrófitas e microflora após a morte. Quando a matéria orgânica é oriunda de fontes externas ao corpo de água diz-se que a mesma é alóctone. Geralmente, a maior parte do aporte de carbono vem na forma dissolvida ou particulada fina (e.g. pólen, resíduos vegetais), porém a fração particulada grossa (e.g. folhas e galhos de árvores carregados pelo escoamento) também pode ser de origem alóctone. Grande parte do carbono orgânico disponível nos corpos de água naturais consiste em carbono orgânico dissolvido (DOC) e carbono orgânico particulado (POC) morto, na forma de detrito, sendo que o DOC de origem alóctone constitui a fonte primária de sobrecarga de carbono orgânico para as águas doces. A razão entre DOC e POC normalmente encontra-se entre 6:1 e 10:1, tanto em lagos quanto em rios (Wetzel, 1993). Sendo as redes alimentares aquáticas movidas, em grande parte pelo material oriundo das bacias adjacentes, as mudanças no fluxo de DOC da terra para as águas superfícies podem afetar a ecologia de lagos e rios (Findlay e Sinsabaugh, 2002; Mulholland, 2002).

Toda a matéria orgânica dissolvida (DOM, do inglês, *dissolved organic matter*) nos rios é oriunda de processos biológicos (e.g. lixiviação de folhas, decomposição bacteriana) sobre a matéria orgânica existente no solo (acima ou abaixo da superfície), vegetação ou no próprio corpo de água. A DOM pode afetar o funcionamento de ecossistemas aquáticos por influenciar na acidez, no transporte de metais, nas reações fotoquímicas e no suprimento de

luz, energia e nutrientes (Evans et al. 2005; Skjelkvale et al. 2005; Vahatalo 2004). A DOM é representada pelos componentes orgânicos capazes de passar em um filtro de 0.45 micrometros. Os compostos orgânicos que se encaixam nesse perfil incluem, em menor proporção, componentes de baixo peso molecular como aminoácidos e carboidratos (10-15%) e, em sua grande parte, componentes complexos com médio e alto peso molecular, as substâncias húmicas (50-75%, ou ainda, 90% em águas bastante coloridas). Em termos práticos é comum assumir que a fração em massa de carbono na matéria orgânica dissolvida (ou DOC) varia entre 45-50% (Hope et al., 1994).

Os processos hidrológicos podem afetar a exportação e as concentrações de DOC nos corpos de água através de diversos mecanismos (e.g. escoamento superficial e erosão). O aporte de material alóctone costuma ser altamente sazonal e uma grande parte dos detritos orgânicos, tanto na fase particulada ou dissolvida, dos ecossistemas de águas interiores consiste de compostos orgânicos residuais de tecidos estruturais de plantas (Naiman e Bilby, 1998). A DOM costuma entrar na rede de drenagem durante todo o ano, porém o aporte pode ser mais significativo durante épocas de chuva.

A matéria orgânica acumulada nas águas da superfície do solo costuma representar uma contribuição relativamente mais alta para as concentrações de DOC nos corpos de água (do que o escoamento subterrâneo), em especial, devido a lavagem do solo após tempestades ou por cheias sazonais. Sendo assim, é esperado que as concentrações de DOC nos corpos de água que drenam solos bastante orgânicos devem aumentar após eventos de chuva (Evans et al. 2005; Dawson e Smith, 2007). Não menos importante, as condições de umidade e temperatura do solo também respondem aos processos hidrológicos, portanto influenciam nas taxas de produção de carbono no solo e na quantidade de carbono disponível para o transporte. Em função da degradação biológica e dos processos de sorção sob a matéria orgânica durante o movimento das camadas mais superficiais do solo para os horizontes mais profundos e também devido aos maiores tempos de residência da água, as concentrações de DOC nas águas subterrâneas costuma ser baixo, na mediana entre 1 e 2 mg/L (Allan, 1995). No que diz respeito à fração orgânica, a entrada de águas subterrâneas profundas com baixas concentrações de DOC deve apresentar um efeito diluidor na água corrente do rio.

Uma vez aportado em rios, o carbono orgânico particulado e dissolvido desloca-se no sentido do movimento da água podendo também sedimentar-se no fundo. Em águas superficiais o DOC pode ser transformado em formas inorgânicas (e.g. CO₂) por atividade microbiana e por processos de degradação fotoquímica, em especial, sob efeitos da luz nos comprimentos de onda do UV-A, UV-B e PAR (do inglês, *photosynthetically active*

radiation, 400-700nm) (Vahatalo, 2000). Como grande parte da matéria orgânica alóctone é de difícil degradação, a decomposição desse material em rios deve ocorrer à jusante do ponto de entrada, podendo inclusive alcançar sistemas estuarinos e oceanos. As características ecológicas ao longo do rio respondem às mudanças na geomorfologia e nos processos fluviais que ocorrem durante o percurso, por exemplo, no sombreamento, velocidade e turbulência e temperatura (Vannote et al., 1980).

O carbono inorgânico dissolvido apresenta-se nas formas de íons livres carbonato (CO_3^{2-}), bicarbonato (HCO_3^-) dissolvido e CO_2 livre, espécies químicas que formam o sistema carbonato que atuam na regulação do pH da água (Figura 2.7). O equilíbrio dessas espécies na água depende da alcalinidade, do pH e da temperatura. O dióxido de carbono, fração inorgânica dissolvida na forma de gás, é basicamente produto de processos respiratórios, ou seja, do metabolismo dos seres vivos e da degradação de matéria orgânica. O carbono inorgânico particulado (PIC, *particulated inorganic carbon*) deriva principalmente do intemperismo e dissolução de minerais carbonatados.

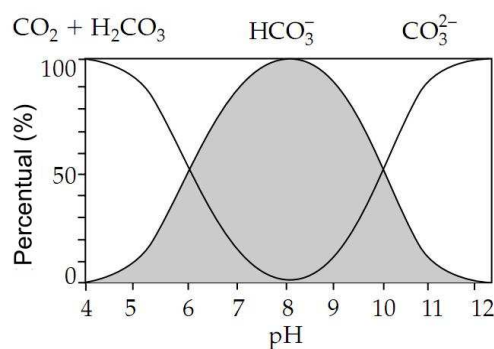


Figura 2.7 Distribuição das formas de carbono inorgânico no sistema carbonato

Fonte: Adaptado de Snoeyink (1980)

A presença de CO_2 em águas superficiais depende tanto do metabolismo do corpo de água quanto das transferências do solo para as águas sub-superficiais e subterrâneas. Em rios, o CO_2 origina-se principalmente em solos onde as concentrações são elevadas devido à respiração heterotrófica e das raízes. A geração de CO_2 nos solos e ecossistemas ribeirinhos é regulada por fatores como quantidade e qualidade de matéria orgânica, temperatura, oxigênio e disponibilidade de nutrientes. Os principais fatores que afetam as reações são a temperatura e a umidade do solo. Em função disso, a respiração pode apresentar um padrão sazonal marcado por uma elevação no verão e diminuição no inverno (Hlavacová et al., 2006).

Os rios costumam apresentar supersaturação de CO_2 devido ao aporte de água dos solos e da mineralização de matéria orgânica terrestre nas águas e sedimentos. A supersaturação de CO_2 na superfície da água, em relação à atmosfera, possibilita altas taxas de

transferência por difusão para a atmosfera (Cole e Caraca, 2001; Hope et al., 2004; Richey et al., 2002; Lilley et al., 1996 apud Hlavacová et al., 2006). Isso implica que em ambientes lóticos o fluxo de gás carbônico tende a ocorrer quase sempre no sentido água-atmosfera.

O metano encontrado em rios é produzido, na sua grande maioria, nas planícies de inundação (Richey et al., 2002) ou nos solos e águas subterrâneas (Jones e Mulholland, 1998). O metano também se encontra tipicamente supersaturado nos rios e é gerado quase que inteiramente pelos processos bióticos (bactérias estritamente anaeróbias). A anoxia é mais comum em zonas terrestres e ripárias, portanto os solos devem representar uma fonte importante de metano. A presença de metano em águas de rios reflete a magnitude do processo de metanogênese nos solos e podem ajudar a caracterizar padrões de anaerobiose no solo. Como os rios são ecossistemas onde as condições óxicas geralmente prevalecem a emissão de metano é bastante limitada e o gás é perdido na forma oxidada, ou seja, dióxido de carbono (Guérin et al., 2006).

Os gases saem dos sistemas aquáticos principalmente por fluxo difusivo na interface água-ar e por borbulhamento. A importância de cada um desses meios de transferência depende da variabilidade natural da temperatura, composição do sedimento e de eventos de inundação. Mudanças bruscas na pressão hidrostática causadas por mudanças significativas no nível de água favorecem o borbulhamento. Este tipo de processo de transporte é importante em lagos e banhados, porém a significância da ebulição de gases em rios é pouco conhecida (Bastviken et al., 2004; Hlavacová et al., 2006).

Em reservatórios o CO_2 e o CH_4 podem ser formados pela decomposição de material alóctone (aporte de DOC e POC da bacia hidrográfica) ou da biomassa que existente antes da inundação e do material autóctone. A produção de CO_2 ocorre também pelo processo de respiração das plantas e pela oxidação do CH_4 formado nas camadas mais profundas durante a subida para a superfície. O sedimento na zona profunda do lago costuma ser rico em matéria orgânica favorecendo a proliferação de microorganismos. O metabolismo das bactérias, por sua vez, provoca rapidamente o aparecimento de condições de anoxia – falta de oxigênio – nessa região (Wetzel, 1993). Portanto, a decomposição de matéria orgânica nos sedimentos ocorre por meio de processos anaeróbios como a metanogênese resultando em CH_4 . A Figura 2.8 apresenta um esquema simplificado dos fluxos de CH_4 e CO_2 em um reservatório artificial, uma questão de interesse atual.

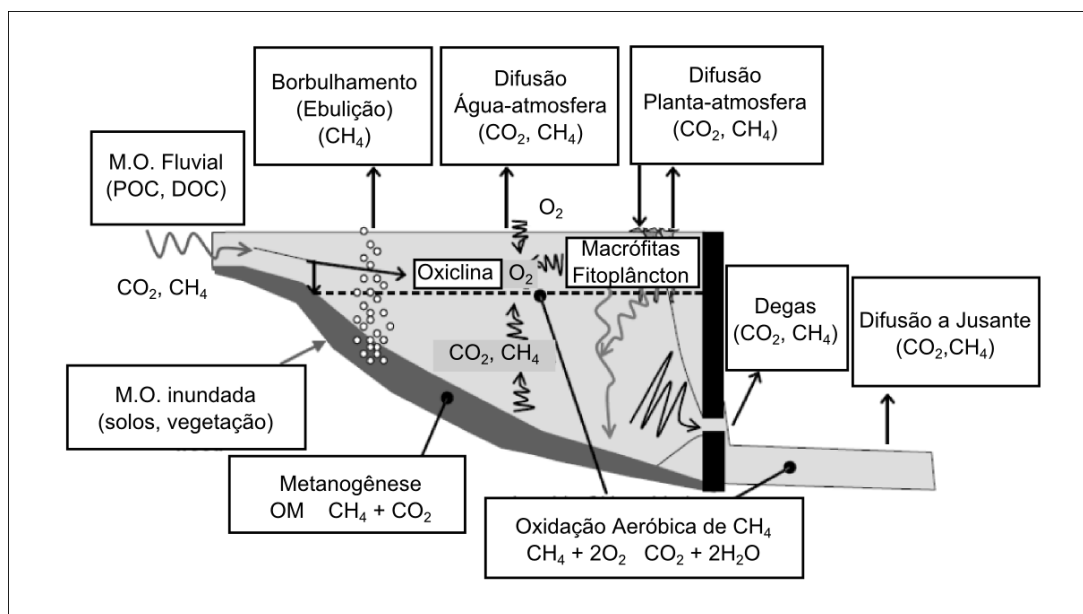


Figura 2.8 Caminhos do dióxido de carbono e metano em reservatório.

Fonte: Adaptado de UNESCO/IHA, 2009

Para a maioria dos ecossistemas aquáticos a respiração excede a produção primária bruta autóctone (GPP), sendo assim, os mesmos têm produção líquida de ecossistema negativa ($[NEP]=[GPP]-R$) (Cole et al., 2000; Hanson et al., 2003) e uma razão $[GPP]/R < 1$. Esta heterotrofia líquida tem sido atribuída à degradação bacteriana de carbono importado da bacia hidrográfica (Tranvik, 1998; Del Giorgio et al., 1997), sendo que a respiração em lagos é frequentemente dominada por degradação de matéria orgânica alóctone (Del Giorgio e Peters, 1993; Jonsson et al., 2001). Dessa forma, o ciclo de carbono em ecossistemas lago deve estar pareado com o suprimento externo de carbono orgânico oriundo da bacia hidrográfica e a mineralização de carbono orgânico dissolvido (Hope et al., 1996; Del Giorgio et al., 1997, Cole e Caraco, 2001; Sobek et al., 2003; Carpenter et al., 2005).

O aumento de concentração de metano em rios devido à construção de barragens já foi documentado em alguns rios (Lilley et al. 1996, Upstill-Goddard et al. 2000 apud Guérin, 2006), no entanto, o impacto líquido das barragens sobre o CO_2 dos rios ainda é difícil de avaliar, devido à falta de informação a respeito da dinâmica de matéria orgânica na interface reservatório-rio. As emissões de gases de efeito estufa (GEE) para a atmosfera a partir de rios localizados à jusante de barragens podem ser bastante consideráveis em reservatórios profundos, pois a água proveniente do hipolímnio nesses frequentemente apresenta concentrações muito baixas de oxigênio devido à decomposição anaeróbica da vegetação e do solo da área inundada (Fearnside, 2004; Richey et al. 2002). Abril et al. (2005) demonstraram que grandes quantidades de metano e dióxido de carbono atravessam as turbinas e chegam ao

rio à jusante da barragem, no reservatório Petit Saut, na Guiana Francesa. Neste mesmo local, cerca de 70% das emissões de CH₄ e 40% das emissões de CO₂ ocorreram à jusante da barragem. Sendo assim, a decomposição de matéria orgânica em reservatórios artificiais pode contribuir para a redução na concentração de O₂ ao longo dos rios a jusante de barragens.

2.6 MODELOS DE QUALIDADE DE ÁGUA E BALANÇO DE CARBONO

A análise de futuros cenários de gestão e/ou mudanças climáticas sobre disponibilidade de água em quantidade e qualidade é possível utilizando modelos de qualidade de água baseados em compartimentos e vias de fluxo, ou ainda, processos atuantes na dinâmica de sistemas. O uso desse tipo de modelos permite uma melhor compreensão sobre interações e funcionamento do ecossistema aquático, em especial, a respeito da influência de forçantes externos (e.g. radiação solar, ventos, cargas de poluentes) e dos mecanismos internos de controle e regulação (e.g. taxas de crescimento, mortalidade, predação, degradação). Além disso, modelos dessa classe podem ser utilizados também para realizar previsões de qualidade de água, florações de cianobactérias e calcular o balanço metabólico (de carbono) em corpos de água.

Os modelos de qualidade de água variam de acordo com o domínio de aplicação (e.g. bacia hidrográfica, lagos, rios, ou modelos integrados), complexidade e variáveis de estado representadas (e.g. oxigênio, temperatura, fósforo, carbono, etc.). Um grande problema relacionado aos modelos biológicos e ambientais complexos é o elevado número de parâmetros envolvidos e a dificuldade na calibração e validação destes modelos. Além disso, os parâmetros geralmente são definidos utilizando dados da literatura obtidos de estudos em clima boreal ou tropical, os quais podem não retratar a realidade brasileira que apresenta climas subtropical e tropical dominantes.

A integração de modelos hidrológicos e de modelos de qualidade de água para estudar a influência dos processos hidrológicos e as práticas de uso do solo aos processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem nos corpos de água se faz necessária para auxiliar na tomada de decisão nos aspectos de entendimento e controle da eutrofização antrópica (Conley et al. 2009).

Os modelos mais utilizados para simular hidrologia e poluição difusa em escala de bacia hidrográfica são: AnnAGNPS (Annualized Agricultural NonPoint Pollution Model - Bingner e Theuer, 2001), HSPF (Hydrological Simulation Program-Fortran – Bicknell et al.

1993), MIKE-SHE (European Hydrological System – Refsfaard e Storm, 1995), SWAT (Soil and Water Assessment Tool – Arnold et al., 1998), AGNPS (Agricultural NonPoint Pollution Model - Young et al., 1987), DWSM (Dynamic Watershed Simulation Model - Borah et al. 2002). Os modelos AnnAGNPs, HSPF, SWAT podem ser aplicados para simulações contínuas, enquanto o modelo AGNPS e DWSM só simulam eventos. O modelo MIKE-SHE pode fazer ambos os tipos de simulação, porém sua aplicação em bacias maiores se torna complicada. Borah e Bera (2003) sugerem o uso dos modelos SWAT, AnnAGNPS e DWSM para aplicação em bacias agrícolas. Modelos conhecidos como o HSPF e o SWAT costumam exigir especialização e grande quantidade de informação para a aplicação.

No Brasil, um módulo de qualidade de água foi acoplado ao modelo hidrológico distribuído MGB-IPH (Collischonn, 2001; Larentis, 2004) com o propósito de avaliar a qualidade das águas em bacias hidrográficas de grande porte. Recentemente, modelos nacionais como o IPH-ECO (Fragoso Jr., 2005) e SisBahia (Rosman, 2000) tem sido aplicados na simulação hidrodinâmica e de qualidade de água de grandes corpos de água (e.g. lagos e reservatórios).

Para melhor entender os meios pelo quais ocorrem os fluxos de carbono nos ecossistemas terrestres, modelos empíricos e baseados em processos foram desenvolvidos para diferentes objetivos, por exemplo, para identificar possíveis mecanismos responsáveis pela alteração nas concentrações de carbono orgânico dissolvido em corpos de água (Evans et al., 2005; Holmberg et al., 2006; Futter et al. 2007; Futter et al., 2008; Futter et al., 2009) e para avaliar a dinâmica de carbono em solos de florestas (Liski et al., 2005; Chertov et al., 2001). Diferentes formas de representação para os compartimentos e fluxos de carbono na interface terrestre (vegetação e solo) pode ser encontrada em modelos de ecossistema, tais como o CENTURY (Parton et al., 1987 apud Metherell et al., 1996), DAYCENT (Parton et al., 1998) e TERRAFLUX (Neff e Asner, 2001) desenvolvidos para avaliar a dinâmica de carbono em diferentes biomas, ou ainda, em modelos como o YASSO (Liski et al., 2005; Tuomi et al., 2009) e ROMUL (Chertov et al., 2001) que enfatizam as transformações nas camadas superficiais do solo. O modelo INCA-C (Futter et al., 2007; Futter et al., 2008; Futter et al., 2009; Whitehead, 1998) foi desenvolvido para estudar a dinâmica de DOC em corpos de água de bacias hidrográficas.

Estudos de Neff e Asner (2001) apontaram que os principais processos controladores da exportação de DOC dos solos para a rede de drenagem são a hidrologia e a dinâmica de sorção de carbono orgânico no solo. Em bacias com grandes reservatórios ou lagos, tanto a produção no solo como a mineralização dentro do lago controla as concentrações de DOC nas

águas superficiais, porém em bacias onde os corpos de água predominantes são rios e córregos, o regime de vazões e as taxas de produção de DOC nos solos orgânicos são os processos dominantes (Futter et al., 2008). Sendo assim, alterações na quantidade e nos caminhos de fluxo de água nos horizontes do solo, decorrentes de mudanças hidrológicas na superfície podem ser tão importantes quanto a atividade biológica na determinação das concentrações de carbono no solo e nos corpos de água que drenam as águas.

Os modelos de qualidade de água citados anteriormente abordam o carbono de forma indireta, através da modelagem de oxigênio e demanda bioquímica de oxigênio (DBO) que trata da fração disponível para degradação rápida. Alguns modelos quantificam o carbono na biomassa de algas, por exemplo, porém o carbono na forma de detrito de degradação lenta não é considerado, ao menos, de forma explícita.

Considerando que o ciclo do carbono em ecossistemas aquáticos está associado a processos que ocorrem na bacia hidrográfica e que a maior parte dos modelos existentes não representa o carbono na forma de detrito de degradação lenta, o desenvolvimento e aplicação de um modelo para a dinâmica de carbono na escala de bacia hidrográfica, integrado a um modelo hidrológico, representa uma contribuição de caráter original.

2.7 ESTUDOS DE QUANTIFICAÇÃO DE EXPORTAÇÃO FLUVIAL DE CARBONO

Existem diversos registros de quantificação de taxas de fluxo fluvial de carbono em corpos de água interiores e bacias hidrográficas da Europa e América do Norte (Hope et al., 1994; Cole et al., 2007; Hinton et al., 1997, 1998). Esses estudos permitiram um melhor entendimento sobre os fatores que atuam na dinâmica de carbono em regiões de clima temperado e boreal, porém pouco se sabe sobre os processos em região de clima tropical e sub-tropical.

No Brasil, estudos que buscaram entender e quantificar os fluxos de carbono em escala de escala regional ou de bacia hidrográfica foram realizados na sua grande parte na Bacia Amazônica (Houghton et al., 2009; Melack et al., 2009; Richey et al., 2009; Johnson et al., 2006, 2008; Waterloo et al., 2006; Krusche et al., 2009).

Alguns trabalhos realizados em São Paulo (Mortatti et al., 2006a; Mortatti et al., 2006b) caracterizaram a origem e estimaram os fluxos de carbono no rio Tietê e rio Piracicaba, com ênfase na fração inorgânica. Nesses estudos, as maiores cargas de carbono foram na forma inorgânica e estiveram associadas a poluição antrópica. No Rio Grande do

Sul, existem trabalhos associados ao carbono, porém com enfoque agrônômico (e.g. Costa et al., 2008).

As duas formas mais usuais para determinar os fluxos de variáveis de qualidade de água em rios são a multiplicação entre concentração e vazão média, ou através do estabelecimento de relações funcionais concentração-vazão (Larentis, 2004; Hobbie e Likens, 1973; Edward et al. 1984). Correlações positivas entre a vazão e as concentrações de DOC e POC de corpos de água já foram observadas e podem ser explicada, em parte, pela lavagem do solo, em especial, após eventos de chuva (Evans et al., 2005; Hinton et al., 1997, 1998). O transporte de matéria particulada sobre o solo exige uma maior quantidade de energia (em relação à matéria dissolvida), portanto a relação entre a vazão do carbono na forma particulada deve ser um tanto mais complexa do que na forma dissolvida.

Considerando a carência de estudos que abordam o ciclo do carbono e a quantificação de fluxos com enfoque integrado de hidrologia e limnologia, na escala de bacia hidrográfica no Brasil, a estimativa da exportação fluvial de carbono contribui para o posicionamento dos corpos d'águas nacionais acerca da magnitude dos fluxos de carbono em relação aos demais.

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Este capítulo apresenta a descrição das bacias hidrográficas cujos dados foram utilizados para o desenvolvimento desse estudo e também traz informações relativas ao monitoramento hidrológico e de variáveis físico-químicas.

3.1 DESCRIÇÃO GERAL

O estudo de quantificação dos fluxos de carbono orgânico e inorgânico foi realizado nas bacias hidrográficas do Taboão (84 km²) e Turcato (19 km²), embutidas na bacia do rio Potiribu, afluente da margem esquerda do Rio Ijuí que é contribuinte da bacia do rio Uruguai, no planalto meridional gaúcho. Considerando a disponibilidade de dados hidrológicos, as características das ferramentas de simulação aplicadas e desenvolvidas nesse estudo, e a similaridade entre as bacias hidrográficas da região, considerar a bacia do rio Ijuí contribui para a avaliação de efeitos de escala e espacialização de comportamentos do sistema, tanto do ponto de vista hidrológico, quanto na dinâmica de carbono.

3.1.1 Bacia hidrográfica do rio Ijuí

A bacia hidrográfica do rio Ijuí está localizada na região norte-noroeste do estado do Rio Grande do Sul, entre as coordenadas geográficas 28° 00' a 29° 05' de latitude Sul e 53° 11' a 55° 21' (Figura 2.2). O rio possui suas nascentes no planalto meridional gaúcho e segue sentido leste-oeste até desaguar na margem esquerda do Rio Uruguai drenando uma área de 10.703 km². Os principais cursos de água são os rio Potiribu, Conceição, Ijuizinho e o Rio Ijuí.

A bacia possui uma população estimada de 341.569 habitantes, distribuída em 20 municípios tais como Ijuí, Santo Ângelo, Tupanciretã e Cruz Alta que consiste o divisor entre as bacias do Ijuí e do Jacuí. A grande parte das atividades econômicas desta bacia está ligada ao setor primário, predominando as lavouras de soja (SEMA-RS, 2000). A vegetação primitiva consiste em Mata Atlântica e a Mata Araucária encontradas principalmente nas galerias, uma vez que esta região é caracterizada por uma agricultura intensiva com dois ciclos de cultura por ano: soja e milho no verão e aveia e trigo no inverno (Silva Júnior et al.

2003).

Os principais usos da água se destinam à irrigação e ao abastecimento público, além da geração de energia em pequenas centrais hidrelétricas (PCHs). De acordo com (Cruz e Vilella, 20??) a sub-bacia do rio Ijuí é favorável à instalação de aproveitamento hidrelétricos, basicamente em função da degradação dos ambientes do entorno e do grande número de barramentos já instalados. Atualmente existem 53 barragens de geração de energia na bacia (FEPAM, 2011) e a tendência é que nos próximos anos o número de aproveitamentos aumente, portanto a simulação hidrológica desta bacia pode subsidiar futuros trabalhos.

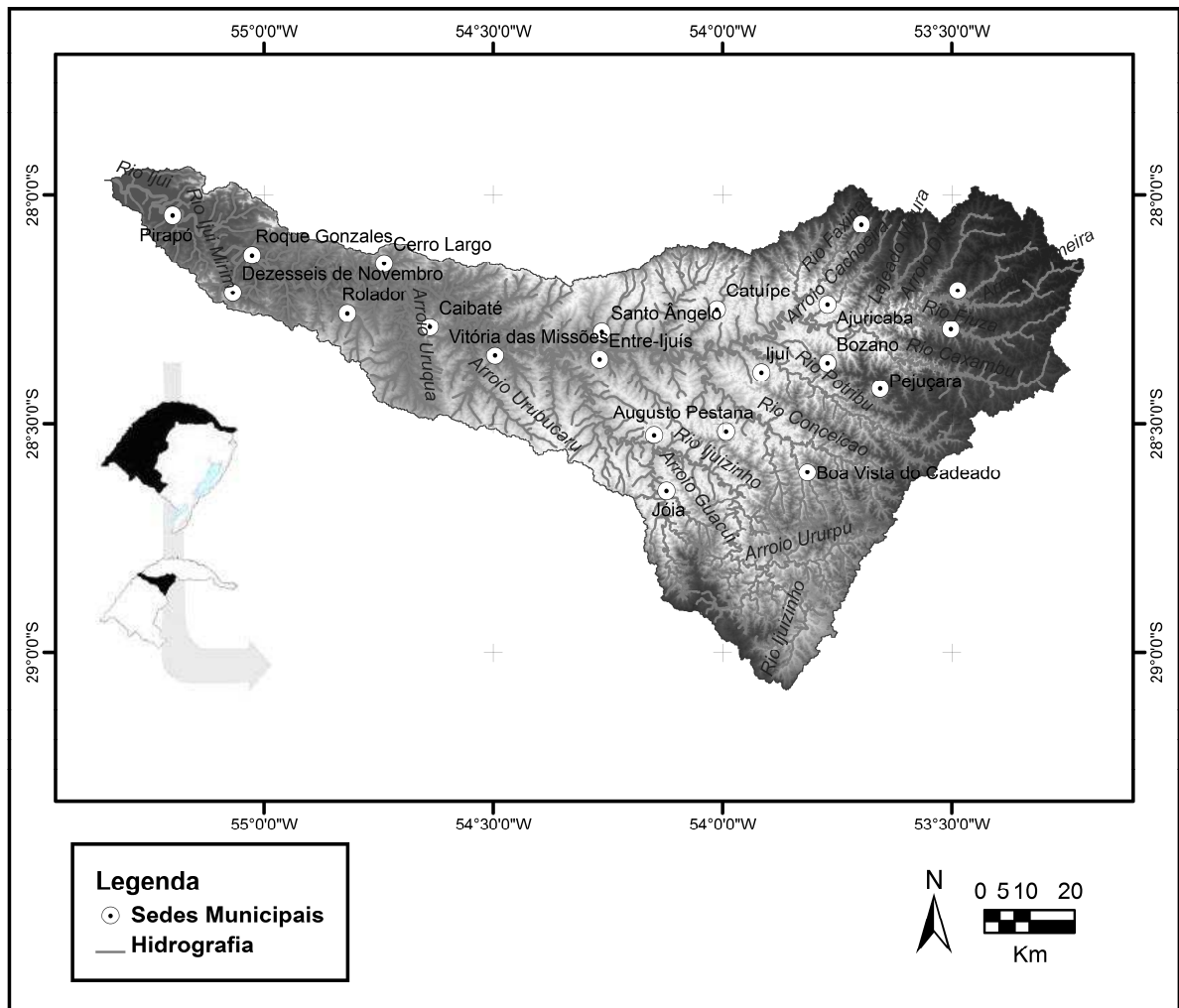


Figura 3.1 Bacia hidrográfica do rio Ijuí e principais afluentes

A bacia do Ijuí encontra-se sobre o planalto médio gaúcho com altitudes entre 420 e 700 m. O relevo é composto de colinas em regiões de campos com declividades suaves que variam entre 3 e 15%. Esse planalto é situado sobre a rocha basáltica formada por sucessivas camadas vulcânicas datadas de 120 milhões de anos que foram se acumulando. Entre essas

camadas, foram sendo depositadas camadas de arenito Botucatu que variam de alguns metros de profundidade até uma centena de metros (Leinz, 1949, IBGE, 1986, apud Silva Júnior et al. 2003) onde a água pode se acumular e escoar horizontalmente. Tal formação constitui a Serra Geral (Geologia do Brasil, 1984 apud Silva Júnior et al. 2003). Sobre este planalto, os solos são bastante úmidos graças ao regime abundante de precipitações e constitui solos bem desenvolvidos e profundos, podendo atingir até mais de 15 m.

A maior parte do solo da região é classificada como latossolos roxos, latossolos vermelho-escuros e terras roxas estruturadas. Apesar de ser um solo argiloso (mais de 60% de argila), ele apresenta uma forte drenagem devido aos microagregados formados em todo o perfil resultando em maior macro-porosidade (Castro, 1996 Borges e Bordas 1988, 1990 apud Silva Júnior et al. 2003). De acordo com o mapa exploratório de solos do RS (IBGE, 2002) a bacia hidrográfica do Ijuí apresenta três grandes grupos de solo: latossolos, terra roxa e solos litólicos (neossolos litólicos) (Figura 3.2). Os latossolos aparecem em roxo, a terra roxa em rosa escuro, e solos rasos em verde-marinho.

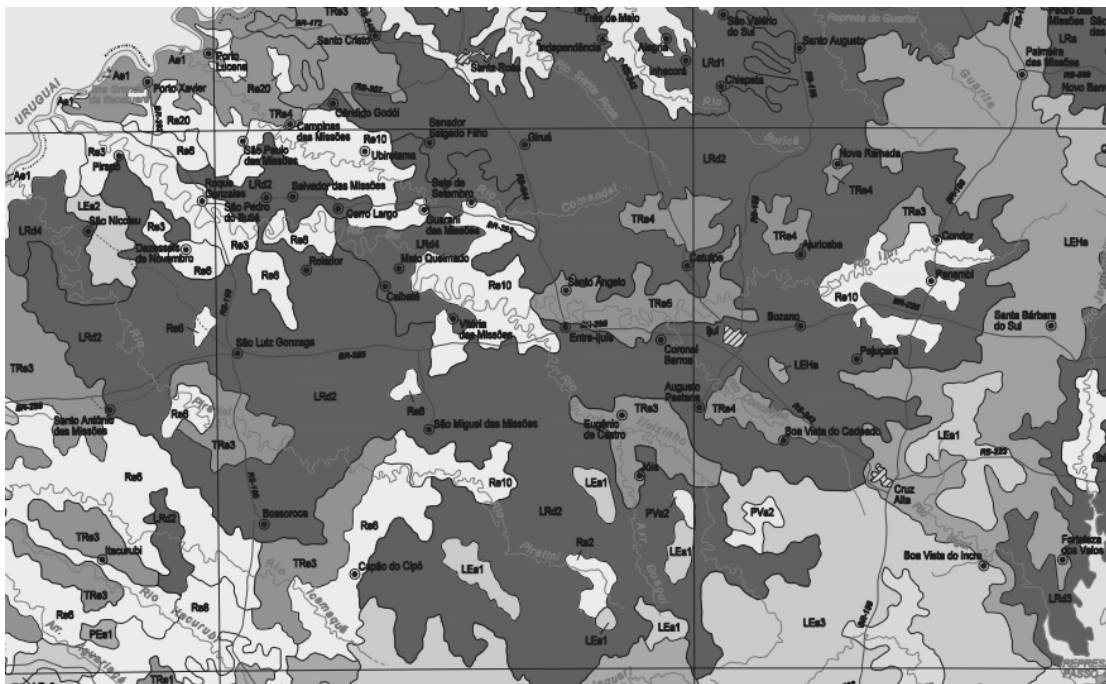


Figura 3.2 Mapa exploratório de solos da região do Ijuí

Fonte: IBGE (2002)

O regime de precipitações é homogêneo durante todo o ano, apresentando chuvas mensais entre 120 e 150 mm, com um total anual médio de 1750 mm (Chevallier e Castro, 1991). A variabilidade espacial e temporal da precipitação na bacia pode ser visualizada na Figura 3.3 que apresenta as médias mensais em cinco postos da região.

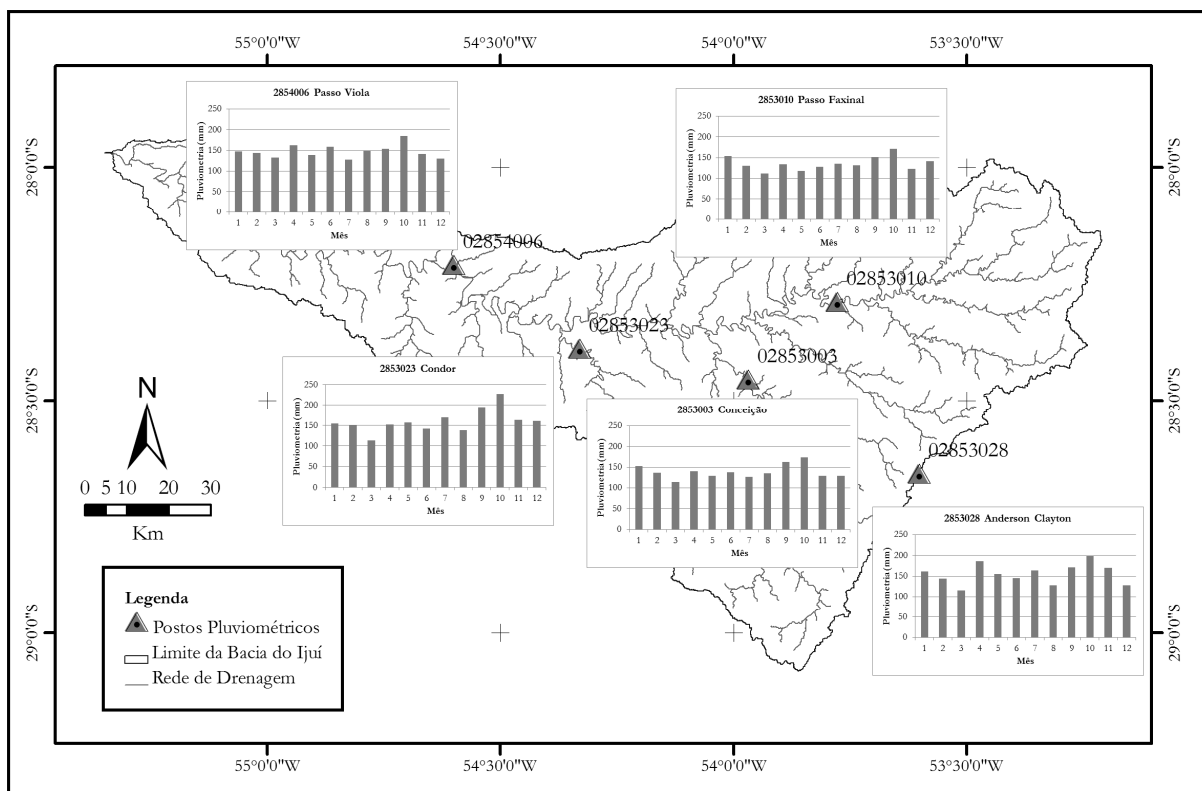


Figura 3.3 Distribuição espacial e temporal da chuva na bacia hidrográfica do Ijuí.

3.1.2 Bacia hidrográfica do rio Potiribu, Taboão e Turcato

O rio Potiribu é contribuinte da margem esquerda do rio Ijuí. A bacia hidrográfica do rio Potiribu drena uma área de aproximadamente 660 km² e, da mesma forma que a bacia do Ijuí, o uso e ocupação do solo são dedicados às atividades agrícolas, apresentando matas de galeria e alguns remanescentes. A bacia pode ser considerada como representativa da região do planalto basáltico sul-americano, uma região que se estende por 230.000 km² e que inclui quase toda a bacia do rio Uruguai (Borges e Bordas 1988, 1990 apud Silva Júnior et al. 2003).

A área de estudo possui três sub-bacias embutidas, a saber, Taboão (84 km²), Turcato (19 km²) e Donato (0,2 km²) monitoradas desde 1989 dentro dos estudos do Projeto Potiribu (Castro et al., 2000) e, recentemente, MATASUL e CLIMASUL (Castro et al. 2010) representadas na Figura 3.4.

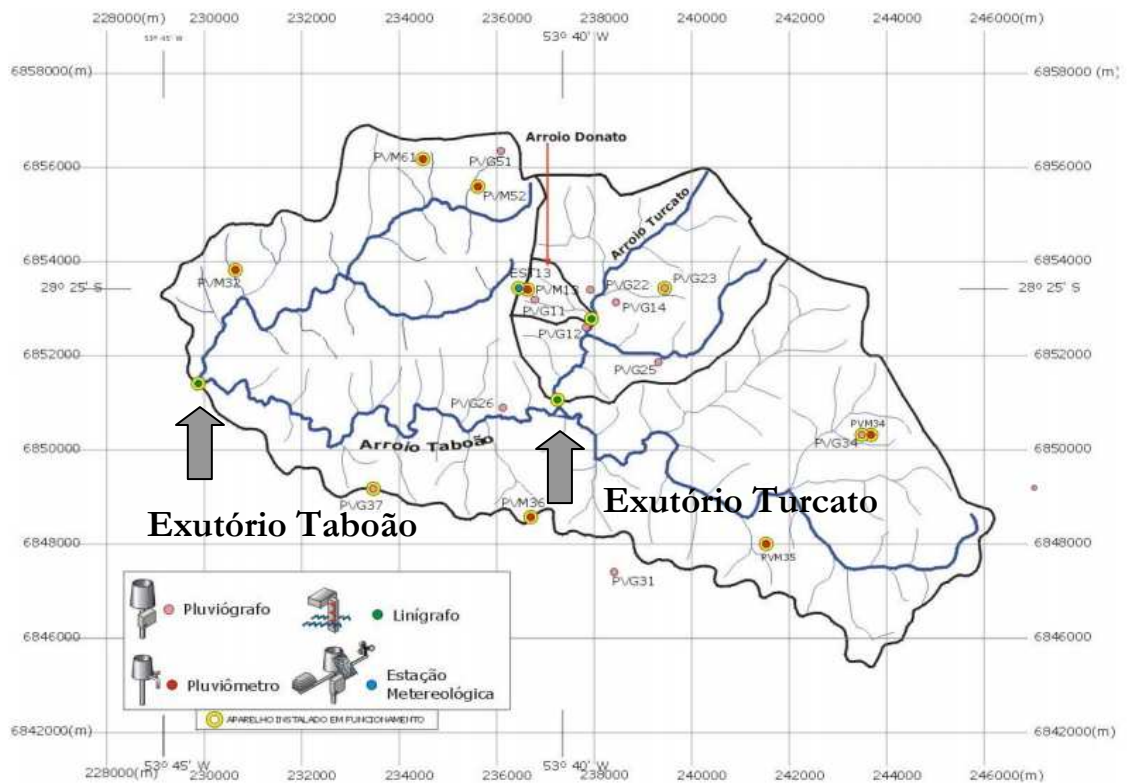


Figura 3.4 Sub-bacias do Taboão e Turcato e pontos de monitoramento na região

Fonte: Castro et al. (2010)

3.2 MONITORAMENTO HIDROLÓGICO

Neste estudo foram utilizados dados hidrológicos e climáticos da bacia hidrográfica do rio Ijuí, sub-bacia 75, conforme o cadastro do banco de dados da Agência Nacional das Águas (ANA), obtidas pelo Hidroweb conforme as tabelas do ANEXO A e Figura 3.5.

Para as bacias embutidas do Potiribu foram utilizados dados adicionais, resultado do monitoramento de pluviômetros e pluviógrafos de responsabilidade do IPH, descritos na Tabela 3.1, apresentados nas Figura 3.4 e 3.5.

Tabela 3.1 Descrição dos pluviômetros (PM) e pluviógrafos (PG) da sub-bacias embutidas do Potiribu.

| Código | Nome | Longitude (O) | Latitude (S) |
|--------|-----------------|---------------|--------------|
| PM 13 | Alto Donato | 53°41'14'' | 28°25'06'' |
| PM 21 | Pejuçara Norte | 53°38'57'' | 28°24'11'' |
| PM 24 | Turcato Central | 53°40'17'' | 28°24'55'' |
| PM 32 | Tincão do Jesus | 53°44'34'' | 28°24'52'' |
| PM 34 | Alto Taboão | 53°27'10'' | 28°26'53'' |

| Código | Nome | Longitude (O) | Latitude (S) |
|--------|-------------------------|---------------|--------------|
| PM 35 | Velha Estrada Cruz Alta | 53°38'19'' | 28°27'46'' |
| PM 36 | Granja das Castanheiras | 53°38'19'' | 28°27'49'' |
| PM 52 | Baixa Divisa | 53°41'55'' | 28°24'08'' |
| PM 61 | Santa Lúcia | 53°37'13'' | 28°26'55'' |
| PM 62 | Granja Santa Catarina | 53°43'37'' | 28°25'04'' |
| PVG 11 | Donato Central | 53°41'13'' | 28°25'15'' |
| PVG 12 | Baixo Donato | 53°40'35'' | 28°25'35'' |
| PVG 14 | Baixo Donato | 53°40'31'' | 28°25'09'' |
| PVG 22 | Alto Turcato | 53°39'53'' | 28°24'02'' |
| PVG 23 | Pejuçara Cidade | 53°39'14'' | 28°25'05'' |
| PVG 25 | Pejuçara Leste | 53°39'41'' | 28°26'00'' |
| PVG 26 | Baixo Turcato | 53°41'39'' | 28°26'00'' |
| PVG 51 | Euzébio | 53°42'55'' | 28°26'54'' |
| PVG 37 | Foz Taboão Castanheira | 53°39'19'' | 28°26'40'' |
| PVG 31 | Fazenda três irmãos | 53°41'39'' | 28°26'29'' |

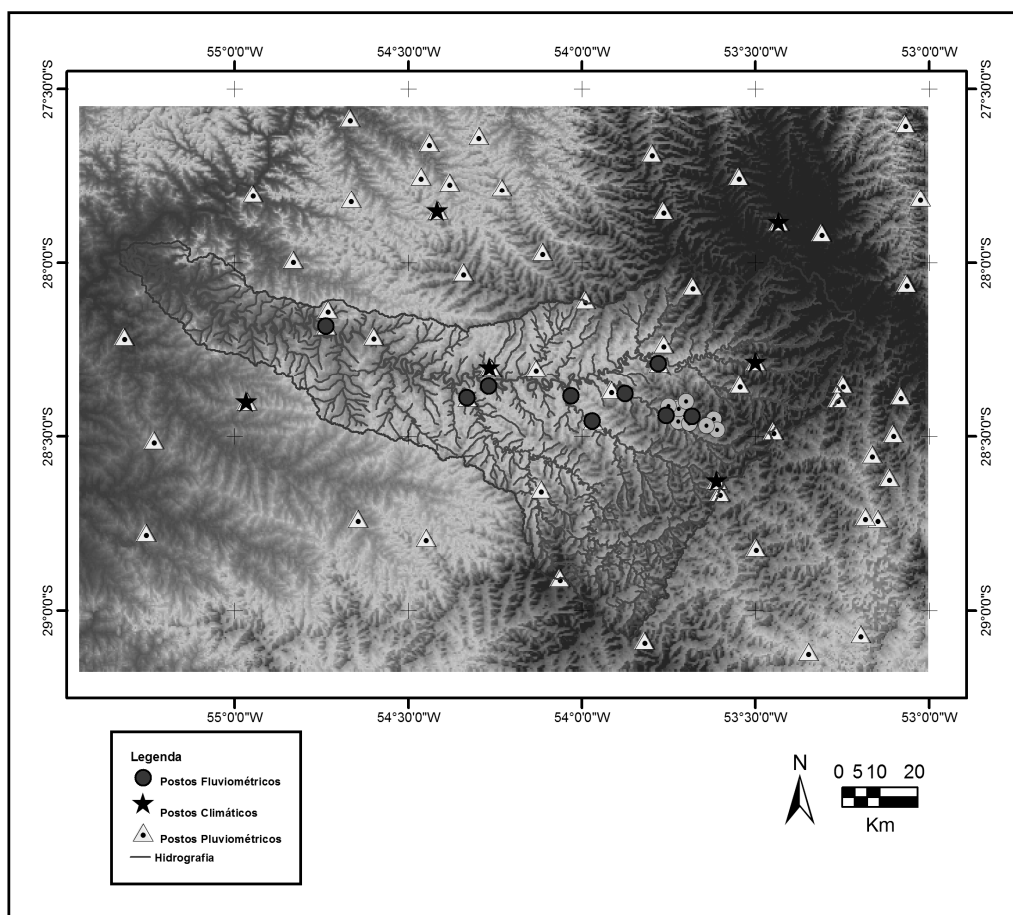


Figura 3.5 Estações de monitoramento hidrológico no Ijuí

3.3 MONITORAMENTO DE VARIÁVEIS FÍSICO-QUÍMICAS DA ÁGUA

Nesse estudo foram utilizados da base de dados físico-químicos relativos ao monitoramento mensal da qualidade de água do rio Potiribu, em Taboão e Turcato, que consiste numa série histórica que vai de agosto de 2007 a dezembro de 2009, obtida com recursos do FINEP dentro do escopo do projeto MATASUL (Castro et al., 2010).

Para o período citado existe no banco de dados as variáveis: alcalinidade, nitrogênio total kjedahl (NTK), nitrogênio amoniacal, nitrato, pH, cor, turbidez, condutividade, fósforo total, ortofosfatos, clorofila-a, absorvância do ultra-violeta (254nm, 340nm, UV365nm, UV430nm, UV440nm), sólidos totais e frações (suspensos e flutuantes, fixas e voláteis), cálcio, magnésio, sódio, potássio, ferro, alumínio, carbono total, carbono inorgânico, carbono orgânico, clorofila-b, clorofila-c e feofitina.

Considerando o conjunto formado pelos pontos de amostragem das sub-bacias do Turcato e Taboão, existem 48 amostras de carbono.

4 SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA

Este capítulo descreve o modelo hidrológico MGB-IPH utilizado para simular os processos hidrológicos na bacia hidrográfica do rio Ijuí e nas bacias embutidas do rio Potiribu e os critérios para avaliação de eficiência do mesmo.

Segue abaixo a descrição das etapas para a aplicação do modelo na área de estudo: consolidação de banco de dados, pré-processamento, calibração e validação. A discretização espacial da bacia, a extração de informações topológicas e mapeamento do uso do solo foram realizados utilizando geoprocessamento e classificação de imagens de satélite.

Os parâmetros do modelo chuva-vazão foram calibrados para a área de estudo utilizando funções de eficiência que comparam os valores simulados aos valores observados em diversos pontos de controle da bacia hidrográfica. Foram utilizados métodos de calibração manual e por otimização utilizando algoritmo de calibração multi-objetivo.

