

RELATÓRIO TÉCNICO

**Avaliação da vida útil do reservatório de
Vargem das Flores**

R1 – Relatório Parcial 1

PLANO DE TRABALHO

Executora



Cliente



Rio de Janeiro, abril de 2018

Apresentação

Este trabalho consiste na estimativa dos possíveis impactos no reservatório de Vargem das Flores, na Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH), em função das modificações previstas para o uso e ocupação do solo na bacia do reservatório, e sua influência sobre o seu uso para o abastecimento de água. Para as modificações futuras no uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do reservatório serão levados em consideração o plano municipal de Contagem e o Macrozoneamento proposto para RMBH.

As estimativas serão realizadas tendo por referência os seguintes cenários de uso do solo:

- a) Cenário passado, de forma a entender os impactos produzidos pelos padrões de ocupação da bacia sobre o reservatório no decorrer dos anos.
- b) Cenário atual de uso do solo, inclusive infraestrutura existente para coleta e tratamento de esgotos e para a drenagem pluvial;
- c) Cenário de uso do solo segundo a regulamentação e as ações de requalificação previstas no Macrozoneamento da RMBH;
- d) Cenário de uso do solo segundo a proposta da Prefeitura Municipal de Contagem.

Para a consecução dos objetivos aqui propostos, é necessário o uso de ferramentas computacionais de modelagem matemática com capacidade para avaliar de forma integral toda a bacia dos cursos d'água afluentes ao reservatório.

A ferramenta de simulação hidrológico-hidrodinâmica a ser utilizada é o modelo MODCEL, de concepção *quasi-2D*, desenvolvido na COPPE/UFRJ (Miguez, 2001; Miguez *et al.* 2017), que servirá de base hidrodinâmica para cálculo da qualidade de água, a qual será analisada com uso do modelo QUAL-UFMG, desenvolvido por Von Sperling (2007).

Por fim, será estimada a vida útil do reservatório de Vargem das Flores, para fins de abastecimento de água, a partir de modelagem de erosão de solos, com base na equação universal de perda de solos, e estimativa de aportes de sedimentos ao reservatório.

Sumário

1	Introdução	4
1.1	Objeto de Estudo	4
1.2	Objetivos	7
2	Escopo e Metodologia	8
2.1	Etapas de desenvolvimento	10
2.2	Produtos	16
3	Cronograma físico	17
4	Aspectos técnicos sobre o sistema de modelagem	18
4.1	Modelagem hidrológico-hidrodinâmica	18
4.1.1	Concepção do Modelo	18
4.1.2	Hipóteses do Modelo de Células para Cheias Urbanas	19
4.1.3	Modelagem de uma Bacia através de Células de Escoamento	19
4.1.4	O Modelo Hidrológico	22
4.1.5	O Modelo Matemático	22
4.1.6	O Modelo Numérico	23
4.2	Modelagem de qualidade da água	25
4.2.1	Características hidráulicas	26
4.2.2	Divisão dos trechos do modelo	27
4.2.3	Vazões de calibração	27
4.2.4	Cargas e vazões domésticas e industriais	27
4.2.5	Condições de Contorno	28
4.3	Modelagem de produção de sedimentos	28
4.3.1	Equação Universal da Perda de Solos - A fórmula USLE	28
4.3.2	Equação básica para previsão de assoreamento e estimativa de vida útil no reservatório	35
5	Consolidação das informações	36
6	Equipe técnica	38
7	Bibliografia	39





1 Introdução

Modificações no uso e ocupação do solo, com a substituição de vegetação natural por culturas agrícolas ou por áreas urbanizadas, ou a modificação de áreas rurais para urbanas, são alterações que acabam gerando variações no ciclo hidrológico das bacias hidrográficas e tem influência direta na qualidade dos corpos hídricos. Tal fato decorre da alteração dos processos físico-químicos e biológicos dos sistemas naturais e tendem a reduzir a qualidade da água.

Além disso, em relação ao transporte de sedimentos, toda modificação na dinâmica de uso de solo é capaz de desequilibrar os sedimentos produzidos e transportados.

A bacia hidrográfica do reservatório de Vargem das Flores tem sido objeto de uma intensa dinâmica de ocupação, predominantemente urbana, embora venha conseguindo conservar suas florestas. Os possíveis impactos de modificações do uso do solo sobre a qualidade das águas afluentes ao reservatório e sobre a quantidade de sedimentos transportados (potenciais diminuidores do volume útil dos reservatórios) motivam este estudo, que busca oferecer uma estimativa destes impactos (para vários cenários de referência, relativos a diferentes usos do solo).

O presente documento está organizado da seguinte forma:

- o capítulo 2 contempla as atividades de modelagem matemática da bacia hidrográfica do reservatório de Vargem das Flores, as quais envolverão aspectos de quantidade e qualidade das águas, além da estimativa de aporte de sedimentos ao reservatório;
- o capítulo 3 detalha, a partir do cronograma físico, as etapas e atividades a serem desenvolvidas ao longo dos trabalhos;
- o capítulo 4 apresenta os aspectos técnicos do sistema de modelagem que engloba a modelagem hidrológica-hidrodinâmica, a modelagem de qualidade da água e a modelagem de produção de sedimentos;
- o capítulo 5 consolida as informações levantadas e recebidas necessárias para a elaboração do estudo;
- o capítulo 6 apresenta a equipe-chave prevista para participação nos estudos;
- por fim, o capítulo 7 apresenta a bibliografia consultada que servirá como arcabouço conceitual para desenvolvimento do estudo.

1.1 Objeto de Estudo

O Sistema Vargem das Flores faz parte do Sistema Integrado de Abastecimento de Água da Região Metropolitana de Belo Horizonte, operado pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA), apresentando capacidade de produção nominal de 1,4 m³/s.

O reservatório de Vargem das Flores, localizado entre as cidades de Contagem e Betim, conforme apresentado na Figura 1, tem capacidade de armazenamento de 44 hm³, com área de espelho d'água de 5,25 km² e profundidade máxima de 19,7 m (Lopes, 2009).

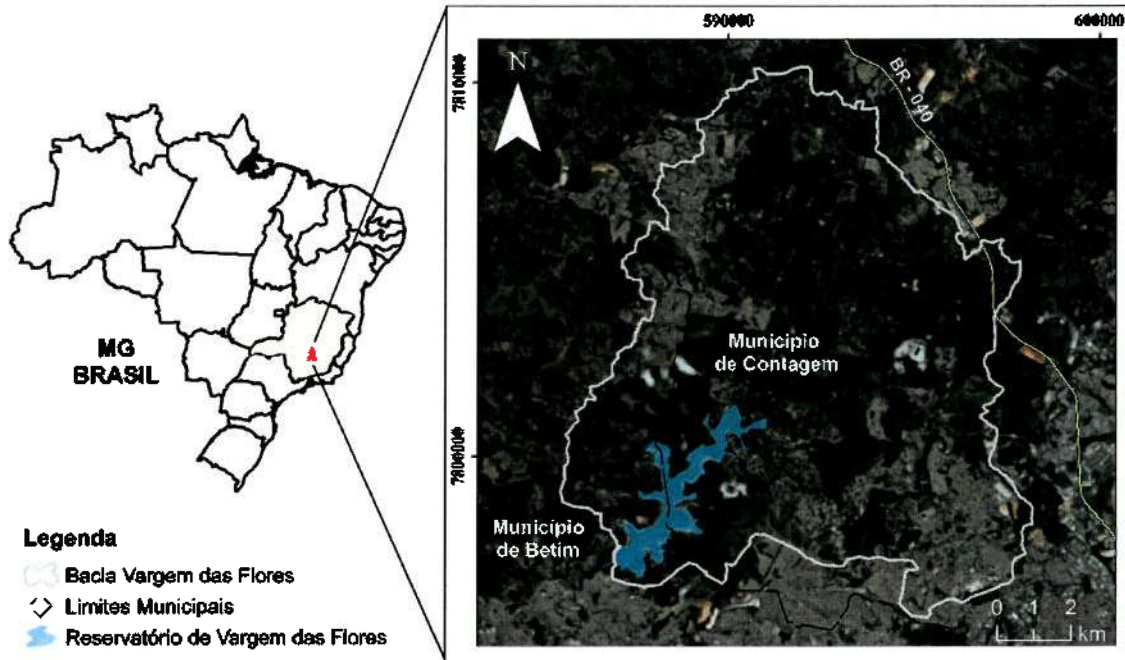


Figura 1 – Localização do reservatório Vargem das Flores

A bacia de contribuição ao reservatório de Vargem das Flores drena uma área total de 121km², tendo como principais corpos hídricos os córregos Água Suja, Morro Redondo, Bela Vista e o Rio Betim. A Tabela 1 apresenta as principais características fisiográficas da bacia contribuinte ao reservatório e de suas principais sub-bacias, as quais são destacadas no mapa apresentado na Figura 2.

Tabela 1 – Características fisiográficas da bacia do reservatório Vargem das Flores e de suas principais sub-bacias.

Bacia	Área de drenagem (km ²)	Extensão do talvegue principal (km)	Declividade média (m/m)	Diferença máxima de cota (m)
Bacia do reservatório Vargem das Flores	121,0	17,2	0,55%	94,07
Sub-bacia Córrego Água Suja	30,2	13,0	0,69%	89,90
Sub-bacia Córrego Morro Redondo	28,7	10,7	1,00%	107,17
Sub-bacia Rio Betim	34,5	12,7	0,82%	104,50
Sub-bacia Córrego Bela Vista	10,3	5,4	2,18%	117,93

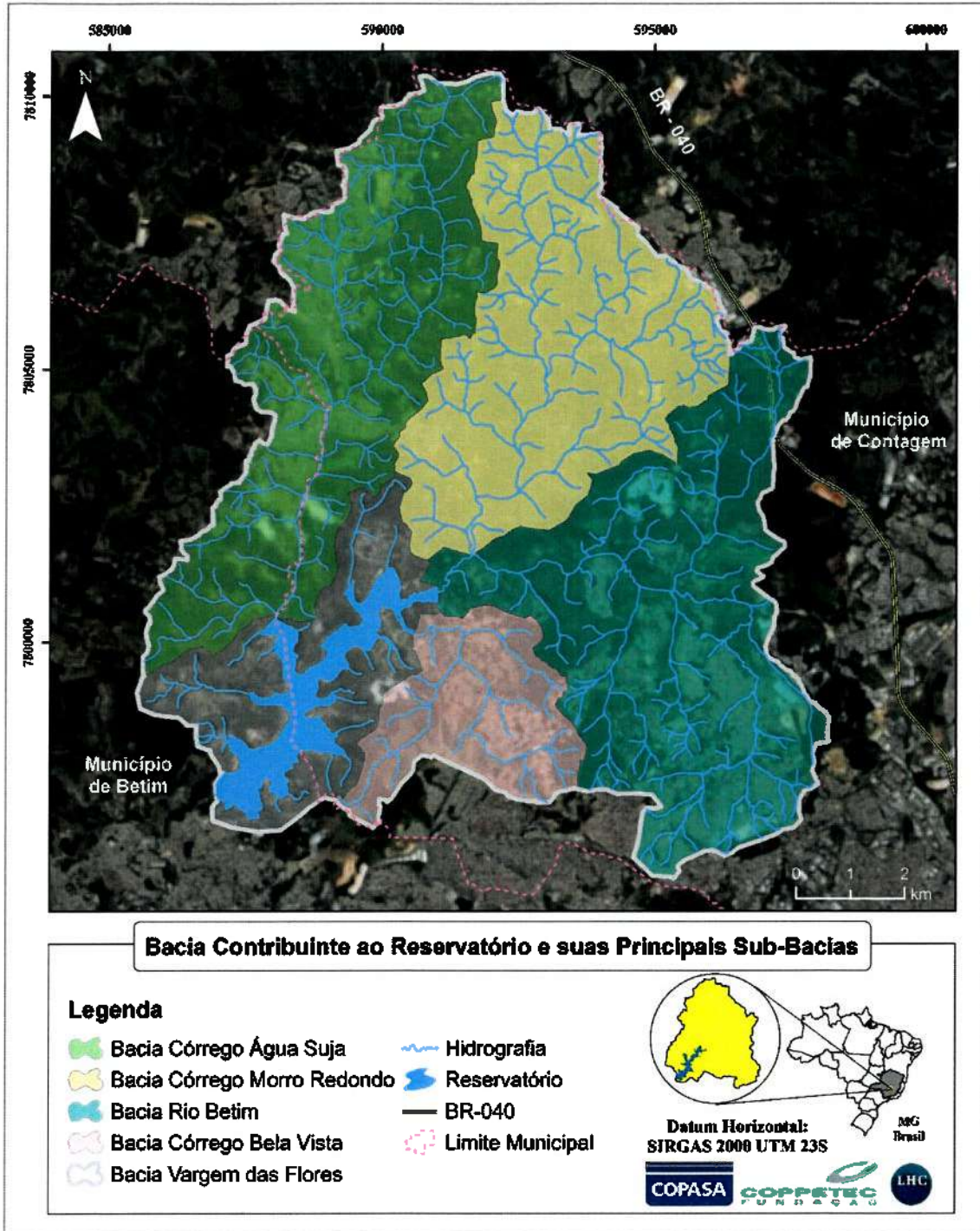


Figura 2 – Sub-bacias contribuintes ao reservatório Vargem das Flores.



1.2 Objetivos

As atividades que serão desenvolvidas ao longo deste estudo objetivam atender a solicitações apresentadas em Especificação de Serviços da COPASA, em documento disponibilizado via correio eletrônico, no dia 07/02/2018, chamado de “Especificação de serviços para a avaliação da vida útil do reservatório de Vargem das Flores”. Esse documento demanda a elaboração de estudos que estimem os **possíveis impactos de alterações previstas em plano, no uso do solo da bacia contribuinte, sobre o reservatório de Vargem das Flores e sobre o seu uso para o abastecimento de água.**

Como objetivo principal, portanto, este estudo, aqui exposto em plano de trabalho, visa apresentar estimativa dos impactos potenciais causados sobre o uso da água para abastecimento do reservatório de Vargem das Flores, caso a Zona de Interesse Metropolitano (ZIM) Vargem das Flores, proposta pelo Macrozoneamento da RMBH (UFMG, 2015) seja substituída pela nova proposta de zoneamento municipal de Contagem (CONTAGEM, 2017).

Para atingir o objetivo principal, os objetivos específicos do estudo são:

- Modelagem hidrológica-hidrodinâmica da bacia a montante do reservatório de Vargem das Flores, desde as cabeceiras da bacia até o reservatório, incluindo sua operação, para suprir informações de vazão em qualquer ponto desejado na área de interesse, em substituição às informações não disponíveis de monitoramento fluviométrico. O Modelo hidrodinâmico será calibrado para representar os níveis de operação e vazões defluentes do reservatório (captadas e vertidas). O resultado fornecerá uma estimativa dos hidrogramas de entrada no reservatório e vazões de base da bacia.
- Modelagem de qualidade da água da bacia contribuinte ao reservatório de Vargem das Flores, para estimativa dos parâmetros de qualidade da água afluente ao reservatório, segundo diferentes cenários de uso e ocupação do solo na bacia contribuinte.
- Modelagem 1D de qualidade da água no interior do reservatório, de acordo com os parâmetros estimados para a vazão afluente.
- Estimativa de aporte de sedimentos ao reservatório, considerando os cenários de uso e ocupação do solo.
- Cálculo estimativo da vida útil do reservatório de Vargem das Flores.

2 Escopo e Metodologia

O escopo do presente estudo contempla atividades de modelagem matemática da bacia hidrográfica do reservatório de Vargem das Flores, que envolverão aspectos de quantidade e qualidade das águas, além da estimativa de aporte de sedimentos ao reservatório. O estudo contemplará toda a bacia hidrográfica, a fim de processar a relação entre as precipitações e as consequentes vazões afluentes ao reservatório, considerando:

- i. A caracterização de uso atual de solo na bacia segundo Matos *et al.* (2017) e de tipos de solo segundo Cândido *et al.* (2017);
- ii. As bases de dados da COPASA, tais como: série temporal de qualidade de água nos afluentes e no reservatório; série temporal de níveis d'água diários junto à torre de tomada de água do reservatório, resultados de batimetrias realizadas no reservatório.
- iii. A base de dados da COPASA sobre os sistemas de coleta e tratamento de esgotos já implantados na bacia de Vargem das Flores.
- iv. A regulamentação de uso do solo e de requalificação urbana propostas pelo Macrozoneamento da RMBH para a ZIM Vargem das Flores;
- v. A proposta de mudança de uso do solo para a bacia de Vargem das Flores elaborada pela Prefeitura de Contagem.

As atividades de modelagem matemática do sistema contemplam:

- ✓ Modelagem hidrológico-hidrodinâmica contínua de quantidade e de qualidade de água, em base de tempo diária;
- ✓ Modelagem hidrodinâmica e de qualidade da água no lago do reservatório de Vargem das Flores.
- ✓ Modelagem de erosão de solos, com base na equação universal de perda de solos, e estimativa de aportes de sedimentos ao reservatório;

Conforme demanda apresentada na “Especificação de serviços para a avaliação da vida útil do reservatório de Vargem das Flores”, são previstos cenários de simulação com o intuito de avaliar diferentes possibilidades de uso e cobertura do solo. Além dos cenários requisitados, abrangendo as duas situações de uso e cobertura do solo propostas no ZIM Vargem das Flores (Macrozoneamento da RMBH, UFMG, 2015) e no zoneamento municipal de Contagem (CONTAGEM, 2017), e da situação atual, será avaliada uma situação pretérita de ocupação da bacia

Assim, ao todo, para o desenvolvimento das análises propostas neste estudo, serão realizados quatro cenários de uso e ocupação do solo, compreendidos por:

- **Cenário 1.** Passado – Uso e ocupação do solo passado
- **Cenário 2.** Atual – Uso e ocupação do solo atual
- **Cenário 3.** Futuro 1 – Uso e ocupação do solo segundo Plano Metropolitano da RMBH
- **Cenário 4.** Futuro 2 – Uso e ocupação do solo segundo zoneamento do Plano Diretor da Prefeitura Municipal de Contagem

Para cada um dos cenários de uso e ocupação do solo, serão realizadas modelagens matemáticas para avaliação do comportamento hidrológico da bacia, hidrodinâmico do reservatório de Vargem das Flores, do padrão de qualidade das águas lançadas no reservatório e das condições de produção de sedimentos na bacia, que alcançarão do reservatório. Considerando tais cenários de uso e ocupação do solo e as modelagens a serem aplicadas ao sistema, temos a combinação final de cenários de simulação, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Cenários de simulação

Cenários	Uso do solo	Modelo
Cenário 1	Passado	Modelo Hidrodinâmico 1 – MHd1 Modelo Hidrológico 1 – MH1 Modelo de Qualidade da Água 1 – MQA1 Modelo de produção de sedimentos 1 – MS1
Cenário 2	Atual	Modelo Hidrodinâmico 2 – MHd2 Modelo Hidrológico 2 – MH2 Modelo de Qualidade da Água 2 – MQA2 Modelo de produção de sedimentos 2 – MS2
Cenário 3	Futuro 1 – Proposta do Plano Metropolitano	Modelo Hidrodinâmico 3 – MHd3 Modelo Hidrológico 3 – MH3 Modelo de Qualidade da Água 3 – MQA3 Modelo de produção de sedimentos 3 – MS3
Cenário 4	Futuro 2 – Proposta da Prefeitura de Contagem	Modelo Hidrodinâmico 4 – MHd4 Modelo Hidrológico 4 – MH4 Modelo de Qualidade da Água 4 – MQA4 Modelo de produção de sedimentos 4 – MS4

Além dos cenários de simulações, será também realizada uma etapa de calibração.

2.1 Etapas de desenvolvimento

Para o desenvolvimento do estudo, são previstas seis etapas, descritas ao longo desse item. As atividades de modelagem previstas serão desenvolvidas nessas etapas.

Etapa 1. Levantamento das informações necessárias e estudos pregressos

Nessa primeira fase, foram avaliadas as informações disponibilizadas pela COPASA para início dos trabalhos. Tais informações foram organizadas em uma base de dados que será utilizada ao longo das atividades de desenvolvimento do estudo. A partir dessa análise, foram solicitadas informações complementares consideradas prioritárias e não disponibilizadas inicialmente, assim como foram realizadas pesquisa em outras fontes públicas, para complementação da base de dados.

Todas as informações levantadas são apresentadas em tabela, constante no presente relatório, o qual atende ao primeiro produto de entrega. O resultado de todo esse levantamento condicionou a proposta final de modelagem aqui também apresentada

Etapa 2. Modelagem hidrológica-hidrodinâmica conforme seus respectivos cenários

A modelagem hidrológica e hidrodinâmica será feita de forma integrada, com o modelo MODCEL (MIGUEZ, 2001 e MIGUEZ et al., 2017). A modelagem hidrodinâmica começa com a interpretação topográfica e hidrográfica da bacia do reservatório de Vargem das Flores. São definidos os principais cursos d'água e suas bacias de contribuição para o processo de discretização do território em células de escoamento, fundamentais para o processo de simulação hidrodinâmica com o MODCEL

As células de escoamento são delimitadas segundo características de uso do solo, topografia, área de contribuição e local de descarga, de forma a ter compartimentos que se comportem de maneira homogênea em termos hidrodinâmicos. Cada célula também realiza um processo de transformação de chuva em vazão. Após a delimitação das células, são posicionados os centros, que as representam, e preestabelecidas as ligações hidráulicas que permitirão a comunicação entre elas. São calibrados e definidos os parâmetros de entrada de dados do MODCEL que representam o escoamento superficial (*runoff*) e as características das ligações hidráulicas (coeficientes de Manning, de vertedor, de orifício, entre outros). As informações de chuva utilizadas na modelagem hidrodinâmica são obtidas a partir da análise hidrológica realizada a partir dos dados pluviométricos obtidos.

A divisão da bacia em células foi realizada a partir da análise do modelo digital de terreno (MDT) existente para a região, assim como da avaliação do uso e ocupação do solo, tanto na situação existente, quanto nas situações planejadas, de forma a melhor representar a transformação da chuva em vazão, em cada unidade do modelo. Em uma versão preliminar para modelagem hidrológico-hidrodinâmica, a bacia foi subdividida em 503 células, como pode ser visto na Figura 3. Com a base de células já dividida, são definidas as relações hidráulicas entre células, que irão simular o escoamento resultante da chuva ao longo da bacia hidrográfica, até alcançar o reservatório.

As chuvas de entrada serão definidas a partir da série histórica de precipitações registrada na bacia do reservatório Vargem das Flores. Os resultados de níveis d'água no reservatório

serão confrontados com os níveis registrados no mesmo evento pluviométrico, de forma a permitir a calibração do modelo. Esse processo de calibração irá considerar as chuvas e os níveis registrados, a tomada d'água no lago do reservatório e as vazões vertidas, retiradas da equação de projeto do vertedor. São então realizadas as simulações dos cenários passado, atual e futuros para obtenção das vazões líquidas que servirão de subsídio para as estimativas de qualidade da água. As simulações serão realizadas considerando situações de estiagem e de cheia.

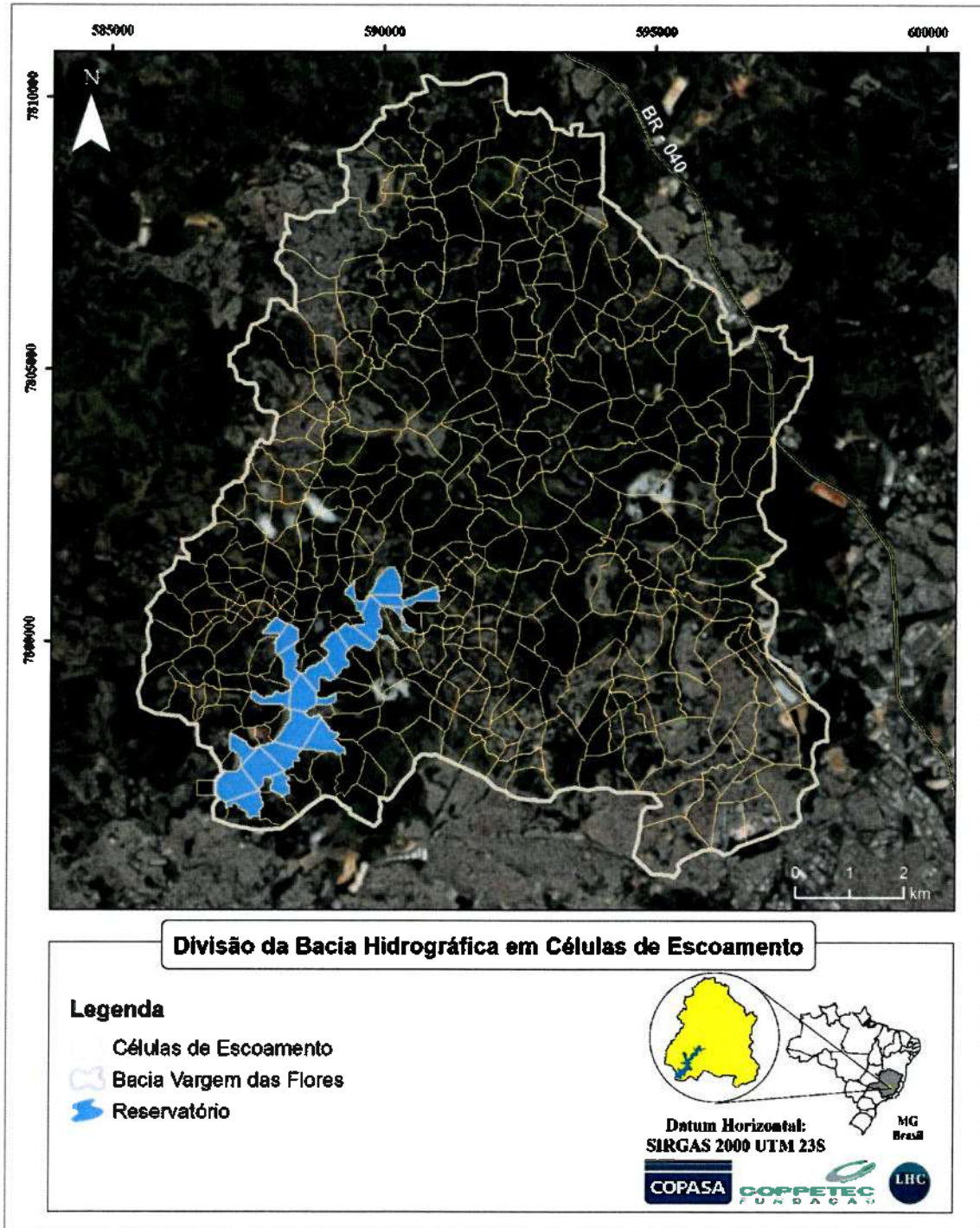


Figura 3 – Divisão preliminar da bacia do reservatório Vargem das Flores em células de escoamento, para modelagem hidrológico-hidrodinâmica.



Etapa 3. Estimativa dos parâmetros de qualidade da água aportados ao reservatório de Vargem das Flores, para os cenários definidos

A modelagem de qualidade da água será realizada em duas etapas. Na primeira será realizada a calibração do modelo e simulação dos cenários de uso do solo previstos, para os principais rios e trechos de rio em estudo. Em seguida será realizada a modelagem de qualidade da água do reservatório de Vargem das Flores.

O modelo de qualidade da água QUAL-UFMG, desenvolvido por Von Sperling (2007), será utilizado tanto para modelagem dos afluentes ao reservatório, como também, de forma simplificada, para o reservatório de Vargem das Flores, considerando assim que os constituintes estão totalmente misturados na largura e profundidade da massa d'água.

A modelagem de qualidade da água será realizada para os seguintes rios, representados na Figura 4:

- Rio Betim – Trecho 1
- Córrego Morro Redondo – Trecho 2
- Córrego Água Suja – Trecho 3

Os rios em estudo serão divididos em trechos, de forma a obedecer a condições de homogeneidade das características hidráulicas do escoamento.

Os parâmetros a serem simulados são oxigênio dissolvido, DBO e fósforo.

Para calibração do modelo serão determinadas as características hidráulicas dos trechos dos rios, as cargas domésticas e industriais incrementais e pontuais lançadas ao longo dos rios simulados, as vazões a serem utilizadas na calibração e simulação do modelo e as condições de contorno. Serão realizadas diversas simulações, visando a obtenção de parâmetros de qualidade da água que mais aproxime o perfil de qualidade da água simulado dos dados observados.

Os dados de qualidade da água observados referem-se às concentrações médias de DBO, OD e fósforo, do mesmo período das medições de vazão disponíveis.

As simulações de qualidade da água serão realizadas considerando os cenários de uso do solo definidos na Tabela 2. Os casos de simulação previstos serão melhor definidos e ajustados ao longo do andamento dos trabalhos.

Para simulação da qualidade da água, serão determinadas as cargas domésticas e industriais resultantes de cada cenário proposto e utilizadas as mesmas características hidráulicas, divisões dos trechos e parâmetros do modelo, obtidos na fase de calibração. No cálculo das cargas domésticas de esgotos potenciais e remanescentes serão utilizadas as mesmas metodologias também indicadas na etapa de calibração, diferenciando apenas em relação à projeção populacional utilizada.

No que diz respeito às vazões, serão realizadas simulações considerando cenários de vazões de estiagem e vazões de cheia. Essas vazões serão determinadas com base nos resultados do modelo hidrodinâmico, descrito anteriormente.

As condições de contorno serão determinadas utilizando o mesmo critério adotado na etapa de calibração, mudando as vazões de simulação e cargas associadas. Os resultados das simulações serão comparados às classes de enquadramento do CONAMA 365, de forma a identificar a situação do curso d'água.

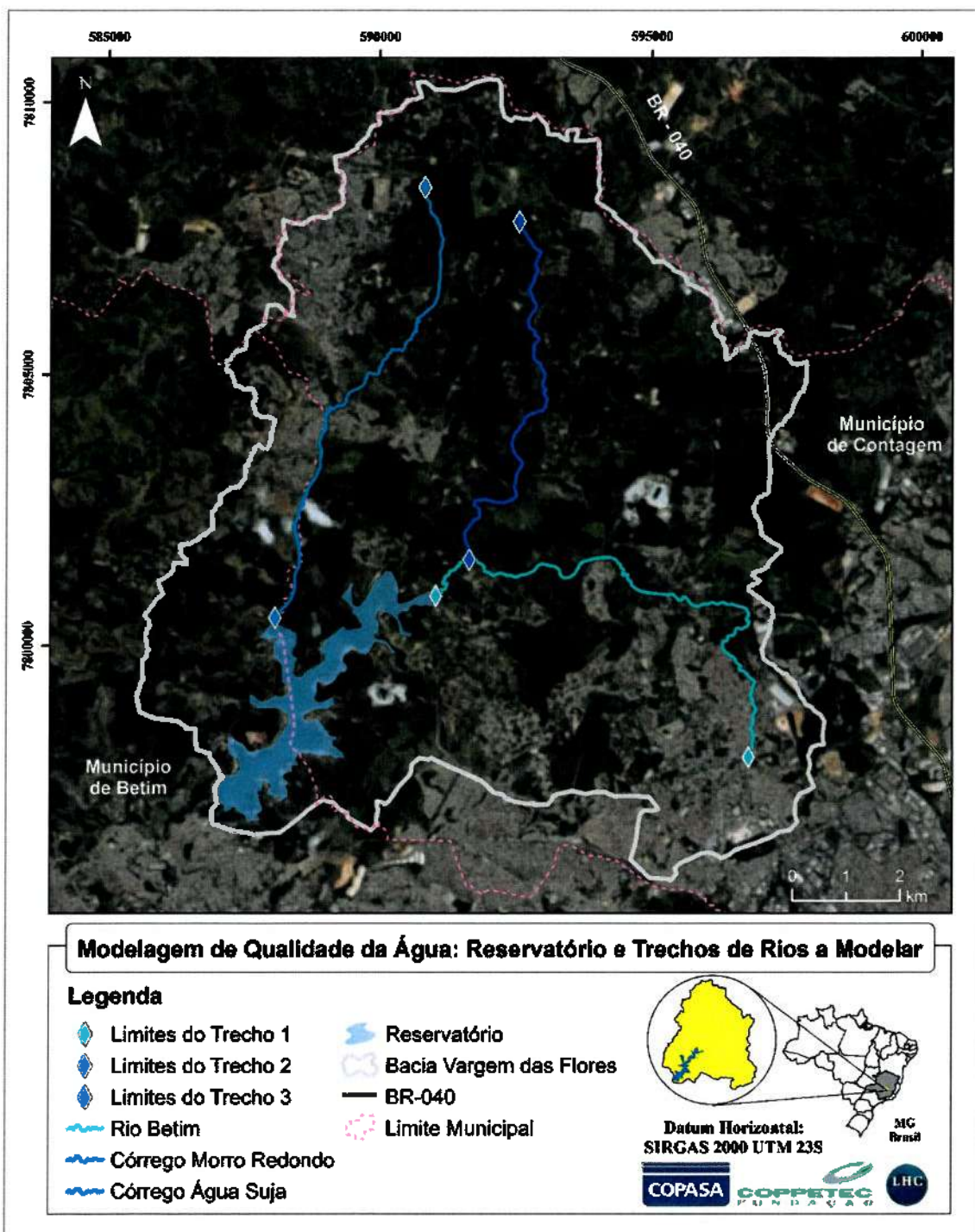


Figura 4 – Modelagem de Qualidade da Água: Reservatório e Trechos de Rios a Modelar

Handwritten signatures and initials in blue ink.

Etapa 4. Modelagem de qualidade da água, para os cenários definidos

Para a modelagem de qualidade da água do reservatório de Vargem das Flores será utilizado de forma simplificada o modelo QUAL2-UFMG, considerando assim que os constituintes estão totalmente misturados na profundidade e largura da massa d'água. Observa-se que a característica alongada do reservatório de Vargem das Flores permite essa simplificação.

Assim, todas as etapas descritas anteriormente para a modelagem dos rios e trechos de rios serão utilizadas para a modelagem do reservatório. São elas: determinação das características hidráulicas, determinação de cargas e captações domésticas e industriais, divisão do curso principal em trechos, calibração e simulação do modelo.

Destaca-se que as condições de contorno a serem utilizadas na modelagem do reservatório serão os resultados do modelo aplicado aos cursos d'água afluentes. No entanto, aqueles de menor porte não modelados, serão considerados como entrada pontual ou incremental ao longo do reservatório.

Etapa 5. Estimativa do aporte de sedimentos ao reservatório de Vargem das Flores, para os cenários definidos

A produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica é resultado da perda de solo por erosão nessa bacia. O processo erosivo é decorrente da complexa ação da chuva sobre o solo, que retira suas partículas pelo impacto das gotas e, após esgotar a capacidade de armazenamento e infiltração do solo, as transporta encosta abaixo por escoamento superficial (MEYER, 1971).

Para se estimar a erosão na bacia hidrográfica do reservatório Vargem das Flores será utilizada a Equação Universal de Perda de Solos Revisada (RUSLE - *Revised Universal Soil Loss Equation*), considerada um modelo adequado para a previsão de perda de solo devido à sua fácil aplicabilidade e a confiabilidade das estimativas obtidas (WILLIAMS & BERNDT, 1977; OLIVEIRA *et al.*, 2012).

As informações necessárias para a aplicação da Equação Universal de Perda de Solo são:

- informações de erosividade;
- características do solo;
- dados de erodibilidade dos solos;
- informações topográficas da bacia;
- informação de uso e cobertura do solo, tanto para a situação atual quanto para o passado e cenários futuros.

Com o objetivo de avaliar a evolução do potencial de perda de solo na região a montante do reservatório e apoiar a modelagem de qualidade da água, a RUSLE será aplicada para estimativa do aporte de sedimentos em 4 cenários pré-definidos: Cenário 1 - passado, considerando o uso e cobertura do solo de 1990; Cenário 2 - atual; Cenário 3 - futuro 1, considerando o Plano Metropolitano da RMBH; Cenário 4 - futuro 2, considerando o zoneamento do Plano Diretor da Prefeitura Municipal de Contagem.

A RUSLE será calculada para cada uma das células definidas na modelagem hidrológica-hidrodinâmica, fornecendo o aporte de sedimentos para cada cenário desejado.

As informações de erosividade serão obtidas por meio do programa netErosividade MG®, desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos (GPRH) do Departamento de Engenharia Agrícola (DEA) da Universidade Federal de Viçosa (UFV) e que disponibiliza os valores mensais e anual da erosividade da chuva para qualquer localidade do estado de Minas Gerais, possibilitando agilidade na obtenção do fator R da equação.

A erodibilidade do solo (K) é representada pela relação entre a intensidade de erosão e a erosividade da chuva, para um solo específico mantido continuamente sem cobertura. O fator de cada solo vai depender de suas propriedades intrínsecas, principalmente as de ordens físicas e químicas (WISCHMEIER & SMITH, 1978). A erodibilidade do solo é uma propriedade inerente a cada solo e independe dos demais fatores como chuva, declive, cobertura vegetal, ou manejo (BERTONI & LOMBARDI NETO, 2014). Para o estudo em questão, o fator de erodibilidade K será determinado de acordo com o trabalho desenvolvido por DENARDIN (1990) para os solos brasileiros e CHAVES (1994) para os solos da bacia do rio São Francisco.

O tipo de solo das células definidas para a estimativa do aporte de sedimentos será obtido do mapa de solos elaborado pela Universidade Federal de Viçosa, em escala 1:600.000.

Os dados topográficos terão como fonte a iniciativa TOPODATA, que oferece livre acesso a variáveis geomorfológicas locais derivadas de dados SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*) para todo o território nacional. Esses dados apresentam resolução horizontal (i.e., resolução espacial) de 3 arco-segundos (~90m) e resolução vertical de 1m. Toda a aquisição dos dados SRTM foi planejada a suprir mapeamentos em escalas entre 1:100.000 e 1:250.000 (VALERIANO, 2008).

Não são previstas visitas de campo. Todas as informações serão obtidas a partir de dados secundários.

Etapa 6. Estimativa da vida útil do reservatório

O processo de assoreamento de reservatórios reduz a sua vida útil, diminuindo o volume de água utilizável. Portanto, é de fundamental importância entender o processo de assoreamento e os impactos dos sedimentos carreados pelos cursos d'água aos reservatórios. De acordo com CARVALHO (2008) vários fatores influenciam a formação dos depósitos, sendo os principais o aporte de sedimentos afluentes, a eficiência de retenção do sedimento no reservatório, a densidade dos depósitos e volume de sedimento depositados.

Após o cálculo do aporte de sedimentos gerados na bacia hidrográfica para os cenários atual e futuros, será estimada a vida útil do reservatório Vargem das Flores para os diferentes cenários.

Poderá ser utilizado o método proposto por CARVALHO *et al* (2000) de previsão do assoreamento total em reservatórios e estimativa da vida útil do aproveitamento ou o método empírico de redução de área, de Borland & Miller (VANONI, 1977). O melhor método será definido de acordo com os dados disponíveis e a evolução do estudo.

2.2 Produtos

Durante o desenvolvimento dos estudos propostos neste documento, é prevista a entrega de três produtos, elaborados em relatório técnico, conforme descrição a seguir:

R1. Relatório Parcial 1:

Representado pelo presente documento, o R1 reporta o início dos trabalhos e detalha a metodologia a ser empregada, após adaptações à metodologia proposta, conforme disponibilidade de dados. Apresenta os resultados obtidos na Etapa 1.

R2. Relatório Parcial 2:

O R2 apresenta os resultados da modelagem hidrodinâmica e resultados preliminares da modelagem hidrológica e da modelagem de qualidade de água e sedimentos. Apresenta os resultados obtidos nas Etapas 2 e 3.

R3. Relatório Final:

O R3 apresenta os resultados finais da modelagem hidrológica e da modelagem de qualidade de água e sedimentos e as interpretações da modelagem hidrodinâmica e de qualidade de água no reservatório e sua estimativa da vida útil. Apresenta os resultados obtidos nas Etapas 4, 5 e 6.

3 Cronograma físico

O estudo será concluído em 13 semanas, contemplando as seis etapas descritas no item 2.1 (pág. 10). A Tabela 3 apresenta o cronograma físico previsto para desenvolvimento de cada etapa do estudo.

Tabela 3 - Cronograma Físico

Etapa	Atividade	Semana a partir do início dos trabalhos														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13		
1	Levantamento das informações necessárias e estudos progressos	█														
2	Modelagem hidrológica-hidrodinâmica			█	█	█	█	█								
3	Estimativa dos parâmetros de qualidade da água				█	█	█	█								
4	Modelagem de qualidade da água								█	█	█	█	█	█		
5	Estimativa do aporte de sedimentos ao reservatório				█	█	█	█	█	█	█	█	█	█		
6	Estimativa da vida útil do reservatório														█	
Entrega dos produtos			R1							R2						R3

4 Aspectos técnicos sobre o sistema de modelagem

As principais etapas para o desenvolvimento do estudo abrangem processos de modelagem, com distintas particularidades. Nesse capítulo são apresentados os aspectos técnicos que embasam a escolha de cada sistema de modelagem utilizado.

4.1 Modelagem hidrológico-hidrodinâmica

O Modelo de Células de Escoamento – MODCEL (MIGUEZ, 2001, MIGUEZ *et al.*, 2017) trabalha com o conceito de células, desenvolvido na década de 1960, por Zanobetti, Lorgerè, Preissman e Cunge (1970). As células são compartimentos articulados, capazes de representar a superfície da bacia, incluindo a rede de drenagem. As células têm capacidade de armazenagem e apresentam características topográficas e de uso do solo, que permitem um processo de transformação chuva- vazão. A integração destes compartimentos forma uma rede de escoamentos e é responsável pela representação física da bacia e dos elementos da paisagem urbana. A iteração entre as células se faz através de diferentes leis hidráulicas, com destaque para as equações completas de Saint-Venant, incluindo ainda vertedouros e orifícios clássicos, estruturas típicas de drenagem e bombeamento, entre outros. O modelo é definido como quasi-bidimensional, mas ainda articula, verticalmente, o plano das galerias subterrâneas. Esse modelo tem registro de obra intelectual CONFEA 1463. 2000.

Características principais:

- ✓ modelo hidráulico-hidrológico distribuído;
- ✓ representação bidimensional compartimentada do espaço;
- ✓ integração da rede de drenagem com estruturas da paisagem urbana;
- ✓ uso de um esquema de células de escoamento;
- ✓ próprio para controle de cheias em bacias rurais e urbanas;
- ✓ diagnóstico ambiental de impactos de inundações;
- ✓ simulação matemática de cenários futuros de intervenções;
- ✓ minimização de prejuízos materiais e humanos decorrentes de chuvas intensas;
- ✓ incorporação de resíduos sólidos e lixo urbano para simulações mais realistas;
- ✓ avaliação de problemas de qualidade de água;
- ✓ sistema de suporte a decisão.

4.1.1 Concepção do Modelo

As bacias de rios naturais, ou canalizados, em áreas urbanas, geralmente em áreas aproximadamente planas, têm potencial para formar grandes áreas alagáveis. Ao sair da rede de drenagem, o caminho da água pode ser qualquer, ditado pelos padrões de urbanização. Calçadas marginais tornam-se vertedouros para os rios, cujas águas extravasadas, ao chegarem às ruas, fazem destas verdadeiros canais, podendo alagar construções, parques ou praças, que então podem funcionar como reservatórios, indesejadamente, concentrando águas que não retornarão à rede de drenagem. Nessa situação, pode-se perceber que águas extravasadas podem ter comportamento independente da rede de drenagem, gerando seus próprios padrões de escoamento, especialmente, quando a microdrenagem não corresponde à função que dela se espera. Em um caso extremo, onde a microdrenagem não funcione, o que não é incomum, por falhas de manutenção e entupimentos, por exemplo, ou onde ela estiver subdimensionada, alagamentos em áreas urbanas podem-se iniciar mesmo sem extravasamento da rede de

macrodrenagem, gerando também um padrão de escoamento particular e distinto daquele dos canais. Nesse contexto, percebe-se que há indicações para o uso de um modelo de características sistêmicas, capaz de representar hidráulica e hidrológicamente, de forma distribuída, a superfície da bacia. Esta necessidade encontra acolhida na concepção de células de escoamento. A representação do espaço urbano através de células, que atuam como compartimentos homogêneos que integram o espaço da bacia e a faz interagir em função do escoamento que sobre ela ocorre, caminha ao encontro dos objetivos da modelação das enchentes urbanas.

4.1.2 Hipóteses do Modelo de Células para Cheias Urbanas

- ✓ A natureza pode ser representada por compartimentos homogêneos, interligados, chamados células de escoamento. A cidade e sua rede de drenagem são subdivididas em células, formando uma rede de escoamento bi-dimensional, com possibilidade de escoamento em várias direções nas zonas de inundação, a partir de relações unidimensionais de troca.
- ✓ Na célula, o perfil da superfície livre é considerado horizontal, a área desta superfície depende da elevação do nível d'água no interior da mesma e o volume de água contido em cada célula está diretamente relacionado com o nível d'água no centro da mesma.
- ✓ O modelo proposto articula as células em "loop" (modelo anelado), com possibilidade de escoamento em várias direções na bacia modelada. Cada célula comunica-se hidráulicamente com células vizinhas.
- ✓ Cada célula recebe a contribuição de precipitações e realiza processos hidrológicos internos para transformação de chuva em vazão, de forma que, às vazões trocadas com as células vizinhas soma-se a vazão resultante da transformação da chuva.
- ✓ O escoamento entre células pode ser calculado através de leis hidráulicas conhecidas, como, por exemplo, a equação dinâmica de Saint-Venant, completa ou simplificada, a equação de escoamento sobre vertedouros, livres ou afogados, a equação de escoamento através de orifícios, equações de escoamento através de bueiros, entre outras várias, sendo considerados os efeitos de inércia no escoamento que ocorre nos cursos d'água principais.
- ✓ O escoamento pode ocorrer simultaneamente em duas camadas, uma superficial e outra subterrânea, em galeria, podendo haver comunicação entre as células de superfície e de galeria. Nas galerias, o escoamento é considerado inicialmente à superfície livre, mas pode vir a sofrer afogamento, passando a ser considerado sob pressão.
- ✓ A vazão entre duas células adjacentes, em qualquer tempo, é apenas função dos níveis d'água no centro dessas células.
- ✓ As seções transversais de escoamento são tomadas como seções retangulares equivalentes, simples ou compostas.
- ✓ Aplica-se o princípio da conservação de massa a cada célula.
- ✓ Cada célula comunica-se com células vizinhas, que são arranjadas em um esquema topológico, constituído por grupos formais, onde uma célula de um dado grupo só pode se comunicar com células deste mesmo grupo, ou dos grupos imediatamente posterior ou anterior, permitindo a solução numérica pelo método da dupla varredura.

4.1.3 Modelagem de uma Bacia através de Células de Escoamento

As células podem representar a natureza isoladamente ou em conjuntos, formando estruturas mais complexas. A definição do conjunto de tipos de ligação, que são representativas de leis hidráulicas que traduzem determinados escoamentos, permite reproduzir uma multiplicidade de padrões de escoamento que ocorrem em um cenário urbano.

A atividade de modelação topográfica e hidráulica depende de um conjunto pré-definido de tipos de célula e de tipos possíveis de ligações entre células. A Figura 5 mostra, esquematicamente, o funcionamento de uma dada célula.

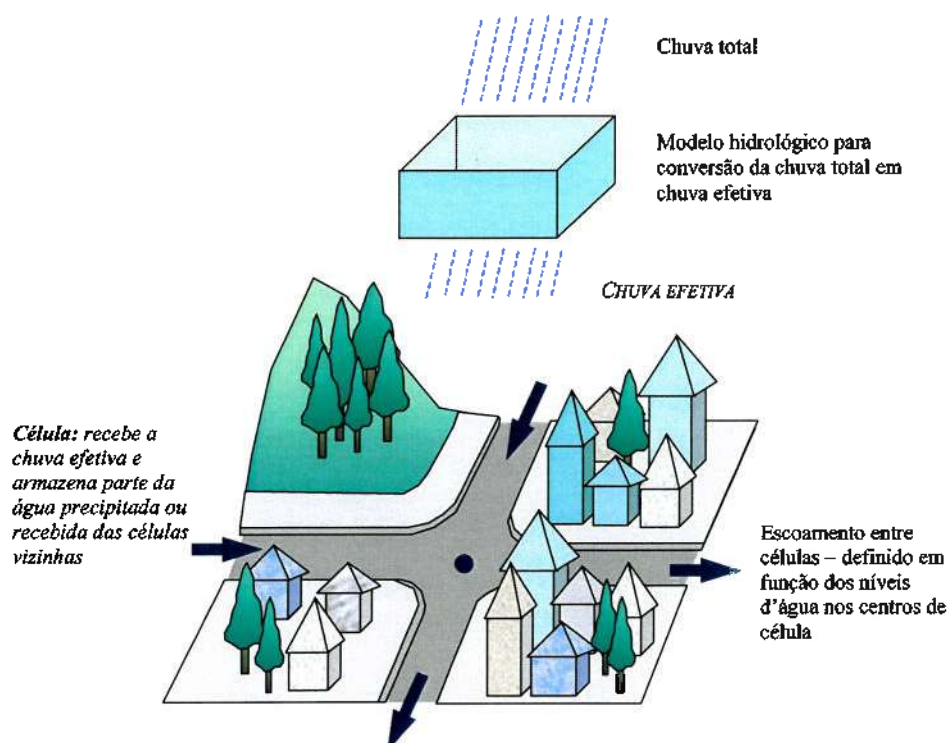


Figura 5 – Funcionamento esquemático de uma célula de escoamento.

Conjunto tipo base de células pré-definido:

- ✓ **de rio**, ou canal, por onde se desenvolve o escoamento principal da drenagem a céu aberto, podendo ser a seção simples ou composta;
- ✓ **de galeria**, subterrânea, complementando a rede de drenagem;
- ✓ **de planície urbanizada**, para a representação de escoamentos a superfície livre em planícies alagáveis, bem como áreas de armazenamento, ligadas umas às outras por ruas, englobando também áreas de encosta, para recepção e transporte da água precipitada nas encostas para dentro do modelo, áreas de vertimento de água de um rio para ruas vizinhas e vice-versa e áreas de transposição de margens, quando é preciso integrar as ruas marginais a um rio e que se comunicam através de uma ponte, considerando um dado padrão de urbanização pré-definido, como mostrado na figura A2.2;
- ✓ **de planície natural**, não urbanizada, análoga ao tipo anterior, porém prismática, sem sustentar nenhum tipo de urbanização
- ✓ **de reservatório**, simulando o armazenamento d'água em um reservatório temporário de armazenamento, dispendo de uma curva cota x área superficial, a partir da qual, conhecendo-se a variação de profundidades, pode-se também conhecer a variação de volume armazenado. A célula tipo-reservatório cumpre o papel de amortecimento de uma vazão afluente.

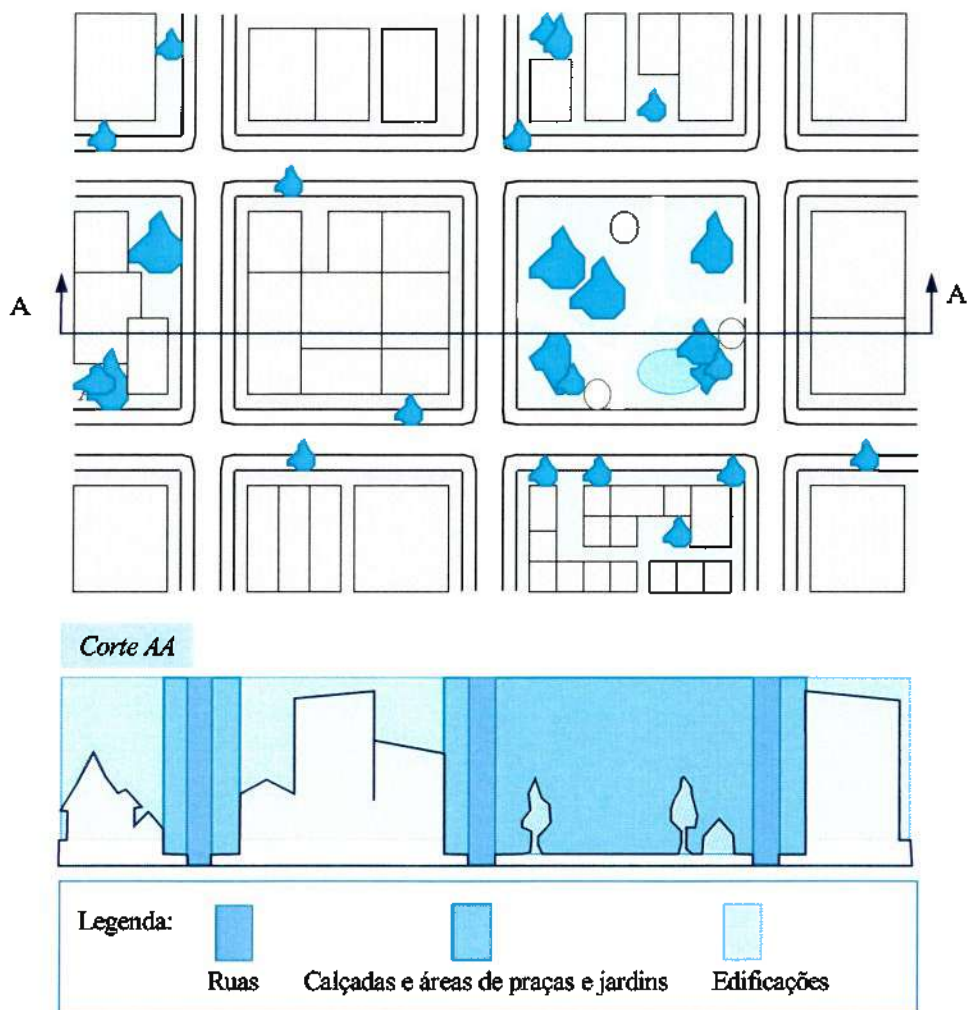


Figura 6 – Escalonamento de níveis na superfície de uma célula urbanizada.

A figura A2.3 mostra um corte em uma bacia, mostrando esquematicamente a modelação do espaço urbano através de células de escoamento.

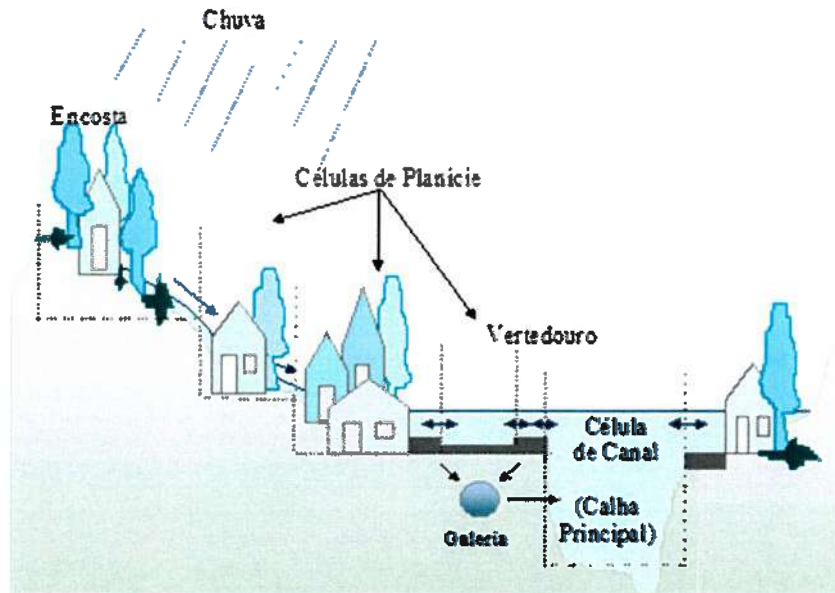


Figura 7 – Representação esquemática de uma região dividida em células, mostrando interfaces dos escoamentos superficiais.

4.1.4 O Modelo Hidrológico

A separação do escoamento superficial, como citado anteriormente, foi originalmente representada no Modelo de Células através do coeficiente de *runoff*, definido conforme características de cada célula. Assim, num dado passo de tempo, a lâmina de chuva efetiva, numa célula qualquer, pode ser obtida através do produto do seu coeficiente de *runoff* pela precipitação referente ao mesmo período.

Com o intuito de melhorar a capacidade de representação dos fenômenos hidrológicos envolvidos na geração das cheias no Modelo de Células, foi desenvolvido um modelo hidrológico simples, representando a infiltração, a interceptação vegetal e a retenção em depressões, sendo estes dois últimos considerados de modo combinado em uma parcela de abstração. A abstração se manifesta enquanto se enche um reservatório que modela a sua capacidade, enquanto a infiltração pode ocorrer enquanto houver uma lâmina d'água sobre a superfície da célula modelada. Em um passo de tempo qualquer, os cálculos referentes às rotinas hidrológicas são realizados em primeiro lugar, e, em seguida, a propagação dos escoamentos é feita através das rotinas hidrodinâmicas.

4.1.5 O Modelo Matemático

A variação do volume d'água em uma célula i , em um intervalo de tempo t , é dada pelo balanço de massa nesta célula. Assim, em termos diferenciais, tem-se a equação da continuidade representada pela equação (1).

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

Sendo:

$Q_{i,k}$ - vazão entre as células i e k, vizinhas entre si;

Z_i - cota do nível d'água no centro da célula i;

A_{S_i} - área superficial do espelho d'água na célula i;

P_i - vazão relativa à parcela de chuva ocorrida sobre a célula i e disponível para escoamento;

t - variável independente relativa ao tempo.

As ligações típicas de escoamento entre células, que podem ser escritas em função de leis hidráulicas, são listadas a seguir:

- ✓ **ligação tipo rio**, para escoamento à superfície livre, considerando a equação dinâmica de Saint Venant, incluindo seus termos de inércia;
- ✓ **ligação tipo planície**, para escoamento à superfície livre, considerando a equação dinâmica de Saint Venant, sem os termos de inércia;
- ✓ **ligação tipo vertedouro** de soleira espessa, considerando a equação clássica, para escoamento livre ou afogado;
- ✓ **ligação tipo orifício**, também clássica;
- ✓ **ligação tipo entrada de galeria**, com contração do escoamento;
- ✓ **ligação tipo saída de galeria**, com expansão do escoamento;
- ✓ **ligação tipo galeria**, com escoamento à superfície livre ou sob pressão;
- ✓ **ligação tipo curva cota x descarga**, estruturas especiais calibradas em laboratório físico (modelos reduzidos);
- ✓ **ligação tipo descarga de galeria em rio**, funcionando como vertedouro, livre ou afogado, ou orifício, para galerias que chegam a um rio em cota superior ao fundo deste, por uma das margens;
- ✓ **ligação tipo bueiro**, como interface das células superficiais com as células de galeria;
- ✓ **ligação tipo bombeamento**, com descarga de uma célula para outra a partir de uma cota de partida;
- ✓ **ligação tipo comporta flap**, funcionando como este tipo de comporta de sentido único de escoamento.

4.1.6 O Modelo Numérico

A formulação numérica do modelo proposto inicia-se com o processo de discretização da equação diferencial que, originalmente contínua, passa a ser considerada em termos de

incrementos finitos. A discretização temporal da equação diferencial representativa da conservação da massa é feita procurando-se linearizar numericamente todos os termos que apresentam não-linearidades, para que não haja a necessidade de um procedimento iterativo de solução, a fim de simplificar o modelo numérico.

O esquema utilizado para marcha no tempo é o totalmente implícito. Para economia de tempo de cálculo e maior rapidez em determinadas aplicações, foi desenvolvida e também implementada uma versão explícita do modelo numérico, a qual, entretanto, está sujeita a restrições de estabilidade numérica nos incrementos da malha de discretização, o que não ocorre com a formulação implícita. O sistema resultante possui uma matriz de coeficientes esparsa, com muitos elementos iguais a zero. A solução deste sistema, por métodos convencionais de solução de matrizes, que trabalham com a matriz cheia, envolve uma série de operações desnecessárias com valores nulos, o que, na prática, significa desperdício de tempo.

Com base na esparsidade da matriz de coeficientes, utiliza-se um método de solução de sistemas do tipo dupla varredura, sobre o modelo topológico de células. O procedimento básico, ponto de partida do método de dupla varredura, consiste em se arranjar topologicamente as células que formam o modelo em uma certa quantidade de grupos numerados, a partir de jusante, de tal forma que, cada célula de um grupo j , central, esteja ligada apenas a células deste mesmo grupo, a células do grupo anterior $j-1$ ou a células do grupo posterior $j+1$, conforme pode ser visto na Figura 8. A primeira varredura, de jusante para montante, tem o objetivo de agrupar o sistema em sub-matrizes; a segunda varredura, de montante para jusante, vai resolvendo os subsistemas resultantes do agrupamento da primeira varredura.

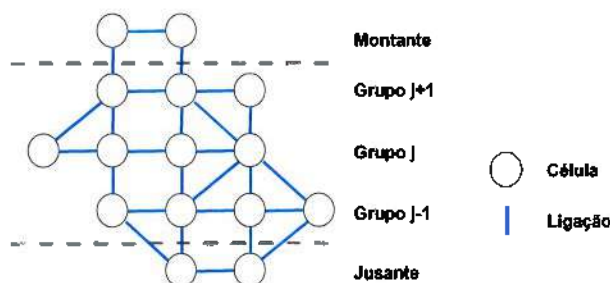


Figura 8 – Matriz topológica, com definição de grupos



4.2 Modelagem de qualidade da água

Para modelagem da qualidade da água no reservatório de Vargem das Flores será usado o modelo de qualidade da água QUAL-UFMG, desenvolvido por Von Sperling (2007), que é uma adaptação do modelo QUAL2E.

As simplificações na implementação do QUAL-UFMG, comparativamente ao QUAL2E, envolvem: a integração numérica pelo método de Euler, a desconsideração da dispersão longitudinal e a não inclusão da modelagem de algas e todas suas interrelações com os demais constituintes (VON SPERLING, 2007).