4.1 MODELO HIDROLÓGICO DISTRIBUÍDO – MGB-IPH

O Modelo de Grandes Bacias é uma ferramenta de simulação hidrológica baseada em processos (ou de base conceitual física) que realiza a transformação chuva/vazão considerando a heterogeneidade espacial desenvolvido para bacias de grande porte (maiores que 10.000 km²). O modelo é distribuído no espaço, ou seja, a bacia hidrográfica é dividida em unidades menores. O sistema de discretização atual, em mini-bacias, permite a aplicação do modelo em bacias com diferentes resoluções espaciais. Seu campo de aplicação na área de recursos hídricos é vasto podendo ser utilizado em estudos de disponibilidade hídrica, previsão de vazões, bem como impactos de ações antrópicas sobre a quantidade e qualidade de água, entre outros. O modelo MGB-IPH possui descrições detalhadas em diversas publicações (e.g. Collischonn, 2001; Collischonn e Tucci, 2001; Collischonn et al., 2007b; Paiva, 2009)

Para aplicação do MGB é necessário consolidar um banco de dados com séries temporais de precipitação, vazão e clima (velocidade do vento, insolação, pressão, umidade relativa do ar), seções transversais de rios, informações topográficas (ex. comprimentos de rio, declividades, áreas) e topológicas (ex. caminhos de água, ordem dos rios) extraídas de modelos digitais de elevação (MDEs) utilizando técnicas de geoprocessamento, bem como

informações sobre o tipo, uso e ocupação do solo e cobertura vegetal, através de imagens de satélite e/ou mapas. As variáveis climáticas de precipitação, temperatura, umidade relativa, insolação, velocidade do vento e pressão atmosférica em uma célula são obtidas por interpolação dos postos com dados mais próximos. Normalmente a função de interpolação utilizada é baseada na ponderação pelo inverso da distância ao quadrado (Paiva, 2009).

O modelo MGB simula os seguintes processos: balanço vertical de água no solo; geração de escoamento nas bacias; amortecimento e retardo de escoamento nas bacias por reservatórios lineares; propagação em rios e planícies de inundação; armazenamento e propagação em reservatórios de água.

O MGB considera a heterogeneidade espacial dentro das mini-bacias (ou células) para a geração de escoamento. O balanço vertical é realizado com base em unidades de resposta hidrológica (URHs) ou Grouped Response Units (GRU) que são classes caracterizadas de acordo com a homogeneidade do comportamento hidrológico (Paiva, 2009). Essas classes são definidas por um conjunto de fatores locais como cobertura vegetal e tipo do solo, extraídas de mapas e imagens de satélite e permite levar em conta a variabilidade das características físicas da bacia no interior de cada mini-bacia.

O balanço vertical é realizado considerando os processos de interceptação, evapotranspiração, armazenamento no solo, trocas com o aquífero e geração de escoamento superficial, sub-superficial e subterrâneo (Figura 4.1). A evaporação e a transpiração são estimadas pela equação de Penman–Monteith. Seguindo a metodologia utilizada em diversos modelos, tais como VIC-2L (Wigmosta et al. 1994 apud Collischonn, 2001) e LARSIM (Bremicker, 1998), a interceptação depende da cobertura do solo, expressa pelo índice de área foliar da vegetação.

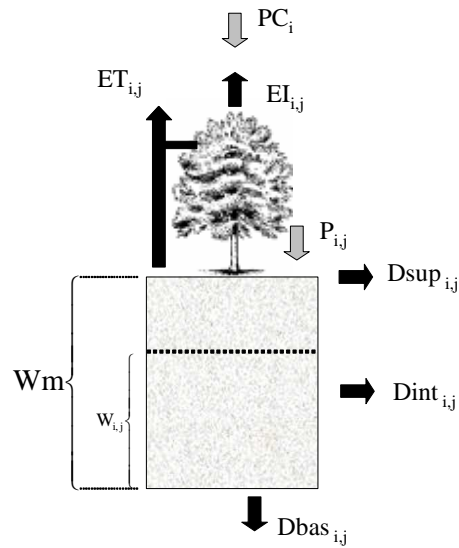


Figura 4.1 Balanço vertical de água no solo para uma URH do modelo MGB-IPH

Fonte: Paiva (2009)

O escoamento superficial (rápido), sub-superficial (lento) e subterrâneo (muito lento) (D_{sup} , D_{int} e D_{bas} , respectivamente) na bacia dependem do estado de armazenamento de água do solo (W). O escoamento superficial é gerado a partir da saturação do solo, somente em eventos de chuva.

Realizado o balanço vertical nos blocos hidrológicos da mini-bacia, os volumes de água que contribuem para o escoamento são propagados considerando o modelo de reservatório linear. Neste ponto, as contribuições de cada URH são integradas. A Figura 4.2 demonstra o esquema de balanço para dois blocos de uma mini-bacia, tal que os volumes de água resultantes são armazenados nos três reservatórios lineares.

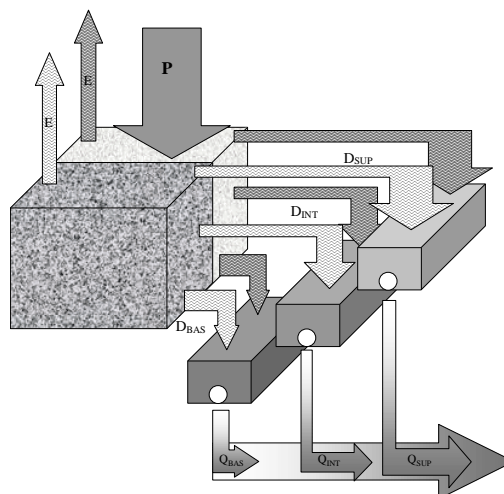


Figura 4.2 Esquema de balanço nas URHs e propagação em reservatórios lineares

Fonte: Collischonn (2001)

A contribuição da bacia para o escoamento dos canais é obtido pela vazão do modelo de reservatório linear. Na rede de drenagem, o escoamento pode ser propagado pelo método de Muskingum-Cunge linear ou não linear (Tucci, 2005) ou utilizando o modelo hidrodinâmico representado pelas equações de Saint-Venant (Paiva, 2009). A Figura 4.3 demonstra a integração dos três processos: balanço vertical, reservatórios lineares e trecho de rio.

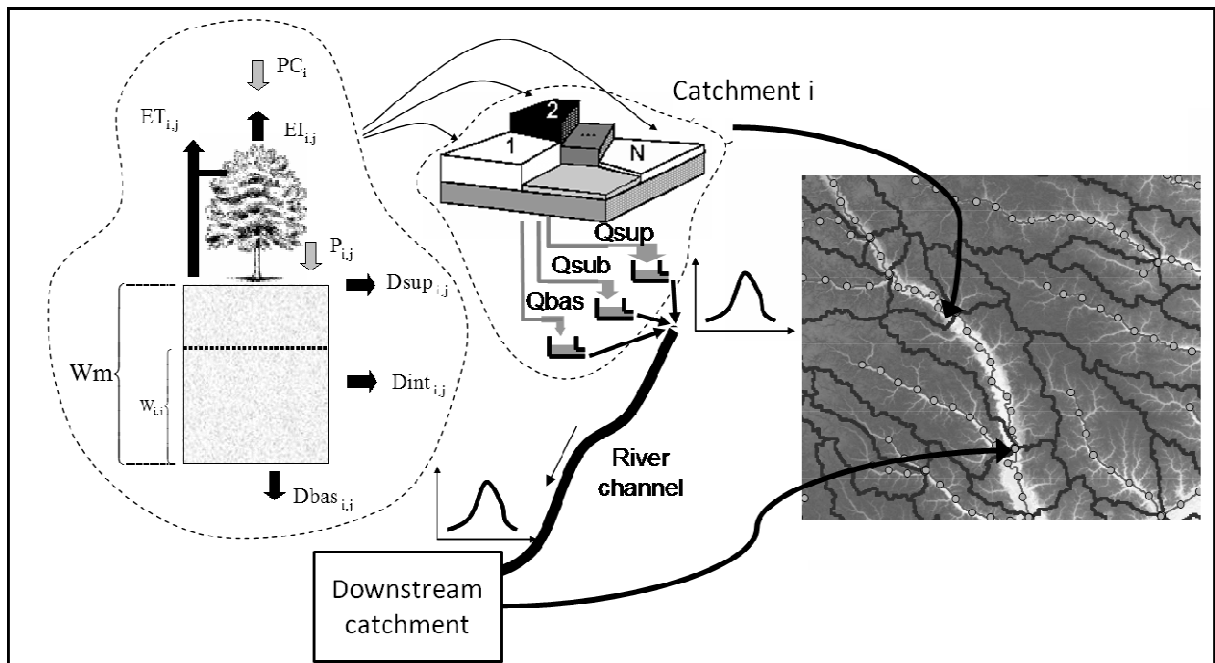


Figura 4.3 Esquema geral dos caminhos de água simulados no modelo MGB-IPH

Fonte: Paiva (2009)

4.1.1 Intercepção

A intercepção é o processo de retenção da água da chuva na vegetação antes que atinja o solo. No modelo MGB-IPH a intercepção é considerada dependente da cobertura do solo, expressa pelo índice de área foliar (IAF) da vegetação. O IAF representa a razão da área de todas as folhas de um determinado tipo de planta sobre a área que ela ocupa, ou seja, um indicador de densidade foliar. Dessa forma, é esperado que uma floresta apresente IAF maior do que um pasto aberto. Valores típicos vão de 1,0 ou menos para vegetação rasteira, até 6,0 ou mais para florestas. Em regiões com cultivos anuais é possível e desejável que as variações no IAF sejam representadas no modelo. Para considerar os efeitos de mudança de cobertura decorrentes do ciclo de plantio na bacia do Ijuí, os valores de IAF atribuídos variam mensalmente ao longo do ano.

A interceptação é representada por um reservatório que armazena a precipitação até um limite máximo definido para cada URH, de acordo com o IAF, sendo a capacidade máxima definida pela equação Equação 4.1:

$$S_{\max_j} = \alpha \cdot LAI_{j,m}$$

Equação 4.1

sendo S_{\max_j} é a capacidade máxima de interceptação em um intervalo de tempo para a URH j e α é um parâmetro que tem o valor fixo e igual a 0,2 mm, (Bremicker, 1998).

A simulação do enchimento e esvaziamento do reservatório de interceptação é realizada em passo de tempo diário. Inicialmente o reservatório de interceptação recebe a água da chuva e seu volume é atualizado. Apenas a chuva em excesso é que atinge o solo. Imediatamente depois, é calculada a evaporação e retirada a água evaporada do reservatório de interceptação. O conjunto de equações abaixo representa matematicamente este processo.

$$S_{i,j}^{k+1/2} = S_{i,j}^k + PC_i \text{ sujeito a } S_{i,j}^{k+1/2} \leq S_{\max_j}$$

Equação 4.2

$$P_i = PC_i - (S_{i,j}^{k+1/2} - S_{i,j}^k)$$

$$S_{i,j}^{k+1} = S_{i,j}^{k+1/2} - EI_{i,j} \text{ sendo } EI_{i,j} = \min(EIP_{i,j}; S_{i,j}^{k+1/2})$$

sendo $S_{i,j}$ é o a lâmina de água interceptada, PC_i é a precipitação no topo do dossel de vegetação; P_i é a precipitação que atinge o solo; $EI_{i,j}$ é a evaporação real da lâmina interceptada; $EIP_{i,j}$ é a evaporação potencial da lâmina interceptada, e os índices k , e $k+1$ indicam início e fim do passo de tempo, e $k+1/2$ indica um momento intermediário, ao longo do passo de tempo. A evaporação potencial é calculada pela equação de Penman-Monteith com o parâmetro resistência superficial igual a zero.

4.1.2 Balanço de Água no Solo

O balanço de água no solo é calculado para cada unidade de resposta hidrológica (URH) de cada mini-bacia de forma independente. Somente a parcela da chuva que não é retida por interceptação, deduzida anteriormente, é contabilizada. A equação de balanço de água no solo é:

$$W_{i,j}^k = W_{i,j}^{k-1} + (P_i - ET_{i,j} - D_{\text{sup}_{i,j}} - D_{\text{int}_{i,j}} - D_{\text{bas}_{i,j}}) \cdot \Delta t$$

Equação 4.3

sendo k , i e j são índices relacionados ao intervalo de tempo (k), à mini-bacia (i) e à URH (j); Δt é o passo de tempo; $W_{i,j}$ [mm] é a quantidade de água armazenada no solo no tempo k , na

URH j da célula i ; P_i é a precipitação efetiva; $ET_{i,j}$ [mm/Δt] é a evapotranspiração a partir do solo; $Dsup_{i,j}$ [mm/Δt] é o escoamento superficial (rápido) que deixa o solo; $Dint_{i,j}$ [mm/Δt] é o escoamento sub-superficial; $Dbas_{i,j}$ [mm/Δt] é a percolação, ou recarga do aquífero.

A evapotranspiração é estimada, para cada URH em cada mini-bacia, através do método de Penman – Monteith (Shuttleworth, 1993), de forma semelhante ao modelo apresentado por Wigmosta et al. (1994), pela Equação 4.4

Equação 4.4

$$e = \left(\frac{\Delta \cdot (R_L - G) + \rho_A \cdot c_p \cdot \frac{(e_s - e_d)}{r_a}}{\Delta + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \right) \cdot \frac{1}{\lambda \cdot \rho_W}$$

sendo e [m.s⁻¹] taxa de evaporação da água; λ [MJ.kg⁻¹] calor latente de vaporização; Δ [kPa.°C⁻¹] taxa de variação da pressão de saturação do vapor; R_L [MJ.m⁻².s⁻¹] radiação líquida na superfície; G [MJ.m⁻².s⁻¹] fluxo de energia para o solo; ρ_A [kg.m⁻³] massa específica do ar; ρ_W [kg.m⁻³] massa específica da água; c_p [MJ.kg⁻¹.°C⁻¹] calor específico do ar úmido; e_s [kPa] pressão de saturação do vapor; e_d [kPa] pressão do vapor; γ [kPa.°C⁻¹] constante psicrométrica; r_s [s.m⁻¹] resistência superficial da vegetação; r_a [s.m⁻¹] resistência aerodinâmica.

A resistência superficial e a altura média da vegetação são parâmetros que agregam características das plantas como a abertura dos estômatos e a rugosidade e influenciam os processos de transferência de umidade e calor entre o solo e o ar circundante. Em condições favoráveis, os valores de resistência superficial são mínimos para uma dada cobertura vegetal. Nestas condições os valores de resistência superficial utilizados no modelo seguem estimativas disponíveis na literatura (Collischonn, 2001). Para cultivos agrícolas admite-se um valor igual a 70 s.m⁻¹, que corresponde, aproximadamente, ao da grama, para cerrado tem sido adotado o valor de 90 s.m⁻¹ e para a água o valor de 0 s.m⁻¹ (Paiva, 2009).

O escoamento superficial é calculado para cada URH de cada mini-bacia por um modelo de geração de escoamento por excesso de capacidade de armazenamento adaptado do modelo Arno (Todini, 1996), de acordo com as equações:

Equação 4.5

$$Dsup_{i,j} = \Delta t \cdot P_i - (Wm_j - W_{i,j}^{k-1}) \quad \text{se } A \leq 0$$

$$Dsup_{i,j} = \Delta t \cdot P_i - (Wm_j - W_{i,j}^{k-1}) + Wm_j \cdot \left[\left(1 - \frac{W_{i,j}^{k-1}}{Wm_j}\right)^{\frac{1}{b_j+1}} - \frac{\Delta t \cdot P_i}{Wm_j \cdot (b_j + 1)} \right]^{b_j+1} \quad \text{se } y > 0$$

onde,

$$y = \left[\left(1 - \frac{W_{i,j}^{k-1}}{Wm_j} \right)^{\frac{1}{b_j+1}} - \frac{\Delta t \cdot P_i}{(b_j + 1) \cdot Wm_j} \right]$$

sendo Wm_j [mm] é um parâmetro do modelo que representa a máxima capacidade de armazenamento do solo para a URH j ; b_j [adimensional] é um parâmetro que define o grau de heterogeneidade da capacidade de armazenamento de água no solo.

A equação acima está baseada no conceito de geração de escoamento por área de contribuição variável. Este método de estimar o escoamento superficial é utilizado em modelos como Arno (Todini, 1996), Xinanjiang (Zhao et al. 1980 apud Collischonn, 2001), VIC (Liang et al., 1994 apud Collischonn, 2001) e LARSIM (Ludwig & Bremicker, 2006).

A drenagem sub-superficial a partir da camada de solo é calculada por uma equação semelhante à equação de Brooks e Corey (Rawls et al., 1993):

Equação 4.6

$$Dint_{i,j} = Kint_j \cdot \left(\frac{W_{i,j} - Wz_j}{Wm_j - Wz_j} \right)^{\left(3 + \frac{2}{\lambda_j} \right)}$$

sendo Wz_j [mm] é um limite mínimo de água armazenada no solo, a partir do qual a drenagem subsuperficial é nula; $Kint_j$ [mm/dt] é um parâmetro que define a drenagem que ocorre quando o solo está saturado; e λ [-] é o índice de porosidade do solo.

A percolação do solo para o lençol freático é calculada por uma equação linear com o armazenamento de água no solo:

Equação 4.7

$$Dbas_{i,j} = Kbas_j \cdot \left(\frac{W_{i,j}^{k-1} - Wc_j}{Wm_j - Wc_j} \right)$$

sendo Wc_j [mm] é o limite mínimo a partir do qual não ocorre percolação; $Kbas_j$ [mm/ Δ] é o parâmetro que define a percolação máxima, quando o solo está saturado.

A hipótese básica do modelo utilizado é que o solo pode ser representado por um número grande de tubos com capacidade de armazenamento de água variável e que o escoamento superficial ocorre quando pelo menos um dos tubos se enche. Tal abordagem permite representar a não-linearidade do processo de geração de escoamento, considerando que à medida que um maior percentual desses tubos atinge a saturação, maior é a probabilidade de ocorrer escoamento superficial (Collischonn, 2001).

4.1.3 Propagação na bacia hidrográfica: reservatórios lineares

Após a realização do balanço vertical, para cada URH, os volumes de escoamento que deixam a camada superior do solo, ou seja, pelos termos $D_{sup_{i,j}}$, $D_{int_{i,j}}$ e $D_{bas_{i,j}}$, definidos anteriormente, não atingem instantaneamente a rede de drenagem, mas sofrem retardo e amortecimento ainda no interior da célula. Estes efeitos são representados pela passagem do escoamento por reservatórios lineares (superficial, sub-superficial e subterrâneo). Neste ponto o escoamento dos diferentes blocos de uso e cobertura vegetal (URHs) são somados e contribuem em conjunto para os reservatórios, conforme:

Equação 4.8

$$V_{sup}^{k'} = V_{sup}^{k'-1} + \Delta t \cdot \left(\sum_{j=1}^{NB} D_{sup_{i,j}} \right)$$

$$V_{int}^{k'} = V_{int}^{k'-1} + \Delta t \cdot \left(\sum_{j=1}^{NB} D_{int_{i,j}} \right)$$

$$V_{bas}^{k'} = V_{bas}^{k'-1} + \Delta t \cdot \left(\sum_{j=1}^{NB} D_{bas_{i,j}} \right)$$

no qual, $V^{k'-1}$ [m^3] são os volumes de cada reservatório linear no início do intervalo de tempo; $V^{k'}$ [m^3] são os volumes de cada reservatório linear após o “enchimento” que é um passo intermediário da propagação na bacia; os somatórios são referentes aos escoamentos de cada bloco hidrológico j , num total de NB URHs existentes na mini-bacia.

Cada um dos reservatórios é representado matematicamente por uma equação de reservatório linear simples conforme:

Equação 4.9

$$Q_{sup_i} = \frac{V_{sup}^{k'}}{TKS_i}$$

$$Q_{int_i} = \frac{V_{int}^{k'}}{TKI_i}$$

$$Q_{bas_i} = \frac{V_{bas}^{k'}}{TKB_i}$$

sendo, Q_{sup} [m^3/s] é a vazão de saída do reservatório superficial; Q_{int} [m^3/s] é a vazão de saída do reservatório sub-superficial; Q_{bas} [m^3/s] é a vazão de saída do reservatório subterrâneo; TKS_i [s], TKI_i [s], TKB_i [s], são os tempos de retardo dos reservatórios superficial, sub-superficial e subterrâneo, respectivamente.

A partir dessas vazões, realiza-se a etapa de “esvaziamento” dos reservatórios lineares

e calcula-se o volume no final do intervalo de tempo por,

Equação 4.10

$$V_{sup}^k = V_{sup}^{k'} - \Delta t \cdot Q_{sup}$$

$$V_{int}^k = V_{int}^{k'} - \Delta t \cdot Q_{int}$$

$$V_{bas}^k = V_{bas}^{k'} - \Delta t \cdot Q_{bas}$$

Onde: V^k [m^3] são os volumes de cada reservatório linear no final do intervalo de tempo. O método de cálculo da propagação da vazão no interior das células apresentado nestas equações é completamente explícito, isto é, a vazão de saída calculada depende apenas da condição do início do intervalo de tempo (k-1), e de um intervalo de tempo intermediário(k').

A vazão de saída da mini-bacia (ou célula) (Q_{cel_i}) é a soma das vazões dos três reservatórios, ou seja, a estimativa da contribuição lateral é expressa na Equação 4.11:

Equação 4.11

$$Q_{cel_i} = Q_{sup_i} + Q_{int_i} + Q_{bas_i}$$

4.1.4 Propagação em canais: método de Muskingum-Cunge

A propagação de vazão nos trechos de rio que não são selecionados para a modelagem hidrodinâmica é realizada utilizando o método de Muskingum-Cunge conforme descrito em Tucci (2005) A descrição do método que segue foi retirada quase que integralmente de Paiva (2009). O método de Muskingum-Cunge relaciona a vazão de saída de um trecho de rio, em um intervalo de tempo qualquer, às vazões de entrada e saída no intervalo de tempo anterior e à vazão de entrada no intervalo atual, pela equação abaixo.

Equação 4.12

$$QR_{i+1}^{t+1} = C_1 \cdot QR_i^t + C_2 \cdot QR_i^{t+1} + C_3 \cdot QR_{i+1}^t$$

Na equação acima $QR_{i+1,t+1}$ [$m^3 \cdot s^{-1}$] é a vazão de saída do trecho de rio no intervalo t+1; $QR_{i+1,t}$ [$m^3 \cdot s^{-1}$] vazão de saída do trecho de rio no intervalo t; $QR_{i,t+1}$ [$m^3 \cdot s^{-1}$] é a vazão de entrada do trecho de rio no intervalo t+1; $QR_{i,t}$ [$m^3 \cdot s^{-1}$] é a vazão de entrada do trecho de rio no intervalo t. Os parâmetros C1, C2 e C3 são estimados com base nos dados de comprimento, declividade, rugosidade e largura média dos trechos de rio.

Os coeficientes C1, C2 e C3 são obtidos pelas equações abaixo.

Equação 4.13

$$C_1 = \frac{2 \cdot K \cdot X + \Delta t}{2 \cdot K \cdot (1 - X) + \Delta t}$$

$$C_2 = \frac{\Delta t - 2 \cdot K \cdot X}{2 \cdot K \cdot (1 - X) + \Delta t}$$

$$C_3 = \frac{2 \cdot K \cdot (1 - X) - \Delta t}{2 \cdot K \cdot (1 - X) + \Delta t}$$

sendo X [-] o parâmetro de espaço; K [s] parâmetro de tempo; Δt [s] o intervalo de tempo de cálculo.

Os parâmetros X e K do modelo Muskingum-Cunge são relacionados às características físicas do trecho de rio pelas equações abaixo (Tucci, 2005)

Equação 4.14

$$X = \frac{1}{2} - \frac{Q_0}{B_0 \cdot S_0 \cdot c_0 \cdot \Delta x}$$

$$K = \frac{\Delta x}{c_0}$$

sendo: X [-] o parâmetro de espaço; K [s] o parâmetro de tempo; dx [m] o comprimento do trecho de rio; Q_0 [m³/s] a vazão de referência para a estimativa dos parâmetros; c_0 [m.s-1] a celeridade cinemática; B_0 [m] a largura do rio; S_0 [-] a declividade do trecho de rio.

A vazão de referência Q_0 e a largura do rio B_0 são estimadas a partir de relações com a área da bacia a montante do trecho de rio. Estas relações são fornecidas como dados de entrada e dependem das características físicas da bacia.

O comprimento do trecho de rio e a declividade são atributos da mini-bacia, que podem ser obtidos a partir da medição em mapas na escala adequada. A celeridade cinemática é obtida pela Equação 4.15

Equação 4.15

$$c_0 = \frac{5}{3} \cdot \frac{Q_0^{0,4} \cdot S_0^{0,3}}{n^{0,6} \cdot B_0^{0,4}}$$

sendo: n o coeficiente de rugosidade de Manning.

O método de Muskingum-Cunge tem precisão próxima a ideal quando se cumpre a Equação 4.16 (Paiva, 2009) que pode ser resolvida iterativamente (e.g. Newton-Raphson) fixando o intervalo de tempo interno, Δt .

Equação 4.16

$$\Delta x \cong 0.5 \cdot c_0 \cdot \Delta t \left[1 + \left(1 + 1.5 \cdot \frac{Q_0}{B \cdot \Delta t \cdot S_0 \cdot c_0^2} \right) \right]$$

4.1.5 Ajuste e Avaliação de Eficiência do Modelo Hidrológico

Para avaliar a eficiência do modelo hidrológico foram utilizadas três medidas de desempenho, baseadas no Índice de Eficiência de Nash e Sutcliffe (Nash e Sutcliffe, 1970) e erro no volume.

Normalmente o ajuste inicial do modelo é realizado de forma manual. Posteriormente, para calibração automática foi utilizado o algoritmo de calibração multi-objetivo MOCOM-UA (*Multi-Objective Complex Evolution*, Yapo et al., 1998) que hierarquiza conjuntos de parâmetros gerados aleatoriamente em um ranking de pareto considerando as melhores respostas para as funções-objetivo que representam as medidas de desempenho.

O Índice de Eficiência de Nash e Sutcliffe (Nash e Sutcliffe, 1970) indica o quanto as predições do modelo são melhores que aquelas de um modelo que prevê simplesmente a média dos dados observados e é dado por:

$$E_{NS} = 1 - \frac{\sum (Q_t^{obs} - Q_t^{calc})^2}{\sum (Q_t^{obs} - \overline{Q^{obs}})^2}$$

Equação 4.17

sendo E_{NS} [adimensional] o Índice de Eficiência de Nash e Sutcliffe, Q_t^{obs} as vazões observadas no intervalo de tempo t , Q_t^{calc} as vazões calculadas no intervalo de tempo t , a média das vazões observadas. Valores de E_{NS} iguais a 1 indicam perfeita concordância entre os dados observados e simulados, enquanto que valores negativos indicam que a média dos dados observados é um melhor preditor que os resultados do modelo. O desempenho do modelo pode ser considerado bom quando E_{NS} supera 0.75, porém é aceitável quando E_{NS} encontra-se entre 0.36 e 0.75 (Gotschalk e Motovilov, 2000 apud Collischonn, 2001).

Uma vez que a estatística E_{NS} não revela erros significativos nas vazões mínimas quando existe uma diferença grande na ordem de grandeza das vazões máximas e mínimas, o Índice de Eficiência de Nash e Sutcliffe do logaritmo das vazões, denotado por E_{NSlog} , pode ser utilizado para avaliar o desempenho do modelo em estiagens.

$$E_{NSlog} = 1 - \frac{\sum (\log Q_t^{obs} - \log Q_t^{calc})^2}{\sum (\log Q_t^{obs} - \overline{\log Q^{obs}})^2}$$

Equação 4.18

sendo $\log Q_t^{obs}$ o logaritmo das vazões observadas no intervalo de tempo t , $\log Q_t^{calc}$ o logaritmo das vazões calculadas no intervalo de tempo t , a média do logaritmo das vazões observadas. a à diferença na ordem de grandeza das vazões máximas e mínimas

O erro no volume total ΔV mede a diferença relativa entre os volumes de água observados e calculados são importantes em estudos de balanço hídrico e de qualidade de água, e é dado por:

$$\Delta V = \frac{\sum Q_t^{\text{calc}} - \sum Q_t^{\text{obs}}}{\sum Q_t^{\text{obs}}}$$

Equação 4.19

4.1.6 Módulo de Qualidade de Água

Existe também um módulo de qualidade de água, IPH-MGBq, para simulação acoplada ao modelo hidrológico MGB-IPH desenvolvido por Larentis (2004) simula processos de aporte de cargas pontuais e difusas na rede de drenagem, considerando concentrações características fixas, por tipo de uso do solo (e.g. pastagem, campos), dependentes da área e população local. Retiradas de água e lançamentos pontuais de esgoto e industriais também podem ser considerados. Processos físico-químicos do solo não são realizados. A Figura 4.4 apresenta a estrutura geral do módulo de qualidade denominado IPH-MGBq que não foi utilizado nesse estudo, porém a abordagem para aplicação de condição de contorno e solução numérica é semelhante.

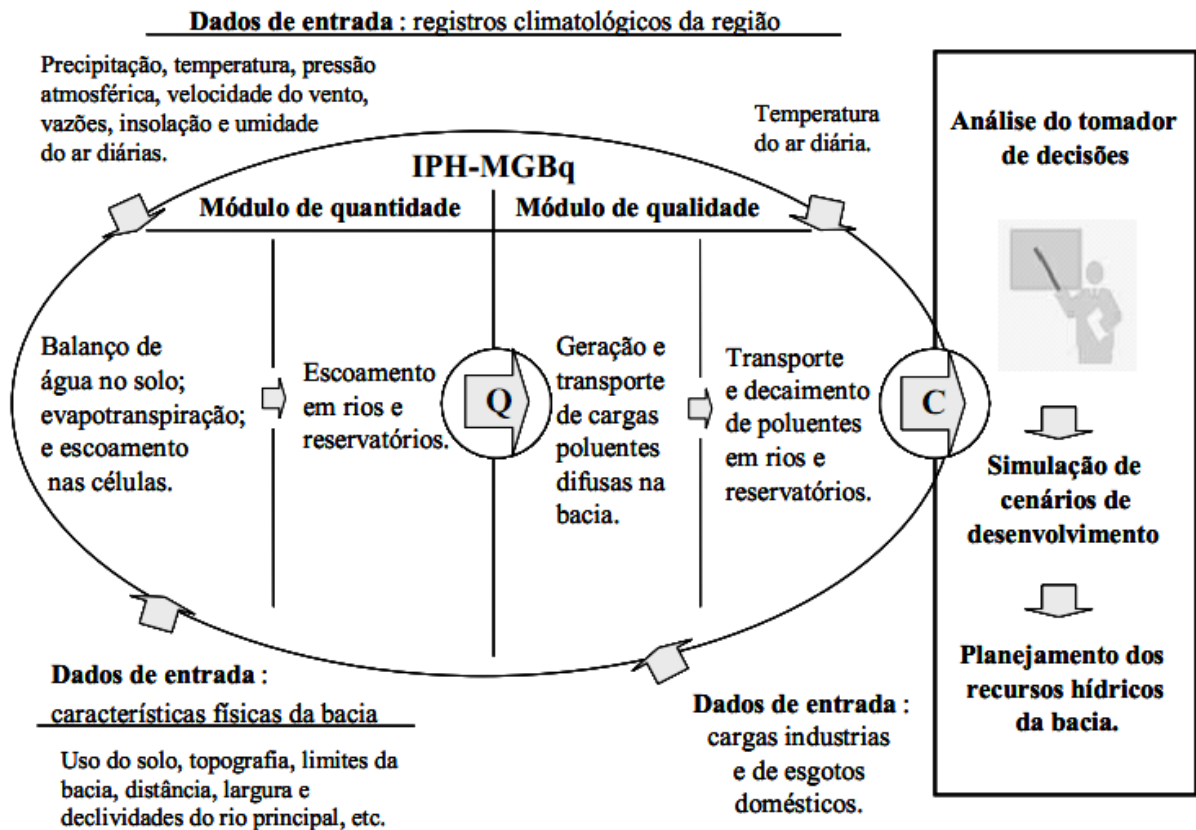


Figura 4.4 Estrutura lógica do módulo de qualidade IPH-MGBq
Fonte: Larentis (2004)

O aporte das cargas, estimadas com base nos coeficientes de exportação e da vazão superficial, na rede de drenagem é realizado pelo modelo de diluição, baseado em balanço de massa conservativo. A Equação 4.20 representa o modelo de diluição de forma generalizada, para um trecho (ou seção) de rio com concentração inicial C_0 e vazão Q_0 , e k trechos que contribuem para este trecho (e.g. contribuição lateral e trechos de montante), com concentração e vazão C_k [mg.L^{-1}] e Q_k , [$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$] respectivamente.

Equação 4.20

$$C_f = \frac{C_0 Q_0 + \sum C_k Q_k}{Q_0 + \sum Q_k}$$

Posteriormente, é a equação de transporte unidimensional Equação 4.21, sem o termo de dispersão longitudinal, é utilizada para propagação de escalares (OD, DBO, fósforo total, nitrogênio e coliformes totais, etc) nos trechos de rio.

Equação 4.21

$$\frac{\partial(AC)}{\partial t} + \frac{\partial(uAC)}{\partial x} = \pm S$$

Onde: A [m^2] é a área da seção; u [$\text{m}.\text{s}^{-1}$] a velocidade média no sentido longitudinal do rio; S [$\text{m}^2.\text{mg.L}^{-1}.\text{s}^{-1}$], são termos de fonte ou sumidouro; e C [mg.L^{-1}], a concentração. Uma

descrição mais detalhada do método de solução da equação pode ser encontrada em Larentis (2004).

Na presença de reservatórios, o volume é calculado com base em regras de operação e as concentrações considerando um modelo de balanço de massa em reator com mistura completa (Larentis, 2004).

4.2 APLICAÇÃO DO MGB-IPH NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO IJUÍ

4.2.1 Discretização Espacial e Pontos de Controle

Para a aplicação do MGB na bacia hidrográfica do Ijuí foram obtidos dados hidrológicos da base de dados Hidroweb da Agência Nacional das Águas (ANA). As estações fluviométricas utilizadas como ponto de controle, bem como a posição dos exutórios das bacia do Taboão, Turcato, Potiribu e Ijuí estão descritos na Tabela 4.1. Para a espacialização da precipitação na bacia, foram utilizados dados das estações da Sub-bacia 75 e das bacias embutidas do Potiribu. Os dados de precipitação e fluviométricos

Tabela 4.1 Estações fluviométricas e pontos de controle exutórios de interesse

| Código | Nome | Latitude(S)/Longitude(O) | Área Drenagem (km ²) |
|----------|---------------------------------|--------------------------|----------------------------------|
| 75155000 | Passo Faxinal | 28.28/53.78 | 2003 |
| 75186000 | Ponte Nova do Potiribu-Jusante | 28.37/53.87 | 629 |
| 75200000 | Conceição | 28.45/53.97 | 805 |
| 75205000 | Ponte Nova Conceição | 28.38/54.03 | 966 |
| 75230000 | Santo Ângelo | 28.35/54.26 | 5414 |
| 75295000 | Colônia Mousquer | 28.39/54.33 | 2131 |
| 75320000 | Ponte Mística | 28.18/54.73 | 9426 |
| * | Turcato | 28.43/53.76 | 19.5 |
| * | Taboão | 28.44/53.68 | 84.0 |
| ** | Exutório –Bacia do Rio Potiribu | 28.32/53.95 | 663 |
| ** | Exutório – Bacia do Rio Ijuí | 27.96/55.33 | 10703 |

* Estações fluviométricas sem código na ANA, operadas pelo IPH.

**Outros pontos de controle de interesse, sem estação fluviométrica

A discretização espacial da bacia (em mini-bacias) foi realizada utilizando ferramentas de delineamento automático de bacias hidrográficas com operações de geoprocessamento sobre o modelo digital de elevação (MDE). Neste estudo foram utilizados MDEs do SRTM (Shuffle Radar Topography Mission), que possuem resolução espacial aproximada de 90m.

Uma vez que a rede de drenagem da região basáltica é bastante densa era esperado o uso de um baixo limiar de área acumulada (da ordem de 0,1-1,0 km²) que representa a área de drenagem mínima necessária para determinar a existência da rede de drenagem. Para evitar a geração de um número elevado de mini-bacias e poupar tempo de processamento na etapa de simulação, foi utilizado o valor arbitrário de 10 km².

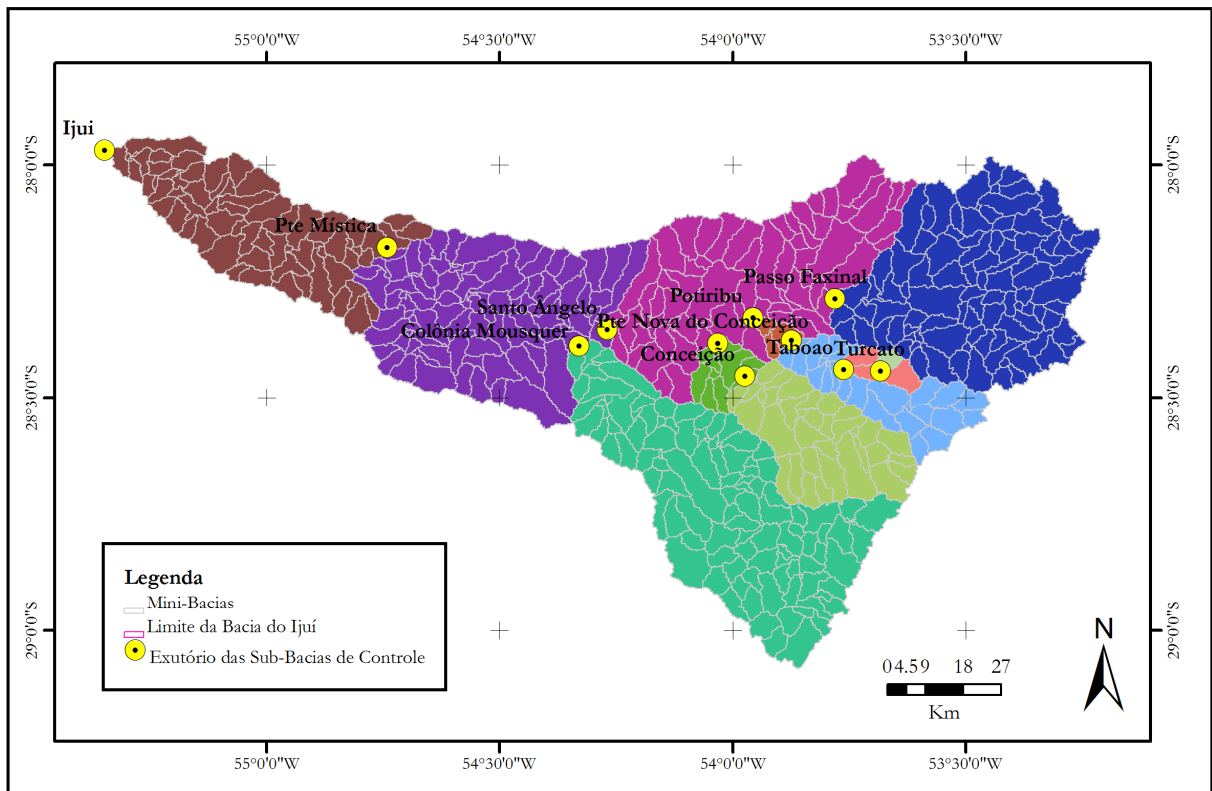


Figura 4.5 Discretização espacial e pontos de controle na Bacia Hidrográfica do rio Ijuí

4.2.2 Mapeamento das Unidades de Resposta Hidrológica

O mapa das unidades de resposta hidrológica foi gerado a partir do cruzamento dos mapas de cobertura obtidos a partir da classificação supervisionada de imagens do satélite e um mapa de solos. Foram utilizadas uma composição de imagens do satélite Landsat 5 TM, nas bandas 5(R)4(G)3(B) (Figura 4.6) e uma classificação simples do mapa de solos do IBGE (2002) que foi digitalizado manualmente Figura 4.7. O georeferenciamento foi realizado a partir de imagens do satélite Landsat 7 ETM+.

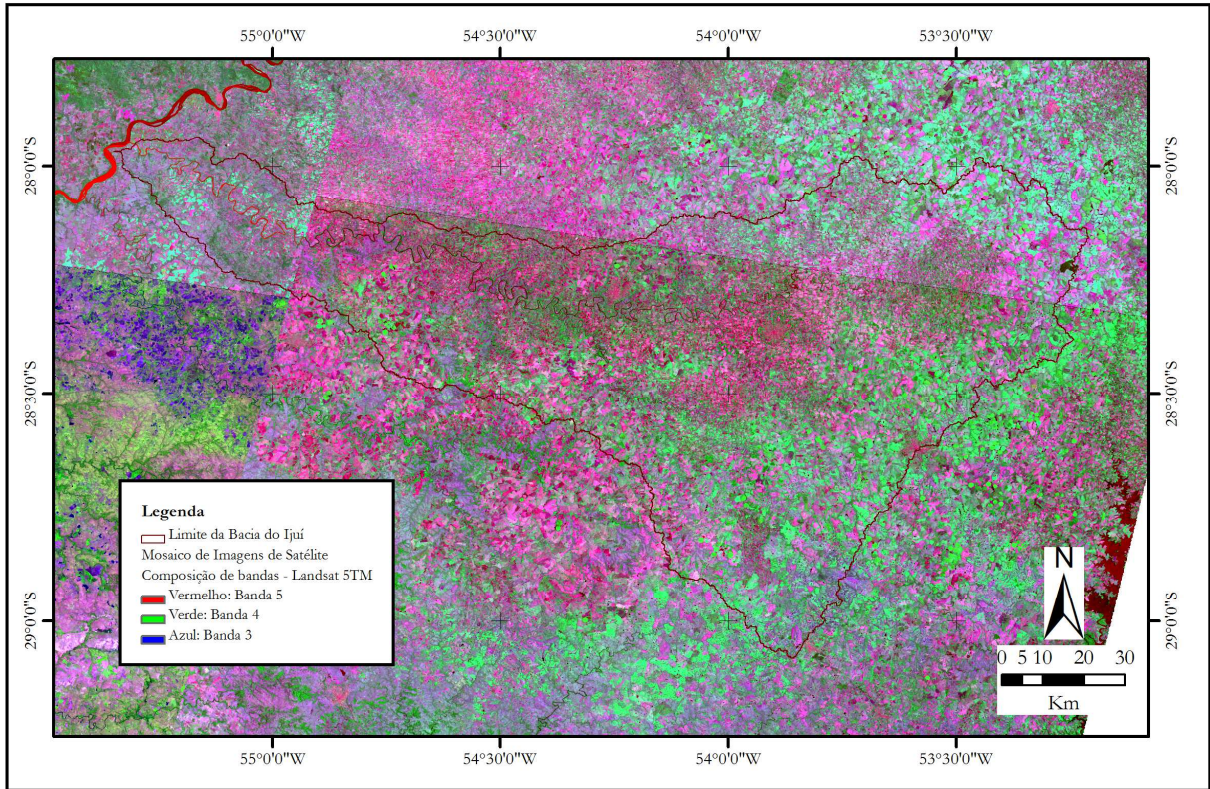


Figura 4.6 Composição de imagens Landsat 5 TM na região da bacia hidrográfica do rio Ijuí

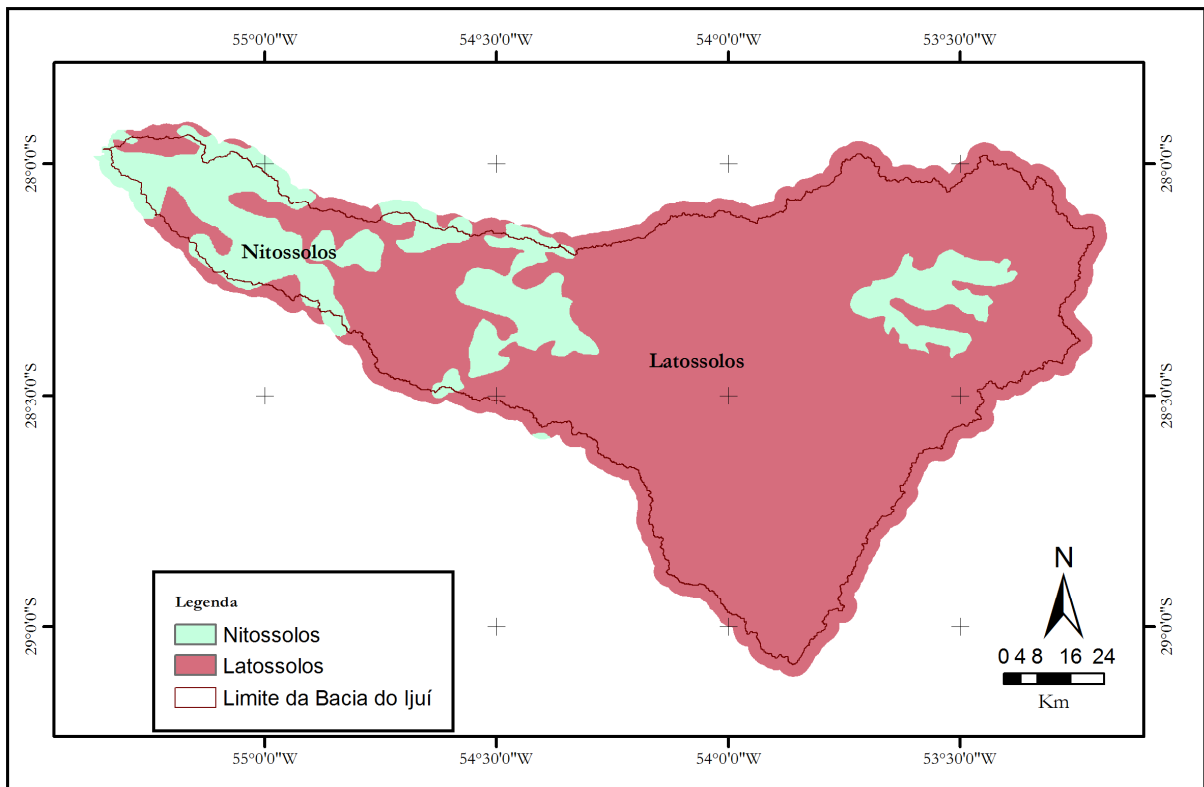


Figura 4.7 Mapa de solos reclassificado para fins de simulação hidrológica na bacia do rio Ijuí

Nesta aplicação foram identificados diferentes tipo de cobertura como água, área urbana e solo exposto, florestas e matas ciliares, campos e áreas agrícolas. As diferenças entre datas das imagens, solos e vegetação com diferentes graus de umidade e densidades dificultaram a classificação. De toda forma, após o cruzamento dos mapas e classificação supervisionada, a bacia hidrográfica do Ijuí foi mapeada em cinco URHs, conforme Tabela 4.2.

Tabela 4.2 Classificação da Bacia hidrográfica do rio Ijuí em URHs

| Número | URH | Área(%) |
|--------|---|---------|
| 1 | Matas em solo raso | 2,6 |
| 2 | Agricultura, campos e pastagem em solo raso | 13,9 |
| 3 | Matas em solo profundo | 7,0 |
| 4 | Agricultura, campos e pastagem em solo profundo | 76,3 |
| 5 | Água | 0,3 |

A Figura 4.8 apresenta o mapa de URHs para a bacia hidrográfica do Ijuí. As URHs da região de solo profundo são apresentadas em tom de laranja a vermelho escuro, representando, respectivamente, as URHs com numeração 3(campos, pastagens e agricultura) e 4 (as matas densas e galerias). A região em tom esverdeado representa os solos rasos, sendo os tons mais escuros, as matas densas e galerias (URH 2), e os tons mais claros os campos (URH 1). A maior parte da região foi classificada como agricultura, campos e pastagem em solos profundos (latossolos e terra roxa). Nota-se também dominância de solos rasos na parte mais baixa da bacia (verde-marinho). A classificação do solo foi realizada com base na profundidade do solo, pois esta propriedade está associada à capacidade de armazenamento de água no solo e ao processo de geração de escoamento superficial no modelo MGB-IPH. Com relação ao tipo de cobertura do solo, as áreas cultivados ou de pastagem, urbanos e expostos foram agrupados em uma única classe.

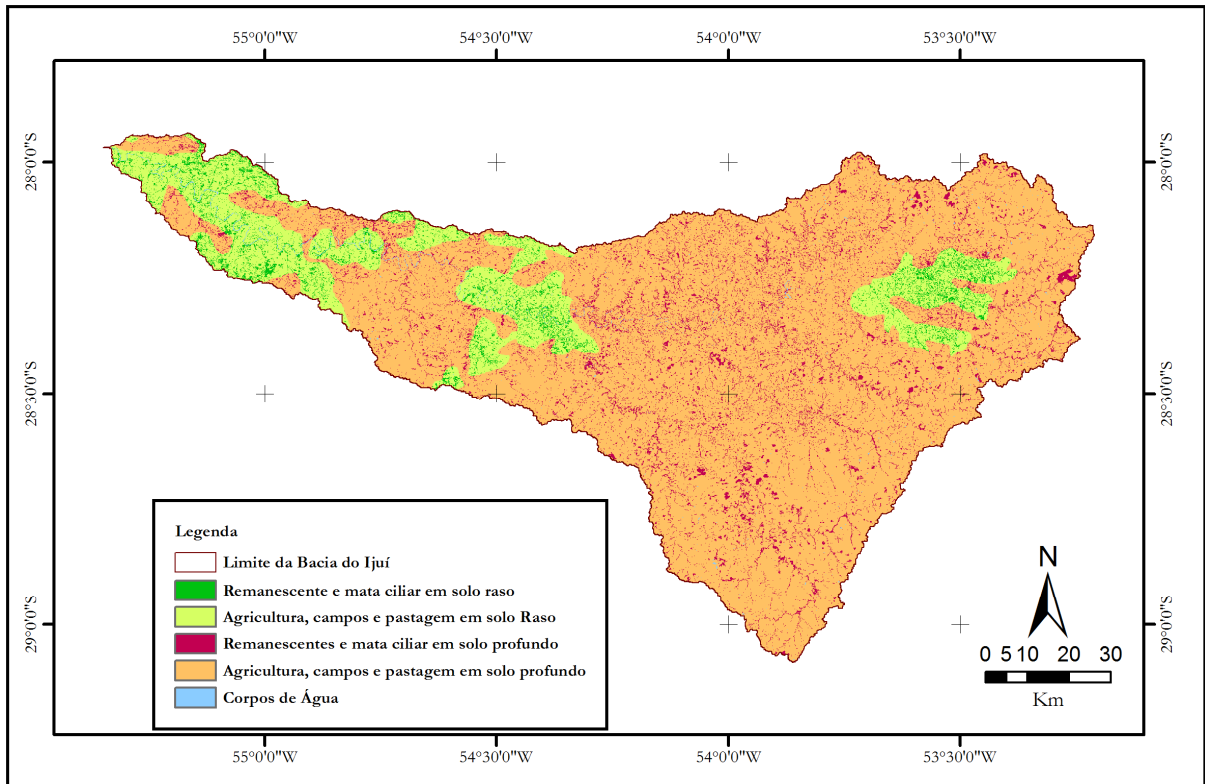


Figura 4.8 Mapa das URHs para a Bacia Hidrográfica do rio Ijuí

O pré-processamento das informações contidas nos mapas (em formato matricial) consistidos anteriormente, a saber, modelo digital de elevação (sem depressões), direção de fluxo, rede de drenagem, mini-bacias, unidades de resposta hidrológicas e sub-bacias é realizado utilizando a extensão desenvolvida para este fim, o PrePro-MGB. Os últimos passos necessários para a aplicação do MGB, ou seja, a interpolação de chuva e cálculo de normais climáticas para o período de interesse (Anexo A), bem como a geração de arquivos de parâmetros fixos e calibráveis foram realizadas diretamente na interface do modelo.

4.2.3 Parâmetros Fixos e Calibráveis

Conforme descrito anteriormente, o conjunto de parâmetros fixos do modelo hidrológico reflete basicamente as informações relativas à cobertura vegetal e uso do solo que influenciam no cálculo da interceptação e evapotranspiração. A Tabela 4.3 resume os valores adotados para os parâmetros fixos, considerando o uso do solo.

Tabela 4.3 Parâmetros fixos do modelo MGB

| URH | Albedo | IAF | Altura da Vegetação | Resistência Superficial |
|-----|--------|-----|---------------------|-------------------------|
| 1 | 0.12 | 6.0 | 6-8 | 99.0 |
| 2 | 0.18 | 3-6 | 0.3-0.6 | 60.0 |
| 3 | 0.12 | 6.0 | 6-8 | 1.0 |
| 4 | 0.18 | 3-6 | 0.3-0.6 | 60.0 |
| 5 | 0.08 | 0.0 | 0.5 | 0.0 |

Os parâmetros calibráveis do modelo hidrológico podem ser separados em dois conjuntos, descritos a seguir. O primeiro conjunto agrega as características do solo e influencia no balanço vertical, ou seja, na geração de escoamento, enquanto o segundo conjunto está associado à propagação do escoamento na bacia.

Inicialmente foi utilizado o conjunto de parâmetros calibráveis apresentados nas Tabelas abaixo para todas as sub-bacias, determinados manualmente, por ajuste visual, a partir de valores de referência em Collischonn (2001).

Tabela 4.4 Parâmetros calibráveis das URHs no ajuste manual

| URH | Wm | b | Kbas | Kint | XL |
|---|-------|------|------|-------|-----|
| Floresta/mata em Solo Raso | 200.0 | 1.00 | 1.00 | 12.00 | 0.4 |
| Agricultura, campos e pastagem em solo raso | 150.0 | 1.00 | 1.00 | 12.00 | 0.4 |
| Floresta/mata em solo profundo | 300.0 | 1.00 | 1.00 | 12.00 | 0.4 |
| Agricultura, campos e pastagem em solo profundo | 250.0 | 1.00 | 1.00 | 12.00 | 0.4 |

O parâmetro Wm representa o armazenamento máximo de água na camada de solo e influencia diretamente o balanço hídrico, pois o volume retido fica disponível para evapotranspiração. O armazenamento depende basicamente das características do solo (e.g. profundidade, porosidade, textura, etc.) e da vegetação (e.g. profundidade das raízes), portanto deve variar para cada URH definida. Espera-se então que Wm seja maior em solos profundos do que em solos rasos e também que em regiões onde a vegetação possui raízes mais profundas Wm também seja maior.

O parâmetro b ajusta a sensibilidade do modelo em relação a geração de escoamento superficial, enquanto os parâmetros Kint e Kbas atuam na drenagem de água por escoamento sub-superficial e subterrâneo. O parâmetro XL (ou λ) é o índice do tamanho dos poros e costuma ser fixado em 0.4, pois a prática mostrou que a resposta do modelo é pouco sensível a este parâmetro. O parâmetro CAP (ou Dcap) representa o fluxo ascendente do aquífero e pode ser utilizado em zonas de recarga, enquanto o parâmetro Wc é utilizado no balanço de água no solo quando considera-se que a água subterrânea pode retornar por fluxo ascendente

para a camada superficial. Ambos foram considerados nulos.

O segundo conjunto de parâmetros está associado à propagação do escoamento na bacia e nos canais. Cs, Ci e Cb são coeficientes de ajuste para os tempos de esvaziamento dos reservatórios lineares (superficial, sub-superficial e subterrâneo) que são utilizados para representar os processos de retardo e o amortecimento do escoamento nas bacias. O parâmetro Cb, que representa o tempo de esvaziamento do reservatório subterrâneo pode ser estimado a partir das recessões observadas. Considerando que as mesmas decaem exponencialmente, utiliza-se a equação $C_b = [ND/\ln(Q_f/Q_i)]$, onde Qi e Qf são as vazões no início e no fim da recessão e ND é o número de dias entre as duas observações. Utilizando este critério, estimou-se Cb em aprox. 1000 h para a bacia. O parâmetro Qb é a vazão de referência específica que é utilizada durante a propagação pelo método Muskingum-Cunge. Pode se estimar Qb pela razão entre a Q_{90} e a área de drenagem do ponto de medição de vazão, que foi da ordem de 0.01 L/s.km^2 . A Tabela 4.5 resume os parâmetros calibráveis adotados inicialmente.

Tabela 4.5 Parâmetros calibráveis gerais no ajuste manual

| Parâmetro | Valor |
|-----------|-------|
| Cs | 10 |
| Ci | 80 |
| Cb | 1000 |
| Qb | 0.01 |

4.2.4 Calibração e Validação

A calibração foi realizada por meio de ajustes manuais e algoritmo de otimização multi-objetivo MOCOM-UA, com base nos critérios definidos na seção 4.1.5. A calibração do modelo foi realizada por URHs e não por sub-bacias, tendo como critério o princípio da parcimônia na modelagem matemática que visa a representação os processos com o menor número de parâmetros (Tucci, 2008). Como o modelo é distribuído espacialmente, os parâmetros das URHs devem variar de acordo com a representação das diferentes unidades de resposta hidrológica mapeadas inicialmente.

A seguir será demonstrado que calibração do modelo apresentou bons resultados para a região de estudo, observados pelos índices de eficiência e hidrogramas ajustados. Devido a menor quantidade de dados e/ou séries sem falhas, o ajuste nas bacias embutidas do Potiribu, Taboão e Turcato, foi realizada com base numa calibração inicial usando séries históricas mais extensas das outras bacias do Ijuí. Em função disso, só foi possível conseguir um ajuste

razoável na bacia do Taboão a partir de um conjunto de parâmetros individualizado para essa sub-bacia. No Turcato não foi possível obter bons ajustes, pois a resposta dessa pequena bacia deve depender de processos que ocorrem em escala menor do que a diária que foi utilizada para a simulação.

4.2.4.1 Calibração Inicial: Período: 1983-1988

Para realizar a calibração do modelo hidrológico na bacia hidrográfica do Ijuí foi utilizada a série de dados de precipitação e de clima da sub-bacia 75, referentes ao período de 01/01/1983 31/12/1988, bem como as vazões observadas nos pontos de controle 75155000, 75200000, 75205000, 75230000, 75295000, 75320000.

Utilizando o conjunto de parâmetros apresentados anteriormente, foi possível representar as tendências gerais do comportamento da bacia. Os resultados preliminares apresentaram erros no volume escoados da ordem de 12% e bons ajustes para os hidrogramas simulados, com E_{NS} variando entre 0.597-0.720 e E_{NSlog} variando entre 0.680-0.824 (Tabela 4.6).

Tabela 4.6 Eficiência para o ajuste manual(01/01/1983-31/12/1988)

| Posto | 75155000 | 75200000 | 75205000 | 75230000 | 75295000 | 75320000 |
|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| E_{NS} | 0.720 | 0.597 | 0.682 | 0.698 | 0.675 | 0.606 |
| E_{NSlog} | 0.680 | 0.652 | 0.782 | 0.772 | 0.824 | 0.762 |
| ΔV | -12.924 | -12.311 | 1.68 | -11.987 | -16.489 | -12.577 |

Para melhorar o desempenho do modelo, foram realizadas centenas de simulações com o algoritmo de calibração multi-objetivo MOCOM-UA. A calibração multi-objetivo faz uma hierarquização dos conjuntos de parâmetros de cada simulação, considerando uma ponderação de três funções-objetivo relativas a minimização das funções de eficiência. Sendo a calibração de multi-objetivo, o método implica numa tomada de decisão quanto ao conjunto de parâmetros a ser utilizado, pois se ao utilizar um conjunto aumenta-se a eficiência em relação a E_{NSlog} , por exemplo, pode se diminuir a acurácia em termos de volume.

Como a variação de E_{NS} e E_{NSlog} em relação à ΔV para os diferentes conjuntos de parâmetros apresentaram comportamentos semelhantes, optou-se por graficar as projeções das funções-objetivo relativas ao E_{NSlog} e ΔV , que permite visualizar graficamente uma aproximação para a região de pareto. Cada ponto no gráfico resulta de uma simulação do modelo hidrológico MGB, utilizando um conjunto diferente de parâmetros fixos gerados aleatoriamente dentro de limites aceitáveis (Figura 4.9).

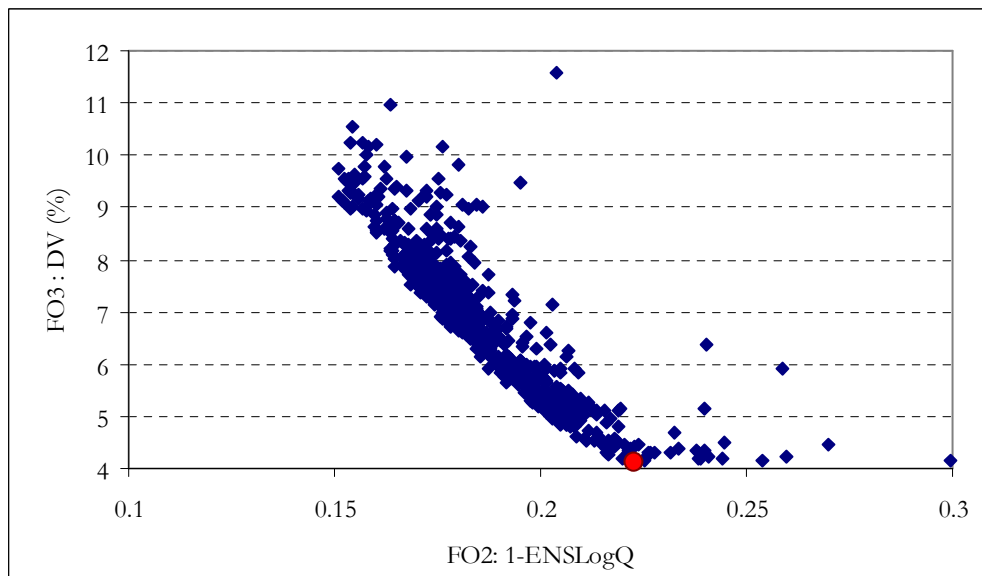


Figura 4.9 Projeção da aproximação da região de pareto no plano formado pelas funções-objetivo relativas ao E_{NSlog} e ΔV obtidas pela calibração automática.

Após a calibração automática foi escolhido o conjunto de parâmetros na curva de pareto da simulação representada pelo ponto vermelho na Figura 4.9 e apresentados nas Tabela 4.7 e Tabela 4.8 que resultaram em melhores E_{NS} e E_{NSlog} e menores erros nos volumes, contribuindo para a melhoria geral da eficiência do modelo (Tabela 4.9).

Tabela 4.7 Parâmetros calibráveis (URHs) após calibração automática

| URH | Wm | b | Kbas | Kint | XL |
|---|--------|------|------|-------|-----|
| Floresta/mata em Solo Raso | 344.60 | 0.32 | 2.64 | 14.69 | 0.4 |
| Agricultura e pastagem em solo raso | 143.55 | 0.17 | 3.59 | 18.35 | 0.4 |
| Floresta/mata em solo profundo | 402.30 | 0.62 | 2.69 | 20.54 | 0.4 |
| Agricultura e pastagem em solo profundo | 218.50 | 0.73 | 2.40 | 18.45 | 0.4 |

Tabela 4.8 Parâmetros calibráveis gerais após calibração automática

| Parâmetro | Valor |
|-----------|--------|
| Cs | 21.25 |
| Ci | 232.72 |
| Cb | 840.60 |
| Qb | 0.01 |

Tabela 4.9 Eficiência após calibração automática (01/01/1983-31/12/1988)

| Posto | 75155000 | 75200000 | 75205000 | 75230000 | 75295000 | 75320000 |
|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| E_{NS} | 0.784 | 0.795 | 0.829 | 0.825 | 0.725 | 0.712 |
| E_{NSlog} | 0.825 | 0.825 | 0.768 | 0.836 | 0.817 | 0.774 |
| ΔV | -2.569 | -5.626 | 10.179 | -2.306 | -9.627 | -3.994 |

Em geral, os resultados foram bons para os pontos de controle simulados, sendo que o

ajuste apresentou desvios em alguns picos, característico nas bacias com menores valores de E_{NS} . Os erros relativos no volume diminuíram bastante em relação à simulação preliminar (ajuste manual) e variaram em torno do valor obtido de 4% e 10% que está dentro da melhor faixa de erro para os conjuntos de parâmetros resultantes das simulações na aproximação da região de pareto (Figura 4.9). O ponto de controle Colônia Mousquer apresentou um grande desvio no volume em relação às demais, que podem decorrer tanto de uma representação inadequada da chuva na região durante esse período, visto que só existem dois postos nessa sub-bacia (Figura 3.5), ou ainda, por algum erro na própria estimativa da vazão observada pela curva-chave. As Figura 4.15 apresentam os hidrogramas observados e calculados relativos ao primeiro ano do período de simulação.

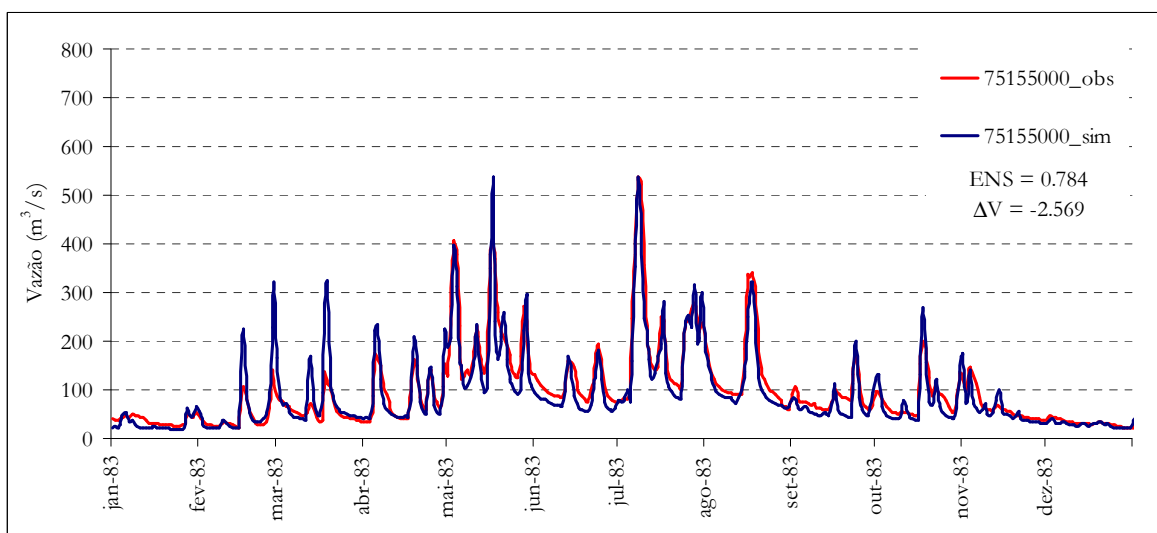


Figura 4.10 Hidrogramas em Passo Faxinal-75155000 (01/01/1983-31/12/1983)

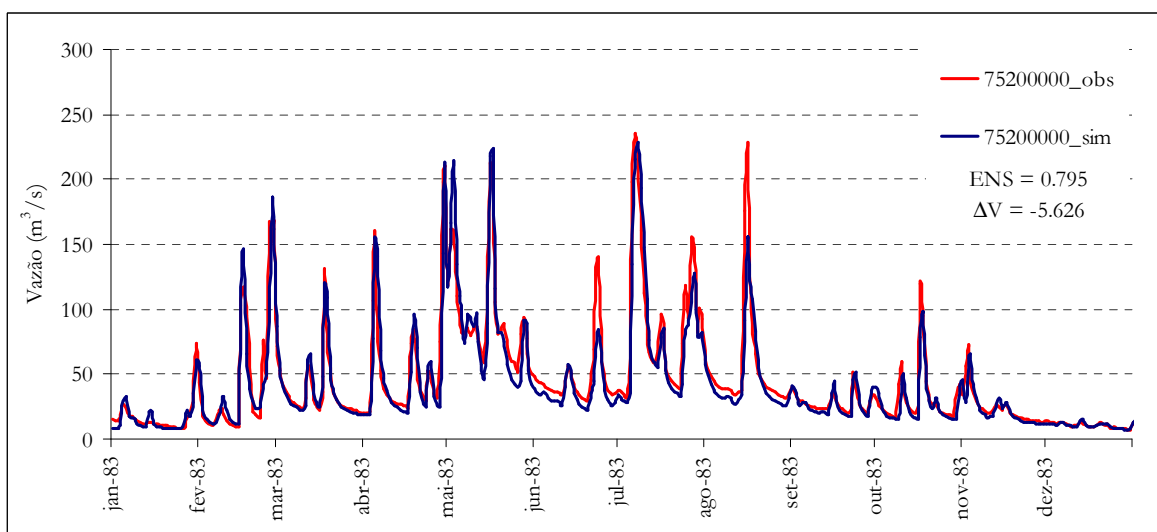


Figura 4.11 Hidrogramas em Conceição-75200000 (01/01/1983-31/12/1983)

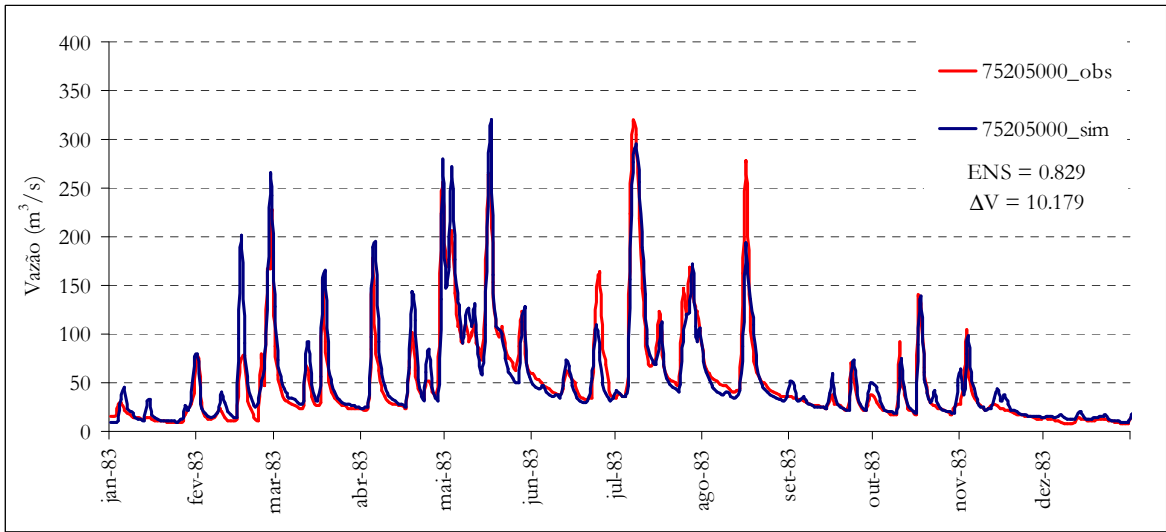


Figura 4.12 Hidrogramas em Ponte Nova Conceição-75205000 (01/01/1983-31/12/1983)

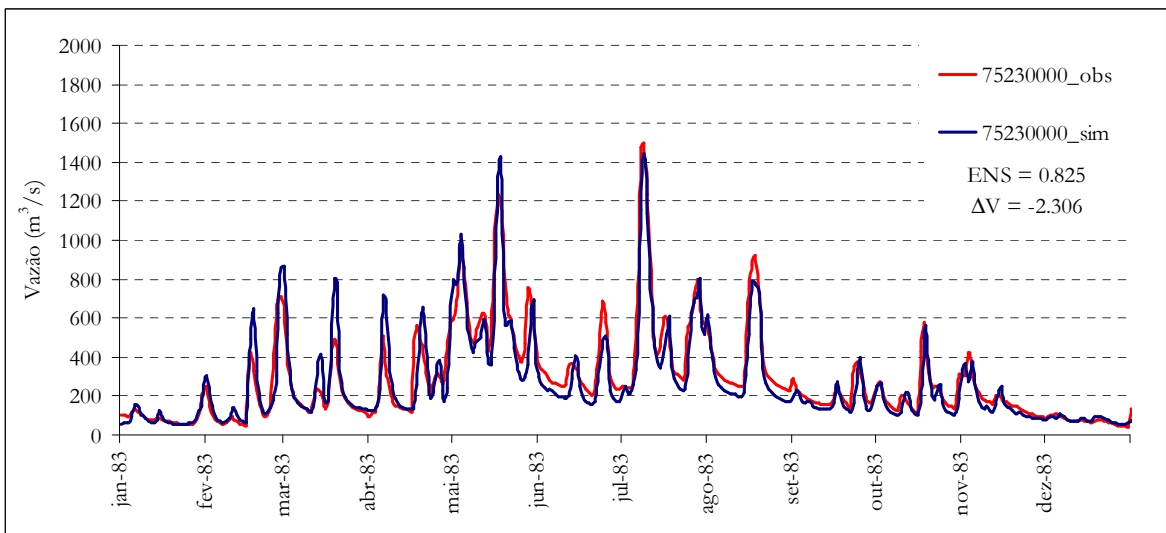


Figura 4.13 Hidrogramas em Santo Ângelo-75230000 (01/01/1983-31/12/1983)

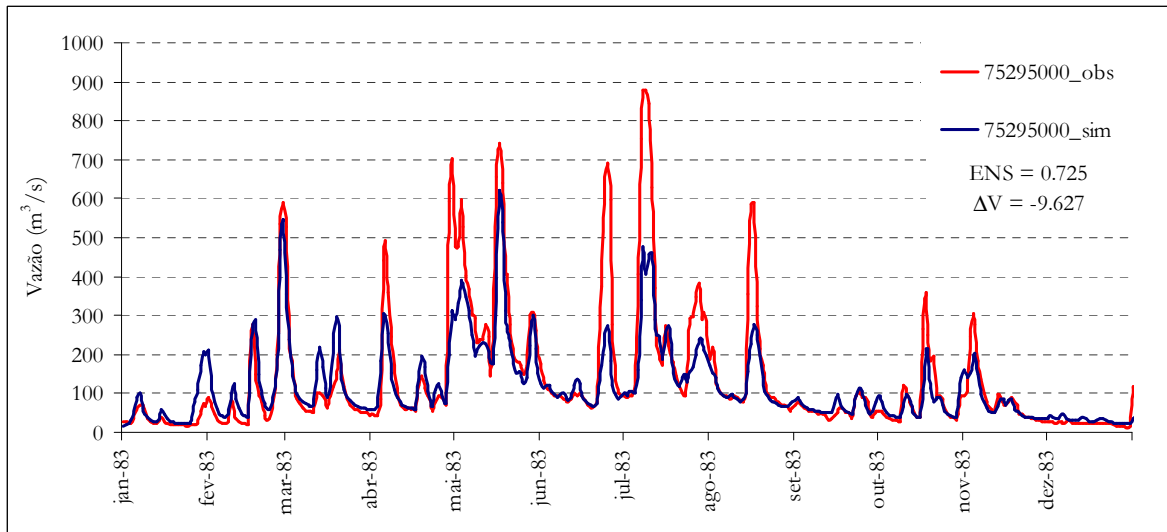


Figura 4.14 Hidrogramas em Colônia Mousquer-75295000 (01/01/1983-31/12/1983)

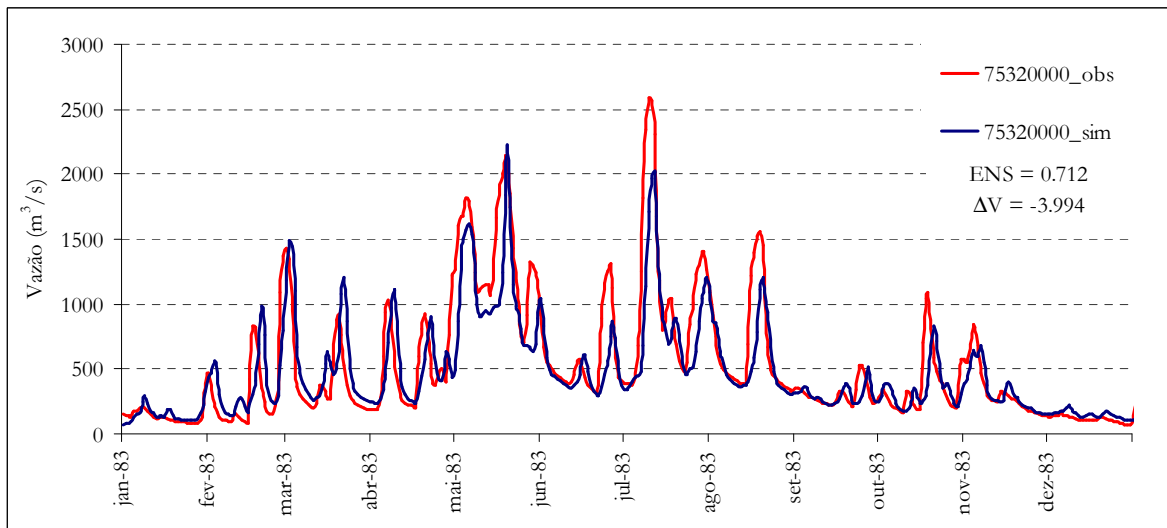


Figura 4.15 Hidrogramas em Ponte Mística-75320000 (01/01/1983-31/12/1983)

4.2.4.2 Período: 1989-1994

Para realizar a validação do modelo hidrológico na bacia hidrográfica do Ijuí foi utilizada a série de dados de precipitação e de clima da sub-bacia 75, referentes ao período de 01/01/1989 31/12/1994, bem como as vazões observadas nos pontos de controle 75155000, 75200000, 75205000, 75230000, 75295000, 75320000.

Utilizando o conjunto de parâmetros ajustados na calibração automática foram obtidos

os hidrogramas representados pelas Figura 4.21. A Tabela 4.10 apresenta os valores das funções-objetivo para este período. Em geral, houve certa redução nos indicadores de eficiência, sendo que E_{NS} variou entre 0.614 e 0.802 e o E_{NSlog} , entre 0.685 e 0.822. Os erros no volume variaram, em valor absoluto, entre 4% e 12%.

Tabela 4.10 Eficiência após calibração automática (01/01/1989-31/12/1994)

| Posto | 75155000 | 75200000 | 75205000 | 75230000 | 75295000 | 75320000 |
|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| E_{NS} | 0,793 | 0,614 | 0,624 | 0,802 | 0,716 | 0,713 |
| E_{NSlog} | 0,728 | 0,786 | 0,728 | 0,822 | 0,685 | 0,709 |
| ΔV | -9,827 | 4,116 | 10,528 | -11,904 | 4,411 | 3,014 |

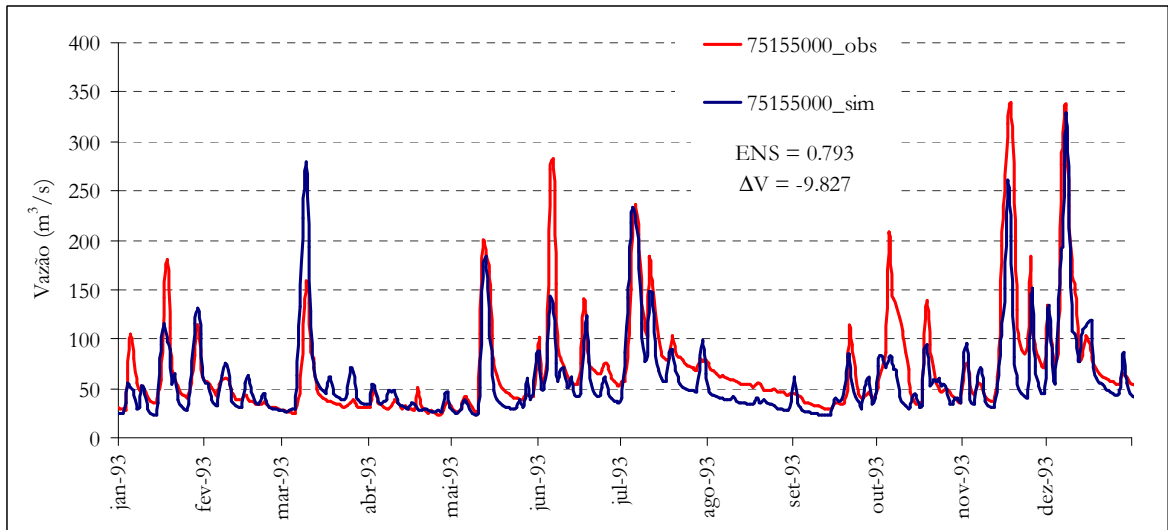


Figura 4.16 Hidrogramas em Passo Faxinal-75155000 (01/01/1993-31/12/1993)

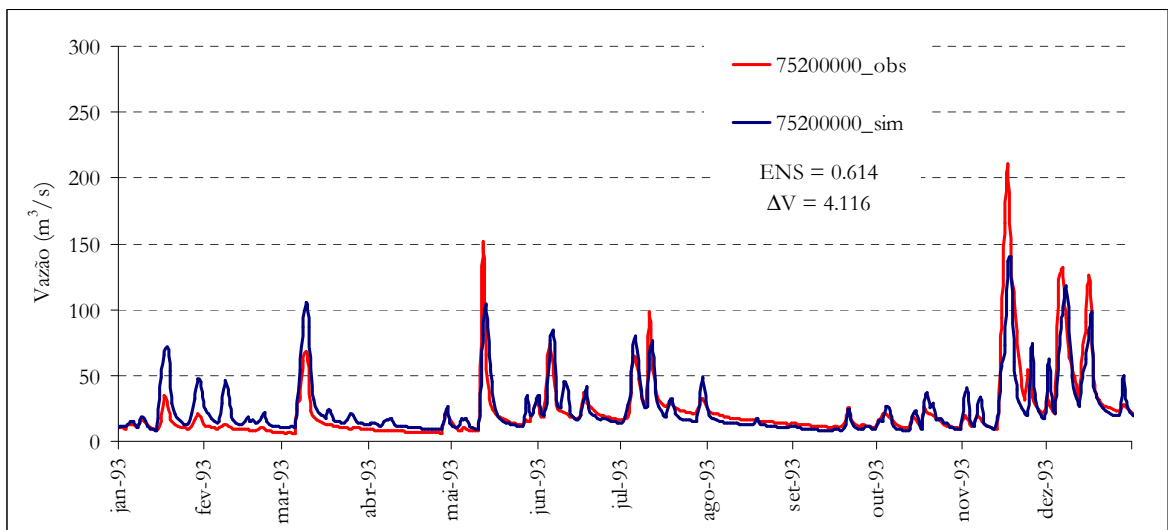


Figura 4.17 Hidrogramas em Conceição-75200000 (01/01/1993-31/12/1993)

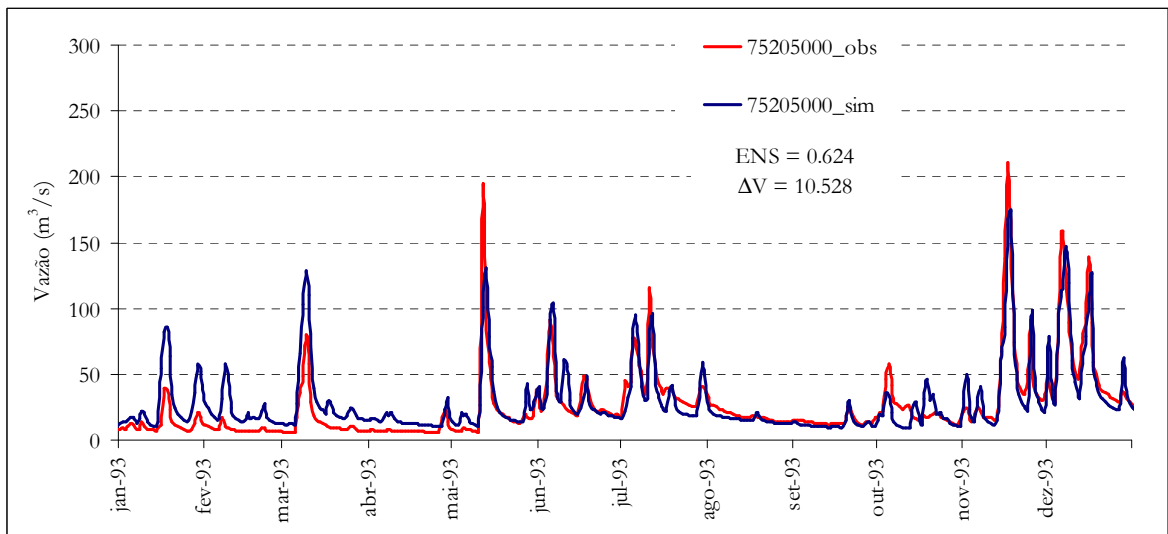


Figura 4.18 Hidrogramas em Ponte Nova Conceição-75205000 (01/01/1993-31/12/1993)

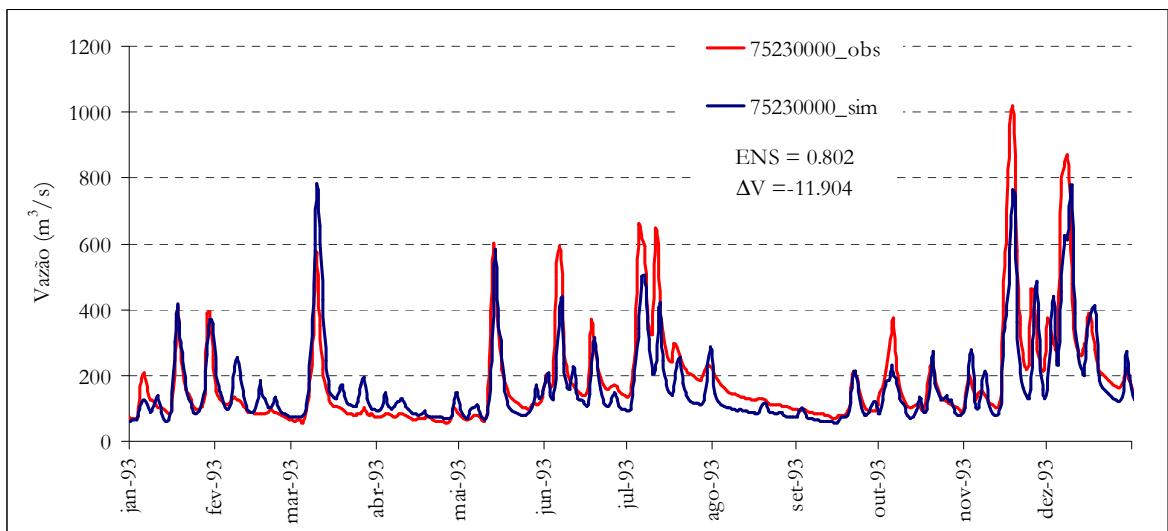


Figura 4.19 Hidrogramas em Santo Ângelo-75230000 (01/01/1993-31/12/1993)

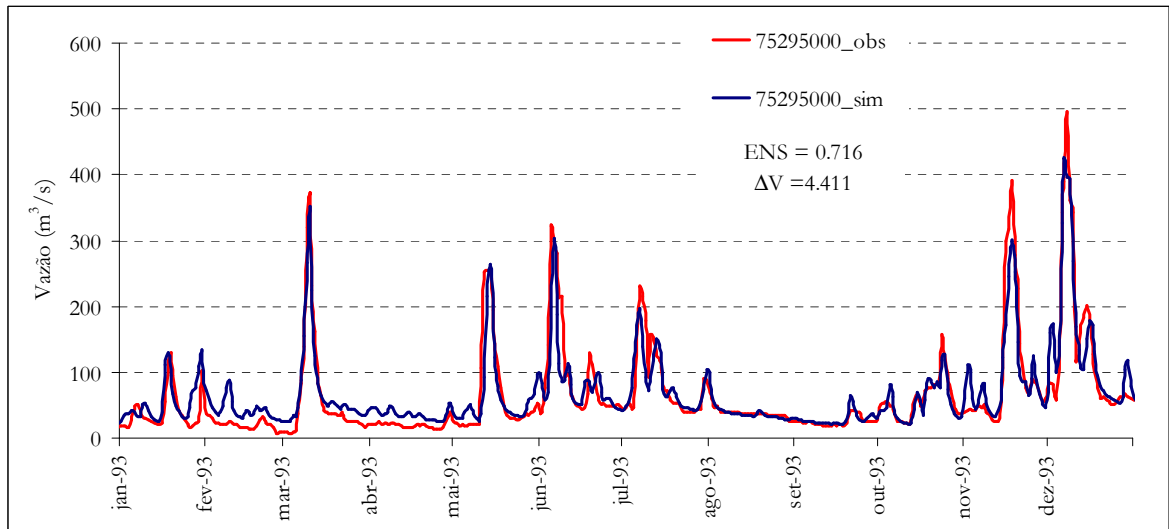


Figura 4.20 Hidrogramas em Colônia Mousquer-75295000 (01/01/1993-31/12/1993)

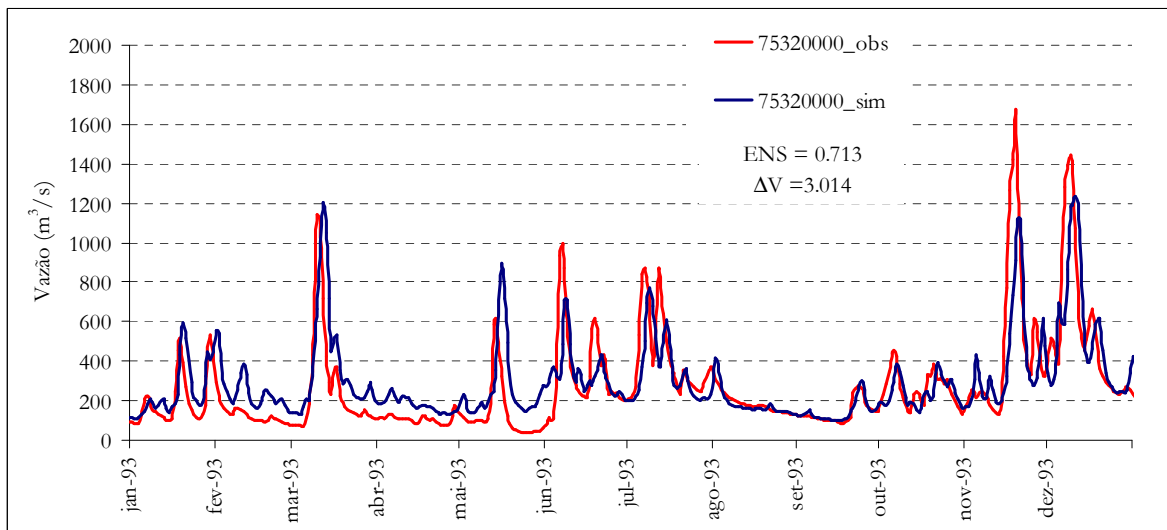


Figura 4.21 Hidrogramas em Ponte Mística-75320000 (01/01/1993-31/12/1993)

4.2.4.3 Período: 1998-2003

O período de 1998-2003 foi utilizado ajustar as bacias embutidas do Potiribu, devido a disponibilidade de dados. Nesta etapa foi utilizada a série de dados de precipitação e de clima da sub-bacia 75, referentes ao período de 01/07/1998 a 31/12/2003, bem como as vazões observadas nos pontos de controle 75155000, 75200000, 75205000, 75230000, 75295000, 75320000, Taboão e Turcato.

Os parâmetros anteriores foram reajustadas manualmente para obter melhores

resultados neste período, conforme Tabela 4.11 e Tabela 4.12. Existem registros de que a partir de 1994, houve troca do plantio convencional para o plantio direto tendo, efeito em potencial, sobre o escoamento superficial (Silva Júnior, 2001).

Tabela 4.11 Parâmetros calibráveis (URHs) após reajuste

| URH | Wm | B | Kbas | Kint | XL |
|---|--------|------|------|-------|-----|
| Floresta/mata em Solo Raso | 352.5 | 0.37 | 1.52 | 22.75 | 0.4 |
| Agricultura e pastagem em solo raso | 160.8 | 0.11 | 1.73 | 12.92 | 0.4 |
| Floresta/mata em solo profundo | 500.30 | 2.45 | 1.43 | 23.77 | 0.4 |
| Agricultura e pastagem em solo profundo | 315.50 | 0.43 | 1.24 | 9.69 | 0.4 |

Tabela 4.12 Parâmetros calibráveis gerais após reajuste

| Parâmetro | Valor |
|-----------|--------|
| Cs | 35.21 |
| Ci | 235.25 |
| Cb | 836.40 |
| Qb | 0.01 |

O ajuste dos parâmetros para as sub-bacias do Potiribu foram realizadas separadamente (Tabela 4.13 e Tabela 4.14).

Tabela 4.13 Parâmetros calibráveis (URHs) após reajuste no Potiribu

| URH | Wm | b | Kbas | Kint | XL |
|---|-------|-------|------|-------|-----|
| Floresta/mata em Solo Raso | 549.4 | 2.65 | 9.02 | 75.03 | 0.4 |
| Agricultura e pastagem em solo raso | 350.9 | 0.68 | 2.29 | 39.69 | 0.4 |
| Floresta/mata em solo profundo | 700.3 | 13.96 | 1.06 | 55.91 | 0.4 |
| Agricultura e pastagem em solo profundo | 560.6 | 1.87 | 5.41 | 25.09 | 0.4 |

Tabela 4.14 Parâmetros calibráveis gerais após reajuste no Potiribu

| Parâmetro | Valor |
|-----------|--------|
| Cs | 58.59 |
| Ci | 480.39 |
| Cb | 952.66 |
| Qb | 0.01 |

Ao final da calibração, os erros no volume variaram, em valor absoluto, entre 0.413 e 13.56%. Em geral, os valores de E_{NS} variaram entre 0.632 e 0.869, os valores de E_{NSlog} variaram entre 0.750 e 0.862. A calibração para o Taboão apresentou resultados aceitáveis, considerando que havia somente cerca de um ano de dados disponível e com falhas. Não foi possível realizar um ajuste adequado para a bacia do Turcato, portanto buscou-se minimizar o erro no volume. Neste caso, é possível que o modelo hidrológico não consiga representar os processos hidrológicos de forma adequada devido a escala espacial e temporal dos processos.

Tabela 4.15 Eficiência após reajuste (Taboão)

| Posto | 75155000 | 75200000 | 75205000 | 75230000 | 75295000 | 75320000 | Taboão | Turcato |
|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|---------|
| E_{NS} | 0,712 | 0,796 | 0,837 | 0,869 | 0,820 | 0,820 | 0,632 | 0,478 |
| E_{NSlog} | 0,743 | 0,811 | 0,841 | 0,862 | 0,820 | 0,856 | 0,750 | 0,118 |
| ΔV | 2,418 | 6,173 | 7,44 | -3,702 | 1,885 | -11,966 | -13,516 | -0,413 |

As figuras abaixo apresentam hidrogramas para o período com dados no Potiribu, entre 2002 e 2003.