O QUAL-UFMG é capaz de simular um número grande de constituintes de qualidade da água, considerando que estão completamente misturados ao escoamento. O modelo assume que o mecanismo de transporte é significativo apenas ao longo da direção principal do escoamento (eixo longitudinal do rio ou canal). Em uma simulação, podem ser considerados vários pontos de lançamento (cargas industriais e domésticas), captações, entradas de tributários e de vazões incrementais.

Os constituintes que podem ser modelados pelo QUAL-UFMG são os seguintes: Demanda bioquímica de oxigênio, Oxigênio dissolvido, Nitrogênio total e sua fração orgânica, amoniacal, nitrito e nitrato, Fósforo total e suas frações orgânicas e inorgânicas, Coliformes termotolerantes (fecais) ou E.coli.

O modelo é composto de quatro planilhas, que tornam possível uma simulação rápida e simples. Essas planilhas são:

- **FórmulasCoefic** - Planilha que contém todas as fórmulas utilizadas e os valores usuais dos coeficientes das equações utilizadas na modelagem;
- **DiagramaUnifilar** - Planilha destinada ao usuário detalhar o diagrama unifilar do rio que ele está modelando;
- **RioPrincipal** - Contém a modelagem do rio principal, onde os cálculos são processados e os resultados apresentados;
- **Tributario1** - Caso seja modelado algum tributário do rio principal, esta planilha deverá ser utilizada e os resultados da simulação deverão ser transportados para a planilha RioPrincipal. Pode-se ter tantas planilhas Tributario1 quantos forem os tributários a se modelar.

A Figura 9 mostra as interações entre os parâmetros simulados pelo modelo QUAL-UFMG, de acordo com Martins (2015), adaptado de Von Sperling (2007). Destaca-se que os retângulos na cor laranja representam a troca com o sedimento.

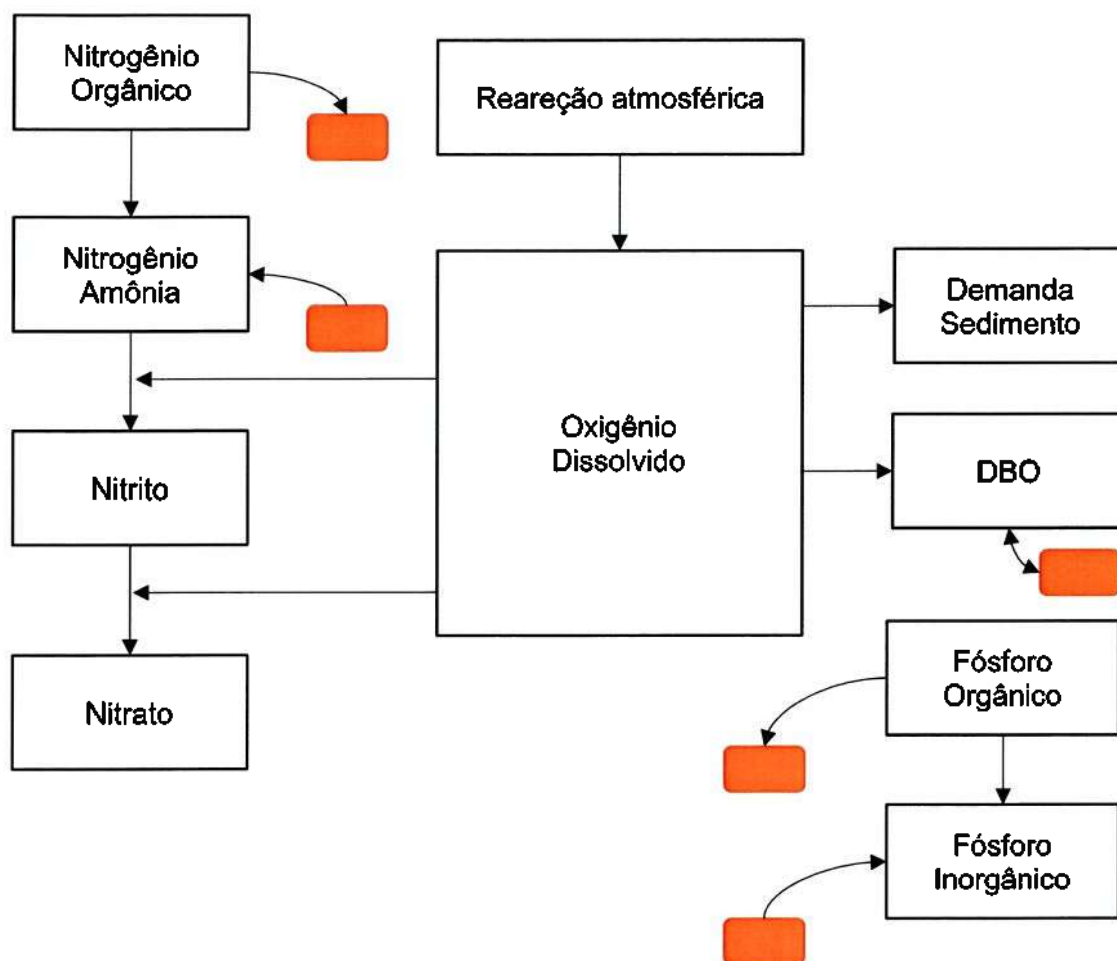


Figura 9 – Representação das inter-relações dos constituintes modelados
(Fonte: Martins, 2015, adaptado de Von Sperling, 2007)

Os parâmetros a serem aqui simulados são oxigênio dissolvido, DBO e fósforo. Os dados e critérios para calibração do modelo nos rios em estudo são apresentados a seguir.

4.2.1 Características hidráulicas

As características hidráulicas dos rios ou trechos de rios a serem simulados serão representadas através das equações (2) e (3), que relacionam velocidade média e vazão e profundidade média e vazão, respectivamente.

$$v = c \cdot Q^d \quad (2)$$

$$h = a \cdot Q^b \quad (3)$$

Os coeficientes a, b, c e d destas equações, serão obtidos a partir dos resultados da modelagem hidrodinâmica nos rios e trechos em estudo.

4.2.2 Divisão dos trechos do modelo

Os rios em estudo serão divididos em trechos, de forma a obedecer a condições de homogeneidade das características hidráulicas do escoamento. Essa divisão também será realizada com base nos afluentes localizados nos trechos e na localização dos postos de qualidade da água a serem utilizados para calibração.

Os trechos do rio serão subdivididos em segmentos menores, onde serão localizadas as vazões e concentrações de efluentes domésticos e/ou industriais, afluências pontuais e incrementais e captações.

4.2.3 Vazões de calibração

Na calibração do modelo será utilizada a vazão média do período coincidente com os dados de qualidade da água existentes nos rios a serem modelados. As vazões de calibração serão obtidas dos resultados do modelo hidrodinâmico.

4.2.4 Cargas e vazões domésticas e industriais

Uma etapa importante na modelagem de qualidade da água é a determinação das captações para abastecimento de água da região em estudo, bem como das cargas de esgoto lançadas e suas respectivas vazões efluentes.

As cargas domésticas de DBO, fósforo e suas respectivas vazões efluentes serão determinadas com base nas projeções populacionais do período coincidente com a calibração. Será considerada uma taxa de 0,054 kg/hab.dia para a DBO.

As vazões efluentes serão calculadas a partir da expressão dada pela equação (4).

$$Q = \frac{P \cdot q \cdot C}{86400} \quad (4)$$

Com:

- ✓ Q = vazão média efluente (l/s);
- ✓ C = coeficiente de retorno (adimensional);
- ✓ P = número de habitantes da cidade;
- ✓ q = quota média diária per capita (l/hab.dia);

No cálculo das cargas domésticas remanescentes, serão considerados os sistemas de tratamento de esgotos existentes. Assim, nesse cálculo serão considerados o percentual da população atendida e a eficiência de remoção das cargas.

Para as cargas e vazões de efluentes industriais e de outros usos da água na bacia serão utilizados os dados do cadastro de outorgas do IGAM.

4.2.5 Condições de Contorno

As condições de contorno correspondem aos valores de DBO, oxigênio dissolvido, fósforo, vazões e temperatura da água, considerados no início do trecho de montante dos rios simulados. As concentrações de cada parâmetro serão calculadas através do balanço de massa entre as concentrações naturais dos rios e as concentrações de DBO e fósforo geradas pelos núcleos urbanos situados no trecho de montante. As vazões iniciais serão obtidas por relação de área de drenagem.

4.3 Modelagem de produção de sedimentos

A erosão do solo e o aporte de sedimentos em reservatórios podem provocar, entre outros fatores, o assoreamento e eutrofização dos corpos hídricos (CERDAN *et al.*, 2010). Portanto, é uma questão preocupante no planejamento e gestão do uso dos solos e das águas.

Para se prever a erosão em superfícies naturais ou alteradas, podemos utilizar modelos que descrevem matematicamente o processo erosivo (MEYER and WISCHMEIER, *apud* SHEN, 1971), ou a utilização de equações paramétricas que usam formas simplificadas.

Note-se que a produção de sedimentos não corresponde exatamente à quantidade de material erodido. A produção de sedimentos compreende a quantidade de solo erodido nas encostas e canais, incluindo as perdas de massa, menos o sedimento que é depositado após sua erosão, porém, antes de chegar ao ponto de interesse (RENARD *et al.*, 1996). Assim, as fórmulas que estimam a erosão não fornecem realmente a produção de sedimentos, porém, podem ajudar a estimar as contribuições dessas fontes, sendo as demais contribuições calculadas em separado.

Para se prever a erosão em superfícies naturais ou alteradas, dentre as várias categorias de modelos matemáticos para a previsão de produção de sedimentos será utilizada a Equação Universal de Perda de Solos Revisada.

4.3.1 Equação Universal da Perda de Solos - A fórmula USLE

A Equação Universal de Perda de Solos, USLE (Universal Soil Loss Equation) desenvolvida por Wischmeier and Smith, em 1965 é um dos modelos mais utilizados, ou sua forma revista, RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation), que se constitui em uma fórmula empírica em que o processo que relaciona o movimento da água e a produção de sedimentos na bacia está agrupado em coeficientes onde a vazão máxima é estimada pelo método racional (SIMONS & SENTÜRK, 1992), dado pela equação (5).

$$Q = CIA \quad (5)$$

Com:

- ✓ I – intensidade da chuva;
- ✓ A – área de drenagem;
- ✓ C – coeficiente de runoff.

A fórmula USLE, bem como a RUSLE são baseadas na relação expressa na equação cuja forma está expressa equação (6) (RENARD *et al.*, 1996).

$$A = R K L S C P \quad (6)$$

Com:

- ✓ A – Perda de solo por unidade de área (t/ha)
- ✓ R – Fator de erosividade da chuva (t.m/ha)(mm/h)
- ✓ K – Fator de erodibilidade do solo (t/ha)/[(t.m/ha)(mm/h)]
- ✓ L – Fator de comprimento do declive (adimensional)
- ✓ S – Fator de declividade (adimensional)
- ✓ C – Fator de uso e manejo do solo (adimensional)
- ✓ P – Fator de prática conservacionista (adimensional)

A USLE foi desenvolvida para a estimativa da erosão média anual em vertentes, (WISCHMEIER & SMITH, 1978).

A confiabilidade nas estimativas de produção de sedimentos, e posterior avaliação de acúmulo no reservatório, depende da disponibilidade de dados existentes. Nenhuma campanha de campo para medição de dados é prevista neste trabalho. Apresenta-se a seguir uma explicação mais detalhada para cada um dos termos da equação RUSLE:

i) R - Fator de erosividade da chuva

O fator R da equação RUSLE representa a capacidade da chuva de causar erosão. É definido como sendo o produto da energia cinética da chuva (E_c) pela sua máxima intensidade em 30 minutos (I_{30}) (CARVALHO, 2008), como mostra a equação (7).

$$R = E_c \times I_{30} \quad (7)$$

sendo:

$$E_c = 12,142 + 8,877 \log I \quad (8)$$

Com:

- ✓ R = Índice de erosão, em tm/ha x mm/h
- ✓ E_c = energia cinética da chuva, tm/ha x mm
- ✓ I = intensidade da chuva (mm/h)
- ✓ I_{30} = máxima intensidade da chuva em 30min, mm/h

Os valores de intensidade máxima da chuva em trinta minutos são computados através dos diagramas de pluviógrafos.

Diante da escassez de registros de pluviógrafos diversos autores buscaram relacionar o índice de erosão a fatores climáticos de mais fácil medida, que não demandem registros de intensidade de chuva (LOMBARDI NETO e MOLDENHAUER, 1992 *apud* MATOS, 2015).

ii) K – Fator de erodibilidade do solo

A erodibilidade do solo é uma propriedade inerente a cada solo e independe dos demais fatores como chuva, declive, cobertura vegetal, ou manejo (BERTONI & LOMBARDI NETO, 2014).

Corresponde a uma taxa de perda de solo por índice unitário de erosão e é obtido experimentalmente com chuva artificial, a partir do material erodido, recolhido em tanques coletores padrão, com comprimento de 25m e declividade de 9%.

Segundo os valores de K podemos ter uma escala de erodibilidade (CARVALHO, 2008):

K < 0,15	Erodibilidade Fraca
0,15 < K < 0,30	Erodibilidade Média
K > 0,30	Erodibilidade Elevada

A obtenção do fator K por métodos experimentais é demorada e trabalhosa podendo levar anos de determinações, o que levou à busca de se estimar o seu valor por outros meios (BERTONI & LOMBARDI NETO, 2014).

O valor de K pode também ser retirado do nomograma de Wischmeier apresentado na Figura 10 que compreende cinco tipos de solo e parâmetros de perfil de solo: percentual de Silte alterado (0,002 – 0,1mm); percentual de Areia alterada (0,1 – 2mm); percentual de Matéria Orgânica (OM) e classes de estrutura (s) e permeabilidade (p) (RENARD *et al.*, 1996).

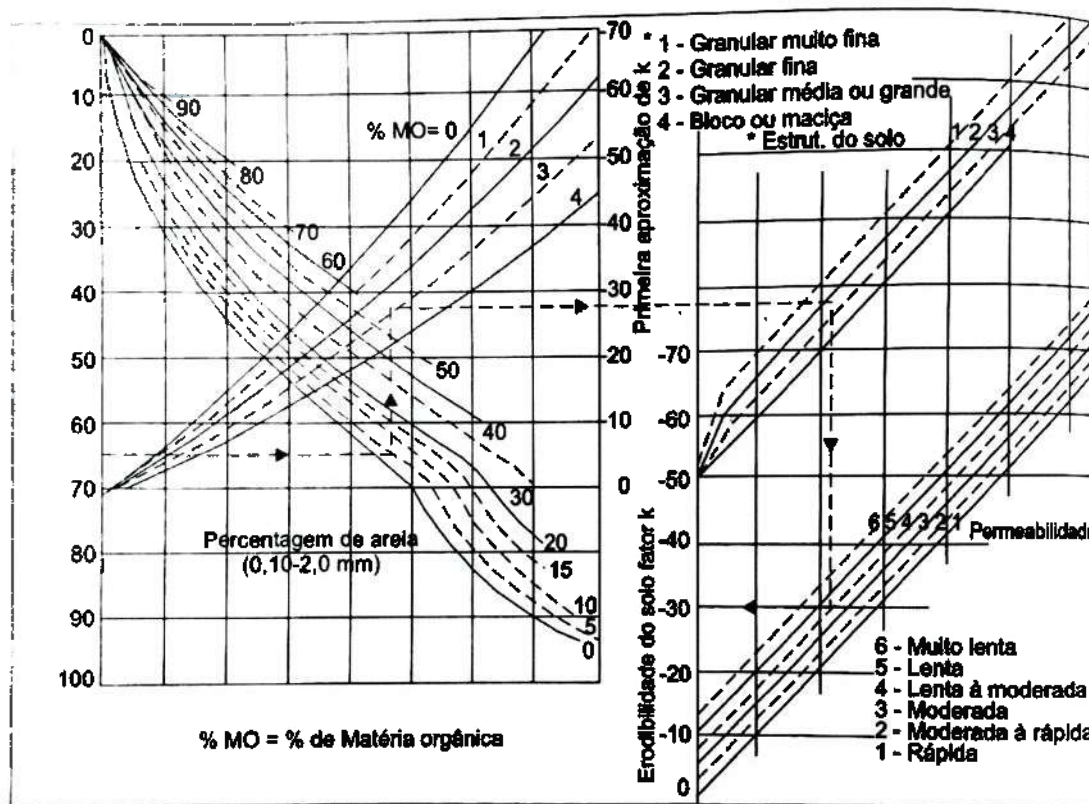


Figura 10 - Nomograma de Wischmeier de erodibilidade do solo.



Para casos em que a fração de silte no solo não seja superior a 70%, a equação (9) pode ser utilizada (Renard *et al.*, 1996):

$$K = [2,1 \cdot 10^{-4}(12 - OM)M^{1,14} + 3,25(s - 2) + 2,5(p - 3)]/100 \quad (9)$$

Com:

- ✓ K - Fornecido em unidades US. Dividindo-se o lado direito da equação por 7,59 obtem-se o valor de K expresso em unidades SI: ha.h.ha-1.MJ-1.mm-1.
- ✓ M – Produto das frações de tamanho das partículas primárias: (% silte alterado ou a fração de tamanho 0,002-0,1mm) x (% silte + % areia).
- ✓ OM – Percentual de Matéria Orgânica
- ✓ s – Classe de estrutura do solo, onde:
 - 1 - Granulometria muito fina
 - 2 - Granulometria fina
 - 3 - Granulometria média ou grossa
 - 4 - Em blocos, lamelar ou maciça
- ✓ p – Classe permeabilidade do solo, onde:
 - 6 – Muito lenta
 - 5 – Lenta
 - 4 – Lenta a moderada
 - 3 – Moderada
 - 2 – Moderada a rápida
 - 1 – Rápida

O fator de erodibilidade K pode também ser expresso em função do diâmetro médio das partículas do solo (D_g), de acordo com a relação apresentada a seguir, obtida a partir de dados globais de medições de K para 225 solos, em estudos naturais e simulados, em que apenas foram considerados aqueles com menos de 10% de fragmentos de rocha por peso (>2mm) (Renard *et al.*, 1996). Os valores médios dos fatores de erodibilidade para solos dentro de classes de tamanho foram relacionados com o diâmetro geométrico médio das partículas desta classe. O resultado dessa relação pode ser expresso pela equação (10).

$$K = 7,594 \left\{ 0,0034 + 0,0405 \cdot e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{\log(Dg) + 1,659}{0,7101} \right]^2} \right\} \quad (10)$$

Com:

- ✓ Dg – Diâmetro geométrico médio da partícula, em mm, dado pela equação (11)

$$Dg = e^{0,01 \sum f_i \ln(m_i)} \quad (\text{com } r^2 = 0,983) \quad (11)$$

Com:

- ✓ f_i – Fração do tamanho da partícula primária em percentagem
- ✓ m_i – Média aritmética dos limites do tamanho das partículas deste tamanho

O valor de K em toda a bacia hidrográfica é ponderado de acordo com a equação (12), a seguir (WILLIAMS & BERNDT, 1977).

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n K_i DA_i}{DA} \quad (12)$$

Com:

- ✓ K_i – Valor de K para o solo (i)
- ✓ DA_i – Área de drenagem coberta pelo solo (i)
- ✓ DA – Área total de drenagem

iii) Fatores topográficos L e S

L representa um fator de comprimento da encosta e é a distância do ponto de origem do escoamento até o ponto onde a declividade diminui o suficiente para que se inicie a deposição, ou o escoamento passe a ser concentrado em um canal.

S é um fator de declividade que reflete a influência da inclinação da encosta na erosão. Pode ser medida no local ou estimada pelas curvas de nível na planta.

Os dois fatores acima costumam ser utilizados conjugados em um único fator LS, que representa relação esperada de perda de solo por unidade de área em comparação com a obtida na área padrão de 25m de comprimento e 9% de declividade e é dado pela equação (13) (BERTONI & LOMBARDI NETO, 2014).

$$LS = (\sqrt{L}/100) \cdot (1,36 + 0,97 S + 0,1385S^2) \quad (13)$$



Com:

- ✓ L – Comprimento do declive, em m;
- ✓ S – Declividade da encosta em percentagem

Nesse caso o fator LS considera a declividade constante e uniforme no trecho, sem concavidade ou convexidade.

Bertoni e Lombardi Neto (2014) usaram dados obtidos nos principais tipos de solo do Estado de São Paulo, em dez anos de observações, determinaram a equação (14).

$$LS = 0,00984C^{0,63}D^{1,18} \quad (14)$$

Com:

- ✓ C – Comprimento da rampa, em m
- ✓ D – Declividade, em percentagem

WILLIAMS e BERNDT, 1977, propõem as expressões (15), (16) e (17) para o fator LS .

$$LS = \left(\frac{L}{22,1}\right)^M (0,065 + 0,0454S + 0,0065S^2) \quad (15)$$

Com:

- ✓ M – Igual a 0,5 para declividades maiores que 3% e 0,3 para encostas mais planas
- ✓ S – Declividade dada pelo método das curvas de nível:

$$S = \frac{0,25 Z(LC_{25} + LC_{50} + LC_{75})}{DA} \quad (16)$$

Com:

- ✓ S – Declividade média da encosta
- ✓ Z – Desnível da bacia hidrográfica
- ✓ LC25, LC50, LC75 – comprimentos das curvas de nível a 25%, 50% e 75% de Z.
- ✓ DA - Área total de drenagem
- ✓ L – Comprimento da encosta da bacia, calculado pelo método dos pontos extremos das curvas de nível:

$$L = \frac{LC \times LB}{2 \cdot EP \sqrt{LC^2 + LB^2}} \quad (17)$$

Com:

- ✓ LC – Comprimento da curva de nível
- ✓ LB – Comprimento da curva mestra
- ✓ EP – Número de pontos extremos na curva de nível (os que ocorrem quando um curso d'água cruza a curva)

iv) Fator C de uso e manejo do solo

Representa a relação entre um solo erodido sobre o manejo considerado e aquele quando cultivado e limpo.

O valor de C depende da cobertura vegetal, das culturas e práticas de manejo, variando de acordo com os períodos de desenvolvimento das culturas. Em áreas sem vegetação o fator tende a 1,0 enquanto que em áreas com florestas tendem a 0,0001. Na Tabela 4 são apresentados exemplos de valores para C.

Tabela 4 - Valores de C para culturas de algodão e soja, em vários estágios de desenvolvimento para a região de Campinas, SP (CARVALHO, 2008)

Estágio da cultura (ou período)		Fator C	
		Algodão	Soja
0	Do preparo ao plantio	0,0567	0,0032
1	Do plantio a 1 mês depois	0,1089	0,0432
2	De 1 a 2 meses após o plantio	0,1056	0,0672
3	De 2 meses após o plantio à colheita	0,3720	0,1037
4	Da colheita ao preparo do solo	0,0414	0,0020
Totals		0,6846	0,2193

v) Fator P de prática conservacionista do solo.

Representa a razão entre a perda de solo com um terreno cultivado com uma prática específica e a perda correspondente ao terreno quando há plantio morro abaixo, mantendo-se as condições padrão de relevo, de uso e de manejo. Na Tabela 5 são apresentados valores de P de acordo com a práticas mais comuns e na Tabela 6, de acordo com a declividade (CARVALHO, 2008).

Tabela 5 - Valores de P para diferentes práticas conservacionistas (CARVALHO, 2008).

Práticas conservacionistas	Valor de P
Plantio morro abaixo	1,0
Plantio em contorno	0,5
Alternância de capinas + plantio em contorno	0,4
Cordões de vegetação permanente	0,2
Terraço	0,1

Tabela 6 - Valores de P em função da declividade (CARVALHO, 2008).

Declividade (%)	Valor de P
0 - 2	0,60
2 - 7	0,50
7 - 12	0,60
12 - 18	0,80
18 - 24	0,90

4.3.2 Equação básica para previsão de assoreamento e estimativa de vida útil no reservatório

Para cálculo preliminar de assoreamento utilizam-se as expressões dadas pelas equações (18) e (19), segundo método proposto por Carvalho *et al* (2000) e Carvalho (2008).

$$S = \frac{D_{st} \cdot E_r}{\gamma_{ap}} = \frac{365 \cdot Q_{st} \cdot E_r}{\gamma_{ap}} \quad (18)$$

$$T = \frac{V_{res}}{S} \quad (19)$$

Sendo:

- ✓ S = volume de sedimento retido no reservatório (m³ /ano);
- ✓ D_{st} = deflúvio sólido total médio anual afluente ao reservatório (t/ano);
- ✓ E_r = eficiência de retenção do sedimento afluente ao reservatório (fração);
- ✓ γ_{ap} = peso específico aparente médio dos depósitos (t/m³);
- ✓ Q_{st} = descarga sólida total média afluente ao reservatório (t/dia);
- ✓ T = tempo de assoreamento de um determinado volume (anos);
- ✓ V_{res} = volume do reservatório, total ou volume morto (m³).

5 Consolidação das informações

Para o desenvolvimento do estudo, foram requisitadas informações básicas, as quais foram atendidas em parte. Também foram levantadas informações complementares de forma a viabilizar as atividades previstas nesse Plano de Trabalho.

Até a emissão do presente relatório, foram levantadas e recebidas as informações apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Informações disponibilizadas pela COPASA e levantadas de fontes alternativas.

Data de receb.	Nome do arquivo/pasta	Descrição	Fonte
15/03/18	Qualidade [diretório]	12 planilhas com dados bacteriológicos, físico-químicos, hidrobiológicos, de metais e pesticidas.	COPASA
15/03/18	Vargem das Flores 2009 ICATU [diretório]	8 arquivos PDF com dados de batimetria (2009) e relatório com balanço hídrico	COPASA
15/03/18	VarzeaFloresJun00	1 arquivo CAD, 2 DOC e 2 XLS, com dados de batimetria (2000)	COPASA
15/03/18	Níveis e Vazões Captadas.xlsx	Planilha com dados medidos de NA no reservatório e vazões de captação, 2011-2018	COPASA
15/03/18	Pluviometria.xlsx	Planilha com totais mensais de precipitação. Jan-2000 a Jan-2018.	COPASA
21/03/18	Drenagem Ottobacia Montante Reservatório Vargem das Flores.kmz	Rios e córregos contribuintes ao Reservatório Vargem das Flores.	IGAM
21/03/18	OTTOBACIA MONTANTE RESERVATÓRIO VARGEM DAS FLORES.kmz	Traçado da bacia contribuinte ao Reservatório Vargem das Flores.	IGAM
21/03/18	OUTORGAS MONTANTE RESERVATÓRIO VARGEM DAS FLORES.kmz	Localização das outorgas existentes na bacia contribuinte ao Reservatório Vargem das Flores.	IGAM

21/03/18	Usuários outorgados a montante do Reservatório Vargem das Flores.pdf	Tabela com dados referentes aos usuários outorgados localizados a montante do Reservatório Vargem das Flores.	IGAM
22/03/18	19S45 ZN.tif	Arquivo com dados de Altitude (numérica) da folha onde se encontra localizada a bacia contribuinte ao Reservatório Vargem das Flores. Os dados estão todos estruturados em quadriculas compatíveis com a articulação 1:250.000.	INPE - TOPODATA
23/03/18	BacH Otto SF Igam 2010.shp	Arquivo shape com divisão das ottobacias da Bacia do Rio São Francisco.	IGAM
23/03/18	RepM MG IGAM Naol.shp	Arquivo shape com as represas existentes em Minas Gerais.	IGAM
24/03/18	MZRMBH - shapes 2017 [diretório]	11 arquivos shape referentes às Macrozonas do Plano Diretor de Desenvolvimento Integrado da Região Metropolitana de Belo Horizonte.	Agência de Desenvolvimento da RMBH
25/03/18	Base Limpa Curvas de Nível 2016.dwg	Arquivo CAD com curvas de nível de 10m e 50m do município de Contagem.	Prefeitura de Contagem, MG.
10/04/18	Mapa de Solos [diretório]	4 folhas formadoras do Mapa de Solos do Estado de Minas Gerais, em formato .pdf; Legenda Expandida do Mapa de Solos do Estado de Minas Gerais em formato .pdf; Arquivos em formato shapefile (.SHP) necessários para a elaboração dos mapas em ambiente Gis	UFV

6 Equipe técnica

A equipe-chave prevista para participação nos estudos está apresentada na Tabela 8.

Tabela 8 – Equipe-chave prevista para desenvolvimento dos estudos.

COORDENAÇÃO		
Marcelo Gomes Miguez	D.Sc. Eng. Civil, Recursos Hídricos e Meio Ambiente / UFRJ	Coordenador
Paulo Canedo	Ph.D Eng. Civil, Hidrologia, Lancaster University - Inglaterra	Co-Coordenador
MODELAGEM DE SEDIMENTOS		
Virgílio Noronha	M.Sc. Eng. De Sistemas – Geomatica / UERJ	Professor – Modelagem de Sedimentos
Ana Caroline Pitzer Jacob	M.Sc. Eng. Civil, Recursos Hídricos e Meio Ambiente / UFRJ	Pesquisador – Modelagem Hidrodinâmica e Ambiental
Miguel Joffer de Oliveira Pereira	Estagiário. Graduando de Eng. Civil/UFRJ	Apoio a Modelagem
MODELAGEM DE QUALIDADE DAS ÁGUAS		
Fernanda Thomaz	Doutoranda Eng. Civil, Recursos Hídricos e Meio Ambiente / UFRJ	Pesquisador – Modelagem Hidrológica
Aline Pires Veról	D.Sc. Eng. Civil, Recursos Hídricos e Meio Ambiente / UFRJ	Professor – Modelagem Qualidade da Água
Bruna Peres Battemarco	Mestranda Eng. Civil, Recursos Hídricos e Meio Ambiente / UFRJ	Pesquisador – Apoio a Modelagem
João Paulo Rebechi Fraga	Estagiário. Graduando de Eng. Civil/UFRJ	Apoio a Modelagem
MODELAGEM HIDROLÓGICO-HIDRODINÂMICA		
Matheus Martins de Sousa.	D.Sc. Eng. Civil, Recursos Hídricos e Saneamento /UFRJ	Pesquisador – Modelagem Hidrodinâmica e Ambiental
Oswaldo Moura Rezende	D.Sc. Eng. Civil, Recursos Hídricos e Saneamento /UFRJ	Pesquisador – Modelagem Hidrodinâmica e Ambiental
Antônio Krishnamurti	Mestrando Eng. Civil, Recursos Hídricos e Meio Ambiente / UFRJ	Pesquisador – Apoio a Modelagem
Rodrigo Konrad Machado	Estagiário. Graduando de Eng. Civil/UFRJ	Apoio a Modelagem

7 Bibliografia

- BERTONI, J., LOMBARDI NETO, F., 2014, Conservação do Solo, 9ª Ed., Ícone Editora, São Paulo, SP
- CARVALHO, N. O; FILIZOLA Jr., SANTOS, P. M. C; LIMA, J. E. F. W., 2000, Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios. Brasília: ANEEL, 185p.
- CARVALHO, N.O., 2008, Hidrossedimentologia Prática, 2ª. Ed., Editora Interciência, Rio de Janeiro, Brasil.
- CERDAN, O.; GOVERS, G.; BISSONNAIS, Y.; OOST, K. van; POESEN, J.; SABY, N.; GOBIN, A.; VACCA, A.; Quinton, J.; AUERSWALD, K.; KLIK, A.; KWAAD, F. J. P. M.; RACLOT, D.; IONITA, I.; REJMAN, J.; ROUSSEVA, S.; MUXART, T.; ROXO, M. J.; DOSTAL T. Rates and spatial variations of soil erosion in Europe: A study based on erosion plot data. *Geomorphology*, v.122, p.167-177, 2010.
- CHAVES, H. M. L. Estimativa da erosão atual e potencial no vale do São Francisco: relatório final de consultoria. Brasília: CODEVASF, 1994. 35 p.
- CONTAGEM, 2017. Lei complementar nº. 26, de 21 de novembro de 2017. Institui o Plano Diretor do Município de Contagem e dá outras providências.
- DENARDIN, J.E. Erodibilidade de solo estimada por meio de parâmetros físicos e químicos. Piracicaba: ESALQ, 1990. 81p. Tese de Doutorado.
- MATOS, T. V. S. Determinação de Áreas de Vulnerabilidade à Erosão Hídrica com Base na Equação Universal de Perda de Solo (Usle). Programa de pós-graduação em saneamento – UFMG. Dissertação de Mestrado. 2015.
- MEYER, L.D., 1971, "Soil Erosion by Water on Upland Areas". In: Shen, H. W., *River Mechanics*, pp. 27-1–27-25, Edited by H.W. Shen, Fort Collins, Colorado, USA.
- MEYER, L.D., WISCHMEIER, W.H., 1971, "Mathematical Simulation of the process of soil erosion by water", In: Shen, H. W., *River Mechanics*, pp. 27-1–27-25, Edited by H.W. Shen, Fort Collins, Colorado, USA.
- MIGUEZ, M.G. (2001). Modelo Matemático de Células de Escoamento para Bacias Urbanas. Tese de Doutorado apresentada à COPPE/UFRJ para obtenção do título de Doutor em Ciências em Engenharia Civil. Rio de Janeiro, RJ.
- MIGUEZ, M.G.; BATTEMARCO, B.P.; DE SOUSA, M.M.; REZENDE, O.M. & VERÓL, A.P.; GUSMAROLI, G., 2017,. Urban Flood Simulation Using MODCEL-An Alternative Quasi-2D Conceptual Model. *Water*, v. 9, p. 445.
- OLIVEIRA, P. T. S.; WENDLAND, E.; NEARING, M. A. Rainfall erosivity in Brazil: A review. *Catena*, v.100, p.139-147, 2012.
- RENARD, K.G., FOSTER, G.A., WEESIES, D.K. et al., 1996, "Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning With the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)", *Agriculture Handbook No. 703*, USDA – United States Department of Agriculture, USA.

SHEN, W. H., 1971, "River Mechanics", Vol. I e II, Edited by H.W. Shen, Fort Collins, Colorado, USA.

SIMONS, D.B., SENTÜRK, F., 1992, Sediment Transport Technology, Water Resources Publications, Littleton, Colorado, USA.

UFMG, 2015. Universidade Federal de Minas Gerais. Macrozoneamento da Região Metropolitana de Belo Horizonte, Produto 5. Agência de Desenvolvimento da Região Metropolitana de Belo Horizonte. 2015.

VALERIANO, M. M. Topodata: guia para utilização de dados geomorfológicos locais. São José dos Campos, SP: INPE: Coordenação de Ensino, Documentação e Programas Especiais (INPE-15318-RPE/818). 72p., 2008.

VANONI, Vito A., 1977. Sedimentation Engineering. ASCE, American Society of Civil Engineers. New York, NY.

WILLIAMS, J.R., BERNDT, H.D., 1977, "Sediment Yield Prediction Based on Watershed Hydrology", Transactions of the ASAE Vol. 20 (6), pp. 1100-1104, American Society of Agricultural Engineers, USA.

WISCHMEIER, W.H., SMITH, D.D, 1978, "Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning", Agriculture Handbook No.737, USDA - United States Department of Agriculture, USA.

ZANOBETTI, D.; LORGERÉ, H.; PREISSMAN, A.; CUNGE, J.A. 1970. Mekong Delta Mathematical Program Construction. Journal of the Waterways and Harbours Division, ASCE, v.96, n.WW2, p. 181-199.

Avaliação da Vida Útil do Reservatório de Vargem das Flores

Rio de Janeiro, 20 de abril de 2018.



Prof. Marcelo Gomes Miguez
Coordenador do Projeto



Prof. Cláudia do Rosario Vaz Morgado
Diretora da Escola Politécnica / UFRJ



Fernando Alves Rochinha
Diretor Superintendente da Fundação COPPETEC

RELATÓRIO TÉCNICO

**Avaliação da vida útil do reservatório de
Vargem das Flores**

R2 – Relatório Parcial 2

RESULTADOS PRELIMINARES DA MODELAGEM

Executora



Cliente



Rio de Janeiro, setembro de 2018

Apresentação

Este segundo relatório, que sucede à apresentação inicial do Plano de Trabalho, que compôs o Relatório 1, apresenta a primeira etapa efetiva do trabalho que visa estimar os possíveis impactos no reservatório de Vargem das Flores, na Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH), em função das modificações previstas para o uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica afluyente ao reservatório, e sua influência sobre o seu uso para o abastecimento de água.

As modificações futuras no uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do reservatório são consideradas e comparadas em 2 cenários de planejamento, um relativo ao Macrozoneamento da RMBH e o outro conforme proposta do Plano Municipal de Contagem.

As estimativas dos possíveis impactos no reservatório de Vargem das Flores serão realizadas tendo por referência os seguintes cenários de uso do solo:

- a) CENARIO PASSADO: Utilizado para entender os impactos produzidos pelos padrões de ocupação da bacia sobre o reservatório no decorrer dos anos.
- b) CENARIO ATUAL: Utilizado como a base de comparação na estimativa dos cenários futuros. Tal cenário contém o atual uso do solo, a infraestrutura existente para coleta e tratamento de esgotos e a drenagem pluvial;
- c) CENARIO FUTURO - MACROZONEAMENTO DA RMBH: Utilizado para entender os impactos futuros do uso do solo segundo a regulamentação e as ações de requalificação previstas no Macrozoneamento da RMBH;
- d) CENARIO FUTURO - PLANO MUNICIPAL DE CONTAGEM: Utilizado para entender os impactos futuros do uso do solo segundo a proposta da Prefeitura Municipal de Contagem.

A consecução dos objetivos aqui propostos necessita do uso de ferramentas computacionais de modelagem matemática, com capacidade para avaliar de forma integrada todas as bacias dos cursos d'água afluentes ao reservatório. A ferramenta de simulação hidrológico-hidrodinâmica a ser utilizada é o modelo MODCEL, de concepção *quasi-2D*, desenvolvido na COPPE/UFRJ (Miguez, 2001; Miguez *et al.* 2017), que servirá de base hidrodinâmica para cálculo da qualidade de água, a qual será analisada com uso do modelo QUAL-UFMG, desenvolvido por Von Sperling (2007). Complementarmente, rotinas de modelagem para suporte ao MODCEL foram desenvolvidas em planilha *Excel*, permitindo a representação de processos de abstração e a modelagem da vazão de base, essenciais em simulações de longo prazo, para o ano hidrológico.

Neste documento são apresentados os resultados do processo de modelagem hidrológica-hidrodinâmica, com a calibração dos modelos e os resultados respectivos para os cenários supracitados. Os resultados preliminares de modelagem da qualidade de água, com a calibração do modelo também são apresentados, ainda, porém, sem apresentar a simulação do reservatório de Vargem das Flores, que é o objetivo final da modelagem e qualidade de água. Por fim, as etapas preliminares da análise da produção de sedimentos na bacia, atividade que fecha o conjunto de análises do projeto, são também apresentadas.

Sumário

1	Introdução.....	5
2	Bacia Hidrográfica de Vargem das Flores	7
3	Modelagem Hidrológica-Hidrodinâmica.....	16
3.1	Concepção do Modelo.....	16
3.2	Hipóteses do Modelo de Células para Cheias Urbanas.....	17
3.3	Modelagem de uma Bacia através de Células de Escoamento	18
3.4	O Modelo Hidrológico	20
3.5	Vazão de Estiagem de Referência	22
3.6	O Modelo Matemático	26
3.7	O Modelo Numérico.....	27
3.8	Modelagem da bacia de Vargem das Flores.....	28
3.9	Calibração e Validação.....	30
3.9.1	Dados para Calibração e Validação.....	30
3.9.2	Parâmetros de Calibração e Validação.....	32
3.9.3	Resultados do processo de Calibração.....	38
3.10	Cenários de Modelagem – Passado e Futuros	44
3.10.1	Alteração da distribuição dos reservatórios de abstração.....	44
3.10.2	Alteração do coeficiente de <i>runoff</i> , responsável pela determinação do escoamento superficial e pela infiltração, após a abstração.....	48
3.10.3	Modificação na vazão natural afluente ao reservatório.....	53
3.10.4	Modificação do aporte de esgoto na rede pluvial.....	53
3.11	Resultados da Simulação dos Cenários.....	55
4	Modelagem de Qualidade da Água	60
4.1	Estimativa dos dados de entrada e definição de critérios para calibração do modelo	60
4.1.1	Divisão dos trechos do modelo	62
4.1.2	Características hidráulicas	65
4.1.3	Vazões de esgotos domésticos.....	69
4.1.4	Cargas e concentrações de esgoto doméstico	74

4.1.5	Vazões de calibração	78
4.1.6	Condições de Contorno.....	80
4.2	Calibração do Modelo.....	81
4.2.1	Rio Betim.....	83
4.2.2	Córrego Morro Redondo	86
4.2.3	Córrego Água Suja.....	90
4.2.4	Análise dos resultados	93
5	Estimativa do aporte de sedimentos ao reservatório.....	95
5.1	R - Fator de erosividade da chuva	95
5.2	K – Fator de erodibilidade do solo.....	96
5.3	Fatores topográficos L e S	99
5.4	Fator C de uso e manejo do solo	100
5.5	Fator P de prática conservacionista do solo.....	105
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	106
	BIBLIOGRAFIA	107

1 Introdução

O estado geral da bacia hidrográfica do reservatório de Vargem das Flores tem importância vital para a função de abastecimento deste reservatório. A sua localização, na Região Metropolitana de Belo Horizonte a coloca em situação de intensa pressão de ocupação, com viés predominantemente urbano. As modificações de uso do solo, principalmente com a substituição de remanescentes florestais, bem como a situação do saneamento básico, em particular em relação aos sistemas de esgotamento sanitário, nas áreas já ocupadas e nas que eventualmente se urbanizem, podem gerar alterações significativas de quantidade e qualidade de água no reservatório. A produção de sedimentos na bacia também tende a se alterar, o que pode acabar refletindo no assoreamento do reservatório, com perda de volume útil.

O presente estudo busca oferecer uma estimativa dos impactos que alterações futuras nos usos do solo podem vir a provocar sobre o funcionamento do reservatório Vargem das Flores, com destaque para a avaliação das propostas do plano da Região Metropolitana de Belo Horizonte e o plano municipal de desenvolvimento de Contagem.

O presente documento está organizado da seguinte forma:

- o capítulo 2 apresenta as principais características da bacia hidrográfica do reservatório de Vargem das Flores, bem como uma a apresentação do processo de urbanização dos últimos 30 anos e as propostas de urbanização futuras;
- o capítulo 3 apresenta os aspectos técnicos do sistema de modelagem hidrológica-hidrodinâmica, incluindo a calibração do modelo utilizado e os principais resultados do processo de simulação hidrológico-hidrodinâmico dos quatro cenários principais de simulação, tomando o momento presente como referência de calibração e simulando o passado e os cenários futuros como resultados para avaliação do comportamento hidrodinâmico da bacia e base de informações para o modelo de qualidade de água. Para os dois cenários futuros considerados, duas possibilidades distintas de desenvolvimento foram consideradas: na primeira, utilizam-se as informações atuais de saneamento da bacia para estimar vazões de base, incluindo parte dos lançamentos de esgoto como aporte de vazão, em uma lógica tendencial; na segunda possibilidade, considerou-se que desenvolvimentos futuros não gerarão aporte de esgoto aos rios que chagam ao reservatório no horizonte dos zoneamentos analisados;
- o capítulo 4 apresenta o desenvolvimento do modelo de qualidade de água, aplicado às sub-bacias que contribuem para o reservatório, bem como os procedimentos de calibração desse modelo. O modelo de qualidade da água utiliza as relações de vazão e velocidade versus profundidades, estabelecidas pelo modelo hidrodinâmico. Neste ponto do estudo, apenas a situação atual, tomada como referência de calibração, está sendo apresentada. A simulação dos cenários futuros e os efeitos sobre o reservatório são objeto de discussão do terceiro e último relatório previsto;
- o capítulo 5 apresenta a organização geral e o início das atividades relacionadas com a modelagem que estimará os sedimentos produzidos na bacia e as consequências possíveis sobre a vida útil do reservatório;
- o capítulo 6 apresenta as considerações finais do relatório.

De forma geral, cabe destacar, para fins de visão de conjunto, o espectro de modelagem previsto como produto completo deste contrato:

- Modelagem hidrológica-hidrodinâmica da bacia a montante do reservatório de Vargem das Flores, desde as cabeceiras da bacia até o reservatório, incluindo sua operação, para suprir informações de vazão em qualquer ponto desejado na área de interesse. O Modelo hidrodinâmico será calibrado para representar os níveis de operação e vazões defluentes do reservatório (captadas e vertidas) e para permitir estimar os hidrogramas de entrada no reservatório e vazões de base da bacia, que vão subsidiar o estudo de qualidade da água.
- Modelagem de qualidade da água para as sub-bacias contribuintes ao reservatório de Vargem das Flores, para estimativa dos parâmetros de qualidade da água afluyente ao reservatório, segundo os quatro diferentes cenários de uso e ocupação do solo na bacia contribuinte.
- Modelagem 1D de qualidade da água no interior do reservatório, de acordo com os parâmetros estimados para a vazão afluyente.
- Estimativa de aporte de sedimentos ao reservatório, considerando os quatro cenários de uso e ocupação do solo, para estimativa da vida útil do reservatório de Vargem das Flores.

2 Bacia Hidrográfica de Vargem das Flores

O Sistema Vargem das Flores faz parte do Sistema Integrado de Abastecimento de Água da Região Metropolitana de Belo Horizonte, operado pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA), apresentando capacidade de produção nominal de 1,4 m³/s. O reservatório de Vargem das Flores, localizado entre as cidades de Contagem e Betim, conforme apresentado na Figura 1, tem capacidade de armazenamento de 44 hm³, com área de espelho d'água de 5,25 km² e profundidade máxima de 19,7 m (Lopes, 2009).

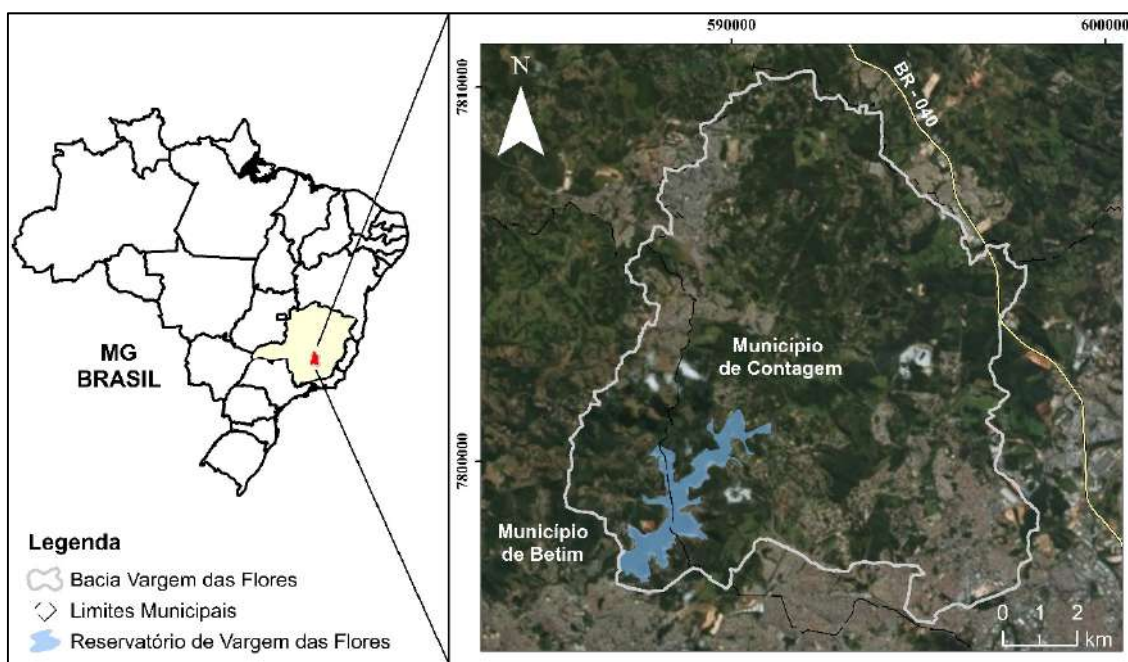


Figura 1 – Localização do reservatório Vargem das Flores

A bacia de contribuição ao reservatório de Vargem das Flores drena uma área total de 121km², tendo como principais corpos hídricos os córregos Água Suja, Morro Redondo, Bela Vista e o Rio Betim. A Tabela 1 apresenta as principais características fisiográficas da bacia contribuinte ao reservatório e de suas principais sub-bacias, as quais são destacadas no mapa apresentado na Figura 2.

Tabela 1 – Características fisiográficas da bacia do reservatório Vargem das Flores e de suas principais sub-bacias.

Bacia	Área de drenagem (km ²)	Extensão do talvegue principal (km)	Declividade média (m/m)	Diferença máxima de cota (m)
Bacia do reservatório Vargem das Flores	121,0	17,2	0,55%	94,07
Sub-bacia Córrego Água Suja	30,2	13,0	0,69%	89,90
Sub-bacia Córrego Morro Redondo	28,7	10,7	1,00%	107,17
Sub-bacia Rio Betim	34,5	12,7	0,82%	104,50
Sub-bacia Córrego Bela Vista	10,3	5,4	2,18	117,93
Contribuições Laterais ao Reservatório	17,3	-	-	-

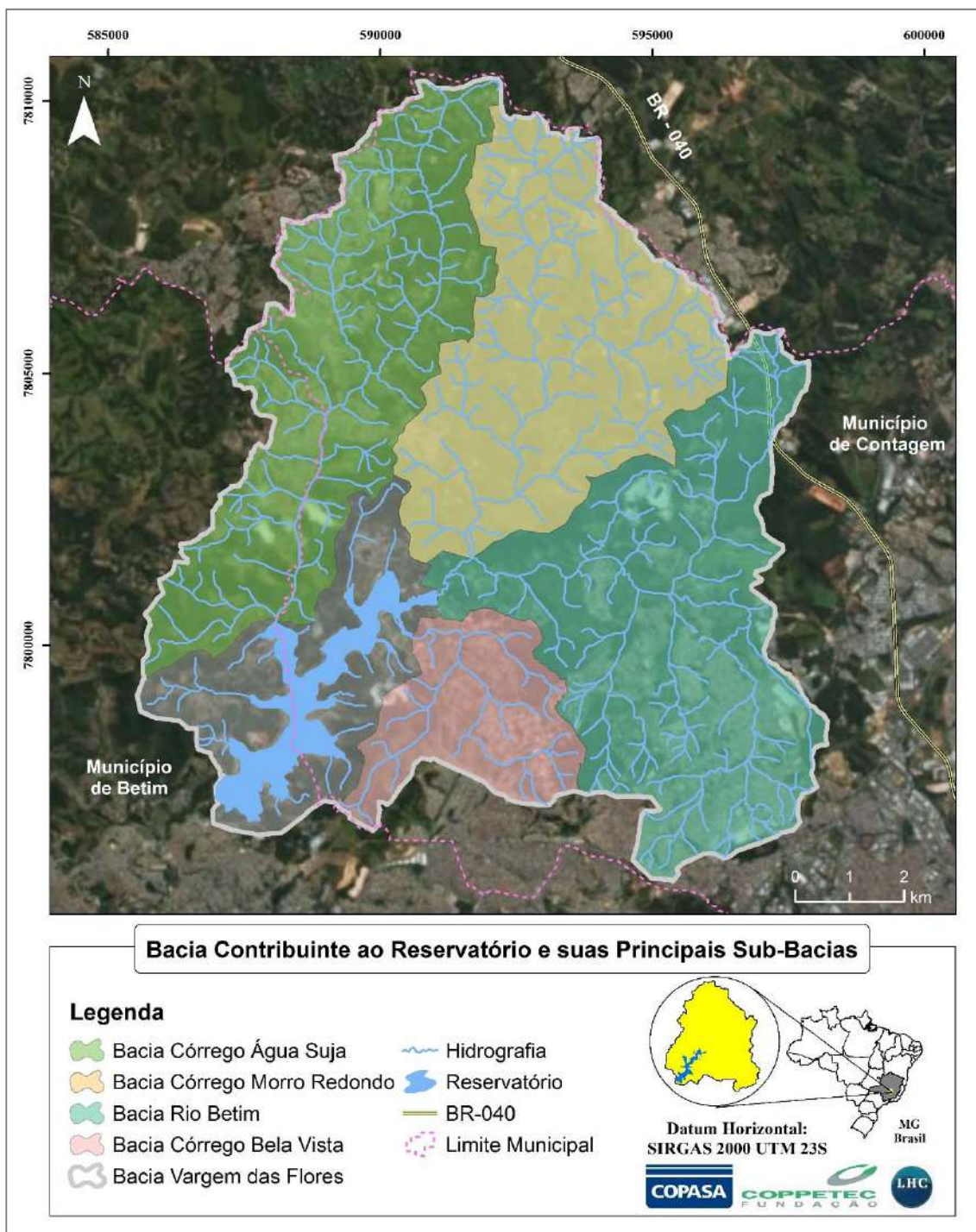


Figura 2 – Sub-bacias contribuintes ao reservatório Vargem das Flores.

Um modelo digital tridimensional planialtimétrico incorporando o uso do solo da bacia foi gerado de forma a auxiliar a interpretação dos escoamentos hidráulicos preferencias, e a identificação de regiões com potencial de alteração da qualidade da água e do aporte de sedimentos. A Figura 3 apresenta o Modelo tridimensional desenvolvido para a região de estudo.

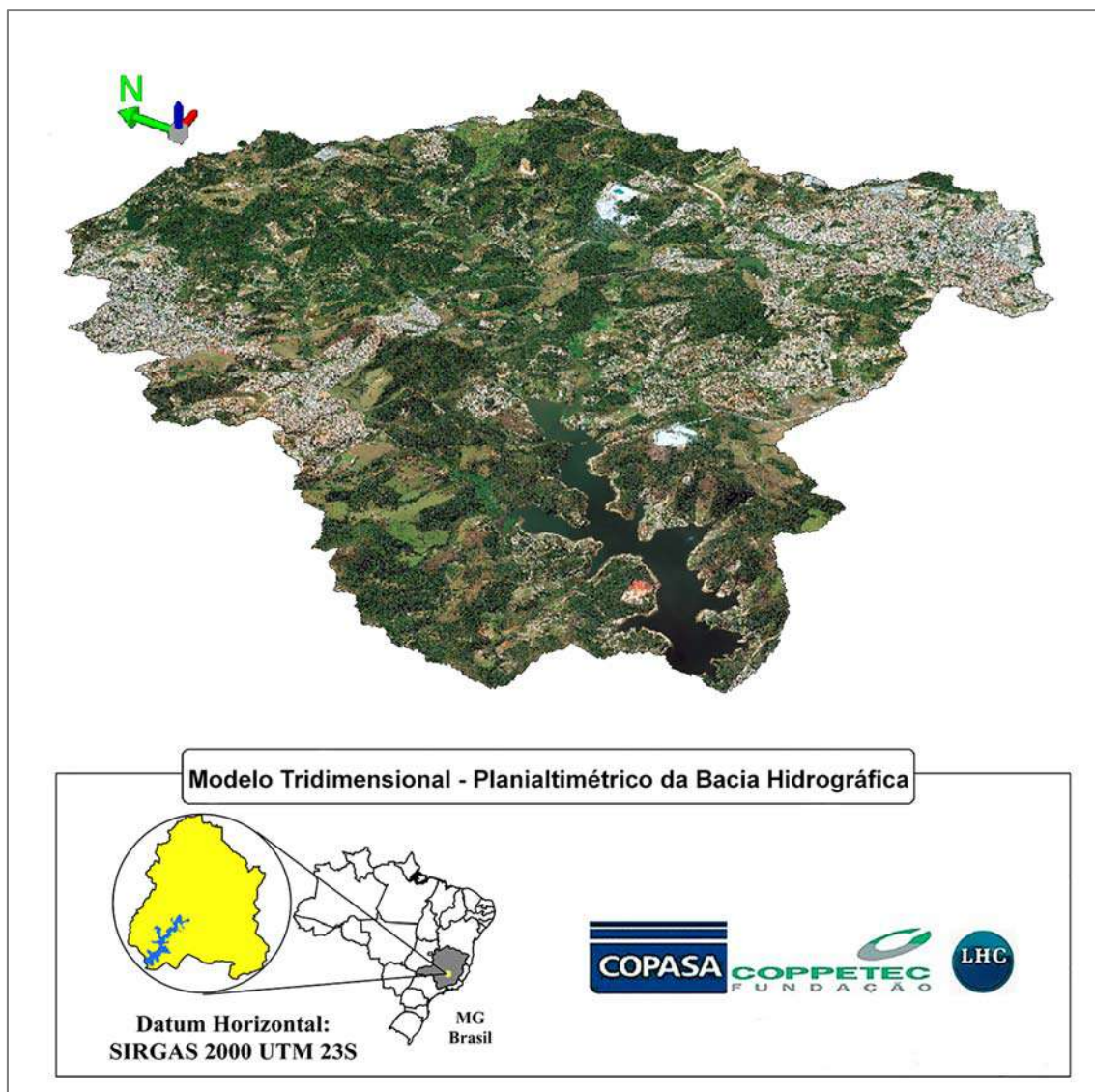


Figura 3 – Modelo Tridimensional – Planialtimétrico da bacia hidrográfica de Vargem das Flores

A bacia de Vargem das Flores sofreu intensa dinâmica de ocupação urbana nos últimos 30 anos. Neste período, observou-se que a mancha urbana aumentou aproximadamente 300%, conforme pode ser constatado pela comparação da Figura 4 e da Figura 5, que mostram as manchas de urbanização de 1987 e 2016, respectivamente. A alteração no uso do solo, especialmente a gerada por processos de urbanização, tem influência direta na quantidade e qualidade dos escoamentos gerados que se acumulam no reservatório.

Os estudos realizados no âmbito do projeto de Macrozoneamento da Região Metropolitana de Belo Horizonte tornam a bacia hidrográfica de Vargem das Flores uma Zona de Interesse Metropolitano – ZIM e a consideraram como de interesse ambiental, dada a sua relevância para o abastecimento de água da RMBH. Porém, o Plano não restringe completamente o crescimento da mancha urbana, permitindo o desenvolvimento de novas ocupações em algumas Macrozonas, desde que não apresentem alto impacto ambiental à região. Nesse sentido, há duas Macrozonas mais permissivas no plano citado que, por mais que sigam diretrizes mais sustentáveis que as que acompanharam o desenvolvimento da bacia até então, têm potencial de expandir a mancha urbana. As referidas Macrozonas são:

MZAC-1 → Deve-se regular a implantação predominante de atividades de pequeno porte e baixa propensão a causar repercussões negativas. Deve privilegiar a instalação de usos não residenciais para atendimento de demandas cotidianas da população.

MZAC-2 → Deve-se regular a implantação predominante de atividades de pequeno e médio porte e baixa propensão a causar repercussões negativas, sendo toleradas atividades que causam impactos de média relevância, desde que haja mitigação dos mesmos. Deve privilegiar a instalação de usos não residenciais para atendimento de demandas cotidianas da população, bem como de atividades de atendimento esporádico, mais especializadas e com maior potencial de abrangência.

A Figura 6 apresenta a mancha de urbanização caso as Macrozonas MZAC-1 e MZAC-2, proposta pelo Plano Metropolitano, sejam completamente ocupadas. Este cenário de ocupação aumenta em 26% a mancha urbana do cenário atual e será utilizado como base para a simulação hidrológica e hidrodinâmica, de qualidade de água e de aporte de sedimentos do cenário 3 ou cenário futuro 1, nomeado como CENÁRIO FUTURO – MACROZONEAMENTO DA RMBH.

Em contrapartida, a Prefeitura de Contagem apresentou à Câmara Municipal um projeto de Lei alterando o seu Plano Diretor Municipal (Projeto de Lei Complementar nº 26, de 21 de novembro de 2017). As alterações transformaram a área rural da Bacia de Vargem das Flores em área de expansão urbana. Sendo assim, a Zona Adensável (ZAD 1), Zona Adensável 2 (ZAD2) e Zona de Expansão Urbana 3 (ZEU 3) tem potencial de aumentar a mancha de urbanização da bacia do reservatório de Vargem das Flores.

A Figura 7 apresenta a mancha de urbanização caso o zoneamento proposto pela prefeitura de Contagem seja posto em prática. É perceptível o grande avanço da mancha urbana, com um aumento de 137% em relação ao cenário atual e de 87% em relação ao cenário futuro 1 (Plano Metropolitano). O cenário de urbanização seguindo o zoneamento do município de Contagem será utilizado como base para a simulação hidrológica, hidrodinâmica, de qualidade de água e de aporte de sedimentos do cenário 4 ou cenário futuro 2, nomeado como CENÁRIO FUTURO - PLANO MUNICIPAL DE CONTAGEM.