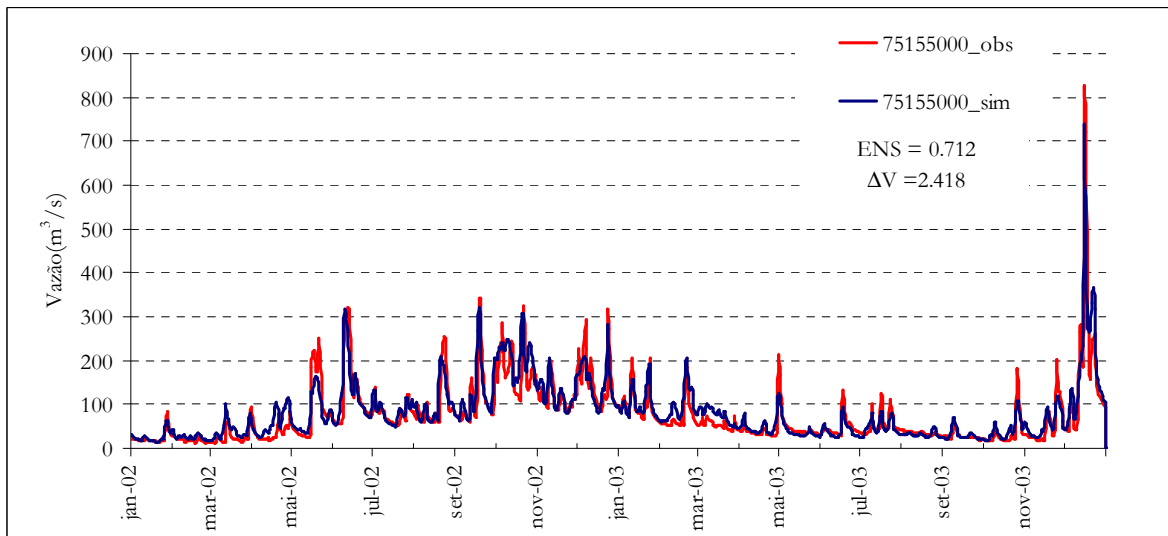


Figura 4.22 Hidrogramas em Passo Faxinal-75155000 (01/01/2002-31/12/2003)

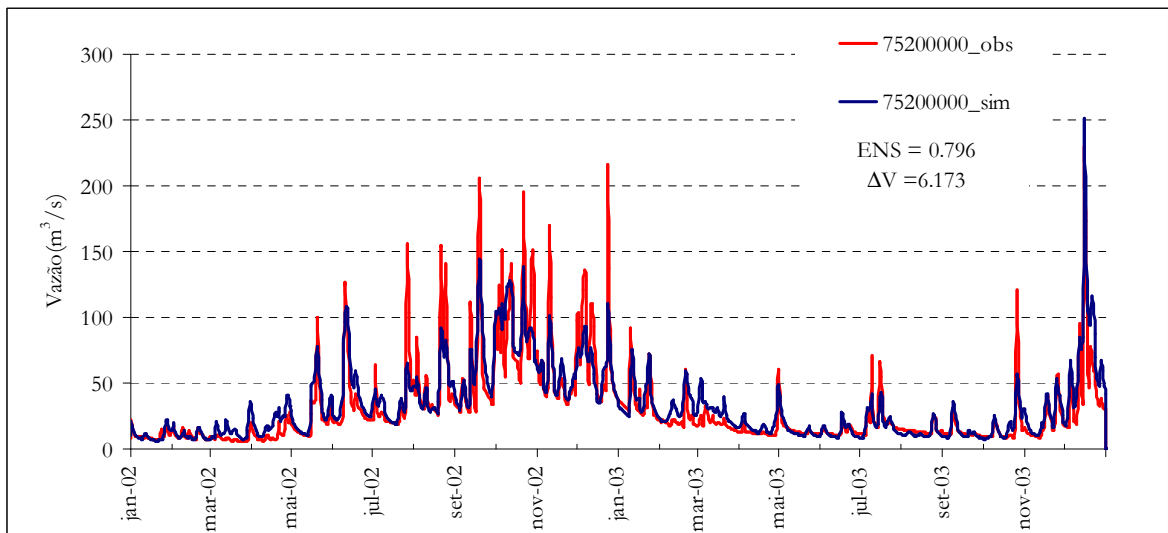


Figura 4.23 Hidrogramas em Conceição-75200000 (01/01/2002-31/12/2003)

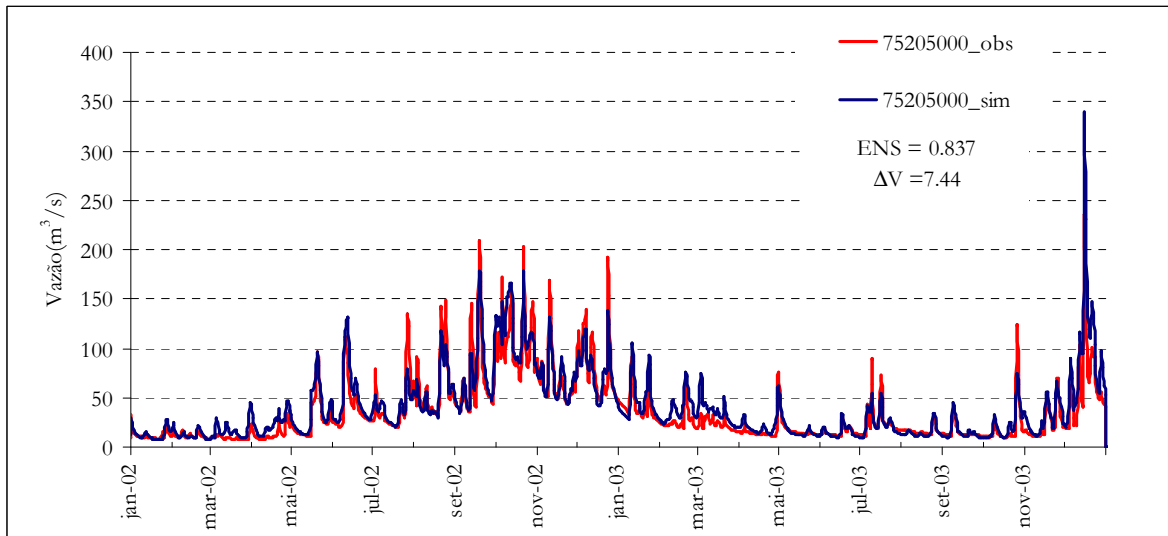


Figura 4.24 Hidrogramas em Ponte Nova Conceição-75205000 (01/01/2002-31/12/2003)

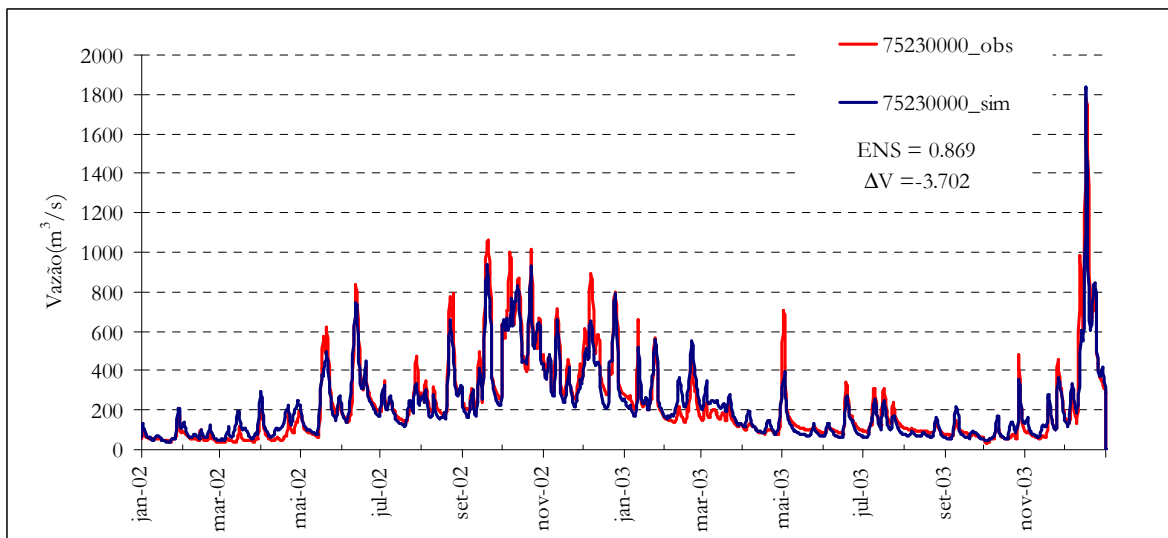


Figura 4.25 Hidrogramas em Santo Ângelo-75230000 (01/01/2002-31/12/2003)

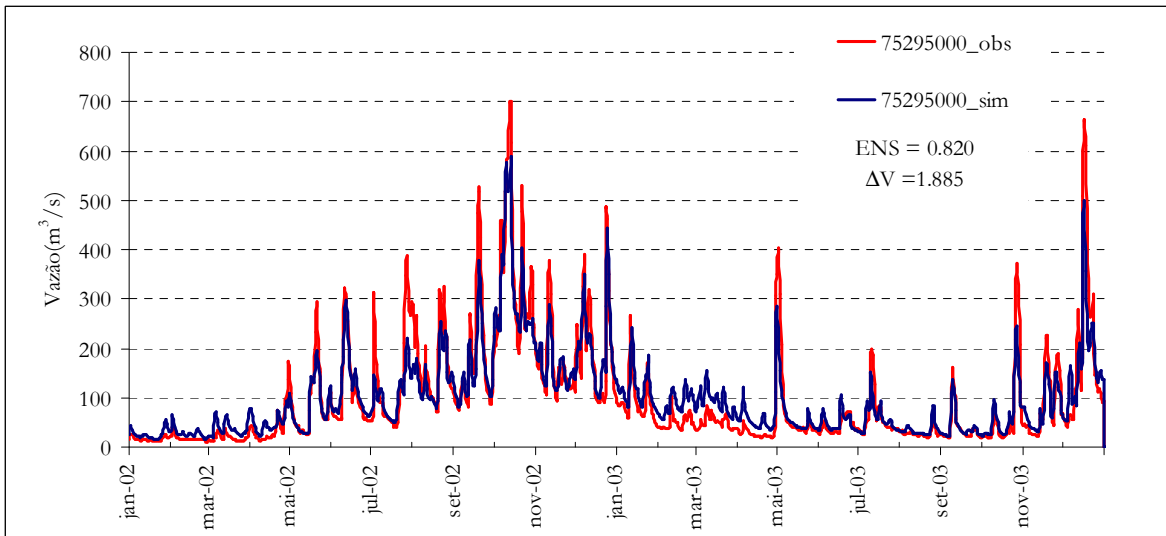


Figura 4.26 Hidrogramas em Colônia Mousquer-75295000 (01/01/2002-31/12/2003)

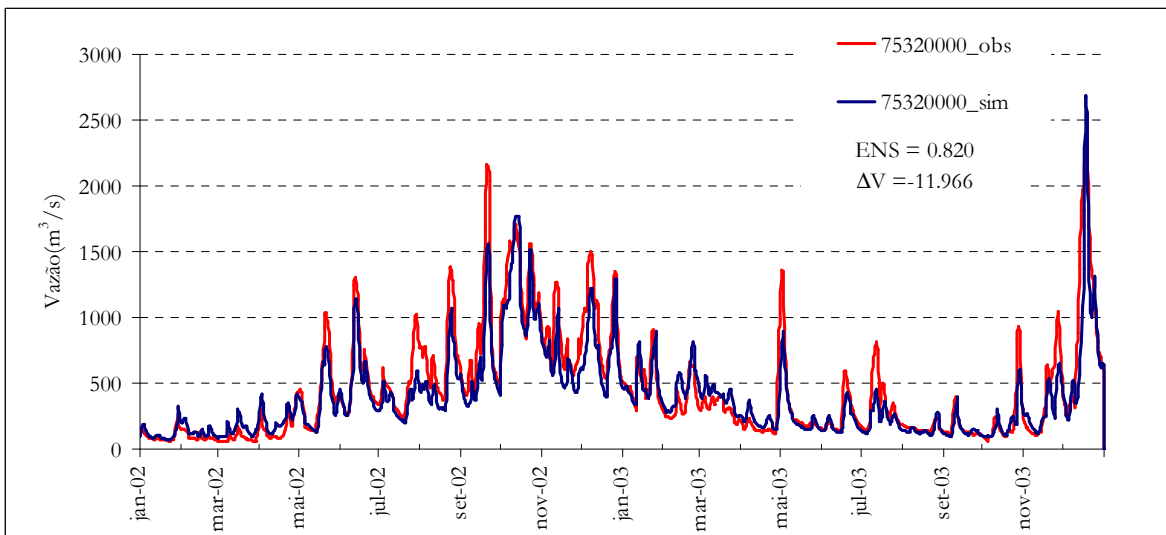


Figura 4.27 Hidrogramas em Ponte Mística-75320000 (01/01/2002-31/12/2003)

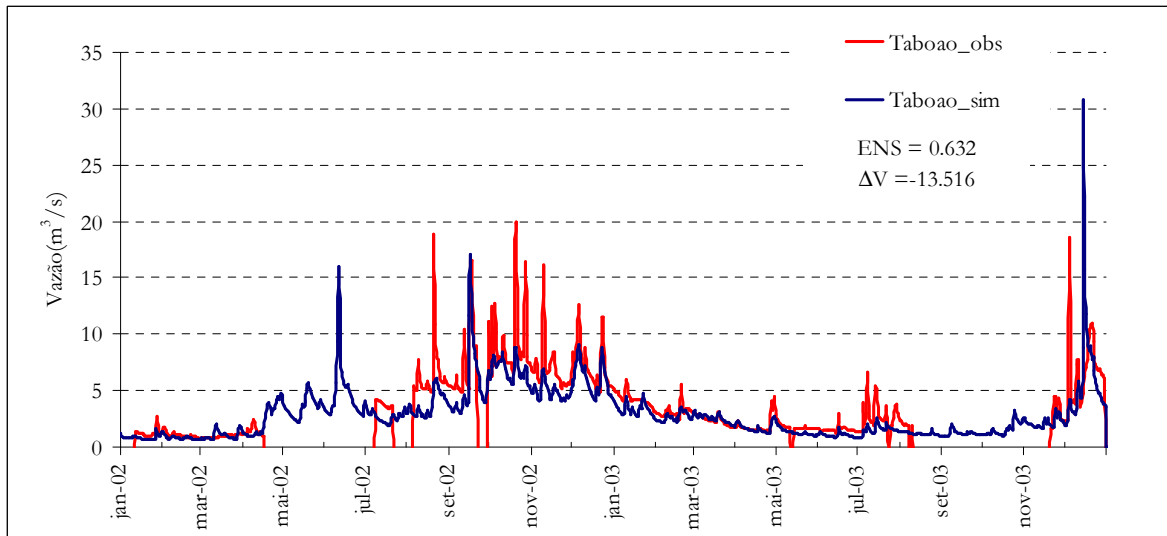


Figura 4.28 Hidrogramas em Taboão (01/01/2002-31/12/2003)

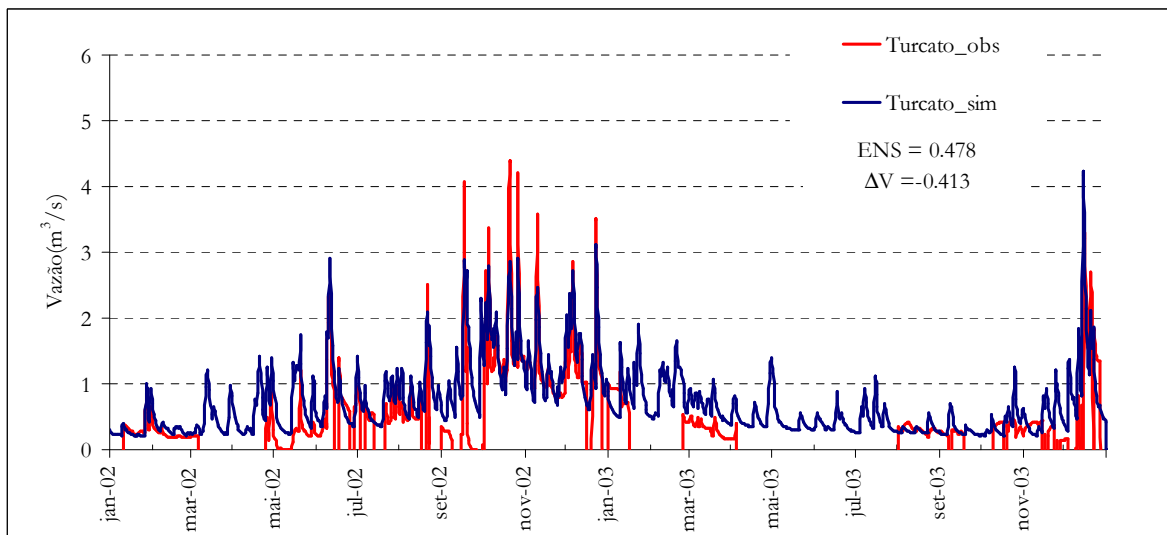


Figura 4.29 Hidrogramas em Turcato (01/01/2002-31/12/2003)

4.2.4.4 Período: 2008-2009

O período de 2008-2009 foi utilizado para verificar o ajuste nas bacia do Taboão, embutida no Potiribu, visando a simulação da dinâmica de carbono. Nesta etapa foi utilizada a série de dados de precipitação e de clima da sub-bacia 75, referentes ao período de 01/01/2008 a 01/10/2009, bem como as vazões observadas nos pontos de controle 75155000, 75200000, 75205000, 75230000, 75295000, 75320000, Taboão e, adicionalmente, 75186000, pois o monitoramento nessa última seção é recente.

Foram utilizados os parâmetros calibrados anteriormente (Tabela 4.11 à Tabela 4.14). Ao final da calibração, os erros no volume variaram, em valor absoluto, entre 0.41 e 21.15%. Em geral, valores de E_{NS} variaram entre 0.654 e 0.896, os valores de E_{NSlog} variaram entre 0.636 e 0.854. O ajuste do modelo no ponto de controle Taboão apresentou redução de performance, porém o erro no volume calculado foi baixo e o comportamento geral da bacia durante o período com dados observado foi representado. Não foi possível realizar um ajuste adequado para a bacia do Turcato.

Tabela 4.16 Eficiência do modelo: período (2008-2009)

| Posto | E_{NS} | E_{NSlog} | ΔV |
|----------|----------|-------------|------------|
| 75155000 | 0.873 | 0.831 | 11.13 |
| 75200000 | 0.788 | 0.845 | 0.94 |
| 75205000 | 0.896 | 0.854 | 6.012 |
| 75230000 | 0.881 | 0.845 | 3.658 |
| 75295000 | 0.833 | 0.730 | 8.459 |
| 75320000 | 0.845 | 0.636 | 16.183 |
| Taboão | 0.422 | 0.546 | -0.431 |
| 75186000 | 0.654 | 0.801 | -21.148 |

As figuras acima apresentam hidrogramas para o período com dados contínuos no Taboão, entre 2008 e 2009.

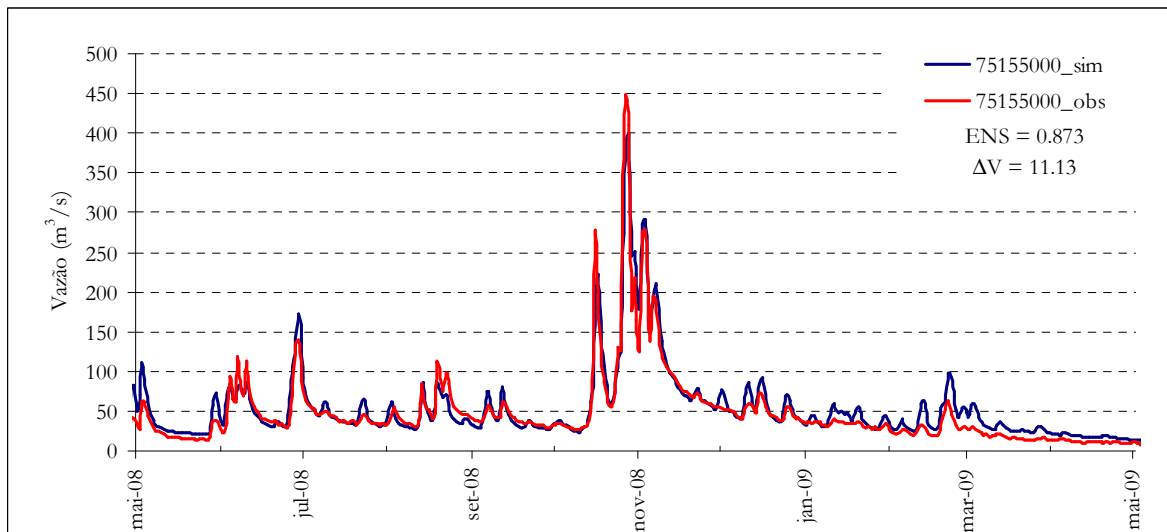


Figura 4.30 Hidrogramas em Passo Faxinal-75155000 (01/01/2008-01/05/2009)

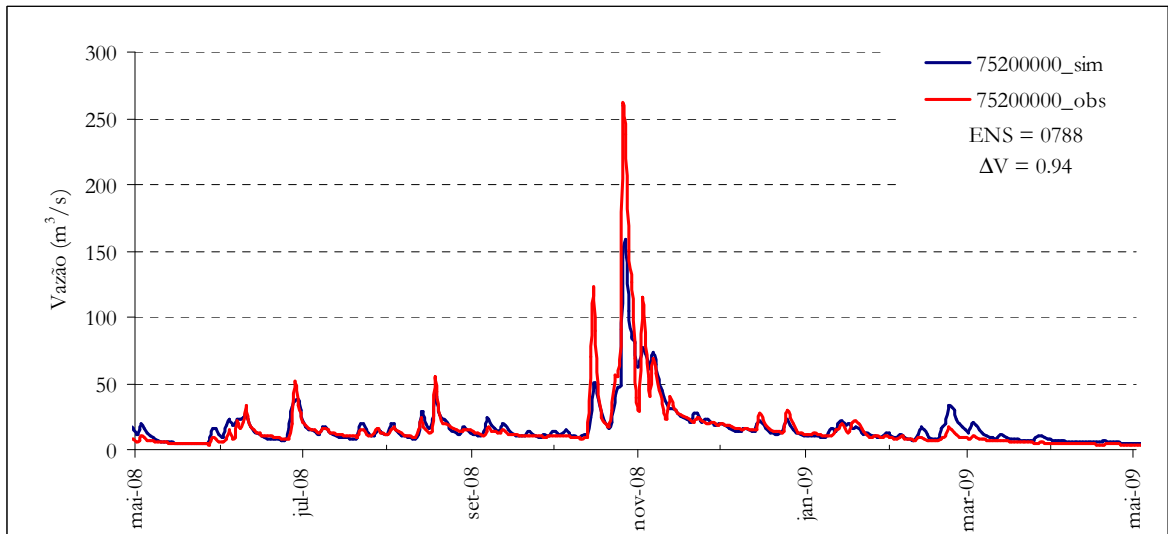


Figura 4.31 Hidrogramas em Conceição-7520000 (01/01/2008-01/05/2009)

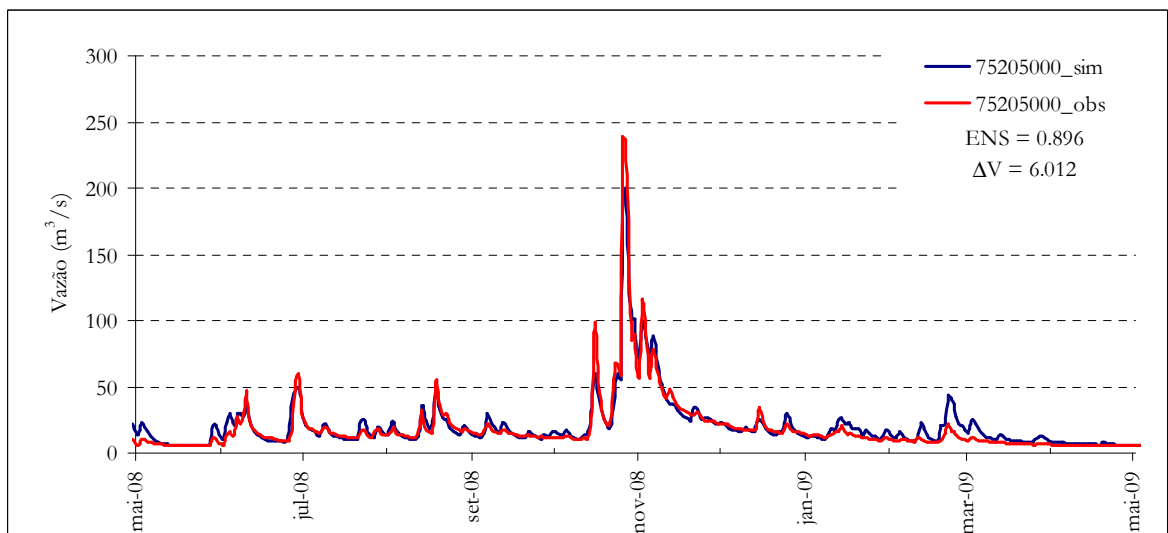


Figura 4.32 Hidrogramas em Ponte Nova Conceição-75205000 (01/05/2008-01/05/2009)

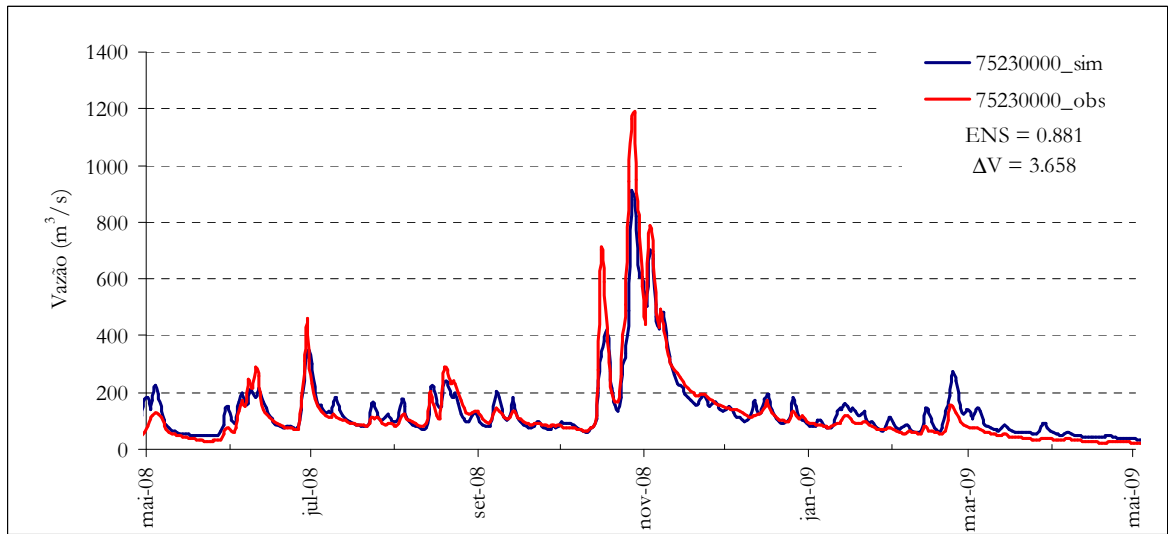


Figura 4.33 Hidrogramas em Santo Ângelo-75230000 (01/05/2008-01/05/2009)

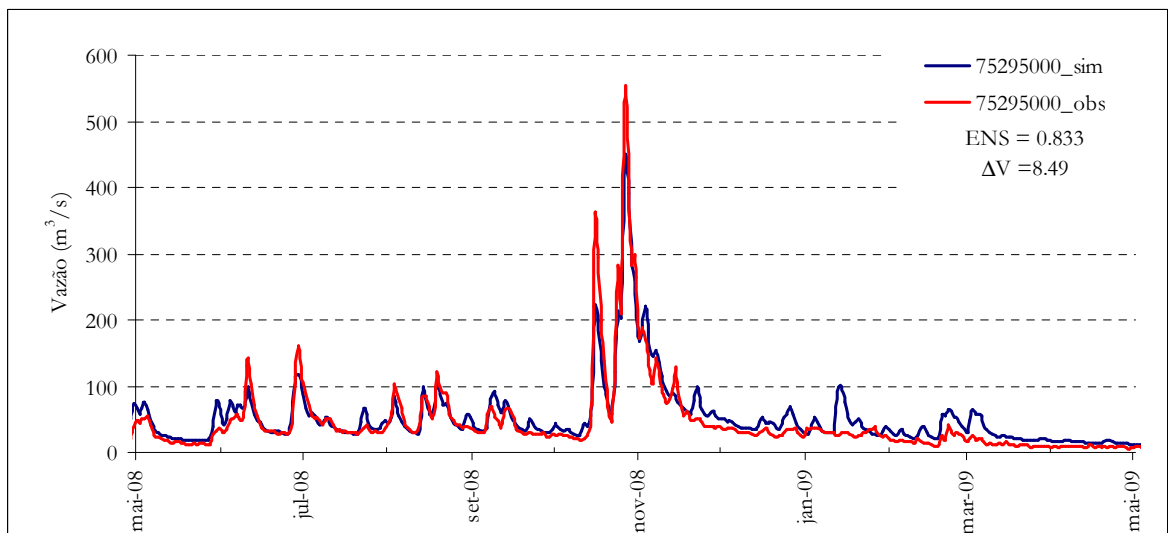


Figura 4.34 Hidrogramas em Colônia Mousquer-75295000 (01/01/2008-01/10/2009)

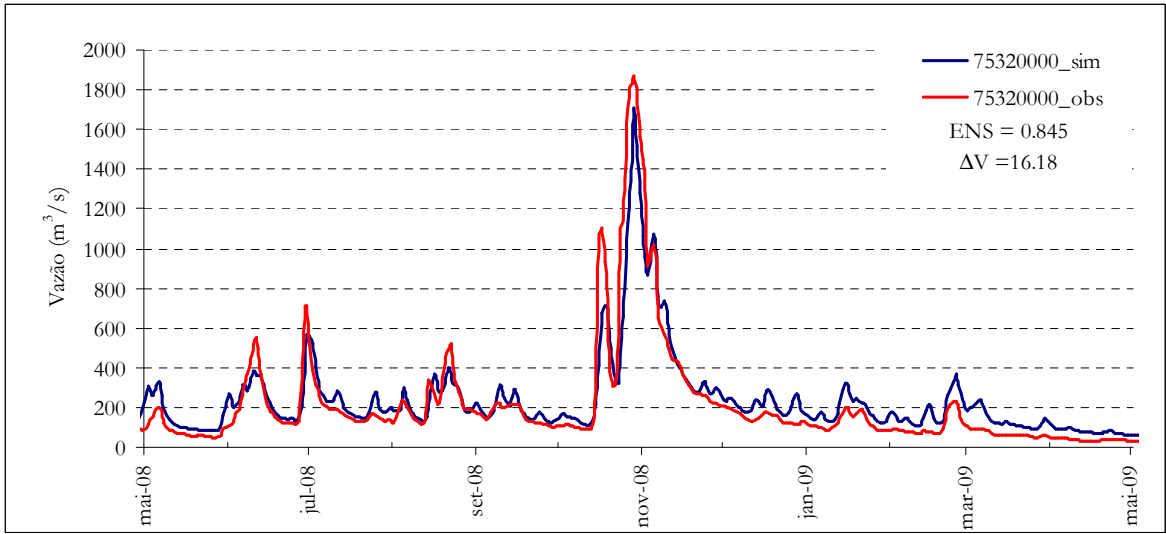


Figura 4.35 Hidrogramas em Ponte Mística-75320000 (01/01/2008-01/05/2009)

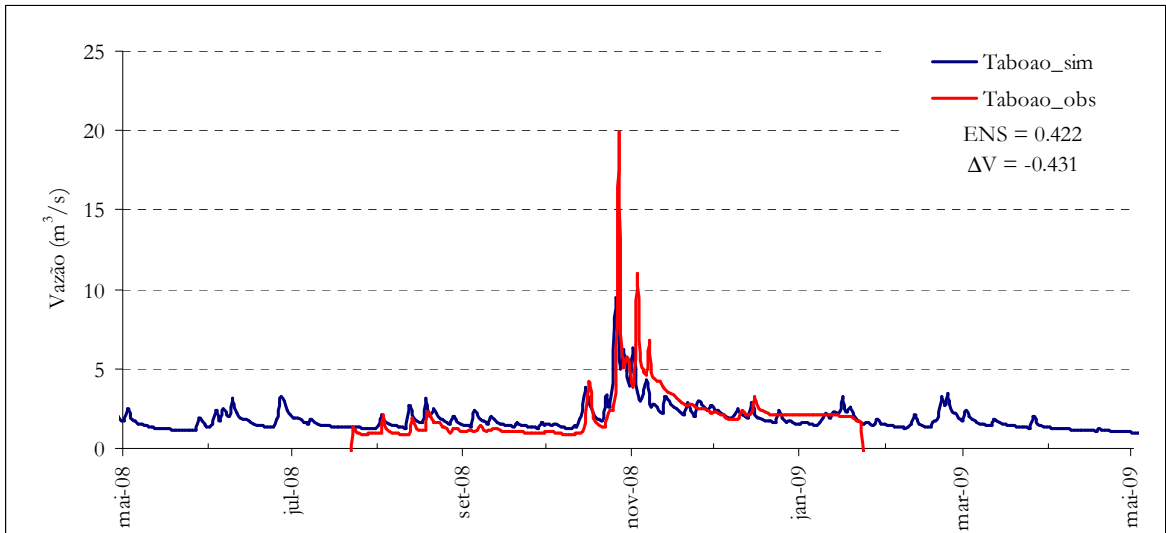


Figura 4.36 Hidrogramas em Taboão (01/01/2008-01/05/2009)

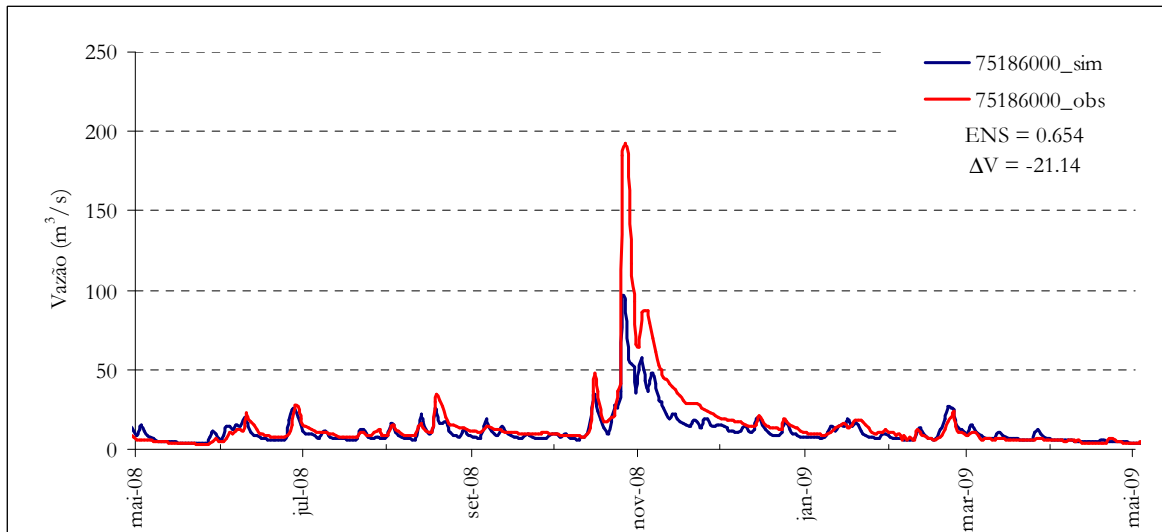


Figura 4.37 Hidrogramas em Ponte Nova Jusante Potiribu 75186000 (01/01/2008-01/10/2009)

Considerando todos os períodos simulados e a eficiência dos ajustes obtidos é possível verificar que o MGB representa melhor as bacias de maior porte. A Figura 4.38 demonstra que o critério de eficiência E_{NSQ} tende a ser melhor com o aumento das áreas de drenagem das bacias simuladas. Em bacias de pequeno porte existem processos hidrológicos atuando em escalas espacial e temporal diferentes para as quais o MGB foi estruturado dificultando os ajustes. Nas bacias a partir de 1000 km^2 , os valores de E_{NSQ} tiveram valores muito bons e estabilizaram em média de 0.7 a 0.9.

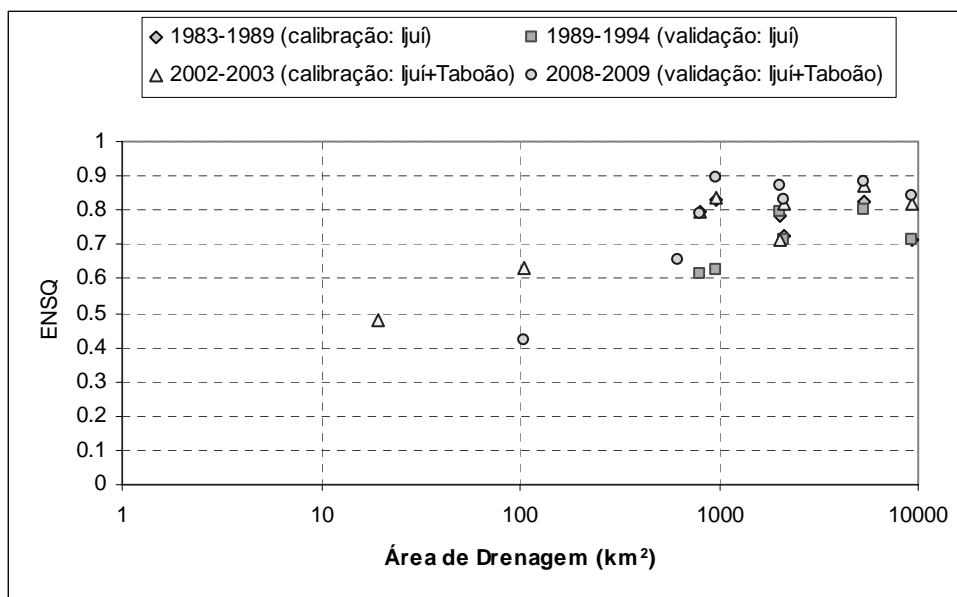


Figura 4.38 Relação E_{NSQ} x Área de Drenagem para as sub-bacias simuladas no Ijuí.

5 MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DE CARBONO

Este capítulo apresenta a estimativa dos fluxos fluviais de carbono orgânico e inorgânico a partir de dados medidos nas bacias do Taboão e Turcato. Visando o melhor entendimento dos processos e fatores que influenciam os fluxos de carbono na área de estudo, relações funcionais entre concentração e vazão foram testadas.

Segue ainda nesse capítulo a descrição do modelo para dinâmica de carbono desenvolvido, MGB-IPH-C. Para analisar a resposta do modelo, com respeito à influência dos processos hidrológicos sob a dinâmica de carbono na bacia hidrográfica, foi utilizado um conjunto fixo de parâmetros. A análise de sensibilidade dos parâmetros permitiu um melhor entendimento do funcionamento do modelo. Em último momento, foi realizado um ajuste manual considerando as concentrações observadas e cargas estimadas a partir dos dados para as bacias do Potiribu, bem como uma análise dos erros para as concentrações e cargas. Todas as simulações da dinâmica de carbono foram realizadas utilizando o modelo hidrológico calibrado anteriormente (capítulo 4).

5.1 ESTIMATIVA DOS FLUXOS FLUVIAIS DE CARBONO NA ÁREA DE ESTUDO

No presente estudo os fluxos fluviais foram estimados utilizando método da multiplicação entre concentração e vazão medidas em campo (Hope et al. 1994). Hinton et al. (1997, 1998) propuseram um modelo para quantificar as parcelas de fluxo de carbono por origem subterrânea ou superficial durante eventos de chuva, semelhante à separação do escoamento em hidrogramas, porém esse tipo de método só é aplicável quando o monitoramento registra dados físico-químicos seqüencialmente durante o evento de cheia.

5.1.1 Bacia do Rio Turcato

Para quantificação dos fluxos fluviais de carbono orgânico e inorgânico nas bacias embutidas do Potiribu, foram utilizados dados entre julho/2008 e agosto/2009, pois a informação a respeito das cotas ou vazão não esteve disponível em todas as amostras. A maior parte das vazões foi estimada com base na curva-chave dos postos.

Em Turcato a concentração de carbono total variou entre 4.4 e 7.4 mg/L, com média de 5.75 mg/L. O carbono inorgânico variou entre 3.35 e 6.43 mg/L, com média de 4.59 mg/L, e representou a maior parcela do carbono total, cerca de 80% do total. O carbono orgânico variou entre 0.1 e 2.68 mg/L, com média de 1.16 mg/L. A Tabela 5.1 resume os valores utilizados para estimativa das cargas de carbono em Turcato.

Tabela 5.1 Concentrações observadas e cargas estimadas de carbono em Turcato

| Data | Concentração (mg/L) | | | Vazão (m ³ /s) | Carga Média Mensal (kg/mês) | | |
|-------------|---------------------|------------|---------|---------------------------|-----------------------------|-------------|---------|
| | C inorgânico | C orgânico | C total | | C inorgânico | C orgânico | C total |
| jul/08 | 4.35 | 0.35 | 4.70 | 0.560 | 6312.7(93%) | 506.6(7%) | 6819.2 |
| ago/08 | 3.35 | 2.64 | 5.99 | 0.560 | 4857.7(56%) | 3830.7(44%) | 8688.4 |
| set/08 | 4.01 | 2.08 | 6.09 | 0.341 | 3542.0(66%) | 1839.5(34%) | 5381.5 |
| out/08 | 3.74 | 1.56 | 5.29 | 0.591 | 5719.8(71%) | 2381.6(29%) | 8101.3 |
| nov/08 | 3.89 | 2.66 | 6.55 | 0.591 | 5959.0(59%) | 4080.9(41%) | 10039.9 |
| dez/08 | 3.93 | 2.36 | 6.29 | 0.591 | 6007.5(62%) | 3612.2(38%) | 9619.7 |
| jan/09 | 4.60 | 0.10 | 4.69 | 0.391 | 4656.9(98%) | 96.3(2%) | 4753.2 |
| fev/09 | 4.55 | 0.25 | 4.80 | 0.273 | 3211.6(95%) | 178.0(5%) | 3389.6 |
| mar/09 | 3.71 | 2.68 | 6.39 | 0.211 | 2027.4(58%) | 1467.4(42%) | 3494.8 |
| abr/09 | 4.25 | 0.15 | 4.4 | 0.192 | 2114.7(97%) | 74.2(3%) | 2188.9 |
| mai/09 | 4.98 | 0.24 | 5.22 | 0.251 | 3243.8(95%) | 155.6(5%) | 3399.4 |
| jun/09 | 4.36 | 0.2 | 4.56 | 0.174 | 1964.6(96%) | 89.8(4%) | 2054.3 |
| jul/09 | 6.43 | 1.04 | 7.47 | 0.251 | 4184.0(86%) | 676.5(14%) | 4860.5 |
| ago/09 | 6.02 | 0.16 | 6.18 | 0.983 | 15349.3(97%) | 400.1(3%) | 15749.4 |
| set/09 | 6.21 | 0.97 | 7.18 | 1.150 | 18510.8(86%) | 2891.4(14%) | 21402.1 |
| out/09 | 5.11 | 1.07 | 6.18 | 1.024 | 13559.0(83%) | 2847.1(17%) | 16406.2 |
| média | 4.59 | 1.16 | 5.75 | 0.508 | 6326.3(80%) | 1570.5(20%) | 7896.8 |
| mínimo | 3.35 | 0.10 | 4.40 | 0.174 | 1964.6 | 74.2 | 2054.3 |
| máximo | 6.43 | 2.68 | 7.47 | 1.150 | 18510.8 | 4080.9 | 21402.1 |
| desv.padrão | 0.93 | 1.02 | 0.96 | 0.312 | 4996.8 | 1495.4 | 5644.6 |
| CV | 0.20 | 0.88 | 0.17 | 0.61 | 0.79 | 0.95 | 0.71 |

As cargas médias mensais variaram em duas e três ordens de grandeza, para as frações inorgânica e orgânica respectivamente e são apresentadas na Figura 5.1. Em Turcato, a fração inorgânica representou em média 80% dos fluxos totais.

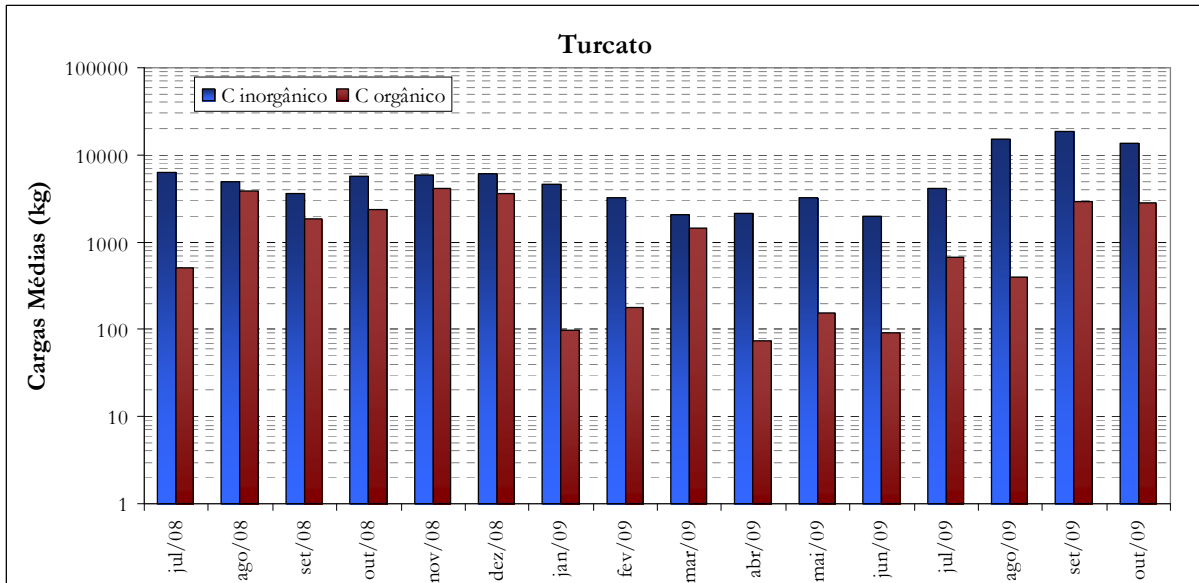


Figura 5.1 Cargas médias mensais de carbono orgânico e inorgânico em Turcato

A Figura 5.2 apresenta a série temporal de dados de vazão e carbono em Turcato. O uso de gráfico por linhas ajuda a discernir as mudanças entre dados que são pontuais, porém não representa necessariamente a variação ocorrida no intervalo entre eles. A concentração de carbono inorgânico apresentou uma leve tendência de aumento no período. Considerando uma relação linear, é possível perceber que as concentrações orgânica e inorgânica aparentemente apresentam uma relação inversa, porém a conforme a Figura 5.3, essa relação tem baixo valor ($r^2=0.27$). Pouco pode se afirmar sobre a relação vazão-concentração com base na análise gráfica da série temporal.

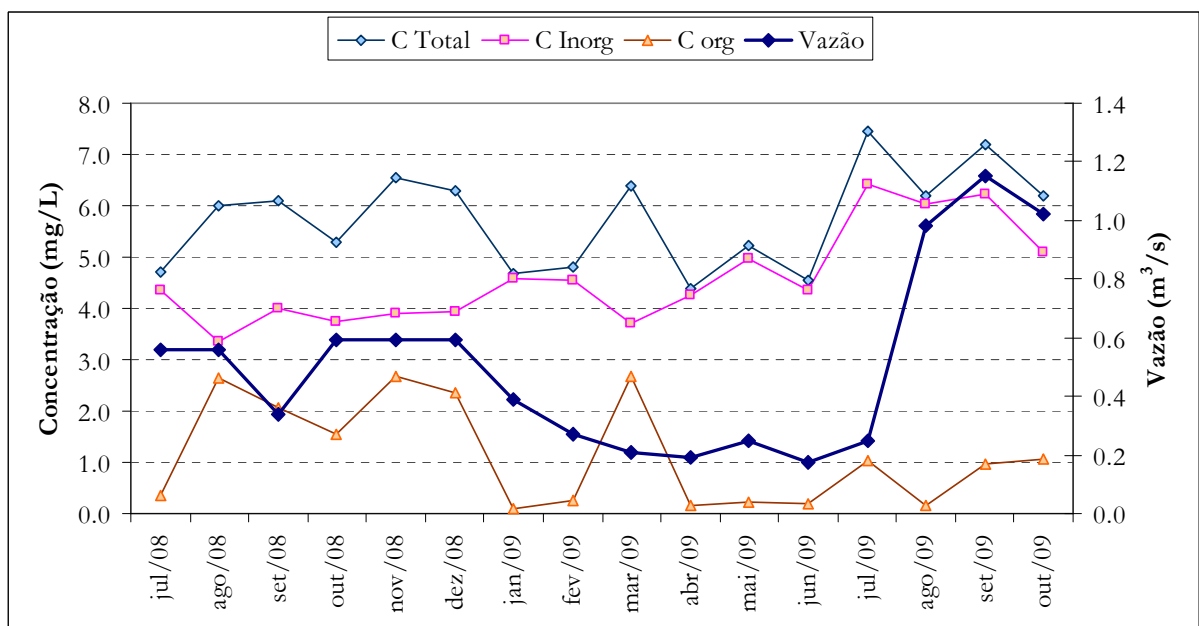


Figura 5.2 Série temporal de dados de vazão e carbono em Turcato

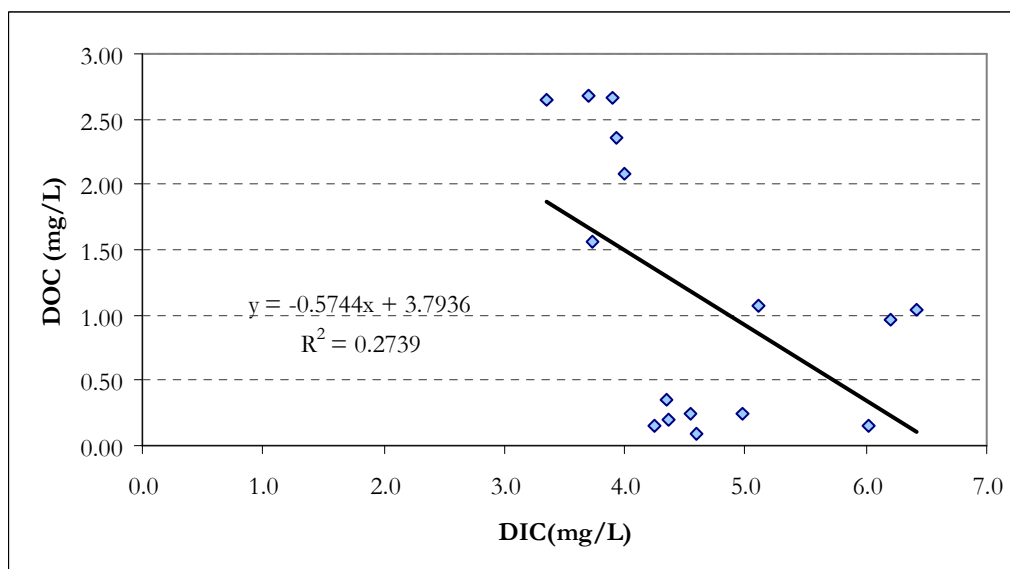


Figura 5.3 Relação DOC x DIC em Turcato

A Figura 5.4 apresenta os pares de concentração de carbono (orgânico, inorgânico e total) e vazão para as amostras realizadas em Turcato. Com esse conjunto de dados não foi possível identificar qualquer relação funcional entre vazão e concentração em nível de significância razoável. Uma vez que em valores absolutos de vazão nenhuma associação clara entre as variáveis foi determinada, buscou-se avaliar a vazão em termos de permanência.