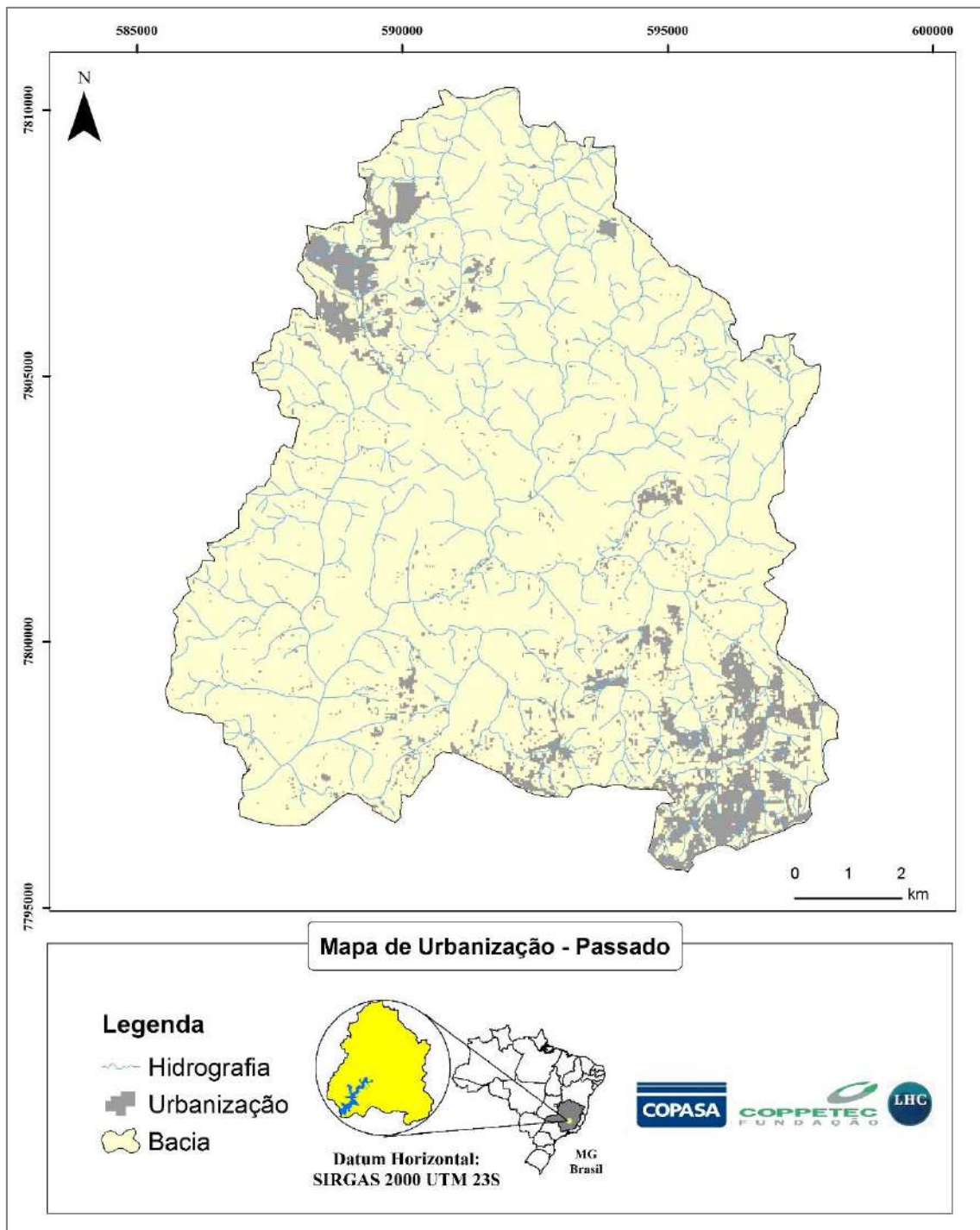


Figura 4 – Mapa de urbanização do Cenário Passado, utilizando o uso do solo de 1987.

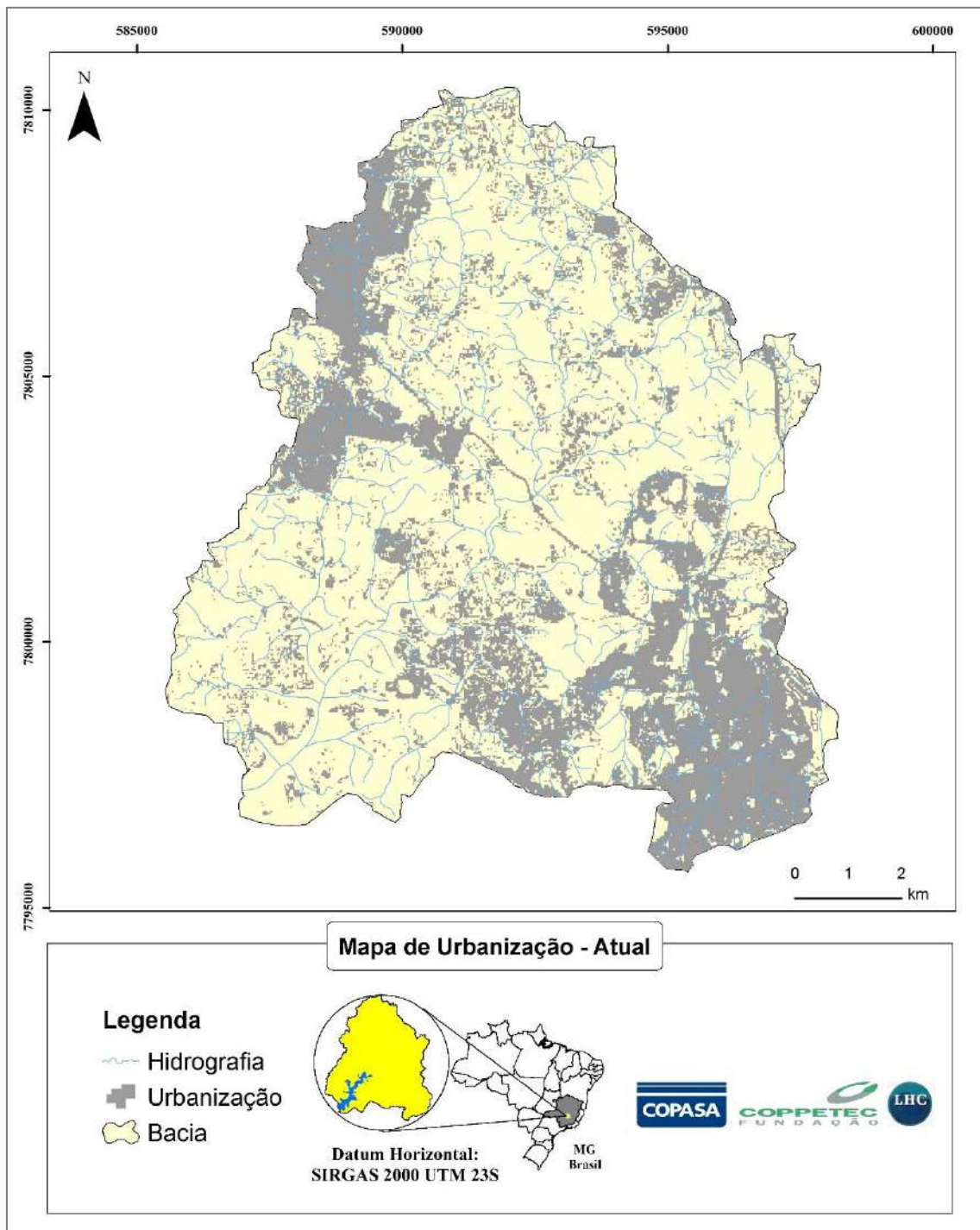


Figura 5 – Mapa de urbanização do Cenário Atual, utilizando o uso do solo de 2016.

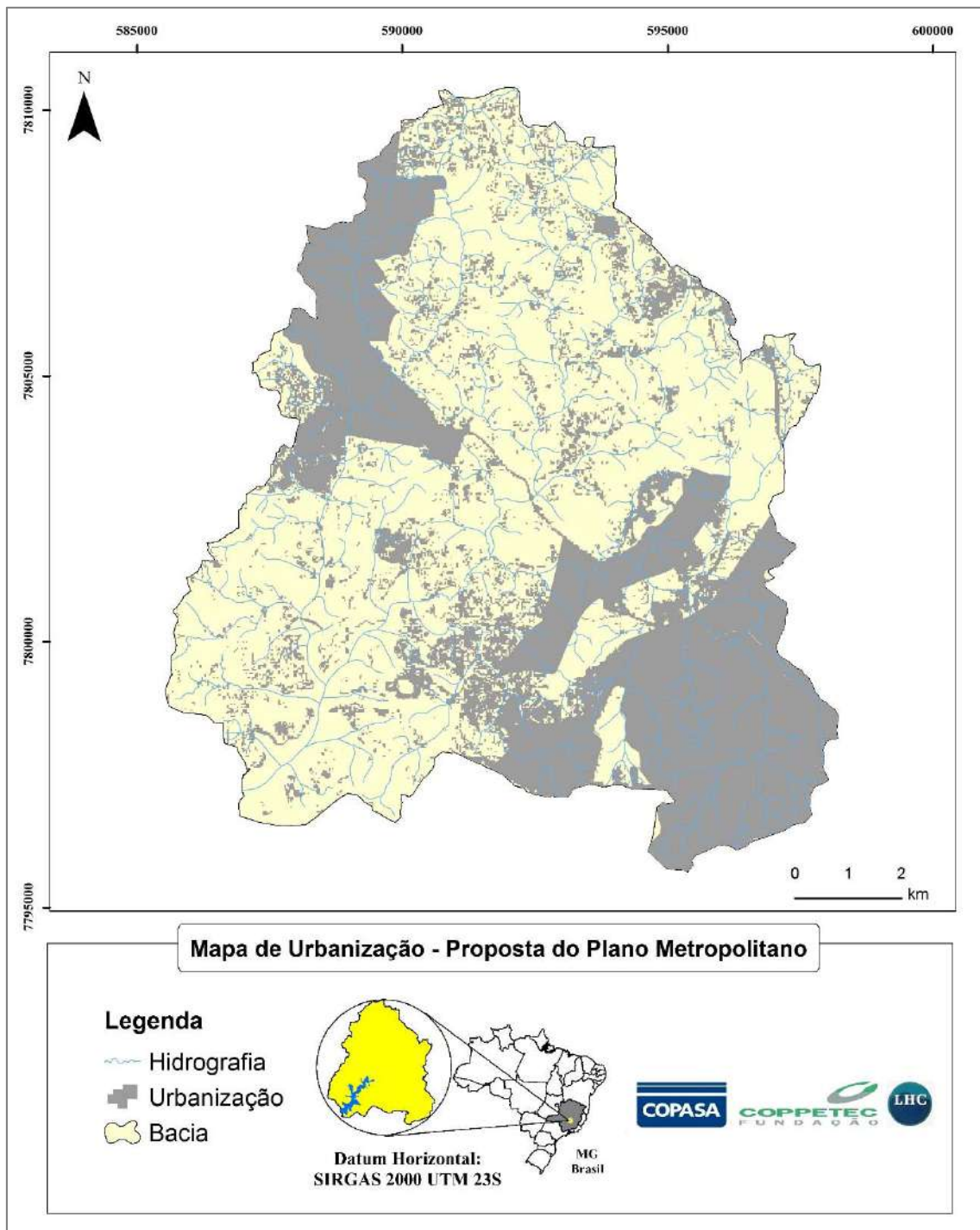


Figura 6 – Mapa de urbanização do Cenário Futuro Macrozoneamento RMBH, com base na proposta de Macrozoneamento do Plano da Região Metropolitana de Belo Horizonte.

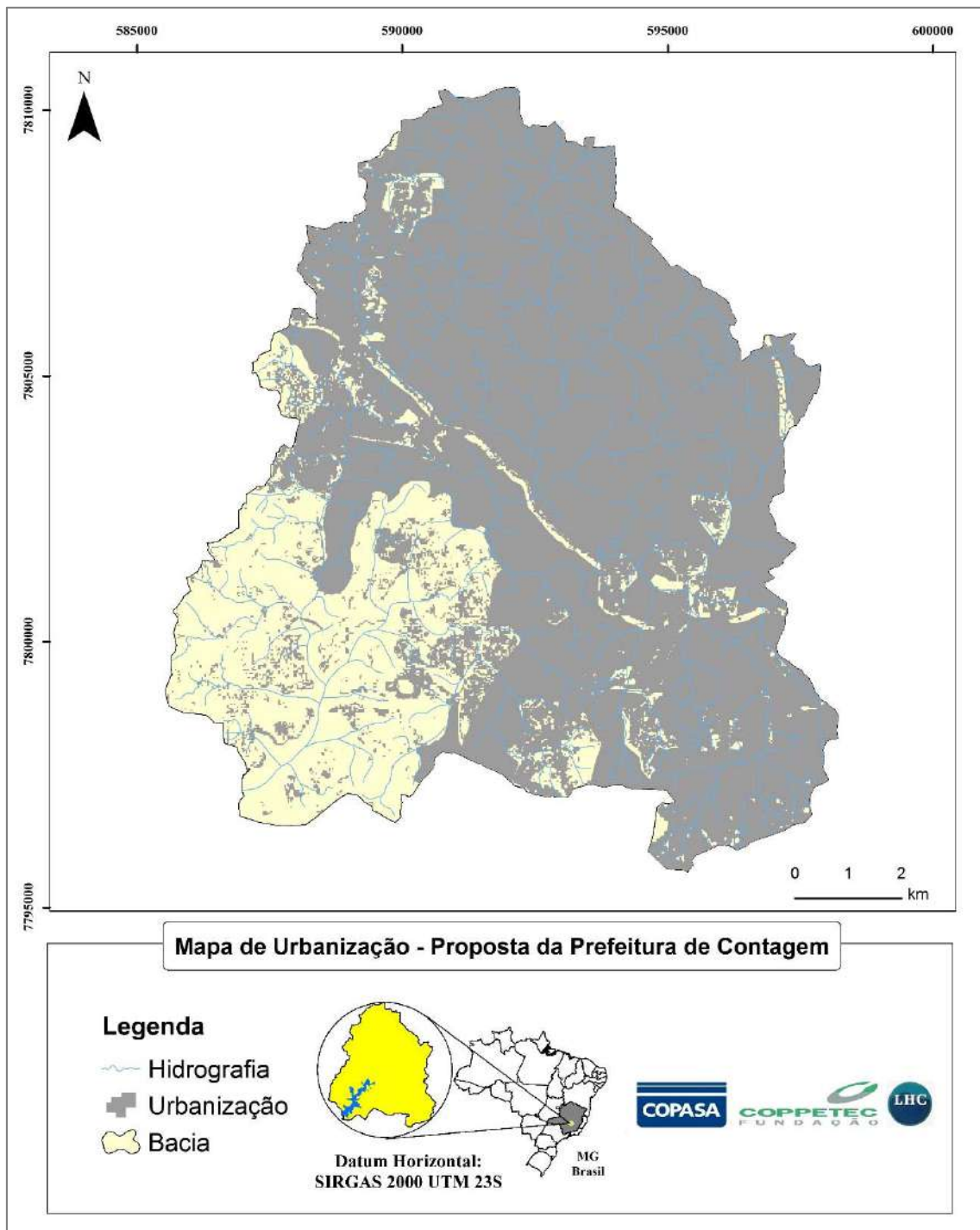


Figura 7 – Mapa de urbanização do Cenário Futuro Plano Municipal de Contagem, com base na proposta de Zoneamento da prefeitura de Contagem.

Com base nas propostas de zoneamento, são considerados quatro cenários de simulação, de acordo com a descrição apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 – Cenários de simulação

Cenários	Uso do solo	Modelo
Cenário 1	Passado	Modelo Hidrodinâmico 1 – MHd1 Modelo de Qualidade da Água 1 – MQA1 Modelo de produção de sedimentos 1 – MS1
Cenário 2	Atual	Modelo Hidrodinâmico 2 – MHd2 Modelo de Qualidade da Água 2 – MQA2 Modelo de produção de sedimentos 2 – MS2
Cenário 3	Futuro 1 MACROZONEAMENTO DA RMBH	Modelo Hidrodinâmico 3 – MHd3 Modelo de Qualidade da Água 3 – MQA3 Modelo de produção de sedimentos 3 – MS3
Cenário 4	Futuro 2 PLANO MUNICIPAL DE CONTAGEM	Modelo Hidrodinâmico 4 – MHd4 Modelo de Qualidade da Água 4 – MQA4 Modelo de produção de sedimentos 4 – MS4

3 Modelagem Hidrológica-Hidrodinâmica

A modelagem hidrológica e hidrodinâmica foi feita de forma integrada, com o modelo MODCEL (MIGUEZ, 2001 e MIGUEZ et al., 2017) que trabalha com o conceito de células, desenvolvido na década de 1960, por Zanobetti, Lorgerè, Preissman e Cunge (1970). As células são compartimentos articulados, capazes de representar a superfície da bacia, incluindo a rede de drenagem. As células têm capacidade de armazenagem e apresentam características topográficas e de uso do solo, que permitem um processo de transformação chuva- vazão. A integração destes compartimentos forma uma rede de escoamentos e é responsável pela representação física da bacia e dos elementos da paisagem urbana. A iteração entre as células se faz através de diferentes leis hidráulicas, com destaque para as equações completas de Saint-Venant, incluindo ainda vertedouros e orifícios clássicos, estruturas típicas de drenagem e bombeamento, entre outros. O modelo é definido como quasi-bidimensional, mas ainda articula, verticalmente, o plano das galerias subterrâneas. Esse modelo tem registro de obra intelectual CONFEA 1463. 2000.

Características principais:

- ✓ modelo hidráulico-hidrológico distribuído;
- ✓ representação bidimensional compartimentada do espaço;
- ✓ integração da rede de drenagem com estruturas da paisagem urbana;
- ✓ uso de um esquema de células de escoamento;
- ✓ próprio para controle de cheias em bacias rurais e urbanas;
- ✓ diagnóstico ambiental de impactos de inundações;
- ✓ simulação matemática de cenários futuros de intervenções;
- ✓ minimização de prejuízos materiais e humanos decorrentes de chuvas intensas;
- ✓ incorporação de resíduos sólidos e lixo urbano para simulações mais realistas;
- ✓ suporte para avaliação de problemas de qualidade de água;
- ✓ sistema de suporte a decisão de projeto.

A escolha deste modelo permite representar toda a rede hidrográfica e integrar seu funcionamento com o processo de transformação de chuva em vazão, assim como representar o funcionamento do reservatório de Vargem das Flores. Esse modelo, porém, tem vocação para a representação detalhada da hidrologia superficial, sendo recomendável a sua complementação com rotinas de pré-processamento para melhor representação das variações ao longo do ano hidrológico.

Neste Capítulo, são apresentados os resultados da modelagem hidrodinâmica da bacia do reservatório Vargem das Flores. Esse modelo, porém, tem vocação para a representação detalhada da hidrologia superficial, sendo recomendável a sua complementação com rotinas de pré-processamento para melhor representação das variações ao longo do ano hidrológico.

3.1 Concepção do Modelo

As bacias de rios naturais, ou canalizados, em áreas urbanas, geralmente em áreas aproximadamente planas, têm potencial para formar grandes áreas alagáveis. Ao sair da rede de drenagem, o caminho da água pode ser qualquer, ditado pelos padrões de ocupação da bacia e, em particular, da própria urbanização, quando o foco é a avaliação de inundações urbanas. Dessa forma, a presença de estradas, diques, depressões naturais e diferentes usos do solo podem condicionar os escoamentos, quando as superfícies alagadas não são suficientes para formar grandes massas de água contínuas, submergindo todos esses obstáculos. Em áreas urbanas, calçadas marginais podem se tornar vertedouros para os rios, cujas águas extravasadas utilizam as ruas como verdadeiros canais, podendo alagar construções, parques ou praças, que então podem funcionar como reservatórios, indesejavelmente, concentrando águas que não retornarão à rede de drenagem na escala de tempo do evento simulado. Nessa situação, pode-se perceber que

águas extravasadas podem ter comportamento independente da rede de drenagem, gerando seus próprios padrões de escoamento, especialmente, quando a microdrenagem não corresponde à função que dela se espera. Cumpre ainda destacar a possibilidade de alagamentos em áreas planas poderem-se iniciar mesmo sem extravasamento de rios ou canais, por acúmulo superficial das chuvas. Nesse contexto, percebe-se que há indicações para o uso de um modelo de características sistêmicas, capaz de representar hidráulica e hidrológicamente, de forma distribuída, a superfície da bacia. Esta necessidade encontra respaldo na concepção de células de escoamento.

3.2 Hipóteses do Modelo de Células para Cheias Urbanas

- ✓ A natureza pode ser representada por compartimentos homogêneos, interligados, chamados células de escoamento. A cidade e sua rede de drenagem são subdivididas em células, formando uma rede de escoamento bidimensional, com possibilidade de escoamento em várias direções nas zonas de inundação, a partir de relações unidimensionais de troca.
- ✓ Na célula, o perfil da superfície livre é considerado horizontal, a área desta superfície depende da elevação do nível d'água no interior da mesma e o volume de água contido em cada célula está diretamente relacionado com o nível d'água no centro da mesma.
- ✓ O modelo proposto articula as células em "loop" (modelo anelado), com possibilidade de escoamento em várias direções na bacia modelada. Cada célula comunica-se hidráulicamente com células vizinhas.
- ✓ Cada célula recebe a contribuição de precipitações e realiza processos hidrológicos internos para transformação de chuva em vazão, de forma que, às vazões trocadas com as células vizinhas soma-se a vazão resultante da transformação da chuva.
- ✓ O escoamento entre células pode ser calculado através de leis hidráulicas conhecidas, como, por exemplo, a equação dinâmica de Saint-Venant, completa ou simplificada, a equação de escoamento sobre vertedouros, livres ou afogados, a equação de escoamento através de orifícios, equações de escoamento através de bueiros, entre outras várias, sendo considerados os efeitos de inércia no escoamento que ocorre nos cursos d'água principais.
- ✓ O escoamento pode ocorrer simultaneamente em duas camadas, uma superficial e outra subterrânea, em galeria, podendo haver comunicação entre as células de superfície e de galeria. Nas galerias, o escoamento é considerado inicialmente à superfície livre, mas pode vir a sofrer afogamento, passando a ser considerado sob pressão.
- ✓ A vazão entre duas células adjacentes, em qualquer tempo, é apenas função dos níveis d'água no centro dessas células.
- ✓ As seções transversais de escoamento são tomadas como seções retangulares equivalentes, simples ou compostas.
- ✓ Aplica-se o princípio da conservação de massa a cada célula.
- ✓ Cada célula comunica-se com células vizinhas, que são arrançadas em um esquema topológico, constituído por grupos formais, onde uma célula de um dado grupo só pode se comunicar com células deste mesmo grupo, ou dos grupos imediatamente posterior ou anterior, permitindo a solução numérica pelo método da dupla varredura.

3.3 Modelagem de uma Bacia através de Células de Escoamento

As células podem representar a natureza isoladamente ou em conjuntos, formando estruturas mais complexas. A definição do conjunto de tipos de ligação, que são representativas de leis hidráulicas que traduzem determinados escoamentos, permite reproduzir uma multiplicidade de padrões de escoamento que ocorrem em um cenário urbano.

A atividade de modelação topográfica e hidráulica depende de um conjunto pré-definido de tipos de célula e de tipos possíveis de ligações entre células. A Figura 8 mostra, esquematicamente, o funcionamento de uma dada célula, em uma escala local, típica de representação urbana.

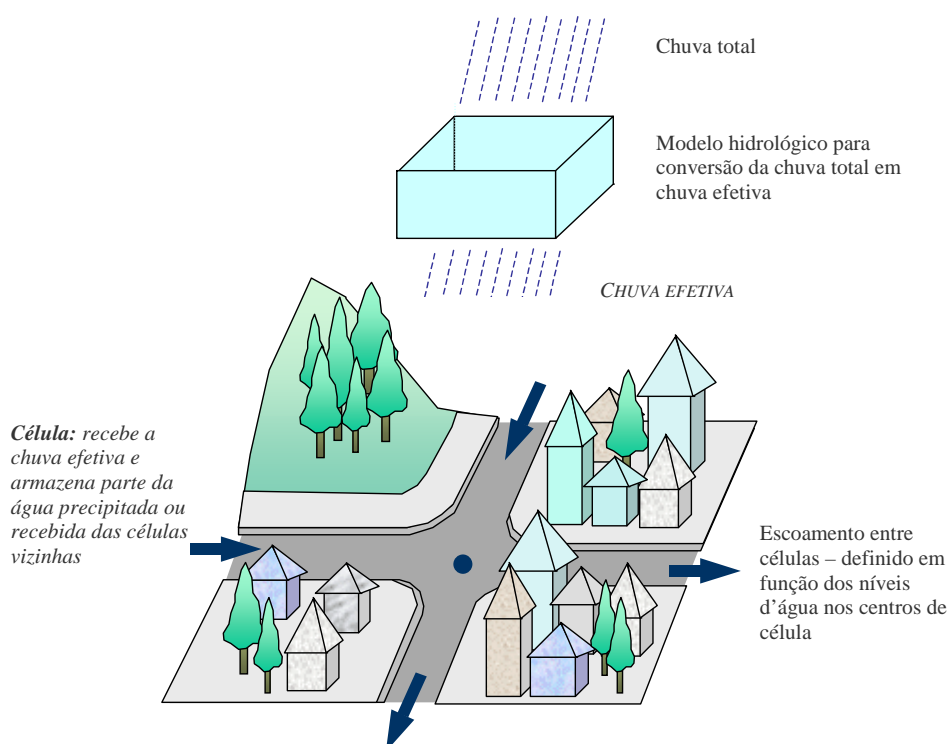


Figura 8 – Funcionamento esquemático de uma célula de escoamento.

Alternativamente, em uma escala mais macroscópica, uma célula pode representar toda uma sub-bacia, simulando sua capacidade de transformação de chuva em vazão, atuando como local de armazenamento temporário de vazões e articulando a rede hidrográfica maior da bacia, na representação integrada de seus escoamentos.

Conjunto tipo base de células pré-definido:

- ✓ **de rio**, ou canal, por onde se desenvolve o escoamento principal da drenagem a céu aberto, podendo ser a seção simples ou composta;
- ✓ **de galeria**, subterrânea, complementando a rede de drenagem;
- ✓ **de planície urbanizada**, para a representação de escoamentos a superfície livre em planícies alagáveis, bem como áreas de armazenamento, ligadas umas às outras por ruas, englobando também áreas de encosta, para recepção e transporte da água precipitada nas encostas para dentro do modelo, áreas de vertimento de água de um rio para ruas vizinhas, considerando um dado padrão de urbanização pré-definido, como mostrado na Figura 9;

- ✓ **de planície natural**, não urbanizada, análoga ao tipo anterior, porém com geometria prismática, sem nenhum padrão particular de variação de sua superfície de fundo;
- ✓ **de reservatório**, simulando também uma área natural, contendo ou não um reservatório formal, onde se dá o armazenamento temporário da água, obedecendo uma curva cota x área superficial, a partir da qual, conhecendo-se a variação de profundidades, pode-se conhecer a variação de volumes armazenados.

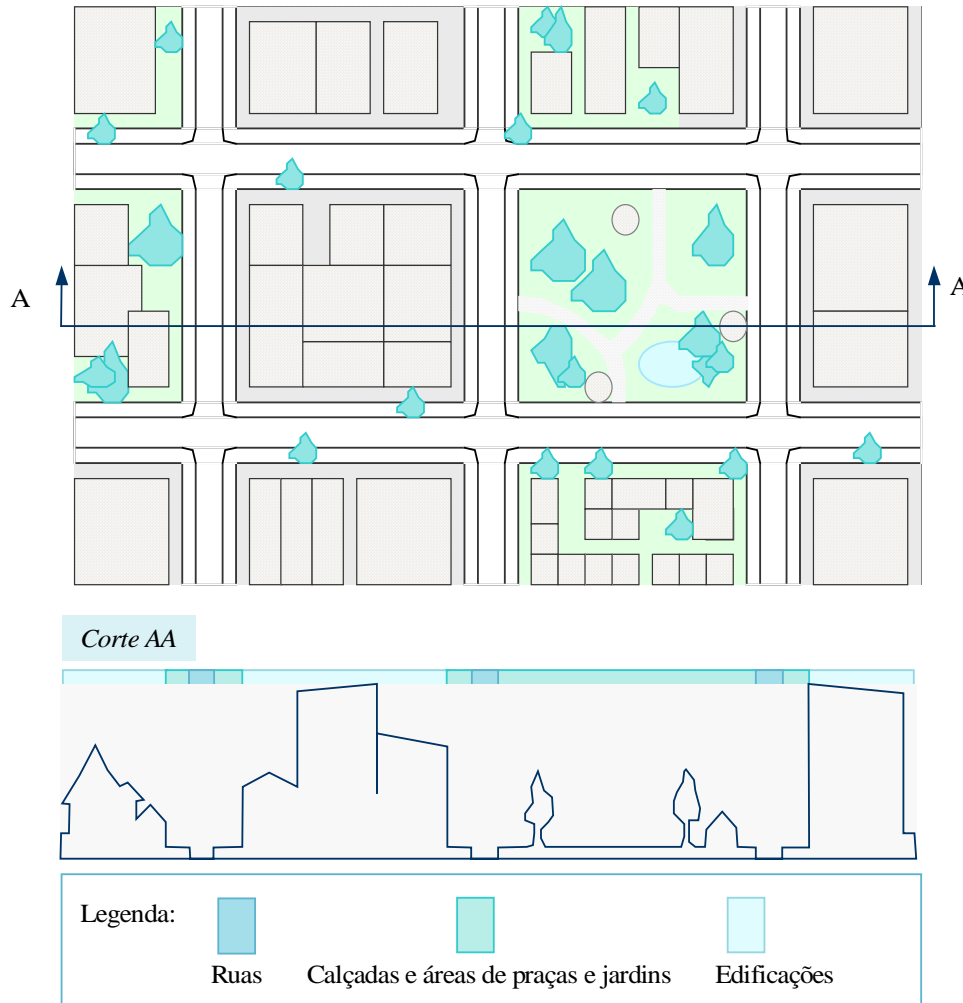


Figura 9 – Escalonamento de níveis na superfície de uma célula urbanizada.

A Figura 10 mostra um corte esquemático em uma bacia, onde se vê a modelação do espaço através de células de escoamento.

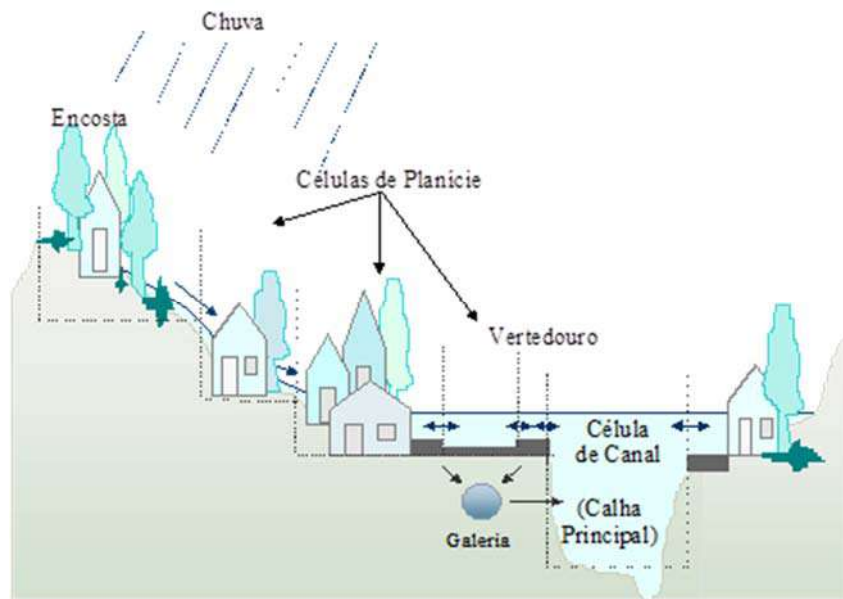


Figura 10 – Representação esquemática de uma região dividida em células, mostrando interfaces dos escoamentos superficiais.

3.4 O Modelo Hidrológico

A separação do escoamento superficial é originalmente representada no Modelo de Células através do coeficiente de *runoff*, definido conforme características de cada célula. Assim, num dado passo de tempo, a lâmina de chuva efetiva, numa célula qualquer, pode ser obtida através do produto do seu coeficiente de *runoff* pela precipitação referente ao mesmo período. Essa representação, porém, tem vocação principal para a representação de eventos e não de períodos longos, como a simulação de anos hidrológicos. A parte superficial do ciclo fica representada, enquanto as vazões de base são informadas como condições de contorno.

O comportamento hidrológico do reservatório de Vargem das Flores, porém, apresenta grande relevância para as vazões de base e são percebidas respostas suaves aos picos de chuva nos períodos de estiagem e início do período de cheias, indicando que o método original apresentado precisa de complementação para o caso em questão.

Com o intuito de melhorar a capacidade de representação dos fenômenos hidrológicos anuais envolvidos na geração das cheias no MODCEL, especialmente no período de estiagem, foi desenvolvido um modelo hidrológico simples, representando a interceptação vegetal e a retenção em depressões, sendo estes dois últimos considerados de modo combinado em uma parcela de abstração. A abstração se manifesta enquanto se enche, em dias de chuva, um reservatório que modela a sua capacidade, sendo sua capacidade restaurada pela evaporação, nos dias sem chuva. A parcela de infiltração pode ser estimada pelo completo do coeficiente de *runoff* ($1 - C$), que agora passa a ser aplicado sobre a chuva descontada da parcela inicialmente abstraída. Por fim, define-se uma regra de correlação entre a parcela infiltrada e a vazão de base

Como premissas do modelo hidrológico empregado, o tamanho do reservatório de abstração depende do CN (coeficiente curva-número, utilizado no método que leva o mesmo nome, conforme desenvolvido pelo *US Natural Resources Conservation Service*, originalmente conhecido por *Soil Conservation Service* ou *SCS*) referente ao tipo e uso do solo da célula em que for aplicado. Dessa forma, parte-se do valor de CN referente ao tipo e uso do solo característico do local, que define a condição de referência, e avalia-se a variação deste valor para uma condição seca e outra úmida, para o mesmo tipo e uso do solo. Conhecida a faixa de variação do CN para as condições seca e úmida, o volume deste reservatório varia em função da ocorrência (ou não) de chuvas antecedentes recentes. No método do CN, a influência das chuvas recentes sempre se refere a um período de 5 dias antecedentes. Assim, os valores de capacidade máxima do reservatório ocorrem em condições de solo seco, ou seja, não ocorreram chuvas nos últimos 5 dias. Os valores de capacidade mínima ocorrem quando ocorreram precipitações nos últimos 5 dias; portanto, caracterizando solo úmido (encharcado). Este período também foi utilizado para determinar a capacidade de recuperação do reservatório, ou seja, caso se encontre preenchido, após 5 dias sem registro de chuva, através de processos de evaporação, recuperará sua capacidade máxima. Entretanto, nesta modelação simplificada do ciclo hidrológico, a evaporação não foi, de fato, avaliada. Partindo da premissa do método do CN original, se a capacidade de gerar escoamento depende dos últimos 5 dias, a recuperação do volume deste reservatório de abstração se dará em 5 dias, de forma que a capacidade diária de recuperação, a cada dia sem chuva, será igual a um quinto do volume do reservatório. Em um passo de tempo qualquer da simulação hidrodinâmica, os cálculos referentes à rotina hidrológica de abstração são realizados em primeiro lugar, e, em seguida, após recalculada a chuva descontada da abstração, o modelo aplica o coeficiente de *runoff*, para separação da parcela que representaria a infiltração e, então, a propagação dos escoamentos é feita através das rotinas hidrodinâmicas.

A Figura 11 apresenta de forma esquemática o modelo hidrológico utilizado na bacia hidrográfica do reservatório de Vargem das Flores. Os resultados desta modelagem são mostrados diretamente no item que descreve a modelagem completa da Bacia de Vargem das Flores (item 3.9).

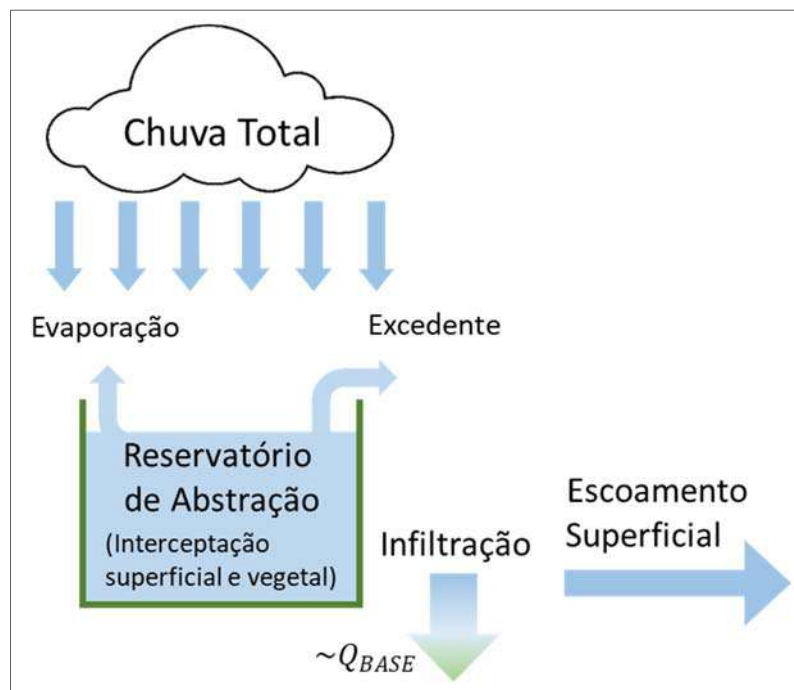


Figura 11 – Esquema do modelo hidrológico utilizado na bacia hidrográfica do reservatório de Vargem das Flores.

O modelo hidrológico também requereu uma avaliação mais detalhada para as vazões de base, visto que mesmo pequenas vazões são relevantes para determinação do balanço hidrológico do reservatório de Vargem das Flores. O modelo hidrológico parte da necessidade inicial de se estimar a vazão natural média que aporta aos vários rios que contribuem para o reservatório, que irá variar de forma proporcional à infiltração que houver ocorrido. As vazões de base vão considerar também a parcela de esgoto que as áreas urbanas descarregam sem tratamento nos rios. Esse dado será considerado a partir das estatísticas do SNIS. A parcela tratada não é descarregada na bacia. A descrição dos procedimentos para determinação da vazão de base de referência é mostrada no próximo item.

3.5 Vazão de Estiagem de Referência

Esse item apresenta os estudos hidrológicos realizados para a determinação das vazões de estiagem das bacias dos principais afluentes ao reservatório de Vargem das Flores, a serem utilizadas na calibração do modelo hidrodinâmico e do modelo de qualidade da água. Os estudos foram desenvolvidos com base nos dados de postos fluviométricos localizados na bacia, fornecidos pela COPASA, compreendendo o período de 1992 a 2004.

No entanto, para esses postos, só estão disponíveis os dados de vazões das medições de descarga, que não são contínuos ao longo do tempo. Vale ressaltar que não existem outros dados fluviométricos a montante do reservatório de Vargem das Flores. Assim, foi necessário adotar uma metodologia simplificada que pudesse caracterizar as vazões de estiagem para o cenário atual, uma vez que os dados das medições dos postos fluviométricos não abrangem esse período. Observa-se que uma parcela não desprezível das vazões de estiagem é formada por vazões de esgoto geradas na bacia. Por isso, o aumento populacional no período deve ser considerado, uma vez que reflete no aumento das vazões de esgoto. Destaca-se, também, que uma parcela significativa dos esgotos é exportada para outra bacia.

As áreas de drenagem e coordenadas geográficas de cada um dos postos fluviométricos foi obtida no relatório de balanço hídrico do reservatório de Vargem das Flores (DRTM/SPAM/DVHD, 1999), como mostrado na Tabela 3.

Visto que as coordenadas informadas neste relatório só possuem grau e minuto, foi necessário realizar uma atualização da localização dessas estações, bem como da área de drenagem correspondente. Essa atualização foi determinada considerando-se um raio de 1 minuto do local indicado para cada uma das estações, aproximando-as do rio de referência. As áreas então foram corrigidas para este local, conforme Tabela 4.

Tabela 3 - Coordenadas geográficas e áreas de drenagem informadas no relatório de balanço hídrico do reservatório (DRTM/SPAM/DVHD, 1999).

ESTAÇÃO	CURSO D'ÁGUA	COORDENADAS		ÁREA RELATÓRIO (km ²)
		Longitude	Latitude	
Faz. Morro Redondo	Betim	44° 6'	19° 52'	30,80
Sítio do engenho	Água Suja	44° 9'	19° 51'	23,00
Olaria	Morro Redondo	44° 7'	19° 52'	25,30
Sem nome	Bela vista	44° 8'	19° 53'	9,65

Tabela 4 - Coordenadas geográficas e áreas de drenagem atualizadas.

ESTAÇÃO	CURSO D'ÁGUA	COORDENADAS		ÁREA atualizada (km ²)
		Longitude	Latitude	
Faz. Morro Redondo	Betim	44° 6' 20,4"	19° 52' 53,4"	30,04
Sítio do engenho	Água Suja	44° 9' 05,0"	19° 51' 56,6"	21,22
Olaria	Morro Redondo	44° 6' 58,7"	19° 53' 09,1"	24,69
Sem nome	Bela vista	44° 7' 32,7"	19° 53' 32,8"	9,70

A Figura 12 apresenta as principais bacias contribuintes ao reservatório de Vargem das Flores, bem como as localizações atualizadas dos postos fluviométricos situados na bacia, utilizados no presente estudo.

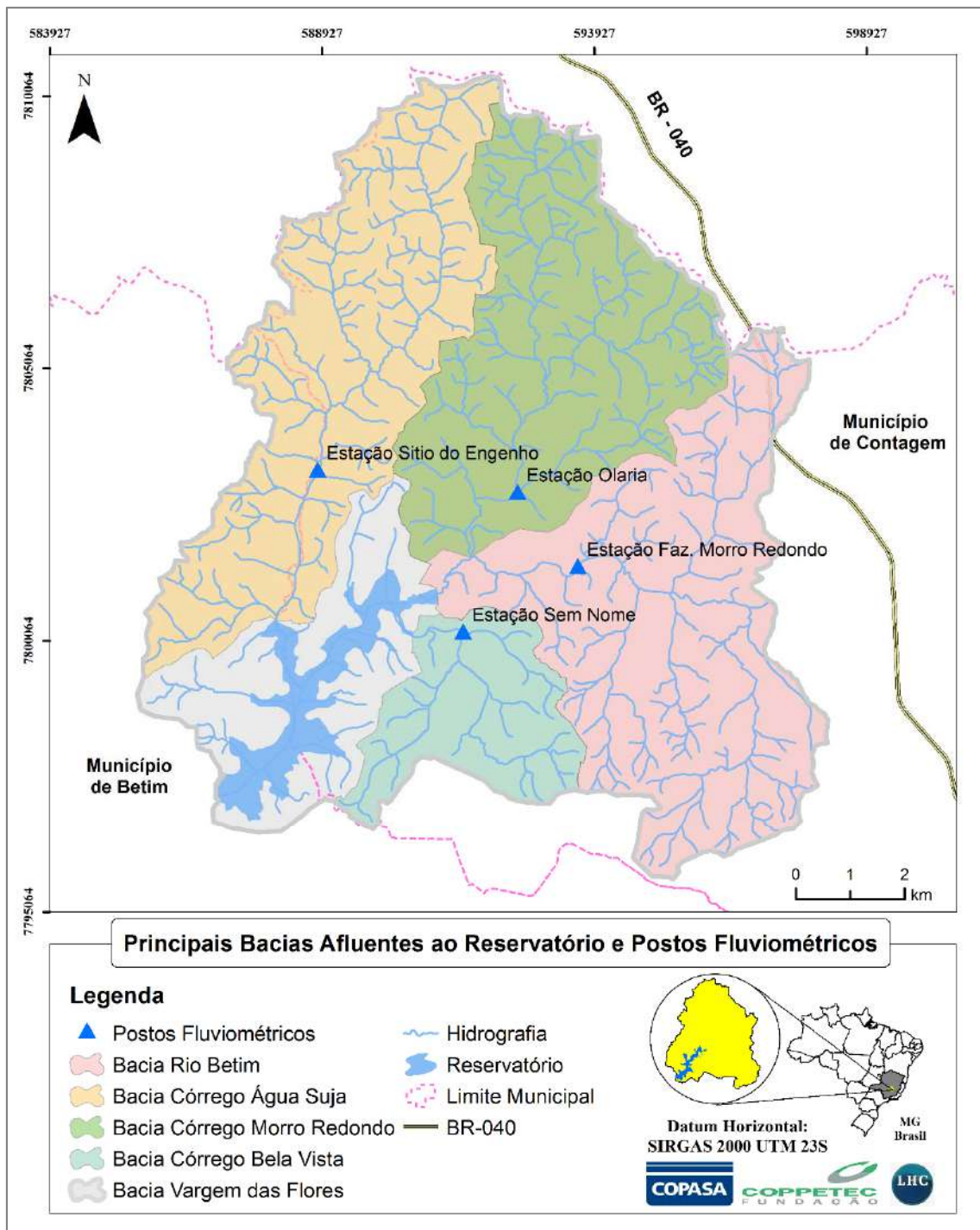


Figura 12 - Principais bacias afluentes ao reservatório de Vargem das Flores e localização atualizada das estações fluviométricas.

Tabela 5 - Coordenadas geográficas e áreas de drenagem atualizadas.

ESTAÇÃO	Curso D'água	Área de drenagem (km ²)	Vazão média de estiagem posto (L/s)
Faz. Morro Redondo	Betim	30,0	153,2
Sítio do engenho	Água Suja	21,2	131,9
Olaria	Morro redondo	24,7	52,8
Sem nome	Bela Vista	9,7	12,4

Para determinação da vazão na foz do rio Betim e dos córregos Bela Vista, Morro Redondo e Água Suja foi utilizado um critério que considera a vazão de estiagem como a soma da vazão natural, acrescida das vazões de esgoto lançadas na bacia de montante. Assim, no local de cada posto a vazão natural é igual a vazão de estiagem subtraída das vazões de esgoto.

Para estimativa das vazões dos efluentes domésticos foi utilizado o ano de referência de 2000, tendo como base a população dos setores censitários que cobrem as bacias em estudo (IBGE, 2000). Para o cálculo das vazões de esgoto, considerou-se um consumo médio per capita de 150 l/hab.dia (SNIS, 2002) e um coeficiente de retorno igual a 1.

A Tabela 6 a seguir reúne as vazões médias de estiagem nos postos, as vazões de esgoto na bacia de montante e as vazões naturais calculadas.

Tabela 6 - Vazões naturais nos postos.

ESTAÇÃO	Rio	Área (km ²)	Vazão média estiagem posto (L/s)	Vazão de esgoto (2000) (L/s)	Vazão Natural no local do posto (L/s)
Faz. Morro Redondo	Betim	30,0	153,2	86,32	66,83
Sítio do engenho	Água Suja	21,2	131,9	71,83	60,03
Olaria	Morro redondo	24,7	52,8	1,98	50,81
Sem nome	Bela Vista	9,7	12,4	7,25	5,15

O cálculo das vazões naturais na foz dos cursos d'água foi feito por relação de área de drenagem o posto e da foz. As vazões totais na foz foram determinadas somando-se as vazões naturais com as vazões de esgoto gerada em cada bacia. A Tabela 7 apresenta as vazões naturais na foz e as vazões totais referentes aos anos de 2000.

Tabela 7 - Determinação das vazões de estiagem na foz para o ano 2000.

Rio	Área de Drenagem foz (km ²)	Vazão natural na Foz (L/s)	Vazão esgoto (2000) (L/s)	Vazão total de estiagem na foz (2000) (L/s)
Betim	33,70	74,98	87,25	162,23
Morro redondo	28,70	59,06	5,62	64,68
Água Suja	30,20	85,42	72,34	157,76
Bela Vista	10,30	5,47	7,52	12,99

(1) – área de drenagem do rio Betim é na confluência com o córrego Morro Redondo

No que diz respeito ao cálculo das vazões de estiagem de 2017, a serem utilizadas para calibração do modelo hidrodinâmico e de qualidade da água, foi utilizada a mesma metodologia apresentada anteriormente. Nesse caso, foram somadas às vazões naturais na foz, as vazões de esgoto referente ao ano de 2017 da bacia de montante

O cálculo das vazões de esgoto e de estiagem no rio Betim e nos córregos Água Suja, Morro Redondo e Bela Vista, tanto na foz como nos seus afluentes e bacias incrementais são apresentados detalhadamente no item 4 deste relatório. As vazões de referência para a estiagem, na foz desses rios, são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 - Vazões de estiagem na foz (2017).

Rio	Área de Drenagem foz (km ²)	Vazão natural na Foz (L/s)	Vazão esgoto (2017) (L/s)	Vazão total de estiagem na foz (2017) (L/s)
Betim ¹	33,70	74,98	41,46	116,4
Morro redondo	28,70	59,1	7,6	66,7
Água Suja	30,20	85,4	38,6	124,0
Bela Vista	10,30	5,5	7,0	12,5

(1) – área de drenagem do rio Betim é na confluência com o córrego Morro Redondo

3.6 O Modelo Matemático

A variação do volume d'água em uma célula i , em um intervalo de tempo t , é dada pelo balanço de massa nesta célula. Assim, em termos diferenciais, tem-se a equação da continuidade representada pela equação (1).

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

Sendo:

- $Q_{i,k}$ - vazão entre as células i e k , vizinhas entre si;
- Z_i - cota do nível d'água no centro da célula i ;
- A_{s_i} - área superficial do espelho d'água na célula i ;
- P_i - vazão relativa à parcela de chuva ocorrida sobre a célula i e disponível para escoamento;
- t - variável independente relativa ao tempo.

As ligações típicas de escoamento entre células, que podem ser escritas em função de leis hidráulicas, são listadas a seguir:

- ✓ **ligação tipo rio**, para escoamento à superfície livre, considerando a equação dinâmica de Saint Venant, incluindo seus termos de inércia;
- ✓ **ligação tipo planície**, para escoamento à superfície livre, considerando a equação dinâmica de Saint Venant, sem os termos de inércia;
- ✓ **ligação tipo vertedouro** de soleira espessa, considerando a equação clássica, para escoamento livre ou afogado;
- ✓ **ligação tipo orifício**, também clássica;
- ✓ **ligação tipo galeria**, com escoamento à superfície livre ou sob pressão;
- ✓ **ligação tipo curva cota x descarga**, que pode representar estruturas especiais calibradas em laboratório físico (modelos reduzidos), ou curvas-chave conhecidas;
- ✓ **ligação tipo descarga de galeria em rio**, funcionando como vertedouro, livre ou afogado, ou orifício, para galerias que chegam a um rio em cota superior ao fundo deste, por uma das margens;
- ✓ **ligação tipo microdrenagem**, como interface das células superficiais com as células de galeria;
- ✓ **ligação tipo bombeamento**, com descarga de uma célula para outra a partir de uma cota de partida;
- ✓ **ligação tipo comporta flap**, funcionando como este tipo de comporta de sentido único de escoamento.

3.7 O Modelo Numérico

A formulação numérica do modelo proposto inicia-se com o processo de discretização da equação diferencial que, originalmente contínua, passa a ser considerada em termos de incrementos finitos. A discretização temporal da equação diferencial representativa da conservação da massa é feita procurando-se linearizar numericamente todos os termos que apresentam não-linearidades, para que não haja a necessidade de um procedimento iterativo de solução, a fim de simplificar o modelo numérico.

O esquema utilizado para marcha no tempo é o totalmente implícito. Para economia de tempo de cálculo e maior rapidez em determinadas aplicações, foi desenvolvida e também implementada uma versão explícita do modelo numérico, a qual, entretanto, está sujeita a restrições de estabilidade numérica nos incrementos da malha de discretização, o que não ocorre com a formulação implícita. O sistema resultante possui uma matriz de coeficientes esparsa, com muitos elementos iguais a zero. A solução deste sistema, por métodos convencionais de solução de matrizes, que trabalham com a matriz cheia, envolve uma série de operações desnecessárias com valores nulos, o que, na prática, significa desperdício de tempo.

Com base na esparsidade da matriz de coeficientes, utiliza-se um método de solução de sistemas do tipo dupla varredura, sobre o modelo topológico de células. O procedimento básico, ponto de partida do método de dupla varredura, consiste em se arranjar topologicamente as células que formam o modelo em uma certa quantidade de grupos numerados, a partir de jusante, de tal forma que, cada célula de um grupo j , central, esteja ligada apenas a células deste mesmo grupo, a células do grupo anterior $j-1$ ou a células do grupo posterior $j+1$, conforme pode ser visto na Figura 13. A primeira varredura, de jusante para montante, tem o objetivo de agrupar o sistema em sub-matrizes; a segunda varredura, de montante para jusante, vai resolvendo os subsistemas resultantes do agrupamento da primeira varredura.

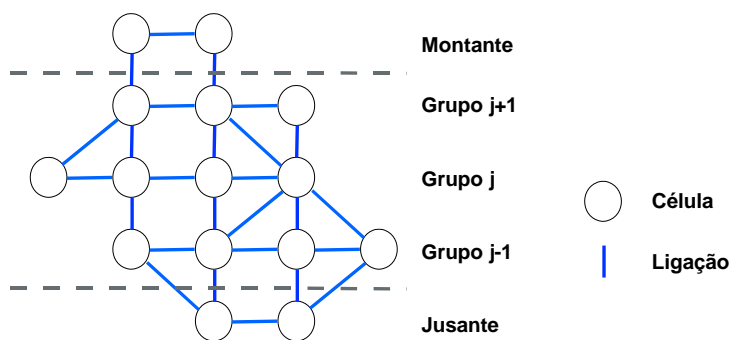


Figura 13 – Matriz topológica, com definição de grupos.

3.8 Modelagem da bacia de Vargem das Flores

A divisão da bacia em células foi realizada a partir da análise do modelo digital de terreno (MDT) existente para a região, assim como da avaliação do uso e ocupação do solo, tanto na situação existente, quanto nas situações planejadas, de forma a melhor representar a transformação da chuva em vazão em cada unidade do modelo. A bacia foi subdividida em 503 células para modelagem hidrológico-hidrodinâmica, como pode ser visto na Figura 14. Com a base de células já dividida, são definidas as relações hidráulicas entre células, que irão simular o escoamento resultante da chuva ao longo da bacia hidrográfica, até alcançar o reservatório.

As chuvas de entrada foram definidas a partir da série histórica de precipitações registrada na bacia do reservatório Vargem das Flores. Os resultados de níveis d'água no reservatório foram confrontados com os níveis medidos ao longo do tempo, de forma a permitir a calibração do modelo. Esse processo de calibração considera as chuvas e os níveis registrados, a tomada d'água no lago do reservatório e as vazões vertidas, retiradas da equação de projeto do vertedor.

Posteriormente, foram realizadas as simulações dos cenários passado, atual e futuros para obtenção das vazões líquidas que servem de subsídio para as estimativas de qualidade da água. Foram realizados quatro cenários de uso e ocupação do solo, compreendidos por:

MHd1 - Cenário Passado – Uso e ocupação do solo passado;

MHd2 - Cenário Atual (Calibração/Validação) – Uso e ocupação do solo atual;

MHd3 - Cenário Futuro Macrozoneamento da RMBH – Uso e ocupação do solo segundo o Macrozoneamento do Plano Metropolitano da Região Metropolitana de Belo Horizonte;

MHd4 - Cenário Futuro Plano Municipal de Contagem – Uso e ocupação do solo segundo zoneamento do Plano Diretor da Prefeitura Municipal de Contagem.

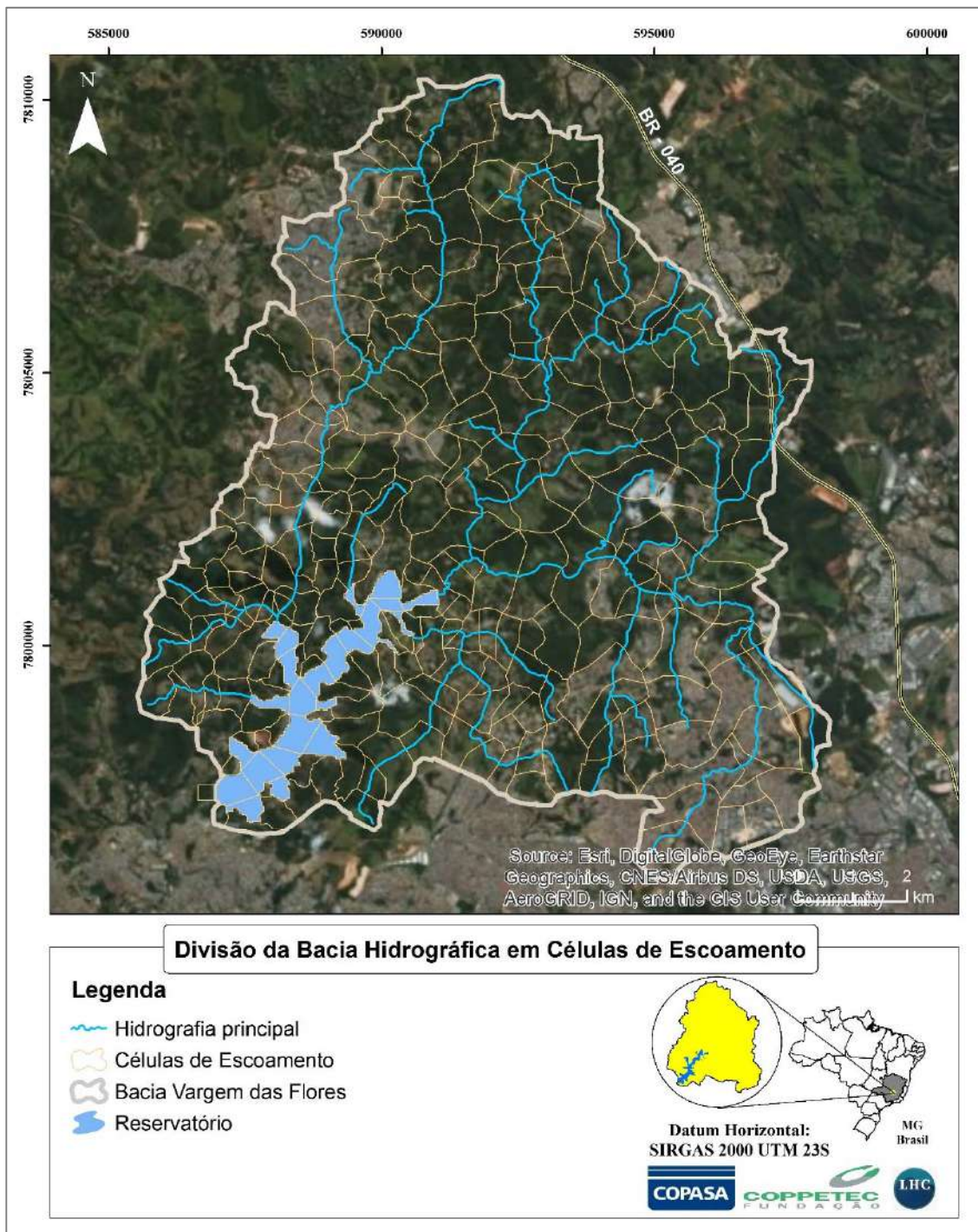


Figura 14 – Divisão da bacia do reservatório Vargem das Flores em células de escoamento, para modelagem hidrológico-hidrodinâmica.

3.9 Calibração e Validação

Dentro do processo de modelagem, a calibração e a validação são duas etapas fundamentais, que devem preceder a utilização do modelo hidrodinâmico/hidrológico. Para simular adequadamente o comportamento em bacias hidrográficas, é necessário que a calibração e a validação sejam realizadas de maneira satisfatória, especialmente para melhorar a consistência do modelo em seu uso para previsões e para reduzir a incerteza dos parâmetros.

A seguir, serão apresentadas as etapas desenvolvidas para calibração e validação do modelo.

3.9.1 Dados para Calibração e Validação

O processo de calibração e validação começa com o levantamento e incorporação de dados de entrada no modelo matemático, divididos para o trabalho em questão em: medições de chuva; condições iniciais de níveis de água; e condições de contorno de entradas e saídas de fluxos. Com essas informações, são realizadas simulações de eventos específicos de interesse. Após a incorporação dos dados de entrada, o modelo matemático irá gerar dados de saída, calculados a partir do comportamento hidrológico e hidrodinâmico da bacia hidrográfica.

Os dados de saída para a calibração e validação do modelo da bacia de Vargem das Flores são as variações no seu reservatório, que comparadas com medições locais, serviram de conferência para os resultados do modelo matemático. As medições de chuva utilizadas como dados de entrada no modelo foram obtidas da Estação Pluviométrica **Betim - Várzea das Flores (CHAVE_ESTACAO_QUANT: 3054)**, contida na bacia hidrográfica de Vargem das Flores. Foram disponibilizados dados de precipitação diária, medidos em milímetros de chuva entre o período de 01/01/2000 e 28/02/2018. A Figura 15 apresenta a variação pluviométrica no período disponibilizado.

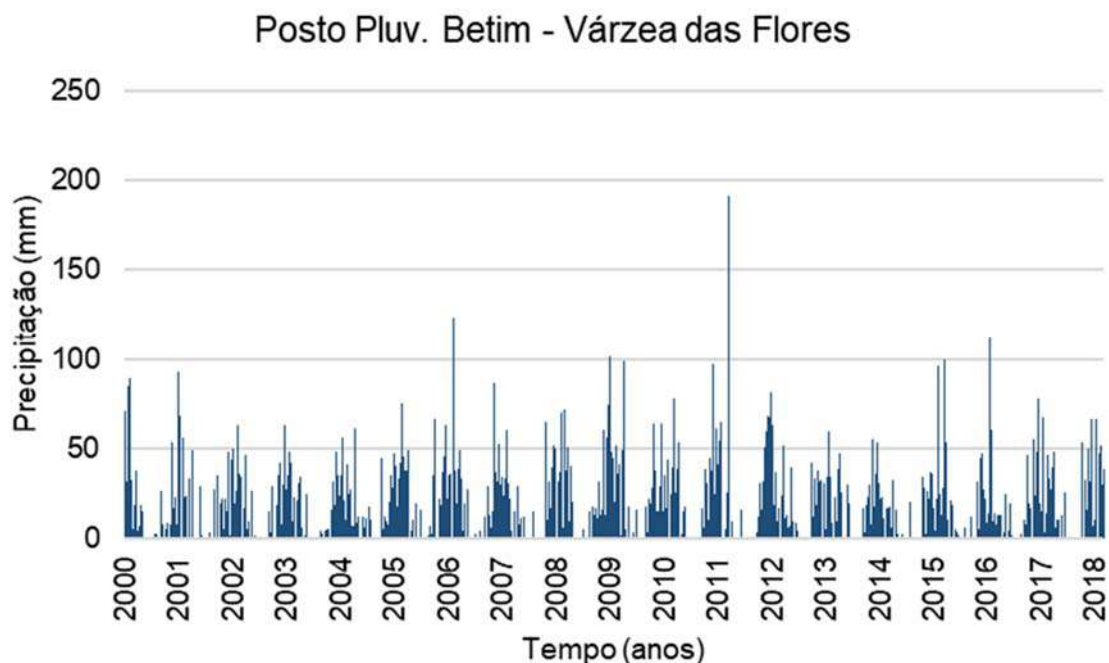


Figura 15 – Precipitação diária medida no posto pluviométrico Betim – Várzea das Flores

Como condição de contorno a jusante da bacia, foram utilizados os dados de vazão captada para abastecimento, disponibilizados pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA). Os dados de captação, apresentados na Figura 16, englobam completamente os anos de 2011 a 2017 e parte de 2018.

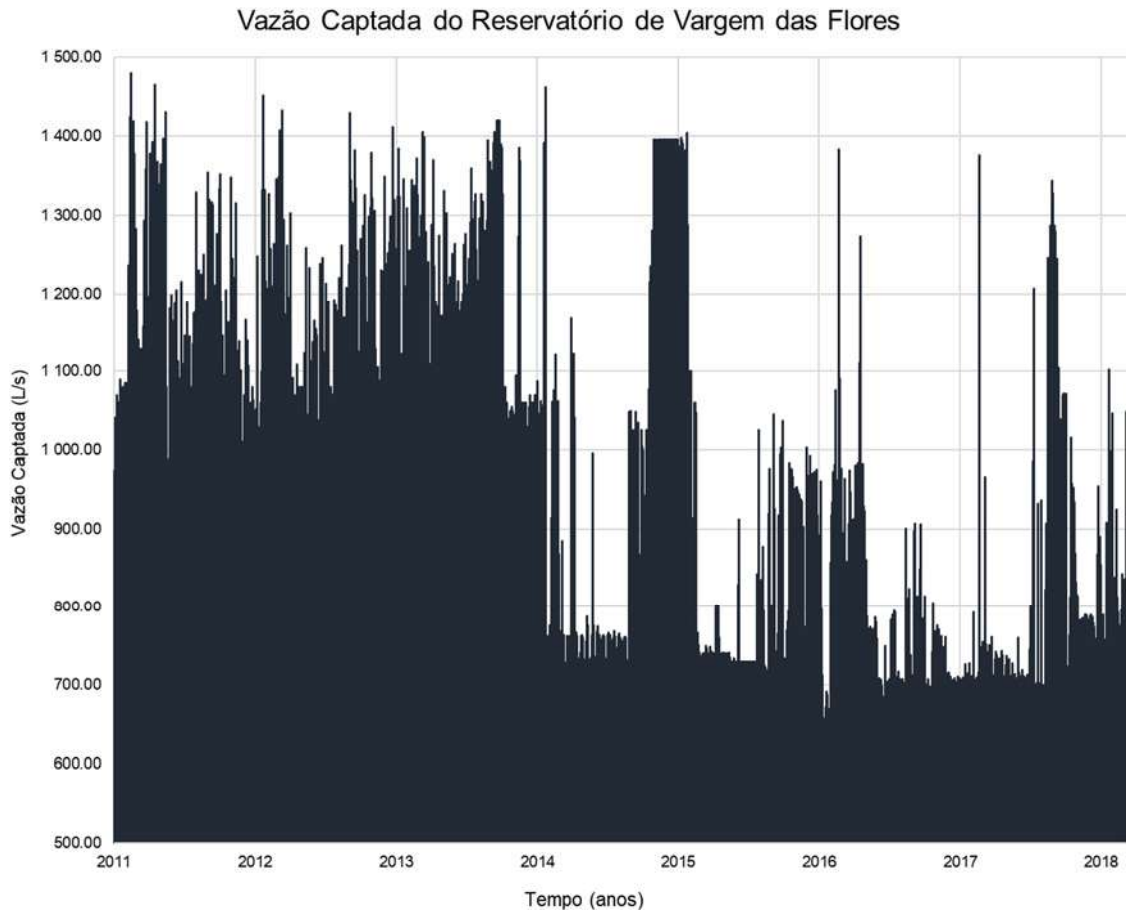


Figura 16 – Vazão captada (L/s) do reservatório de Vargem das Flores do período de jan/2011 à mar/2018. (Fonte: COPASA).

As vazões naturais, dos cursos d'água que afluem ao reservatório foram consideradas como condições de contorno a montante do modelo matemático. As vazões foram calculadas a partir de registros de estações fluviométricas no interior da bacia hidrográfica do reservatório. Foram também considerados como condição de contorno os possíveis aportes diretos de esgoto ao reservatório.

Em relação às variações de nível, utilizadas para comparação dos dados simulados, e essenciais para a calibração e validação do modelo matemático, foram utilizados os registros de flutuação do nível de água no reservatório, disponibilizados pela COPASA. As medições da variação de nível de água no reservatório de Vargem das Flores podem ser apreciadas na Figura 17. É importante ressaltar que tal variação de nível registrada também foi utilizada para determinar os níveis iniciais do reservatório a serem informados como condição de partida do modelo matemático em cada período de simulação, que correspondeu a um ano do calendário.

Foi observado que o período compreendido entre 2011 e 2017 possui todos os dados necessários para realização das simulações matemáticas; dessa forma, foram realizadas simulações anuais nestes períodos para verificar a consistência do modelo. O comportamento hidrológico de 2011, representativo do padrão da bacia com viés mais úmido, e o comportamento hidrológico de 2014, representativo de um ano com severa seca, foram tomados como eventos de calibração e os anos restantes (2012, 2013, 2015, 2016 e 2017) como eventos de validação, de forma a verificar se as premissas definidas para a representação de 2011 e 2014 seriam válidas também nos demais anos. Foram realizadas, portanto, 7 simulações com duração de um ano.



Figura 17 – Medição de variação de Nível no Reservatório de Vargem das Flores. (Fonte: COPASA).

3.9.2 Parâmetros de Calibração e Validação

Neste item, serão apresentados os parâmetros de entrada do modelo hidrológico/hidrodinâmico que permitem o ajuste dos dados simulados em relação aos dados registrados. Serão apresentadas: (i) as considerações realizadas para classificação do uso do solo e a subsequente escolha dos coeficientes de escoamento superficial (*runoff*) adotados para a bacia hidrográfica; (ii) o modelo de abstração inicial de chuva, necessário para bem representar o comportamento hidrológico nos períodos de simulação; e (iii) a definição das vazões de base dos cursos d'água, a partir da vazão de referência estabelecida no item 3.5 (pág. 22).

A classificação do uso do solo para os cenários de calibração e validação levou em consideração o uso do solo da bacia em questão disponibilizado no trabalho de Matos *et al.* (2017) para o ano de 2016. Para cada classificação do uso do solo, foi definido um valor de coeficiente de *runoff*, indicando para cada caso a porcentagem da chuva efetiva que se torna escoamento superficial. Os valores adotados para a bacia podem ser vistos na Tabela 9.

O uso do MODCEL necessita de uma interpretação do uso do solo e da definição do coeficiente de *runoff* associado a este uso. Dessa forma, as células de escoamento foram ponderadas segundo os usos que possuíssem.

Tabela 9 – Valores de coeficientes de *runoff* adotados para a bacia.

Uso do Solo	Coeficiente de <i>runoff</i>
Afloramento Rochoso	1,00
Corpos Hídricos	1,00
Mancha Urbana	0,60
Solo Exposto	0,40
Usos Agropastoris	0,30
Vegetação Densa	0,10
Vegetação Esparsa	0,20

Para a modelagem do reservatório de abstração, foram definidos quatro usos de solo padrão: Corpos Hídricos, Urbanização, Campo/Bosque/Rural e Floresta. Para os quatro usos foram estabelecidos valores de CN correspondentes a 100, 75, 55 e 45 para a condição II de umidade, associada a um valor normal. A Tabela 10 apresenta os valores do CN para as condições de solo seco (I) e de solo úmido (III), de onde foi possível retirar os valores extremos para os 4 tipos de reservatórios de abstração considerados.

Tabela 10 – Ajustamento do Número CN da condição normal II para a condição para a condição para solo seco (I) e para solo úmido (III).

Condição II de umidade do número CN (Normal)	Número CN correspondente para a devida Condição	
	Condição I (Seco)	Condição III (Úmido)
100	100	100
95	87	99
90	78	98
85	70	97
80	63	94
75	57	91
70	51	87
65	45	83
60	40	79
55	35	75
50	31	70
45	27	65
40	23	60
35	19	55
30	15	50
25	12	45
20	9	39
15	7	33
10	4	26
5	2	17
0	0	0

Fonte: McCuen, 1998

A Figura 18 apresenta a classificação das células de escoamento segundo o seu uso do solo predominante.

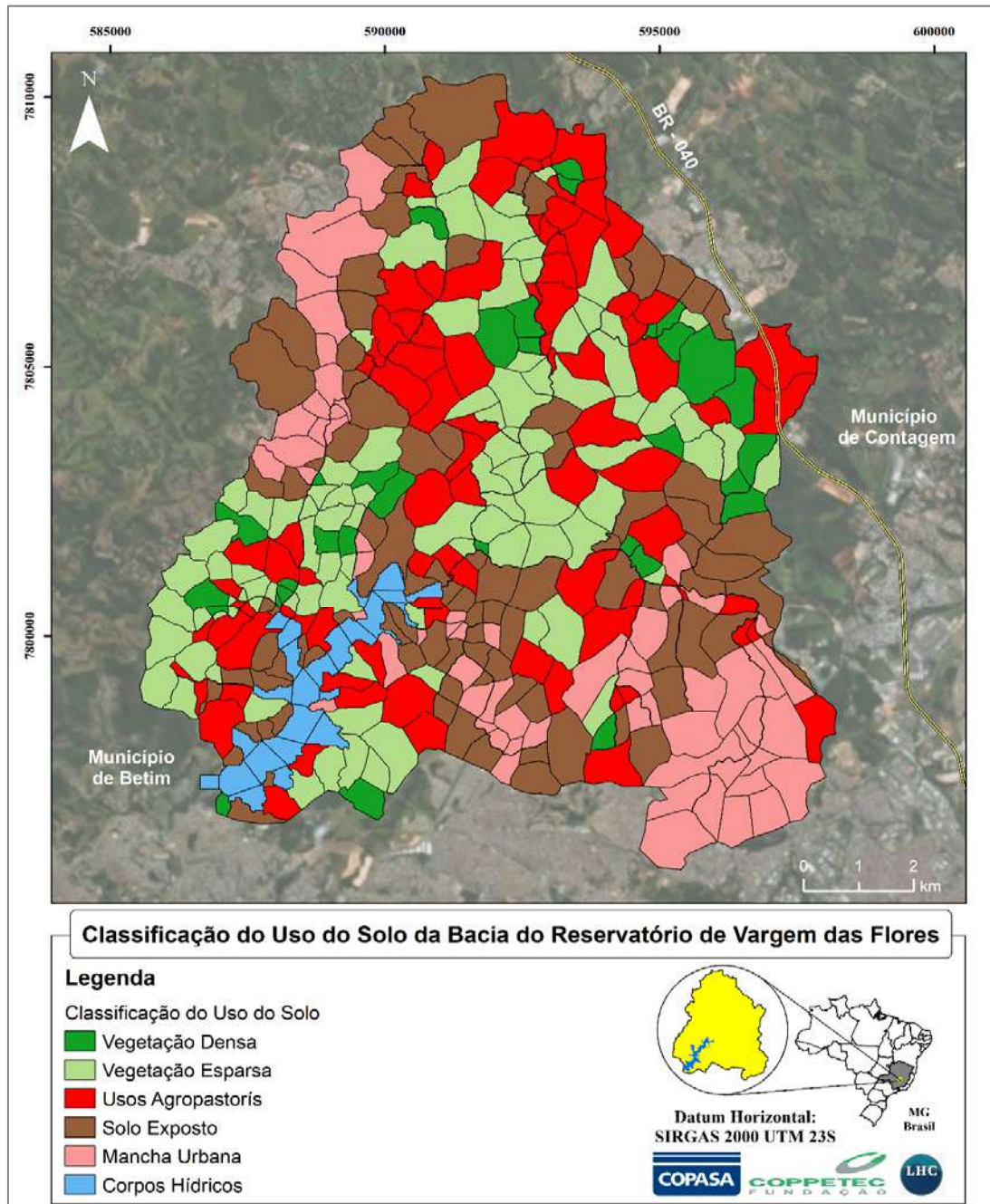


Figura 18 – Classificação das células de escoamento segundo o seu uso do solo predominante.

Após o estabelecimento dos valores máximos e mínimos de CN é necessário encontrar a variação de capacidade de acumulação de água, em milímetros, dos reservatórios de abstração.

A partir da Equação (2), do método do SCS, foi calculado o potencial máximo de retenção (S) até se iniciar o escoamento superficial. Por definição deste método, 20% desse valor corresponde à abstração inicial, tornando-se possível determinar a amplitude de variação da capacidade dos reservatórios de abstração.

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (2)$$

Em relação à recuperação da capacidade de abstração dos reservatórios pelo processo de evaporação, sabendo que a chuva, neste método, foi considerada como capaz de influenciar o processo de abstração somente nos primeiros 5 dias, a recuperação em mm/dia do reservatório foi encontrada dividindo-se a amplitude de variação por 5. Dessa forma, após 5 dias sem chuva, aplicando a recuperação calculada, os reservatórios de abstração voltariam a sua capacidade máxima. A Tabela 11 apresenta as capacidades, amplitudes e recuperações dos 4 modelos de reservatórios de abstração propostos para a bacia de Vargem das Flores.

Tabela 11 - Capacidades, amplitudes e recuperações dos 4 modelos de reservatórios propostos para a bacia de Vargem das Flores

CN	Abstração (mm)		Amplitude (mm)	Recuperação (mm/dia)
	Máxima	Mínima		
45	137.3	27.4	110.0	22.0
55	94.3	16.9	77.4	15.5
75	38.3	5.0	33.3	6.7
100	0	0	0	0

As séries de chuva modificadas por este método, para os anos de 2011 a 2017 são apresentadas na Figura 19, Figura 20 e Figura 21, respectivamente para os reservatórios de abstração de usos de solo padrão: Urbanização, Campo/Bosque/Rural e Floresta. Para Corpos hídricos foi considerado reservatório de abstração nulo, ou seja, não houve modificação na chuva registrada para estes locais.

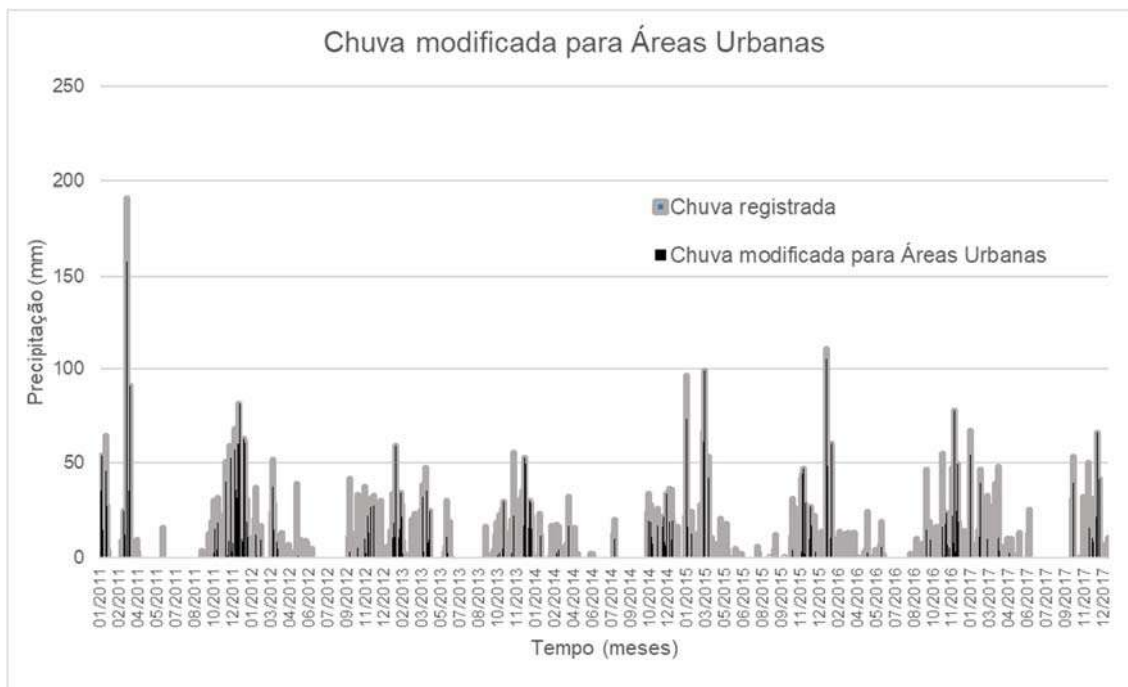


Figura 19 – Chuva modificada a partir dos reservatórios de abstração em áreas urbanas

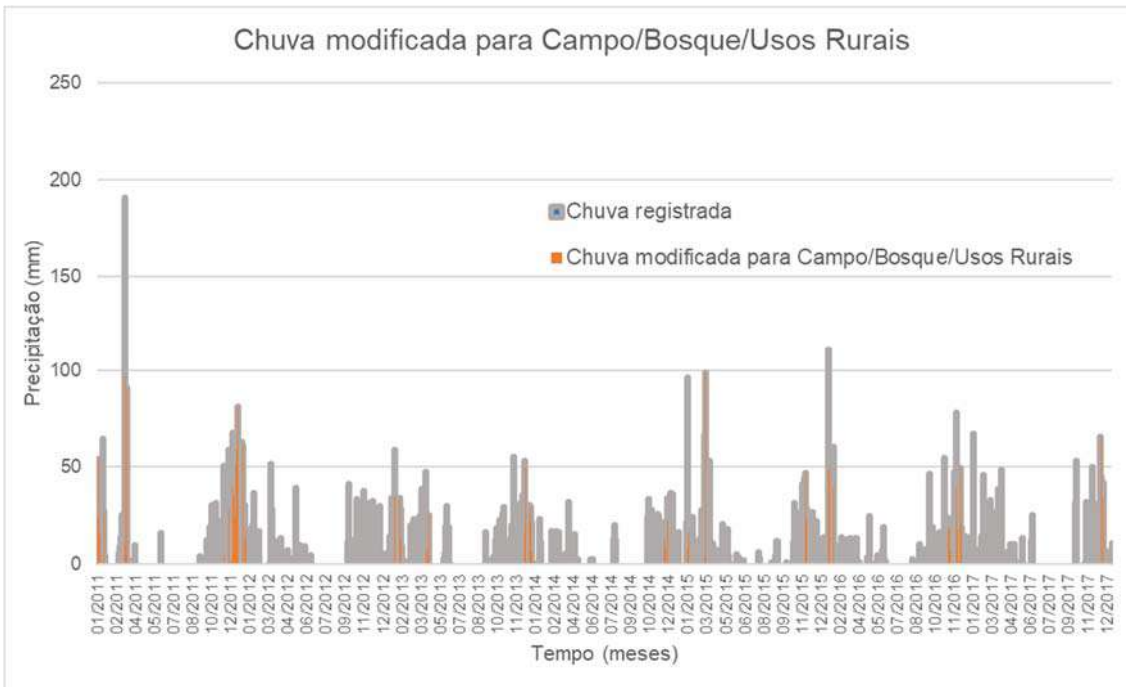


Figura 20 – Chuva modificada a partir dos reservatórios de abstração em Campo/Bosque/Usos Rurais

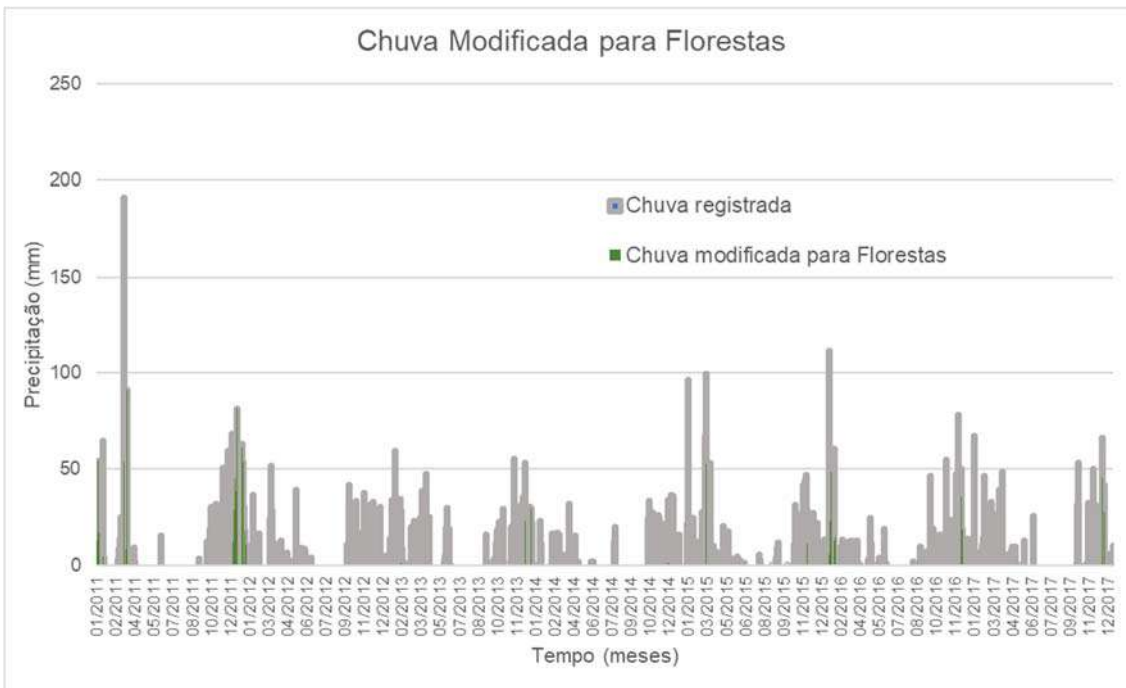


Figura 21 – Chuva modificada a partir dos reservatórios de abstração em Florestas

Além das chuvas, é necessário ao processo de modelagem, o conhecimento das vazões de base afluentes ao reservatório, que influenciam o comportamento de seu enchimento/esvaziamento. A vazão de base utilizada como condição de contorno para o modelo hidrológico/hidrodinâmico foi obtida a partir da vazão de referência, estimada para uma série de dados de estiagem, definida no item 3.5 (pág. 22). Esta vazão foi obtida a partir da vazão média dos postos fluviométricos disponíveis na bacia para o período de julho a setembro, considerado como o período de estiagem na bacia, adicionada de uma vazão das possíveis contribuições de esgotamento sanitário nas redes de drenagem. A vazão foi considerada como vazão de referência para o modelo hidrológico/hidrodinâmico.

Entretanto, a vazão de base não se mantém constante o tempo todo. Pelo contrário, apesar de sua variação ser lenta, ela deve ser diferente entre o período seco e o período úmido de um ano e deve ser diferente entre um ano seco e um ano úmido. Ou seja, esperam-se variações que vão de uma vazão de base na estiagem de um ano seco até a vazão de base na cheia de um ano úmido. Com intuito de variar temporalmente a vazão de base para calibrar o modelo, foram aplicados multiplicadores de correção da vazão de base, seguindo as seguintes hipóteses:

- Tomando o ano de 2011 como um ano hidrológico de referência para períodos de chuva bastante úmido, a vazão de base natural na cheia foi considerada como o triplo da vazão de base natural de referência, enquanto na estiagem a relação foi tomada como igual a 1. Nessa hipótese, excluem-se as vazões de esgoto, que foram depois somadas ao resultado do processo natural.
- Tomando agora 2014 como referência de um ano extremamente seco, a vazão de base natural na cheia foi tomada como a metade da vazão de base natural de referência. Isso significa considerar que o período úmido do ano, por causa de sua baixa intensidade pluviométrica, não teria sido capaz sequer de repor a vazão de referência. Também aqui se excluíram as vazões de esgoto da multiplicação, para depois soma-las com a vazão modificada pelo multiplicador.
- As vazões de base são proporcionais às perdas consideradas no coeficiente de *runoff* (1-C), tomadas, por sua vez, como proporcionais à infiltração. Nota-se que o modelo de abstração já foi aplicado à chuva, antes da consideração do coeficiente de *runoff*, de forma que a interceptação vegetal, as retenções superficiais e a evaporação foram consideradas neste modelo. A evaporação foi o mecanismo considerado na recuperação do volume do reservatório de abstração modelado. Assim, pode-se considerar que (1-C) dá a parcela infiltrada, como parte faltante a considerar no ciclo hidrológico.

As hipóteses da variação da vazão de base, usando a proporcionalidade com os volumes infiltrados e as referências dos anos de 2011 e 2014, permitem a obtenção de multiplicadores que corrigem a vazão de base média encontrada, para os diferentes períodos de análise (esses multiplicadores já foram ponderados, de forma a permitir a multiplicação direta da vazão de referência, incluindo as vazões de esgoto). A

Tabela 12 apresenta os multiplicadores da vazão de base média segundo os critérios adotados. Note-se que a média dos multiplicadores dá um valor de 0,96, bem próximo da unidade, o que garante que a vazão de referência, que representa um valor médio de vários anos, está sendo aproximadamente respeitada na soma dos 6 anos avaliados. Destaca-se ainda, que os valores obtidos para os anos de 2012, 2013, 2015, 2016 e 2017 são dependentes dos valores assumidos para os anos de calibração, de forma a verificar, com as simulações, se essas referências podem ser aceitas.

A Figura 22, por sua vez, apresenta os valores das vazões de base afluentes ao reservatório de Vargem das Flores variando no período de análise. As vazões, por simplicidade, foram sempre consideradas constantes durante seis meses

Tabela 12 – Multiplicadores da Vazão de Base segundo critérios adotados.

Período	Multiplicador da Vazão de Base
2011/01	2.43
2011/02	1.00
2012/01	2.88
2012/02	1.15
2013/01	0.71
2013/02	0.43
2014/01	0.64
2014/02	0.40
2015/01	0.49
2015/02	0.26
2016/01	1.09
2016/02	0.55
2017/01	0.94
2017/02	0.50

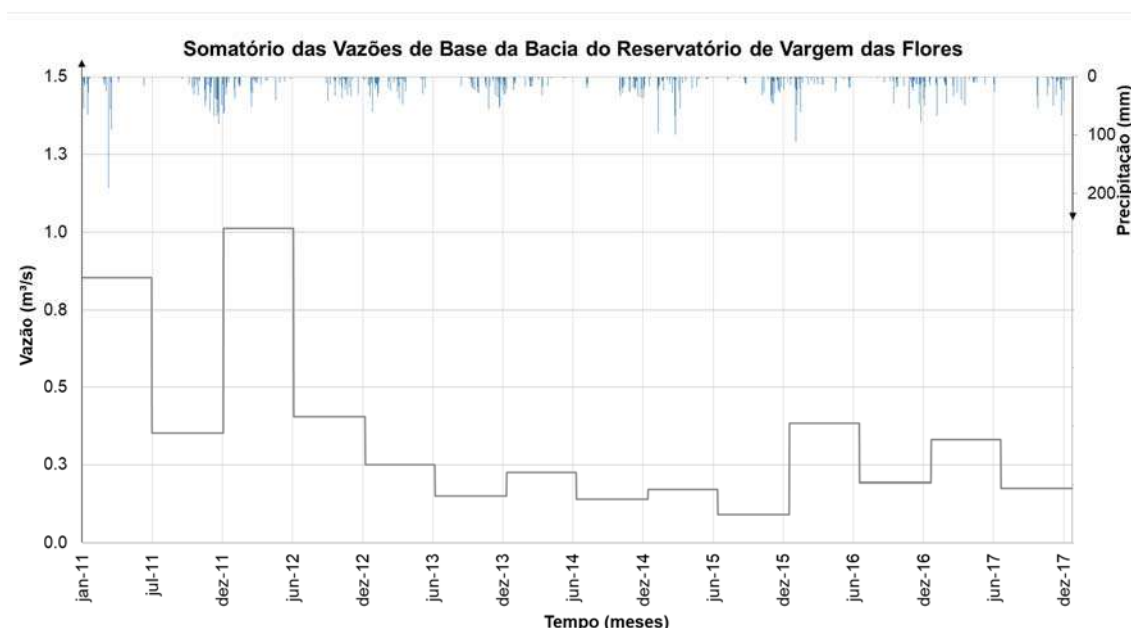


Figura 22 – Vazão de base afluentes ao reservatório de Vargem das Flores.

3.9.3 Resultados do processo de Calibração

A Figura 23 e a Figura 24 apresentam os resultados finais para os eventos de calibração, 2011 e 2014, respectivamente. É possível observar as variações de níveis de água do reservatório para as medições e simulações realizadas, considerando os resultados para ano hidrológico padrão/úmido e para o ano hidrológico muito seco.

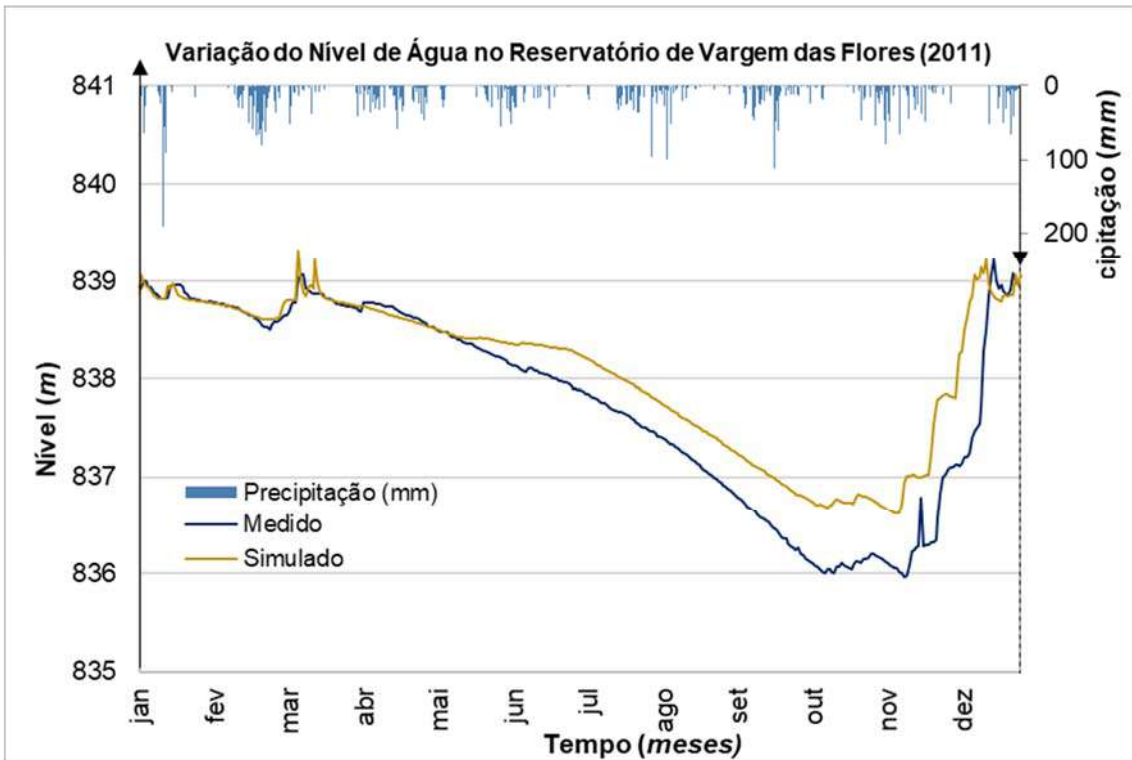


Figura 23 – Resultados da simulação para o evento de calibração de 2011

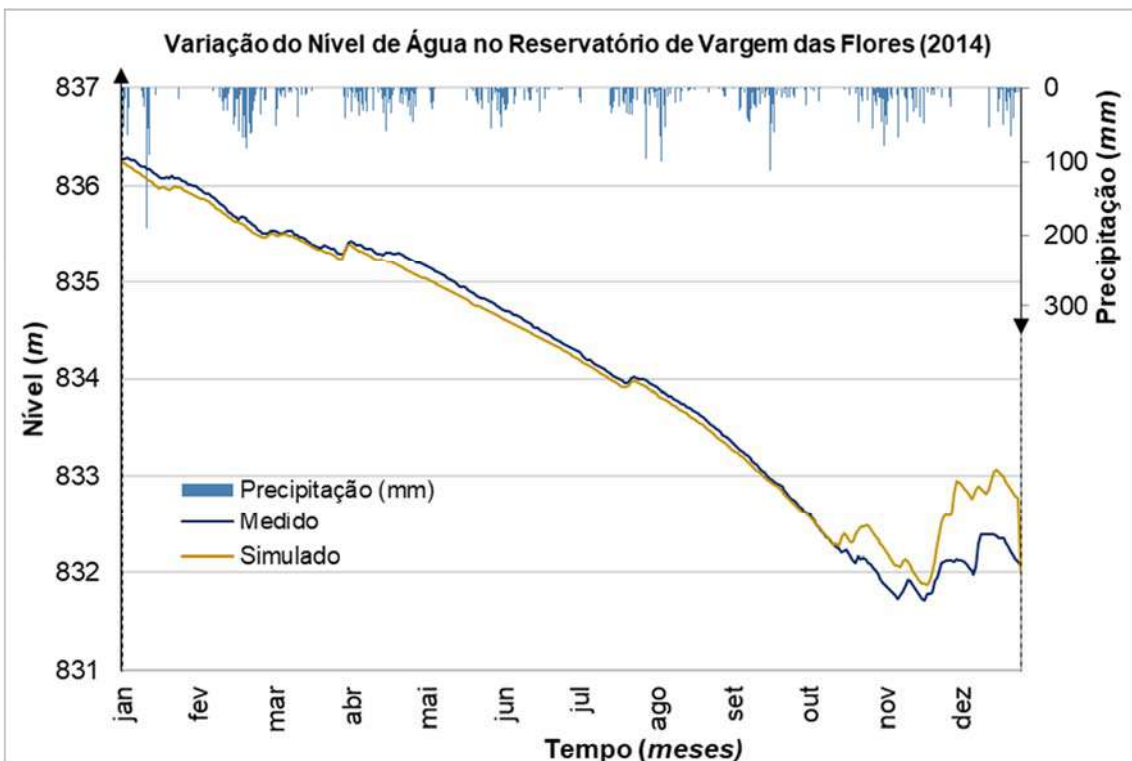


Figura 24 – Resultados da simulação para o evento de calibração de 2014

Tendo sido considerado como adequado o processo de calibração dos anos de 2011 e 2014, procedeu-se a validação para os demais anos da série de dados disponível. Os resultados do processo de validação são apresentados da Figura 25 à Figura 29. A Figura 30 apresenta uma composição dos 7 modelos simulados no processo de calibração e validação de forma a mostrar o comportamento do modelo matemático em todo o período de análise desta etapa. Ressalta-se, porém, que esta imagem é a justaposição de 7 simulações e não uma simulação contínua.

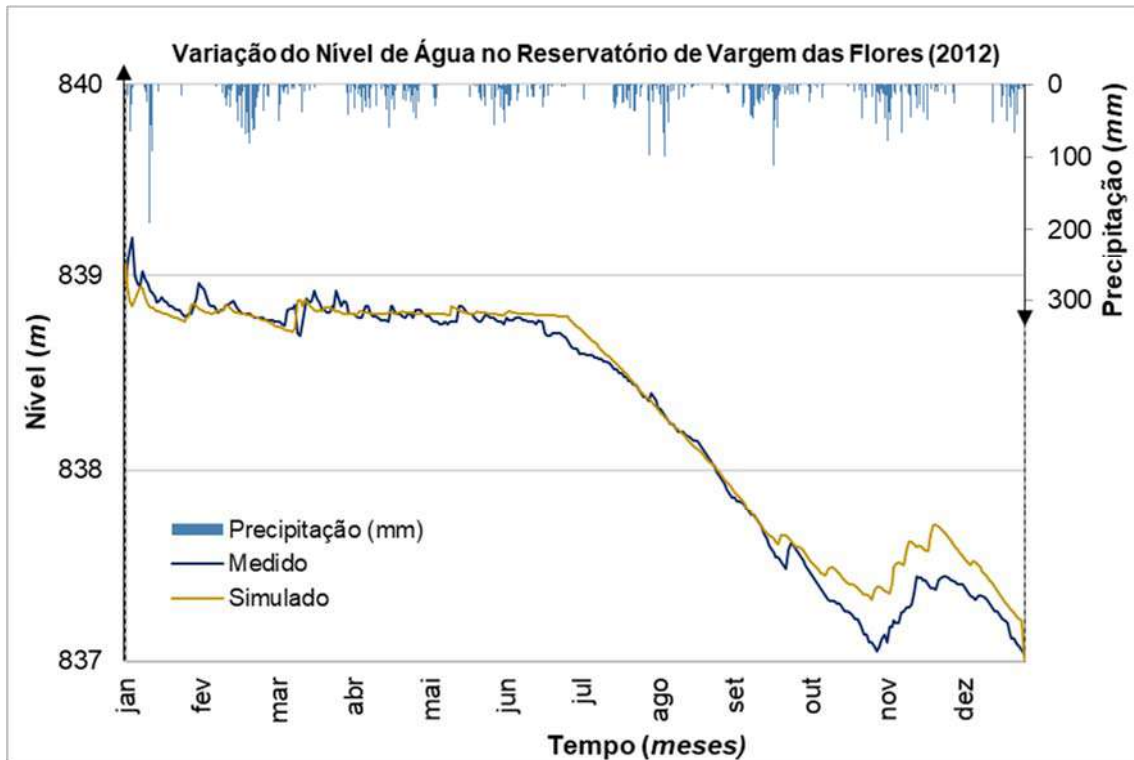


Figura 25 – Resultados da simulação para o evento de validação de 2012

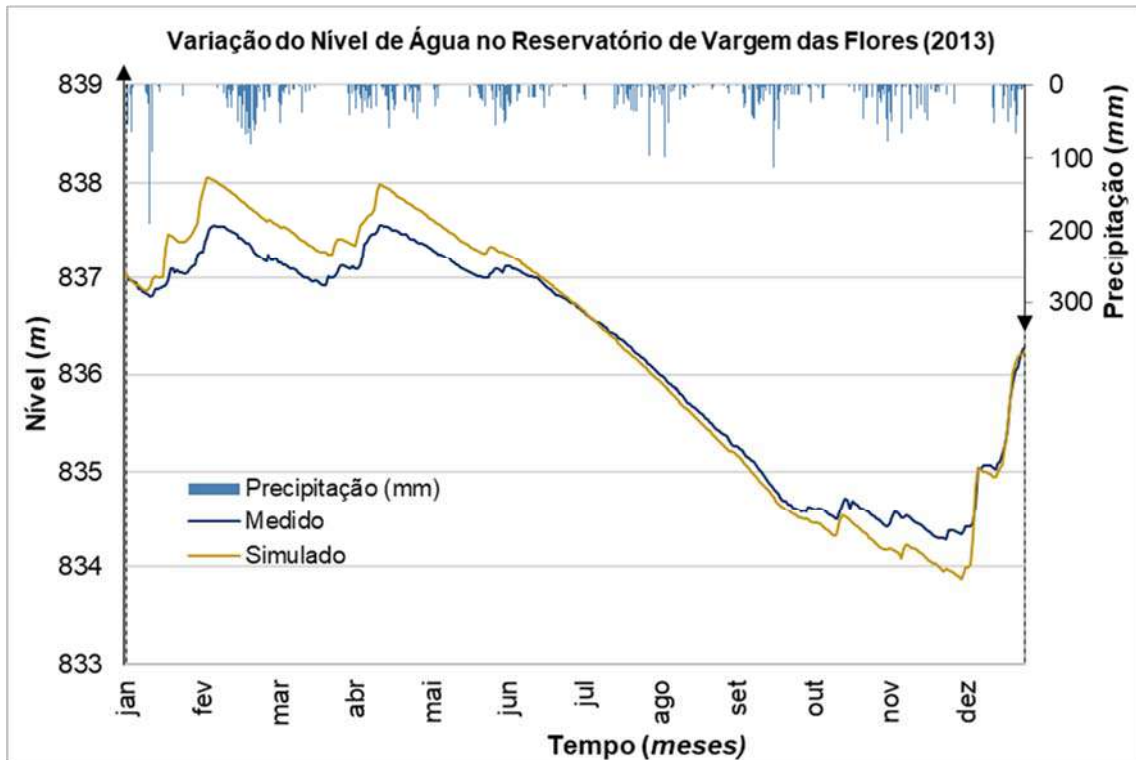


Figura 26 – Resultados da simulação para o evento de validação de 2013

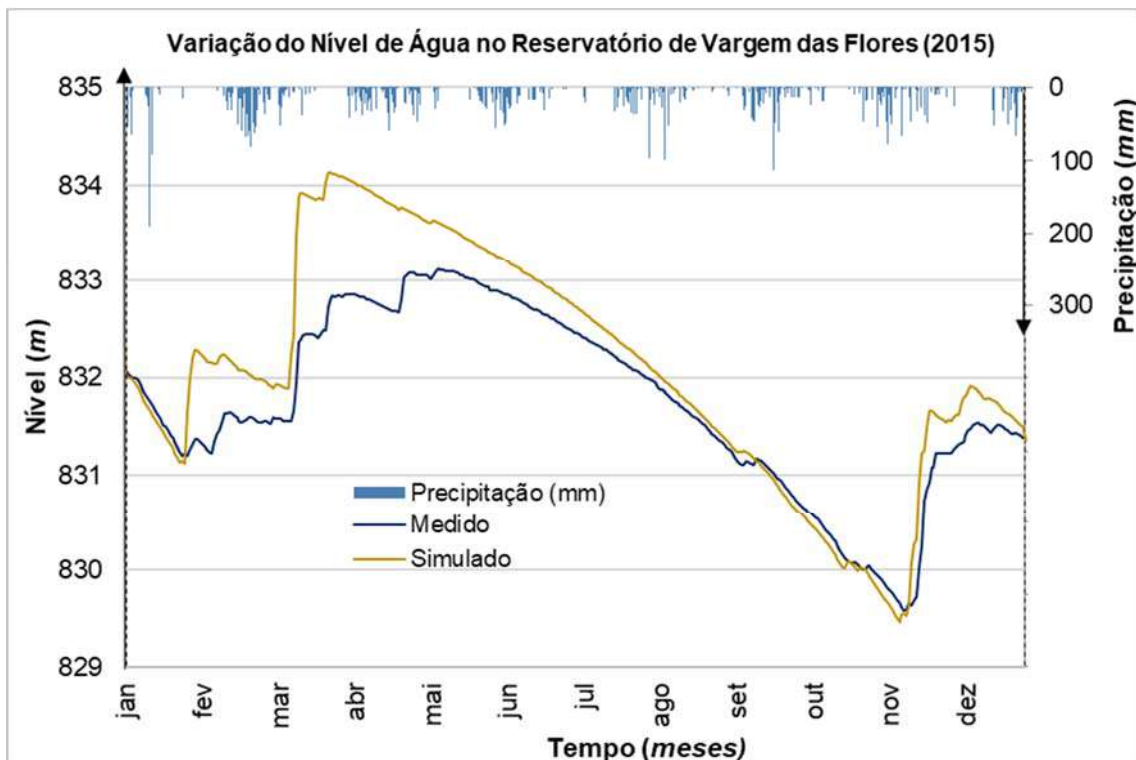


Figura 27 – Resultados da simulação para o evento de validação de 2015

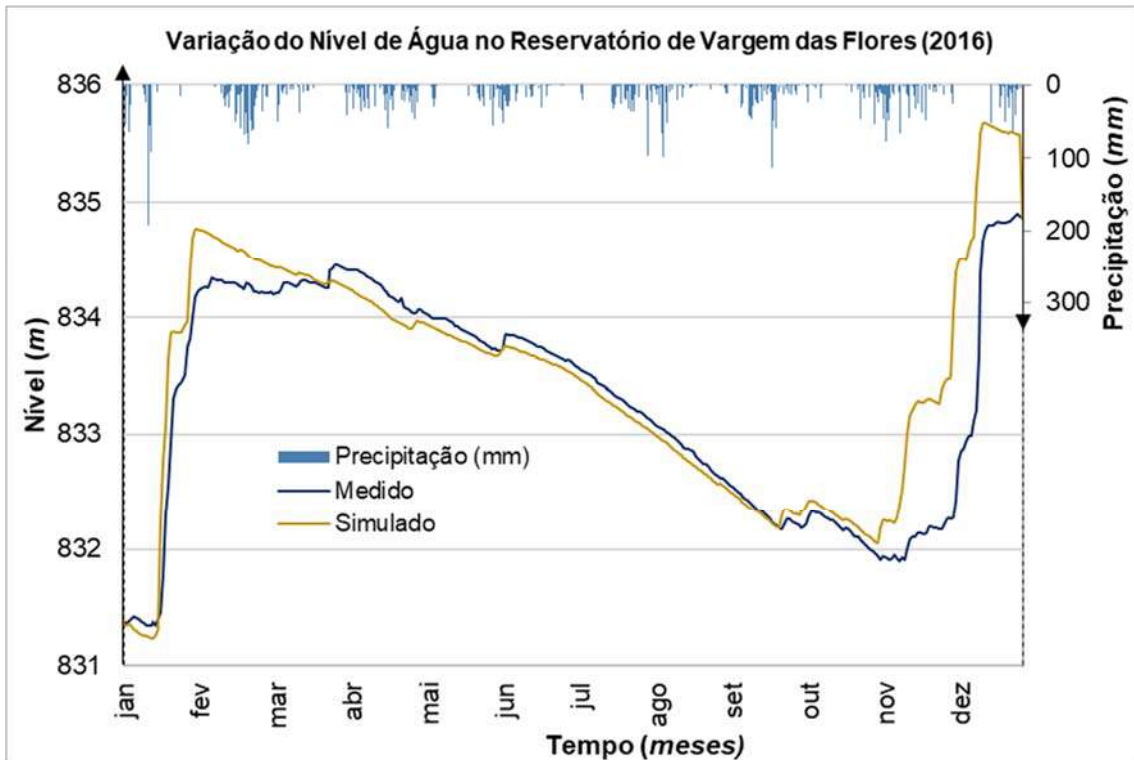


Figura 28 – Resultados da simulação para o evento de validação de 2016

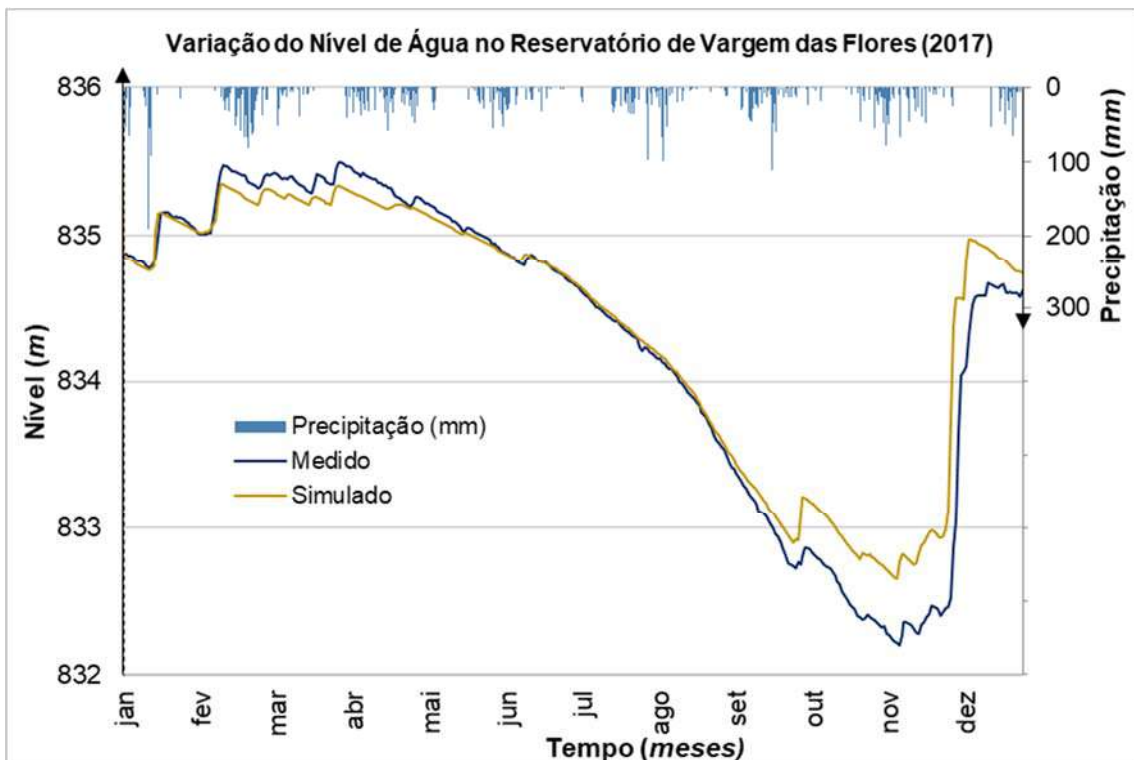


Figura 29 – Resultados da simulação para o evento de validação de 2017

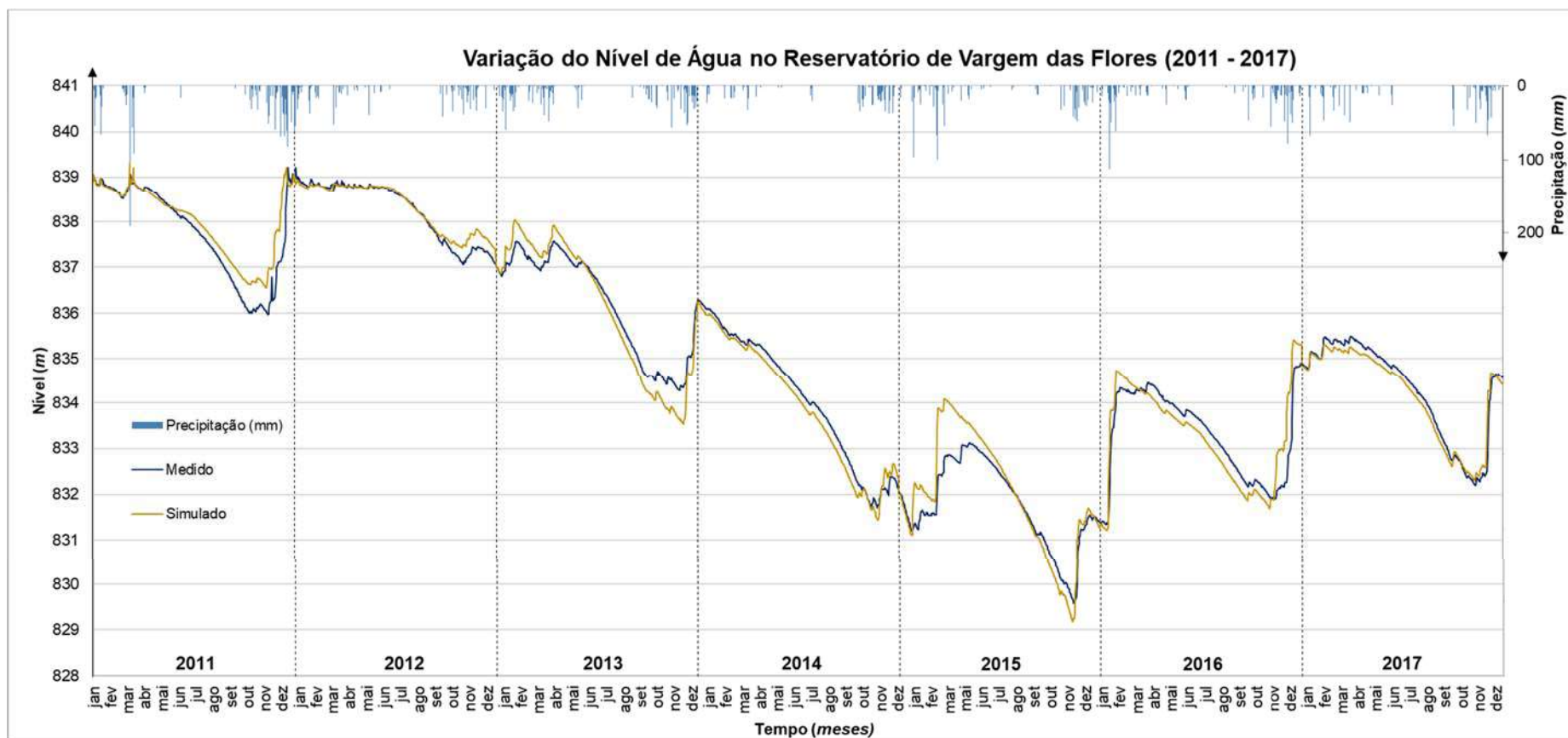


Figura 30 – Resultados do processo de calibração (2011 e 2014) e de validação (2012-2013, 2015-2017) para os eventos hidrológicos de sete anos.

3.10 Cenários de Modelagem – Passado e Futuros

A modificação no uso do solo é a principal mudança nos cenários de modelagem realizados, já que as novas ocupações acarretam em uma série de impactos na bacia do reservatório de Vargem da Flores. A alteração do uso do solo modifica o coeficiente de *runoff*, a distribuição espacial dos reservatórios de abstração (que acompanha o uso do solo, através da modificação do CN) e a vazão de base, atuando tanto na vazão natural, quanto na parcela de esgotos.

Para representar os cenários futuros, os arquivos de entrada do modelo sofreram as modificações apresentadas na Tabela 13. Nessa tabela também são apresentadas as metodologias utilizadas para efetuar as referidas modificações.

Tabela 13 - Principais modificações nos arquivos de entrada do modelo e metodologia para sua determinação para os cenários.

Modificações no modelo	Metodologia
Alteração da distribuição dos reservatórios de abstração	Proporcional à modificação do CN das células para os diferentes cenários
Alteração do coeficiente de <i>runoff</i> , responsável pela determinação do escoamento superficial e pela infiltração, após a abstração	Proporcional à modificação do coeficiente de <i>runoff</i> das células para os diferentes cenários
Modificação na vazão natural afluente ao reservatório	Proporcional ao <i>runoff</i> médio de toda a bacia hidrográfica
Modificação do aporte de esgoto na rede pluvial	Proporcional ao aumento da mancha urbana para cada sub-bacia (mantendo-se o nível de atendimento atual como tendência)

3.10.1 Alteração da distribuição dos reservatórios de abstração

A alteração da distribuição dos reservatórios de abstração foi realizada de maneira proporcional à modificação do uso do solo das células para os diferentes cenários de uso e ocupação. Dessa forma, espera-se que cenários com maior número de células de escoamento com reservatórios de abstração do tipo urbanização gerem maiores escoamentos superficiais. Por outro lado, as vazões de base naturais serão menores e a modificação da vazão de esgoto será proporcional ao aumento da mancha.

A Figura 31, a Figura 32, a Figura 33 e a Figura 34 apresentam a distribuição dos reservatórios de abstração nas células de escoamento para os cenários **Passado** (Cenário 1), **Atual** (Cenário 2), **Futuro Macrozoneamento da RMBH** (Cenário 3) e **Futuro Plano Municipal de Contagem** (Cenário 4) respectivamente.

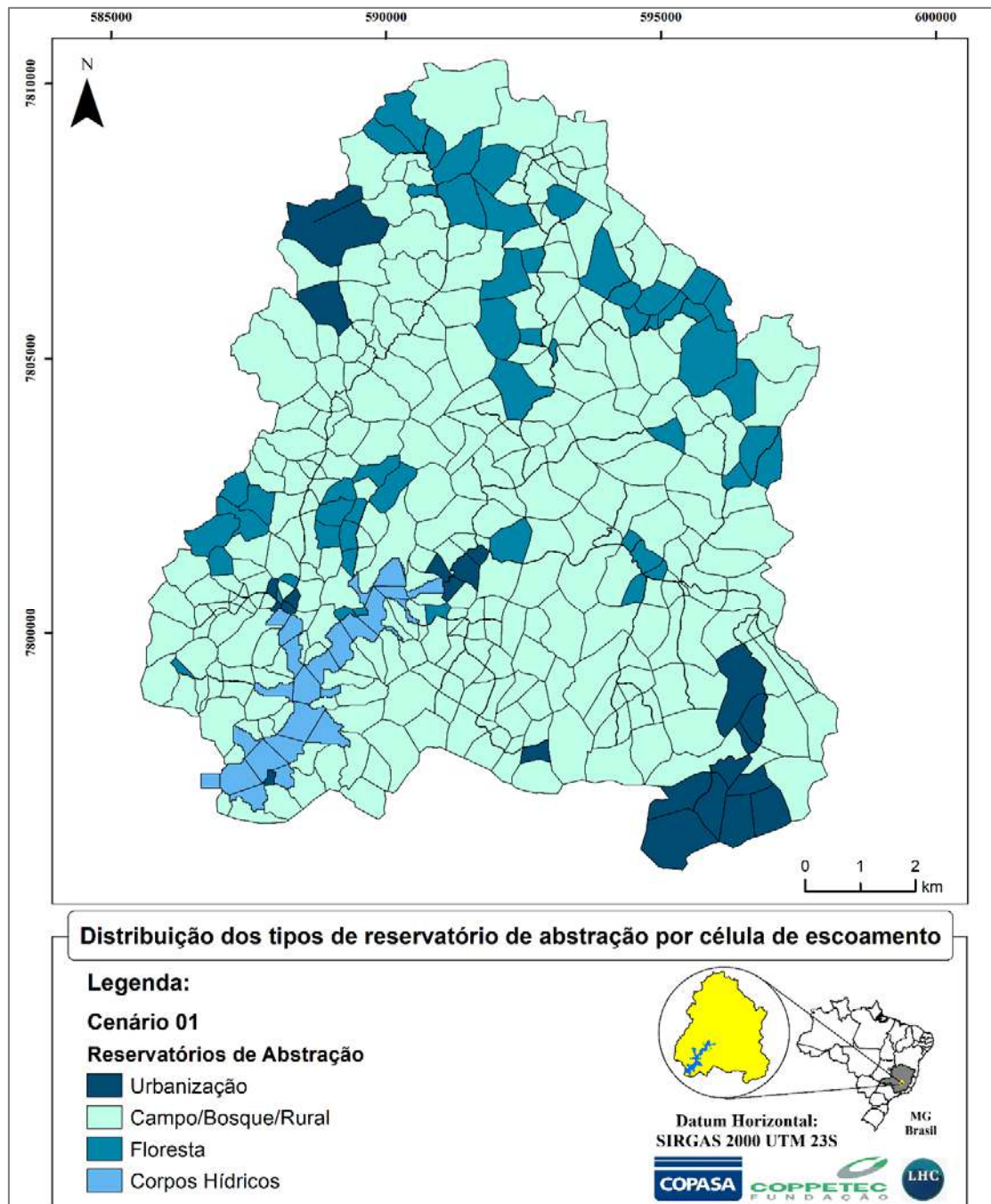


Figura 31 – Distribuição dos reservatórios de abstração nas células para o Cenário Passado.

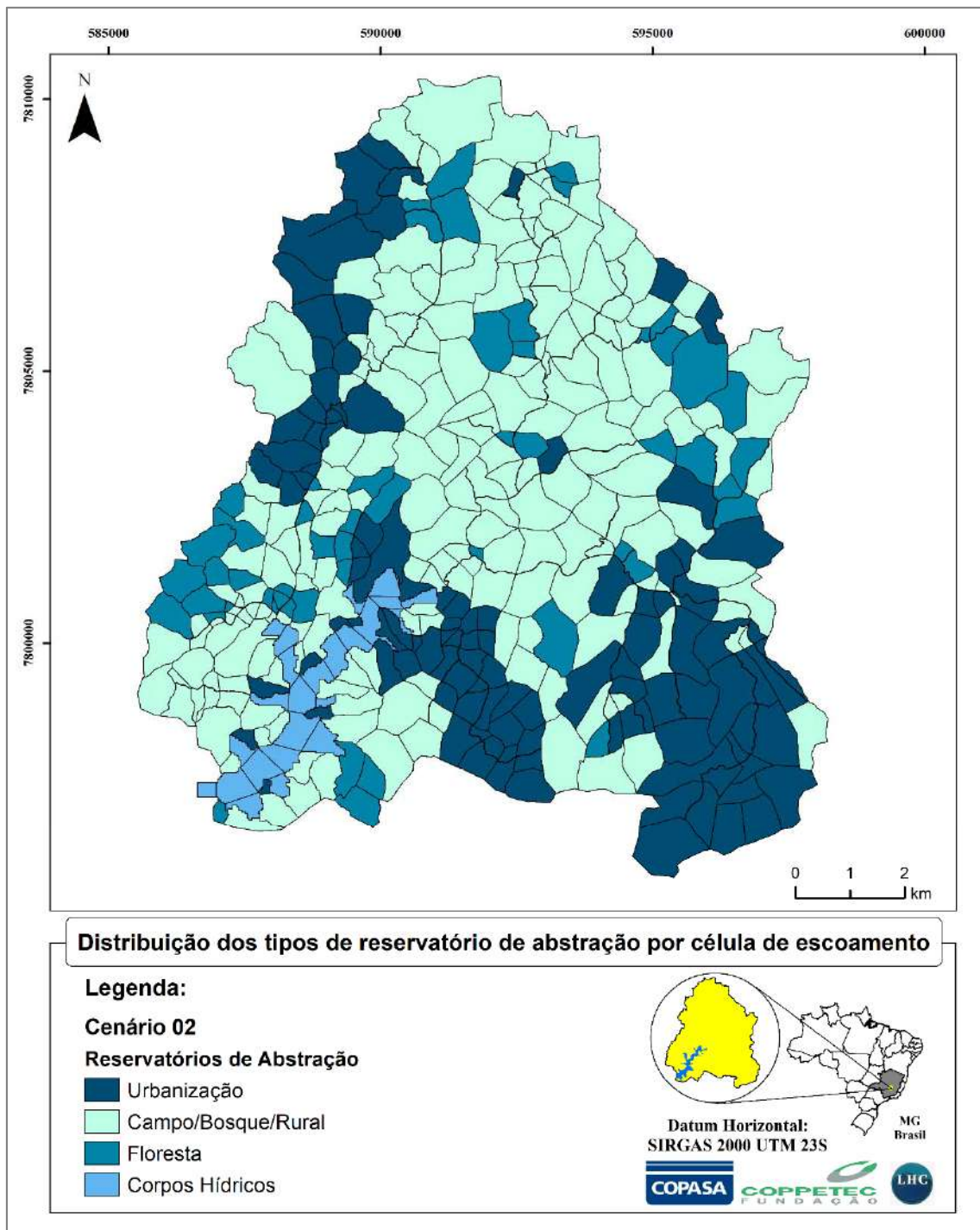


Figura 32 – Distribuição dos reservatórios de abstração nas células de escoamento para o Cenário Atual.