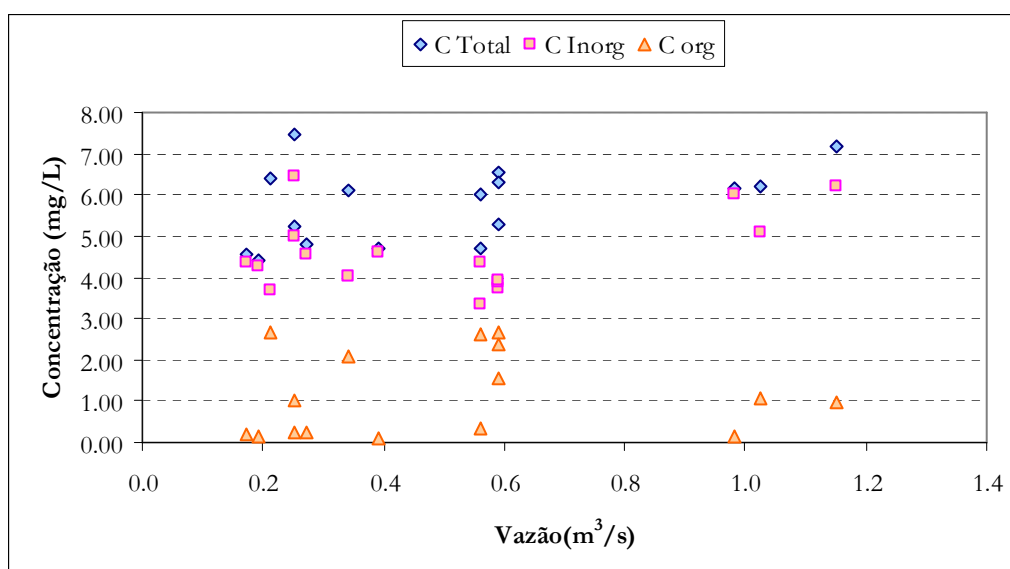


Figura 5.4 Concentração de carbono x Vazão em Turcato

A Figura 5.5 apresenta os pares de concentração de carbono (orgânico, inorgânico e total) e vazão para as amostras realizadas em Turcato. Neste caso, também não foi possível

determinar uma relação funcional razoável entre as variáveis. É possível perceber que as amostras apresentam a maior parte da cobertura na faixa de vazão com permanência entre 90% e 50%, o que significa em termos gerais que as amostras são mais representativas para as vazões baixas e vazões médias – ou mediana, por definição da permanência.

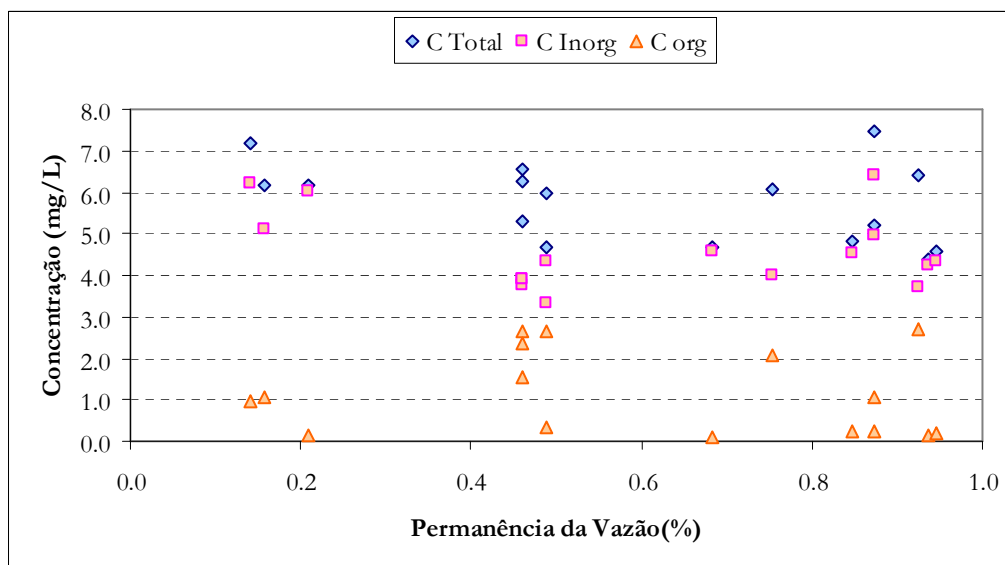


Figura 5.5 Concentração de carbono x Permanência da Vazão em Turcato

5.1.2 Bacia do Rio Taboão

Em Taboão a concentração de carbono total variou entre 4.50 e 8.18 mg/L, com média de 6.20 mg/L. O carbono inorgânico variou entre 3.17 e 7.01 mg/L, com média de 4.83 mg/L, e representou a maior parcela do carbono total, cerca de 78% do total. O carbono orgânico variou entre 0.03 e 2.50 mg/L, com média de 1.38 mg/L. A Tabela 5.2 resume os valores utilizados para estimativa das cargas de carbono orgânico e inorgânico em Taboão representados na Figura 5.6.

Tabela 5.2 Concentrações observadas e cargas estimadas de carbono em Taboão

| Data | Concentração (mg/L) | | | Vazão (m ³ /s) | Carga Média Mensal (kg/mês) | | |
|--------|---------------------|------------|---------|---------------------------|-----------------------------|--------------|---------|
| | C inorgânico | C orgânico | C total | | C inorgânico | C orgânico | C total |
| jul/08 | 4.71 | 0.89 | 5.6 | 0.96 | 11701.5(84%) | 2217(16%) | 13918.5 |
| ago/08 | 3.57 | 2.41 | 5.98 | 1.11 | 10274.2(60%) | 6931(40%) | 17205.2 |
| set/08 | 6.55 | 1.52 | 8.06 | 0.991 | 16812(81%) | 3891.5(19%) | 20703.5 |
| out/08 | 3.86 | 2.18 | 6.04 | 2.39 | 23930.8(64%) | 13486.3(36%) | 37417.1 |
| nov/08 | 5.53 | 1.25 | 6.78 | 2.35 | 33653.9(82%) | 7620.1(18%) | 41274 |
| dez/08 | 3.64 | 2.5 | 6.15 | 2.31 | 21806.5(59%) | 14986.8(41%) | 36793.3 |
| jan/09 | 4.39 | 1.37 | 5.66 | 1.29 | 14683.9(76%) | 4565.9(24%) | 19249.8 |

| | | | | | | | |
|--------------|------|------|------|-------|--------------|--------------|---------|
| fev/09 | 4.48 | 0.03 | 4.5 | 0.995 | 11545.7(99%) | 64.5(1%) | 11610.2 |
| mar/09 | 3.6 | 2.5 | 6.1 | 0.728 | 6802.2(59%) | 4710.9(41%) | 11513.1 |
| abr/09 | 5.06 | 0.56 | 5.63 | 0.567 | 7443.7(90%) | 827.6(10%) | 8271.3 |
| mai/09 | 5.95 | 1.9 | 7.86 | 2.115 | 32626.5(76%) | 10431.5(24%) | 43058 |
| jun/09 | 4.6 | 0.64 | 5.24 | 0.517 | 6161(88%) | 858.3(12%) | 7019.3 |
| jul/09 | 7.01 | 1.18 | 8.19 | 0.785 | 14251.7(86%) | 2408.8(14%) | 16660.5 |
| ago/09 | 6.06 | 0.2 | 6.26 | 1.954 | 30678.1(97%) | 1018.2(3%) | 31696.3 |
| set/09 | 5.06 | 0.95 | 6 | 2.034 | 26651.2(84%) | 4982.3(16%) | 31633.4 |
| out/09 | 3.17 | 1.97 | 5.13 | 2.89 | 23735.7(62%) | 14717.8(38%) | 38453.4 |
| média | 4.83 | 1.38 | 6.20 | 1.499 | 18297.4(75%) | 5857.4(25%) | 24154.8 |
| mínimo | 3.17 | 0.03 | 4.50 | 0.517 | 6161.0 | 64.5 | 7019.3 |
| máximo | 7.01 | 2.50 | 8.19 | 2.890 | 33653.9 | 14986.8 | 43058.0 |
| desv. padrão | 1.15 | 0.81 | 1.05 | 0.771 | 9381.4 | 5067.9 | 12679.6 |
| CV | 0.24 | 0.59 | 0.17 | 0.51 | 0.51 | 0.87 | 0.52 |

As cargas médias mensais variaram em duas e três ordens de grandeza, para as frações inorgânica e orgânica respectivamente e são apresentadas na Figura 5.6. Em Taboão, a fração orgânica representou em média 25% dos fluxos totais.

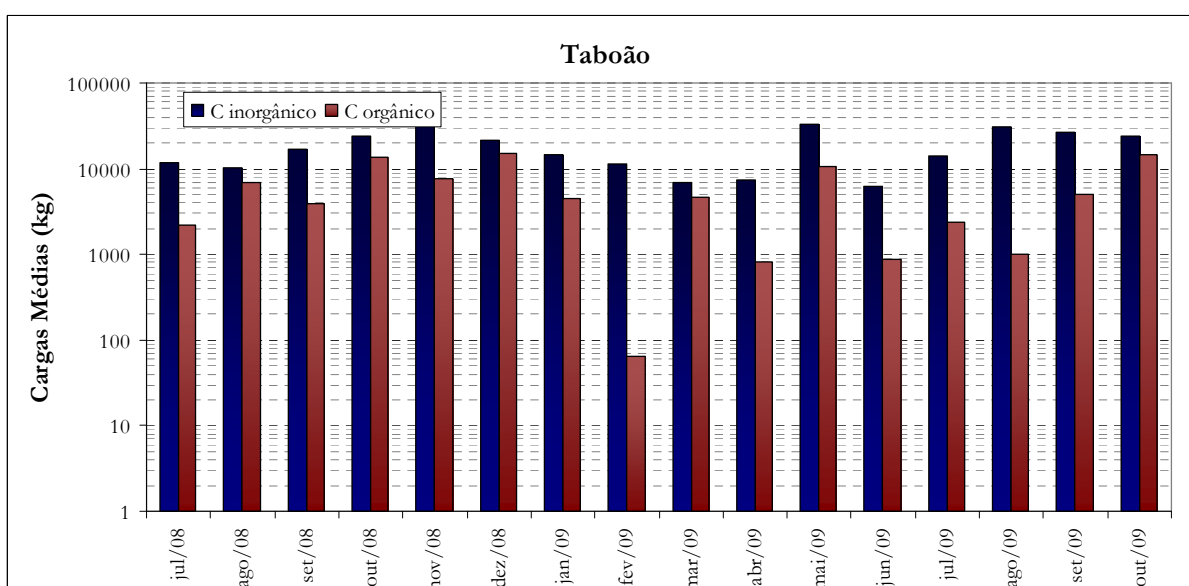


Figura 5.6 Cargas médias mensais de carbono orgânico e inorgânico de Taboão

A Figura 5.7 apresenta a série temporal de dados de vazão e carbono em Taboão. Observando a série é possível perceber que as concentrações orgânica e inorgânica aparentemente apresentam uma relação inversa, porém a conforme a Figura 5.8, essa relação tem baixo valor ($r^2=0.21$). Pouco pode se afirmar sobre a relação vazão-concentração com base na análise gráfica.

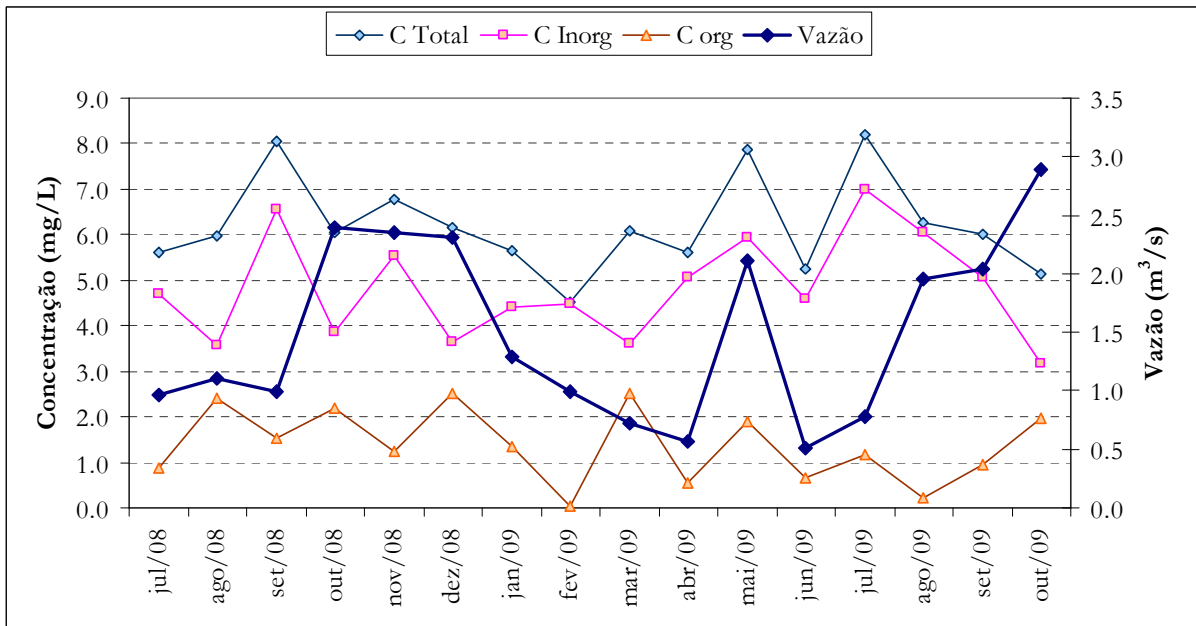


Figura 5.7 Série temporal de dados de vazão e carbono em Taboão

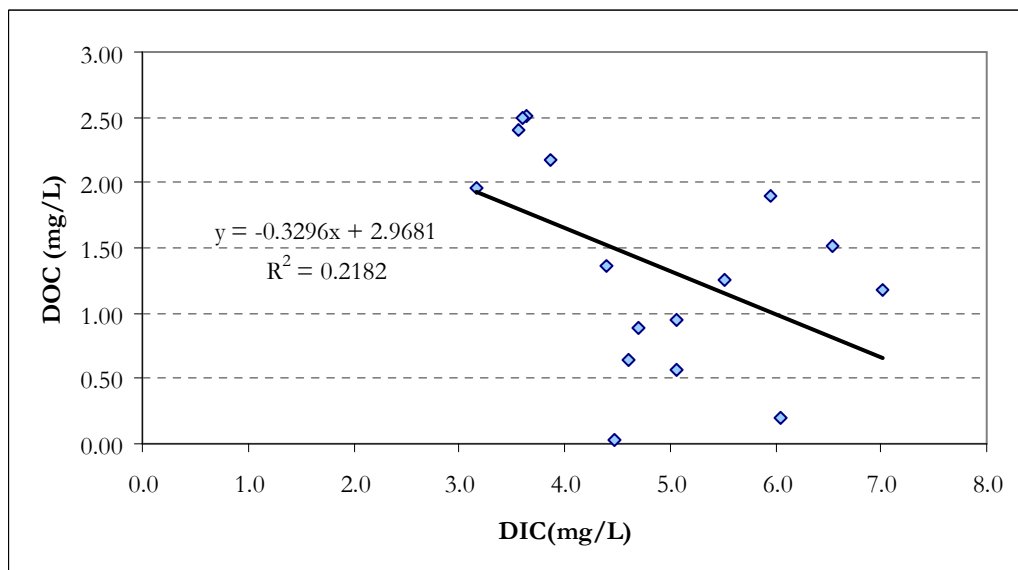


Figura 5.8 Relação DOC-DIC em Taboão

A Figura 5.9 apresenta os pares de concentração de carbono (orgânico, inorgânico e total) e vazão para as amostras realizadas em Taboão. Com esse conjunto de dados não foi possível identificar qualquer relação funcional entre vazão e concentração em nível de significância razoável.

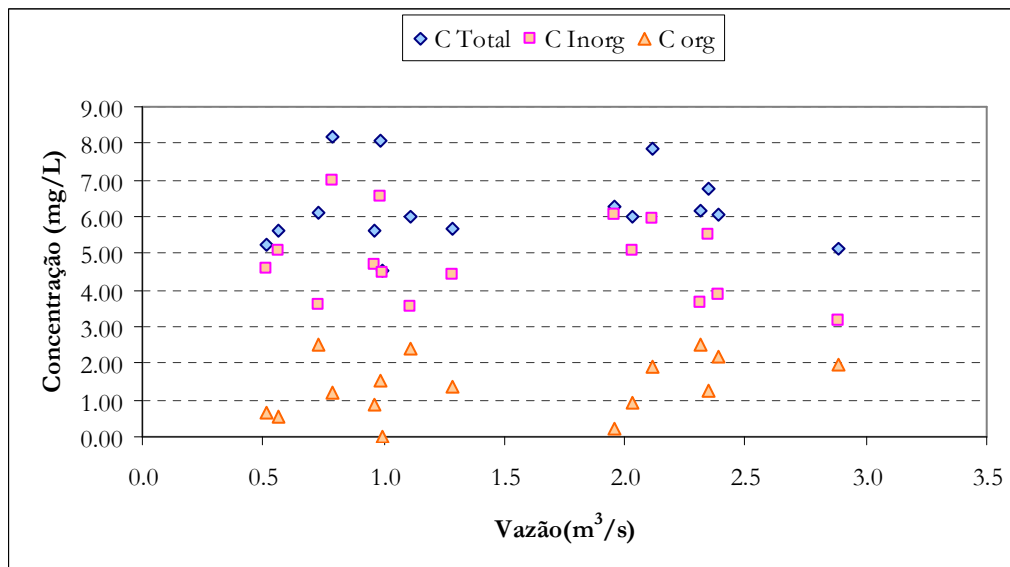


Figura 5.9 Concentração de carbono x Vazão em Taboão

Considerando a ausência de associação entre vazão absoluta e concentração de carbono, buscou-se avaliar a concentração de carbono com a vazão em termos de permanência. A Figura 5.10 apresenta os pares de concentração de carbono (orgânico, inorgânico e total) e permanência da vazão para as amostras realizadas em Taboão. Neste ponto também não foi possível determinar uma relação funcional razoável entre essas variáveis. É possível perceber que as amostras apresentam uma faixa de cobertura da vazão com permanência relativamente larga indo desde 99% a 40%. Para permanências abaixo de 40% houve somente duas amostras, portanto ainda existe uma lacuna no que diz respeito às concentrações de carbono em vazões elevadas.

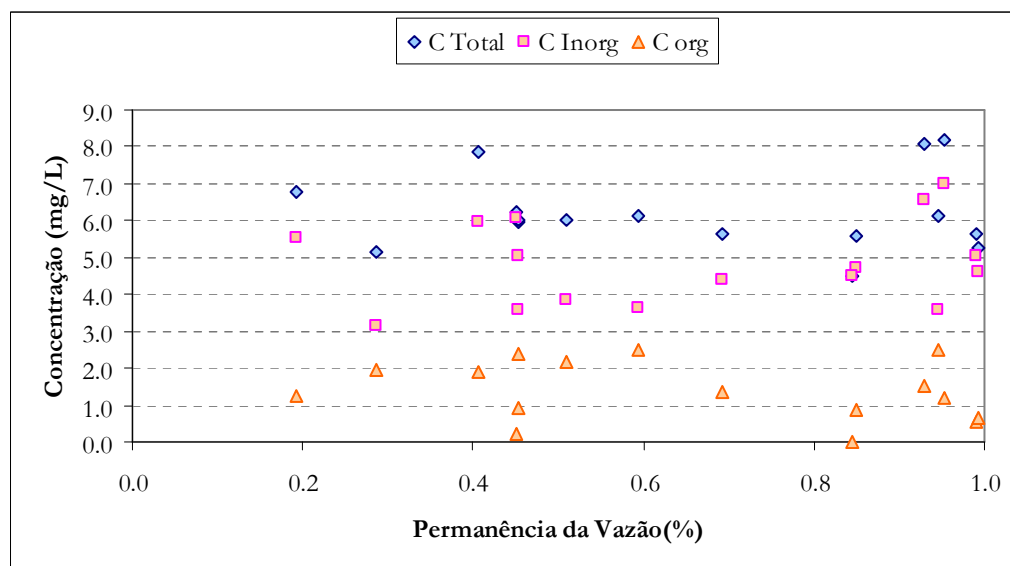


Figura 5.10 Concentração de carbono x Permanência da vazão em Taboão

A Tabela 5.3 mostra que a carga total específica anual de carbono foi de 3293.8 kgC/ano.km² e 4859.5 kgC/ano.ha, totalizando um fluxo médio anual de 289857 kgC/ano e 94761 kgC/ano, respectivamente, em Taboão e Turcato. Em ambos os pontos, a fração inorgânica de carbono apresentou maior percentual, com média de 78% do total. Mortatti et al. (2006) estudaram fluxos de carbono no rio Piracicaba, em São Paulo, e estimaram cargas de 3.68 tC/ano.km² e 3.22 tC/ano.km², para o carbono inorgânico e orgânico, respectivamente. O percentual foi de 53% para a fração inorgânica e 47% para a orgânica, sendo que essa esteve associada principalmente à poluição doméstica. Oliveira et al. (2006) estimaram uma carga de cerca de 86 tC/ano.km², sendo 74,7% carbono inorgânico, no rio Tietê, em São Paulo. No Igarapé Asu de águas escuras, ricas em matéria orgânica, na Amazônia, as cargas variaram entre 9 e 23 tC/ano.km² (Waterloo et al. 2006).

Tabela 5.3 Carga de carbono anual média em Taboão e Turcato

| Cargas | Taboão | | | Turcato | | |
|------------------------|--------------|------------|---------|--------------|------------|---------|
| | C inorgânico | C orgânico | C total | C inorgânico | C orgânico | C total |
| Kg | 292758 | 93718 | 386476 | 101220 | 25127 | 126348 |
| Kg/ano | 219568 | 70288 | 289857 | 75915 | 18845 | 94761 |
| Kg/ano.km ² | 2495.10 | 798.74 | 3293.84 | 3893.11 | 966.45 | 4859.56 |
| Kg/ano.ha | 24.95 | 7.99 | 32.94 | 38.93 | 9.66 | 48.60 |
| (%) | 76% | 24% | 100% | 80% | 20% | 100% |

Globalmente, o fluxo de carbono orgânico em rios varia entre 1 e 500 kgC/ha.ano, porém na maior parte das bacias as taxas variam entre 10 e 100 kgC/ha.ano, com uma média de 56.2 kgC/ha.ano, sendo que ecossistemas de banhados e florestas boreais tendem a apresentar as maiores taxas (Hope et al. 2004). Nas bacias do Potiribu as estimativas de cargas médias mensais de carbono orgânico e inorgânico apresentaram alta variabilidade (CV: 0.51 a 0.95) com valores em três ordens de grandeza. As estimativas dos fluxos anuais de carbono nas bacias do Potiribu apresentaram valores abaixo da média global, e na mesma ordem de grandeza daqueles estimados na bacia do rio Piracicaba, porém os percentuais de carbono orgânico foram mais baixos. Nos dois estudos realizados em São Paulo (Mortatti, 2006; Oliveira, 2006), os autores acreditam que a fração inorgânica decorre principalmente de processos biogênicos e alterações da rocha (dissolução de silicatos e carbonatos). Para o rio Tietê, foi sugerido que o aporte pluvial, contribuição antrópica e dissolução de rochas contribuíram respectivamente em, 6.7%, 45.5% e 47.8%, do total de carbono inorgânico dissolvido, em termos de íons bicarbonato. Em bacias de cabeceira da Amazônia, foram

observadas altas concentrações de dióxido de carbono variando entre $5000\mu\text{atm}$ e $20000\mu\text{atm}$ o que representa uma supersaturação de cerca de 10 a 100 vezes, em relação à atmosfera (Krusche et al. 2009). De acordo com Johnson et al. (2007), nesses casos 77% do carbono transportado pela água é oriundo de processos respiratórios da fração no solo e dissolução da fração inorgânica na água. Dessa forma, é possível que a maior proporção da fração inorgânica nas águas das bacias do Potiribu representem processos de respiração do solo e zona hiporréica.

Considerando que os registros das amostragens no Potiribu ocorreram, em geral, em períodos cuja vazão não corresponde ao extremo de alta vazão da curva de permanência e o espaçamento mensal, os fluxos de carbono apresentados podem estar subestimados. Por outro lado, os dados utilizados permitiram uma estimativa da magnitude média dos fluxos. Hinton et al. (1997; 1998) demonstraram que as cargas exportadas de DOC variam muito para diferentes eventos de chuva e que estimativas geradas a partir de médias ou ponderações utilizando dados semanais chegaram a subestimar os fluxos em até 22%. De fato, a amostragem durante eventos de chuva e cheias são necessárias para realizar estimativas acuradas. Grieve (1984) verificou que cerca de 50% do total de DOC exportado de uma bacia com campos abertos ocorreu durante condições de vazão elevada, de permanência da ordem de 5-6%. Johnson et al. (2003) quantificaram os fluxos em quatro microbacias do Rio Juruena na cabeceira do rio Tapajós e verificaram que a fração de DOC representou 59% do fluxo anual de carbono, sendo que 65% do fluxo ocorreu durante a estação chuvosa. No mesmo estudo a concentração de DOC no rio apresentou correlação positiva com a quantidade de matéria vegetal na liteira dos períodos secos indicando que a degradação de material alóctone é importante para o rio Juruena. Waterloo et al. (2006) verificou que em um igarapé de águas escuras no rio Negro, a exportação de carbono durante a estação chuvosa compreendeu 80% do total. A concentração de DOC variou entre 8 mg/L, em baixas vazões, e 27 mg/L para eventos de escoamento rápido em curto tempo. Sendo assim, uma alternativa para melhorar as estimativas é realizar a amostragem durante eventos de cheia e de curta duração.

Nesse estudo, não foram avaliadas separadamente as frações dissolvida e particulada, porém a fração particulada normalmente compreende cerca de 10% do total de carbono orgânico exportado dos rios (Hope et al. 2004). A razão DOC:POC varia bastante, mas tende a apresentar valores menores à medida que o rio aumenta de tamanho quando a importância relativa da fração particulada se torna mais evidente (Meybeck 1981, Thurman, 1985 apud Allan 1995).

5.2 MODELO PARA DINÂMICA DE CARBONO EM BACIAS HIDROGRÁFICAS: MGB-IPH-C

Para a simulação da dinâmica do carbono em bacias hidrográficas, um modelo de balanço de carbono no solo e água foi acoplado ao modelo hidrológico MGB-IPH e denominado MGB-IPH-C. A estrutura conceitual do modelo de balanço de carbono apresenta semelhanças ao modelo INCA-C (Futter et al. 2007, Futter et al. 2008, Futter et al. 2009) e ao modelo de processos descrito no capítulo II e é representado pela Figura 5.11

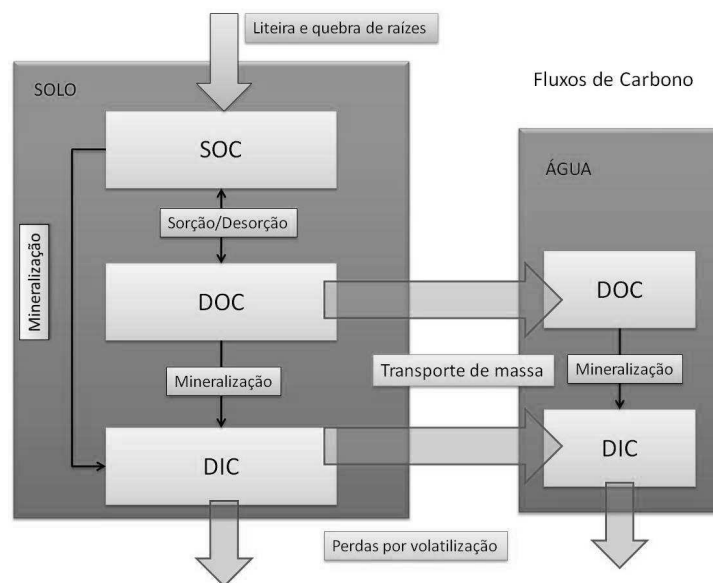


Figura 5.11 Estrutura do modelo para os fluxos de carbono do solo para a água

O modelo desenvolvido MGB-IPH-C simula o armazenamento de carbono orgânico nos ambientes terrestre e aquático, bem como os processos de transformação dentro dos compartimentos e a transferência entre os mesmos, em intervalo de tempo diário. O MGB-IPH-C simula o fluxo de carbono orgânico no solo (SOC), carbono orgânico dissolvido (DOC) e carbono inorgânico dissolvido (DIC) em dois compartimentos, a saber, solo e águas superficiais.

5.2.1 Modelagem do Carbono no Solo

A modelagem das variações da massa de carbono no solo é realizada no mesmo nível das URHs do modelo MGB, tal que os parâmetros referentes às transformações (e.g. sorção e

mineralização) podem ser ajustadas de acordo com o tipo de solo e cobertura vegetal.

A entrada de carbono orgânico na camada superior do solo é simplificada por um termo que representa a quebra de material orgânico na superfície (liteira), raízes no solo ou aporte agrícola. No compartimento solo são representados os processos de sorção e dessorção que transformam carbono orgânico entre DOC e SOC e de mineralização das formas orgânicas para inorgânica que pode ser transferida para atmosfera, por difusão. DOC e DIC são transportados (advectivamente) pelo movimento do solo para as águas superficiais. As variações de carbono no solo são resolvidas de forma independente para cada mini-bacia e URH, utilizando o conjunto de equações diferenciais descritos a seguir. A solução é obtida numericamente utilizando um esquema tipo Runge-Kutta de 4ª ordem explícito.

Equação 5.1

$$\begin{aligned}\frac{\partial SOC_{ij}}{\partial t} &= (LF + RB) + m(k_{DS}DOC_{ij} - k_{DS}SOC_{ij} - k_{SI}SOC_{ij}) \\ \frac{\partial DOC_{ij}}{\partial t} &= m(k_{SD}SOC_{ij} - k_{DS}DOC_{ij} - k_{DI}DOC_{ij}) - adv_{DOCij}DOC_{ij} \\ \frac{\partial DIC_{ij}}{\partial t} &= m(k_{SI}SOC_{ij} + k_{DI}DOC_{ij}) - adv_{DICij}DIC_{ij} - K_L(DIC_{ij} - DIC_{sat})\end{aligned}$$

Onde: SOC, DOC e DIC são as massas [kg/km²] de carbono orgânico agregado ao solo, orgânico dissolvido e inorgânico dissolvido em cada URH *j*, da mini-bacia *I*; os parâmetros LF e RB, são os termos fonte do sistema, e representam o aporte de carbono de material da liteira e raízes, respectivamente; os termos *k_{SD}*, *k_{DS}*, *k_{DI}*, *k_{SI}* representam as taxas [dia⁻¹] de dessorção (SOC-DOC), sorção (DOC-SOC), mineralização (DOC-DIC, SOC-DIC); *K_L* [m.dia⁻¹] é a velocidade “pistão” de DIC, na forma gasosa para a atmosfera; *DIC_{sat}* é um parâmetro que representa a saturação de DIC no solo. O termo *m* [-] condiciona ajustes de temperatura e umidade sobre as reações, conforme descrição abaixo; os termos *adv_{DOCij}* e *adv_{DICij}* condicionam o fluxo de carbono pelo escoamento e será descrito mais adiante.

5.2.1.1 Temperatura e Umidade

As reações de transformação no solo são dependentes da temperatura, condição de umidade do solo e fluxo de água. O efeito da temperatura é realizado utilizando um modelo tipo Q₁₀, tal que quanto maior a temperatura, maior a velocidade das reações e, portanto maior as taxas de transformação, representado pela Equação 5.2 (Chapra, 1997).

Equação 5.2

$$f(T) = \theta^{(T - T_{ref})}$$

Onde: T, é a temperatura do solo [°C]; θ é um coeficiente de ajuste [-] que costuma variar entre 1,01 e 1,03; e T_{ref} , é uma temperatura de referência, usualmente 20°C.

A temperatura do solo pode ser estimada de forma simplificada utilizando o modelo descrito em Rankinen et al. (2004), basicamente, um modelo de difusão de calor. Considera-se que a temperatura na superfície é igual à do ar e que a temperatura no final da camada é igual à temperatura no centro da camada, implicando que não há fluxo de calor para a camada de baixo.

O efeito da umidade é realizado feito utilizando um modelo linear, que considera a existência de um limite máximo de déficit de umidade do solo (SMD_{max}) para ocorrência dos processos. A equação de ajuste pela umidade é dada pela Equação 5.3

$$f(W) = 1 - \frac{\min(SMD, SMD_{max})}{SMD_{max}}$$

Equação 5.3

Onde: SMD é um indicador de déficit de umidade do solo, calculado pela diferença entre o armazenamento no intervalo (W^t) e o armazenamento máximo (W_{max}); SMD_{max} é parâmetro do modelo de carbono.

Considerando esses dois fatores, o ajuste total m para as taxas de transformação é dado por:

$$m = f(T) \cdot f(W)$$

Equação 5.4

5.2.1.2 Taxas de Fluxo Advectivo de Carbono do Solo

Os termos de fluxo advectivo (adv_{DOC} e adv_{DIC}) do solo são utilizados como estimadores das cargas que saem do solo. Neste ponto é importante lembrar que o modelo foi adaptado para se adequar a estrutura do modelo hidrológico, considerando as etapas de balanço vertical que ocorre e nível de URH e reservatórios lineares, em nível de mini-bacia, foi levada em consideração. As taxas de fluxo, em cada URH j , são estimadas com base na razão entre o escoamento gerado e o volume armazenado, conforme as equações abaixo:

$$adv_{DOCij} = \frac{\xi_{doc,sup} D_{sup} + \xi_{doc,int} D_{int} + \xi_{doc,bas} D_{bas}}{W_{ij}}$$

Equação 5.5

$$adv_{DICij} = \frac{\xi_{dic,sup} D_{sup} + \xi_{dic,int} D_{int} + \xi_{dic,bas} D_{bas}}{W_{ij}}$$

Onde: adv_{DOC} e adv_{DIC} , são taxas de fluxo [dia^{-1}] para DOC e DIC; D_{supij} , D_{intij} , D_{basij} [mm/dia], são os volumes escoados no balanço vertical; W_{ij} [mm] é o armazenamento de água no solo; os coeficientes $\xi_{x,y}$ são coeficientes de fluxo por espécie x e caminho de água (superficial, sub-superficial, subterrâneo) y .

As cargas de carbono que são transferidas do solo para a água escoada na bacia podem ser separadas por caminho de escoamento, conforme as equações abaixo, que nada mais são do que os termos parciais das taxas totais de fluxo advectivo de carbono orgânico e inorgânico (Equação 5.5):

Equação 5.6

$$\frac{\partial LDOC_{sup}}{\partial t} = - \frac{\xi_{doc,sup} D_{sup}}{W_{ij}} DOC$$

$$\frac{\partial LDOC_{int}}{\partial t} = - \frac{\xi_{doc,int} D_{int}}{W_{ij}} DOC$$

$$\frac{\partial LDOC_{bas}}{\partial t} = - \frac{\xi_{doc,bas} D_{bas}}{W_{ij}} DOC$$

$$\frac{\partial LDIC_{sup}}{\partial t} = - \frac{\xi_{dic,sup} D_{sup}}{W_{ij}} DIC$$

$$\frac{\partial LDIC_{int}}{\partial t} = - \frac{\xi_{dic,int} D_{int}}{W_{ij}} DIC$$

$$\frac{\partial LDIC_{bas}}{\partial t} = - \frac{\xi_{dic,bas} D_{bas}}{W_{ij}} DIC$$

Onde: $LDOC_{supij}$, $LDOC_{intij}$, $LDOC_{basij}$, $LDIC_{supij}$, $LDIC_{intij}$, $LDIC_{basij}$, [$\text{kg}/\text{km}^2 \cdot \text{dia}$] são estimativas das cargas de DOC e DIC pelos três caminhos de escoamento. Essas equações são acopladas ao sistema dado pela Equação 5.1 durante a solução numérica.

5.2.2 Modelagem do Carbono na Água

Considera-se que o carbono se desloca na bacia, conforme o fluxo de água, portanto, o modelo de carbono foi estruturado para responder aos processos de amortecimento e translação, utilizando os volumes e vazão dos reservatórios lineares para caracterizar as

concentrações e cargas que aportam na rede de drenagem.

Na etapa de enchimento dos reservatórios lineares, a carga de carbono que sai do solo calculada anteriormente é utilizada para atualizar uma concentração característica de carbono nas três parcelas de escoamento de água, a saber, superficial, sub-superficial e subterrâneo para o intervalo de tempo, considerando os volumes de água em cada reservatório linear. Dessa forma, o efeito das cargas provenientes do solo sob a concentração característica da água vai depender da área de contribuição de cada URH. Matematicamente a concentração característica é estimada pelas equações abaixo semelhantes a um modelo de diluição. A notação para os intervalos de tempo ($k-1$, k' , k) seguem conforme descrição do modelo hidrológico.

Equação 5.7

$$CDOC_{sup}^{k'} = \frac{MDOC_{sup}^{k-1} + \left(\sum_{j=1}^{NB} LDOC_{sup_{i,j}} \cdot \text{ÁreaURH}_{ij} \right)}{V_{sup}^{k'}} = \frac{MDOC_{sup}^{k'}}{V_{sup}^{k'}}$$

$$CDOC_{int}^{k'} = \frac{MDOC_{int}^{k-1} + \left(\sum_{j=1}^{NB} LDOC_{int_{i,j}} \cdot \text{ÁreaURH}_{ij} \right)}{V_{int}^{k'}} = \frac{MDOC_{int}^{k'}}{V_{int}^{k'}}$$

$$CDOC_{bas}^{k'} = \frac{MDOC_{bas}^{k-1} + \left(\sum_{j=1}^{NB} LDOC_{bas_{i,j}} \cdot \text{ÁreaURH}_{ij} \right)}{V_{bas}^{k'}} = \frac{MDOC_{bas}^{k'}}{V_{bas}^{k'}}$$

$$CDIC_{sup}^{k'} = \frac{MDIC_{sup}^{k-1} + \left(\sum_{j=1}^{NB} LDIC_{sup_{i,j}} \cdot \text{ÁreaURH}_{ij} \right)}{V_{sup}^{k'}} = \frac{MDIC_{sup}^{k'}}{V_{sup}^{k'}}$$

$$CDIC_{int}^{k'} = \frac{MDIC_{int}^{k-1} + \left(\sum_{j=1}^{NB} LDIC_{int_{i,j}} \cdot \text{ÁreaURH}_{ij} \right)}{V_{int}^{k'}} = \frac{MDIC_{int}^{k'}}{V_{int}^{k'}}$$

$$CDIC_{bas}^{k'} = \frac{MDIC_{bas}^{k-1} + \left(\sum_{j=1}^{NB} LDIC_{bas_{i,j}} \cdot \text{ÁreaURH}_{ij} \right)}{V_{bas}^{k'}} = \frac{MDIC_{bas}^{k'}}{V_{bas}^{k'}}$$

Onde: $CDOC_{sup}^{k'}$, $CDOC_{int}^{k'}$, $CDOC_{bas}^{k'}$, são as concentrações características da bacia DOC[kg/m³] após o enchimento; $CDIC_{sup}^{k'}$, $CDIC_{int}^{k'}$, $CDIC_{bas}^{k'}$, são as concentrações características da bacia DIC[kg/m³] após o enchimento; $MDOC_{sup}^{k-1}$, $MDOC_{int}^{k-1}$, $MDOC_{bas}^{k-1}$, são as massas características de DOC da bacia [kg/m³] antes do enchimento; $MDIC_{sup}^{k-1}$, $MDIC_{int}^{k-1}$, $MDIC_{bas}^{k-1}$, são as massas características de DIC da bacia [kg/m³]

antes do enchimento; ÁreaURH_{ij} é a área [km²] de cada URHs; $MDOC_{\text{sup}}^{k'}$, $MDOC_{\text{int}}^{k'}$, $MDOC_{\text{bas}}^{k'}$, são as massas características da bacia DOC [kg/m³] após o enchimento; $MDIC_{\text{sup}}^{k'}$, $MDIC_{\text{int}}^{k'}$, $MDIC_{\text{bas}}^{k'}$, são as concentrações características da bacia DIC [kg/m³] após do enchimento; ÁreaURH_{ij} é a área [km²] de cada URH.

Considerando a concentração constante durante o esvaziamento, a massa no final do período é função do volume final, ou seja:

Equação 5.8

$$MDOC_{\text{sup}}^k = CDOC_{\text{sup}}^k \cdot V_{\text{sup}}^k$$

$$MDOC_{\text{int}}^k = CDOC_{\text{int}}^k \cdot V_{\text{int}}^k$$

$$MDOC_{\text{bas}}^k = CDOC_{\text{bas}}^k \cdot V_{\text{bas}}^k$$

$$MDIC_{\text{sup}}^k = CDIC_{\text{sup}}^k \cdot V_{\text{sup}}^k$$

$$MDIC_{\text{int}}^k = CDIC_{\text{int}}^k \cdot V_{\text{int}}^k$$

$$MDIC_{\text{bas}}^k = CDIC_{\text{bas}}^k \cdot V_{\text{bas}}^k$$

A carga de carbono que chega a rede de drenagem é estimada pela diferença de massa no início e no fim da etapa de esvaziamento de cada reservatório linear.

Equação 5.9

$$WDOC_{\text{sup}} = MDOC_{\text{sup}}^{k'} - MDOC_{\text{sup}}^k$$

$$WDOC_{\text{int}} = MDOC_{\text{int}}^{k'} - MDOC_{\text{int}}^k$$

$$WDOC_{\text{bas}} = MDOC_{\text{bas}}^{k'} - MDOC_{\text{bas}}^k$$

$$WDIC_{\text{sup}} = MDIC_{\text{sup}}^{k'} - MDIC_{\text{sup}}^k$$

$$WDIC_{\text{int}} = MDIC_{\text{int}}^{k'} - MDIC_{\text{int}}^k$$

$$WDIC_{\text{bas}} = MDIC_{\text{bas}}^{k'} - MDIC_{\text{bas}}^k$$

No rio, a carga estimada é alocada de forma concentrada na seção de montante de cada mini-bacia, utilizando o modelo de diluição, semelhante ao IPH-MGBq. Uma vez atualizadas as condições de contorno, utiliza-se a equação de transporte unidimensional, conforme o módulo de qualidade de água, para propagar as formas de carbono na rede de drenagem.

Considera-se a cinética de mineralização (microbiana e fotolítica) de DOC para DIC que, por sua vez, pode ser perdido por volatilização para a atmosfera. Na água, os termos de cinética também são lineares e ajustados pela temperatura. Essa abordagem simplificada dos processos entre carbono orgânico e inorgânico, visa representar a degradação de matéria orgânica de origem alóctone e degradação lenta. As variações de DOC e DIC na água são

expressos por:

Equação 5.10

$$\frac{\partial(A \cdot DOC)}{\partial t} = \frac{\partial(Q \cdot DOC)}{\partial x} - f(T) \cdot A \cdot (K_{DIB} + K_{DIP})DOC$$

$$\frac{\partial(A \cdot DIC)}{\partial t} = \frac{\partial(Q \cdot DIC)}{\partial x} + f(T) \cdot A \cdot (K_{DIB} + K_{DIP})DOC - A \cdot K_{pis} (DIC - DIC_{sat})$$

5.2.3 Parametrização do Modelo de Carbono

Os parâmetros utilizados para as simulações com o módulo de carbono foram definidos na Tabela 5.4. Na prática, uma faixa de variação para valores para os parâmetros só poderá ser definida a partir da calibração do modelo em diferentes aplicações. Considerando que parte da estrutura conceitual do modelo segue a do INCA-C (Futter et al. 2007; 2008; 2009), os valores apresentados abaixo e utilizados na calibração inicial do modelo foram retirados da mesma fonte. A importância dessa tabela não está de fato nos valores em si, mas na magnitude dos parâmetros e seu significado dentro do todo. Por exemplo, o parâmetro k_{SD} que representa a taxa de dessorção do solo é da ordem de 10^{-5} dia^{-1} , duas ordens de grandeza maior do que a taxa de mineralização direta de carbono orgânico do solo para inorgânico (k_{SI}) e cerca de três ordens de grandeza menor do que a taxa de mineralização da fração orgânica dissolvida para a inorgânica. Todos os parâmetros da tabela foram descritos nas seções anteriores.

Tabela 5.4 Parâmetros do módulo de carbono no solo e água

| Parâmetros | Valor [unidade] | Descrição |
|-------------|---------------------------------|---|
| SMD_{MAX} | 65%-80% | Déficit de umidade limite para ajuste de cinética |
| k_{SI} | 0.0000005 [dia^{-1}] | Taxa de transformação: SOC-DIC (mineraliz.) - solo |
| k_{SD} | 0.00006 [dia^{-1}] | Taxa de transformação: SOC-DOC (dessorção) – solo |
| k_{DS} | 0.060 [dia^{-1}] | Taxa de transformação: DOC-SOC(sorção) – solo |
| k_{DI} | 0.025 [dia^{-1}] | Taxa de transformação: DOC-DIC (mineraliz.) – solo |
| LF e RB | 0.5-2.0 [gC.m^{-1}] | Aporte de carbono via liteira e quebra de raízes – solo |
| K_L | 2.5 [m.dia^{-1}] | Velocidade pistão para perda de DIC – solo |
| DIC_{sat} | 12.0 [mg.L^{-1}] | Parâmetro de saturação de DIC – solo |
| ξ_{xy} | 0.01-1.00 [-] | Coeficientes de fluxo advectivo – solo |
| k_{DIB} | 0.065 [dia^{-1}] | Taxa de transformação: DOC-DIC (microbiano) – água |
| k_{DIP} | 0.025 [dia^{-1}] | Taxa de transformação: DOC-DIC (fotolítico) – água |
| K_{pis} | 0.5 [dia^{-1}] | Velocidade pistão para perda de DIC - água |

A quantidade de inicial de carbono do solo é uma entrada do modelo. Nesse estudo foi

utilizado como referência dados do IPCC (2007) apresentados na Tabela 5.5. Nesse caso, o que importa também é a magnitude dos valores.

Tabela 5.5 Quantidade de carbono em diferentes tipo de solo

| Tipo de cobertura vegetal | Quantidade média de carbono |
|---------------------------|-----------------------------|
| Campos verdes | 20 kgC.m ⁻² |
| Agricultura | 8 kgC.m ⁻² |
| Florestas | 12 kgC.m ⁻² |

5.3 ANÁLISE QUALITATIVA DO MODELO DE CARBONO

O modelo responde qualitativamente de forma esperada (Figura 5.12) reproduzindo os efeitos de acumulação e lavagem (“build-up e wash-off”). Nos períodos sem chuva, o aporte de carbono via liteira provoca o aumento nas concentrações de carbono no solo. Em condições apropriadas de umidade a solubilização do carbono é favorecida e, em resposta a eventos de chuva, essa fração pode ser transferida para os trechos de rio, aumentando a concentração no corpo de água (Figura 5.13). Uma vez removido o carbono acumulado no solo, o processo de lavagem em dias subsequentes se torna mais fraco devido ao aumento da retenção de carbono no solo e também pela menor disponibilidade de carbono, consequência das lavagens anteriores. A fração inorgânica apresentou uma taxa de aumento assintótica que depende da saturação no solo e da taxa de perda para a atmosfera. A fração orgânica tende a aumentar exponencialmente.

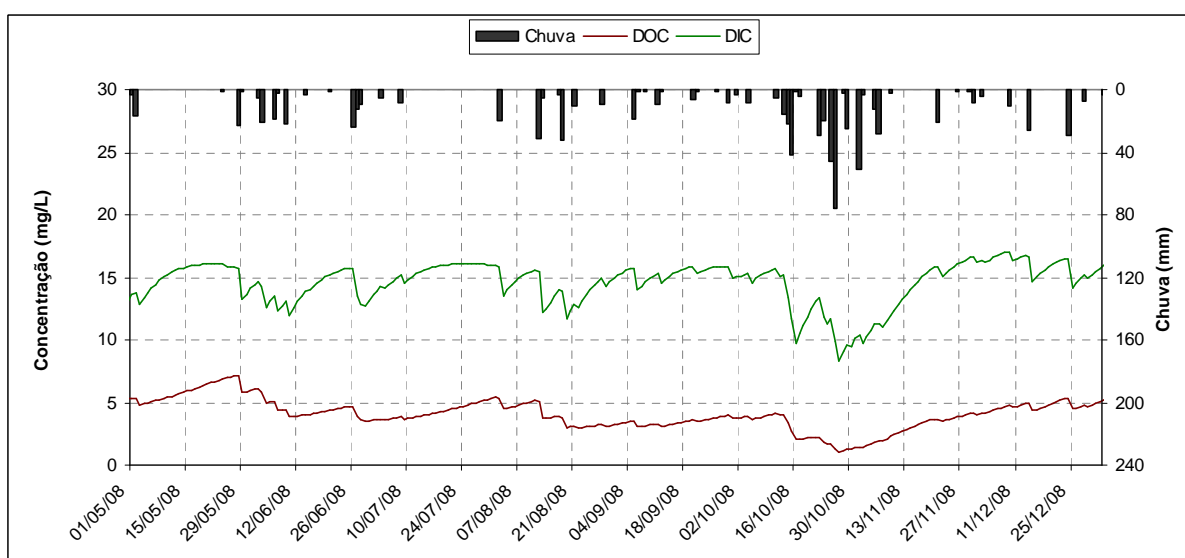


Figura 5.12 Exemplo hipotético da variação temporal do carbono dissolvido no solo obtido por simulação: efeitos de acumulação e lavagem após eventos de precipitação

Nos trechos de rio, o modelo consegue representar a variação nas concentrações de carbono devido às contribuições da bacia (Figura 5.13). A concentração varia conforme a entrada de água no sistema, tendo um aumento durante a subida do hidrograma e diminuição na recessão. Esse comportamento é esperado durante a lavagem de solos ricos em matéria orgânica e já foi observado (Hinton et al. 1998). Nos períodos de menor vazão, as variações na concentração de carbono no rio ficam mais sensíveis às contribuições subterrâneas e aos próprios processos biológicos, porém esses são pequenos em relação aos fluxos advectivos nos trechos de rio. As variações da fração inorgânica, em especial, é influenciada pelas trocas com a atmosfera. Após um período mais extenso de chuvas, a diminuição nas concentrações de carbono dissolvido no solo e, conseqüentemente, no escoamento pode apresentar um efeito diluidor no modelo que pode ser visualizado, por exemplo, no período simulado entre 15/10/2008 a 13/11/2008 para a simulação representada na Figura 5.13.