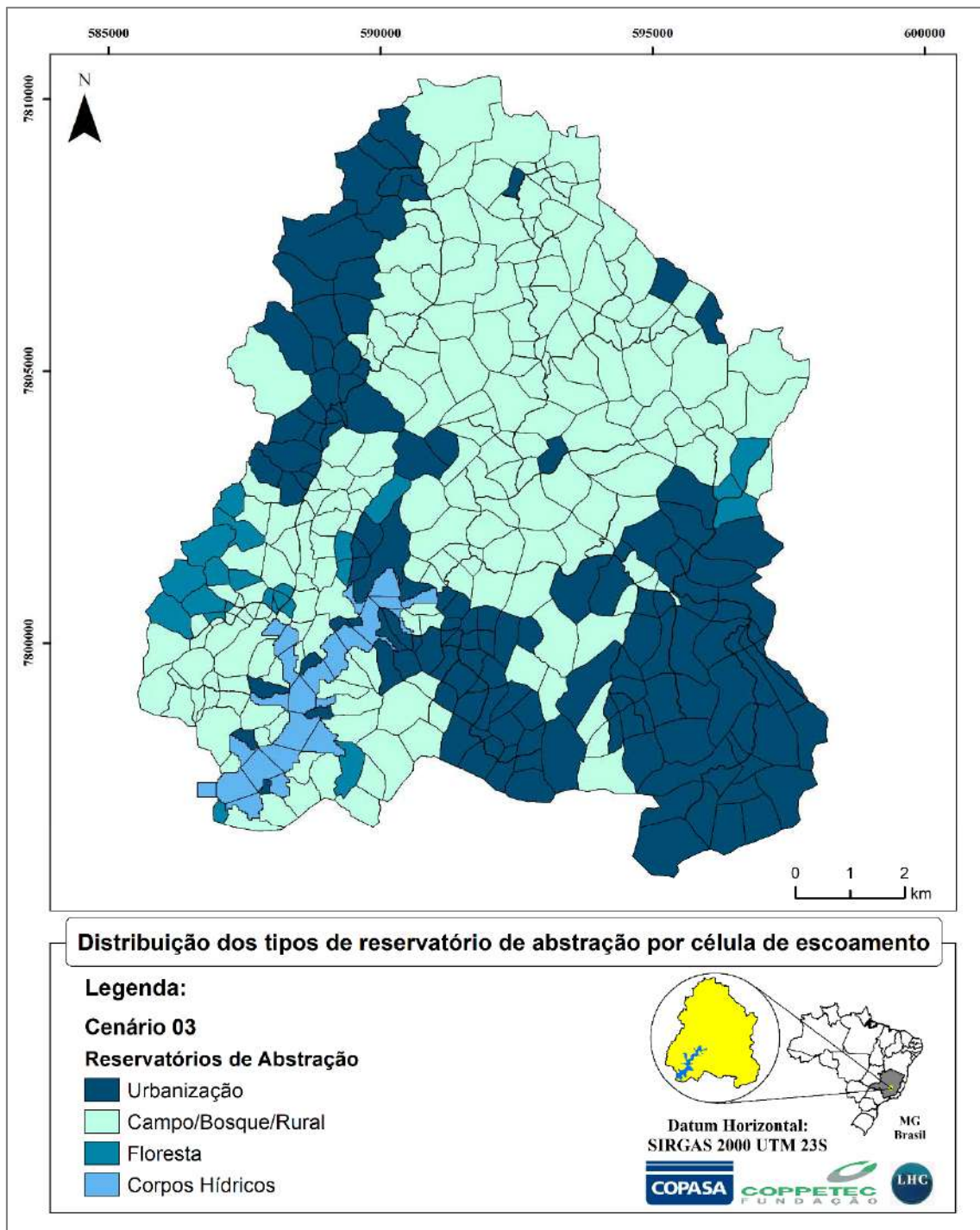


Figura 33 – Distribuição dos reservatórios de abstração nas células de escoamento para o Cenário Futuro Macrozoneamento RMBH.

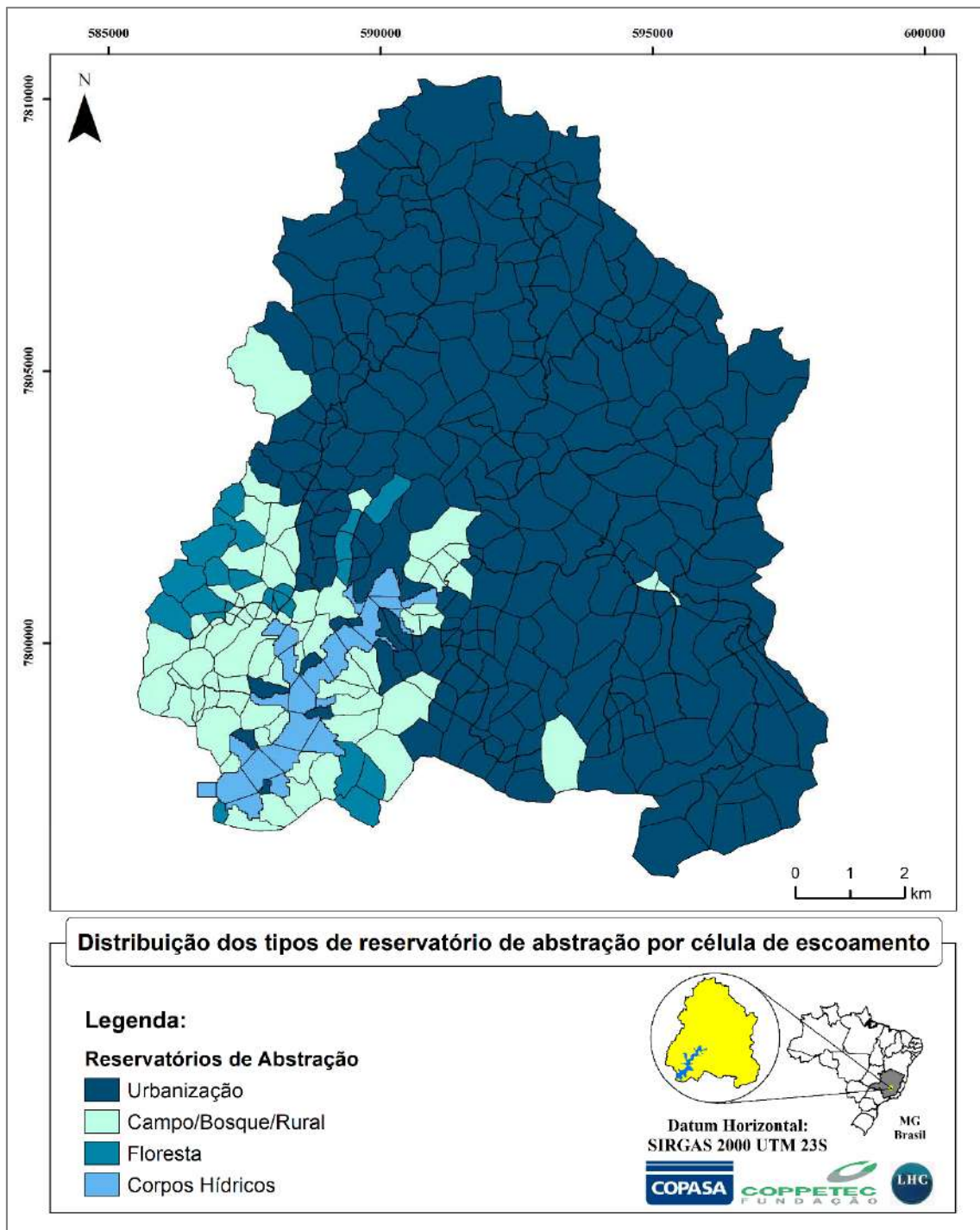


Figura 34 – Distribuição dos reservatórios de abstração nas células de escoamento para o Cenário Futuro Plano Municipal Contagem.

3.10.2 Alteração do coeficiente de *runoff*, responsável pela determinação do escoamento superficial e pela infiltração, após a abstração

Assim como para os reservatórios de abstração, a alteração do coeficiente de *runoff*, responsável pela determinação do escoamento superficial e pela infiltração, também seguiu proporcional à modificação do uso do solo das células para os diferentes cenários. A Figura 35, a Figura 36, a Figura 37 e a Figura 38 apresentam a variação do coeficiente aplicado para as células de escoamento segundo os cenários **Passado** (Cenário 1), **Atual** (Cenário 2), **Futuro Macrozoneamento da RMBH** (Cenário 3) e **Futuro Plano Municipal de Contagem** (Cenário 4) respectivamente.

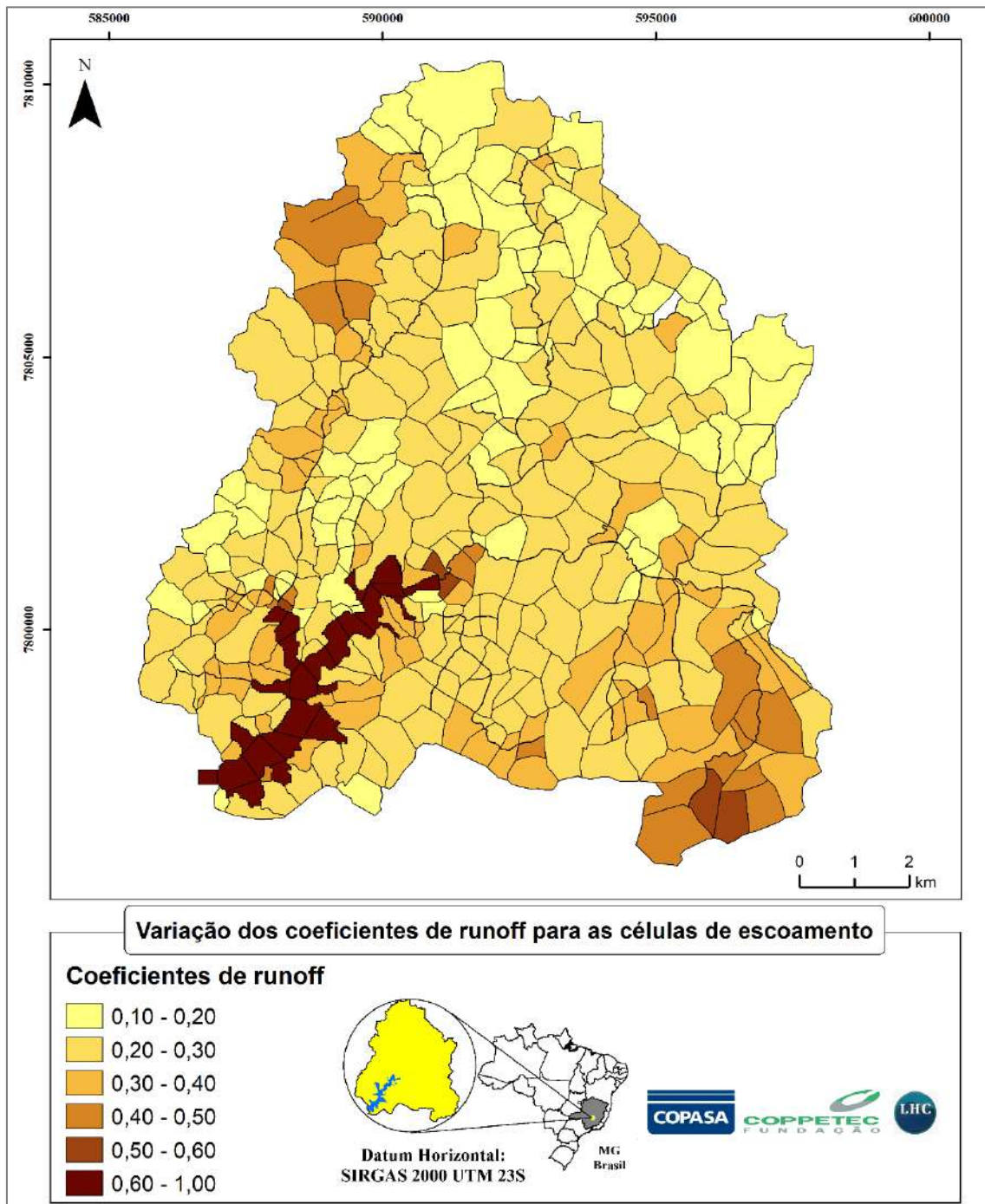


Figura 35 – Variação dos coeficientes de *runoff* para as células de escoamento no Cenário Passado.

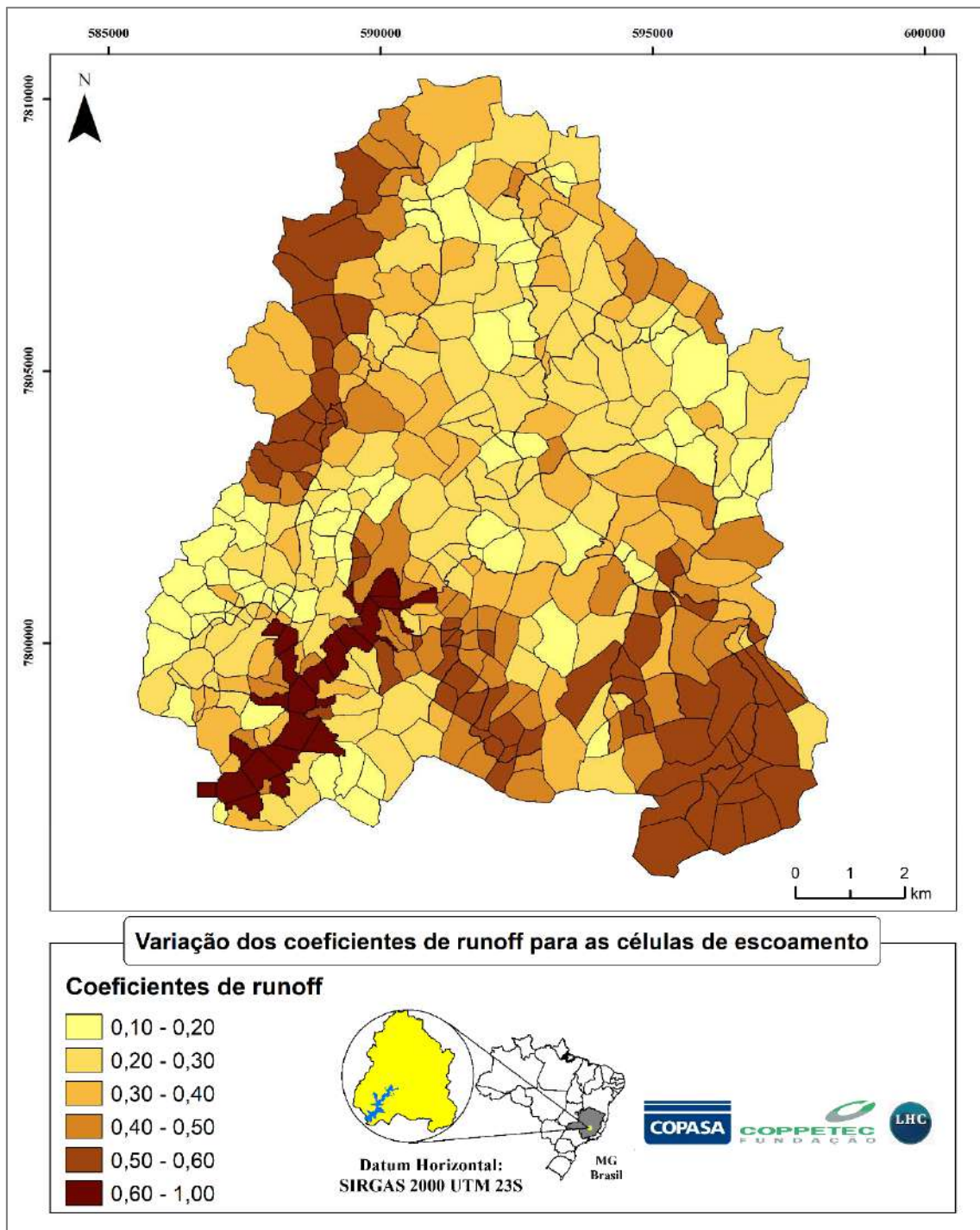


Figura 36 – Variação dos coeficientes de *runoff* para as células de escoamento no Cenário Atual.

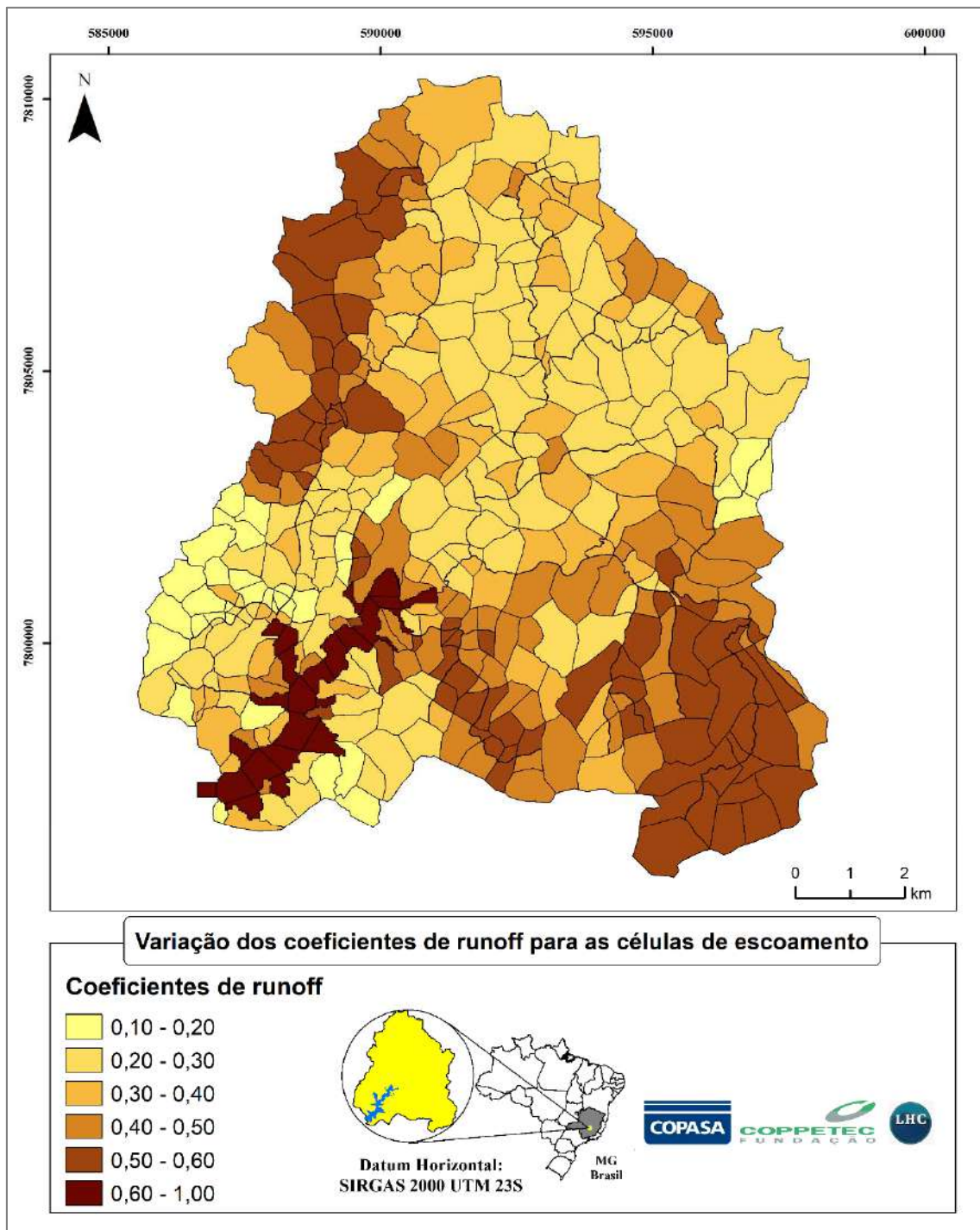


Figura 37 – Varição dos coeficientes de *runoff* para as células de escoamento no Cenário Futuro Macrozoneamento RMBH.

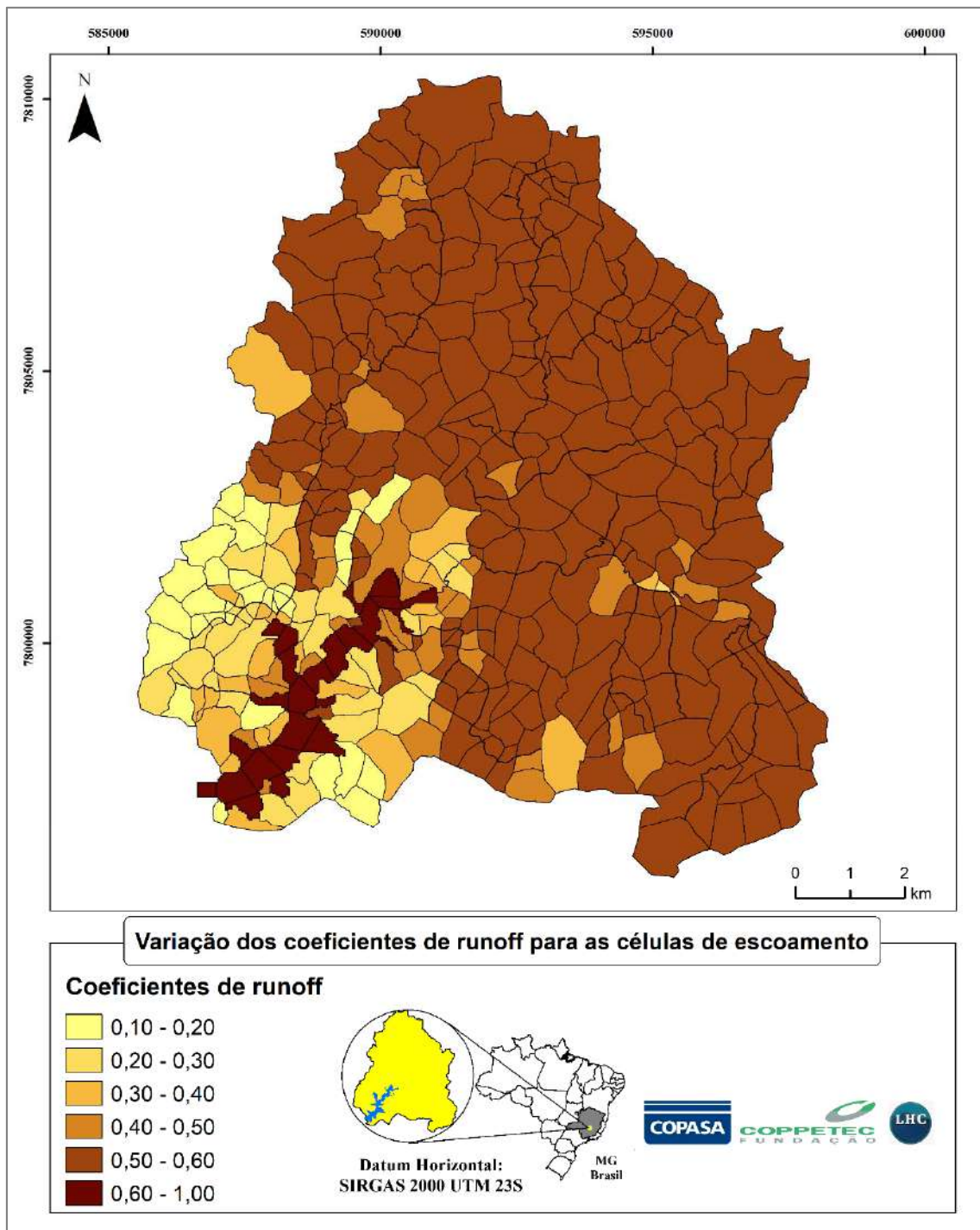


Figura 38 – Variação dos coeficientes de *runoff* para as células de escoamento no Cenário Futuro Plano Municipal de Contagem.

3.10.3 Modificação na vazão natural afluyente ao reservatório

A modificação na vazão natural afluyente ao reservatório foi calculada proporcionalmente à modificação do *runoff* médio de toda a bacia hidrográfica para os diferentes cenários. O *runoff* médio foi ponderado pela área ocupada pelos diferentes tipos de uso do solo, obtendo-se um valor único de escoamento superficial por cenário de ocupação da bacia hidrográfica.

A vazão natural dos diferentes cenários foi então corrigida por um multiplicador encontrado pela relação entre o *runoff* médio da bacia na situação atual dividido pelo *runoff* médio do cenário em análise. O *runoff* médio da situação atual foi utilizado como referência, pois se trata do cenário de calibração para o qual foram inicialmente encontradas as vazões de base que afluem para o reservatório.

A Tabela 14 apresenta o *runoff* médio da bacia hidrográfica para os diferentes cenários de simulação e apresenta também o multiplicador de correção para a vazão natural a ser utilizada em cada uma das simulações.

Tabela 14 – Modificação do *runoff* médio da bacia para os diferentes cenários e correção da Vazão Natural, proporcional à modificação em relação ao cenário atual

Cenário	<i>runoff</i> médio	Correção da Q_{NAT}
Passado	0,26	1,12
Atual	0,34	1,00
Futuro Macrozoneamento RMBH	0,38	0,95
Futuro Plano Municipal de Contagem	0,54	0,69

3.10.4 Modificação do aporte de esgoto na rede pluvial

A vazão de base afluyente ao reservatório é constituída de uma parcela de vazão natural acrescida do aporte de esgoto pelas áreas urbanas. É esperado que o aporte de esgoto se modifique nos diferentes cenários de simulação. Para modificação do aporte de esgoto na rede pluvial, que aflui ao reservatório, para os diferentes cenários de simulação, foi considerado que a quantidade de esgoto é proporcional ao aumento da mancha urbana para cada sub-bacia, utilizando o cenário atual (Calibração e Validação) como referência. Dessa forma, quanto maior for a mancha urbana do cenário, maior será o aporte de esgoto ao reservatório.

A Tabela 15, a Tabela 16 e a Tabela 17 apresentam a variação das áreas urbanas de diferentes cenários em comparação ao cenário atual, separadas por sub-bacia de contribuição ao reservatório. Também são apresentados os multiplicadores de correção da vazão de esgoto, obtido pela divisão entre a área urbana do cenário em análise pela área urbana do cenário atual. Os dados da Tabela 15 são relativos ao Cenário Passado (utilizando a mancha urbana de 1987), os da Tabela 16 se referem ao Cenário Futuro Macrozoneamento RMBH e da Tabela 17 apresentam os dados do Cenário Futuro Plano Municipal de Contagem.

Tabela 15 – Multiplicadores para correção da vazão de esgoto afluente ao reservatório proporcional à mancha urbana do Cenário Passado em relação ao cenário 2

Sub-bacia	Área Urbana Atual (m ²)	Área Urbana em 1987 (m ²)	Correção Q _{ESG}
Contribuição Lateral	2504896	379445	0,151
Água Suja	10051471	2675707	0,266
Morro Redondo	4603310	219406	0,048
Betim	16612145	5538727	0,333
Bela Vista	4394832	898687	0,204

Tabela 16 – Multiplicadores para correção da vazão de esgoto afluente ao reservatório proporcional à mancha urbana do Cenário Futuro Macrozoneamento RMBH em relação ao cenário 2

Sub-bacia	Área Urbana Atual (m ²)	Área Urbana RMBH (m ²)	Correção Q _{ESG}
Contribuição Lateral	2504896	2507474	1,001
Água Suja	10051471	12359578	1,230
Morro Redondo	4603310	4637812	1,007
Betim	16612145	22928652	1,380
Bela Vista	4394832	5853584	1,332

Tabela 17 – Multiplicadores para correção da vazão de esgoto afluente ao reservatório proporcional à mancha urbana do Cenário Futuro Plano Municipal de Contagem em relação ao cenário 2

Sub-bacia	Área Urbana Atual (m ²)	Área Urbana Contagem (m ²)	Correção Q _{ESG}
Contribuição Lateral	2504896	2547040	1,017
Água Suja	10051471	21683730	2,157
Morro Redondo	4603310	27620262	6,000
Betim	16612145	31949080	1,923
Bela Vista	4394832	6639682	1,511

De forma a complementar às discussões, foram simulados dois cenários futuros adicionais, o **Cenário Futuro Macrozoneamento RMBH sem Esgoto** e o **Cenário Futuro Plano Municipal de Contagem sem Esgoto**. Estes cenários são variações dos Cenários Futuro já apresentados (Cenário 3 – Futuro Macrozoneamento RMBH e Cenário 4 – Futuro Plano Municipal de Contagem).

Para estes cenários foi levado em consideração que o aporte de esgotos foi completamente direcionado para suas devidas redes e posterior tratamento e que seguem o mesmo caminho de exportação de esgoto para outras bacias, como ocorre hoje com a parcela adequadamente tratada e encaminhada para destino final. Logo, estes esgotos não contribuiriam para o aumento das vazões que chegam ao reservatório de Vargem das Flores.

Nestes cenários futuros, o sistema de esgotamento sanitário irá funcionar de forma 100% adequada. O objetivo, neste caso, se refere a avaliar se a redução esperada das vazões de base naturais, no caso de um incremento muito grande de urbanização, poderia também afetar o funcionamento quantitativo do reservatório.

3.11 Resultados da Simulação dos Cenários

Os resultados de nível d'água no reservatório de Vargem das Flores, para as várias situações de regime de chuvas abaixo relacionadas, são mostradas em sequência:

- 1- Ano hidrológico com uma chuva efetiva padrão:** Tal situação é bem representada pelas chuvas ocorridas no ano de 2011 e representa um típico ano hidrológico para analisar as flutuações de NA no reservatório e efetuar a análise da qualidade de suas águas.
- 2- Ano hidrológico com severo período de estiagem:** Tal situação é bem representada pelas chuvas ocorridas no ano de 2014 e representa um ano de maiores dificuldades para a quantidade e qualidade das águas do reservatório.
- 3- Ano hidrológico com uma chuva total padrão:** Tal situação é mais bem representada pelas chuvas ocorridas no ano de 2016, cujo funcionamento do reservatório pode ser mais adequado para efetuar a análise da qualidade de suas águas.

A Figura 39, a Figura 40 e a Figura 41 mostram os resultados que consideramos como de referência para a discussão, com o aporte de vazões de esgoto junto com a vazão de base natural.

Percebe-se, de forma geral, que o aumento de vazões de esgoto acaba por compensar, com certa vantagem a redução da vazão de base natural. A qualidade desta água adicional, porém, será pior. Também se percebe que a urbanização favorece a conversão de chuva em vazões no período das cheias.

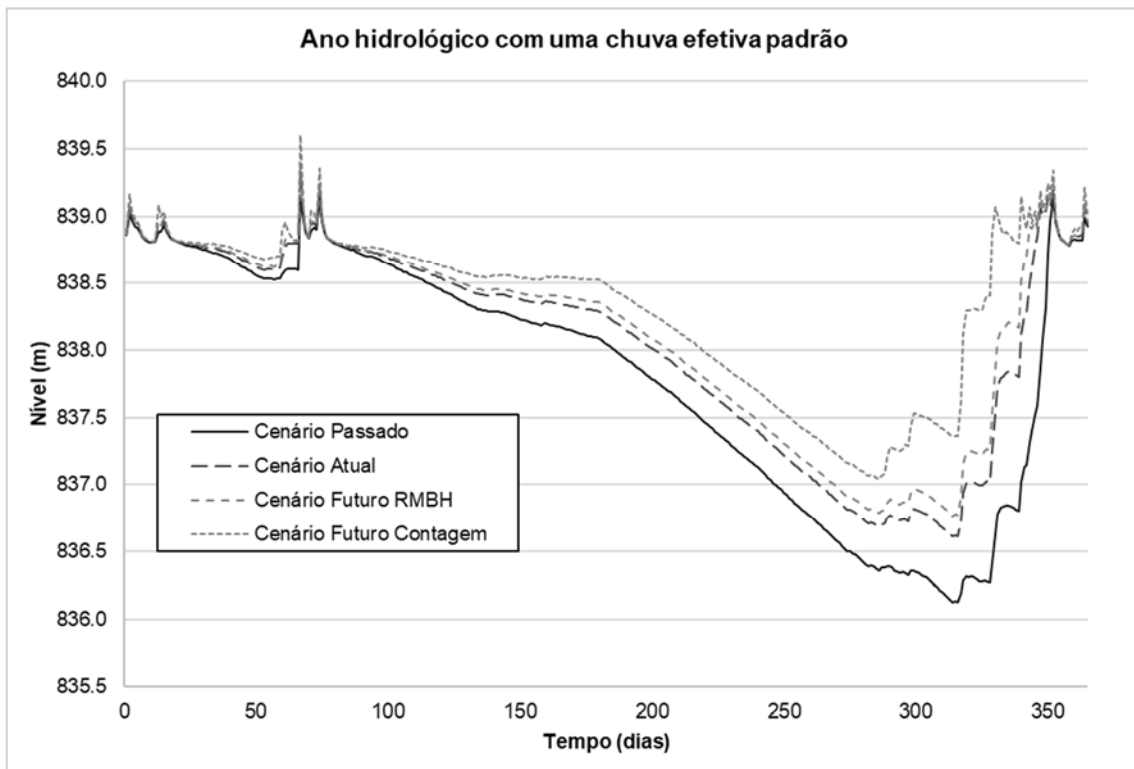


Figura 39 – Resultados da simulação dos cenários Passado, Atual, Futuro Macrozoneamento RMBH e Futuro Plano Municipal de Contagem para o ano de referência de 2011 (Ano hidrológico com uma chuva efetiva padrão).

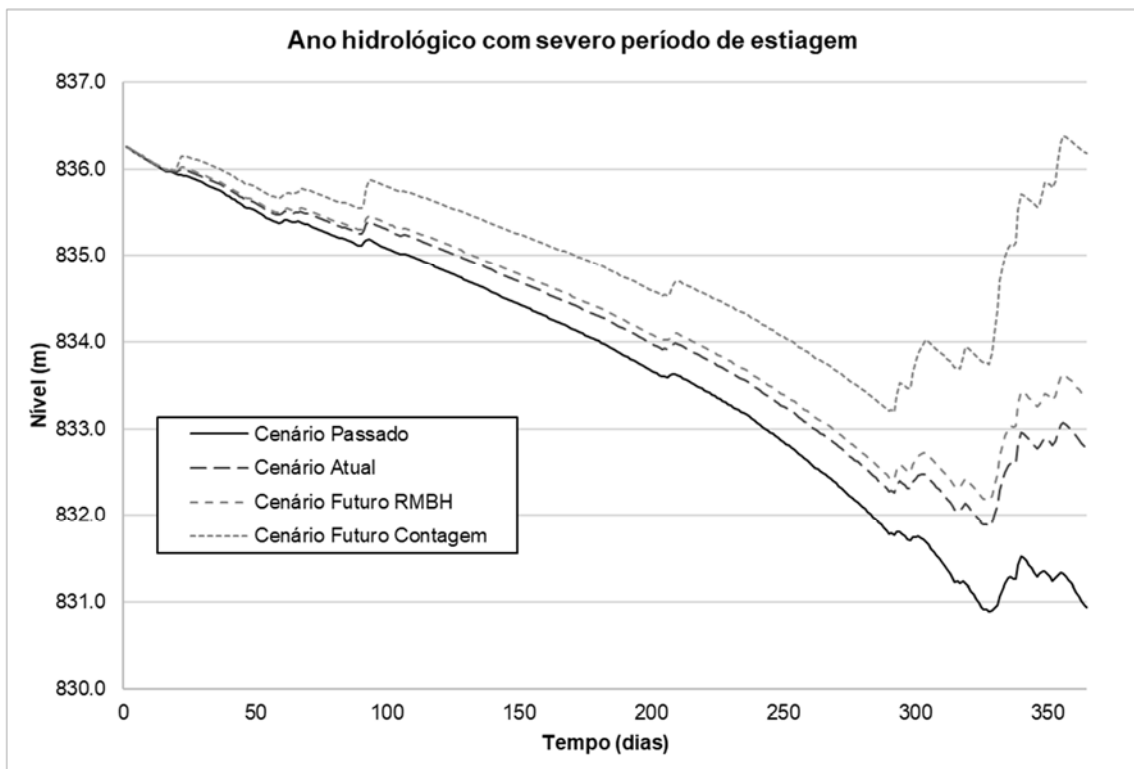


Figura 40 – Resultados da simulação dos cenários Passado, Atual, Futuro Macrozoneamento RMBH e Futuro Plano Municipal de Contagem para o ano de referência de 2014 (Ano hidrológico com severo período de estiagem).

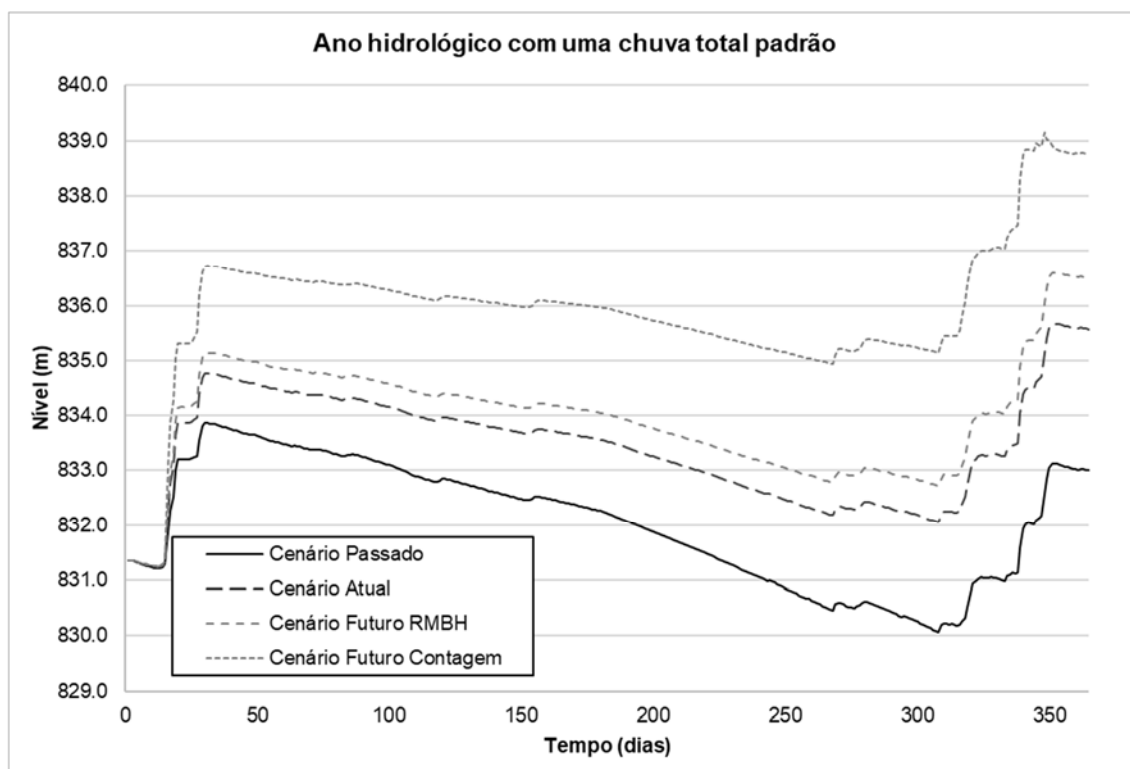


Figura 41 – Resultados da simulação dos cenários Passado, Atual, Futuro Macrozoneamento RMBH e Futuro Plano Municipal de Contagem para o ano de referência de 2016 (Ano hidrológico com uma chuva total padrão).

A Figura 41 mostra uma situação interessante: o acréscimo de vazões superficiais, devido ao aumento da urbanização, faz com que o ano de 2016, que teve chuvas importantes em janeiro, eleve o nível do reservatório a um patamar bem maior do que aquele que foi efetivamente registrado na prática.

Adicionalmente, os mesmos anos hidrológicos tomados como referência (2011, 2014 e 2016) foram simulados com a consideração de que um adequado sistema de esgotamento sanitário acompanhará o desenvolvimento na bacia e que atuais falhas serão corrigidas. Para tal situação foram simulados os eventos de referência de com afluência nula de esgoto direto na rede de drenagem. A Figura 42, a Figura 43 e a Figura 44 apresentam os resultados de simulação dos cenários futuros com e sem vazões de esgotamento sanitário, comparados com as simulações do cenário atual.

Quando observados os resultados dos cenários futuros, nos quais foram suprimidas as vazões de esgoto, é possível perceber que os cenários tendenciais, que seguem a predisposição de aporte de esgotos nas redes pluviais proporcionais à situação atual, aportam uma parcela muito elevada de volumes de águas residuais no reservatório de Vargem das Flores. Esta diferença torna-se nítida e o volume aportado pode ser medido pela integral da diferença entre as duas curvas.

Um comportamento de ordem geral mostra um maior deplecionamento do reservatório, pela redução das vazões de base naturais e pela remoção das vazões de esgoto. A única exceção é 2016, onde as vazões superficiais geradas pelo aumento da urbanização compensam esse efeito através de uma maior elevação do nível d'água do reservatório no período da cheia.

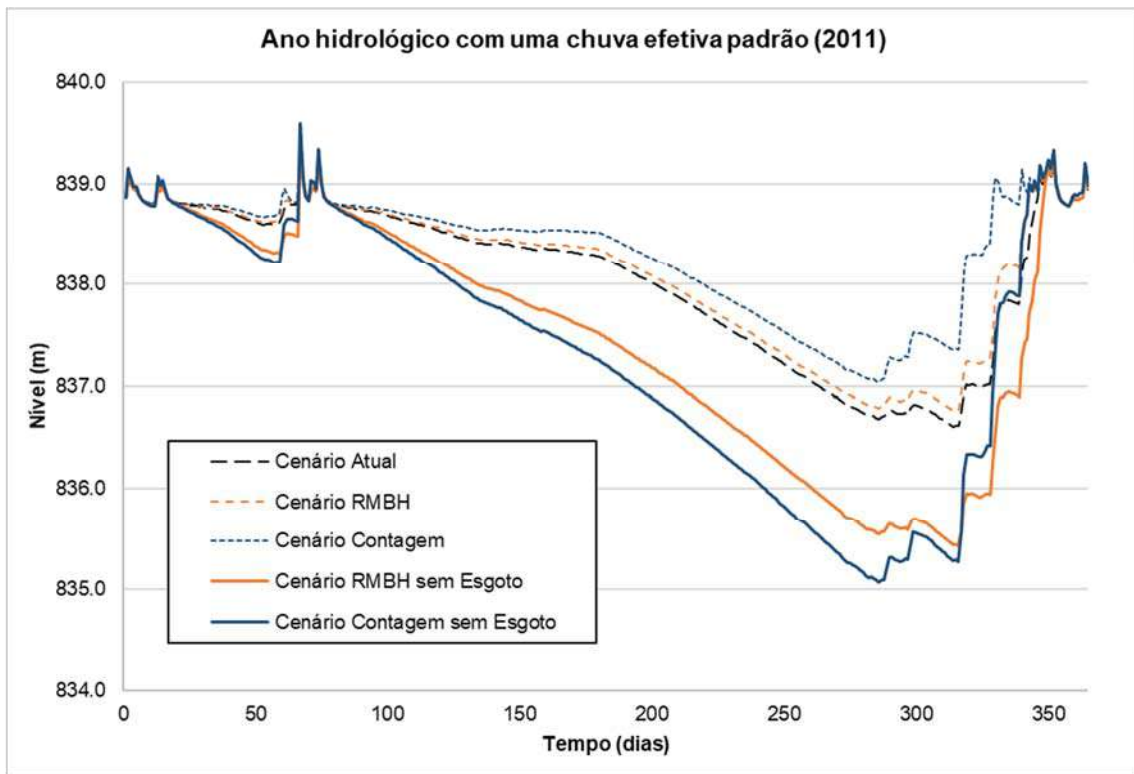


Figura 42 – Resultados para o ano de referência de 2011 para os cenários futuros com e sem funcionamento adequado do sistema de esgotamento sanitário em comparação com o cenário atual.

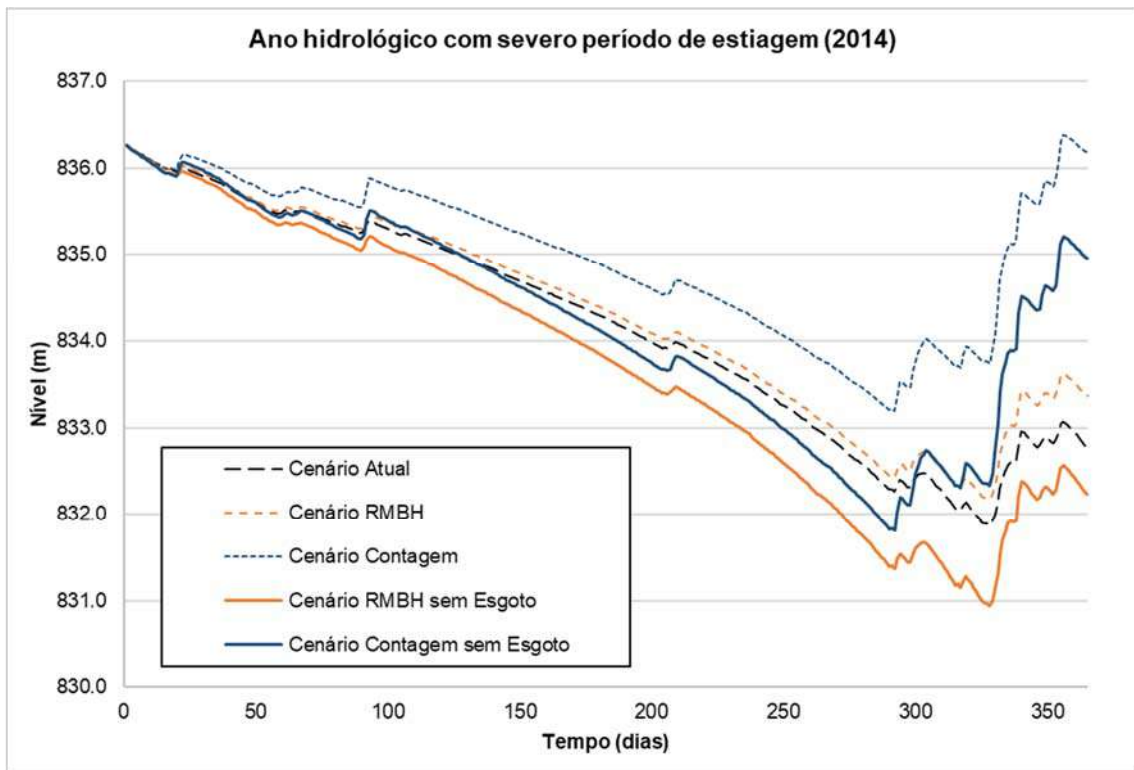


Figura 43 – Resultados para o ano de referência de 2014 para os cenários futuros com e sem funcionamento adequado do sistema de esgotamento sanitário em comparação com o cenário atual.

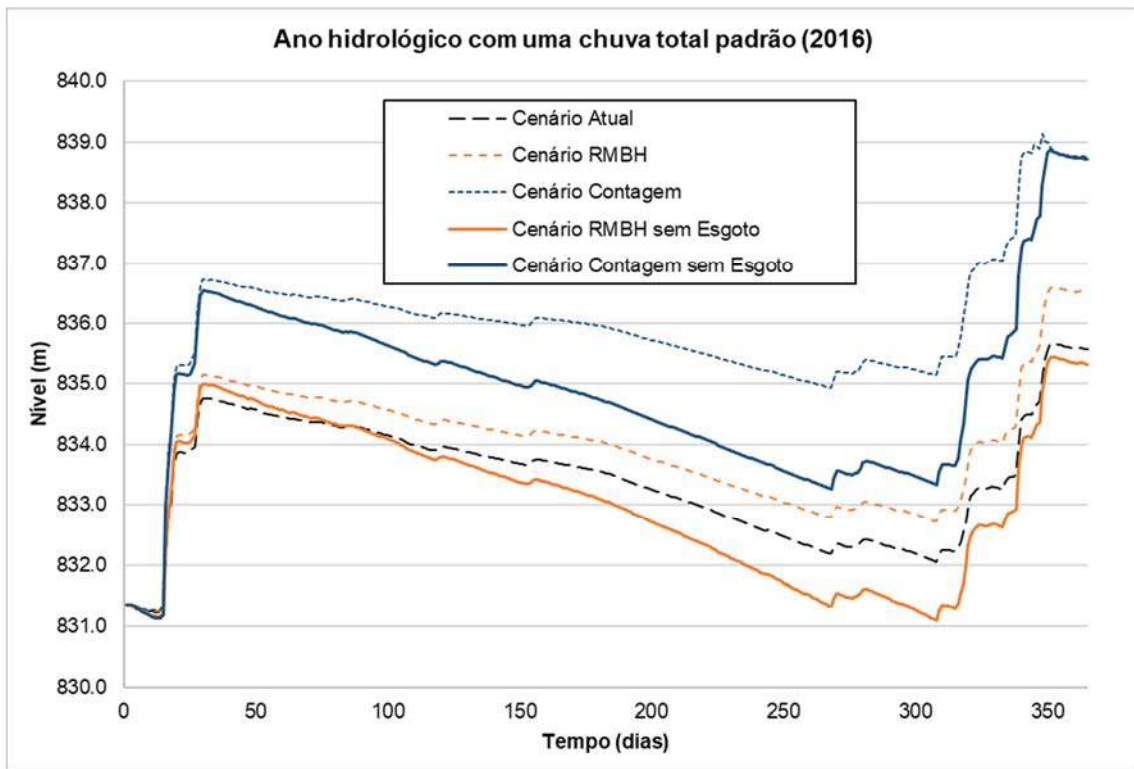


Figura 44 – Resultados para o ano de referência de 2016 para os cenários futuros com e sem funcionamento adequado do sistema de esgotamento sanitário em comparação com o cenário atual.

4 Modelagem de Qualidade da Água

Neste item, são apresentadas as etapas realizadas para determinação dos dados de entrada do modelo de qualidade de água QUAL-UFMG, as estimativas das concentrações dos parâmetros de qualidade da água, os critérios utilizados na modelagem e os resultados da calibração para os trechos fluviais que aportam ao reservatório de Vargem das Flores.

Em relação aos dados, foram determinadas as características hidráulicas dos trechos dos rios, as vazões efluentes e cargas domésticas incrementais e pontuais lançadas ao longo dos rios simulados, as vazões a serem utilizadas na calibração do modelo e as condições de contorno. Destaca-se que, na região em estudo, não foram identificadas captações significativas de abastecimento doméstico e industrial.

Para calibração do modelo, foram realizadas diversas simulações visando a obtenção dos parâmetros de qualidade da água que mais aproximasse o perfil de qualidade da água simulado dos dados observados. Os parâmetros de qualidade da água simulados referem-se às concentrações de DBO, OD e fósforo total, este último separado em seus componentes orgânico e inorgânico.

Vale ressaltar que a modelagem de qualidade da água procurou representar todos os processos que ocorrem na bacia, tendo como base os dados disponibilizados pela COPASA e/ou obtidos na literatura técnica existente. No entanto, em função da limitação de informações disponíveis, foi necessário adotar simplificações, hipóteses e critérios adicionais, de forma a reproduzir da melhor maneira possível a situação da qualidade da água na bacia.

Assim, não se pretende que os resultados da calibração do modelo reflitam exatamente as condições de qualidade da água observadas nos cursos d'água simulados, mas sim que estejam dentro dos limites máximos e mínimos dos dados observados de qualidade da água do período considerado. Assim, espera-se que os resultados sejam consistentes e representativos, embora não exatos, sendo capazes de explicar sistemicamente os dados reais medidos.

Com os resultados da modelagem, será possível avaliar as condições futuras de qualidade da água considerando os cenários de uso e ocupação do solo a serem simulados para avaliação das consequências dos cenários de urbanização sobre o reservatório de Vargem das Flores.

4.1 Estimativa dos dados de entrada e definição de critérios para calibração do modelo

A modelagem de qualidade da água foi realizada para os trechos dos principais rios afluentes ao reservatório de Vargem das Flores, representados na Figura 45. São eles:

- Rio Betim
- Córrego Morro Redondo
- Córrego Água Suja

Os parâmetros a serem simulados são oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e fósforo total (orgânico e inorgânico). Os dados e critérios para a calibração do modelo nos rios em estudo são apresentados nos itens a seguir.

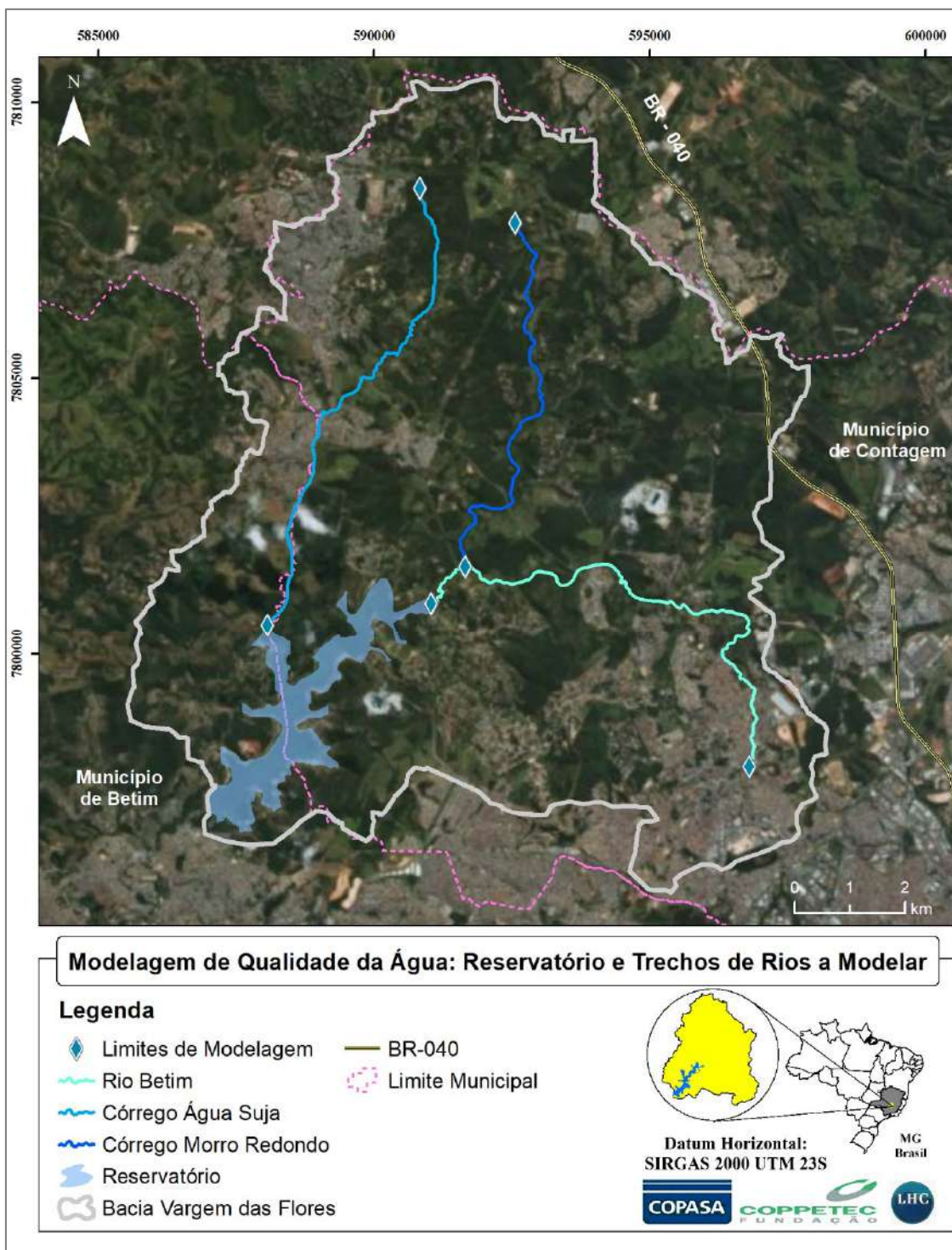


Figura 45 – Modelagem de Qualidade da Água: Reservatório e Trechos de Rios a Modelar

4.1.1 Divisão dos trechos do modelo

Cada um dos rios em estudo foi segmentado de forma a obedecer a condições de homogeneidade das características hidráulicas do escoamento. Essa divisão também foi realizada com base nos afluentes localizados nos trechos, com áreas superiores a 3km².

Adotou-se o comprimento de 0,1 km para os elementos computacionais. A divisão dos trechos é ilustrada na Figura 46 e os respectivos comprimentos são apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 – Comprimento dos Trechos de Modelagem

Rio	Comprimento (km)			
	Trecho 1	Trecho 2	Trecho 3	Trecho 4
Betim	5,1	0,7	4,0	1,2
Morro Redondo	3,5	2,6	2,1	-
Água Suja	4,4	3,1	2,4	-

Após análise das bacias, por meio da ferramenta de visualização do *Google Earth*, optou-se por acrescentar um trecho na bacia do córrego Água Suja, devido às características bastante diferentes de nível de ocupação urbana (O Trecho 2 é densamente ocupado, diferentemente do Trecho 3, onde praticamente não há ocupação – Figura 47).

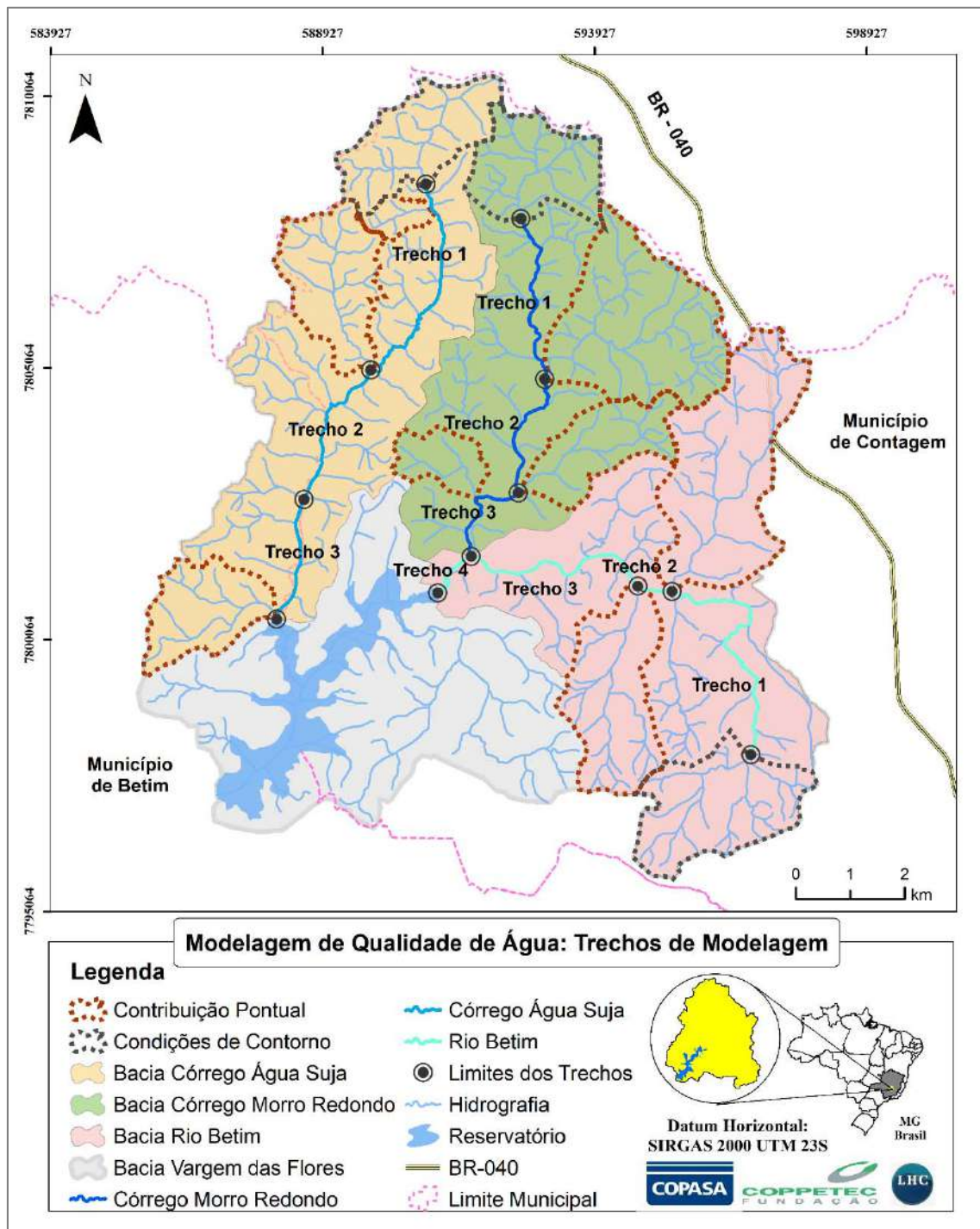


Figura 46 – Modelagem de Qualidade de Água: Trechos de Modelagem

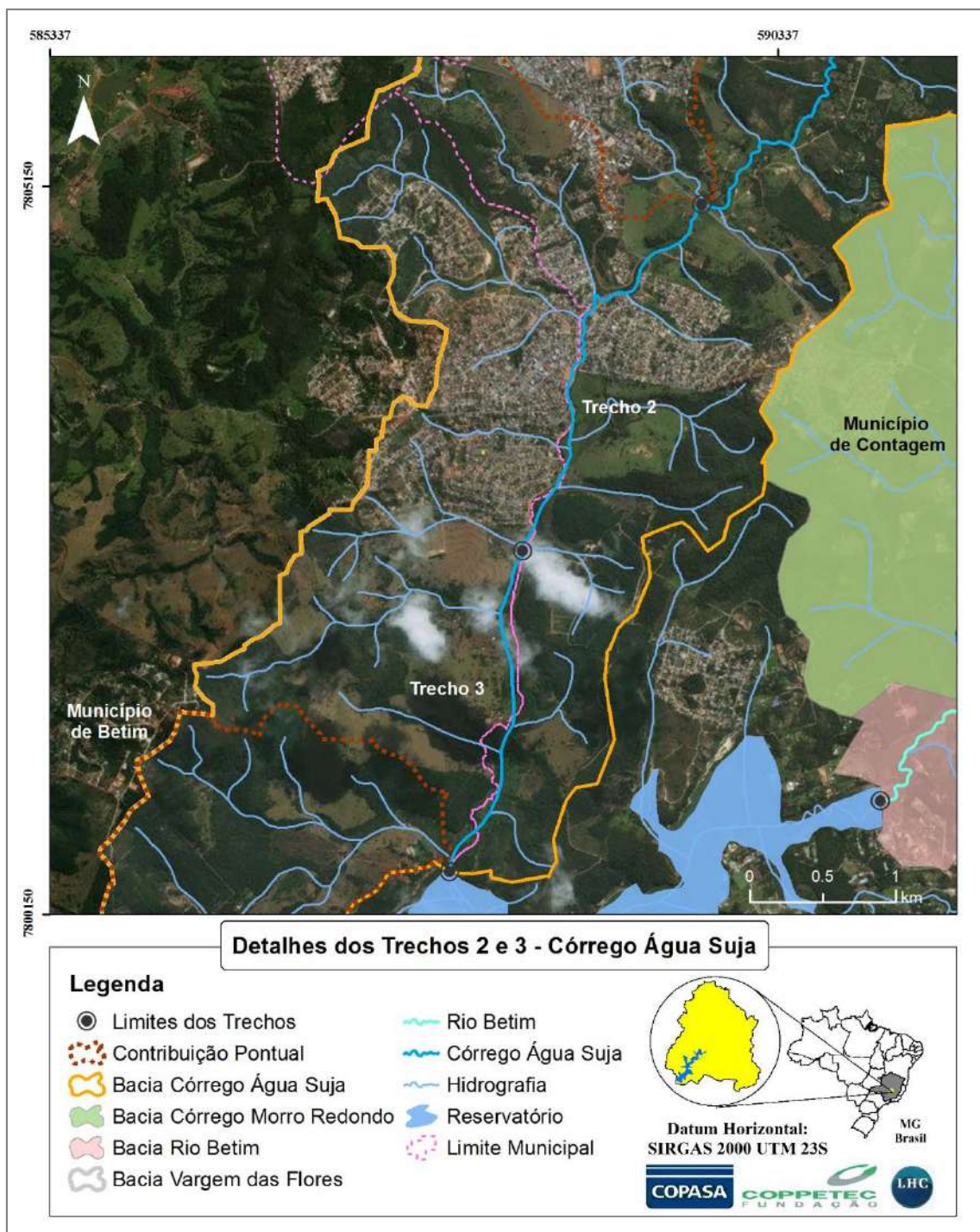


Figura 47 – Detalhes dos Trechos 2 e 3 – Córrego Água Suja

4.1.2 Características hidráulicas

As características hidráulicas dos trechos de rios simulados são representadas através das equações (3) e (4), que relacionam vazão e profundidade média e vazão e velocidade média, respectivamente.

$$h = a \cdot Q^b \quad (3)$$

$$v = c \cdot Q^d \quad (4)$$

Os coeficientes a, b, c e d destas equações, apresentados na Tabela 19, foram obtidos a partir dos resultados da modelagem hidrodinâmica dos rios em estudo (Capítulo 3, pág. 16).

Tabela 19 – Coeficientes das Equações (2) e (3)

Trechos de Modelagem	a	b	c	d
Betim 1	0,3271	0,3769	0,2152	0,6015
Betim 2	0,4251	0,3756	0,2078	0,5972
Betim 3 e 4	0,4285	0,3738	0,1944	0,6021
Água Suja 1	0,3936	0,3676	0,2151	0,6173
Água Suja 2 e 3	0,2921	0,3863	0,2767	0,5996
Morro Redondo 1	0,7154	0,3224	0,1656	0,6056
Morro Redondo 2	0,2967	0,3781	0,257	0,5974
Morro Redondo 3	0,4149	0,3721	0,1856	0,5991

As curvas resultantes do ajuste considerando a equação potencial tanto para a relação entre vazão e profundidade quanto para a relação entre vazão e velocidade, encontram-se na Figura 48 (Rio Betim), na Figura 49 (Córrego Água Suja) e na Figura 50 (Córrego Morro Redondo).

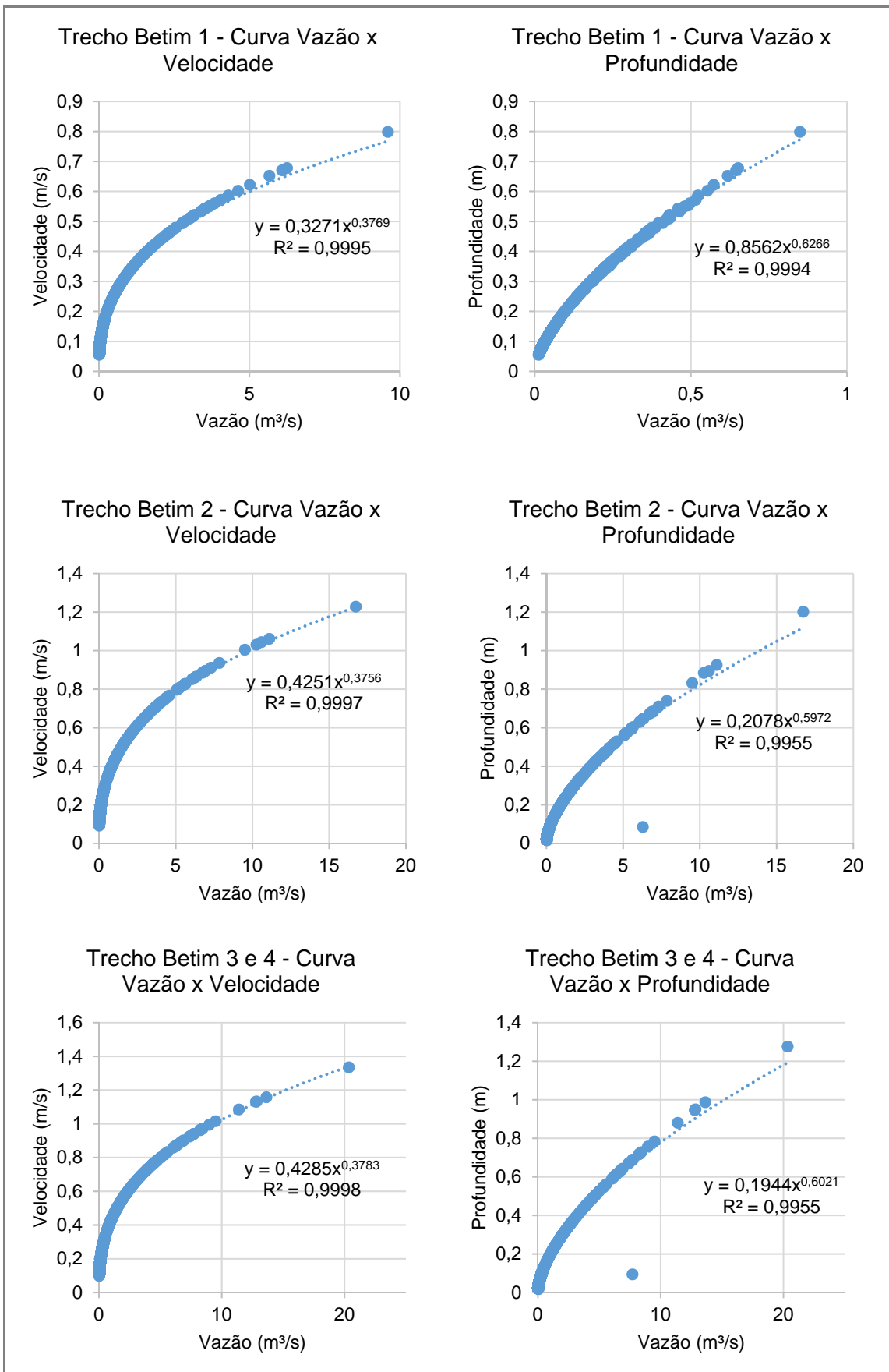


Figura 48 – Curvas de Vazão x Velocidade e Vazão Profundidade para os trechos do Rio Betim

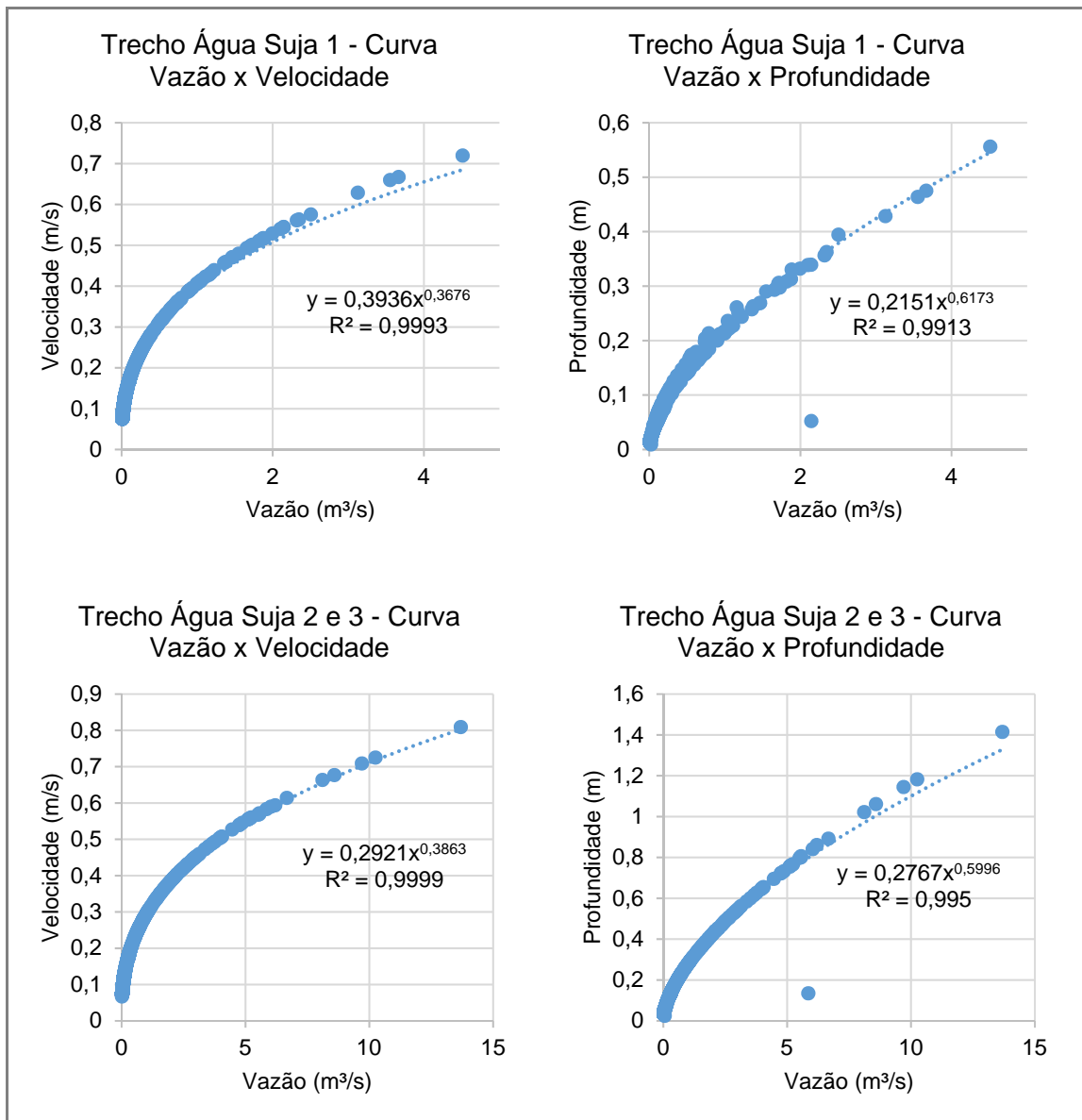


Figura 49 - Curvas de Vazão x Velocidade e Vazão Profundidade para os trechos do Córrego Água Suja

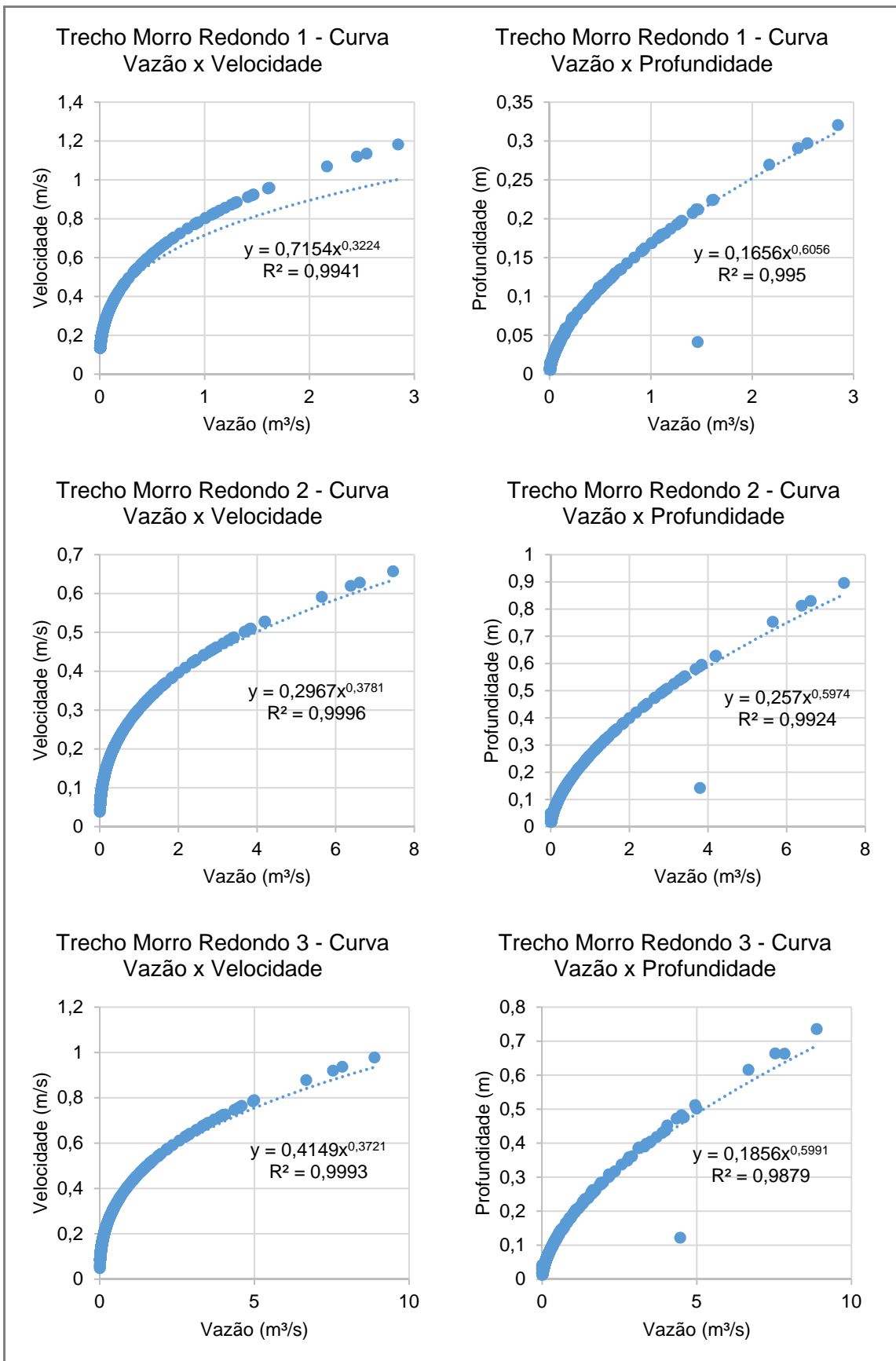


Figura 50 - Curvas de Vazão x Velocidade e Vazão Profundidade para os trechos do Córrego Morro Redondo

4.1.3 Vazões de esgotos domésticos

As vazões dos efluentes domésticos foram determinadas com base nas projeções populacionais para o ano de 2017, de acordo com a seguinte metodologia:

- Atualização dos dados populacionais do Censo de 2010 (IBGE, 2010) para os Municípios de Betim, Contagem e Esmeraldas, considerando o crescimento populacional estimado para 2017 de 13%, 9% e 14%, respectivamente. Esse crescimento foi determinado com base nas estimativas populacionais para 2017 (IBGE, 2017).
- Sobreposição em ArcGis das camadas referentes aos setores censitários de 2010 e às áreas contribuintes pontuais e incrementais consideradas (Figura 51).
- Cálculo do percentual de área do setor censitário dentro das áreas das sub-bacias incrementais e pontuais. Esse percentual foi usado para determinar a população dentro dessas bacias de interesse.
- Obtenção dos dados referentes aos moradores em domicílios particulares permanentes e domicílios coletivos e aos moradores em domicílios particulares permanentes com banheiro de uso exclusivo dos moradores ou sanitário e esgotamento sanitário via rede geral de esgoto ou pluvial. Com essas informações foi possível estimar a população atendida e não atendida por rede de esgotamento sanitário.
- Cálculo das vazões de esgoto referentes à população atendida ou não por rede, utilizando a equação (5).

$$Q = \frac{P \cdot q \cdot C}{86400} \quad (5)$$

Com:

- ✓ Q = vazão média efluente (l/s);
- ✓ C = coeficiente de retorno (adimensional);
- ✓ P = número de habitantes da cidade;
- ✓ q = quota média diária per capita (l/hab.dia).

Em relação à quota média diária per capita de água abastecida, foram utilizados dados do SNIS (2016) para os municípios de Betim, Contagem e Esmeraldas, cujos valores são, respectivamente: 127,7 l/hab.dia, 139,7 l/hab.dia e 140 l/hab.dia. No que diz respeito ao coeficiente de retorno, foi considerado como critério o valor igual a 1.

- Cálculo das vazões domésticas efluentes remanescentes na bacia, considerando o percentual de tratamento dos esgotos coletados disponibilizado pelo SNIS (2016), aplicado às vazões resultantes dos moradores com acesso à rede de esgotamento sanitário. Foi considerado um índice de tratamento de 90% para Contagem e de 100% para Betim e Esmeraldas. Destaca-se que o índice de tratamento de esgoto é resultado da relação entre a soma dos volumes de esgotos tratados e a soma dos volumes de esgotos coletado e bruto importado (SNIS, 2016).

É importante ressaltar que os esgotos sanitários coletados na bacia de Vargem das Flores são, em parte, encaminhados para tratamento na ETE de Nova Contagem, que lança seu efluente de tratamento em corpo hídrico fora da bacia, e o restante (contribuições da sede municipal e bairros adjacentes) é revertido mediante estações elevatórias para a bacia de Pampulha/Onça (Prefeitura Municipal de Contagem, 2013). Desta forma, considerou-se que todo o esgoto gerado tratado não retorna à bacia de contribuição do reservatório.

- Cálculo da vazão de esgoto remanescente final em cada bacia somando-se a vazão gerada pelos moradores sem acesso à rede de esgotamento sanitário à parcela correspondente a 10% da vazão gerada pelos moradores com acesso à rede de esgotamento sanitário em Contagem. Como em Betim e Esmeraldas o índice de tratamento dos esgotos coletados é 100%, esses municípios não foram considerados no cálculo da vazão remanescente daqueles com acesso à rede de esgotamento sanitário.

Para melhor identificação, as entradas pontuais e incrementais em cada rio estudado foram numeradas conforme apresentado na Figura 52. A Tabela 20 contém os valores obtidos de vazão de esgotos domésticos para as entradas pontuais e incrementais do modelo.

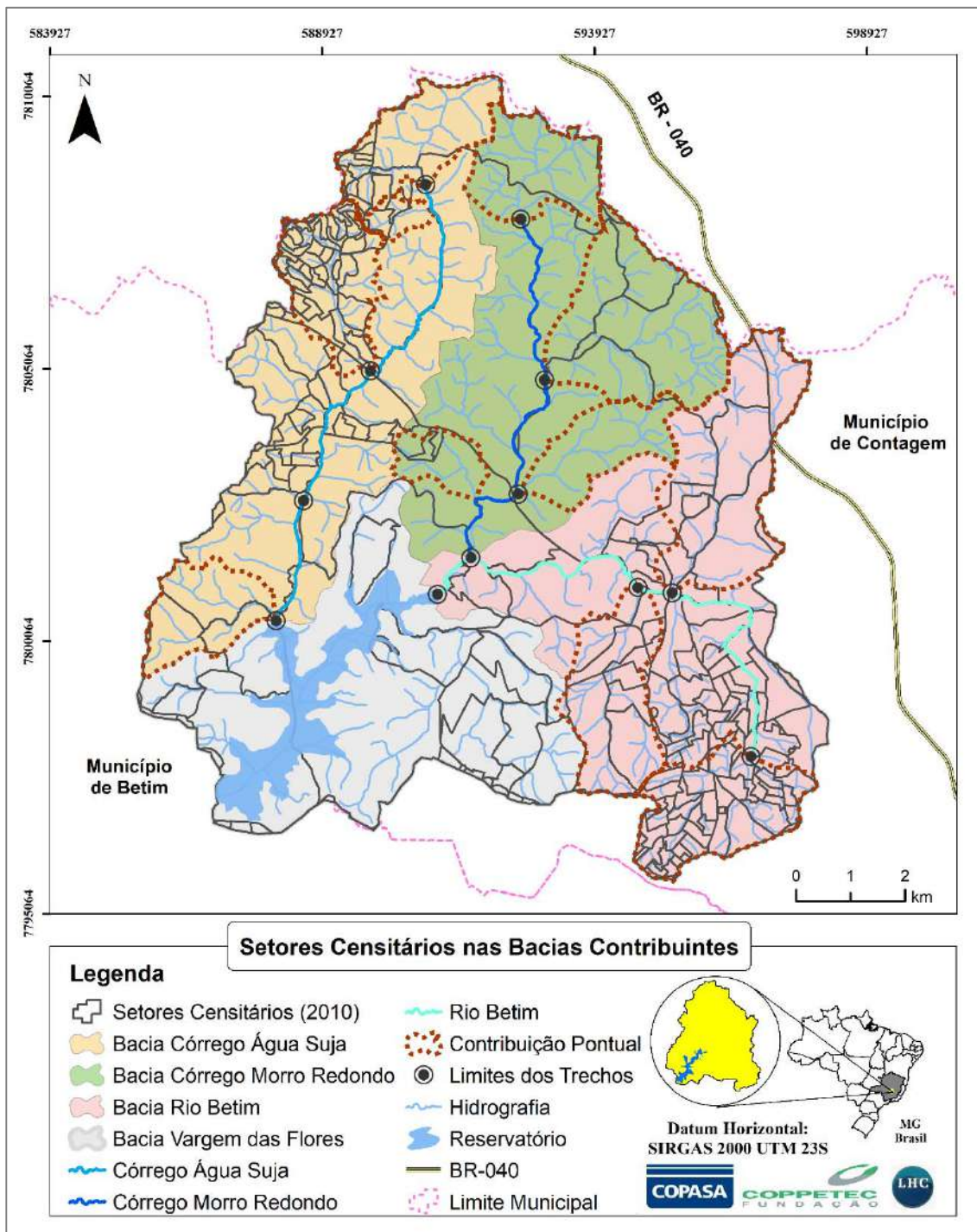


Figura 51 – Setores Censitários nas Bacias Contribuintes

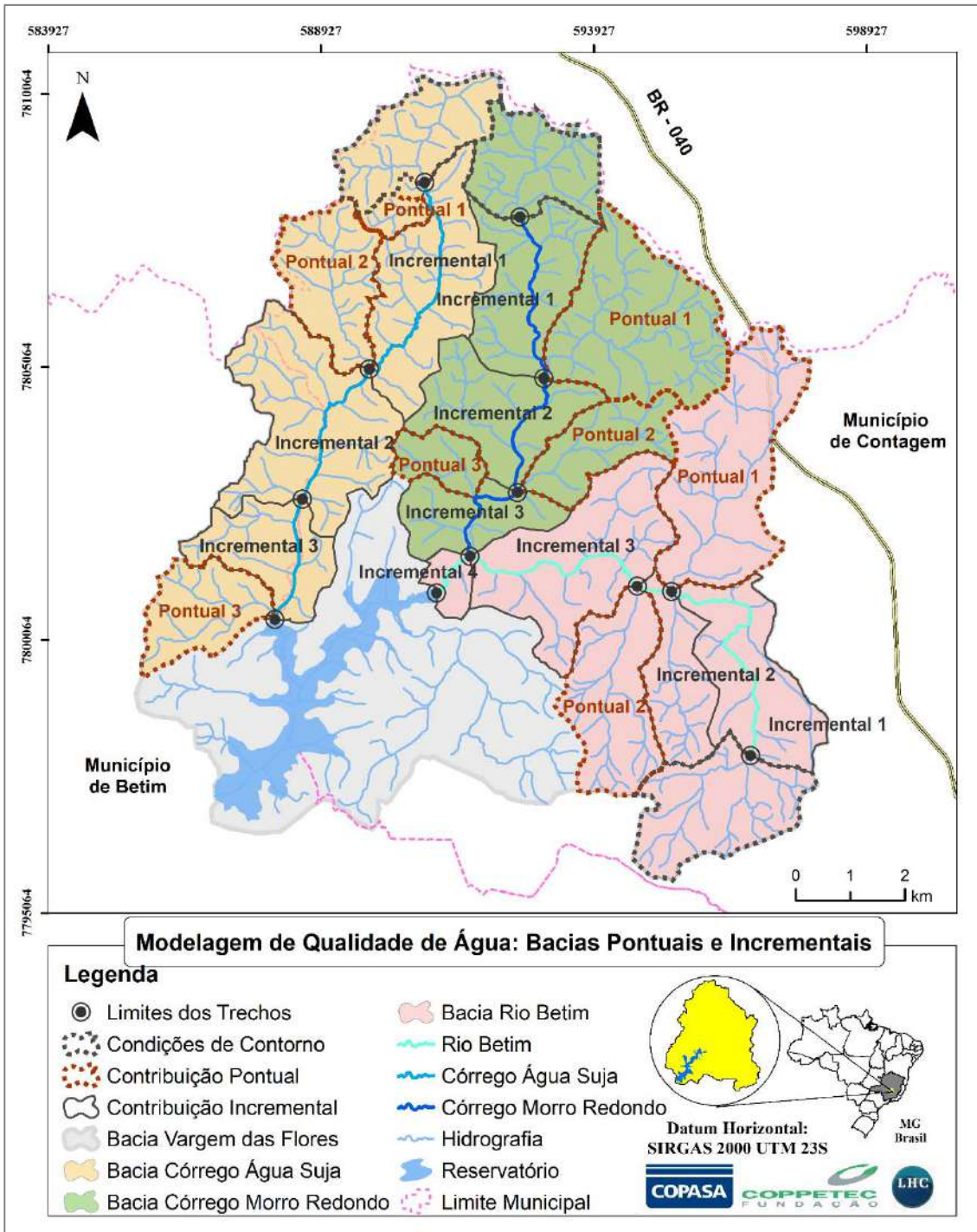


Figura 52 – Modelagem de Qualidade de Água: Entradas Pontuais e Bacias Incrementais

Tabela 20 – Vazões de Esgoto nas Bacias

Rio	Descrição	Moradores com rede (2017)	Moradores sem rede (2017)	Vazão sem rede (m³/s)	Vazão com rede (m³/s)	Vazão de esgoto na Bacia (m³/s)	Vazão de esgoto na Bacia (l/s)
Rio Betim	Condição de Contorno	31167	2992	0,0048	0,0504	0,0094	9,4
	Entrada Pontual 1	57	2388	0,0039	0,0001	0,0039	3,9
	Entrada Pontual 2	798	7345	0,0119	0,0013	0,0120	12,0
	Entrada Incremental 1	12661	3524	0,0057	0,0205	0,0076	7,6
	Entrada Incremental 2	6794	2578	0,0042	0,0110	0,0052	5,2
	Entrada Incremental 3	98	2149	0,0035	0,0002	0,0035	3,5
	Entrada Incremental 4	0	12	0,0000	0,0000	0,0000	0,0
Córrego Morro Redondo	Condição de Contorno	21	167	0,0003	0,0000	0,0003	0,3
	Entrada Pontual 1	24	1128	0,0018	0,0000	0,0018	1,8
	Entrada Pontual 2	2	51	0,0001	0,0000	0,0001	0,1
	Entrada Pontual 3	290	2589	0,0042	0,0005	0,0042	4,2
	Entrada Incremental 1	1	99	0,0002	0,0000	0,0002	0,2
	Entrada Incremental 2	26	586	0,0009	0,0000	0,0010	1,0
	Entrada Incremental 3	1	44	0,0001	0,0000	0,0001	0,1
Córrego Água Suja	Condição de Contorno	5188	2567	0,0042	0,0084	0,0049	4,9
	Entrada Pontual 1	563	1872	0,0030	0,0009	0,0031	3,1
	Entrada Pontual 2	26918	3792	0,0061	0,0435	0,0101	10,1
	Entrada Pontual 3	6	46	0,0001	0,0000	0,0001	0,1
	Entrada Incremental 1	2	283	0,0005	0,0000	0,0005	0,5
	Entrada Incremental 2	852	13015	0,0199	0,0013	0,0200	20,0
	Entrada Incremental 3	5	30	0,0000	0,0000	0,0000	0,0

4.1.4 Cargas e concentrações de esgoto doméstico

A estimativa das cargas e concentrações de esgoto doméstico foi realizada de acordo com as seguintes etapas:

- Estimativa da concentração potencial nos esgotos dividindo-se a carga per capita de DBO e fósforo total (Von Sperling, 2007) pela vazão per capita de esgotos de cada município (SNIS, 2016). A Tabela 21 apresenta as concentrações potenciais de DBO e fósforo total para cada município.

Tabela 21 - Concentrações potenciais DBO e Fósforo Total para cada município

Destaca-se que as	Município	Carga per capita de DBO (mg/hab.dia)	Carga per capita de fósforo total (mg/hab.dia)	Vazão per capita de esgotos (l/hab.dia)	Concentração Potencial DBO (mg/l)	Concentração Potencial Fósforo Total (mg/l)
	Contagem	54000	700	139,7	386,5	5,01
	Betim	54000	700	127,7	422,9	5,48
	Esmeraldas	54000	700	140,0	385,7	5,00

concentrações de oxigênio dissolvido foram consideradas nulas.

- Determinação da parcela da população que possui esgotamento sanitário por fossa séptica, fossa rudimentar e vala para cada bacia (entrada pontual) e área incremental dos rios modelados. Para esses locais, foi calculada a concentração remanescente, aplicando-se os coeficientes de remoção para cada forma de esgotamento sanitário, de acordo com a Tabela 22.

Tabela 22 - Percentual de Remoção de Fósforo Total e DBO para Fossa Séptica, Rudimentar e Vala

Tipo	% remoção de DBO	% remoção de Fósforo Total
Fossa séptica	35%	35%
Fossa rudimentar e vala	20%	20%

O percentual de remoção considerado para fossa séptica foi baseado na recomendação de Von Sperling (2007) para tratamento primário simplificado e tanques sépticos. Em relação às fossas rudimentares e valas, considerou-se, de forma simplificada, que há uma pequena remoção de DBO e Fósforo Total e que, em sua grande maioria, são interligadas diretamente aos cursos d'água. Destaca-se que esta configuração resulta, também, de uma série de testes preliminares, com variações destes valores, que apontam para as escolhas realizadas como mais prováveis.

- Cálculo da concentração remanescente em cada bacia (entrada pontual) e área incremental dos rios modelados, considerando as concentrações e vazões remanescentes das fossas séptica e rudimentar e as concentrações e vazões referentes à parcela coletada que não recebe tratamento. Nesse balanço, também estão incluídas outras formas de esgotamento sanitário que não utilizam o esgotamento por rede.

- Aplicação de decaimento simplificado da DBO em função da distância, em algumas bacias e trechos incrementais, em relação aos rios modelados. Essa metodologia foi aplicada uma vez que alguns centros urbanos estão localizados muito distantes do rio principal (que está sendo modelado) e sofrem um decaimento das cargas até chegar ao rio. A expressão utilizada para o decaimento da DBO, obtida em Von Sperling (2007), é representada pela equação (6) a seguir.

$$C_{\text{DBO}} \text{ (mg/l)} = C_0 \cdot e^{-Kt} \quad (6)$$

A Tabela 23 apresenta os trechos e bacias considerados, as distâncias até o rio principal, as velocidades, os coeficientes de decaimento (K) utilizados e o percentual final das concentrações de DBO remanescentes. O tempo foi estimado através da relação entre a distância e a velocidade e os coeficientes foram obtidos na calibração do trecho do rio principal, para onde estão afluindo as bacias e áreas incrementais.

Destaca-se que, na bacia incremental do Córrego Morro Redondo considerada, há três núcleos urbanos distantes do rio principal simulado. Neste caso, aplicou-se um decaimento em função da distância para cada um deles e, por fim, foi feito um balanço de massa considerando as vazões de esgoto geradas por cada um para a aplicação da concentração incremental ao longo do trecho.

Tabela 23 – Informações necessárias para cálculo do decaimento de DBO

Rio	Descrição	Distância até o Rio Principal (m)	Velocidade (m/s)	K (d ⁻¹)	Decaimento (%)
Córrego Morro Redondo	Condição de Contorno	1322,0	0,08	1,24	79%
	Entrada Pontual 1	3389,0	0,08	1,24	54%
	Entrada Pontual 2	1049,0	0,11	1,24	87%
	Entrada Pontual 3	1789,0	0,15	1,24	84%
	Entrada Incremental 2				
	Núcleo Urbano 1	837,0	0,08	1,24	84%
	Núcleo Urbano 2	660,2	0,08	1,24	87%
	Núcleo Urbano 3	2426,8	0,08	1,24	61%
Córrego Água Suja	Condição de Contorno	1566,0	0,11	1,41	79%
	Entrada Pontual 1	1054,8	0,11	1,41	86%
	Entrada Pontual 2	2502,5	0,11	1,41	69%

- Aplicação da remoção de fósforo considerando a existência de lagoas e reservatórios em algumas sub-bacias, como pode ser visto na Figura 53.

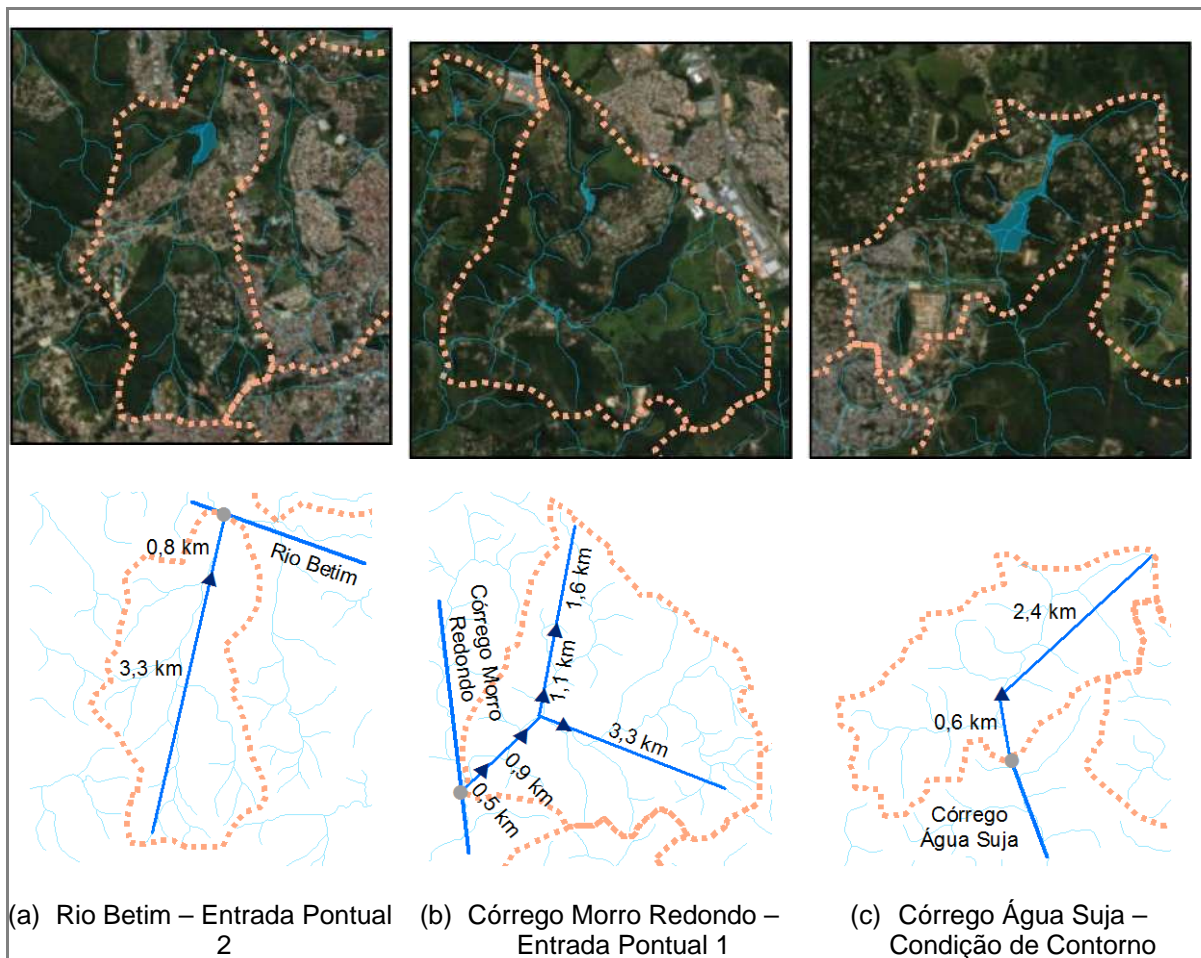


Figura 53 – Localização das Lagoas utilizadas na remoção de fósforo total das bacias consideradas

Para esses locais, que podem ser considerados como bacias de retenção, foi aplicada uma remoção de fósforo de 50% para cada lagoa (Tomaz, 2016). Na Entrada Pontual 1 no Córrego Morro Redondo, foi possível constatar a existência de lagoas em cadeia. Neste caso, foi aplicada a remoção do fósforo para as concentrações geradas na bacia da primeira lagoa de montante, fazendo-se, em seguida, o balanço de vazões e concentrações da saída do lago com as vazões e concentrações geradas no próximo trecho incremental. Esse procedimento foi repetido até chegar no último reservatório de jusante. Um exemplo de aplicação desse procedimento é apresentado na Figura 54 a seguir.

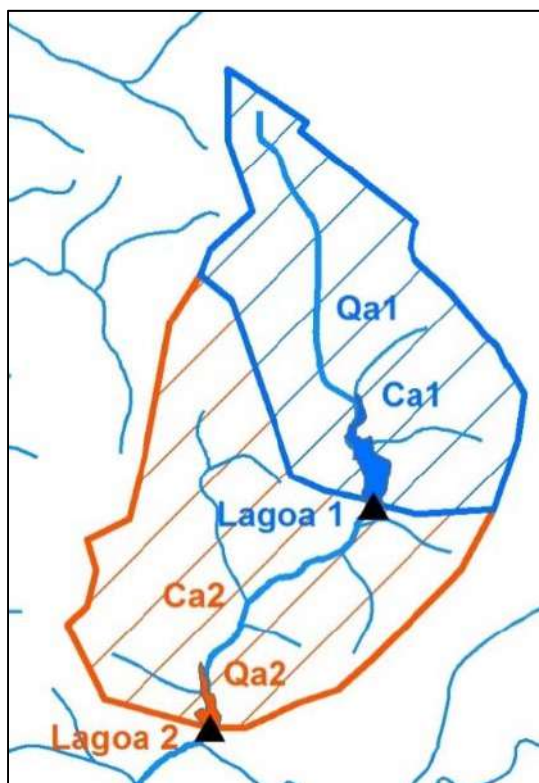


Figura 54 – Exemplo de aplicação da remoção de fósforo total nas lagoas

Nesse exemplo da Figura 54, a concentração de fósforo total afluente à Lagoa 1 é representada por Ca_1 e a vazão que drena para a lagoa é Qa_1 . Assim, a concentração a jusante da Lagoa 1 será expressa pela equação (7).

$$CL_{1j} = Ca_1 \times 0,5 \quad (7)$$

Onde, CL_{1j} é a concentração de fósforo total a jusante da Lagoa 1 com uma remoção de 50%.

Logo, a concentração a montante da Lagoa 2 é expressa pela equação (8).

$$CL_{2m} = \frac{CL_{1j} \times Qa_1 + Ca_2 \times Qa_2}{Qa_1 + Qa_2} \quad (8)$$

Na qual CL_{2m} é a concentração a montante do lago 2. Ressalta-se que, para as concentrações a jusante da Lagoa 2, utiliza-se o mesmo procedimento.

A Tabela 24 apresenta, então, as concentrações finais de DBO e fósforo total consideradas para os esgotos domésticos gerados em cada entrada pontual e bacias incrementais.

Tabela 24 – Concentrações Finais de DBO e Fósforo nos Esgotos Domésticos

Rio	Descrição	DBO (mg/l)	P total (mg/l)
Rio Betim	Condição de Contorno	350,2	4,54
	Entrada Pontual 1	304,1	3,94
	Entrada Pontual 2	287,1	2,31
	Entrada Incremental 1	320,9	4,16
	Entrada Incremental 2	301,9	3,91
	Entrada Incremental 3	271,7	3,52
	Entrada Incremental 4	283,0	3,67
Córrego Morro Redondo	Condição de Contorno	219,7	3,61
	Entrada Pontual 1	165,8	0,67
	Entrada Pontual 2	219,7	3,27
	Entrada Pontual 3	231,2	3,56
	Entrada Incremental 1	289,7	3,75
	Entrada Incremental 2		
	Núcleo Urbano 1	247,0	3,72
	Núcleo Urbano 2	255,0	3,72
	Núcleo Urbano 3	186,7	3,72
Entrada Incremental 3	277,1	3,59	
Córrego Água Suja	Condição de Contorno	277,5	4,51
	Entrada Pontual 1	269,4	4,08
	Entrada Pontual 2	240,0	4,51
	Entrada Pontual 3	332,7	4,31
	Entrada Incremental 1	307,7	3,99
	Entrada Incremental 2	322,8	3,96
	Entrada Incremental 3	306,9	3,81

4.1.5 Vazões de calibração

A determinação das vazões de calibração seguiu a metodologia apresentada no item 3.5 (pág. 22). As vazões naturais referentes às entradas pontuais e bacias incrementais de cada rio, necessárias para a simulação, foram calculadas a partir da correlação de áreas de drenagem com as vazões naturais obtidas nos postos. Os resultados são apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 – Vazões Naturais nas Entradas Pontuais e Bacias Incrementais dos Rios Simulados

Rio	Descrição	Área de Drenagem (km ²)	Vazão Natural (l/s)	Vazão Natural (m ³ /s)
Rio Betim	Condição de Contorno	5,1	11,3	0,0113
	Entrada Pontual 1	8,0	17,7	0,0177
	Entrada Pontual 2	5,0	11,1	0,0111
	Entrada Incremental 1	5,2	11,5	0,0115
	Entrada Incremental 2	3,1	6,8	0,0068
	Entrada Incremental 3	7,4	16,6	0,0166
	Entrada Incremental 4	0,9	1,9	0,0019
Córrego Morro Redondo	Condição de Contorno	3,7	7,7	0,0077
	Entrada Pontual 1	7,8	16,0	0,0160
	Entrada Pontual 2	3,1	6,4	0,0064
	Entrada Pontual 3	1,5	3,0	0,0030
	Entrada Incremental 1	4,9	10,1	0,0101
	Entrada Incremental 2	4,7	9,7	0,0097
	Entrada Incremental 3	3,0	6,1	0,0061
Córrego Água Suja	Condição de Contorno	4,0	11,2	0,0112
	Entrada Pontual 1	0,7	1,9	0,0019
	Entrada Pontual 2	4,1	11,6	0,0116
	Entrada Pontual 3	3,2	9,0	0,0090
	Entrada Incremental 1	6,6	18,6	0,0186
	Entrada Incremental 2	8,1	23,0	0,0230
	Entrada Incremental 3	3,6	10,3	0,0103

A Tabela 26 apresenta as vazões totais (naturais e de esgotos) nas entradas pontuais, bacias incrementais e condições de contorno dos rios simulados.

Tabela 26 – Vazões Totais nas Entradas Pontuais e Bacias Incrementais dos Rios Simulados

Rio	Descrição	Vazão Natural (m³/s)	Vazão de esgoto (m³/s)	Vazão Total (m³/s)
Rio Betim	Condição de Contorno	0,0113	0,0094	0,0207
	Entrada Pontual 1	0,0177	0,0039	0,0216
	Entrada Pontual 2	0,0111	0,0120	0,0231
	Entrada Incremental 1	0,0115	0,0076	0,0191
	Entrada Incremental 2	0,0068	0,0052	0,0120
	Entrada Incremental 3	0,0166	0,0035	0,0201
	Entrada Incremental 4	0,0019	0,0000	0,0019
Córrego Morro Redondo	Condição de Contorno	0,0077	0,0003	0,0080
	Entrada Pontual 1	0,0160	0,0018	0,0178
	Entrada Pontual 2	0,0064	0,0001	0,0065
	Entrada Pontual 3	0,0030	0,0042	0,0072
	Entrada Incremental 1	0,0101	0,0002	0,0103
	Entrada Incremental 2	0,0097	0,0010	0,0107
	Entrada Incremental 3	0,0061	0,0001	0,0062
Córrego Água Suja	Condição de Contorno	0,0112	0,0049	0,0161
	Entrada Pontual 1	0,0019	0,0031	0,0050
	Entrada Pontual 2	0,0116	0,0101	0,0216
	Entrada Pontual 3	0,0090	0,0001	0,0090
	Entrada Incremental 1	0,0186	0,0005	0,0190
	Entrada Incremental 2	0,0230	0,0200	0,0429
	Entrada Incremental 3	0,0103	0,0000	0,0103

4.1.6 Condições de Contorno

As condições de contorno correspondem aos valores de DBO, oxigênio dissolvido, fósforo, vazões e temperatura da água, considerados no início do trecho de montante dos rios simulados. As concentrações de cada parâmetro foram calculadas através do balanço de massa entre as concentrações naturais dos rios e as concentrações de DBO e fósforo geradas pelos núcleos urbanos situados no trecho de montante. As vazões naturais foram obtidas por relação de área de drenagem, como apresentado no item 4.1.5 (pág. 78). Os resultados são apresentados na Tabela 27.

Destaca-se que a vazão total considerada é a correspondente à soma das vazões natural e de esgotos domésticos no ponto considerado, como apresentado na Tabela 26. O valor da temperatura (°C) foi obtido fazendo a média dos valores medidos disponibilizados para o período de julho a setembro entre os anos de 2015 e 2017. As concentrações de DBO, OD e Fósforo utilizadas para o rio em situação natural foram de 2 mg/l, 90% do OD de saturação (calculado a partir de informações acerca de altitude e temperatura) e 0,01 mg/l, respectivamente. É importante relembrar que, na composição do fósforo total foram considerados 40% de fósforo orgânico e 60% de fósforo inorgânico (Salla *et. al*, 2013).

Tabela 27 – Condições de Contorno de cada Rio Simulado

Rio	Vazão Total (m³/s)	T (°C)	Altitude (m)	OD saturação (mg/l)	OD (mg/l)	DBO (mg/l)	Fósforo Orgânico (mg/l)	Fósforo Inorgânico (mg/l)
Betim	0,0207	21	852	8,04	3,94	160,4	0,83	1,24
Morro Redondo	0,0080	22	851	7,89	6,85	9,5	0,05	0,08
Água Suja	0,0161	21	860	8,04	5,03	86,0	0,55	0,83

Assim como explicado no item 4.1.4, referente à estimativa das cargas e concentrações dos esgotos domésticos, as condições de contorno também consideram as hipóteses de remoção e decaimento utilizados.

4.2 Calibração do Modelo

Para calibração do modelo, foram feitas diversas simulações visando a obtenção de parâmetros de qualidade da água que mais aproximasse o perfil de qualidade da água simulado dos dados observados. Os dados de qualidade da água observados referem-se às concentrações mínimas e máximas e aos percentis de 25%, 50% e 75% de DBO, OD e fósforo total, do período de julho a setembro entre 2012 e 2017. Na Figura 55, podem ser visualizadas a localização das estações de qualidade de água consideradas na calibração do modelo.

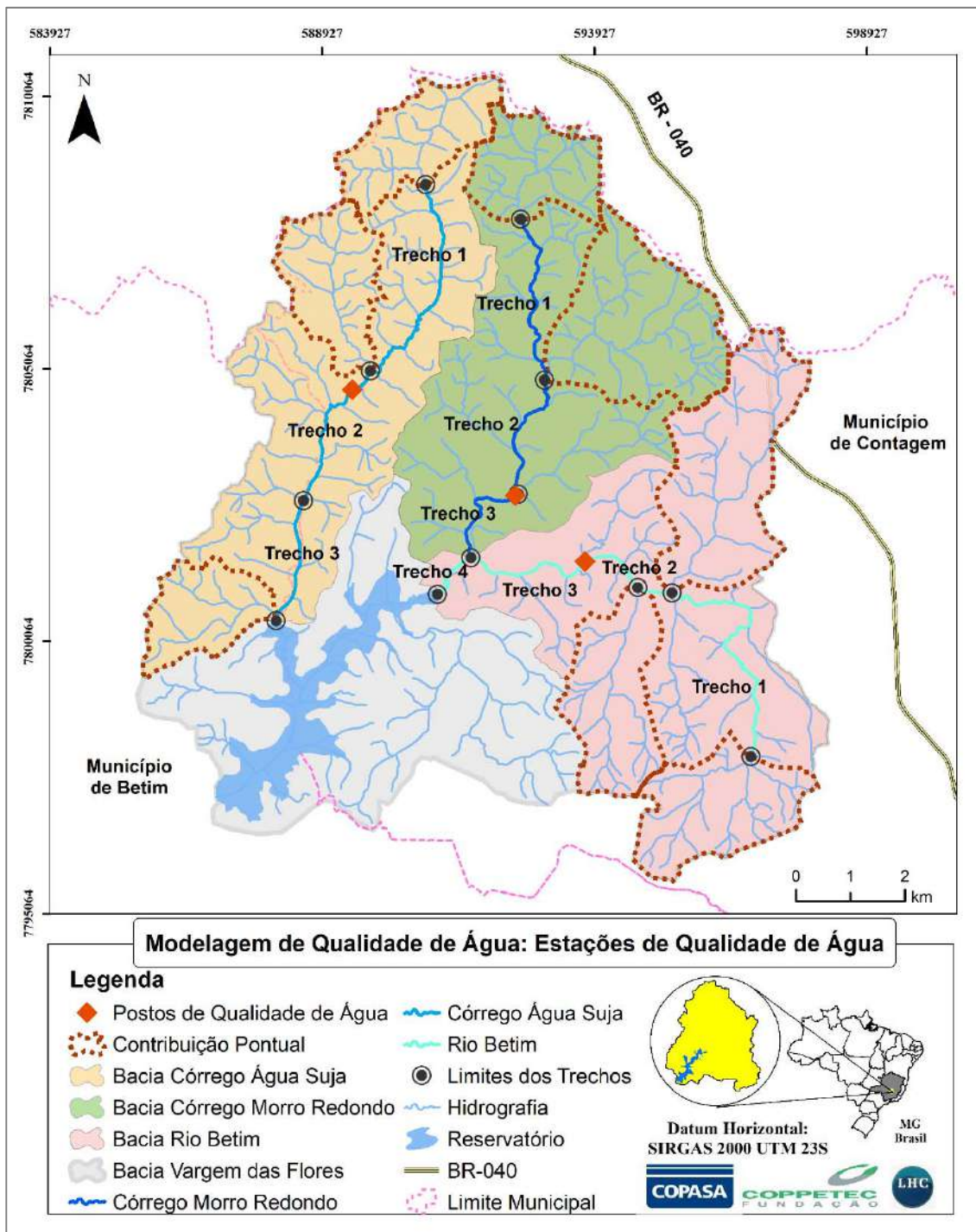


Figura 55 – Localização das Estações de Qualidade de Água nas Principais Bacias Contribuintes ao Reservatório

Os coeficientes utilizados na calibração do modelo de qualidade de água foram estimados segundo Von Sperling (2007) e são apresentados na Tabela 28. Para o coeficiente de reaeração (K_2), foram atribuídos valores de forma a obter o melhor ajuste aos dados observados. Os valores obtidos foram comparados com os valores calculados por Von Sperling (2007) para o rio Betim, em Betim, utilizando uma abordagem de correlação entre a vazão do curso d'água e K_2 (Equação (9)), baseada na equação de Owens *et. al* (Equação (10)).

$$K_2 = m \cdot Q^n \quad (9)$$

$$K_2 = 5,3 v^{0,67} H^{-1,85} \quad (10)$$

Tabela 28 – Coeficientes de Desoxigenação (K_1), de Decomposição (K_d), de Remoção de DBO por Sedimentação (K_s), de Sedimentação do P orgânico (K_{spo}), de Conversão do P orgânico em P inorgânico (K_{oi}) e de Reaeração (K_2) utilizados na calibração do modelo

Rio	K_1 (d^{-1})	K_d (d^{-1})	K_s (d^{-1})	K_{spo} (d^{-1})	K_{oi} (d^{-1})	K_2 (d^{-1})
Betim	0,25	0,40	0,05	0,05	0,2	8,0
Morro Redondo	0,20	0,70	0,30	0,05	0,2	8,0
Água Suja	0,45	1,0	0,35	0,05	0,2	10,0

Para melhor visualização, os resultados obtidos na etapa de calibração são apresentados por curso d'água considerado, nos tópicos a seguir.

4.2.1 Rio Betim

A Figura 56 apresenta o trecho modelado do rio Betim, indicando o ponto inicial da calibração ou condição de contorno (km 0,0), o ponto final na entrada do reservatório de Vargem das Flores (km 11,0) e a localização da estação de qualidade da água (km 7,6).

Na Tabela 29, são apresentados os valores mínimos, máximos e percentis de 25%, 50% e 75% dos dados observados para DBO, OD e Fósforo Total e os respectivos valores de concentração obtidos na modelagem do Rio Betim, para fins de comparação.

Os perfis longitudinais de concentração de DBO, OD e Fósforo Total do Rio Betim são apresentados na Figura 57, na Figura 58 e na Figura 59, respectivamente. Destaca-se que, nesses gráficos, o ponto inicial (km 0,0) é o início do trecho modelado e o ponto final (km 11,0) o final da modelagem na chegada do reservatório, conforme Figura 56.

Tabela 29 – Comparação entre os valores mínimos, máximos e percentis dos dados observados e os dados obtidos na modelagem – Rio Betim

		Rio Betim						
DBO (mg/l) Observado	DBO (mg/l) Obtido	P (mg/l) Observado	P (mg/l) Obtido	OD (mg/l) Observado	OD (mg/l) Obtido			
Mínimo	14,95	Mínimo	0,771	Mínimo	0,00			
Q25%	41,03	Q25%	1,117	Q25%	0,00			
Q50%	144,86	99,0	Q50%	1,632	1,39	Q50%	0,25	1,09
Q75%	198,93		Q75%	2,003		Q75%	3,16	
Máximo	208,03		Máximo	2,421		Máximo	5,37	

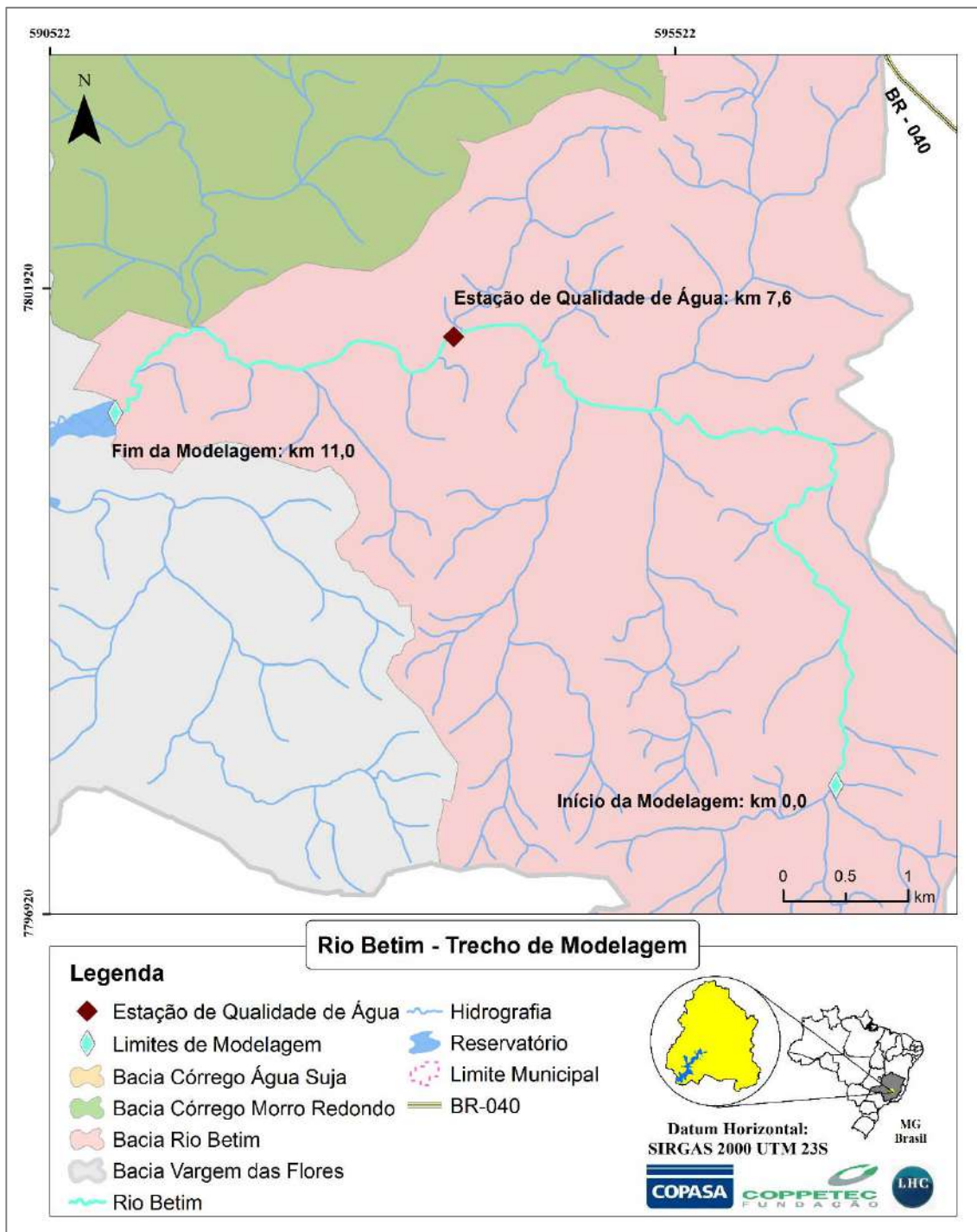


Figura 56 – Rio Betim: Localização do início e do fim da modelagem e da estação de qualidade da água

Rio Betim- Perfil Longitudinal de Concentração de DBO (mg/L)

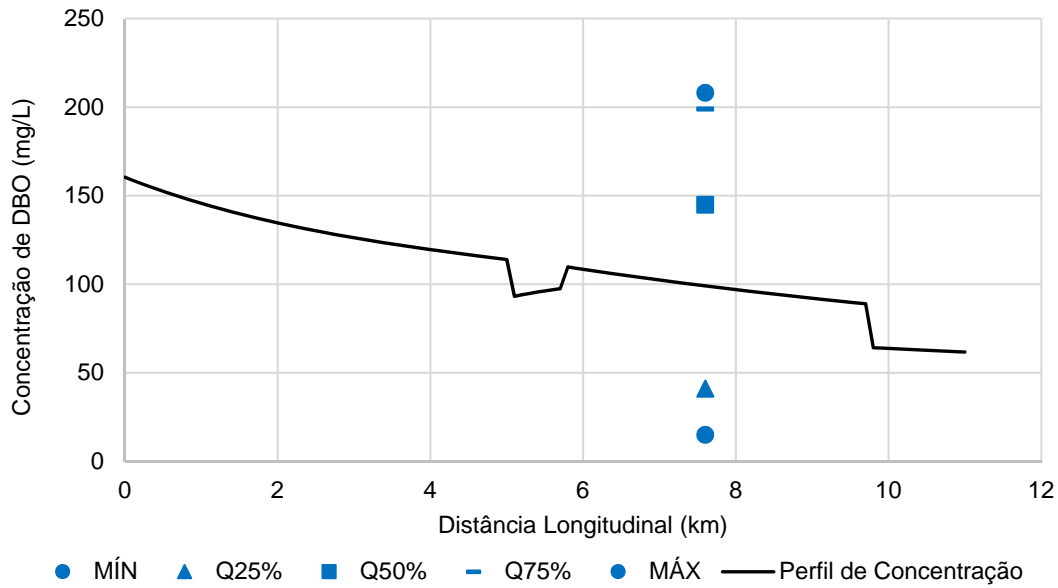


Figura 57 – Perfil Longitudinal de Concentração de DBO (mg/L) no Rio Betim

Rio Betim- Perfil Longitudinal de Concentração de OD (mg/L)

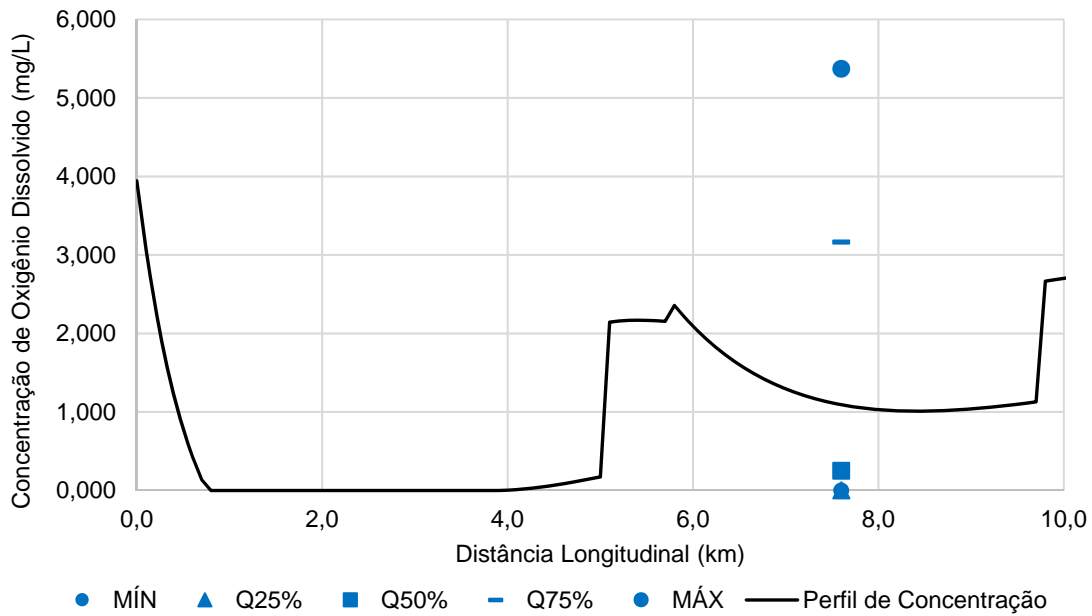


Figura 58 - Perfil Longitudinal de Concentração de OD (mg/L) no Rio Betim

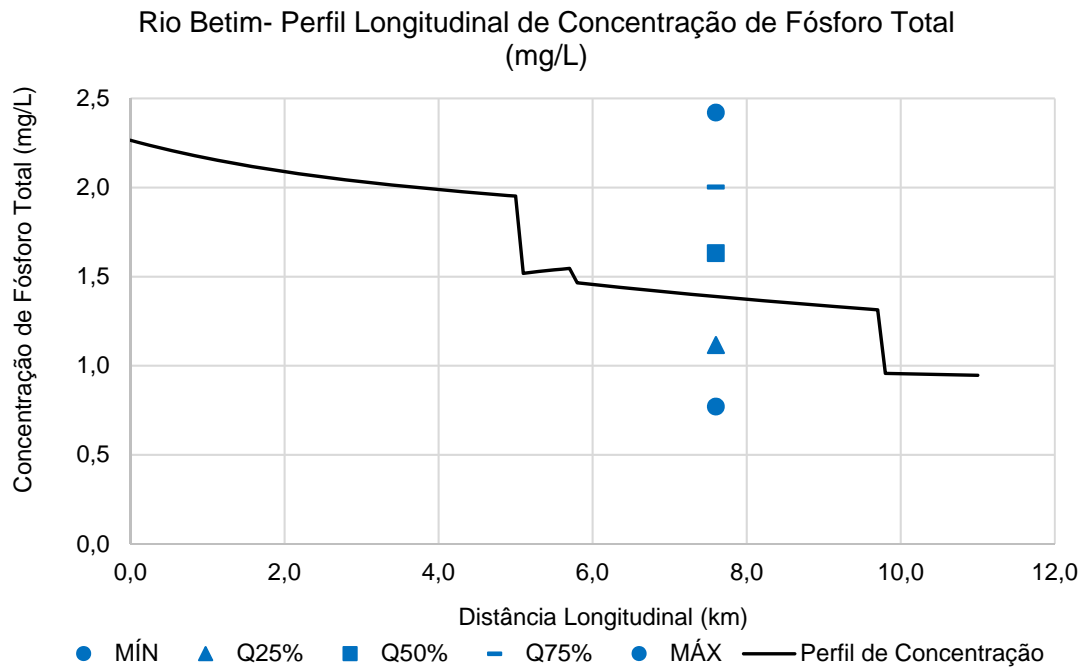


Figura 59 - Perfil Longitudinal de Concentração de Fósforo Total (mg/L) no Rio Betim

As concentrações de DBO do rio Betim (Figura 57) encontram-se fora de classe ao longo de todo o rio, indicando um grave comprometimento em relação a poluição por matéria orgânica. O valor obtido na calibração no local da estação de qualidade da água encontra-se entre a faixa dos percentis de 50% e 25% dos dados observados, indicando um bom ajuste.