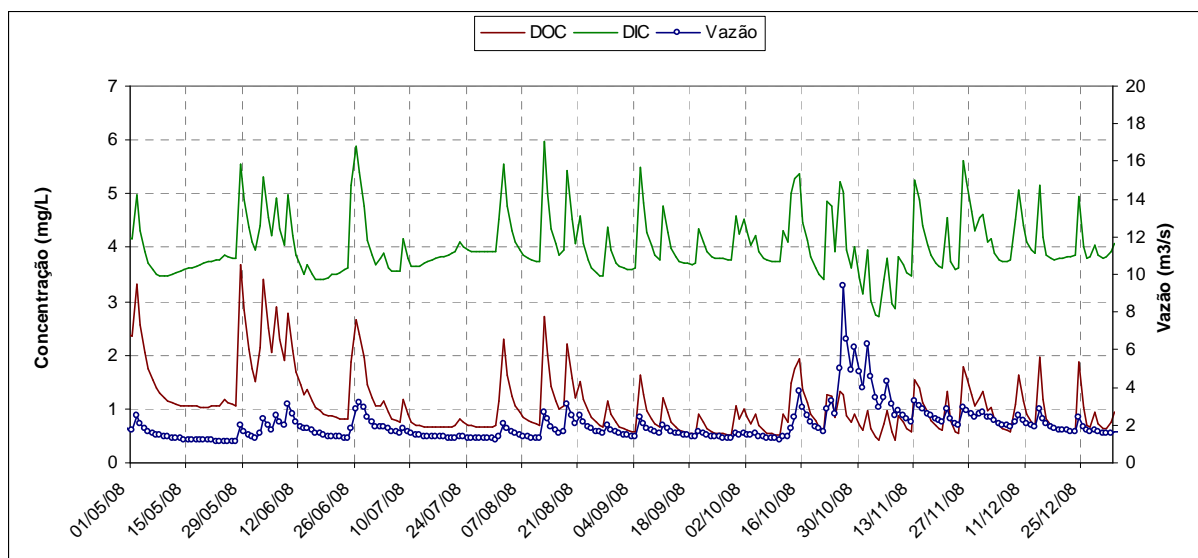


Figura 5.13 Exemplo hipotético da variação temporal de carbono dissolvido na água obtido por simulação

Por fim, a Figura 5.14 apresenta um exemplo de aplicação em potencial no que diz respeito à espacialização do carbono em uma bacia, uma vez que o modelo é distribuído. Nesse caso, a representação aponta que o carbono orgânico tende a se acumular e apresentar concentrações mais elevadas (tom mais escuro) em rios de maior porte (em bacias com maior área de drenagem), o que ocorre devido ao transporte de montante para jusante em conjunto com as baixas taxas de degradação. Até então esse exemplo, na bacia do Ijuí, possui caráter puramente ilustrativo, pois não se tem dados monitorados na mesma.

O comportamento do modelo vai depender dos valores atribuídos aos parâmetros citados anteriormente. A regulação dos patamares das concentrações de carbono tanto no solo

quanto na água, bem como a amplitude das variações depende da sensibilidade do sistema às mudanças nos parâmetros físico-químico-biológicos.

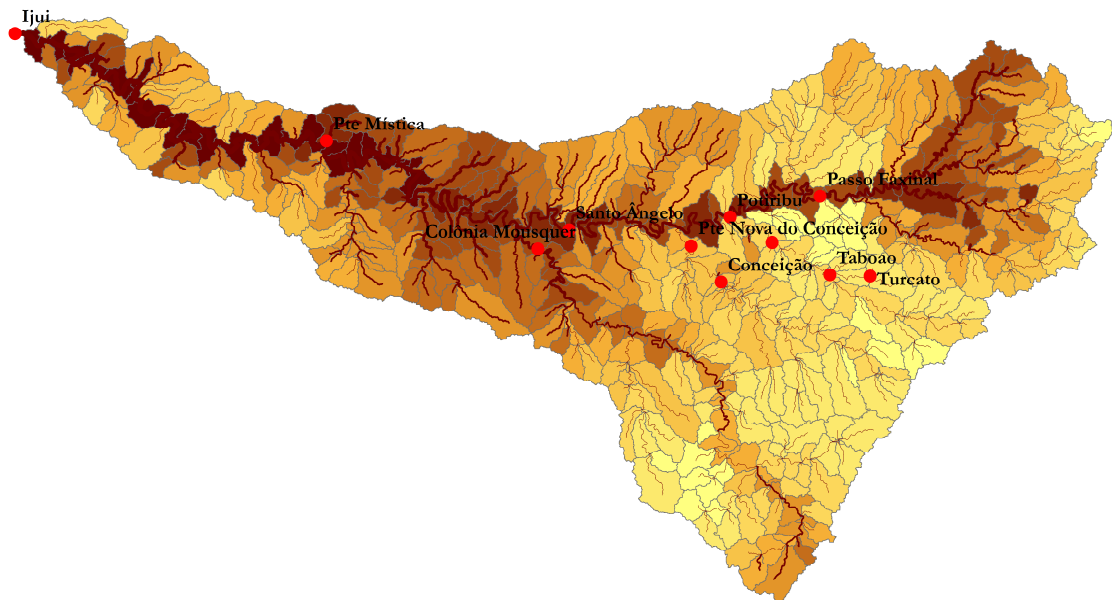


Figura 5.14 Exemplo hipotético de distribuição espacial de carbono orgânico (concentração) em rios numa bacia obtido por simulação

5.4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A análise de sensibilidade dos parâmetros e variáveis de entrada no modelo de carbono permite identificar quais deles provocam maiores interferências nas saídas do modelo e permite o melhor entendimento do comportamento geral do mesmo. Existem diferentes métodos para realizar tal análise, sendo as duas formas mais comuns, a análise de sensibilidade de primeira ordem e o método da perturbação dos parâmetros (Chapra, 1997).

A análise de sensibilidade de primeira ordem e o método da perturbação dos parâmetros consiste na avaliação das variações nas respostas do modelo em termos relativos ou absolutos, mediante perturbações em um parâmetro ou variável, mantendo as outras fixas. Quando existe pouca informação a respeito das faixas de variação dos parâmetros estas análises permitem identificar o peso, ou influência, de cada parâmetro no comportamento das respostas e devem auxiliar na etapa de ajuste (ou calibração) do modelo. Em geral, o fator de sensibilidade de um parâmetro pode ser estimada pela Equação 5.11.

Equação 5.11

$$\psi(x, F) = \frac{x}{F} \frac{\partial F}{\partial x}$$

Onde: x é um parâmetro e F é um indicador de interesse da resposta do sistema.

Neste estudo, as funções F serão os valores máximos, mínimo e médios das variáveis de estado concentração de carbono orgânico e concentração de carbono inorgânico nos trechos de rio, e também, os valores de carga total acumulada de carbono orgânico e inorgânico, para cada mini-bacia. A derivada da Equação 5.11 pode ser estimada numericamente, por exemplo, com uma diferença finita centrada, como demonstrado abaixo.

Equação 5.12

$$\frac{\partial F}{\partial x} \approx \frac{F(x + \delta x) - F(x - \delta x)}{2\delta x}$$

A análise de sensibilidade consistiu em avaliar o efeito de pequenas perturbações nos parâmetros do modelo, considerando oito critérios (ou indicadores), a saber, concentração média de DOC e DIC, concentração mínima de DOC e DIC, concentração máxima de DOC e DIC, cargas acumuladas totais de DOC e DIC para cada mini-bacia. Os resultados numéricos detalhados da análise de sensibilidade podem ser encontrados nas tabelas do Anexo B que apresentam os quantis do conjunto de fatores de sensibilidade de todas as mini-bacias, para cada parâmetro, para cada um dos indicadores.

A sensibilidade dos parâmetros sobre a carga acumulada e concentração média foi baixa, na ordem de 0.0001 e 0.001. Os parâmetros mais sensíveis para esses indicadores foram àqueles associados ao limiar de umidade e as parcelas de escoamento superficial e subterrâneo. Os parâmetros de desorção para DOC e perdas para a atmosfera em DIC apresentaram sensibilidade, mas em menor grau.

Os indicadores para a concentração mínima apresentaram a maior sensibilidade, na ordem de 0.1. A concentração de DIC mínima é regulada pelos parâmetros de perda para a atmosfera e, em menor grau, depende do escoamento subterrâneo e superficial. A concentração mínima de DOC é mais sensível principalmente do limiar de umidade, e também dos parâmetros de fluxo superficial e subterrâneo. O valor das concentrações mínimas, fisicamente, deve tender ao valor observado em períodos de estiagem quando a água que alimenta o rio é basicamente subterrânea. O efeito dos parâmetros de escoamento superficial e do limiar de umidade sobre a mínima atua de forma indireta. O primeiro incide na quantidade de carbono que fica disponível na forma solúvel para transporte. A sensibilidade demonstrada pelo parâmetro associado ao escoamento se explica pela possível diminuição dos patamares de concentração devido à própria remoção pelo escoamento. Em

outras palavras, se o escoamento remover muito carbono, haverá menor disponibilidade de carbono no solo, refletido nas concentrações mínimas. Esses mesmos parâmetros incidem sobre as máximas, porém de forma um pouco diferente.

A sensibilidade nas concentrações máximas foi próxima a das mínimas, observados pelos indicadores também da ordem de 0.1. As máximas foram influenciadas basicamente por parâmetros de fluxo superficial e limiar de umidade. Os primeiros controlam quanto sai em eventos de lavagem enquanto o parâmetro de umidade regula as condições de sorção e solubilização e, portanto, da carga de saída. Os parâmetros condicionam, acima de tudo, a disponibilidade de carbono solúvel para os valores médios. Sua influencia sobre as máximas é previsto para o fim das estiagens. Nesse tipo de ocasião o solo que se encontrava em condições pouco favoráveis de para os processos ecológicos, ao receber umidade solubilizar boa parte do carbono que fica disponível. O escoamento por sua vez acaba carrega o carbono e gera um pulso, com concentração elevada devido acumulação que ocorre no período antecedente, tendo seu efeito nas máximas concentrações de carbono inorgânico são bastante influenciadas pela velocidade de transferência para atmosfera e concentração de saturação no solo.

5.5 AJUSTE DO MODELO DE CARBONO

Para realizar o ajuste do modelo de carbono aos dados observados, foi utilizada a simulação hidrológica do período entre 2008 e 2009 que abrange o intervalo com dados observados no ponto de controle Taboão. O ajuste foi realizado inicialmente de forma manual, visualmente e comparando a concentração e os fluxos estimados pelos dados de monitoramento com aqueles estimados pela simulação.

A Figura 5.15 apresenta as variações de carbono orgânico e inorgânico simuladas e os valores amostrados, sendo esse o melhor ajuste manual obtido. O modelo conseguiu representar a ordem de grandeza das variáveis de forma adequada. O melhor ajuste manual obtido foi realizado considerando as concentrações e cargas anuais médias estimadas pelos dados observados. Uma vez ajustado, a carga simulada pelo modelo foi de 7.32 kg/ha.ano e 31.49 kg/ha.ano, para o carbono orgânico e inorgânico, respectivamente. Esse ajuste quando comparado aos valores estimados anteriormente de, 7.99 kg/ha.ano e 24.95 kg/ha.ano, representam um desvio relativo de +8.4% e +26.2%, para o carbono orgânico e inorgânico, respectivamente. As concentrações médias para o período simuladas foram de 0.89 e 4.05

mg/L, respectivamente, para carbono orgânico e inorgânico. Comparando com a média estimada pelos valores observados de 1.16 e 4.54 mg/L, temos um desvio relativo de -21.6% e +10.8% nas concentrações. Conforme esperado pela análise de sensibilidade, os parâmetros de escoamento tiveram um papel importante na calibração e mostraram uma menor taxa de fluxo advectivo via subterrânea para a fração orgânica, em relação, à inorgânica, definindo os níveis de concentração de base (mínimos).

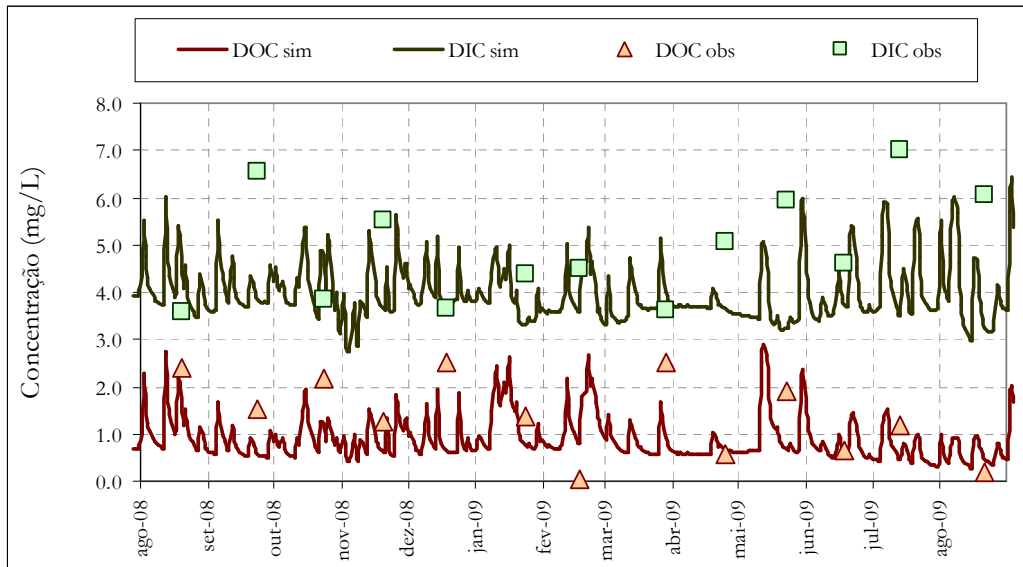


Figura 5.15 Carbono orgânico e inorgânico simulados e observados em Taboão

Por fim foram realizadas diversas simulações utilizando o mesmo algoritmo de calibração automática do modelo hidrológico. Nesse caso foram definidas quatro funções-objetivo, a saber: o erro na concentração média de DOC, erro na concentração média de DIC, erro na carga específica anual de DOC e erro na carga específica anual de DIC. Sendo o erro definido pela diferença entre os valores simulados e valores estimados pelos dados (ANEXO C).

As técnicas de otimização multi-objetivo tendem a apresentar um conjunto de soluções que representam uma aproximação da região de pareto para o sistema. Isso significa que à medida que se ganha no ajuste de uma função objetivo, se perde noutra. Para o modelo de carbono desenvolvido foi possível observar que existe certa tendência na associação do erro na concentração e na carga de carbono orgânico (Figura 5.16) e, também, entre o erro na concentração e na carga de carbono inorgânico (Figura 5.17) para diferentes conjuntos de parâmetros. Pares de erros entre as frações orgânica e inorgânica, tanto para concentração quanto para as cargas, não apresentaram tendências claras (Figura 5.18 a Figura 5.19).

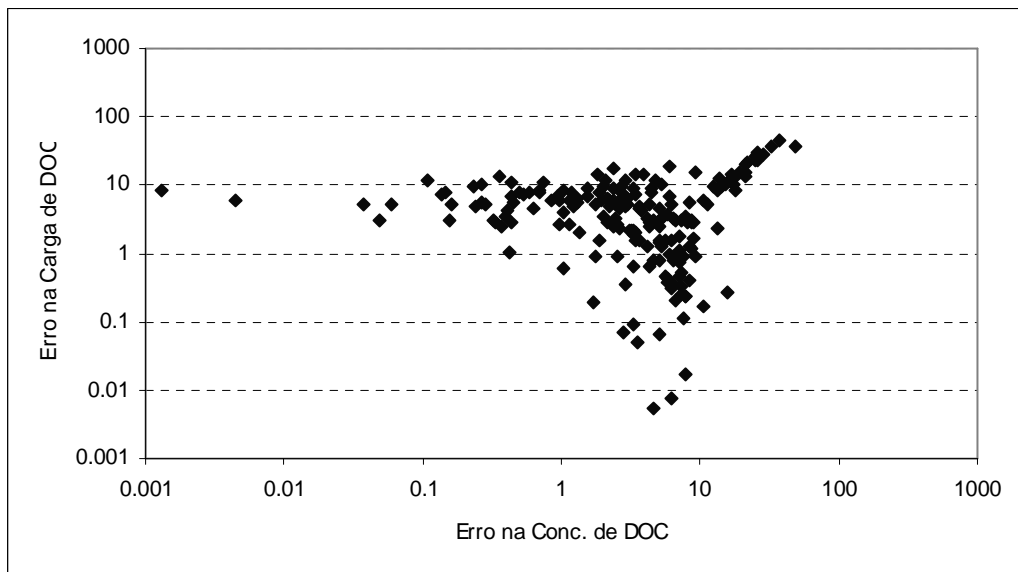


Figura 5.16 Projeção da aproximação da região de pareto no plano formado pelo erro na Concentração de DOC e Carga de DOC após calibração automática no Taboão

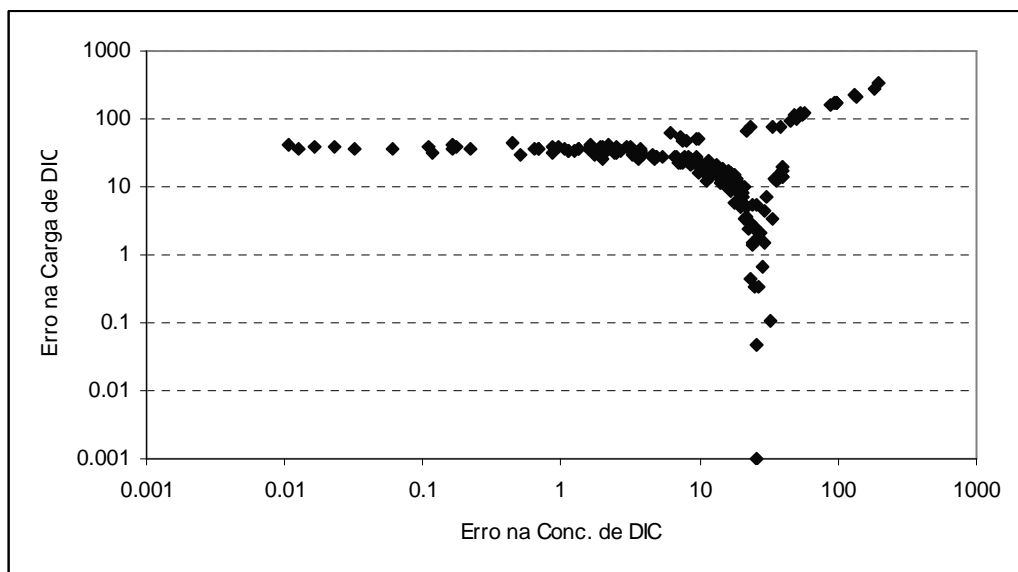


Figura 5.17 Projeção da aproximação da região de pareto no plano formado pelo entre erro na Concentração de DIC e Carga de DIC após calibração automática no Taboão

As Figura 5.16 e Figura 5.17 mostram pares de erro na concentração (eixo x) e erro na carga (eixo y) de DOC e DIC, respectivamente, para um conjunto de simulações que representam os melhores ajustes obtidos pelo algoritmo de calibração automática. Pode se observar que para erros altos a relação entre as duas funções se torna linear (ramo superior direito do gráfico), enquanto para erros baixos existe uma tendência que favorece uma função objetivo, em detrimento da outra, no sentido da carga ou da concentração. Essa característica do pareto foi bastante marcada, em especial, para a fração inorgânica. Parte dos erros pode

estar associada aos baixos erros calculados no volume do modelo hidrológico.

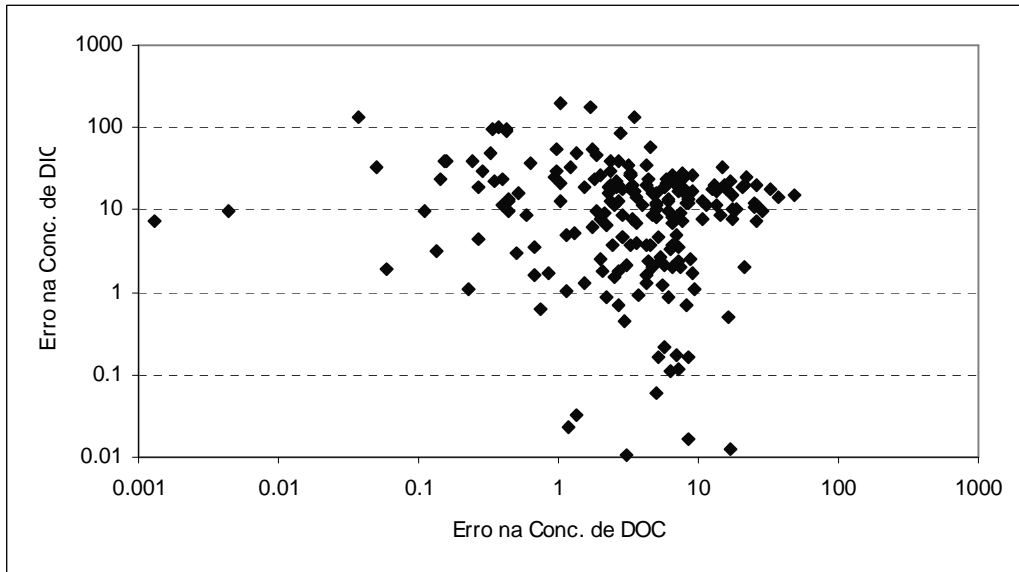


Figura 5.18 Projeção da aproximação da região de pareto no plano formado pelo erro na Concentração de DOC e Concentração de DIC após calibração automática no Taboão

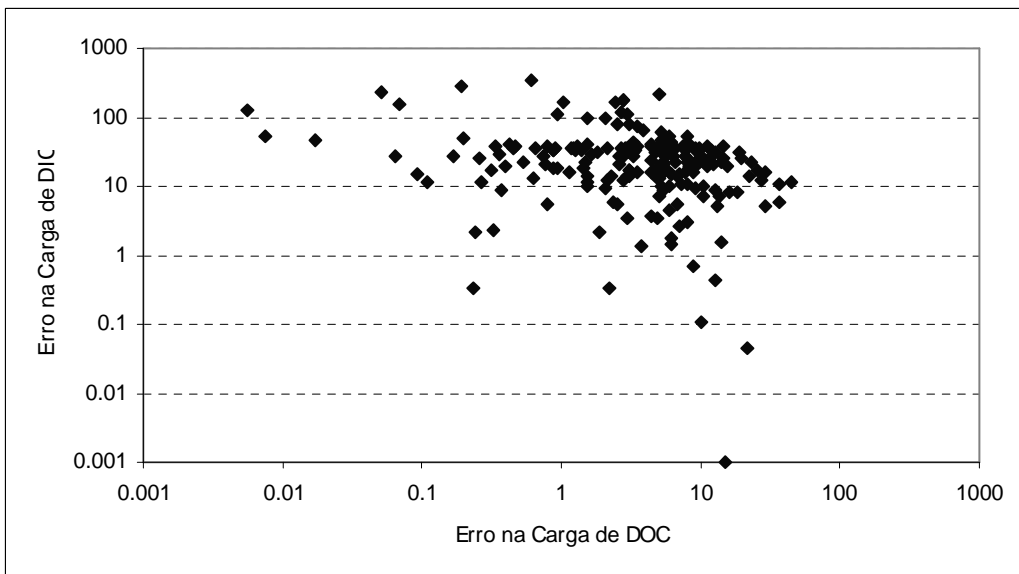


Figura 5.19 Projeção da aproximação da região de pareto no plano formado pelo entre erro na Carga de DOC e Carga de DIC após calibração automática no Taboão

A Figura 5.20 apresenta a variação temporal de carbono orgânico e inorgânico para os ajustes realizados com o algoritmo de calibração automática. As diferentes linhas apresentam o 1º, 2º e 3º quantil de concentração calculados das melhores simulações do pareto, considerando aquelas cujas quatro funções objetivo apresentaram um erro abaixo de 25%, limite atribuído arbitrariamente a partir dos resultados. Foi observada uma diferença

qualitativamente razoável em relação à calibração manual. Nota-se que a resposta do ajuste automático tendeu como era esperado a ser mais suave, em função da utilização da função erro pela média. Na prática, o ajuste automático acabou por remover efeitos de transientes que conduziam principalmente à resposta pelo escoamento superficial. Esse tipo de resultado demonstra claramente algumas limitações de ajustes automáticos, e mostra que a calibração manual possui a vantagem da parametrização das respostas de sistema dentro do que é esperado do ponto de vista de processos físicos e ecológicos.

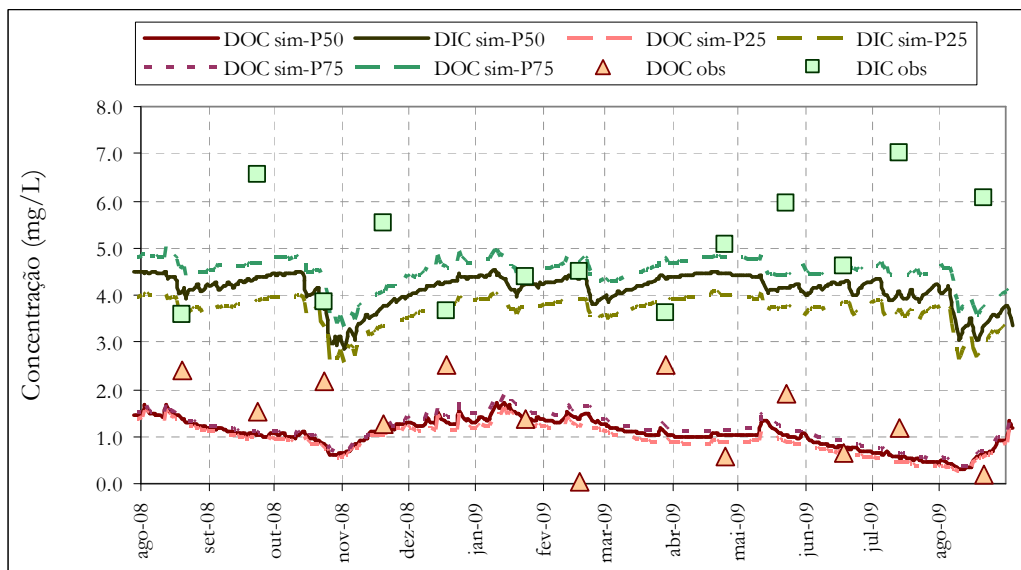


Figura 5.20 Resultados da simulação do modelo de carbono ajustado com algoritmo de otimização

Considerando o limiar adotado de no máximo 25% para as funções erro, a Tabela 5.6 apresenta um resumo estatísticos para as simulações que atenderam esses critérios, mostrando que numericamente o modelo atingiu ótimos resultados nas estimativas para as concentrações médias e cargas médias anuais, quando comparado ao modelo empírico. A concentração de DOC e de DIC simulados entre 1.06 e 1.14 mg/L e entre 3.66 e 4.01 mg/L, respectivamente, faixa entre 1º e 3º quantil. As cargas simuladas após o ajuste variaram entre 7.75 e 8.52 kg/ha.ano para DOC e de 27.23 a 29.79 kg/ha.ano para DIC, faixas entre o 1º e 3º quantil.

Tabela 5.6 Resumo de indicadores após ajuste do modelo de carbono com calibração automática e comparação com os valores obtidos pelos dados de monitoramento e calibração manual

| Indicadores | Concentração (mg/L) | | Carga (kg/ha.ano) | |
|--------------------------------|---------------------|------|-------------------|-------|
| | DOC | DIC | DOC | DIC |
| Calib. Automática - Média | 1.09 | 3.83 | 8.08 | 28.40 |
| Calib. Automática - Mediana | 1.10 | 3.81 | 8.12 | 28.53 |
| Calib. Automática - Quantil-25 | 1.06 | 3.66 | 7.75 | 27.23 |

| | | | | |
|--------------------------------|------|------|------|-------|
| Calib. Automática - Quantil-75 | 1.14 | 4.01 | 8.52 | 29.79 |
| Empírico (dados) | 1.16 | 4.54 | 7.99 | 24.95 |
| Calibração Manual | 0.89 | 4.05 | 7.32 | 31.49 |

A Tabela 5.6 mostra que para os melhores ajustes, o erro na concentração de DOC entre o 1º e 3º quantil variou entre -8.7% e 2.1% (média:-6.2%), o erro na concentração de DIC entre o 1º e 3º quantil variou entre -19,4% e -11.7% (média:-15.7%), o erro na carga de DOC entre o 1º e 3º quantil variou entre -2.9% e +6.6% (média:+1.1%) e o erro na carga de DIC entre o 1º e 3º quantil variou entre 9.2% e +19.4% (média:+13.8%).

Não foi possível realizar ajustes precisos para concentrações e cargas médias em escala mensal ou menor. Isso pode ocorrer devido a grande incerteza na extrapolação de concentrações e cargas estimadas pontualmente para o período inteiro. É importante enfatizar que pouco se sabe sobre as condições hidroecológicas em escalas temporais de maior resolução temporal para o sistema em estudo, antes e durante a amostragem. Além disso, é possível que o modelo não esteja representando alguns mecanismos importantes para a dinâmica local. A representação da escala temporal pode ter sido um fator limitante, uma vez que as bacias estudadas são pequenas e possuem resposta rápida a eventos, possivelmente, em escala menor do que a diária.

Hinton et al (1998) realizou monitoramento hidrológico e de carbono com amostras semanais em uma bacia experimental e constatou utilizando modelos empíricos que a variabilidade da resposta do sistema é grande e que cada evento de chuva provoca alterações distintas nas concentrações de carbono. Amostragens em frequência mais alta, por exemplo, horária, diária ou semanal durante um curto período podem ajudar a explicar melhor a variabilidade nas concentrações de carbono, permitindo buscar melhorar a representação dos processos na estrutura do modelo.

Estudos recentes sugerem que a zona hiporréica, a região porosa onde as águas superficiais e subterrâneas se encontram no fundo e margens de corpos de água, possuem um papel importante no funcionamento do metabolismo dos ecossistemas de águas interiores, principalmente em bacias de cabeceira (Jones e Mulholland, 1998; Birgand et al. 2007; Ingehdahl, 2009). A diferença na composição das águas superficiais e subterrâneas determina a zona hiporréica como uma região onde complexos processos biogeoquímicos ocorrem (Runkel et al. 2003). As trocas de água influenciam a distribuição da fauna, o transporte de matéria orgânica e solutos, os processos respiratórios e, portanto, o metabolismo dos corpos aquáticos (Rode et al. 2009). A maior proporção de carbono inorgânico, em relação à fração inorgânica, encontrada nas bacias do Potiribu pode estar associada e refletir processos

respiratórios da zona hiporréica ou solos adjacentes.

O fato de que os processos ocorrem em diferentes escalas (espacial e temporal) continua sendo uma dificuldade no entendimento, desenvolvimento e aplicação de modelos de ecossistema. Escalas temporais e espaciais podem ser geradas por transientes internos ao sistema (Hastings, 2004) em função de processos lineares, não-lineares, mudanças na sincronia e, ainda, estocasticidade (Goldwyn e Hastings, 2008). A dinâmica de sistemas ecológicos só pode ser entendida combinando as influências (ou forçantes) externas e a dinâmica endógena que atuam em diferentes escalas. Hastings (2010) afirma que o desenvolvimento de métodos (ou abordagens) gerais que consigam explorar de forma explícita o papel do tempo e das escalas temporais é um dos grandes desafios da atualidade. Identificar potenciais causas de transientes permite determinar onde os transientes serão, de fato, importantes, portanto a observação e monitoramento em diferentes escalas são necessárias para melhorar a nossa compreensão dos ecossistemas e nossa capacidade de representar os processos adequadamente.

6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

6.1 BALANÇO DE CARBONO EM BACIAS HIDROGRÁFICAS

O balanço entre o aporte de carbono nos ecossistemas via fotossíntese e as perdas por respiração e transporte determina se um ecossistema atua como fonte ou sumidouro de carbono durante um intervalo de tempo. Considerando os fatores que atuam no ciclo do carbono em bacias hidrográficas, os processos de sorção e desorção, a decomposição de matéria orgânica e a dissolução de carbono inorgânico na água do solo associados ao transporte pelo escoamento devem ter papel importante sobre o metabolismo de corpos de água interiores. O transporte e variabilidade espacial das perdas de carbono do solo para os corpos de água devem estar vinculados à resposta aos eventos de precipitação e às mudanças nos caminhos e fluxos de água através dos diferentes tipos de solo e cobertura vegetal que compõe as bacias hidrográficas. Em ecossistemas aquáticos o carbono sofre processos de transformação por vias bióticas e abióticas podendo, em geral, ser armazenado, exportado por via fluvial ou perdido para a atmosfera em forma de gases. É importante ressaltar que a geração de gases, provém de processos respiratórios das comunidades aquáticas, mas também, em grande parte, da degradação de detritos provenientes da bacia hidrográfica.

6.2 APLICAÇÃO DO MODELO MGB-IPH NA BACIA HIDROGRÁFICA DO IJUÍ

Em geral, o modelo hidrológico MGB-IPH apresentou bons resultados para a simulação hidrológica na bacia hidrográfica do Ijuí. A eficiência do modelo foi melhor para as bacias de maior porte, em especial, a partir de 1000 km². Nas bacias do Potiribu, foi possível obter um bom ajuste para a bacia do Taboão (84 km²), porém na bacia do Turcato (19 km²) não foi possível obter um ajuste razoável. A limitação do ajuste do modelo na bacia do Turcato pode decorrer de alguns fatores como a escala temporal na representação dos processos pela estrutura do modelo e dos dados utilizados. As bacias pequenas possuem um tempo de concentração baixo, muitas vezes menor do que o intervalo diário que foi utilizado para o passo de tempo de cálculo e também para os dados. Por outro lado, a eficiência do ajuste na bacia do Taboão motiva a aplicação do MGB-IPH em outras bacias de mesoescala para avaliação de sua eficiência em outra escala.

6.3 EXPORTAÇÃO DE CARBONO NAS BACIAS DO TABOÃO E TURCATO

Nas bacias do Taboão e Turcato as estimativas de cargas médias mensais de carbono orgânico e inorgânico a partir dos dados monitorados apresentaram alta variabilidade (CV: 0,51 a 0,95) com valores em três ordens de grandeza. As estimativas dos fluxos anuais de carbono nas bacias do Potiribu apresentaram valores abaixo da média global. Em Taboão, o fluxo médio anual foi de 24,95 e 7,99 kg/ha.ano, para a fração inorgânica e orgânica, respectivamente. Em Turcato, o fluxo médio anual foi de 38,93 e 9,66 kg/ha.ano, para a fração inorgânica e orgânica, respectivamente. Os valores estiveram na mesma ordem de grandeza daqueles estimados na bacia do rio Piracicaba e Tietê, em São Paulo, e a maior fração também foi inorgânica (~76 - 80%). Mais informações são necessárias para identificar as fontes do carbono, por exemplo, se são provenientes de descargas domésticas, processos respiratórios do solo, precipitação ou intemperismo de rochas carbonatadas. Não foi identificado qualquer tipo de associação entre as concentrações de carbono inorgânico ou orgânico e vazão. Considerando que os registros das amostragens no Potiribu ocorreram, em geral, em períodos cuja vazão não corresponde a extremos da curva de permanência, principalmente, de altas vazões, e o espaçamento mensal, os fluxos de carbono apresentados podem estar subestimados.

6.4 DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DO MODELO DE CARBONO MGB-IPH-C

O modelo de carbono MGB-IPH-C desenvolvido conseguiu representar qualitativamente processos esperados, em especial, a acumulação e lavagem (*build-up e washoff*) no solo, e o efeito desses na concentração dos rios conforme a contribuição das águas que escoam na bacia hidrográfica. O aumento na concentração em trechos de rio é pronunciado após períodos secos, porém o efeito se torna mais fraco após sucessivos eventos de lavagem devido à diminuição na disponibilidade de carbono para transporte. Ainda na análise qualitativa o modelo representou espacialmente uma tendência de acúmulo e aumento nas concentrações de carbono orgânico em rios de maior porte, o que é coerente com o transporte e as baixas taxas de degradação de carbono orgânico de origem alóctone. O melhor ajuste do modelo realizado manualmente apresentou erros na concentração média de carbono da ordem de 9% a 20% e de até -21% a 30% para as cargas, de DOC e DIC, respectivamente.

Os erros na concentração média de carbono orgânico foram maiores, enquanto o erro nas cargas de carbono inorgânico foram maiores. A variabilidade na concentração da fração orgânica nas amostras é grande o que torna o erro pela média nessa variável mais sensível. O ajuste utilizando um algoritmo de calibração automática com base nos erros de concentração e cargas de DOC e DIC anuais permitiu ajustes com erros menores do que o procedimento manual, porém devido a minimização do erro em escala anual e em função da média a resposta do modelo não representou bem os valores mais extremos das amostras. Mesmo assim, os resultados demonstra que um modelo matemático simples, baseado em processos, pode representar comportamentos do ciclo do carbono, em bacias hidrográficas.

Para conseguir um melhor ajuste do modelo, é preciso ter mais informação a respeito do funcionamento do ecossistema. Possíveis fatores e mecanismos para explicar os processos hidroecológicos para a dinâmica do ciclo do carbono nas águas da bacia do Potiribu foram sugeridos. O efeito das escalas (temporal e espacial) para os processos que atuam nos ecossistemas e a representação explícita dos mecanismos através de modelagem é uma dificuldade ainda em aberto. Testar o modelo em uma bacia com monitoramento de dados físico-químicos em frequência maior pode ajudar a questionar a estrutura do modelo, no entanto, há ainda uma carência de amostragens menores do que mensais (ou trimestrais) no Brasil.

Uma análise exploratória e estatística dos dados físico-químicos em diferentes escalas temporais pode ajudar a identificar processos não representados na estrutura do modelo. Estudos de caracterização da matéria orgânica da bacia, quantificação de carbono na vegetação, ciclo de detritos na superfície e ensaios de lixiviação dos mesmos, sedimentologia e, principalmente, estudos na zona hiporréica (e.g. respiração, composição, solutos) ao longo dos rios dessa bacia podem contribuir para o melhor entendimento do sistema. No que diz respeito à calibração utilizando dados pontuais, incentiva-se o desenvolvimento e a aplicação de funções de erro que caracterizem também a variabilidade dos dados, por exemplo, o desvio padrão ou variância. O uso de informações derivadas de sensores remotos (e.g. índices de vegetação, produtividade, PAR) pode auxiliar no entendimento da dinâmica integrada entre a fase terrestre e aquática dos corpos de água.

REFERÊNCIAS

- Abril, G. *et al.* Carbon dioxide and methane emissions and the carbon budget of a 10-year old tropical reservoir (Petit Saut, French Guiana). **Global Biogeochemical Cycles**, n. 19, 2005.
- Allan, J. D. **Stream ecology**: structure and function of running waters. Kluwer Academic Publishers, 1995.
- Arnold, J. G. *et al.* Large-area hydrologic modeling and assessment: part I – model development. **J. American Water Resources Assoc.**, v. 34, n. 1, p. 73-89, 1998.
- Bastviken, D.; Cole J.; Pace M. Methane emissions from lakes: dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate. **Global Biogeochemical Cycle**, n. 18, 2004.
- Bicknell, B. R. *et al.* **Hydrologic Simulation Program – FORTRAN (HSPF)**: user's manual for release 10. Report no EPA/600/R-93/174. U. S. EPA Environmental Research Lab., 1993.
- Bingner, R. L.; Theuer F. D. **AnnAGNPS technical processes**: documentation version 2. 2001. Disponível em: <www.sedlaboemiss.edu/agnps.HTML>. Acesso em 26 abr. 2011.
- Borah, D. K. Watershed-scale nonpoint-source pollution models: mathematical bases. **SAE Paper**, ASAE, n. 022091, 2002.
- Bremicker, M. **Aufbau eines Wasserhaushaltsmodells für das Weser und das Ostsee Einzugsgebiet als Baustein eines Atmosphären-Hydrologie-Modells**. Dissertation Doktorgrad, Geowissenschaftlicher Fakultät der Albert-Ludwigs-Universität. Freiburg. Juli. 1998
- Carpenter, S. R. *et al.* Ecosystem subsidies: terrestrial support of aquatic food webs from C-13 addition to contrasting lakes. **Ecology**, n. 86, p. 2737-2750, 2005.
- Castro et al. Relatório do Projeto Potiribu. 2000.
- Castro et al. Relatório do Projeto MATASUL. 2010.
- Chapra, S. C. **Surface water quality modelling**. Mc-Graw Hill, 1997.
- Chertov, O. G. *et al.* ROMUL — a model of forest soil organic matter dynamics as a substantial tool for forest ecosystem modeling. **Ecological Modelling**, n. 133, p. 289-308, 2001.
- Cole J. J.; Caraco, N. F. Carbon in catchments: connecting terrestrial carbon losses with aquatic metabolism. **Mar. Freshwater Res.**, n. 52, p. 101-110, 2001.
- Cole, J. J. *et al.* Persistence of net heterotrophy in lakes during nutrient addition and food web manipulation. **Limno. Oceanogr.**, n. 45, p. 1718-1730, 2000.
- Cole, J. J. *et al.* Plumbing the global carbon cycle: integrating inland waters into the terrestrial

carbon budget. **Ecosystems**, n. 10, p. 171-184, 2007.

Coleman, D. C.; Crossley Jr., D. A.; Hendrix, P. F. **Fundamentals of soil ecology**. Elsevier Academic Press. 2. ed. 2004.

Collischonn, W. **Simulação hidrológica de grandes bacias**. Tese (Doutorado) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

Conley, D. J. *et al.* Controlling eutrophication: nitrogen and phosphorus. **Science**, n. 323, p. 1014-1015, 2009.

Costa S. F. *et al.* Estoque de carbono orgânico no solo e emissões de dióxido de carbono influenciadas por sistemas de manejo no sul do Brasil. **Revista Bras. Ciência do Solo**, n. 32, p. 323-332, 2008.

Cruz, R. C.; Vilella, F. S. Análise de fragilidades ambientais e da viabilidade de licenciamento de aproveitamentos hidrelétricos das bacias hidrográficas dos Rio Ijuí e Butuí-Piratinim-Icamaquã, região hidrográfica do Rio Uruguai. Porto Alegre: Fepam; UFRGS, 2004. (Cadernos de Planejamento e Gestão Ambiental, 5.). Disponível em: <http://www.fepam.rs.gov.br/biblioteca/hidreletrico_uruguai/index2.html>. Acesso em 26 abr. 2011.

Dawson J. J. C.; Smith, P. Carbon Losses from soil and its consequences for land-use management. **Science of Total Environment**, n. 382, p. 165-190, 2007.

Del Giorgio, P. A.; Cole, J. J.; Cimbleris, A. Respiration rates in bacteria exceed phytoplankton production in unproductive aquatic systems. **Nature**, n. 385, p. 148-151, 1997.

Del Giorgio, P. A.; Peters, R. H. Balances between phytoplankton production and plankton respiration in lakes. **Can. J. Fish. Aquat. Sci.**, n. 50, p. 282-289, 1993.

Evans, C. D., Monteith, D. T., Cooper, D. M.: Long-term increases in surface water dissolved organic carbon: observations, possible causes and environmental impacts. **Environ. Pollut.**, n. 137, p. 55-71, 2005.

Fan, F. M. **Manual do programa manejo de dados Hidroweb**. Versão 1.0. Porto Alegre: IPH/ UFRGS, 2009.

Fearnside, P. M. Greenhouse gas emissions from hydroelectric dams: controversies provide a springboard for rethinking a supposedly “clean” energy source. **Clim. Change**, v. 66, n. 18, 2004.

Findlay S.; Sinsabaugh, R. L. **Aquatic ecosystems: interactivity of dissolved organic matter**. Academic Press, 2002. 512 p.

Fragoso Jr, C. R. **Simulações da Dinâmica de fitoplâncton no sistema hidrológico do Taim**. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005. 151 p.

Futter M. N. Long-term simulation of dissolved organic carbon. **Hydrology Research**, n. 40,

2009.

Futter, M. N. *et al.* Modelling long-term patterns of dissolved organic carbon concentration in the surface waters of a boreal catchment. **Hydrology and Earth System Sciences**, n. 12, p. 437-447, 2008.

Futter, M. N. *et al.* Modelling the mechanisms that control in-stream dissolved organic carbon dynamics in upland and forested catchments. **Water Res. Res.**, v. 43, n. 2, 2007.

Futter, M. N.; Wit, H. A. Testing seasonal and long-term controls of streamwater DOC using empirical and process-based models. **Sci. Total Environ.**, v. 407, n. 1, p. 698-707, 2008.

Goldwyn, H. E.; Hastings, A. When can dispersal synchronize populations? **Theoretical Populations Biology**, n. 73, p. 395-402, 2008.

Guérin, F. *et al.* Methane and carbon dioxide emissions from tropical reservoirs: significance of rivers downstream. **Geophysical research letters**, n. 33, L21407, 2006.

Hanson, P. C.; Bade, D. L.; Carpenter, S. R. Lake metabolism: relationships with dissolved organic carbon and phosphorus. **Limno. Oceanogr.**, n. 48, p. 1112-1119, 2003.

Hastings, A. Timescales, dynamics and ecological understanding. **Ecology**, v. 91, n. 12, p. 3471-3480, 2010.

Hastings, A. Transients: the key to long-term ecological understanding? **Trend in Ecology and Evolution**, n. 19, p. 39-45, 2004.

Hinton, M. J.; Schiff, S. L.; English, M. C. Sources and flowpaths of dissolved organic carbon during storms oin two forested watersheds of the Precambrian Shield. **Biogeochemistry**, n. 41, p. 175-197, 1998.

Hinton, M. J.; Schiff, S. L.; English, M. C. The significance of storms for the concentration and export of dissolved organic carbon from two Precambrian Shield catchments. **Biogeochemistry**, n. 36, p. 67-68, 1997.

Hlaváčová, E. *et al.* Greenhouse gas (CO₂, CH₄, N₂O) emissions to the atmosphere from a small lowland stream in Czech Republic. **Arch. Hydrobiol.**, v. 165, n. 3, p. 339-353, 2003.

Holmberg, M. *et al.* An application of artificial neural networks to carbon, nitrogen and phosphorus concentrations in three boreal streams and impacts of climate change. **Ecological Modelling**, n. 195, p. 51-60, 2006.

Hope, D. *et al.* A review of the export of carbon in river water: fluxes and processes. **Environmental Pollution**, n.84(3), p. 301-324, 1994.

Hope, D.; Kratz, T. K.; Riera, T. K. Relationship between pCO₂ and dissolved organic carbon in northern Wisconsin Lakes. **J. Environ. Qual.**, n. 25, p. 1442-1445, 1996.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Bates, B. C. *et al.* (Eds.) **Climate change and water**: technical paper of the intergovernmental panel on climate

change. Geneva, Switzerland, 2008. 210 p.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Houghton, J. T. *et al.* (Eds.). **Climate Change 2001: the scientific basis – contribution of working Group I to the Third Assessment: Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2001.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Pachauri, R. K.; Reisinger, A. (Eds.). **Climate Change 2007: synthesis report – contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Geneva, Switzerland, 2007. 104 p.

Johnson, M. S. *et al.* CO₂ efflux from Amazonian headwater streams represents a significant fate for deep soil respiration. **Geophysical Research Letters**, n. 35, L17401, 2008.

Johnson, M. S. *et al.* DOC and DIC in flowpaths of Amazonian headwater catchments with hydrologically contrasting soils, **Biogeochemistry**, n. 81, p. 45-57, 2006.

Jones Jr., J. B.; Mulholland, P. J. Influence of drainage basin topography and elevation on carbon dioxide and methane supersaturation of stream water. **Biogeochemistry**, n. 40, p. 57-72, 1998.

Jonsson, A. *et al.* Whole-lake mineralization of *allochthonous* and *autochthonous* organic carbon in a large humic lake (Ortrasket, N. Sweden). **Limno. Oceanogr.**, v. 46, p. 1691-1700, 2001.

Jorgensen, S. E.; Bendoricchio, G. **Fundamentals of ecological modeling.** 3. ed. Elsevier Science Ltd., 2001.