Já o OD (Figura 58), apresenta concentrações com valores baixos ao longo de praticamente todo o rio Betim. Os valores simulados também estão entre a faixa dos percentis de 25% e 50%, mostrando um bom ajuste.

Em relação aos resultados obtidos para o Fósforo total, Figura 59, observa-se que a concentração simulada está cerca de 15% inferior ao percentil de 50% dos dados observados, mostrando um excelente ajuste para esse parâmetro.

4.2.2 Córrego Morro Redondo

A Figura 60 apresenta o trecho modelado do córrego Morro Redondo, onde são indicados o ponto inicial da calibração ou condição de contorno (km 0,0), o ponto final na confluência com o rio Betim (km 8,2) e a localização da estação de qualidade da água (km 6,5).

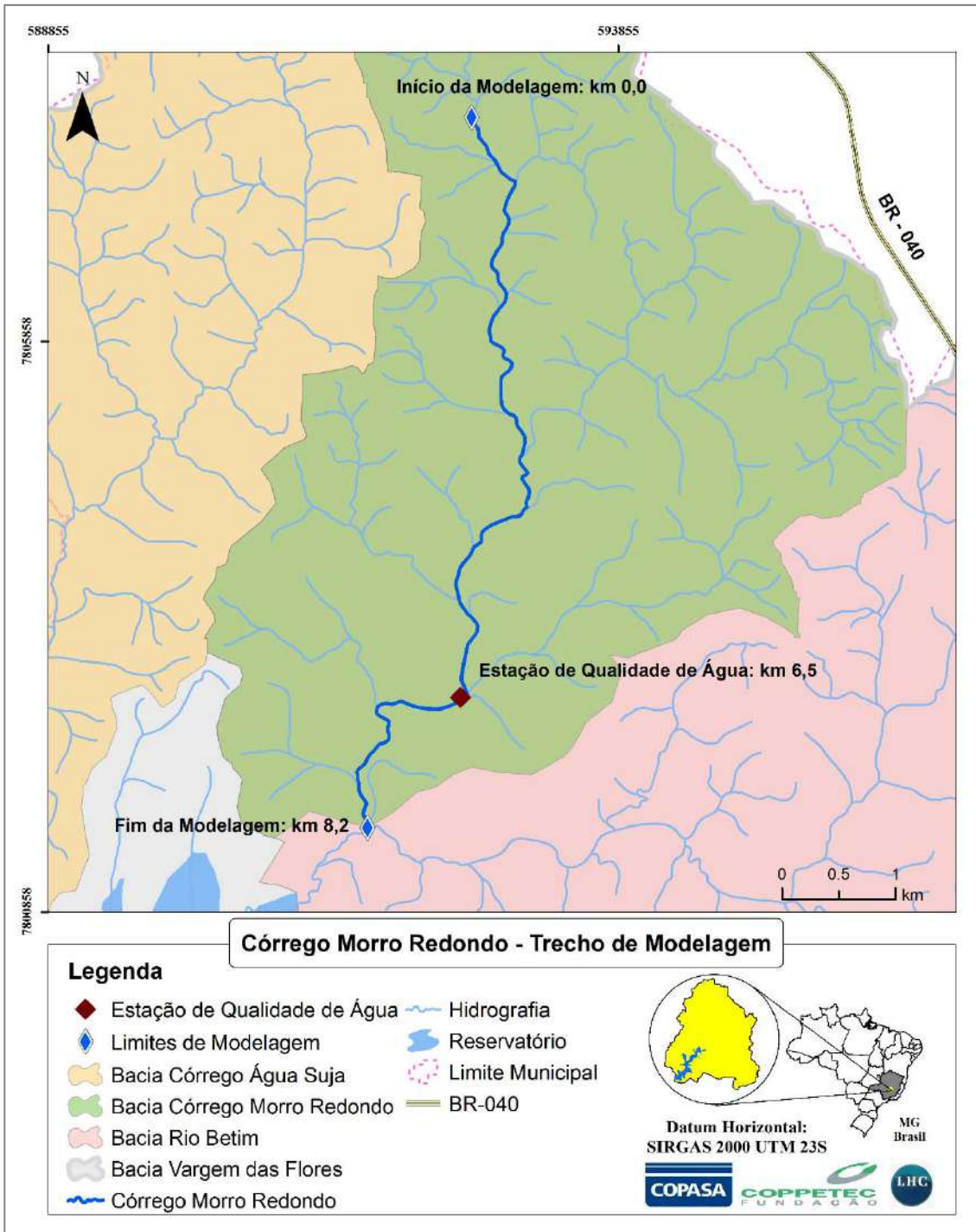


Figura 60 – Córrego Morro Redondo: Localização do início e do fim da modelagem e da estação de qualidade da água

Na Tabela 30, são apresentados os valores mínimos, máximos e percentis de 25%, 50% e 75% dos dados observados para DBO, OD e Fósforo Total e os respectivos valores de concentração obtidos na modelagem do Córrego Morro Redondo, para fins de comparação.

Os perfis longitudinais de concentração de DBO, OD e Fósforo Total do Córrego Morro Redondo são apresentados na Figura 61, Figura 62 e na Figura 63, respectivamente. Destaca-se que, nesses gráficos, o ponto inicial (km 0,0) é o início do trecho modelado e o ponto final (km 8,2) o final da modelagem na confluência com o rio Betim, conforme Figura 60.

Tabela 30 - Comparação entre os valores mínimos, máximos e percentis dos dados observados e os dados obtidos na modelagem – Córrego Morro Redondo

Córrego Morro Redondo								
DBO (mg/l) Observado	DBO (mg/l) Obtido	P (mg/l) Observado	P (mg/l) Obtido	OD (mg/l) Observado	OD (mg/l) Obtido			
Mínimo	5,03	Mínimo	0,01	Mínimo	5,06			
Q25%	7,52	Q25%	0,01	Q25%	5,20			
Q50%	11,17	10,8	Q50%	0,03	0,13	Q50%	5,85	6,29
Q75%	27,41	Q75%	0,08	Q75%	6,50			
Máximo	67,70	Máximo	0,15	Máximo	6,64			

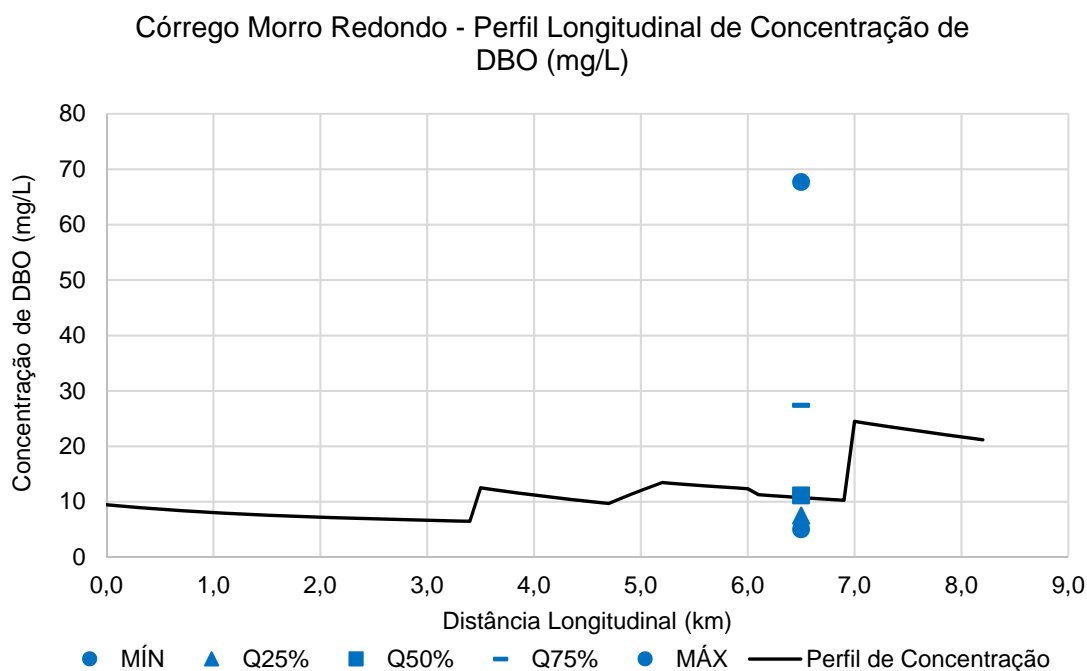


Figura 61 - Perfil Longitudinal de Concentração de DBO (mg/L) no Córrego Morro Redondo

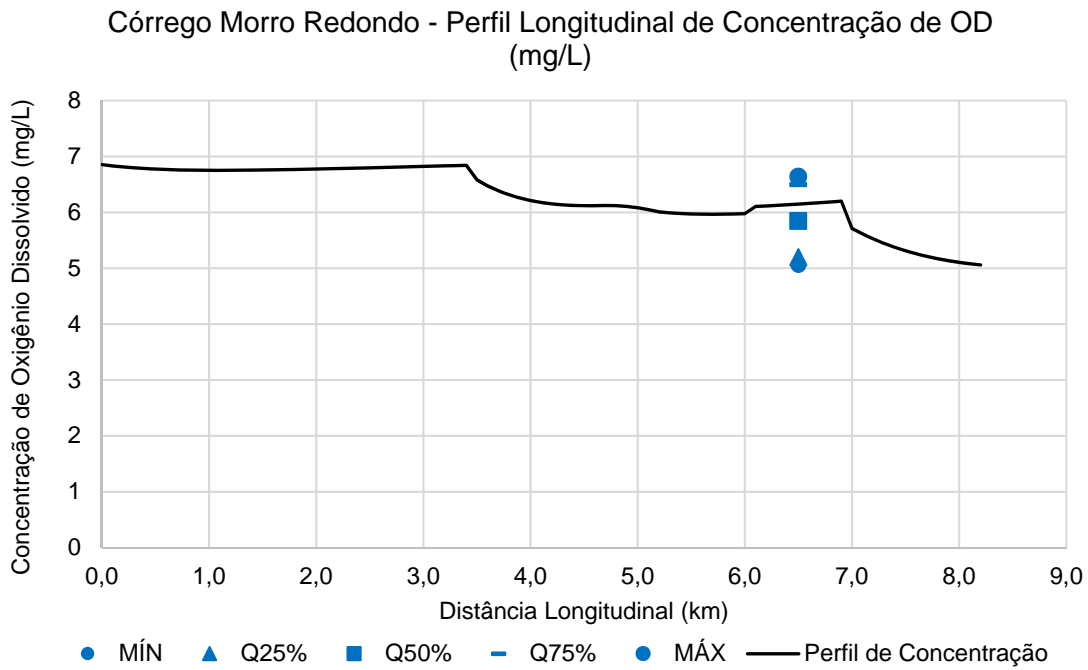


Figura 62 - Perfil Longitudinal de Concentração de OD (mg/L) no Córrego Morro Redondo

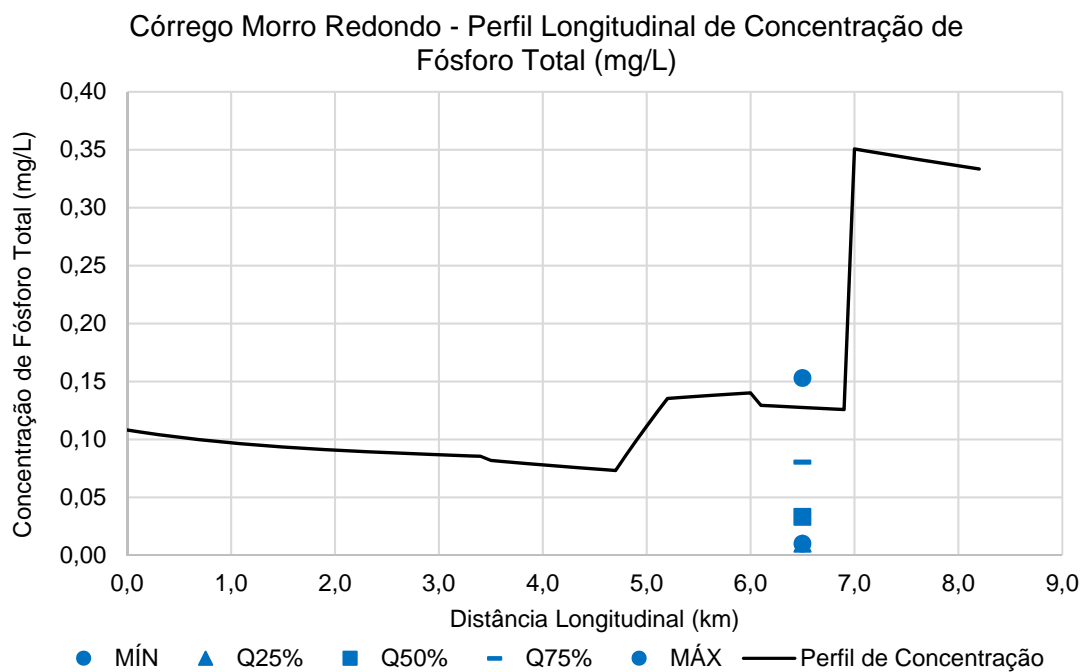


Figura 63 - Perfil Longitudinal de Concentração de Fósforo Total (mg/L) no Córrego Morro Redondo

As concentrações de DBO e OD do córrego Morro Redondo (Figura 61 e Figura 62) obtidos na calibração do modelo apresentam, no local da estação de qualidade da água, um excelente ajuste entre os dados observados e simulados. O valor da DBO está próximo ao percentil de 50% e o de OD encontra-se entre a faixa dos percentis de 50% e 75%.

Em relação aos resultados obtidos para o Fósforo total, Figura 63, observa-se que a simulação apresentou valores elevados para esse parâmetro. No entanto, a concentração obtida no local da estação de qualidade de água encontra-se abaixo do valor máximo observado.

4.2.3 Córrego Água Suja

A Figura 64 apresenta o trecho modelado do córrego Água Suja, indicando o ponto inicial da calibração ou condição de contorno (km 0,0), o ponto final na entrada do reservatório de Vargem das Flores (km 9,9) e a localização da estação de qualidade da água (km 5,3).

Na Tabela 31, são apresentados os valores mínimos, máximos e percentis de 25%, 50% e 75% dos dados observados para DBO, OD e Fósforo Total e os respectivos valores de concentração obtidos na modelagem do Córrego Água Suja, para fins de comparação.

Os perfis longitudinais de concentração de DBO, OD e Fósforo Total do Córrego Água Suja são apresentados na Figura 65, Figura 66 e na Figura 67, respectivamente. Destaca-se que, nesses gráficos, o ponto inicial (km 0,0) é o início do trecho modelado e o ponto final (km 9,9) o final da modelagem na chega'da do reservatório conforme Figura 64.

Tabela 31 - Comparação entre os valores mínimos, máximos e percentis dos dados observados e os dados obtidos na modelagem – Córrego Água Suja

Córrego Água Suja								
DBO (mg/l) Observado	DBO (mg/l) Obtido	P (mg/l) Observado	P (mg/l) Obtido	OD (mg/l) Observado	OD (mg/l) Obtido			
Mínimo	8,91	Mínimo	0,01	Mínimo	0,44			
Q25%	11,62	Q25%	0,78	Q25%	2,00			
Q50%	20,65	47,3	Q50%	1,19	1,20	Q50%	2,87	2,83
Q75%	25,07	Q75%	1,73	Q75%	3,72			
Máximo	139,70	Máximo	2,39	Máximo	4,81			

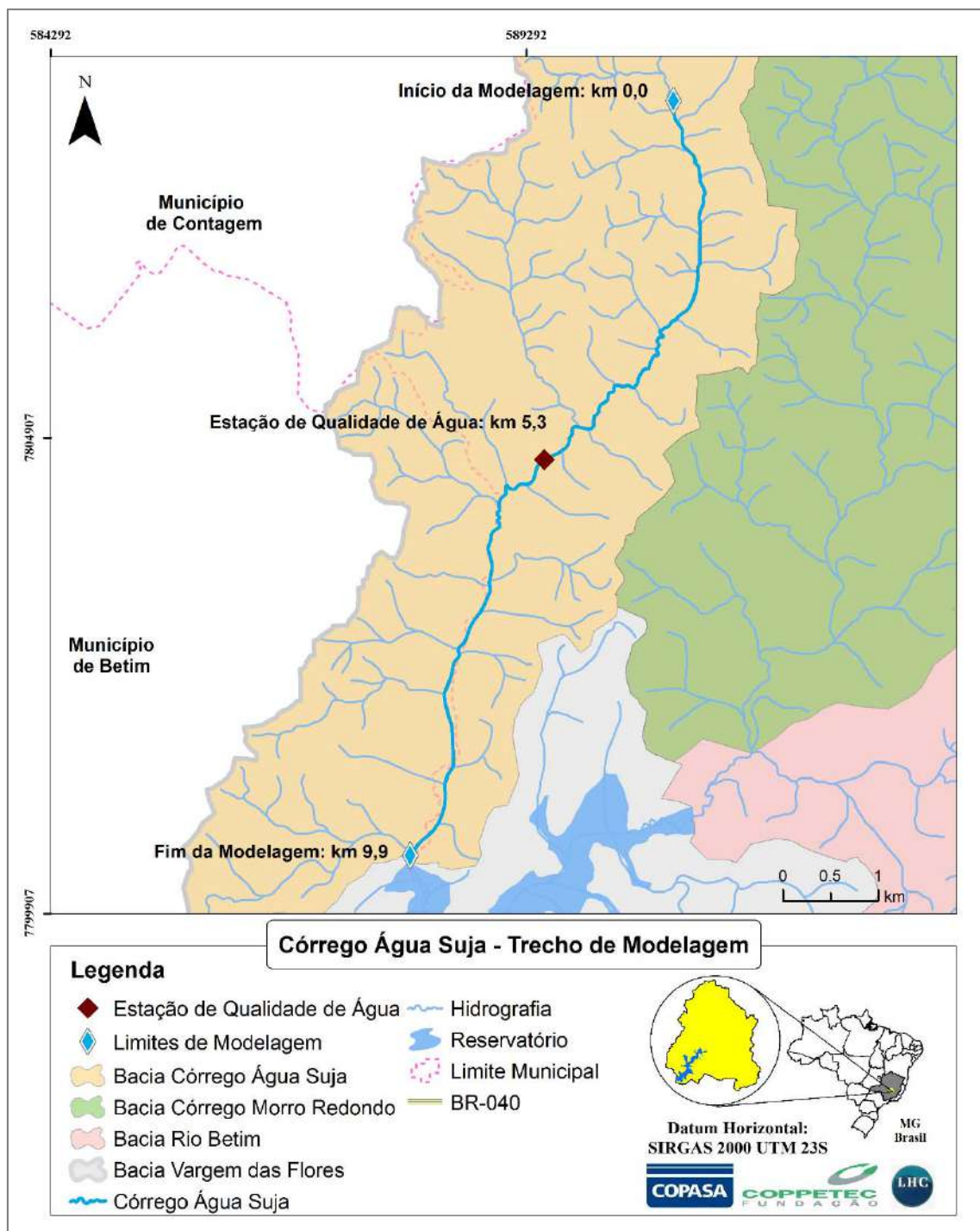


Figura 64 - Córrego Água Suja: Localização do início e do fim da modelagem e da estação de qualidade da água

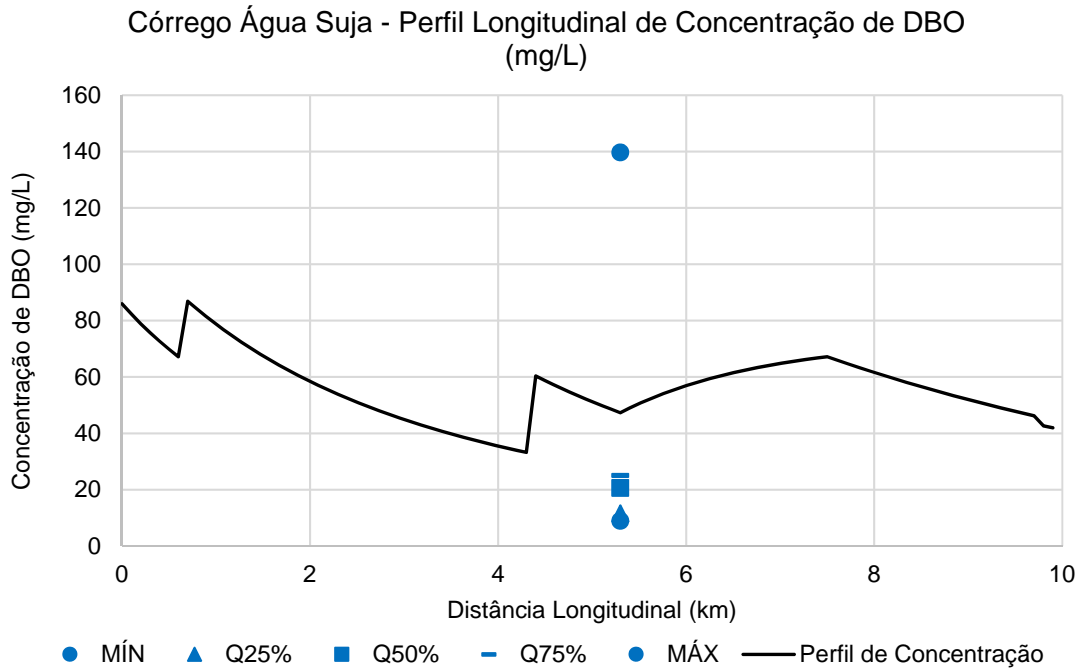


Figura 65 - Perfil Longitudinal de Concentração de DBO (mg/L) no Córrego Água Suja

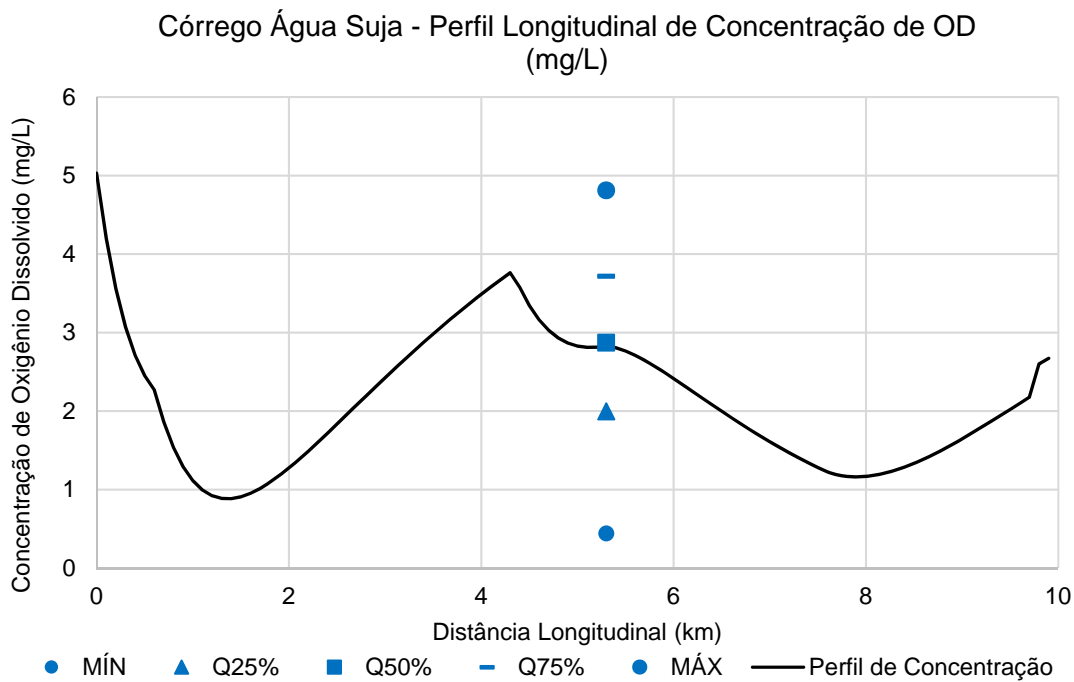


Figura 66 - Perfil Longitudinal de Concentração de OD (mg/L) no Córrego Água Suja

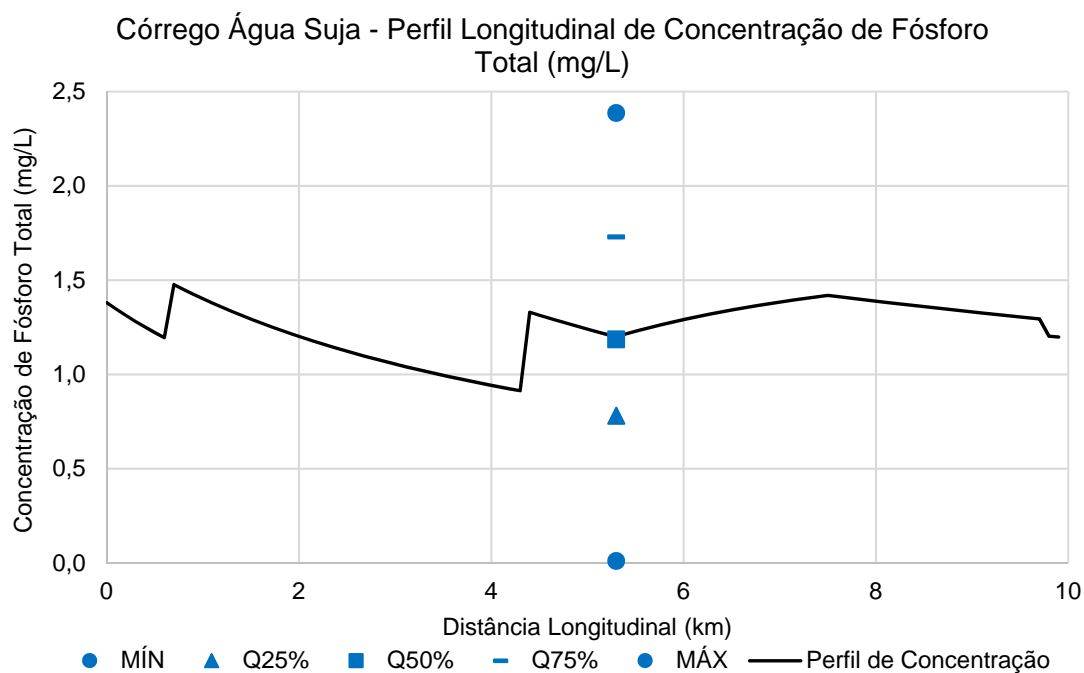


Figura 67 - Perfil Longitudinal de Concentração de Fósforo Total (mg/L) no Córrego Água Suja

Em relação aos resultados obtidos para a DBO, Figura 65, observa-se que a simulação apresentou valores elevados para esse parâmetro, superiores ao percentil de 75% dos dados observados, indicando um processo contínuo de poluição por matéria orgânica. No entanto, a concentração obtida no local da estação de qualidade de água encontra-se abaixo do valor máximo observado.

As concentrações de OD e Fósforo total do córrego Água Suja (Figura 66 e Figura 67) obtidos na calibração do modelo apresentam, no local da estação de qualidade da água, um excelente ajuste entre os dados observados e simulados. Os valores simulados estão próximos ao percentil de 50%.

4.2.4 Análise dos resultados

Os resultados da modelagem mostram uma boa aderência entre o perfil simulado de DBO, oxigênio dissolvido e fósforo total e os valores máximos, mínimos e percentis dos dados observados no período de 2012 e 2017.

Observa-se que a concentração de DBO simulada para o rio Betim (Figura 57) é inferior ao percentil de 50%. No entanto, encontra-se acima do percentil de 25% e dentro dos limites de valores observados. O mesmo ocorre no córrego Água Suja também em relação à DBO (Figura 65). Neste caso, o valor simulado foi superior ao percentil de 75%, mas encontra-se no interior da faixa de dados observados. No córrego Morro Redondo, Figura 61, os valores simulados estão próximos ao percentil de 50%, mostrando um bom ajuste para DBO.

No que diz respeito ao fósforo total, os resultados da calibração apresentam um bom ajuste para o rio Betim e Água Suja (Figura 59 e Figura 67), com valores bem próximos dos percentis de 50%. No córrego Morro Redondo, os valores resultantes da simulação (Figura 63) são elevados em comparação com os dados observados, mas encontram-se dentro da faixa de valores observados.

O oxigênio dissolvido apresentou bom ajuste em todos os rios simulados (Figura 58, Figura 62 e Figura 66).

Vale ressaltar que uma grande parte dos dados utilizados para a calibração do modelo, tais como cargas e vazões de esgoto e vazões dos rios, foi determinada através de métodos indiretos e critérios simplificados de cálculo.

Por exemplo, as vazões observadas nos cursos d'água simulados não são contínuas no tempo (apenas medições de descarga esporádicas) e estão disponíveis apenas para o período de 1992 a 2004. Assim sendo, foi necessário adotar uma metodologia simplificada para determinar as vazões do cenário atual. Visto que as concentrações observadas nas estações de qualidade da água estão diretamente relacionadas as vazões no local de observação e essas vazões foram calculadas por meio indireto, é importante lembrar que os resultados da modelagem trazem em si uma certa imprecisão.

No entanto, o presente trabalho procurou reduzir essas imprecisões, adotando metodologias e critérios de acordo com a literatura técnica, de forma a melhor representar as condições de qualidade da água nos rios em estudo. Desta forma, com os resultados aqui encontrados será possível avaliar impactos relacionados aos cenários futuros de uso e ocupação do solo nas bacias e, com isso, o impacto consequente no reservatório de Vargem das Flores.

5 Estimativa do aporte de sedimentos ao reservatório

Neste relatório, serão apresentados os parâmetros obtidos para calcular o aporte de sedimentos à bacia do Reservatório Vargem das Flores por meio da Equação Universal de Perda de Solos Revisada (RUSLE - *Revised Universal Soil Loss Equation*), considerada um modelo adequado para a previsão de perda de solo devido à sua fácil aplicabilidade e a confiabilidade das estimativas obtidas (Williams & Berndt, 1977; Oliveira *et al.*, 2012).

A fórmula RUSLE é baseada na relação expressa na equação (11), a seguir (Renard *et al.*, 1996):

$$A = R K L S C P \quad (11)$$

Com

- A – Perda de solo por unidade de área (t/ha)
- R – Fator de erosividade da chuva (t.m/ha)(mm/h)
- K – Fator de erodibilidade do solo (t/ha)/[(t.m/ha)(mm/h)]
- L – Fator topográfico que expressa o comprimento do declive (m)
- S – Fator topográfico que expressa a declividade do terreno ou grau do declive (adimensional)
- C – Fator que expressa uso e manejo do solo (adimensional)
- P – Fator que expressa a prática conservacionista do solo (adimensional)

Portanto, para a aplicação da Equação Universal de Perda de Solo são necessárias as seguintes informações:

- ✓ informações de erosividade;
- ✓ características do solo;
- ✓ dados de erodibilidade dos solos;
- ✓ informações topográficas da bacia;
- ✓ informação de uso e cobertura do solo, tanto para a situação atual, quanto para o passado e cenários futuros.

A RUSLE será calculada para cada uma das células definidas na modelagem hidrológica-hidrodinâmica, fornecendo o aporte de sedimentos para cada cenário desejado. Nos próximos itens, são apresentadas as fontes dos dados de cada parâmetro da equação. Este primeiro relatório mostra os trabalhos preparatórios para a determinação de uma estimativa de sedimentação do reservatório, que será feita no terceiro e último relatório.

5.1 R - Fator de erosividade da chuva

O fator R da equação RUSLE representa a capacidade da chuva de causar erosão. É definido como sendo o produto da energia cinética da chuva (E_c) pela sua máxima intensidade em 30 minutos (I_{30}) (CARVALHO, 2008).

Diante da escassez de registros de pluviógrafos, diversos autores buscaram relacionar o índice de erosão a fatores climáticos de mais fácil medida, que não demandem registros de intensidade de chuva (Lombardi Neto e Moldenhauer, 1992 *apud* Matos, 2015).

As informações de erosividade foram obtidas por meio do programa netErosividade MG® (Moreira *et al.*, 2008), desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos (GPRH) do Departamento de Engenharia Agrícola (DEA) da Universidade Federal de Viçosa (UFV) e que disponibiliza os valores mensais e anual da erosividade da chuva para qualquer localidade do estado de Minas Gerais, possibilitando agilidade na obtenção do fator R da equação.

Os resultados obtidos no programa netErosividade MG® para a localidade de Contagem estão apresentados na Tabela 32.

Tabela 32 – Valores de erosividade para a cidade de Contagem – MG. Fonte: netErosividade MG®

Meses	Erosividade (MJ.mm /h.ha.ano)	
	EI30 (F)	EI30 (W&M)
Janeiro	1.584	1.533
Fevereiro	1.045	1.068
Março	841	797
Abril	295	314
Maio	92	100
Junho	35	36
Julho	24	27
Agosto	32	32
Setembro	137	118
Outubro	519	523
Novembro	1.047	1.080
Dezembro	1.742	1.773
Anual	7.393	7.401
Médio	616,08	616,75

(F) Energia cinética calculada pelo método proposto por Foster *et al.* (1981)

(W&M) Energia cinética calculada pelo método proposto por Wagner e Massambani (1988)

5.2 K – Fator de erodibilidade do solo

A erodibilidade do solo é uma propriedade inerente a cada solo e independe dos demais fatores como chuva, declive, cobertura vegetal, ou manejo (Bertoni & Lombardi Neto, 2014). Para obter o coeficiente de erodibilidade para a bacia do reservatório Vargem das Flores foi utilizado o mapa de solos da UFV (2010), em escala de 1:600.000, que apresenta o tipo de solo para todo o estado de Minas Gerais. A partir de software de geoprocessamento foi extraída a área da bacia de interesse e obtido o tipo do solo por célula de modelagem.

Para a bacia do reservatório Vargem das Flores foram encontrados os tipos de solo apresentados na Tabela 33.

Tabela 33 - Tipos de solo encontrados na bacia do reservatório Vargem das Flores.

Código	Descrição
PVAd8	ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO distrófico típico A moderado textura média/argilosa + LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO distrófico típico A moderado textura argilosa + CAMBISSOLO HÁPLICO distrófico típico A moderado textura siltosa/argilosa; todos fase floresta subcaducifólia, relevo ondulado e forte ondulado.
LVAAd15	LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO distrófico típico A moderado textura argilosa + ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO distrófico típico A moderado textura média/argilosa; ambos fase floresta subperenifólia, relevo suave ondulado e ondulado e forte ondulado.
CXbe9	CAMBISSOLO HÁPLICO eutrófico típico e léptico A moderado textura argilosa + CAMBISSOLO HÁPLICO distrófico típico A moderado textura argilosa + ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO distrófico típico A moderado textura média/ argilosa; todos fase floresta subcaducifólia, relevo ondulado e forte ondulado.
AU	Área Urbana

O mapa da Figura 68 apresenta os tipos de solo encontrados na área de interesse. Para as células que apresentaram mais de um tipo de solo, foi calculado o coeficiente K ponderado. Nas áreas urbanas considerou-se que a erodibilidade é baixa, devido à alta impermeabilização do solo, e o aporte de sedimentos para o reservatório é quase desprezível.

Os valores do coeficiente de erodibilidade (K) utilizados foram obtidos do estudo de Chaves (1994 *apud* Matos, 2015) e estão apresentados na Tabela 34. Segundo Matos (2015), Chaves (1994) desenvolveu um modelo de regressão para os solos que ocorrem na bacia do Rio São Francisco, tendo como base os dados de K obtidos para os solos brasileiros por Denardin (1990), proporcionando valores mais fidedignos para a região de interesse.

Tabela 34 - Valores de erodibilidade K (Mg h MJ⁻¹ mm⁻¹)

SOLO	SIGLA	K (Mg h MJ ⁻¹ mm ⁻¹)
Latossolo Vermelho Amarelo	LVAAd	0,020
Cambissolo Háplico	CXbd	0,060
Argissolo Vermelho	PVd	0,029

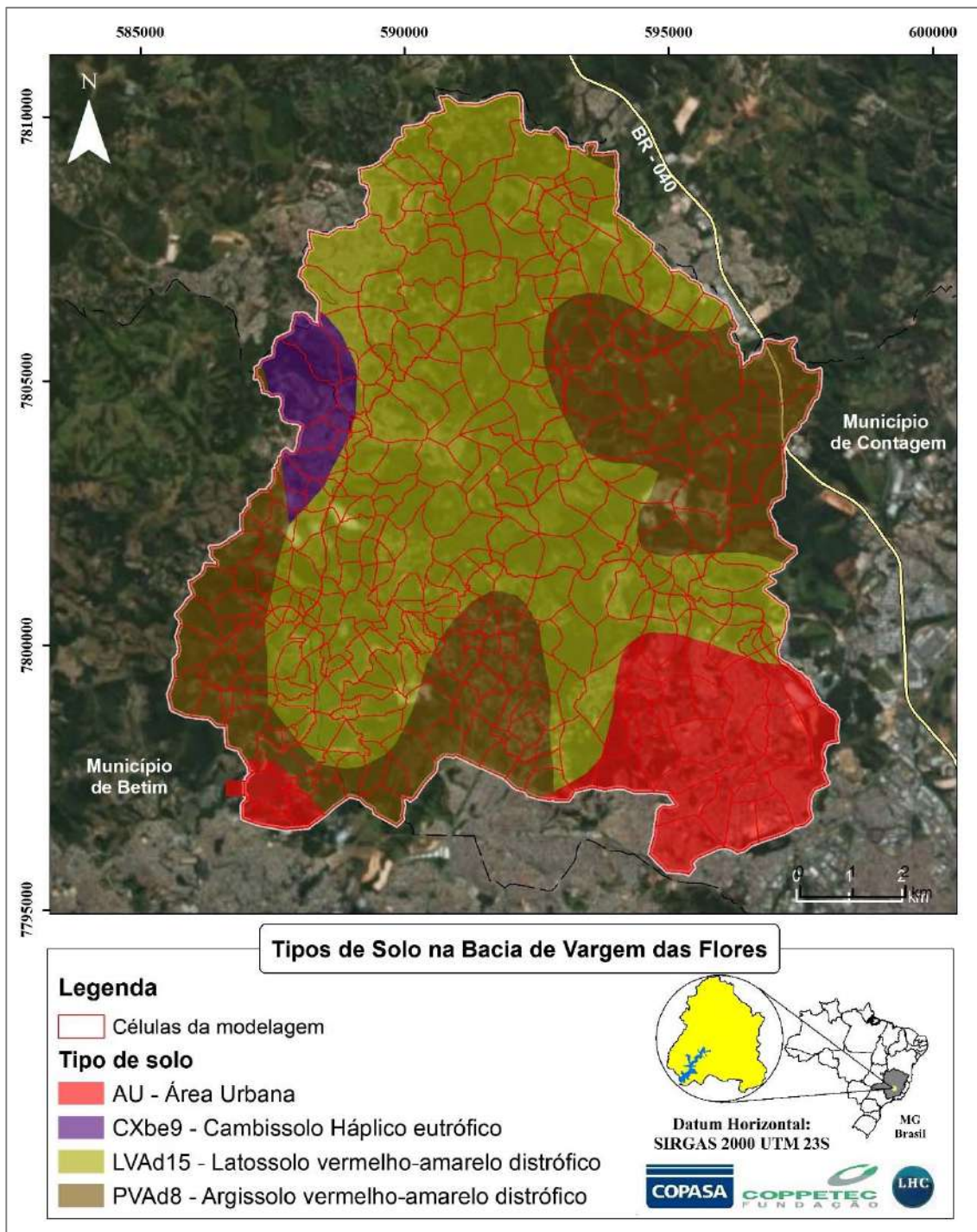


Figura 68 – Tipos de solo presentes na bacia do reservatório Vargem das Flores.

5.3 Fatores topográficos L e S

O fator topográfico, representado na equação por declividade e comprimento do terreno por onde se dá o escoamento, é o fator com uma das maiores influências sobre a erosão e, conseqüentemente, aporte de sedimentos aos corpos d'água (Matos, 2015).

O parâmetro L representa um fator de comprimento da encosta e é a distância do ponto de origem do escoamento até o ponto onde a declividade diminui o suficiente para que se inicie a deposição, ou o escoamento passe a ser concentrado em um canal. O S é um fator topográfico que reflete a influência da inclinação da encosta na erosão. Pode ser medida no local ou estimada pelas curvas de nível na planta.

Esses dois fatores costumam ser utilizados conjugados em um único fator LS, que representa a relação esperada de perda de solo por unidade de área em comparação com a obtida na área padrão de 25m de comprimento e 9% de declividade e é dado pela equação (12) (Bertoni & Lombardi Neto, 2014):

$$LS = (\sqrt{L}/100) \cdot (1,36 + 0,97S + 0,1385S^2) \quad (12)$$

Com

- L – Comprimento do declive, em m;
- S – Declividade da encosta em porcentagem

Nesse caso o fator LS considera a declividade constante e uniforme no trecho, sem concavidade ou convexidade.

Bertoni e Lombardi Neto (2014) usaram dados obtidos nos principais tipos de solo do Estado de São Paulo, em dez anos de observações, e determinaram a equação (13), a seguir:

$$LS = 0,00984L^{0,63}S^{1,18} \quad (13)$$

Com

- L – Comprimento da rampa, em m
- S – Declividade, em porcentagem

Para o presente estudo, os dados topográficos tiveram como fonte a iniciativa TOPODATA, que oferece livre acesso a variáveis geomorfológicas locais derivadas de dados SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*) para todo o território nacional. Esses dados apresentam resolução espacial horizontal de 3 arco-segundos (~90m) e resolução vertical de 1m. Toda a aquisição dos dados SRTM foi planejada para suprir mapeamentos em escalas entre 1:100.000 e 1:250.000 (VALERIANO, 2008).

Para a obtenção dos parâmetros L e S, para a área de interesse, foram, inicialmente, identificadas as áreas de rampa em cada célula, com o uso de software de geoprocessamento. Para tanto, foi criado um *shapfile* de linha que permitiu medir o comprimento e a declividade da rampa. Para as células com mais de uma rampa identificada, foram calculados o comprimento e declividade médios.

5.4 Fator C de uso e manejo do solo

O valor de C representa a cobertura do solo que o protegem contra a ação erosiva da água. Este parâmetro baseia-se em mapas de uso e cobertura do solo determinado a partir de imagens de satélite. Para a obtenção do fator C será considerado o uso e ocupação do solo em cada cenário definido.

Para a identificação do uso e cobertura do solo para cada célula no cenário passado foi utilizado o mapa elaborado por Matos *et al.* (2017) referente ao uso no ano de 1987. Os arquivos *shapefile* foram disponibilizados pela COPASA. Matos *et al.* (2017) utilizaram imagens do satélite Landsat-5 nas quais foram realizadas correções atmosféricas e de radiância. O uso do solo por célula para o cenário passado está apresentado na Figura 69.

O mesmo estudo de Matos *et al.* (2017) mapeou o uso e cobertura do solo para o ano de 2016, utilizando imagens do satélite Landsat-8. Este mapa foi utilizado para o cenário atual da bacia e pode ser visto na Figura 70.

O **Cenário Futuro Macrozoneamento da RMBH** utilizou o zoneamento do Plano Metropolitano da Região Metropolitana de Belo Horizonte – RMBH (ADRMBH, 2017). Os *shapes* e descrição das áreas de zoneamento estão disponibilizados no site do Plano. O mapa da Figura 71 apresenta o uso e cobertura previstos no Plano Metropolitano da RMBH.

O **Cenário Futuro Plano Municipal Contagem** obteve os usos previstos considerando o zoneamento do Plano Diretor da Prefeitura Municipal de Contagem e o Plano Diretor de Betim. Estes usos podem ser vistos na Figura 72.

Neste trabalho o **Fator C** será obtido em conjunto com o **Fator P**, conforme apresentado no item 5.5.

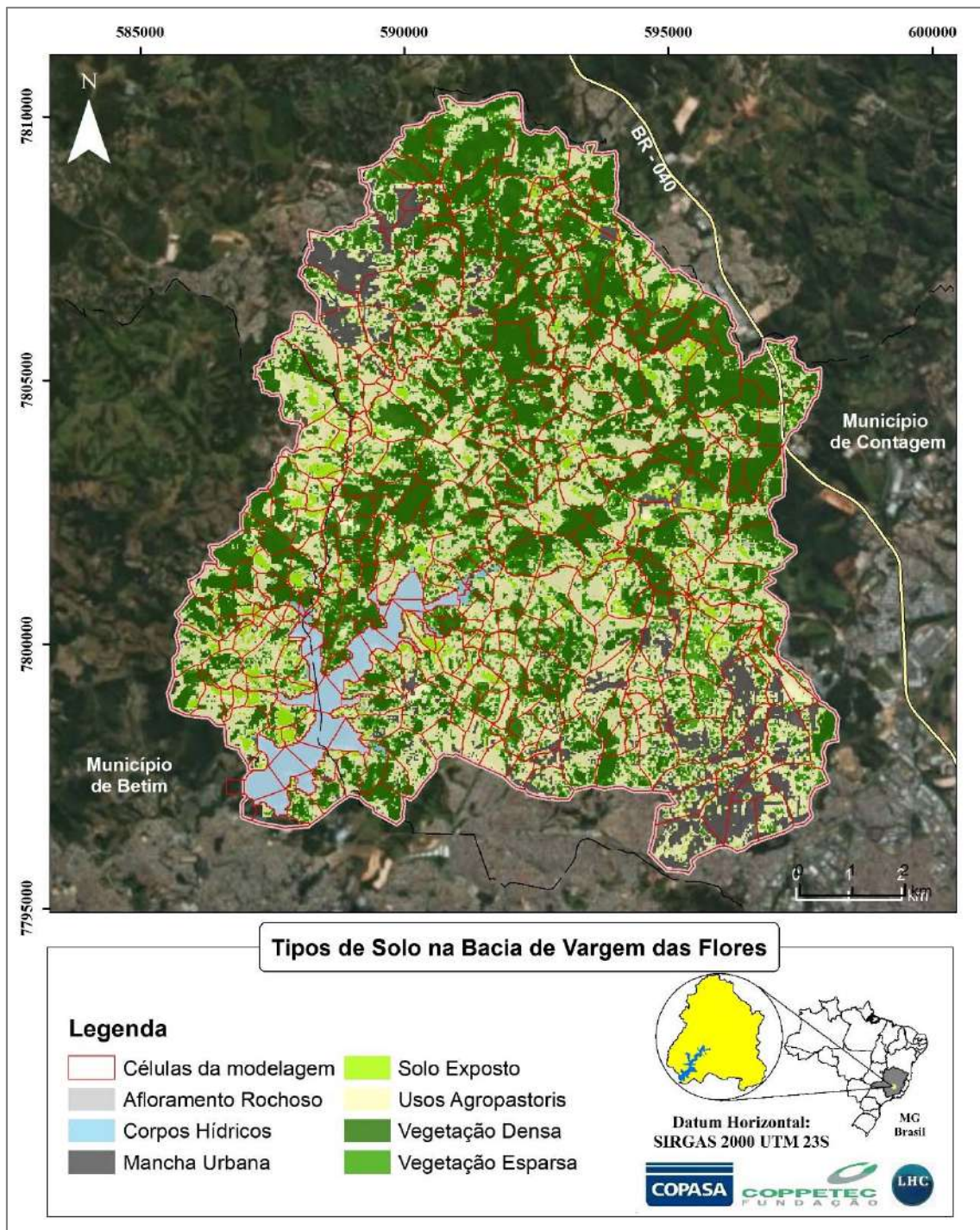


Figura 69 - Mapa do uso e cobertura do solo para o cenário passado, ano de 1987.

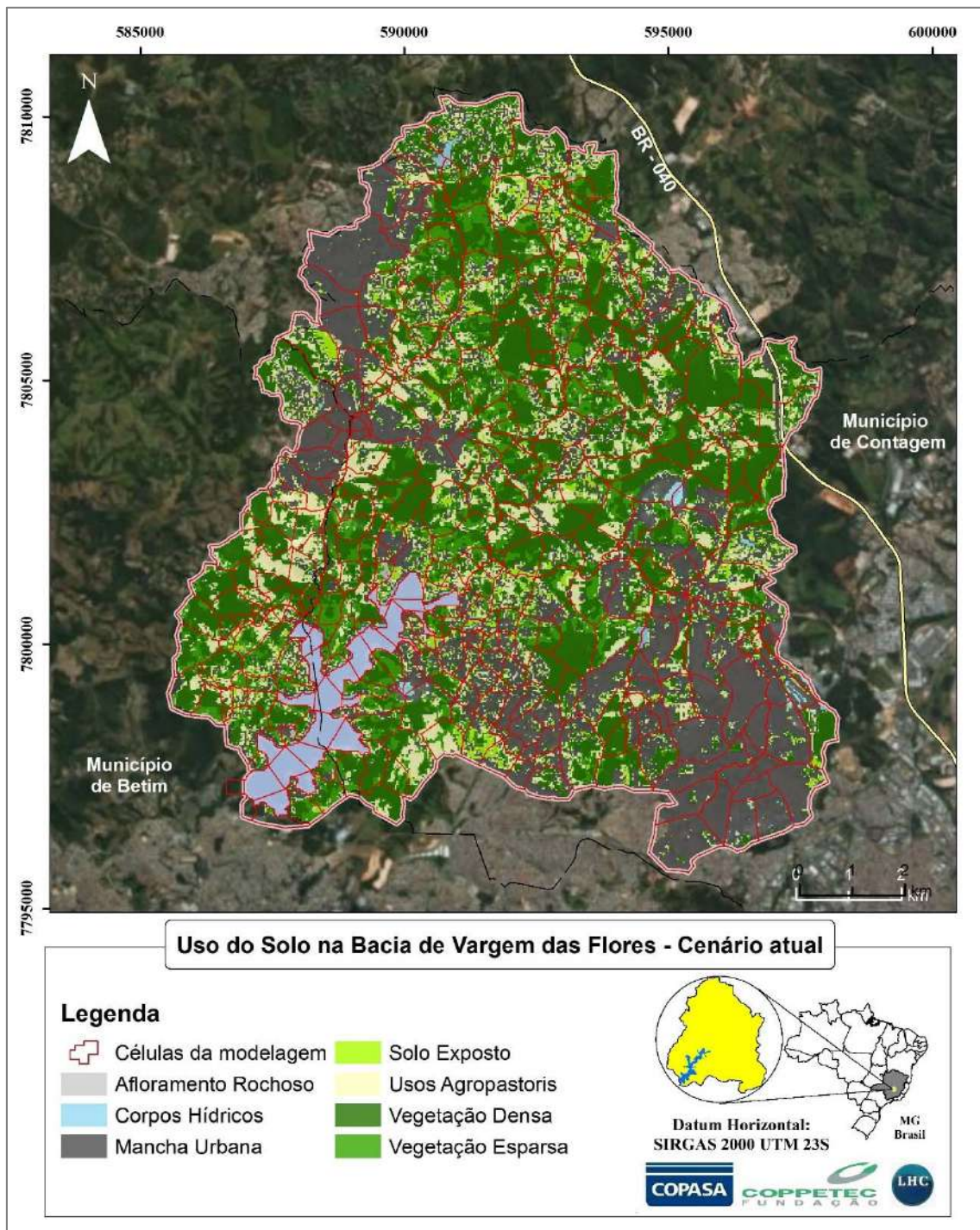


Figura 70 - Mapa do uso e cobertura do solo para o cenário atual, ano de 2016.

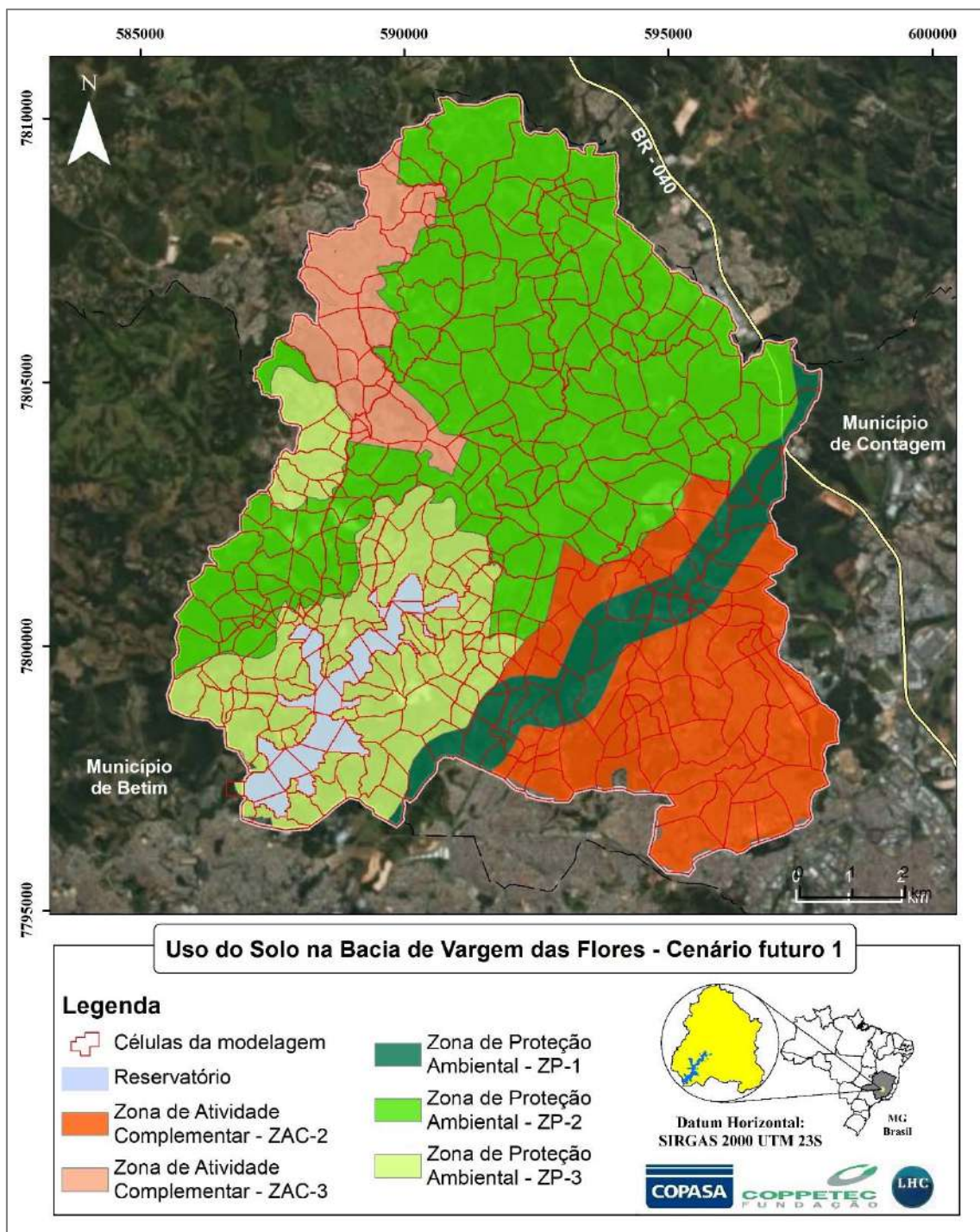


Figura 71 - Mapa de zoneamento previsto pelo PM da RMBH.