Larentis, D. G. **Modelagem matemática da qualidade de água em grandes bacias: Sistema Taquari-Antas.** Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

Liski, J. *et al.* Carbon and decomposition model Yasso for forest soils. **Ecol. Model.**, n. 189, p. 168-182, 2005.

Ludwig, Karl.; Bremicker, M. The Water Balance Model LARSIM - Design, Content and Applications. **Freiburger Schriften zur Hydrologie**, Band 22, Institut für Hydrologie der Universität Freiburg, 2006.

Mattson T. *et al.* Export of dissolved organic matter in relation to land use along European Gradient. **Science of the total Environment**, n. 407, p. 1967-1976, 2009.

Melack J. M.; Victoria R. L.; Tomasella J. Amazonia and global change: surface waters in Amazonia: key findings and perspectives em **Geophysical Monograph Series**, v. 1, 2009. 576 p.

Metherell, A. J. *et al.* **CENTURY – Soil Organic Matter Model Environment Technical Documentation Agroecosystem Version 4. 0:** Great Plains System Research Unit Technical Report No. 4. USDA-ARS. Fort Collins, Colorado: Colorado State University, 1996.

Mortatti J. *et al.* Fluxo de carbono inorgânico dissolvido no rio Piracicaba (São Paulo): partição e reações de equilíbrio do sistema carbonato. **Geociências**, v. 25, n. 4, p. 429-436, 2006.

Mortatti, J. *et al.* Origem do carbono inorgânico dissolvido no Rio Tietê (São Paulo): reações de equilíbrio e variabilidade temporal. **Geochimica Brasilensis**, v. 20, n. 3, p. 267-277, 2006.

Mulholland, P. J. Large-scale patterns of dissolved organic carbon concentration, flux, and sources. In: Findlay, S.; Sinsabaugh, R. L. **Aquatic ecosystems: interactivity of dissolved organic matter**. Academic Press, 2002. 512 p.

Naiman, R. J.; Bilby, R. E. (Eds.). **River Ecology and management: lessons from the pacific coastal ecoregion**. New York: Springer-Verlag, 1998.

NATIONAL RESOURCES CONSERVATION SERVICES. A Soil Profile. Disponível em: <<http://soils.usda.gov/education/resources/lessons/profile/>>.

Neff, J. C.; Asner, G. P. Dissolved organic carbon in terrestrial systems: synthesis and a model. **Ecosystems**, n. 4, p. 29-48, 2001.

Paiva, R. C. D. **Modelagem hidrológica e hidrodinâmica de grandes bacias: estudo de caso: Bacia do rio Solimões**. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

Parton W. J. *et al.* DAYCENT and its land surface submodel: description and testing. **Global and Planetary Change**, n. 19, p. 35-48, 1998.

Rawls, W. J. *et al.*. Infiltration and soil water movement. In: Maidment, D. R. **Handbook of hydrology**. McGraw-Hill New York, 1993.

Refsfaard, J. C.; Storm, B. MIKE-SHE. In: Singh, V. P (Ed.). **Computer Models of Watershed Hydrology**. Highlands Ranch, Colorado: Water Resources Publications, 1995. p. 809-846.

Richey, J. E. *et al.* Outgassing from Amazonian rivers and wetland as a large tropical source of atmospheric CO₂. **Nature**, v. 416, p. 617-620, 2002.

Snoeyink V. L., Jenkins D. **Water Chemistry**. John Wiley & Sons, New York, 1980.

Shuttleworth, W.J. Evaporation. Em: Maidment, D. R. **Handbook of hydrology** McGraw-Hill, New York, 1993.

RIO GRANDE DO SUL. Secretaria Estadual do Meio Ambiente. **Relatório Anual sobre a Situação dos Recursos Hídricos no Estado do Rio Grande do Sul e Inventário Hidrelétrico da sub-bacia 75**. 2000.

Rode, M. *et al.* New challenges in integrated water quality modelling. **Hydrological Processes**, n. 24, p. 3447-3461, 2009.

Rosman, P. C. C. **Referência Técnica do SisBaHiA – Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental**. Rio de Janeiro: Programa COPPE, Engenharia Oceânica, Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica, 2000.

Schlesinger, W. H., Andrews, J. A. Soil respiration and the global carbon cycle. **Biogeochemistry**, n. 48, p. 7-20, 2000.

Silva Júnior, O. B. **Análise da escala das variáveis hidrológicas e do uso do solo na bacia do Potiribu – RS**. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

Silva Júnior, O. B. *et al.* Extrapolação espacial na regionalização da vazão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 1, p. 21-37, 2003.

Sinsabaugh, R. L.; Foreman, C. M. Integrating dissolved organic matter metabolism and microbial diversity: an overview of conceptual models. In: Findlay S.; Sinsabaugh, R. L. **Aquatic ecosystems: interactivity of dissolved organic matter**. Academic Press, 2002. 512 p.

Skjelkvale, B. L. *et al.* Regional scale evidence for improvements in surface water chemistry 1990-2001, **Environ. Pollut.**, n. 137, p. 165-176, 2005.

Sobek, S. *et al.* The catchment and climate regulation of pCO₂ in boreal lakes. **Glob. Change Biol.**, n. 9, p. 630-641, 2003.

Todini, E. The ARNO rainfall-runoff model. **Journal of Hydrology**, n. 175, p. 339-382, 1996.

Tranvik, L. J. Availability of dissolved organic carbon for planktonic bacteria in oligotrophic lakes of different humic content. **Microb. Ecol.**, n. 16, p. 311-322, 1988.

Tucci, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. 2. ed. Porto Alegre: Ed. Universidade, 2005.

Tuomi, M. *et al.* Leaf litter decomposition – estimates of global variability based on Yasso07 model. **Ecological Modelling**, n. 220, p. 3362–3371, 2009.

UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION/ INTERNATIONAL HYDROPOWER ASSOCIATION. **The UNESCO/IHA measurement specification guidance for evaluating the GHG status of man-made freshwater reservoirs**. p. 55. 2009. Disponível em: <<http://unesdoc.unesco.org/images/0018/001831/183167e.pdf>>.

Vahatalo, A. V. **Role of photochemical reactions in the biogeochemical cycling of detrital carbon in aquatic ecosystems**. Dissertação (Mestrado em Microbiologia) – University of Helsinki, Finland, 2000.

Vahatalo, A. V.; Wetzel, R. G. Photochemical and microbial decomposition of chromophoric dissolved organic matter during long (months – years) exposure. **Mar. Chem.**, n. 89, p. 313-326, 2004.

Vannote, R. L. *et al.* The river continuum concept. **Can. J. Fish. Aquat. Sci.**, n. 37, p. 130-

137, 1980.

Waterloo, M. J. *et al.* Export of organic carbon in run-off from an Amazonian rainforest blackwater catchment. **Hydrological Processes**, n. 20, p. 2581-2597, 2006.

Wetzel, R. G. Dissolved organic carbon: detrital, energetic, metabolic regulators and drivers of ecosystem stability of aquatic ecosystems. In: Findlay S.; Sinsabaugh, R. L. **Aquatic ecosystems: interactivity of dissolved organic matter**. Academic Press, 2002. 512 p.

Wetzel, R. G. **Limnologia**. Lisboa: Fundação Calouste, 1993.

Whitehead, P. G. *et al.* A semi-distributed Integrated Nitrogen model for multiple source assessment in Catchments (INCA): part II - application to large river basins in South Wales and Eastern England. **The Science of the Total Environment**, n. 210/211, p. 559-583, 1998.

Whitehead, P. G.; Wilson, E. J.; Butterfield, D. A semi-distributed Integrated Nitrogen model for multiple source assessment in Catchments (INCA): part I - model structure and process equations. **The Science of the Total Environment**, n. 210/211, p. 547-558, 1998.

Yapo, P. O. *et al.* Multi-objective global optimization for hydrologic models. **Journal of Hydrology**, n. 204, p.83-97, 1998

Young, R. A. *et al.* AGNPS, Agricultural nonpoint-source pollution model: a watershed analytical tool. **Conservation Research Report**, Washington, D. C, n. 35, 1987.

.

Anexo A – Pontos de Monitoramento Hidrológico da Sub-Bacia 75

Tabela A.1 Postos fluviométricos da sub-bacia 75

| Estação - Código | Estação - Nome | Rio - Nome | Responsável - Sigla | Latitude | Longitude | Área de drenagem (km2) | Última atualização | Operando |
|------------------|------------------------------|---------------|---------------------|-----------|------------|------------------------|--------------------|----------|
| 75550002 | GARRUCHOS - BRASIL - JUSANTE | RIO URUGUAI | ELETROSUL | -28:12:00 | -055:42:00 | 115718 | 02/06/2005 | Sim |
| 75705000 | PONTE DO RIO ICAMAQUA | RIO ICAMAQUA | ANA | -28:39:00 | -055:42:00 | 4168 | 07/06/1994 | Não |
| 75175000 | BARRAGEM ANDORINHAS | RIO POTIRIBU | CEEE | -28:24:00 | -053:48:00 | 728 | 02/06/2005 | Sim |
| 75177000 | IJUI | RIO POTIRIBU | ANA | -28:21:00 | -053:54:00 | ND | 13/03/2003 | Não |
| 75900001 | ITAQUI | RIO URUGUAI | ELETROSUL | -29:08:00 | -056:33:00 | 130103 | 02/06/2005 | Sim |
| 75770000 | SANTO TOMÉ (DNCPVN-580) | RIO URUGUAI | ARGENTINA | -28:33:00 | -056:02:00 | 127500 | 02/06/2005 | Sim |
| 75550100 | GARABI | RIO URUGUAI | ELETROSUL | -28:13:00 | -055:43:00 | 115720 | 05/05/2006 | Sim |
| 75550001 | GARRUCHOS - BRASIL | RIO URUGUAI | ELETROSUL | -28:10:00 | -055:39:00 | 115718 | 02/06/2005 | Sim |
| 75550103 | GARRUCHOS (DNCPVN) | RIO URUGUAI | ARGENTINA | -28:11:00 | -055:39:00 | 114590 | 15/04/2010 | Sim |
| 75900000 | ITAQUI | RIO URUGUAI | ANA | -29:07:07 | -056:33:16 | 114494 | 16/03/2010 | Sim |
| 75780000 | PASSO SÃO BORJA | RIO URUGUAI | ANA | -28:37:28 | -056:02:13 | 110898 | 16/03/2010 | Sim |
| 75550000 | GARRUCHOS | RIO URUGUAI | ANA | -28:10:56 | -055:38:35 | 104162 | 10/05/2010 | Sim |
| 75350000 | PASSO FLORIDA | RIO IJUÍ | ANA | -28:08:00 | -055:07:00 | 10033 | 07/06/1994 | Não |
| 75320000 | PONTE MÍSTICA | RIO IJUÍ | ANA | -28:10:53 | -054:44:18 | 9426 | 27/10/2009 | Não |
| 75300000 | PASSO VIOLA | RIO IJUÍ | ANA | -28:13:00 | -054:36:00 | 8883 | 07/06/1994 | Não |
| 75230000 | SANTO ANGELO | RIO IJUÍ | ANA | -28:21:19 | -054:16:06 | 5414 | 10/05/2010 | Sim |
| 75500000 | PASSO DO SARMENTO | RIO PIRATINIM | ANA | -28:12:43 | -055:19:11 | 5281 | 10/05/2010 | Sim |
| 75470000 | PONTE DO PIRATINIM | RIO PIRATINIM | ANA | -28:29:00 | -055:08:00 | 3760 | 07/06/1994 | Não |
| 75700000 | PASSO DO NOVO | RIO ICAMAQUA | ANA | -28:40:58 | -055:34:46 | 3700 | 02/03/2010 | Sim |
| 75450000 | PASSO SANTA MARIA | RIO PIRATINIM | ANA | -29:34:45 | -054:54:54 | 3277 | 02/03/2010 | Sim |
| 75295000 | COLÔNIA MOUSQUER | RIO IJUIZINHO | ANA | -28:23:23 | -054:19:51 | 2131 | 10/05/2010 | Sim |
| 75290000 | USINA IJUIZINHO - CERMISSÕES | RIO IJUIZINHO | CERMISSÕES | -28:24:44 | -054:18:09 | 2100 | 24/05/2005 | Sim |
| 75120000 | BARRAGEM AJURICABA | RIO IJUÍ | DEMEI | -28:16:00 | -053:48:00 | 2100 | 31/05/2005 | Sim |
| 75105000 | PASSO AJURICABA | RIO IJUÍ | ANA | -28:17:00 | -053:48:00 | 2029 | 07/06/1994 | Não |
| 75288000 | PCH IJUIZINHO | RIO IJUIZINHO | CEEE | -28:26:00 | -054:17:00 | 2010 | 28/05/2008 | Não |
| 75288001 | BARRAGEM IJUIZINHO | RIO IJUIZINHO | CEEE | -28:26:00 | -054:17:00 | 2010 | 02/06/2005 | Sim |
| 75155000 | PASSO FAXINAL | RIO IJUÍ | ANA | -28:17:13 | -053:45:51 | 2003 | 10/05/2010 | Sim |
| 75285000 | USINA VELHA | RIO IJUIZINHO | ANA | -28:27:00 | -054:16:00 | 1924 | 07/06/1994 | Não |

| | | | | | | | | |
|----------|-------------------------------------|--------------------|-----------|-----------|------------|-----|------------|-----|
| 75205000 | PONTE NOVA DO CONCEIÇÃO | RIO CONCEIÇÃO | ANA | -28:23:05 | -054:01:53 | 966 | 10/05/2010 | Sim |
| 75270000 | PONTE QUEIMADA | RIO IUJIZINHO | ANA | -28:47:00 | -053:59:00 | 939 | 13/08/1995 | Não |
| 75400000 | PASSO DO DIAS | RIO PIRATINIM | ANA | -28:39:25 | -054:27:32 | 936 | 10/05/2010 | Sim |
| 75280000 | PONTE CADEADO | RIO IUJIZINHO | ANA | -28:47:00 | -053:59:00 | 892 | 13/08/1995 | Não |
| 75430000 | PASSO MAJOR ZEFERINO | ARROIO INHACAPETUM | ANA | -28:44:00 | -054:38:00 | 890 | 07/06/1994 | Não |
| 75200000 | CONCEIÇÃO | RIO CONCEIÇÃO | ANA | -28:27:18 | -053:58:15 | 805 | 10/05/2010 | Sim |
| 75275000 | TUPANCIRETA | RIO IUJIZINHO | ANA | -29:05:09 | -053:49:21 | 775 | 27/03/1995 | Não |
| 75185000 | PONTE NOVA DO POTIRIBU | RIO POTIRIBU | ANA | -28:22:38 | -053:52:32 | 629 | 02/06/2005 | Não |
| 75186000 | PONTE NOVA DO POTIRIBU - JUSANTE | RIO POTIRIBU | ANA | -28:22:15 | -053:52:45 | 629 | 10/05/2010 | Sim |
| 75020100 | PCH RIO PALMEIRA | ARROIO PALMEIRAS | HIDROPAN | -28:15:10 | -053:33:15 | 498 | 31/05/2005 | Sim |
| 75600000 | PASSO DAS TURMAS | RIO ICAMAQUA | ANA | -28:50:14 | -054:51:18 | 388 | 02/03/2010 | Sim |
| 75830000 | PASSO DO BUTUI | RIO BUTUI | ANA | -29:01:00 | -055:41:00 | 207 | 07/06/1994 | Não |
| 75030100 | PCH RIO ALEGRE | LAJEADO ALEGRE | HIDROPAN | -28:12:00 | -053:26:26 | 173 | 31/05/2005 | Sim |
| 75115000 | USINA AJURICABA | ARROIO CACHOEIRA | ANA | -28:16:00 | -053:45:00 | 75 | 13/03/2003 | Não |
| 75240000 | ESTÂNCIA DO ESPILHO | RIO URUPUZINHO | ANA | -28:51:00 | -053:47:00 | 36 | 07/06/1994 | Não |
| 75174500 | PCH CASCATA ANDORINHAS - JUSANTE | RIO POTIRIBU | RGE | -28:22:00 | -053:51:00 | ND | 02/06/2005 | Sim |
| 75341000 | PCH PIRAPO 1 - MONTANTE | RIO IUJÍ | RGE | -28:28:00 | -055:03:00 | ND | 02/06/2005 | Sim |
| 75020000 | PCH PINDORAMA | ARROIO PALMEIRAS | CEEE | -28:17:00 | -053:24:00 | ND | 02/06/2005 | Não |
| 75178000 | PCH LINHA 3 LESTE | RIO IUJÍ | CERILUZ | -28:18:20 | -053:52:56 | ND | 24/05/2005 | Sim |
| 75330000 | PCH PIRAPO 3 - MONTANTE | RIO IUJÍ | RGE | -28:11:00 | -054:52:00 | ND | 02/06/2005 | Sim |
| 75030000 | PCH LIBERDADE | LAJEADO ALEGRE | CEEE | -28:14:00 | -053:23:00 | ND | 03/08/2005 | Não |
| 75288100 | PCH IUJIZINHO - JUSANTE | RIO IUJIZINHO | CEEE | -28:26:00 | -054:17:00 | ND | 05/05/2006 | Sim |
| 75371000 | PCH PIRAPO - JUSANTE | RIO IUJÍ | RGE | -28:05:00 | -055:10:00 | ND | 12/06/2006 | Sim |
| 75370000 | SÃO LUÍS GONZAGA | RIO IUJÍ | ANA | -28:12:00 | -055:05:00 | ND | 12/06/2006 | Não |
| 75890000 | ALVEAR (DNCPVN-582) | RIO URUGUAI | ARGENTINA | -29:06:00 | -056:33:00 | ND | 15/04/2010 | Sim |
| 75340000 | PCH PIRAPO 2 - MONTANTE | RIO IUJÍ | RGE | -28:10:00 | -055:01:00 | ND | 02/06/2005 | Sim |
| 75190000 | CRUZ ALTA II | ARROIO DA PONTE | SOPRS | -28:38:00 | -053:43:00 | ND | 03/08/2005 | Não |
| 75174000 | PCH CASCATA ANDORINHAS 1 - MONTANTE | RIO POTIRIBU | RGE | -28:25:00 | -053:48:00 | ND | 02/06/2005 | Sim |
| 75173000 | PCH CASCATA ANDORINHAS 2 - MONTANTE | RIO POTIRIBU | RGE | -28:30:00 | -053:40:00 | ND | 02/06/2005 | Sim |

Tabela A.2 Postos pluviométricos da sub-bacia 75

| Estação - Código | Estação - Nome | Responsável - Sigla | Latitude | Longitude | Altitude (m) | Última atualização | Operando |
|------------------|-------------------------------------|---------------------|-----------|------------|--------------|--------------------|----------|
| 2855005 | FAZENDA SANTA CECÍLIA DO BUTUI | ANA | -28:59:23 | -055:40:27 | 140 | 04/03/2010 | Sim |
| 2853032 | USINA DA SEDE | CEEE | -28:21:19 | -053:53:37 | 265 | 15/04/2005 | Sim |
| 2854016 | PCH IJUIZINHO | CERMISSÕES | -28:28:00 | -054:19:00 | ND | 24/05/2005 | Sim |
| 2956010 | ITAQUI - IPAGRO | INMET | -29:07:00 | -056:32:00 | 53 | 03/08/2005 | Sim |
| 2850019 | BOSSOROCA | ANA | -28:42:10 | -054:55:28 | 309 | 04/03/2010 | Sim |
| 2855010 | PCH PIRAPO 1 - MONTANTE | RGE | -28:09:00 | -055:03:00 | ND | 23/03/2006 | Sim |
| 2854019 | MAUÁ | ANA | -28:18:08 | -054:08:03 | 256 | 04/03/2010 | Sim |
| 2855012 | SAMBURÁ | ANA | -28:24:20 | -055:36:37 | 72 | 10/05/2010 | Sim |
| 2855013 | GARRUCHOS (DNCPVN) | ARGENTINA | -28:11:00 | -055:39:00 | ND | 11/12/2009 | Sim |
| 2956005 | ITAQUI | ANA | -29:07:39 | -056:33:45 | 35 | 03/03/2010 | Sim |
| 2853033 | SANTA BARBARA DO SUL | ANA | -28:23:18 | -053:15:31 | 500 | 04/03/2010 | Sim |
| 2854017 | PIRAPO 3 - MONTANTE | CEEE | -28:12:00 | -054:22:00 | ND | 23/03/2006 | Sim |
| 2855011 | PCH PIRAPO - JUSANTE | CEEE | -28:06:00 | -055:10:00 | ND | 23/03/2006 | Sim |
| 2954031 | ESQUINA DOS LIMA (STA. BARBARA) | ANA | -29:04:40 | -054:30:34 | 420 | 19/03/2010 | Sim |
| 2853034 | PANAMBI | ANA | -28:20:40 | -053:32:30 | 480 | 10/05/2010 | Sim |
| 2853035 | NOVA RAMADA | ANA | -28:04:00 | -053:41:00 | 533 | 04/03/2010 | Sim |
| 2854018 | JÓIA | ANA | -28:38:57 | -054:06:48 | 314 | 10/05/2010 | Sim |
| 2853029 | CASCATA ANDORINHAS 1 - MONTANTE | ELETROSUL | -28:24:00 | -053:48:00 | ND | 23/03/2006 | Sim |
| 2856005 | SÃO BORJA - IPAGRO | INMET | -28:39:44 | -056:00:44 | 83 | 22/08/2007 | Sim |
| 2854015 | PONTE MÍSTICA | ANA | -28:10:53 | -054:44:18 | ND | 27/10/2009 | Não |
| 2853030 | PCH CASCATA ANDORINHAS 2 - MONTANTE | RGE | -28:30:00 | -053:40:00 | ND | 23/03/2006 | Sim |
| 2854011 | SÃO LUIZ GONZAGA | INMET | -28:24:00 | -054:58:00 | 245 | 02/06/2005 | Sim |
| 2853006 | IJUI | ANA | -28:22:00 | -053:55:00 | 300 | 02/06/2005 | Não |
| 2853025 | IJUI - IPAGRO | INMET | -28:23:17 | -053:54:50 | 448 | 02/06/2005 | Sim |
| 2854001 | BOA VISTA | ANA | -28:06:40 | -053:59:35 | 447 | 04/03/2010 | Sim |
| 2854002 | CERRO LARGO | CEEE | -28:08:00 | -054:44:00 | 200 | 02/06/2005 | Sim |
| 2853016 | USINA AJURICABA | CEEE | -28:16:00 | -053:48:00 | 270 | 02/06/2005 | Sim |
| 2854004 | GUARANI DAS MISSÕES | CEEE | -28:08:00 | -054:33:00 | 200 | 02/06/2005 | Sim |
| 2854005 | PASSO MAJOR ZEFERINO | ANA | -28:44:01 | -054:38:52 | 160 | 10/05/2010 | Sim |
| 2853010 | PASSO FAXINAL | ANA | -28:17:22 | -053:46:46 | 200 | 10/05/2010 | Sim |
| 2854010 | USINA IJUIZINHO | CEEE | -28:26:00 | -054:17:00 | 250 | 02/06/2005 | Sim |

| | | | | | | | |
|---------|----------------------------------|---------|-----------|------------|-----|------------|-----|
| 2853001 | AJURICABA | CEEE | -28:14:00 | -053:46:00 | 250 | 23/03/2006 | Sim |
| 2855001 | GARRUCHOS | ANA | -28:11:16 | -055:38:13 | 60 | 10/05/2010 | Sim |
| 2855006 | FAZENDA SÃO RAFAEL | ANA | -28:53:00 | -055:39:00 | 140 | 02/06/2005 | Não |
| 2856006 | PASSO SÃO BORJA | ANA | -28:39:59 | -055:58:47 | 50 | 04/03/2010 | Sim |
| 2855004 | PASSO DO NOVO | ANA | -28:40:41 | -055:34:52 | 50 | 04/03/2010 | Sim |
| 2856003 | SÃO BORJA | INMET | -28:39:00 | -056:00:00 | 96 | 02/06/2005 | Não |
| 2853002 | BELISÁRIO | CEEE | -28:29:00 | -053:27:00 | 504 | 02/06/2005 | Sim |
| 2853004 | CONDOR | CEEE | -28:12:27 | -053:29:06 | 450 | 02/06/2005 | Não |
| 2854007 | SANTO ANGELO | INMET | -28:18:00 | -054:16:00 | 289 | 02/06/2005 | Não |
| 2853022 | PANAMBI (PINDORAMA) | INMET | -28:17:00 | -053:30:00 | 470 | 02/06/2005 | Não |
| 2855003 | USINA PIRAPO | CEEE | -28:08:00 | -055:03:00 | 100 | 02/06/2005 | Sim |
| 2856002 | PASSO SÃO BORJA | ANA | -28:37:00 | -056:02:00 | 50 | 02/06/2005 | Não |
| 2853017 | USINA ANDORINHAS | CEEE | -28:24:00 | -053:48:00 | 300 | 05/05/2006 | Sim |
| 2854014 | SANTO ANGELO - IPAGRO | INMET | -28:18:13 | -054:15:45 | 275 | 27/01/2006 | Sim |
| 2854012 | COIMBRA | ANA | -28:47:16 | -054:27:09 | 300 | 10/05/2010 | Sim |
| 2854009 | SÃO MIGUEL DAS MISSÕES | CEEE | -28:33:00 | -054:33:00 | 350 | 02/06/2005 | Sim |
| 2854006 | PASSO VIOLA | ANA | -28:12:40 | -054:36:11 | 160 | 10/05/2010 | Sim |
| 2853028 | ANDERSON CLAYTON | ANA | -28:39:28 | -053:36:21 | 440 | 10/05/2010 | Sim |
| 2856007 | CUNHA | ANA | -28:53:51 | -056:05:06 | 20 | 03/03/2010 | Sim |
| 2853003 | CONCEIÇÃO | ANA | -28:27:22 | -053:58:18 | 160 | 10/05/2010 | Sim |
| 2956004 | ITAQUI | INMET | -29:07:00 | -056:33:00 | 76 | 02/06/2005 | Não |
| 2855009 | PCH PIRAPO 2 - MONTANTE | RGE | -28:11:00 | -055:01:00 | ND | 23/03/2006 | Sim |
| 2853036 | PCH LINHA 3 LESTE | CERILUZ | -28:18:02 | -053:52:56 | 310 | 24/05/2005 | Sim |
| 2855007 | SANTO ANTÔNIO DAS MISSÕES | ANA | -28:29:33 | -055:13:51 | 200 | 04/03/2010 | Sim |
| 2855002 | PASSO DO SARMENTO | ANA | -28:12:32 | -055:19:24 | 80 | 10/05/2010 | Sim |
| 2853031 | PCH CASCATA ANDORINHAS - JUSANTE | RGE | -28:23:00 | -053:51:00 | ND | 23/03/2006 | Sim |
| 2954036 | PASSO SANTA MARIA | ANA | -29:34:40 | -054:54:53 | 120 | 18/01/2006 | Sim |
| 2855008 | ITACUMBI | ANA | -28:46:26 | -055:15:26 | 180 | 04/03/2010 | Sim |
| 2853023 | CONDOR | ANA | -28:13:32 | -053:28:13 | 440 | 10/05/2010 | Sim |

Tabela A.3 Postos com dados climáticos na região do Ijuí

| Código | Estação climática | Longitude | Latitude |
|--------|-------------------|-----------|----------|
|--------|-------------------|-----------|----------|

| | | | |
|----------|----------------------|---------|---------|
| 02854011 | São Luiz Gonzaga | -54.967 | -28.4 |
| 02753005 | Palmeira das Missões | -53.433 | -27.883 |
| 02853005 | Cruz Alta | -53.612 | -28.624 |
| 02854007 | Santo Ângelo | -54.267 | -28.3 |

Tabela A.4 Normais climáticas para a região do Ijuí

| Temperatura Média do Ar (°C) | | | | | | | | | | | | |
|------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Estação | jan | fev | mar | abr | mai | jun | jul | ago | set | out | nov | dez |
| 2854011 | 25.4 | 25.1 | 23.6 | 20.2 | 17.8 | 15.3 | 15.8 | 16.2 | 18.4 | 20.2 | 22.5 | 24.6 |
| 2753005 | 23.5 | 23.2 | 21.8 | 19.1 | 16.3 | 14.3 | 13.9 | 14.9 | 16.8 | 18.5 | 20.8 | 22.4 |
| 2853005 | 22.8 | 22.3 | 20.9 | 18.2 | 15.3 | 13.2 | 13.1 | 14.1 | 15.2 | 17.7 | 20 | 21.9 |
| 2854007 | 25.5 | 25.1 | 23.5 | 20.3 | 17.4 | 15.3 | 15.2 | 17 | 18.1 | 20.5 | 22.9 | 24.5 |
| Umidade Relativa (%) | | | | | | | | | | | | |
| Estação | jan | fev | mar | abr | mai | jun | jul | ago | set | out | nov | dez |
| 2854011 | 55.8 | 57.4 | 58.3 | 57 | 59.1 | 63.4 | 61.7 | 59.3 | 57.8 | 54.1 | 52.1 | 51.2 |
| 2753005 | 58.1 | 60.4 | 61.5 | 59.8 | 62.5 | 66.3 | 63.6 | 62.6 | 62.6 | 59.7 | 55.1 | 56.3 |
| 2853005 | 57.2 | 59.6 | 59.6 | 56.7 | 57.9 | 59.8 | 59.5 | 59 | 59.2 | 54.5 | 52.4 | 52.2 |
| 2854007 | 51.7 | 55.2 | 55.7 | 56.7 | 54.6 | 60.3 | 59.8 | 55.2 | 59.7 | 55.4 | 51.3 | 50 |
| Insolação (horas/dia) | | | | | | | | | | | | |
| Estação | jan | fev | mar | abr | mai | jun | jul | ago | set | out | nov | dez |
| 2854011 | 8.2 | 8 | 7.5 | 7.8 | 6.8 | 6.1 | 6 | 6.4 | 6.7 | 7.7 | 8.5 | 8.7 |
| 2753005 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 0.9 |
| 2853005 | 8.2 | 8 | 7.4 | 7.4 | 6.5 | 5.4 | 6.3 | 6.3 | 7 | 8 | 8.8 | 9 |
| 2854007 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| Vento (m/s) | | | | | | | | | | | | |
| Estação | jan | fev | mar | abr | mai | jun | jul | ago | set | out | nov | dez |
| 2854011 | 1.6 | 1 | 1.1 | 1.2 | 1.6 | 1.3 | 1.4 | 1.2 | 1.2 | 1.3 | 1.6 | 1.1 |
| 2753005 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 |
| 2853005 | 1.2 | 0.9 | 0.8 | 1 | 0.8 | 0.8 | 1 | 1 | 1.2 | 1.2 | 1.4 | 1.2 |
| 2854007 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 |
| Pressão(kPa) | | | | | | | | | | | | |
| Estação | jan | fev | mar | abr | mai | jun | jul | ago | set | out | nov | dez |
| 2854011 | 98.2 | 98.3 | 98.4 | 98.7 | 98.8 | 98.8 | 98.9 | 98.8 | 98.7 | 98.5 | 98.3 | 98.2 |

| | | | | | | | | | | | | |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 2753005 | 96.2 | 96.2 | 96.2 | 96.2 | 96.2 | 96.2 | 96.2 | 96.2 | 96.2 | 96.2 | 96.2 | 96.2 |
| 2853005 | 95.6 | 95.7 | 95.9 | 96 | 96.2 | 96.1 | 96.2 | 96.2 | 96 | 95.9 | 95.7 | 95.7 |
| 2854007 | 96.2 | 96.2 | 96.2 | 96.2 | 96.2 | 96.2 | 96.2 | 96.2 | 96.2 | 96.2 | 96.2 | 96.2 |

Anexo B – Tabelas da Análise de Sensibilidade dos Parâmetros do MGB-IPH-C

Tabela B.1 Resultados para análise de sensibilidade em DOC média

| Id_par | Parâmetro | Uso | Min | Q ₁ | Mediana | Q ₃ | Max |
|--------|---------------------|-----|-----------|----------------|-----------|----------------|----------|
| 1 | K _{pis} | - | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 2 | k _{DIB} | - | -3.20E-08 | -3.25E-09 | -1.44E-10 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 3 | k _{DIP} | - | -1.70E-10 | -1.94E-11 | -8.01E-13 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 4 | SMD _{MAX} | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.25E-06 | 7.29E-06 |
| 5 | k _{SI} | 1 | -3.88E-14 | -5.42E-15 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 6 | k _{SD} | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.37E-10 | 8.95E-10 |
| 7 | k _{DS} | 1 | -9.62E-07 | -1.47E-07 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 8 | k _{DI} | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.40E-08 | 9.19E-08 |
| 9 | K _L | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 10 | DIC _{sat} | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 11 | ξ _{DOCsup} | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 3.17E-07 | 2.28E-06 |
| 12 | ξ _{DOCint} | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 4.50E-08 | 3.52E-07 |
| 13 | ξ _{DOCbas} | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 5.91E-07 | 3.71E-06 |
| 14 | ξ _{DICsup} | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 15 | ξ _{DICint} | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 16 | ξ _{DICbas} | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 17 | SMD _{MAX} | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 3.82E-05 | 1.38E-04 |
| 18 | k _{SI} | 2 | -3.24E-13 | -9.34E-14 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 19 | k _{SD} | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.27E-09 | 6.90E-09 |
| 20 | k _{DS} | 2 | -5.08E-06 | -1.64E-06 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 21 | k _{DI} | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.55E-07 | 4.81E-07 |
| 22 | K _L | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 23 | DIC _{sat} | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 24 | ξ _{DOCsup} | 2 | -1.76E-08 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 4.84E-07 | 3.87E-06 |
| 25 | ξ _{DOCint} | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 4.08E-07 | 1.68E-06 |
| 26 | ξ _{DOCbas} | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 8.85E-06 | 2.73E-05 |
| 27 | ξ _{DICsup} | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 28 | ξ _{DICint} | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 29 | ξ _{DICbas} | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 30 | SMD _{MAX} | 3 | 0.00E+00 | 6.54E-06 | 9.06E-06 | 1.13E-05 | 1.10E-04 |
| 31 | k _{SI} | 3 | -4.48E-14 | -1.85E-14 | -1.45E-14 | -1.03E-14 | 0.00E+00 |
| 32 | k _{SD} | 3 | 0.00E+00 | 4.00E-10 | 5.31E-10 | 6.60E-10 | 1.72E-09 |
| 33 | k _{DS} | 3 | -1.71E-06 | -6.45E-07 | -5.18E-07 | -3.91E-07 | 0.00E+00 |
| 34 | k _{DI} | 3 | 0.00E+00 | 3.75E-08 | 4.96E-08 | 6.17E-08 | 1.63E-07 |
| 35 | K _L | 3 | -1.97E-09 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 4.16E-08 |
| 36 | DIC _{sat} | 3 | -1.20E-09 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.66E-08 |
| 37 | ξ _{DOCsup} | 3 | -1.49E-08 | 1.27E-06 | 1.81E-06 | 2.19E-06 | 6.52E-06 |
| 38 | ξ _{DOCint} | 3 | 0.00E+00 | 2.29E-08 | 3.35E-08 | 4.65E-08 | 1.50E-07 |
| 39 | ξ _{DOCbas} | 3 | 0.00E+00 | 1.25E-06 | 1.64E-06 | 2.09E-06 | 4.94E-06 |
| 40 | ξ _{DICsup} | 3 | -5.94E-11 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.44E-09 |

| | | | | | | | |
|----|----------------|---|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|
| 41 | ξ_{DICint} | 3 | -5.20E-11 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.56E-09 |
| 42 | ξ_{DICbas} | 3 | -1.15E-09 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.00E-10 |
| 43 | SMD_{MAX} | 4 | 0.00E+00 | 2.40E-05 | 3.30E-05 | 3.92E-05 | 8.86E-04 |
| 44 | k_{SI} | 4 | -9.92E-13 | -8.32E-13 | -6.75E-13 | -5.59E-13 | 0.00E+00 |
| 45 | k_{SD} | 4 | 0.00E+00 | 8.56E-09 | 1.14E-08 | 1.21E-08 | 1.95E-08 |
| 46 | k_{DS} | 4 | -1.51E-05 | -1.35E-05 | -1.28E-05 | -9.66E-06 | 0.00E+00 |
| 47 | k_{DI} | 4 | 0.00E+00 | 9.19E-07 | 1.22E-06 | 1.28E-06 | 1.44E-06 |
| 48 | K_L | 4 | -6.93E-09 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.94E-09 |
| 49 | DIC_{sat} | 4 | -4.29E-08 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.16E-09 |
| 50 | ξ_{DOCsup} | 4 | 0.00E+00 | 2.29E-05 | 2.85E-05 | 3.33E-05 | 4.26E-05 |
| 51 | ξ_{DOCint} | 4 | 0.00E+00 | 7.84E-06 | 9.51E-06 | 1.19E-05 | 1.90E-05 |
| 52 | ξ_{DOCbas} | 4 | 0.00E+00 | 3.00E-05 | 4.20E-05 | 4.56E-05 | 5.98E-05 |
| 53 | ξ_{DICsup} | 4 | -1.90E-09 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 9.70E-11 |
| 54 | ξ_{DICint} | 4 | -9.84E-11 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.85E-09 |
| 55 | ξ_{DICbas} | 4 | -1.73E-09 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 5.26E-11 |

Tabela B.2 Resultados para análise de sensibilidade em DIC média

| Id_par | Parâmetro | Uso | Min | Q ₁ | Mediana | Q ₃ | Max |
|--------|----------------|-----|-----------|----------------|----------|----------------|----------|
| 1 | K_{pis} | - | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 8.89E-07 | 1.40E-05 | 2.21E-05 |
| 2 | k_{DIB} | - | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 5.38E-10 | 9.12E-09 | 2.57E-08 |
| 3 | k_{DIP} | - | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.75E-12 | 5.54E-11 | 1.37E-10 |
| 4 | SMD_{MAX} | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 5.14E-07 | 2.83E-05 |
| 5 | k_{SI} | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 3.32E-13 | 1.91E-11 |
| 6 | k_{SD} | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.06E-11 | 5.19E-10 |
| 7 | k_{DS} | 1 | -5.45E-07 | -1.12E-08 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 8 | k_{DI} | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 5.03E-09 | 2.74E-07 |
| 9 | K_L | 1 | -9.26E-05 | -1.60E-06 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 10 | DIC_{sat} | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 6.58E-06 | 3.79E-04 |
| 11 | ξ_{DOCsup} | 1 | -3.56E-07 | -1.60E-09 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.93E-09 |
| 12 | ξ_{DOCint} | 1 | -5.40E-08 | -3.30E-10 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 4.66E-10 |
| 13 | ξ_{DOCbas} | 1 | -3.10E-07 | -4.70E-10 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.08E-08 |
| 14 | ξ_{DICsup} | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.51E-07 | 1.32E-05 |
| 15 | ξ_{DICint} | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 4.54E-08 | 2.90E-06 |
| 16 | ξ_{DICbas} | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 3.28E-07 | 2.12E-05 |
| 17 | SMD_{MAX} | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 4.30E-06 | 1.12E-04 |
| 18 | k_{SI} | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 3.90E-12 | 1.24E-10 |
| 19 | k_{SD} | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.17E-10 | 2.43E-09 |
| 20 | k_{DS} | 2 | -1.81E-06 | -8.42E-08 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 21 | k_{DI} | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 4.15E-08 | 1.21E-06 |
| 22 | K_L | 2 | -3.03E-04 | -9.17E-06 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 23 | DIC_{sat} | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 6.36E-05 | 2.03E-03 |
| 24 | ξ_{DOCsup} | 2 | -1.44E-06 | -2.97E-08 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 25 | ξ_{DOCint} | 2 | -6.46E-07 | -1.41E-08 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 26 | ξ_{DOCbas} | 2 | -6.23E-06 | -9.09E-08 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 6.98E-08 |
| 27 | ξ_{DICsup} | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 6.23E-07 | 2.06E-05 |

| | | | | | | | |
|----|----------------|---|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|
| 28 | ξ_{DICint} | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 3.95E-07 | 1.34E-05 |
| 29 | ξ_{DICbas} | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 4.90E-06 | 1.65E-04 |
| 30 | SMD_{MAX} | 3 | 0.00E+00 | 3.48E-06 | 5.22E-06 | 7.43E-06 | 2.02E-05 |
| 31 | k_{SI} | 3 | 0.00E+00 | 1.42E-12 | 2.08E-12 | 2.98E-12 | 7.93E-12 |
| 32 | k_{SD} | 3 | 0.00E+00 | 3.87E-11 | 5.18E-11 | 7.37E-11 | 1.93E-10 |
| 33 | k_{DS} | 3 | -1.86E-07 | -7.12E-08 | -4.95E-08 | -3.75E-08 | 0.00E+00 |
| 34 | k_{DI} | 3 | 0.00E+00 | 1.85E-08 | 2.65E-08 | 3.85E-08 | 1.02E-07 |
| 35 | K_L | 3 | -3.28E-05 | -1.18E-05 | -8.03E-06 | -5.37E-06 | 2.64E-05 |
| 36 | DIC_{sat} | 3 | 0.00E+00 | 4.64E-05 | 7.14E-05 | 9.83E-05 | 2.71E-04 |
| 37 | ξ_{DOCsup} | 3 | -2.28E-07 | -9.23E-08 | -6.07E-08 | -3.51E-08 | 3.35E-08 |
| 38 | ξ_{DOCint} | 3 | -4.56E-09 | -1.46E-09 | -8.71E-10 | -5.05E-10 | 6.34E-10 |
| 39 | ξ_{DOCbas} | 3 | -1.16E-07 | -3.93E-08 | -2.27E-08 | -9.42E-09 | 3.16E-08 |
| 40 | ξ_{DICsup} | 3 | 0.00E+00 | 2.29E-06 | 3.38E-06 | 4.73E-06 | 1.42E-05 |
| 41 | ξ_{DICint} | 3 | 0.00E+00 | 5.18E-08 | 8.03E-08 | 1.16E-07 | 3.84E-07 |
| 42 | ξ_{DICbas} | 3 | 0.00E+00 | 1.83E-06 | 2.88E-06 | 4.30E-06 | 1.67E-05 |
| 43 | SMD_{MAX} | 4 | 0.00E+00 | 4.58E-05 | 7.72E-05 | 9.46E-05 | 1.28E-04 |
| 44 | k_{SI} | 4 | 0.00E+00 | 5.90E-11 | 1.04E-10 | 1.26E-10 | 1.47E-10 |
| 45 | k_{SD} | 4 | 0.00E+00 | 1.80E-09 | 3.08E-09 | 3.77E-09 | 4.40E-09 |
| 46 | k_{DS} | 4 | -4.98E-06 | -4.17E-06 | -3.38E-06 | -1.99E-06 | 0.00E+00 |
| 47 | k_{DI} | 4 | 0.00E+00 | 9.16E-07 | 1.61E-06 | 1.99E-06 | 2.32E-06 |
| 48 | K_L | 4 | -7.78E-04 | -6.53E-04 | -5.39E-04 | -2.96E-04 | 8.04E-05 |
| 49 | DIC_{sat} | 4 | 0.00E+00 | 8.28E-04 | 1.40E-03 | 1.67E-03 | 2.62E-03 |
| 50 | ξ_{DOCsup} | 4 | -2.76E-06 | -2.15E-06 | -1.70E-06 | -8.82E-07 | 3.91E-07 |
| 51 | ξ_{DOCint} | 4 | -8.94E-07 | -5.38E-07 | -4.22E-07 | -2.09E-07 | 1.10E-07 |
| 52 | ξ_{DOCbas} | 4 | -1.61E-06 | -1.44E-06 | -1.03E-06 | -3.95E-07 | 5.65E-07 |
| 53 | ξ_{DICsup} | 4 | 0.00E+00 | 3.32E-05 | 5.15E-05 | 6.18E-05 | 8.11E-05 |
| 54 | ξ_{DICint} | 4 | 0.00E+00 | 1.28E-05 | 2.19E-05 | 2.66E-05 | 4.23E-05 |
| 55 | ξ_{DICbas} | 4 | 0.00E+00 | 3.88E-05 | 6.92E-05 | 8.49E-05 | 1.64E-04 |

Tabela B.3 Resultados para análise de sensibilidade na carga acumulada de DOC

| Id_par | Parâmetro | Uso | Min | Q ₁ | Mediana | Q ₃ | Max |
|--------|----------------|-----|-----------|----------------|-----------|----------------|----------|
| 1 | K_{pis} | - | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 2 | k_{DIB} | - | -8.93E-07 | -8.85E-08 | -2.81E-08 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 3 | k_{DIP} | - | -7.27E-09 | -7.90E-10 | -2.53E-10 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 4 | SMD_{MAX} | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.03E-05 | 9.40E-03 |
| 5 | k_{SI} | 1 | -7.81E-11 | -1.32E-13 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 6 | k_{SD} | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.92E-09 | 1.09E-06 |
| 7 | k_{DS} | 1 | -1.16E-03 | -3.14E-06 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 8 | k_{DI} | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.97E-07 | 1.12E-04 |
| 9 | K_L | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 10 | DIC_{sat} | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 11 | ξ_{DOCsup} | 1 | -7.93E-04 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 5.85E-03 |
| 12 | ξ_{DOCint} | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 5.68E-07 | 1.63E-03 |
| 13 | ξ_{DOCbas} | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 3.83E-06 | 7.06E-03 |
| 14 | ξ_{DICsup} | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 15 | ξ_{DICint} | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |

| | | | | | | | |
|----|--------------------|---|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|
| 16 | ξ_{DICbas} | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 17 | SMD _{MAX} | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 3.97E-04 | 2.30E-01 |
| 18 | k _{SI} | 2 | -1.76E-09 | -1.73E-12 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 19 | k _{SD} | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.74E-08 | 2.11E-05 |
| 20 | k _{DS} | 2 | -1.52E-02 | -1.87E-05 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 21 | k _{DI} | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.78E-06 | 1.45E-03 |
| 22 | K _L | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 23 | DIC _{sat} | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 24 | ξ_{DOCsup} | 2 | -1.29E-02 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.48E-02 |
| 25 | ξ_{DOCint} | 2 | -1.67E-06 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 3.95E-06 | 7.76E-03 |
| 26 | ξ_{DOCbas} | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 6.00E-05 | 1.00E-01 |
| 27 | ξ_{DICsup} | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 28 | ξ_{DICint} | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 29 | ξ_{DICbas} | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 30 | SMD _{MAX} | 3 | 0.00E+00 | 3.93E-04 | 2.23E-03 | 7.80E-03 | 6.85E-02 |
| 31 | k _{SI} | 3 | -2.22E-10 | -2.50E-11 | -6.67E-12 | -7.13E-13 | 4.05E-12 |
| 32 | k _{SD} | 3 | 0.00E+00 | 2.04E-08 | 1.44E-07 | 4.78E-07 | 2.98E-06 |
| 33 | k _{DS} | 3 | -2.77E-03 | -4.65E-04 | -1.38E-04 | -1.90E-05 | 0.00E+00 |
| 34 | k _{DI} | 3 | 0.00E+00 | 1.82E-06 | 1.32E-05 | 4.42E-05 | 2.66E-04 |
| 35 | K _L | 3 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 36 | DIC _{sat} | 3 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 7.39E-04 |
| 37 | ξ_{DOCsup} | 3 | -3.63E-03 | -5.15E-05 | 6.73E-05 | 1.13E-03 | 9.26E-03 |
| 38 | ξ_{DOCint} | 3 | -4.42E-07 | 1.51E-06 | 1.22E-05 | 6.21E-05 | 1.72E-03 |
| 39 | ξ_{DOCbas} | 3 | -5.54E-04 | 2.45E-05 | 2.90E-04 | 1.35E-03 | 1.97E-02 |
| 40 | ξ_{DICsup} | 3 | -6.40E-05 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 41 | ξ_{DICint} | 3 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 8.89E-05 |
| 42 | ξ_{DICbas} | 3 | -7.42E-05 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 43 | SMD _{MAX} | 4 | 0.00E+00 | 7.89E-04 | 6.41E-03 | 2.10E-02 | 9.57E-01 |
| 44 | k _{SI} | 4 | -9.08E-09 | -1.55E-09 | -4.67E-10 | -4.16E-11 | 0.00E+00 |
| 45 | k _{SD} | 4 | 0.00E+00 | 3.59E-07 | 3.66E-06 | 1.23E-05 | 6.56E-05 |
| 46 | k _{DS} | 4 | -7.59E-02 | -1.37E-02 | -4.19E-03 | -3.89E-04 | 0.00E+00 |
| 47 | k _{DI} | 4 | 0.00E+00 | 3.70E-05 | 4.00E-04 | 1.31E-03 | 7.26E-03 |
| 48 | K _L | 4 | -1.16E-03 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 49 | DIC _{sat} | 4 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.00E-03 |
| 50 | ξ_{DOCsup} | 4 | -4.13E-02 | -5.00E-04 | 8.21E-04 | 2.05E-02 | 1.16E-01 |
| 51 | ξ_{DOCint} | 4 | -3.04E-06 | 5.02E-04 | 4.90E-03 | 2.09E-02 | 1.82E-01 |
| 52 | ξ_{DOCbas} | 4 | -8.69E-03 | 6.07E-04 | 7.80E-03 | 2.83E-02 | 3.84E-01 |
| 53 | ξ_{DICsup} | 4 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.10E-04 |
| 54 | ξ_{DICint} | 4 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 55 | ξ_{DICbas} | 4 | -8.30E-05 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |

Tabela B.4 Resultados para análise de sensibilidade na carga acumulada de DIC

| Id_par | Parâmetro | Uso | Min | Q ₁ | Mediana | Q ₃ | Max |
|--------|------------------|-----|----------|----------------|----------|----------------|----------|
| 1 | K _{pis} | - | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 4.93E-08 | 1.27E-06 | 5.38E-06 |
| 2 | k _{DIB} | - | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 8.06E-11 | 6.29E-10 | 3.67E-09 |
| 3 | k _{DIP} | - | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 4.59E-13 | 4.07E-12 | 2.04E-11 |

| | | | | | | | |
|----|---------------------|---|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|
| 4 | SMD _{MAX} | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.98E-08 | 4.83E-05 |
| 5 | k _{SI} | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.52E-14 | 3.97E-11 |
| 6 | k _{SD} | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 4.41E-13 | 1.07E-09 |
| 7 | k _{DS} | 1 | -1.10E-06 | -4.43E-10 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 8 | k _{DI} | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.14E-10 | 5.65E-07 |
| 9 | K _L | 1 | -1.68E-04 | -6.16E-08 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 10 | DIC _{sat} | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 3.23E-07 | 7.03E-04 |
| 11 | ξ _{DOCsup} | 1 | -7.41E-07 | -1.80E-10 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.40E-11 |
| 12 | ξ _{DOCint} | 1 | -1.34E-07 | -3.06E-11 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 3.01E-12 |
| 13 | ξ _{DOCbas} | 1 | -5.96E-07 | -1.04E-10 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 5.80E-11 |
| 14 | ξ _{DICsup} | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.37E-08 | 3.28E-05 |
| 15 | ξ _{DICint} | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.71E-09 | 6.76E-06 |
| 16 | ξ _{DICbas} | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.44E-08 | 2.98E-05 |
| 17 | SMD _{MAX} | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.83E-07 | 3.06E-04 |
| 18 | k _{SI} | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.06E-13 | 4.04E-10 |
| 19 | k _{SD} | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 4.44E-12 | 8.05E-09 |
| 20 | k _{DS} | 2 | -5.92E-06 | -3.08E-09 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 21 | k _{DI} | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.95E-09 | 3.98E-06 |
| 22 | K _L | 2 | -8.19E-04 | -3.96E-07 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 23 | DIC _{sat} | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 3.88E-06 | 6.03E-03 |
| 24 | ξ _{DOCsup} | 2 | -4.87E-06 | -1.76E-09 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 25 | ξ _{DOCint} | 2 | -2.37E-06 | -1.07E-09 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 26 | ξ _{DOCbas} | 2 | -1.90E-05 | -8.20E-09 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.27E-10 |
| 27 | ξ _{DICsup} | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 4.25E-08 | 8.44E-05 |
| 28 | ξ _{DICint} | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.80E-08 | 5.23E-05 |
| 29 | ξ _{DICbas} | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.85E-07 | 4.37E-04 |
| 30 | SMD _{MAX} | 3 | 0.00E+00 | 4.10E-07 | 3.28E-06 | 9.99E-06 | 5.26E-05 |
| 31 | k _{SI} | 3 | 0.00E+00 | 1.86E-13 | 1.58E-12 | 4.87E-12 | 2.39E-11 |
| 32 | k _{SD} | 3 | 0.00E+00 | 4.19E-12 | 3.71E-11 | 1.17E-10 | 5.69E-10 |
| 33 | k _{DS} | 3 | -5.30E-07 | -1.10E-07 | -3.47E-08 | -3.78E-09 | 0.00E+00 |
| 34 | k _{DI} | 3 | 0.00E+00 | 2.12E-09 | 1.96E-08 | 6.15E-08 | 3.00E-07 |
| 35 | K _L | 3 | -7.63E-05 | -1.60E-05 | -5.00E-06 | -4.41E-07 | 2.10E-05 |
| 36 | DIC _{sat} | 3 | 0.00E+00 | 6.67E-06 | 4.92E-05 | 1.47E-04 | 7.08E-04 |
| 37 | ξ _{DOCsup} | 3 | -7.31E-07 | -1.52E-07 | -4.72E-08 | -4.42E-09 | 1.18E-10 |
| 38 | ξ _{DOCint} | 3 | -1.42E-08 | -2.58E-09 | -7.97E-10 | -8.25E-11 | 2.93E-12 |
| 39 | ξ _{DOCbas} | 3 | -2.96E-07 | -6.31E-08 | -2.04E-08 | -1.96E-09 | 7.46E-11 |
| 40 | ξ _{DICsup} | 3 | 0.00E+00 | 3.90E-07 | 2.91E-06 | 8.98E-06 | 4.37E-05 |
| 41 | ξ _{DICint} | 3 | 0.00E+00 | 6.36E-09 | 5.35E-08 | 1.61E-07 | 9.01E-07 |
| 42 | ξ _{DICbas} | 3 | 0.00E+00 | 1.87E-07 | 1.30E-06 | 4.04E-06 | 2.02E-05 |
| 43 | SMD _{MAX} | 4 | 0.00E+00 | 4.27E-06 | 3.97E-05 | 1.25E-04 | 3.19E-04 |
| 44 | k _{SI} | 4 | 0.00E+00 | 6.14E-12 | 6.36E-11 | 2.07E-10 | 4.74E-10 |
| 45 | k _{SD} | 4 | 0.00E+00 | 1.81E-10 | 1.81E-09 | 5.97E-09 | 1.38E-08 |
| 46 | k _{DS} | 4 | -1.50E-05 | -6.45E-06 | -1.97E-06 | -1.79E-07 | 0.00E+00 |
| 47 | k _{DI} | 4 | 0.00E+00 | 9.33E-08 | 9.52E-07 | 3.15E-06 | 7.25E-06 |
| 48 | K _L | 4 | -2.31E-03 | -9.45E-04 | -2.87E-04 | -2.37E-05 | 1.43E-04 |
| 49 | DIC _{sat} | 4 | 0.00E+00 | 9.41E-05 | 8.14E-04 | 2.60E-03 | 6.78E-03 |
| 50 | ξ _{DOCsup} | 4 | -8.93E-06 | -3.66E-06 | -1.13E-06 | -9.52E-08 | 1.33E-09 |

| | | | | | | | |
|----|-----------------------|---|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|
| 51 | ξ_{DOCint} | 4 | -2.42E-06 | -1.03E-06 | -3.08E-07 | -2.35E-08 | 3.73E-10 |
| 52 | ξ_{DOCbas} | 4 | -5.26E-06 | -2.17E-06 | -6.46E-07 | -5.86E-08 | 1.29E-09 |
| 53 | ξ_{DICsup} | 4 | 0.00E+00 | 4.63E-06 | 4.35E-05 | 1.38E-04 | 3.37E-04 |
| 54 | ξ_{DICint} | 4 | 0.00E+00 | 1.21E-06 | 1.31E-05 | 4.17E-05 | 1.03E-04 |
| 55 | ξ_{DICbas} | 4 | 0.00E+00 | 3.44E-06 | 2.94E-05 | 9.00E-05 | 2.44E-04 |

Tabela B.5 Resultados para análise de sensibilidade em DOC mínimo

| Id_par | Parâmetro | Uso | Min | Q ₁ | Mediana | Q ₃ | Max |
|--------|---------------------------|-----|-----------|----------------|-----------|----------------|----------|
| 1 | K_{pis} | - | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 2 | k_{DIB} | - | -5.61E-05 | -8.60E-06 | -4.47E-07 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 3 | k_{DIP} | - | -4.61E-07 | -7.98E-08 | -3.94E-09 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 4 | SMD_{MAX} | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 4.99E-04 | 4.83E-03 |
| 5 | k_{SI} | 1 | -7.42E-13 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 6 | k_{SD} | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.15E-08 | 2.04E-07 |
| 7 | k_{DS} | 1 | -9.29E-05 | -9.76E-06 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 8 | k_{DI} | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 9.42E-07 | 9.12E-06 |
| 9 | K_{L} | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 10 | DIC_{sat} | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 11 | ξ_{DOCsup} | 1 | -1.47E-05 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.81E-03 | 2.43E-02 |
| 12 | ξ_{DOCint} | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 7.07E-05 | 7.83E-04 |
| 13 | ξ_{DOCbas} | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 7.46E-04 | 9.18E-03 |
| 14 | ξ_{DICsup} | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 15 | ξ_{DICint} | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 16 | ξ_{DICbas} | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 17 | SMD_{MAX} | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 9.92E-03 | 5.76E-02 |
| 18 | k_{SI} | 2 | -1.88E-11 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 6.86E-12 |
| 19 | k_{SD} | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 5.15E-07 | 4.03E-06 |
| 20 | k_{DS} | 2 | -1.84E-03 | -2.34E-04 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 21 | k_{DI} | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.22E-05 | 1.75E-04 |
| 22 | K_{L} | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 23 | DIC_{sat} | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 24 | ξ_{DOCsup} | 2 | -4.20E-04 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 8.79E-03 | 7.71E-02 |
| 25 | ξ_{DOCint} | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 9.72E-04 | 2.09E-02 |
| 26 | ξ_{DOCbas} | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.78E-02 | 2.38E-01 |
| 27 | ξ_{DICsup} | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 28 | ξ_{DICint} | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 29 | ξ_{DICbas} | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 30 | SMD_{MAX} | 3 | 0.00E+00 | 2.77E-03 | 4.25E-03 | 8.68E-03 | 3.29E-02 |
| 31 | k_{SI} | 3 | -1.09E-08 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.16E-11 |
| 32 | k_{SD} | 3 | 0.00E+00 | 1.10E-07 | 1.71E-07 | 3.56E-07 | 1.44E-06 |
| 33 | k_{DS} | 3 | -7.11E-04 | -1.64E-04 | -7.80E-05 | -5.03E-05 | 0.00E+00 |
| 34 | k_{DI} | 3 | -3.15E-05 | 4.86E-06 | 7.49E-06 | 1.54E-05 | 6.87E-05 |
| 35 | K_{L} | 3 | -2.17E-02 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 5.63E-06 |
| 36 | DIC_{sat} | 3 | -1.30E-02 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 9.00E-06 |
| 37 | ξ_{DOCsup} | 3 | 0.00E+00 | 7.63E-03 | 1.45E-02 | 1.94E-02 | 5.83E-02 |
| 38 | ξ_{DOCint} | 3 | 0.00E+00 | 1.65E-04 | 3.40E-04 | 7.47E-04 | 3.84E-03 |
| 39 | ξ_{DOCbas} | 3 | 0.00E+00 | 2.55E-03 | 5.57E-03 | 1.20E-02 | 4.66E-02 |

| | | | | | | | | |
|----|----------------|---|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|
| 40 | ξ_{DICsup} | 3 | -7.50E-07 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.09E-03 |
| 41 | ξ_{DICint} | 3 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 42 | ξ_{DICbas} | 3 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 43 | SMD_{MAX} | 4 | 0.00E+00 | 3.67E-02 | 7.37E-02 | 1.37E-01 | 9.26E-01 | |
| 44 | k_{SI} | 4 | -3.98E-11 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 3.23E-11 |
| 45 | k_{SD} | 4 | 0.00E+00 | 1.60E-06 | 3.23E-06 | 6.54E-06 | 1.27E-05 | |
| 46 | k_{DS} | 4 | -6.26E-03 | -3.07E-03 | -1.45E-03 | -7.30E-04 | 0.00E+00 | |
| 47 | k_{DI} | 4 | 0.00E+00 | 6.94E-05 | 1.35E-04 | 2.93E-04 | 6.00E-04 | |
| 48 | K_L | 4 | -2.17E-02 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.50E-05 | |
| 49 | DIC_{sat} | 4 | -9.00E-06 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.30E-02 |
| 50 | ξ_{DOCsup} | 4 | - | 4.32E+00 | 1.05E-01 | 1.70E-01 | 2.23E-01 | 3.51E-01 |
| 51 | ξ_{DOCint} | 4 | 0.00E+00 | 2.20E-03 | 5.42E-03 | 1.25E-02 | 5.13E-02 | |
| 52 | ξ_{DOCbas} | 4 | 0.00E+00 | 4.40E-02 | 1.15E-01 | 2.12E-01 | 5.51E+00 | |
| 53 | ξ_{DICsup} | 4 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 54 | ξ_{DICint} | 4 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 55 | ξ_{DICbas} | 4 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |

Tabela B.6 Resultados para análise de sensibilidade em DIC mínimo

| Id_par | Parâmetro | Uso | Min | Q ₁ | Mediana | Q ₃ | Max | |
|--------|----------------|-----|-----------|----------------|-----------|----------------|----------|----------|
| 1 | K_{pis} | - | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 9.33E-03 | 4.37E-02 | 3.39E-01 | |
| 2 | k_{DIB} | - | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 3.54E-07 | 2.96E-06 | 2.07E-05 | |
| 3 | k_{DIP} | - | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 3.14E-09 | 2.62E-08 | 1.15E-07 | |
| 4 | SMD_{MAX} | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.84E-04 | 5.01E-02 | |
| 5 | k_{SI} | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.12E-10 | 2.54E-08 | |
| 6 | k_{SD} | 1 | -2.02E-10 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.43E-09 | 7.51E-07 | |
| 7 | k_{DS} | 1 | -8.27E-04 | -7.47E-07 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.02E-07 | |
| 8 | k_{DI} | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.03E-06 | 3.92E-04 | |
| 9 | K_L | 1 | -2.33E-01 | -9.12E-04 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.55E-04 | |
| 10 | DIC_{sat} | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 3.68E-03 | 7.59E-01 | |
| 11 | ξ_{DOCsup} | 1 | -4.44E-04 | -2.13E-07 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.79E-06 | |
| 12 | ξ_{DOCint} | 1 | -3.45E-05 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.65E-06 | |
| 13 | ξ_{DOCbas} | 1 | -4.88E-04 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 4.23E-06 | |
| 14 | ξ_{DICsup} | 1 | -1.30E-04 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.52E-04 | 4.50E-02 | |
| 15 | ξ_{DICint} | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.00E-04 | 3.87E-03 | |
| 16 | ξ_{DICbas} | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.61E-04 | 2.92E-02 | |
| 17 | SMD_{MAX} | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.33E-03 | 1.42E-01 | |
| 18 | k_{SI} | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 4.25E-09 | 1.27E-07 | |
| 19 | k_{SD} | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 4.29E-08 | 2.33E-06 | |
| 20 | k_{DS} | 2 | -1.84E-03 | -2.03E-05 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | |
| 21 | k_{DI} | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 3.76E-05 | 1.15E-03 | |
| 22 | K_L | 2 | - | 1.20E+00 | -5.52E-04 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 5.71E-01 |
| 23 | DIC_{sat} | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 6.32E-02 | 3.40E+00 | |
| 24 | ξ_{DOCsup} | 2 | -1.75E-03 | -1.43E-05 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 6.53E-06 | |
| 25 | ξ_{DOCint} | 2 | -4.77E-04 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.35E-05 | |
| 26 | ξ_{DOCbas} | 2 | -7.60E-03 | -7.05E-05 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 8.95E-05 | |

| | | | | | | | |
|----|----------------|---|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|
| 27 | ξ_{DICsup} | 2 | -7.73E-04 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 5.97E-04 | 6.98E-02 |
| 28 | ξ_{DICint} | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.40E-03 | 6.11E-02 |
| 29 | ξ_{DICbas} | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 8.41E-03 | 2.13E-01 |
| 30 | SMD_{MAX} | 3 | 0.00E+00 | 8.44E-04 | 1.55E-03 | 2.88E-03 | 2.25E-02 |
| 31 | k_{SI} | 3 | -7.31E-09 | 7.72E-10 | 1.42E-09 | 2.31E-09 | 9.40E-09 |
| 32 | k_{SD} | 3 | 0.00E+00 | 1.16E-09 | 3.81E-09 | 1.75E-08 | 1.48E-07 |
| 33 | k_{DS} | 3 | -1.44E-04 | -1.30E-05 | -1.79E-06 | -5.24E-07 | 3.96E-07 |
| 34 | k_{DI} | 3 | -3.59E-05 | 5.32E-06 | 1.04E-05 | 1.64E-05 | 7.56E-05 |
| 35 | K_L | 3 | -6.45E-02 | -1.61E-02 | -8.24E-03 | -3.04E-03 | 6.26E-02 |
| 36 | DIC_{sat} | 3 | 0.00E+00 | 2.43E-02 | 4.72E-02 | 7.83E-02 | 3.11E-01 |
| 37 | ξ_{DOCsup} | 3 | -1.74E-04 | -8.79E-06 | -2.11E-06 | 8.31E-07 | 9.54E-04 |
| 38 | ξ_{DOCint} | 3 | -4.54E-06 | -2.00E-07 | 0.00E+00 | 2.05E-07 | 2.75E-06 |
| 39 | ξ_{DOCbas} | 3 | -9.16E-05 | -4.65E-06 | -8.62E-08 | 2.10E-06 | 9.57E-04 |
| 40 | ξ_{DICsup} | 3 | -4.72E-06 | 2.66E-03 | 4.54E-03 | 8.91E-03 | 4.75E-02 |
| 41 | ξ_{DICint} | 3 | 0.00E+00 | 8.39E-05 | 3.09E-04 | 7.25E-04 | 4.35E-03 |
| 42 | ξ_{DICbas} | 3 | 0.00E+00 | 1.71E-03 | 5.80E-03 | 1.26E-02 | 5.49E-02 |
| 43 | SMD_{MAX} | 4 | 0.00E+00 | 1.32E-02 | 2.34E-02 | 4.50E-02 | 1.72E-01 |
| 44 | k_{SI} | 4 | 0.00E+00 | 1.83E-08 | 3.20E-08 | 5.06E-08 | 1.29E-07 |
| 45 | k_{SD} | 4 | 0.00E+00 | 3.00E-08 | 1.04E-07 | 5.69E-07 | 4.05E-06 |
| 46 | k_{DS} | 4 | -4.78E-03 | -4.58E-04 | -5.02E-05 | -1.42E-05 | 0.00E+00 |
| 47 | k_{DI} | 4 | 0.00E+00 | 1.16E-04 | 2.25E-04 | 4.01E-04 | 2.14E-03 |
| 48 | K_L | 4 | -1.78E+00 | -9.42E-01 | -5.05E-01 | -1.50E-01 | 3.95E-01 |
| 49 | DIC_{sat} | 4 | 0.00E+00 | 4.08E-01 | 7.73E-01 | 1.17E+00 | 2.44E+00 |
| 50 | ξ_{DOCsup} | 4 | -3.04E-03 | -1.84E-04 | -5.64E-05 | -1.70E-06 | 3.99E-04 |
| 51 | ξ_{DOCint} | 4 | -3.17E-04 | -5.80E-06 | -1.47E-06 | 4.34E-06 | 1.43E-04 |
| 52 | ξ_{DOCbas} | 4 | -1.86E-03 | -1.39E-04 | -1.75E-05 | 3.52E-05 | 9.44E-04 |
| 53 | ξ_{DICsup} | 4 | -8.66E-05 | 3.42E-02 | 5.45E-02 | 8.36E-02 | 2.75E-01 |
| 54 | ξ_{DICint} | 4 | 0.00E+00 | 5.04E-03 | 8.18E-03 | 1.35E-02 | 3.90E-02 |
| 55 | ξ_{DICbas} | 4 | 0.00E+00 | 2.64E-02 | 1.04E-01 | 2.23E-01 | 5.84E-01 |

Tabela B.7 Resultados para análise de sensibilidade em DOC máximo

| Id_par | Parâmetro | Uso | Min | Q ₁ | Mediana | Q ₃ | Max |
|--------|----------------|-----|-----------|----------------|-----------|----------------|----------|
| 1 | K_{pis} | - | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 2 | k_{DIB} | - | -8.46E-06 | -1.02E-06 | -3.51E-08 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 3 | k_{DIP} | - | -4.05E-08 | -5.13E-09 | -1.59E-10 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 4 | SMD_{MAX} | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 6.69E-04 | 5.23E-03 |
| 5 | k_{SI} | 1 | -1.97E-11 | -3.13E-12 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 6 | k_{SD} | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 6.20E-08 | 4.91E-07 |
| 7 | k_{DS} | 1 | -5.37E-04 | -6.71E-05 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 8 | k_{DI} | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 6.43E-06 | 5.13E-05 |
| 9 | K_L | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 10 | DIC_{sat} | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 11 | ξ_{DOCsup} | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 3.66E-04 | 3.48E-03 |
| 12 | ξ_{DOCint} | 1 | -2.49E-05 | -1.40E-06 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 4.56E-07 |
| 13 | ξ_{DOCbas} | 1 | -1.65E-04 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 3.21E-07 | 5.08E-04 |
| 14 | ξ_{DICsup} | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |

| | | | | | | | |
|----|----------------|---|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|
| 15 | ξ_{DICint} | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 16 | ξ_{DICbas} | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 17 | SMD_{MAX} | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.20E-02 | 6.95E-02 |
| 18 | k_{SI} | 2 | -1.12E-10 | -2.28E-11 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 19 | k_{SD} | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 4.18E-07 | 2.15E-06 |
| 20 | k_{DS} | 2 | -1.61E-03 | -2.64E-04 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 21 | k_{DI} | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.48E-05 | 1.53E-04 |
| 22 | K_L | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 23 | DIC_{sat} | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 24 | ξ_{DOCsup} | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.03E-03 | 1.09E-02 |
| 25 | ξ_{DOCint} | 2 | -3.37E-04 | -2.03E-05 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 4.34E-05 |
| 26 | ξ_{DOCbas} | 2 | -4.75E-03 | -8.56E-05 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.77E-03 |
| 27 | ξ_{DICsup} | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 28 | ξ_{DICint} | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 29 | ξ_{DICbas} | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 30 | SMD_{MAX} | 3 | 0.00E+00 | 3.42E-03 | 5.04E-03 | 7.37E-03 | 3.12E-02 |
| 31 | k_{SI} | 3 | -2.90E-11 | -1.27E-11 | -9.83E-12 | -6.31E-12 | 0.00E+00 |
| 32 | k_{SD} | 3 | 0.00E+00 | 1.71E-07 | 2.36E-07 | 3.20E-07 | 7.34E-07 |
| 33 | k_{DS} | 3 | -7.53E-04 | -3.24E-04 | -2.43E-04 | -1.75E-04 | 0.00E+00 |
| 34 | k_{DI} | 3 | 0.00E+00 | 1.67E-05 | 2.33E-05 | 3.10E-05 | 7.21E-05 |
| 35 | K_L | 3 | -2.79E-06 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 36 | DIC_{sat} | 3 | -2.71E-06 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 37 | ξ_{DOCsup} | 3 | 0.00E+00 | 1.04E-03 | 1.45E-03 | 1.86E-03 | 4.57E-03 |
| 38 | ξ_{DOCint} | 3 | -6.90E-06 | -2.83E-06 | -1.93E-06 | -1.28E-06 | 2.03E-06 |
| 39 | ξ_{DOCbas} | 3 | -4.23E-04 | -5.41E-05 | -8.84E-06 | 6.03E-05 | 4.48E-04 |
| 40 | ξ_{DICsup} | 3 | -4.94E-07 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 41 | ξ_{DICint} | 3 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 5.49E-08 |
| 42 | ξ_{DICbas} | 3 | -4.39E-07 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.40E-07 |
| 43 | SMD_{MAX} | 4 | 0.00E+00 | 9.34E-03 | 1.43E-02 | 2.56E-02 | 2.84E-01 |
| 44 | k_{SI} | 4 | -6.59E-10 | -3.71E-10 | -3.10E-10 | -2.18E-10 | 0.00E+00 |
| 45 | k_{SD} | 4 | 0.00E+00 | 2.41E-06 | 3.29E-06 | 3.76E-06 | 7.44E-06 |
| 46 | k_{DS} | 4 | -6.61E-03 | -4.35E-03 | -3.78E-03 | -2.82E-03 | 0.00E+00 |
| 47 | k_{DI} | 4 | 0.00E+00 | 2.70E-04 | 3.62E-04 | 4.16E-04 | 6.32E-04 |
| 48 | K_L | 4 | -2.84E-07 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 3.56E-07 |
| 49 | DIC_{sat} | 4 | -5.49E-06 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 50 | ξ_{DOCsup} | 4 | 0.00E+00 | 1.53E-02 | 1.99E-02 | 2.27E-02 | 3.78E-02 |
| 51 | ξ_{DOCint} | 4 | -2.73E-04 | -8.82E-05 | -5.38E-05 | 1.36E-05 | 1.09E-03 |
| 52 | ξ_{DOCbas} | 4 | -8.49E-03 | 8.69E-04 | 2.48E-03 | 3.95E-03 | 8.84E-03 |
| 53 | ξ_{DICsup} | 4 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 4.58E-07 |
| 54 | ξ_{DICint} | 4 | -4.39E-07 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 55 | ξ_{DICbas} | 4 | -1.83E-08 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.40E-07 |

Tabela B.8 Resultados para análise de sensibilidade em DIC máximo

| Id_par | Parâmetro | Uso | Min | Q ₁ | Mediana | Q ₃ | Max |
|--------|-----------|-----|-----------|----------------|----------|----------------|----------|
| 1 | K_{pis} | - | -5.70E-03 | -5.71E-05 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 4.00E-03 |
| 2 | k_{DIB} | - | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 9.31E-08 | 2.25E-06 | 1.25E-05 |
| 3 | k_{DIP} | - | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 4.09E-10 | 1.19E-08 | 1.03E-07 |

| | | | | | | | |
|----|---------|---|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|
| 4 | SMDMAX | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.80E-04 | 1.88E-02 |
| 5 | kSI | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.11E-10 | 1.10E-08 |
| 6 | kSD | 1 | -5.41E-12 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.91E-09 | 3.27E-07 |
| 7 | kDS | 1 | -3.60E-04 | -3.07E-06 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 8 | kDI | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.42E-06 | 1.71E-04 |
| 9 | KL | 1 | -8.57E-02 | -1.46E-03 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 5.55E-05 |
| 10 | DICsat | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 3.04E-03 | 1.66E-01 |
| 11 | ξDOCsup | 1 | -2.17E-04 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 8.97E-06 |
| 12 | ξDOCint | 1 | -1.33E-05 | -2.66E-08 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.04E-07 |
| 13 | ξDOCbas | 1 | -1.71E-04 | -5.51E-08 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 3.73E-06 |
| 14 | ξDICsup | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 3.77E-04 | 2.36E-02 |
| 15 | ξDICint | 1 | -2.51E-07 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.38E-06 | 3.92E-05 |
| 16 | ξDICbas | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 5.97E-05 | 2.08E-03 |
| 17 | SMDMAX | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 7.66E-04 | 3.98E-02 |
| 18 | kSI | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 4.57E-10 | 3.29E-08 |
| 19 | kSD | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.41E-08 | 7.63E-07 |
| 20 | kDS | 2 | -6.08E-04 | -9.89E-06 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 21 | kDI | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 4.61E-06 | 3.76E-04 |
| 22 | KL | 2 | -7.58E-01 | -2.34E-03 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.16E-02 |
| 23 | DICsat | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.59E-02 | 4.67E-01 |
| 24 | ξDOCsup | 2 | -4.06E-04 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 4.39E-05 |
| 25 | ξDOCint | 2 | -1.07E-04 | -8.99E-07 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 8.25E-07 |
| 26 | ξDOCbas | 2 | -1.44E-03 | -4.26E-06 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.95E-05 |
| 27 | ξDICsup | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 7.69E-04 | 5.95E-02 |
| 28 | ξDICint | 2 | -1.05E-05 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.30E-05 | 8.97E-04 |
| 29 | ξDICbas | 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 9.12E-04 | 3.39E-02 |
| 30 | SMDMAX | 3 | 0.00E+00 | 1.17E-03 | 3.58E-03 | 5.07E-03 | 1.27E-02 |
| 31 | kSI | 3 | 0.00E+00 | 3.38E-10 | 1.21E-09 | 1.85E-09 | 4.67E-09 |
| 32 | kSD | 3 | -5.41E-12 | 1.37E-08 | 3.35E-08 | 5.15E-08 | 1.29E-07 |
| 33 | kDS | 3 | -1.32E-04 | -5.23E-05 | -3.39E-05 | -1.38E-05 | 1.39E-08 |
| 34 | kDI | 3 | 0.00E+00 | 4.97E-06 | 1.69E-05 | 2.59E-05 | 6.59E-05 |
| 35 | KL | 3 | -4.35E-02 | -1.21E-02 | -8.08E-03 | -2.18E-03 | 1.66E-03 |
| 36 | DICsat | 3 | 0.00E+00 | 1.57E-02 | 3.78E-02 | 5.56E-02 | 1.43E-01 |
| 37 | ξDOCsup | 3 | -1.59E-04 | -5.87E-05 | -3.52E-05 | -7.12E-08 | 3.06E-05 |
| 38 | ξDOCint | 3 | -1.94E-06 | -5.57E-07 | -2.91E-07 | 0.00E+00 | 2.80E-04 |
| 39 | ξDOCbas | 3 | -7.73E-05 | -2.79E-05 | -1.81E-05 | 0.00E+00 | 2.59E-04 |
| 40 | ξDICsup | 3 | 0.00E+00 | 2.63E-03 | 3.78E-03 | 5.05E-03 | 1.40E-02 |
| 41 | ξDICint | 3 | 0.00E+00 | 1.51E-06 | 2.65E-06 | 4.81E-06 | 3.95E-05 |
| 42 | ξDICbas | 3 | 0.00E+00 | 8.04E-05 | 2.55E-04 | 4.80E-04 | 3.60E-03 |
| 43 | SMDMAX | 4 | 0.00E+00 | 9.72E-03 | 3.61E-02 | 4.44E-02 | 7.67E-02 |
| 44 | kSI | 4 | 0.00E+00 | 1.02E-08 | 4.81E-08 | 5.75E-08 | 7.69E-08 |
| 45 | kSD | 4 | 0.00E+00 | 4.38E-07 | 1.50E-06 | 1.81E-06 | 2.43E-06 |
| 46 | kDS | 4 | -2.87E-03 | -2.10E-03 | -1.71E-03 | -5.08E-04 | 0.00E+00 |
| 47 | kDI | 4 | 0.00E+00 | 2.01E-04 | 7.79E-04 | 9.51E-04 | 1.27E-03 |
| 48 | KL | 4 | -6.11E-01 | -3.94E-01 | -3.16E-01 | -9.76E-02 | 6.43E-03 |
| 49 | DICsat | 4 | 0.00E+00 | 2.21E-01 | 5.35E-01 | 6.64E-01 | 1.18E+00 |
| 50 | ξDOCsup | 4 | -1.57E-03 | -8.54E-04 | -6.00E-04 | -8.62E-07 | 3.68E-04 |
| 51 | ξDOCint | 4 | -6.99E-04 | -1.29E-04 | -6.72E-05 | -2.48E-06 | 5.44E-06 |
| 52 | ξDOCbas | 4 | -8.78E-04 | -6.06E-04 | -5.20E-04 | -8.53E-08 | 7.22E-05 |
| 53 | ξDICsup | 4 | 0.00E+00 | 4.09E-02 | 5.71E-02 | 6.27E-02 | 1.02E-01 |
| 54 | ξDICint | 4 | 0.00E+00 | 2.44E-04 | 8.06E-04 | 1.85E-03 | 8.25E-03 |
| 55 | ξDICbas | 4 | 0.00E+00 | 2.26E-03 | 5.61E-03 | 1.12E-02 | 3.82E-02 |

Os gráficos do tipo box-plot demonstrados a seguir resumem os resultados numéricos da análise de sensibilidade que podem ser encontrados nas tabelas acima. A numeração do eixo das abcissas se refere ao identificador dos parâmetros perturbados.

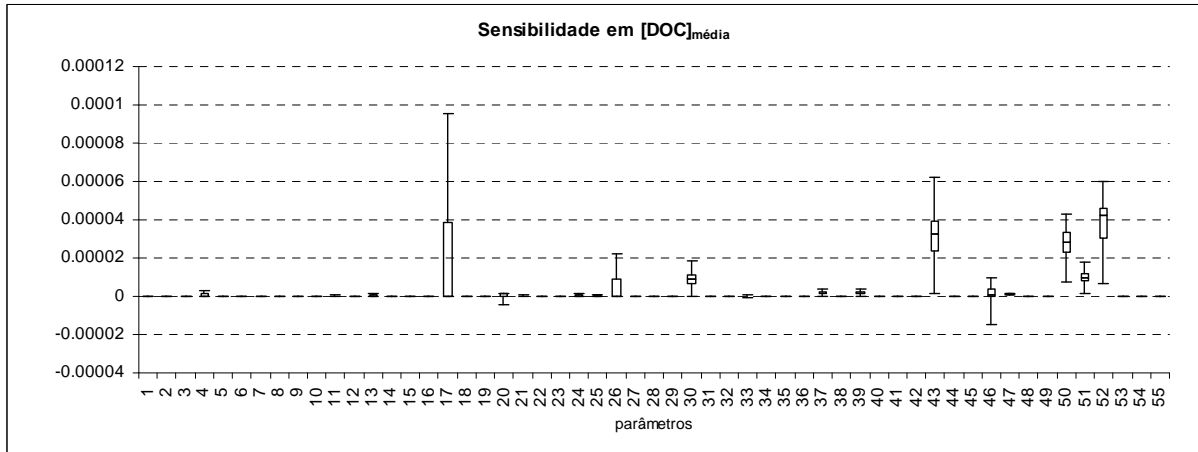


Figura B.1 Sensibilidade dos parâmetros para concentração média de DOC

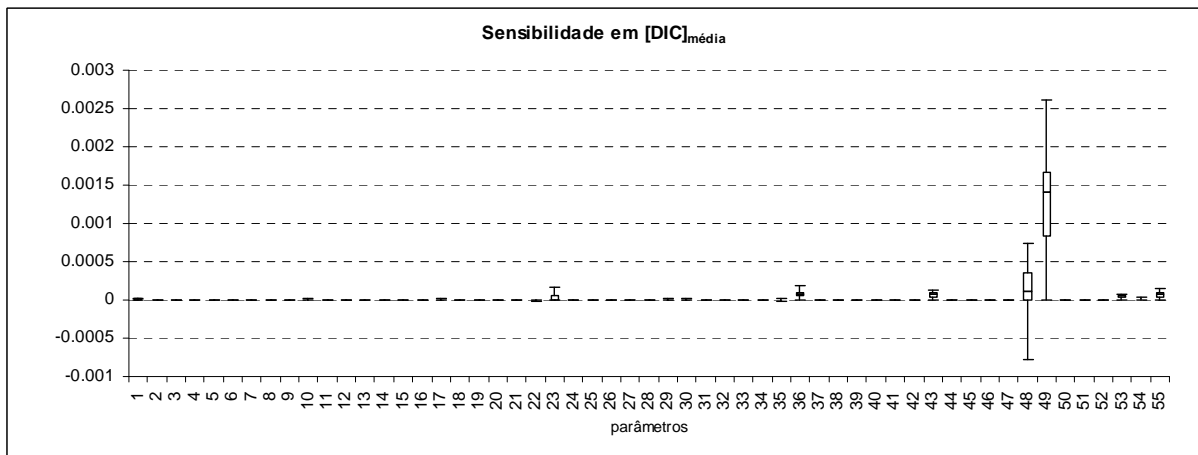


Figura B.2 Sensibilidade dos parâmetros para concentração média de DIC

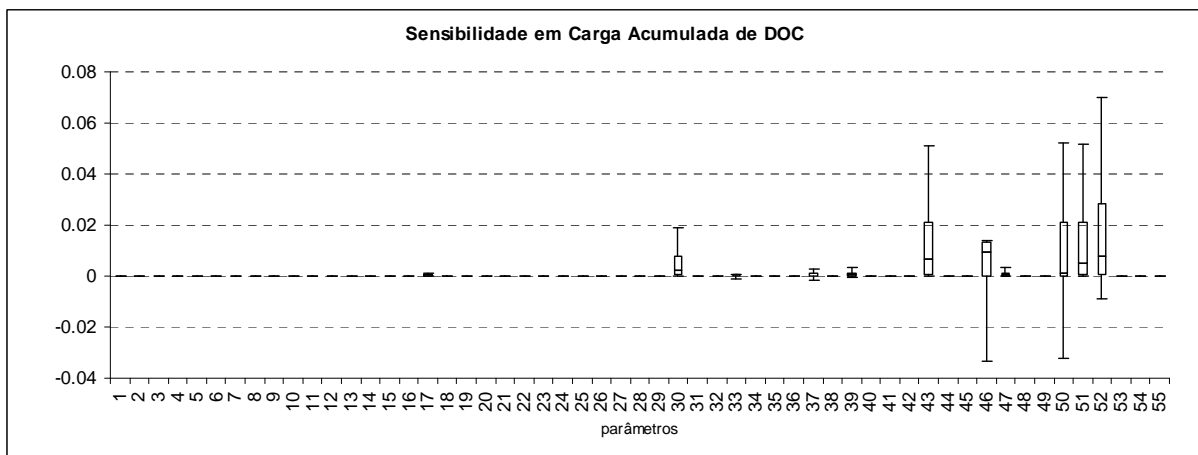


Figura B.3 Sensibilidade dos parâmetros para carga de DOC acumulada

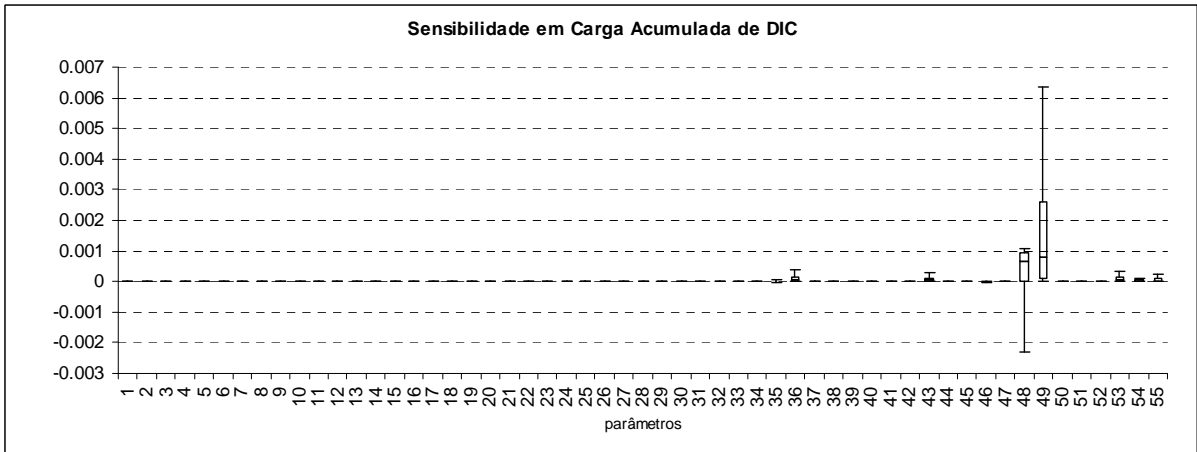


Figura B.4 Sensibilidade dos parâmetros para carga de DIC acumulada

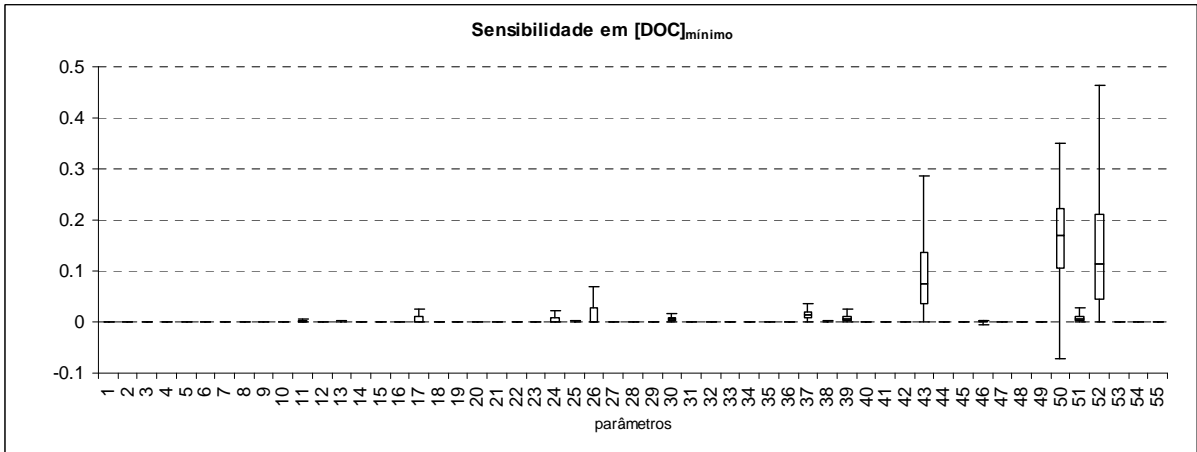


Figura B.5 Sensibilidade dos parâmetros para concentração mínima de DOC

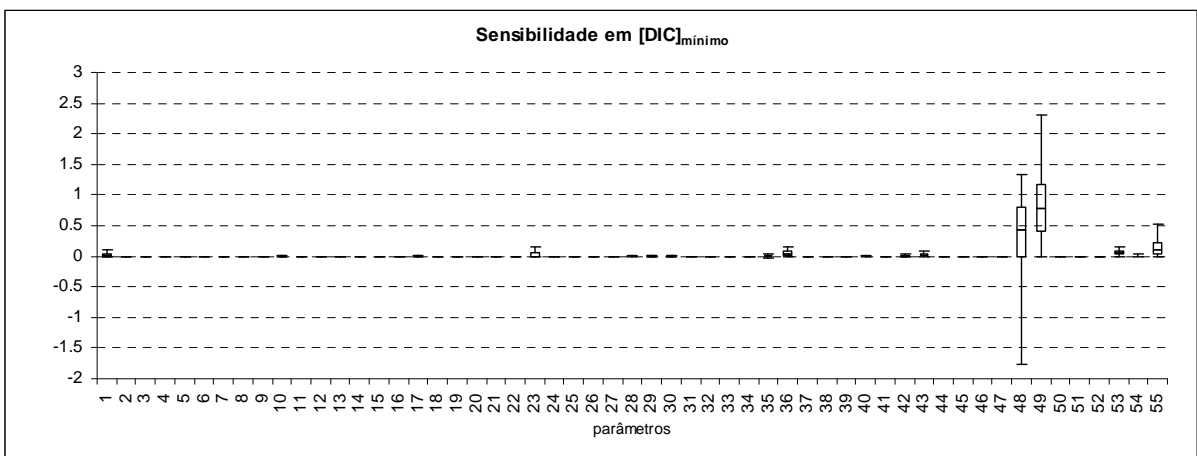


Figura B.6 Sensibilidade dos parâmetros para concentração mínima de DIC

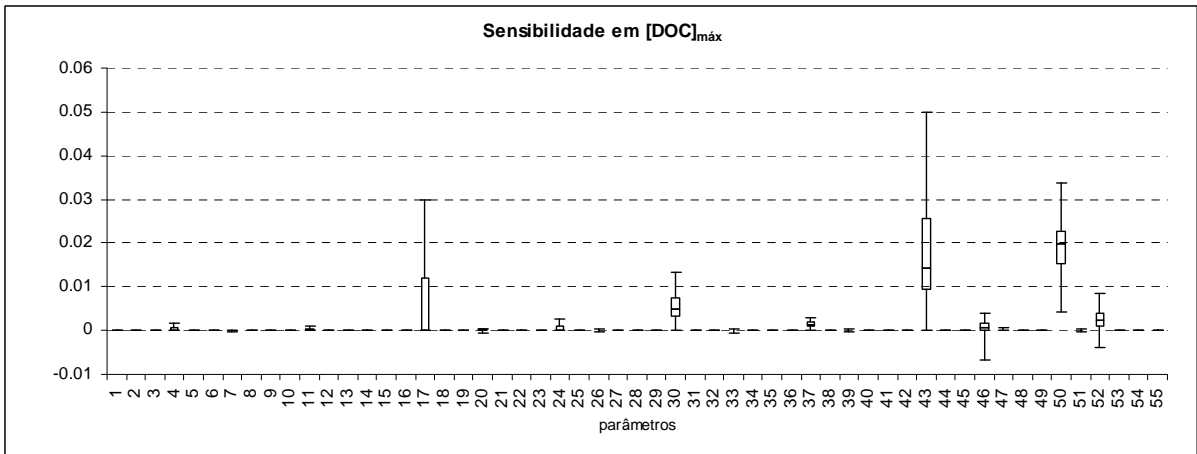


Figura B.7 Sensibilidade dos parâmetros para concentração máxima de DOC

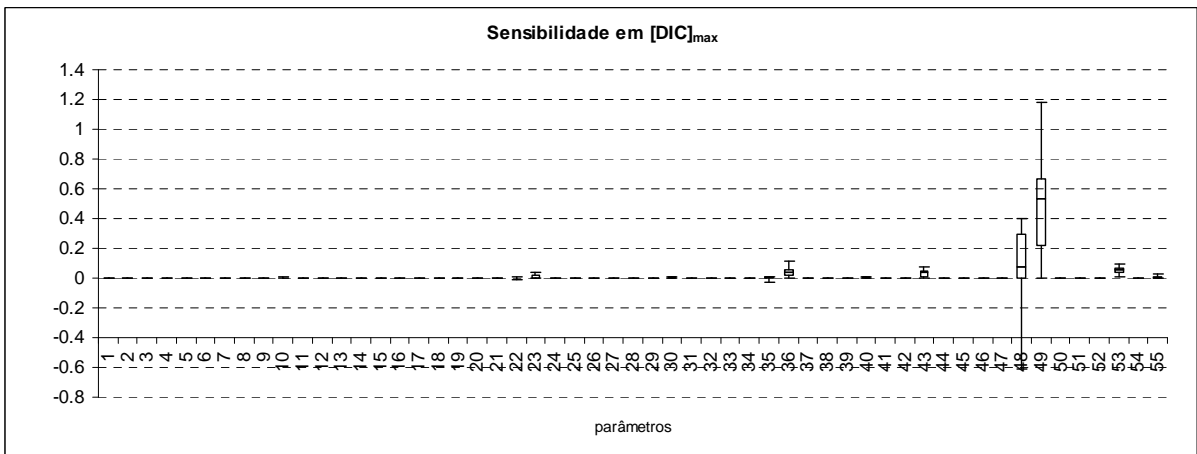


Figura B.8 Sensibilidade dos parâmetros para concentração máxima de DIC

Anexo C – Funções Erro para o Ajuste do Modelo de Carbono

Para avaliar a eficiência do modelo de carbono foram utilizadas quatro medidas de desempenho, baseadas erro entre dados observados e simulados.

Para calibração automática foi utilizado o algoritmo de calibração multi-objetivo MOCOM-UA (*Multi-Objective Complex Evolution*, Yapo et al. 1998 apud Collischonn, 2001) que hierarquiza conjuntos de parâmetros gerados aleatoriamente em um ranking de pareto considerando as melhores respostas para as funções-objetivo que representam as medidas de desempenho.

A função de eficiência para os erros na concentração de DOC e DIC foram calculadas da seguinte maneira:

Equação C.1

$$E_{CDOC} = \frac{\overline{DOC}_{sim} - \overline{DOC}_{emp}}{\overline{DOC}_{emp}}$$
$$E_{CDIC} = \frac{\overline{DIC}_{sim} - \overline{DIC}_{emp}}{\overline{DIC}_{emp}}$$

Onde: E_{CDOC} [adimensional] é o erro na concentração média de DOC, calculado pelo desvio relativo entre a concentração de DOC média simulada pelo modelo (\overline{DOC}_{sim}) e a concentração de DOC média estimada pelos dados (\overline{DOC}_{emp}). Da mesma forma, E_{CDIC} [adimensional] é o erro na concentração média de DIC, calculado pelo desvio relativo entre a concentração de DIC média simulada pelo modelo (\overline{DIC}_{sim}) e a concentração de DIC média estimada pelos dados (\overline{DIC}_{emp})

A função de eficiência para os erros nas cargas de DOC e DIC foram calculadas da seguinte maneira:

Equação C.2

$$E_{WDOC} = \frac{\overline{WDOC}_{sim} - \overline{WDOC}_{emp}}{\overline{WDOC}_{emp}}$$
$$E_{WDIC} = \frac{\overline{WDIC}_{sim} - \overline{WDIC}_{emp}}{\overline{WDIC}_{emp}}$$

Onde: E_{CDOC} [adimensional] é o erro na carga média de DOC [kg/ha.ano], calculado pelo desvio relativo entre a carga de DOC média simulada pelo modelo (\overline{DOC}_{sim}) e a carga de DOC média estimada pelos dados (\overline{DOC}_{emp}). Da mesma forma, E_{CDIC} [adimensional] é o erro na carga média de DIC [kg/ha.ano], calculado pelo desvio relativo entre a carga de DIC média simulada

pelo modelo (DIC_{sim}) e a carga de DIC média estimada pelos dados (DIC_{emp}).