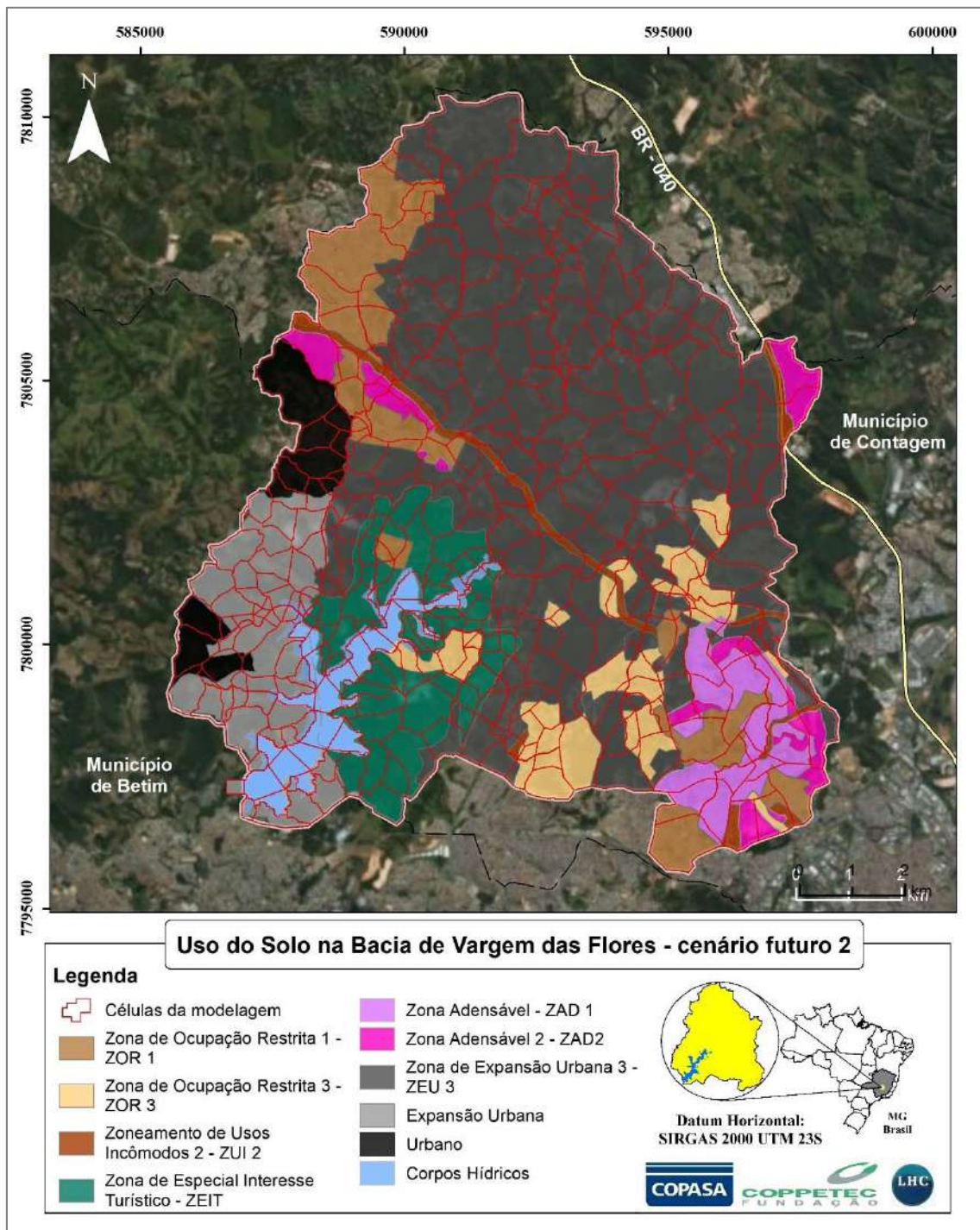


Figura 72 – Mapa de zoneamento previsto pelos Plano Diretor de Contagem e Plano Diretor de Betim.

5.5 Fator P de prática conservacionista do solo.

O fator P expressa as práticas de conservação do solo, que podem reduzir enormemente a perdas do solo (RIGHETO, 1998).

Para este estudo o P poderá ser obtido de acordo com a declividade média da célula ou em conjunto como fator C. Os valores de P (CARVALHO, 2008) estão apresentados na Tabela 35.

Tabela 35 - Valores de P em função da declividade (CARVALHO, 2008).

Declividade (%)	Valor de P
0 - 2	0,60
2 - 7	0,50
7 - 12	0,60
12 - 18	0,80
18 - 24	0,90

Os fatores C e P estão significativamente relacionados e, de acordo com Wischmeier e Smith (1978), devem ser analisados em conjunto, o que é chamado de fator CP. Esse fator pode ser classificado em função do tipo de ocupação e densidade da cobertura vegetal (Stein *et al.*, 1987 *apud* Matos, 2015). Os valores do fator CP estão apresentados na Tabela 36.

Tabela 36 – Valores do fator CP para os tipos de cobertura do solo, de acordo com Stein *et al.* (1987).

Uso do solo	CP
Corpos d'água	0
Mineração	0
Urbano	0
Vegetação Arbórea	0,00004
Silvicultura	0,0001
Vegetação campestre	0,01
Pastagem	0,01
Cultura Temporária	0,2
Solo exposto	0,2

Deverá ser considerado, para as áreas urbanas, um percentual não pavimentado e exposto, tendo em vista que a vegetação original foi removida para ocupação urbana.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os critérios de definição de divisão de um território através do zoneamento, fixando as condições de uso do solo, tem a finalidade de obter um desenvolvimento ordenado e orientar a gestão de problemas territoriais específicos. O zoneamento deve ser realizado levando em consideração parâmetros sociais, econômicos e ambientais e idealizado de forma holística, de forma a evitar futuros problemas originados justamente por uma alteração inadequada de uso do solo.

O município de Contagem possui um complicador em relação à definição de seu zoneamento. Além de todas as variáveis que devem ser observadas para planejar a divisão do seu território em zonas, surge como limitador o fato de estar inserido e interagir com o principal formador da bacia hidrográfica do reservatório de Vargem das Flores, um dos principais para abastecimento de água potável à Região Metropolitana de Belo Horizonte. Por este motivo, parte de seu território foi classificado como Zona de Interesse Metropolitano e o macrozoneamento da RMBH apresenta pontos conflitantes com a presente proposta do Município de Contagem.

Neste relatório foram preparadas todas as bases para uma avaliação de quantidade e qualidade da água no reservatório e foram dados os passos iniciais para a estimativa da produção de sedimentos na bacia.

A partir das simulações realizadas no Cenário Futuro Plano Municipal de Contagem, percebe-se que o impacto no reservatório de Vargem das Flores, caso se materialize a proposta do Plano Municipal de Contagem parece ter um viés negativo. A urbanização tende a diminuir a produção da vazão de base natural que afluí para o reservatório e é extremamente necessária para manter os níveis do reservatório em faixas operacionais durante a estiagem. Além disso, as simulações mostram que a urbanização traria um elevado aporte de esgotamento sanitário ao reservatório, caso mantivesse a tendência atual de atendimento da rede, diminuindo provavelmente a qualidade da água. A simulação de qualidade da água no reservatório, porém, é objeto do terceiro e último relatório.

Em comparação com os resultados do Cenário Futuro Plano Municipal de Contagem, o Cenário Futuro Macrozoneamento da RMBH apresenta menores variações em relação à quantidade de vazão de base natural e com um aporte de esgotamento sanitário menor.

A etapa de modelagem hidrológica/hidrodinâmica foi realizada integralmente nessa fase do trabalho.

A modelagem de qualidade da água cumpriu uma etapa fundamental nessa etapa do trabalho. As medições de qualidade da água, na bacia de montante, nos três principais rios que afluem ao reservatório, Rio Betim, Córrego Morro Redondo e Córrego Água Suja, foram utilizadas para construir um modelo conceitual de funcionamento da bacia, de forma a estabelecer relações e parâmetros de referência, para a conseqüente simulação do reservatório, na próxima etapa de trabalho.

A qualidade da água afluente ao reservatório e seu movimento através do reservatório, será simulada segundo os quatro diferentes cenários de uso e ocupação do solo na bacia contribuinte. a Modelagem de qualidade da água no interior do reservatório será feita de forma unidimensional.

No quesito sedimentos, as variáveis básicas que alimentam a fórmula RUSLE foram especializadas, configurando o primeiro passo para a avaliação da produção de sedimentos, que será também concluída no terceiro relatório.

A Estimativa de aporte de sedimentos ao reservatório também considerará os quatro cenários de uso e ocupação do solo, para estimativa dos possíveis efeitos sobre a vida útil do reservatório de Vargem das Flores.

BIBLIOGRAFIA

AGÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DA REGIÃO METROPOLITANA DE BELO HORIZONTE. RMBH e Colas Metropolitano. Disponível em: <<http://www.agenciarmbh.mg.gov.br/institucional/rmbh-e-colar-metropolitano/>>.

BERTONI, J., LOMBARDI NETO, F., 2014, Conservação do Solo, 9ª Ed., Ícone Editora, São Paulo, SP

CARVALHO, N.O., 2008, Hidrossedimentologia Prática, 2ª. Ed., Editora Interciência, Rio de Janeiro, Brasil.

CHAVES, H. M. L., 1994. Estimativa da erosão atual e potencial no vale do São Francisco: relatório final de consultoria. Brasília: CODEVASF. 35 p.

CONTAGEM, 2017. Lei complementar nº. 26, de 21 de novembro de 2017. Institui o Plano Diretor do Município de Contagem e dá outras providências.

DRTM/SPAM/DVHD, 1999, balanço hídrico do reservatório de Vargem das Flores, Belo Horizonte, MG.

DENARDIN, J.E., 1990. Erodibilidade de solo estimada por meio de parâmetros físicos e químicos. Piracicaba: Tese de Doutorado. ESALQ. 81p.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2000, Censo Demográfico 2000.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2010, Censo Demográfico 2010.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2017, Estimativas da População Residente no Brasil e Unidades da Federação com Data de Referência em 1º de Julho de 2017.

LOMBARDI NETO, F.; MOLDENHAUER, W. C., 1992. Erosividade da chuva: sua distribuição e relação com as perdas de solo em Campinas (SP). *Bragantia*, Campinas, v. 51, n. 2, p.189-196.

MATOS, A.C.S.; LEMOS, R.S.; SILVA, T.F.G.; ELEUTÉRIO, J.C.; NASCIMENTO, N.O., 2017. Evolução do Uso e Ocupação do Solo em Mananciais de Abastecimento Metropolitano na Região Metropolitana de Belo Horizonte, Estado de Minas Gerais. Em: XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2017, Florianópolis. Anais do XXII Simposio Brasileiro de Recursos Hídricos.

MOREIRA, M. C. *et al.*, 2008. Neterosividade MG: erosividade da chuva em Minas Gerais. *R. Bras. Ci. Solo*, n. 32, p. 1349-1353.

PREFEITURA MUNICIPAL DE CONTAGEM, 2013, Plano Municipal de Saneamento Básico de Contagem.

RENARD, K.G., FOSTER, G.A., WEESIES, D.K. *et al.*, 1996, "Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning With the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)", *Agriculture Handbook No. 703*, USDA – United States Department of Agriculture, USA.

SALLA, M. R.; PEREIRA, C. E.; ALAMY FILHO, J. E.; PAULA, L. D.; PINHEIRO, A. M., 2013, Estudo da autodepuração do Rio Jordão, localizado na bacia hidrográfica do Rio Dourados. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 18, n. 2, p. 105-114.

SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, 2002, Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2002.

SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, 2016, Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2016.

STEIN, D. P.; DONZELI, A. F.; GIMENEZ, A. F.; PONÇANO, W. L.; LOMBARDI NETO, F., 1987. Potencial de erosão laminar, natural e antrópico na bacia do Peixe Paranapanema. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROSÃO, 4., São Paulo, 1987. [Anais] São Paulo: ABGE/DAEE, p. 105-136.

TOMAZ, P., 2016, Reservatório de retenção (cap. 62). Curso de Manejo de águas Pluviais, São Paulo, S.P.

UFV, 2010. UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA; FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS; UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS; FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. *Mapa de solos do Estado de Minas Gerais* [Belo Horizonte].

UFMG, 2015. Universidade Federal de Minas Gerais. Macrozoneamento da Região Metropolitana de Belo Horizonte, Produto 5. Agência de Desenvolvimento da Região Metropolitana de Belo Horizonte.

VALERIANO, M. M., 2008. Topodata: guia para utilização de dados geomorfológicos locais. São José dos Campos, SP: INPE: Coordenação de Ensino, Documentação e Programas Especiais (INPE-15318-RPE/818). 72p.

VON SPERLING, M., 2007, Estudos e Modelagem da Qualidade da Água de Rios. DESA/UFMG. MATOS, T. V. S., 2015. Determinação de Áreas de Vulnerabilidade à Erosão Hídrica com Base na Equação Universal de Perda de Solo (Usle). Dissertação de Mestrado. Programa de pós-graduação em saneamento – UFMG.

WILLIAMS, J.R., BERNDT, H.D., 1977, "Sediment Yield Prediction Based on Watershed Hydrology", Transactions of the ASAE Vol. 20 (6), pp. 1100-1104, American Society of Agricultural Engineers, USA.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. 1978. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. Washington: USDA. 58 p. (Agriculture Handbook, 537)

ANEXO A. Relatório do netErosividade MG® para Contagem

Relatório - Erosividade da chuva para o Estado de Minas Gerais

Imprimir Fechar

RELATÓRIO

Erosividade da chuva para o Estado de Minas Gerais

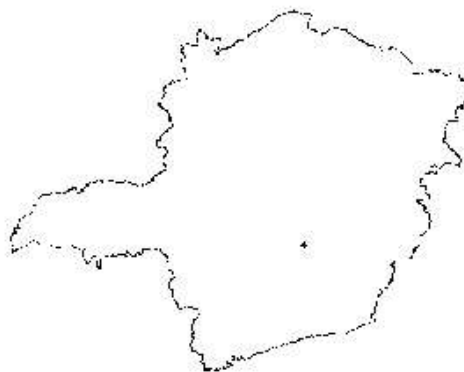
LOCALIZAÇÃO

Localidade: Belo Horizonte

Latitude: 19°55'47"

Longitude: 44°02'59"

Altitude: 878 m



VALORES DE EROSIVIDADE

	KE>25 (F)	KE>25 (W&M)	EI ₃₀ (F)	EI ₃₀ (W&M)
	MJ ha ⁻¹ ano ⁻¹		MJ mm h ⁻¹ ha ⁻¹ ano ⁻¹	
Janeiro	16,55	15,72	1.584	1.533
Fevereiro	11,40	10,78	1.045	1.068
Março	8,90	8,72	841	797
Abril	2,56	2,95	295	314
Mai	0,54	0,53	92	100
Junho	0,01	0,01	35	36
Julho	0,01	0,00	24	27
Agosto	0,02	0,01	32	32
Setembro	0,24	0,61	137	118
Outubro	5,36	4,79	519	523
Novembro	10,82	13,07	1.047	1.080
Dezembro	17,87	16,05	1.742	1.773
Anual	74,28	73,23	7.395	7.401

(F) Energia cinética calculada pelo método proposto por Foster et al. (1981)

(W&M) Energia cinética calculada pelo método proposto por Wagner & Massambani (1988)

Relatório gerado pelo netErosividade MG em 31/07/2018.

Avaliação da Vida Útil do Reservatório de Vargem das Flores

Rio de Janeiro, 14 de setembro de 2018

Prof. Marcelo Gomes Miguez
Coordenador do Projeto

Prof^a. Cláudia do Rosário Vaz Morgado
Diretora da Escola Politécnica / UFRJ

Fernando Alves Rochinha
Diretor Superintendente da Fundação COPPETEC

RELATÓRIO TÉCNICO

Avaliação da vida útil do reservatório de Vargem das Flores

R3 – Relatório Final – rev2

**RESULTADOS FINAIS DA MODELAGEM DE QUALIDADE DA
ÁGUA E SEDIMENTOS E INTERPRETAÇÃO DA CONDIÇÃO DA
QUALIDADE DA ÁGUA NO RESERVATÓRIO DE VARGEM DAS
FLORES E DA ESTIMATIVA DE SUA VIDA ÚTIL, PARA OS
CENÁRIOS FUTUROS DO MACROZONEAMENTO
METROPOLITANO E DO PLANO MUNICIPAL DE CONTAGEM.**

Executora



Cliente



Rio de Janeiro, dezembro de 2018

Apresentação

Este terceiro relatório (R3) apresenta a etapa final dos trabalhos iniciados com o Relatório Parcial 1 (R1), que apresentou o plano de trabalho, seguido pelo Relatório Parcial 2 (R2), que desenvolveu e apresentou a modelagem hidrológica e hidrodinâmica, em versão final, bem como os resultados de calibração para o modelo de qualidade da água dos rios que afluem ao reservatório Vargem das Flores e as etapas preliminares da análise da produção de sedimentos na bacia, dentro de um contexto de estudo que visa estimar os possíveis impactos neste reservatório, localizado na Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH), em função das modificações previstas para o uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica afluente ao reservatório.

As modificações futuras no uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do reservatório são consideradas e comparadas em 2 cenários de planejamento, um relativo ao Macrozoneamento da RMBH e o outro conforme proposta do Plano Municipal de Contagem.

Este relatório, conforme previsão contratual, não tem a finalidade de apresentar os resultados completos consolidados, sendo, portanto, complementar ao Relatório Parcial 2, que finalizou as estimativas hidrológicas e hidrodinâmicas que servem para alimentar os demais estudos. Nesse contexto, o resultado final do trabalho deve ser entendido como a soma dos relatórios R2 e R3.

As estimativas dos possíveis impactos no reservatório de Vargem das Flores foram realizadas tendo por referência os seguintes cenários de uso do solo:

- a) **CENÁRIO PASSADO:** Utilizado para entender os impactos produzidos pelos padrões de ocupação da bacia sobre o reservatório no decorrer dos anos.
- b) **CENÁRIO ATUAL:** Utilizado como a base de comparação na estimativa dos cenários futuros. Tal cenário contém o atual uso do solo, a infraestrutura existente para coleta e tratamento de esgotos e a drenagem pluvial;
- c) **CENÁRIO FUTURO 1 - MACROZONEAMENTO DA RMBH:** Utilizado para entender os impactos futuros do uso do solo segundo a regulamentação e as ações de requalificação previstas no Macrozoneamento da RMBH;
- d) **CENÁRIO FUTURO 2 - PLANO MUNICIPAL DE CONTAGEM:** Utilizado para entender os impactos futuros do uso do solo segundo a proposta da Prefeitura Municipal de Contagem.

Nesta etapa final do trabalho, o cenário passado foi utilizado para ajustar o modelo de produção de sedimentos na bacia e acumulação de sedimentos no reservatório. O Cenário atual serve de base para os estudos de qualidade de água e sedimentológicos. Da mesma forma, os dois cenários futuros são considerados em ambos os estudos, para fins de comparação das modificações introduzidas no território, em relação à situação atual.

Para a consecução dos objetivos aqui propostos, utilizou-se de ferramentas matemáticas e computacionais, que são descritas neste documento, em complementação às ferramentas apresentadas anteriormente em R2. São apresentados os resultados do processo de modelagem da qualidade de água no reservatório Vargem das Flores, bem como as alterações provocadas pelos cenários

futuros nos rios afluentes e no próprio reservatório, com as respectivas análises. São também apresentados os resultados dos estudos sobre sedimentação do reservatório, com as previsões futuras e as análises pertinentes. Estas duas etapas do estudo aparecem nos capítulos 2 e 3, de forma individualizada, na sequência da introdução a este relatório.

SUMÁRIO

1	Introdução.....	5
2	Modelagem de Qualidade da Água – Reservatório de Vargem das Flores	7
2.1	Simulação de Cenários de uso do Solo – Cursos D’água Afluentes.....	8
2.1.1	Vazões de esgotos domésticos	8
2.1.2	Cargas e concentrações de esgoto doméstico	15
2.1.3	Vazões de simulação	17
2.1.4	Condições de Contorno	22
2.1.5	Resultados da Modelagem dos Principais Afluentes ao Reservatório	24
2.1.6	Análise dos resultados	39
2.2	Modelagem do Reservatório de Vargem das Flores.....	39
2.2.1	Avaliação dos dados de DBO e OD das estações de qualidade da água ..	39
2.2.2	Modelagem de DBO e Oxigênio dissolvido – Situação Atual	43
2.2.3	Modelagem de DBO e Oxigênio dissolvido – Cenários de uso do solo	55
2.2.4	Avaliação do Estado Trófico do Reservatório	66
3	Aporte de Sedimentos ao Reservatório de Vargem das Flores e Estimativa de sua Vida Útil	72
3.1	Estimativa do aporte de sedimentos ao reservatório de Vargem das Flores	72
3.1.1	R - Fator de erosividade da chuva.....	73
3.1.2	K – Fator de erodibilidade do solo	73
3.1.3	LS - Fator topográfico.....	78
3.1.4	CP - Fator de uso e manejo do solo	83
3.1.5	Resultados da estimativa do aporte de sedimentos com o uso da RUSLE por cenário	110
3.2	Estudos progressos de assoreamento no reservatório de Vargem das Flores.	112
3.3	Modelagem para estimativa de vida útil do reservatório	115
3.4	Conclusões sobre a produção de sedimentos e estimativa da vida útil do reservatório de Vargem das Flores.....	123
4	Considerações Finais	124
	BIBLIOGRAFIA.....	127

1 Introdução

O Sistema Vargem das Flores faz parte do Sistema Integrado de Abastecimento de Água da Região Metropolitana de Belo Horizonte e é operado pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA), com capacidade de produção nominal de 1,4 m³/s. O reservatório de Vargem das Flores localiza-se entre as cidades de Contagem e Betim, conforme apresenta a Figura 1, tem capacidade de armazenamento de cerca 44 hm³, com área de espelho d'água de 5,25 km² e profundidade máxima de 19,7 m (Lopes, 2009).

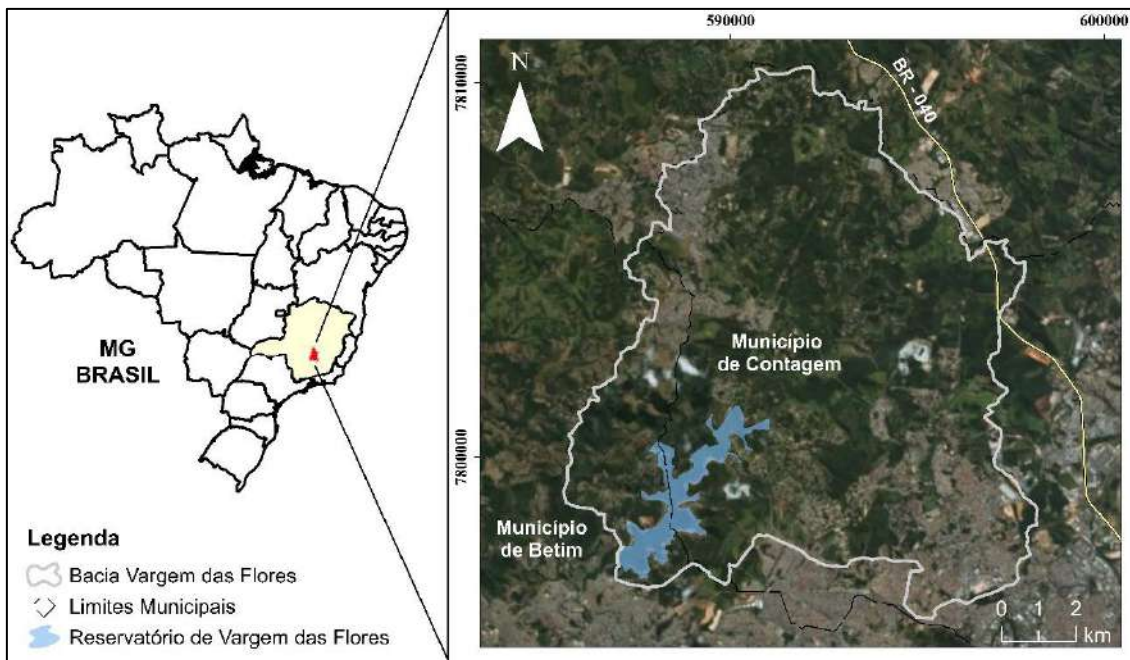


Figura 1 - Localização do reservatório Vargem das Flores.

A bacia de contribuição ao reservatório de Vargem das Flores drena uma área total de 121km², tendo como principais corpos hídricos os córregos Água Suja, Morro Redondo, Bela Vista e o Rio Betim.

O estado geral da bacia hidrográfica do reservatório de Vargem das Flores tem importância vital para a função de abastecimento deste reservatório. A sua localização, na Região Metropolitana de Belo Horizonte o coloca em situação de intensa pressão de ocupação, com possibilidade de expansão urbana significativa sobre sua bacia contribuinte. As modificações de uso do solo, principalmente com a substituição de remanescentes florestais, bem como a situação do saneamento básico, em particular em relação aos sistemas de esgotamento sanitário, nas áreas já ocupadas e nas que eventualmente se urbanizem, podem gerar alterações significativas de quantidade e qualidade de água no reservatório. Parte da vazão de esgoto coletada transpõe a bacia, é tratada e lançada em outro corpo hídrico. Porém, nem todo o esgoto é tratado e coletado, como mostram os dados do SNIS, e essa parcela acaba contribuindo para o reservatório. A expansão da urbanização sobre o território, com a manutenção dos níveis atuais de atendimento do sistema de esgotamento sanitário, pode mudar muito a qualidade no sistema em estudo.

A produção de sedimentos na bacia também tende a se alterar, o que pode acabar refletindo no assoreamento do reservatório, com perda de volume útil. A urbanização em estágio final, consolidado, com o provimento de infraestrutura adequada pode proteger o solo da bacia contra erosão, pela impermeabilização de sua área. Porém, o que se verifica como tendência é que a expansão das áreas mais periféricas, gerando espalhamento espacial, demanda um tempo para sua consolidação e, nesse tempo, expõe parcela significativa de áreas em obras, onde a vegetação foi removida e sem nenhuma proteção para o solo exposto. Mesmo depois das construções iniciais, sobram terrenos ainda baldios e ruas sem pavimentação (e sem a adequada ou completa infraestrutura em um primeiro momento).

O presente estudo busca oferecer uma estimativa dos impactos que estas alterações futuras nos usos do solo podem vir a provocar sobre o funcionamento do reservatório Vargem das Flores, com destaque para a avaliação das propostas do plano da Região Metropolitana de Belo Horizonte e o Plano Municipal de desenvolvimento de Contagem.

Estudos progressos na bacia de Vargem das Flores mostram que o volume de sedimentos depositados no reservatório vem aumentando consideravelmente ao longo dos anos, o que indica a necessidade de revisão do manejo e uso do solo, a fim de reduzir os impactos ao reservatório e prolongar sua operação.

Nessa situação, ameaças ao funcionamento e vida útil do reservatório Vargem das Flores são identificadas.

O presente documento está organizado da seguinte forma, na sequência desta introdução:

- o capítulo 2 apresenta o complemento dos estudos de modelagem de qualidade da água, com destaque para a representação do reservatório na situação atual, complementando a calibração do modelo, seguido pela avaliação dos cenários futuros nos rios afluentes e no próprio reservatório.
- o capítulo 3 apresenta a modelagem completa que estima os sedimentos produzidos na bacia e as consequências possíveis sobre a vida útil do reservatório, para os cenários futuros em análise. A evolução do cenário passado até o presente é utilizada para ajuste do modelo proposto.
- o capítulo 4 apresenta as considerações finais que concluem o relatório.

2 Modelagem de Qualidade da Água – Reservatório de Vargem das Flores

Na segunda etapa da modelagem de qualidade da água, são apresentadas as simulações do modelo de qualidade da água (QUAL-UFMG) para os corpos hídricos fluviais afluentes ao reservatório de Vargem das Flores, para os períodos de estiagem e cheia, considerando os cenários de uso do solo previstos no presente estudo: Cenário futuro 1 - Macrozoneamento da RMBH e Cenário futuro 2 - Plano Municipal de Contagem. É importante ressaltar que os resultados da calibração do modelo representam o cenário atual de qualidade da água na bacia.

Também são apresentadas nesta etapa a metodologia e os resultados da modelagem de qualidade de água para o reservatório de Vargem das Flores. Destaca-se que, para o reservatório, foram utilizadas duas metodologias simplificadas para avaliação da DBO e do oxigênio dissolvido, diferentes daquela utilizada para a simulação dos principais afluentes ao reservatório, devido à limitação de dados disponíveis. Desta forma, o QUAL-UFMG foi utilizado para os rios que afluem ao reservatório, enquanto o próprio reservatório foi modelado em *excel*, separadamente, em procedimento que será detalhado ao longo deste relatório. Para o fósforo total, optou-se por avaliar o estado trófico do reservatório, fornecendo uma medida do potencial de eutrofização, já que este nutriente atua como o agente causador do processo.

Conforme destacado no relatório R2, a modelagem de qualidade da água procurou representar os processos que ocorrem na bacia, tendo como base os dados disponibilizados pela COPASA e/ou obtidos na literatura técnica existente. No entanto, em função da limitação de informações disponíveis, foi necessário adotar simplificações, hipóteses e critérios adicionais, de forma a reproduzir da melhor maneira possível a situação da qualidade da água na bacia e poder comparar os cenários futuros. Destaca-se que os principais resultados deste estudo (e do estudo posterior de sedimentação e vida útil do reservatório) devem sempre ser considerados de forma relativa, ou seja, as comparações entre resultados dos dois diferentes cenários (e as variações percentuais) são mais importantes que os resultados absolutos, considerando que a disponibilidade de dados limita a precisão da resposta de modelagem.

No que diz respeito ao reservatório de Vargem das Flores, portanto, não se pretende que os resultados das simulações reflitam exatamente as condições de qualidade da água atuais do reservatório, mas sim que estejam dentro das faixas de variação aceitáveis dos dados observados de qualidade da água do período considerado. Espera-se que os resultados sejam consistentes e representativos, embora não exatos e que possam ser usados para o planejamento do uso do solo na sua bacia de contribuição, evitando situações potenciais de risco, bem como para implantação de ações futuras de modo a reduzir cargas efluentes ao reservatório.

2.1 Simulação de Cenários de uso do Solo – Cursos D'água Afluentes

As simulações de qualidade da água dos principais afluentes ao reservatório de Vargem das Flores, considerando diferentes cenários de uso do solo, foram realizadas com a finalidade de avaliar os impactos futuros na qualidade da água do reservatório. Nas simulações foram considerados os seguintes cenários de uso do solo, previstos no presente estudo:

- a) CENÁRIO ATUAL: Utilizado na calibração do modelo;
- b) CENÁRIO FUTURO 1 - MACROZONEAMENTO DA RMBH;
- c) CENÁRIO FUTURO 2 - PLANO MUNICIPAL DE CONTAGEM.

Para cada cenário de uso e ocupação do solo, foram simulados os períodos de estiagem e de cheia.

Nas simulações realizadas com o Modelo Qual-UFMG, para os cenários futuros, foram utilizados os mesmos trechos e características hidráulicas, bem como os mesmos parâmetros de qualidade da água obtidos na calibração do modelo para os principais afluentes do reservatório (Relatório R2). Destaca-se que a situação atual foi utilizada para cálculo dos dados relativos aos cenários de uso do solo de referência.

Os dados necessários para a simulação de qualidade da água são apresentados nos itens a seguir. As simulações do Cenário Atual (calibração do modelo) dos principais afluentes ao reservatório estão apresentadas no relatório R2, que deve ser sempre considerado juntamente com este relatório R3, de forma a compor o escopo do projeto desenvolvido neste contrato.

2.1.1 Vazões de esgotos domésticos

As vazões dos efluentes domésticos dos cenários futuros foram determinadas de acordo com a seguinte metodologia:

- Delimitação da área urbana no Cenário Atual (MATOS *et al.*, 2017) e em cada cenário de uso do solo considerado (Cenários Futuros - Macrozoneamento da RMBH, conforme UFMG (2015), e Plano Municipal de Contagem, segundo Contagem (2017)) para cada área contribuinte pontual e incremental dos corpos hídricos considerados na modelagem.
- Cálculo do percentual de modificação da área urbana em cada área contribuinte pontual e incremental (conforme mostrado na Tabela 1).
- Determinação da vazão de esgotos para cada cenário de uso do solo, multiplicando-se a vazão do cenário atual pelo percentual de modificação da área urbana de cada cenário. Assim, por simplificação, foi considerado que a vazão de esgotos de um determinado cenário é proporcional à redução ou aumento da área urbana em relação ao cenário atual. Esse procedimento foi feito para cada área contribuinte pontual e incremental dos corpos hídricos simulados. Ressalta-se que a vazão de esgotos no Cenário atual para a bacia do Córrego Bela Vista e para a bacia lateral contribuinte ao reservatório, foi calculada conforme a metodologia apresentada no relatório R2.

Para melhor identificação, as entradas pontuais e incrementais em cada rio estudado foram numeradas conforme apresentado na Figura 2. Os mapas referentes à mancha urbana em cada cenário de uso do solo são apresentados na Figura 3 (Cenário Atual), na Figura 4 (Cenário Futuro 1 – Macrozoneamento RMBH) e na Figura 5 (Cenário Futuro 2 – Plano Municipal de Contagem).

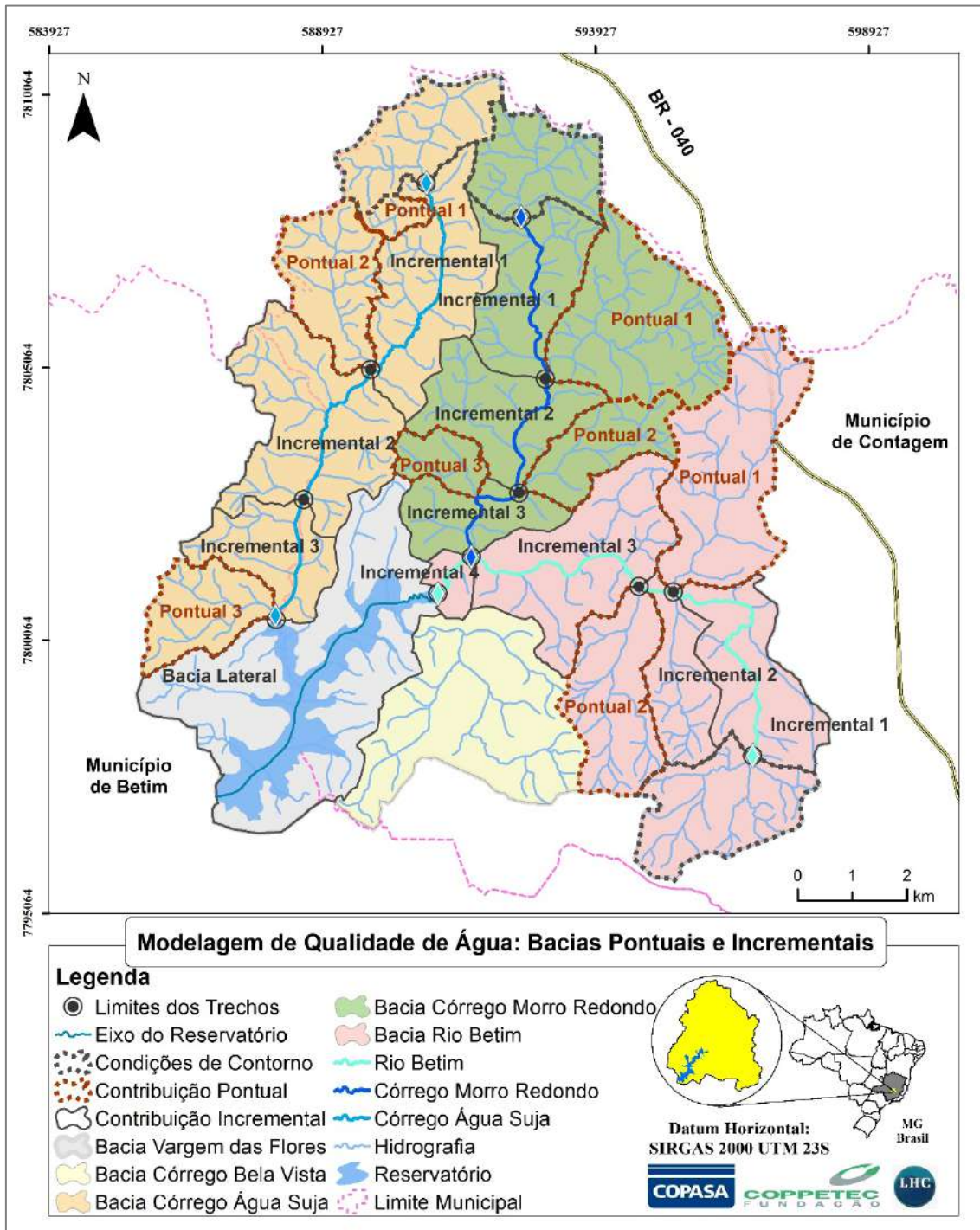


Figura 2 – Modelagem de Qualidade de Água: Entradas Pontuais e Bacias Incrementais

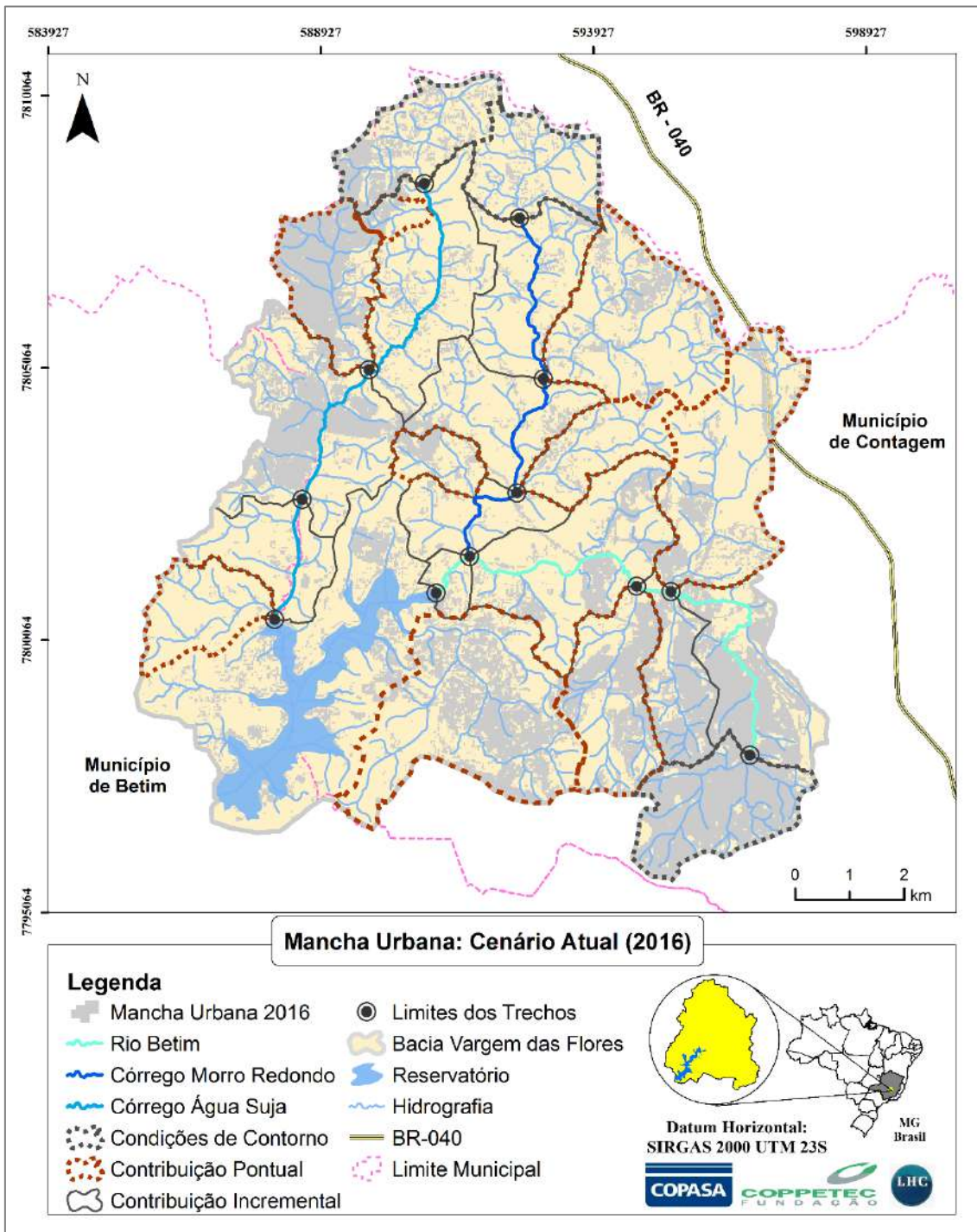


Figura 3 – Mancha urbana do Cenário Atual, utilizando o uso do solo de 2016.

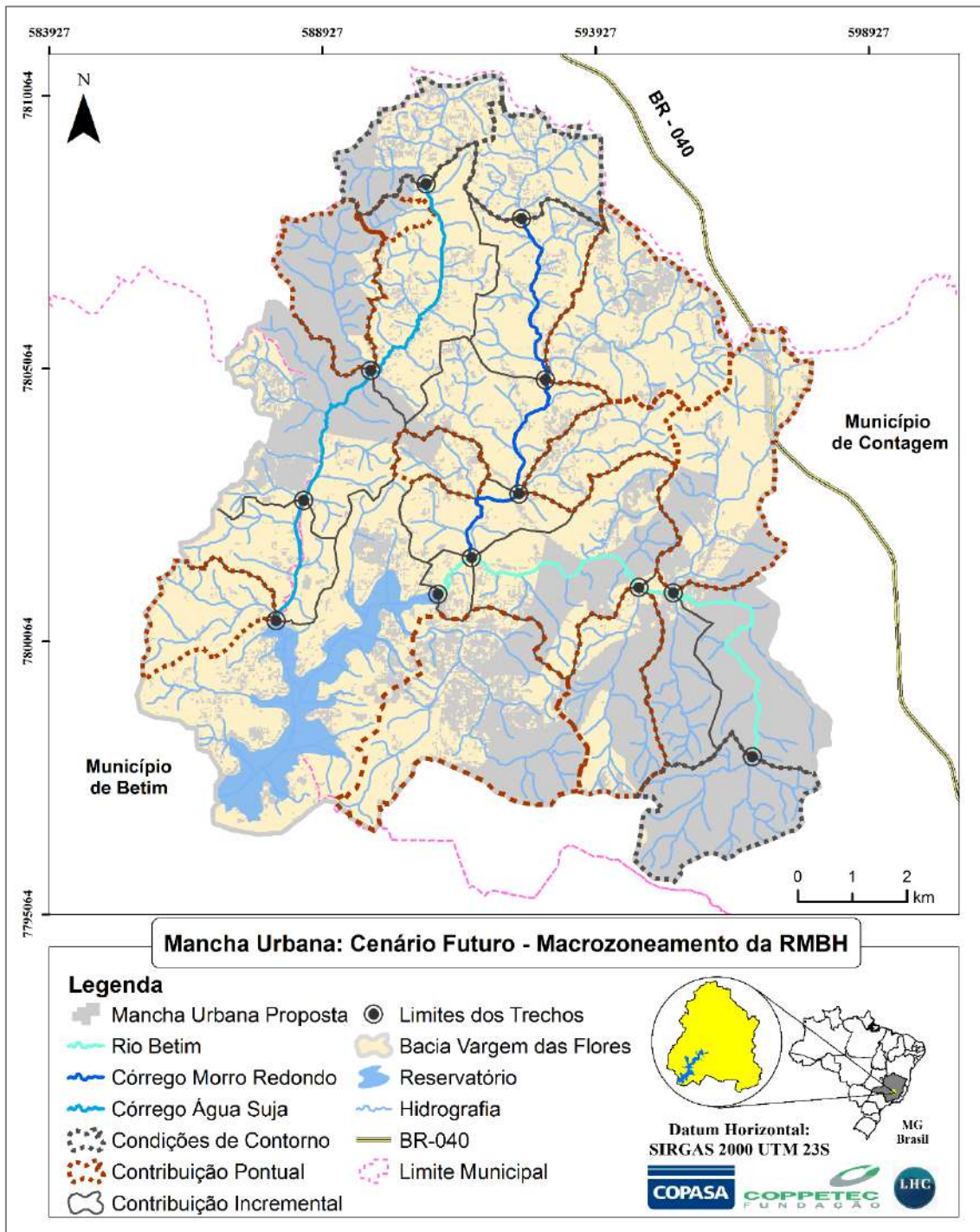


Figura 4 – Mancha urbana do Cenário Futuro 1 - Macrozoneamento RMBH, com base na proposta de Macrozoneamento do Plano da Região Metropolitana de Belo Horizonte.

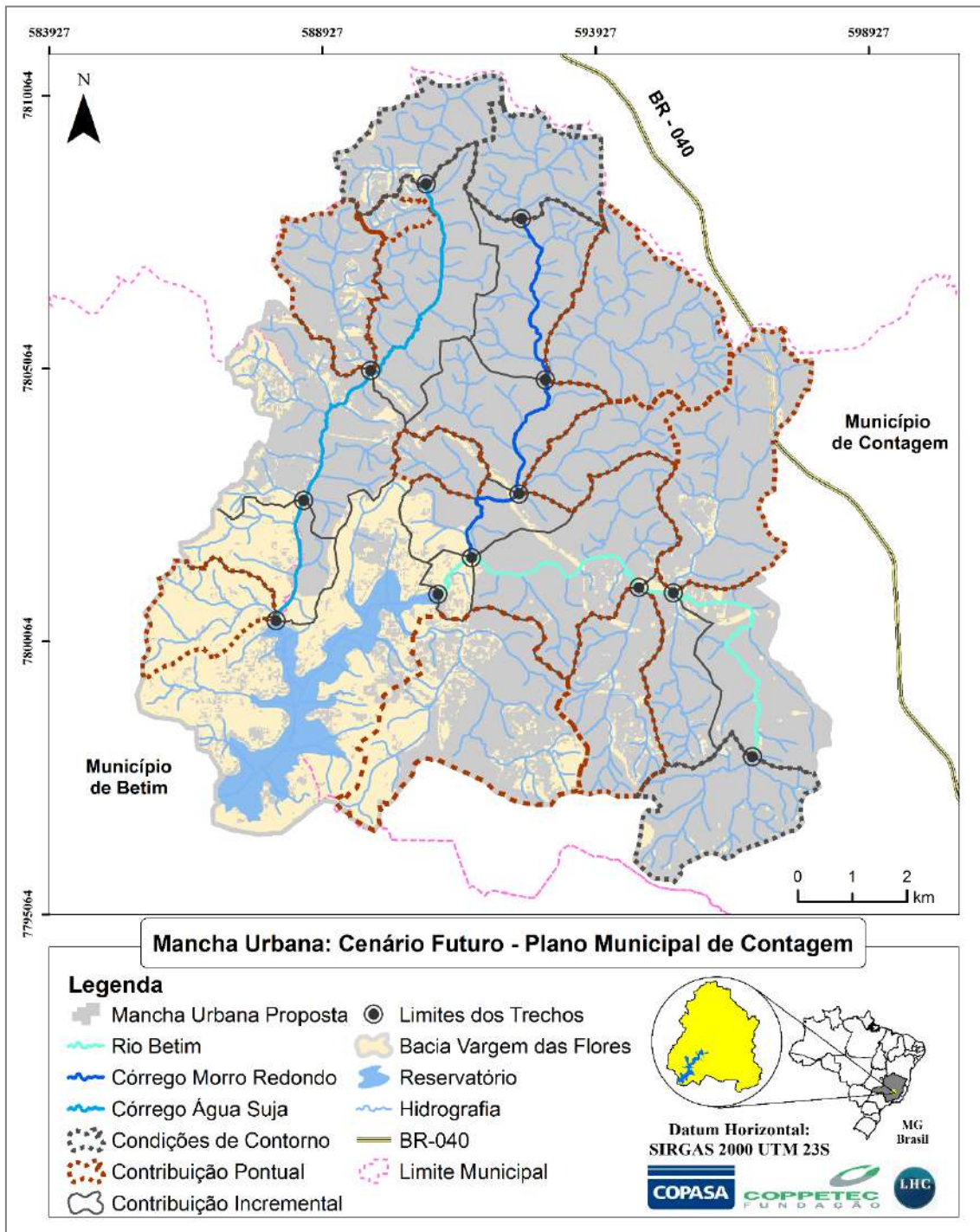


Figura 5 – Mancha urbana do Cenário Futuro 2 - Plano Municipal de Contagem, com base na proposta de Zoneamento da prefeitura de Contagem.

A Tabela 1 e a Tabela 2 contêm os percentuais de modificação de área urbana e os valores obtidos de vazão de esgotos domésticos para as entradas pontuais e incrementais do modelo, respectivamente.

Ressalta-se que as vazões de esgoto são as mesmas nas condições de estiagem e de cheia, portanto, resultando em concentrações diferentes, mas com mesma carga, quando combinadas com as vazões fluviais.

Tabela 1 – Fator de Correção para Atualização das Vazões de Esgoto

Rio	Descrição	Fator de Correção - Cenário Futuro - Macrozoneamento da RMBH	Fator de Correção - Cenário Futuro - Plano Municipal de Contagem
Rio Betim	Condição de Contorno	1,094	1,056
	Entrada Pontual 1	1,553	4,249
	Entrada Pontual 2	1,330	1,856
	Entrada Incremental 1	1,453	1,390
	Entrada Incremental 2	1,304	1,293
	Entrada Incremental 3	1,982	3,802
	Entrada Incremental 4	1,000	1,007
Córrego Morro Redondo	Condição de Contorno	1,007	6,344
	Entrada Pontual 1	1,000	5,077
	Entrada Pontual 2	1,000	7,819
	Entrada Pontual 3	1,042	2,590
	Entrada Incremental 1	1,000	9,177
	Entrada Incremental 2	1,016	6,084
Córrego Água Suja	Condição de Contorno	1,185	2,183
	Entrada Pontual 1	1,391	2,113
	Entrada Pontual 2	1,159	1,181
	Entrada Pontual 3	1,000	1,000
	Entrada Incremental 1	1,248	7,291
	Entrada Incremental 2	1,320	1,697
	Entrada Incremental 3	1,000	3,748
Reservatório	Córrego Bela Vista	1,332	1,511
	Bacia Lateral	1,001	1,017

Tabela 2 – Vazões de Esgotos em cada Cenário

Rio	Descrição	Vazão de Esgotos Cenário Atual (m³/s)	Vazão de Esgotos Cenário Futuro - Macrozoneamento da RMBH (m³/s)	Vazão de Esgotos Cenário Futuro - Plano Municipal de Contagem (m³/s)
Rio Betim	Condição de Contorno	0,0094	0,0103	0,0099
	Entrada Pontual 1	0,0039	0,0060	0,0164
	Entrada Pontual 2	0,0120	0,0160	0,0223
	Entrada Incremental 1	0,0076	0,0110	0,0105
	Entrada Incremental 2	0,0052	0,0067	0,0067
	Entrada Incremental 3	0,0035	0,0069	0,0133
	Entrada Incremental 4	0,0000	0,0000	0,0000
Córrego Morro Redondo	Condição de Contorno	0,0003	0,0003	0,0017
	Entrada Pontual 1	0,0018	0,0018	0,0093
	Entrada Pontual 2	0,0001	0,0001	0,0006
	Entrada Pontual 3	0,0042	0,0044	0,0110
	Entrada Incremental 1	0,0002	0,0002	0,0015
	Entrada Incremental 2	0,0010	0,0010	0,0058
	Entrada Incremental 3	0,0001	0,0001	0,0006
Córrego Água Suja	Condição de Contorno	0,0049	0,0058	0,0107
	Entrada Pontual 1	0,0031	0,0043	0,0066
	Entrada Pontual 2	0,0101	0,0117	0,0119
	Entrada Pontual 3	0,0001	0,0001	0,0001
	Entrada Incremental 1	0,0005	0,0006	0,0033
	Entrada Incremental 2	0,0200	0,0263	0,0338
	Entrada Incremental 3	0,0000	0,0000	0,0002
Reservatório	Córrego Bela Vista	0,0070	0,0094	0,0106
	Bacia Lateral	0,0053	0,0053	0,0054

2.1.2 Cargas e concentrações de esgoto doméstico

A estimativa das cargas e concentrações de esgoto doméstico foi realizada de acordo com a metodologia apresentada no relatório R2, onde as concentrações de esgoto são calculadas dividindo-se a carga per capita de DBO e fósforo total (Von Sperling, 2007) pela vazão per capita de esgotos de cada município (SNIS, 2016).

Também foram considerados todos os critérios utilizados no relatório R2 para determinação das concentrações remanescentes: o decaimento da DBO conforme a distância até o corpo d'água principal, a remoção da DBO e do fósforo em fossas séptica e rudimentar, além da remoção do fósforo em lagos e pequenos reservatórios presentes nas bacias.

A Tabela 3 apresenta, então, as concentrações finais de DBO e fósforo total consideradas para os esgotos domésticos gerados em cada entrada pontual e bacias incrementais.

Tabela 3 – Concentrações Finais de DBO e Fósforo nos Esgotos Domésticos

Rio	Descrição	DBO (mg/l)	P total (mg/l)
Rio Betim	Condição de Contorno	350,2	4,54
	Entrada Pontual 1	304,1	3,94
	Entrada Pontual 2	287,1	2,31
	Entrada Incremental 1	320,9	4,16
	Entrada Incremental 2	301,9	3,91
	Entrada Incremental 3	271,7	3,52
	Entrada Incremental 4	283,0	3,67
Córrego Morro Redondo	Condição de Contorno	219,7	3,61
	Entrada Pontual 1	165,8	0,67
	Entrada Pontual 2	219,7	3,27
	Entrada Pontual 3	231,2	3,56
	Entrada Incremental 1	289,7	3,75
	Entrada Incremental 2		
	Núcleo Urbano 1	247,0	3,72
	Núcleo Urbano 2	255,0	3,72
	Núcleo Urbano 3	186,7	3,72
	Entrada Incremental 3	277,1	3,59
Córrego Água Suja	Condição de Contorno	277,5	4,51
	Entrada Pontual 1	269,4	4,08
	Entrada Pontual 2	240,0	4,51
	Entrada Pontual 3	332,7	4,31
	Entrada Incremental 1	307,7	3,99
	Entrada Incremental 2	322,8	3,96
	Entrada Incremental 3	306,9	3,81
Reservatório	Córrego Bela Vista	287,5	3,73
	Bacia Lateral	266,5	3,45

2.1.3 Vazões de simulação

A vazão natural afluyente ao reservatório para os diferentes cenários considerados foi calculada multiplicando-se a vazão natural do cenário atual por um fator de correção. Esse fator foi determinado através da relação entre o *runoff* médio da bacia na situação atual dividido pelo *runoff* médio de cada cenário em análise, conforme metodologia apresentada no relatório R2. Esse procedimento considera que, com maior escoamento superficial e menor infiltração, tem-se uma redução proporcional na vazão de base. Destaca-se que o *runoff* médio da situação atual foi utilizado como referência, pois se trata do cenário de calibração para o qual foram inicialmente encontradas as vazões de base que afluem para o reservatório.

Os fatores de correção da vazão natural para cada cenário de uso do solo considerado são apresentados na Tabela 4 e as vazões naturais nas entradas pontuais e bacias incrementais dos rios simulados (período de estiagem) na Tabela 5.

Ressalta-se que a vazão natural no Cenário atual para a bacia do Córrego Bela Vista e para a bacia lateral contribuinte ao reservatório foi calculada conforme a metodologia apresentada no relatório R2.

A Tabela 6 apresenta as vazões totais (naturais e de esgotos) nas entradas pontuais, bacias incrementais e condições de contorno dos rios simulados, para o período de estiagem.

O cálculo das vazões de cheia seguiu a mesma metodologia do cálculo das vazões de estiagem, conforme apresentado no Relatório R2. Os estudos foram desenvolvidos com base nos dados de postos fluviométricos localizados na bacia, fornecidos pela COPASA, compreendendo o período de 1992 a 2004 e considerando a vazão média de cheia entre os meses de dezembro a março. A Tabela 7 apresenta as vazões naturais de cheia.

As vazões naturais de cheia referentes às entradas pontuais e bacias incrementais de cada rio, necessárias para a simulação, foram calculadas a partir da correlação de áreas de drenagem com as vazões naturais obtidas. Os resultados são apresentados, por cenário de uso do solo, na Tabela 8.

Tabela 4 – Fator de Correção da Vazão Natural para cada cenário de uso do solo considerado

Cenário	Fator de Correção da Vazão Natural
Futuro 1 - Macrozoneamento da RMBH	0,95
Futuro 2 - Plano Municipal de Contagem	0,69

Tabela 5 – Vazões Naturais nas Entradas Pontuais e Bacias Incrementais dos Rios Simulados - Estiagem

Rio	Descrição	Vazão Natural Cenário Atual (m ³ /s)	Vazão Natural Cenário Futuro - Macrozoneamento da RMBH (m ³ /s)	Vazão Natural Cenário Futuro - Plano Municipal de Contagem (m ³ /s)
Rio Betim	Condição de Contorno	0,0113	0,0107	0,0078
	Entrada Pontual 1	0,0177	0,0168	0,0122
	Entrada Pontual 2	0,0111	0,0106	0,0077
	Entrada Incremental 1	0,0115	0,0109	0,0079
	Entrada Incremental 2	0,0068	0,0065	0,0047
	Entrada Incremental 3	0,0166	0,0157	0,0114
	Entrada Incremental 4	0,0019	0,0018	0,0013
	Córrego Morro Redondo	Condição de Contorno	0,0077	0,0073
Entrada Pontual 1		0,0160	0,0152	0,0110
Entrada Pontual 2		0,0064	0,0061	0,0044
Entrada Pontual 3		0,0030	0,0029	0,0021
Entrada Incremental 1		0,0101	0,0096	0,0070
Entrada Incremental 2		0,0097	0,0092	0,0067
Entrada Incremental 3		0,0061	0,0058	0,0042
Córrego Água Suja	Condição de Contorno	0,0112	0,0106	0,0077
	Entrada Pontual 1	0,0019	0,0018	0,0013
	Entrada Pontual 2	0,0116	0,0110	0,0080
	Entrada Pontual 3	0,0090	0,0085	0,0062
	Entrada Incremental 1	0,0186	0,0176	0,0128
	Entrada Incremental 2	0,0230	0,0218	0,0158
	Entrada Incremental 3	0,0103	0,0097	0,0071
Reservatório	Córrego Bela Vista	0,0055	0,0052	0,0038
	Bacia Lateral	0,0247	0,0235	0,0171

Tabela 6 – Vazões Totais nas Entradas Pontuais e Bacias Incrementais dos Rios Simulados e do Reservatório - Estiagem

Rio	Descrição	Vazão Total Cenário Atual (m³/s)	Vazão Total Cenário Futuro - Macrozoneamento da RMBH (m³/s)	Vazão Total Cenário Futuro - Plano Municipal de Contagem (m³/s)
Rio Betim	Condição de Contorno	0,0207	0,0210	0,0177
	Entrada Pontual 1	0,0216	0,0228	0,0287
	Entrada Pontual 2	0,0231	0,0265	0,0299
	Entrada Incremental 1	0,0191	0,0219	0,0184
	Entrada Incremental 2	0,0120	0,0132	0,0114
	Entrada Incremental 3	0,0201	0,0227	0,0247
	Entrada Incremental 4	0,0019	0,0018	0,0013
	Córrego Morro Redondo	Condição de Contorno	0,0080	0,0076
Entrada Pontual 1		0,0178	0,0170	0,0203
Entrada Pontual 2		0,0065	0,0062	0,0051
Entrada Pontual 3		0,0072	0,0073	0,0130
Entrada Incremental 1		0,0103	0,0098	0,0085
Entrada Incremental 2		0,0107	0,0102	0,0125
Entrada Incremental 3		0,0062	0,0059	0,0048
Córrego Água Suja	Condição de Contorno	0,0161	0,0165	0,0184
	Entrada Pontual 1	0,0050	0,0061	0,0079
	Entrada Pontual 2	0,0216	0,0227	0,0199
	Entrada Pontual 3	0,0090	0,0086	0,0063
	Entrada Incremental 1	0,0190	0,0182	0,0161
	Entrada Incremental 2	0,0429	0,0481	0,0497
	Entrada Incremental 3	0,0103	0,0098	0,0073
Reservatório	Córrego Bela Vista	0,0125	0,0146	0,0144
	Bacia Lateral	0,0301	0,0288	0,0225

Tabela 7 – Vazões Naturais de Cheia

Rio	Área de Drenagem foz (km²)	Vazão natural de cheia na Foz (L/s)
Betim	33,70	659,3
Morro redondo	28,70	484,6
Água Suja	30,20	664,7
Bela Vista	10,30	151,8

Tabela 8 - Vazões Naturais nas Entradas Pontuais e Bacias Incrementais dos Rios Simulados e do Reservatório – Cheia

Rio	Descrição	Vazão Natural Cenário Atual (m³/s)	Vazão Natural Cenário Futuro - Macrozoneamento da RMBH (m³/s)	Vazão Natural Cenário Futuro - Plano Municipal de Contagem (m³/s)
Rio Betim	Condição de Contorno	0,0990	0,0940	0,0683
	Entrada Pontual 1	0,1558	0,0962	0,1075
	Entrada Pontual 2	0,0977	0,0569	0,0674
	Entrada Incremental 1	0,1012	0,0962	0,0698
	Entrada Incremental 2	0,0599	0,0569	0,0413
	Entrada Incremental 3	0,1457	0,1384	0,1005
	Entrada Incremental 4	0,0166	0,0158	0,0115
Córrego Morro Redondo	Condição de Contorno	0,0632	0,0601	0,0436
	Entrada Pontual 1	0,1309	0,1244	0,0903
	Entrada Pontual 2	0,0524	0,0498	0,0362
	Entrada Pontual 3	0,0249	0,0237	0,0172
	Entrada Incremental 1	0,0831	0,0789	0,0573
	Entrada Incremental 2	0,0797	0,0757	0,0550
Córrego Água Suja	Condição de Contorno	0,0871	0,0827	0,0601
	Entrada Pontual 1	0,0149	0,0141	0,0103
	Entrada Pontual 2	0,0901	0,0856	0,0622
	Entrada Pontual 3	0,0698	0,0663	0,0482
	Entrada Incremental 1	0,1444	0,1372	0,0997
	Entrada Incremental 2	0,1787	0,1698	0,1233
Reservatório	Entrada Incremental 3	0,0798	0,0758	0,0551
	Córrego Bela Vista	0,1518	0,1442	0,1047
	Bacia Lateral	0,2030	0,1929	0,1401

A Tabela 9 apresenta as vazões totais (naturais e de esgotos) nas entradas pontuais, bacias incrementais e condições de contorno dos rios simulados, para o período de cheia.

Tabela 9 - Vazões Totais nas Entradas Pontuais e Bacias Incrementais dos Rios Simulados e do Reservatório - Cheia

Rio	Descrição	Vazão Total Cenário Atual (m ³ /s)	Vazão Total Cenário Futuro - Macrozoneament o da RMBH (m ³ /s)	Vazão Total Cenário Futuro - Plano Municipal de Contagem (m ³ /s)
Rio Betim	Condição de Contorno	0,1084	0,1043	0,0782
	Entrada Pontual 1	0,1597	0,1540	0,1240
	Entrada Pontual 2	0,1097	0,1087	0,0896
	Entrada Incremental 1	0,1088	0,1071	0,0803
	Entrada Incremental 2	0,0651	0,0637	0,0480
	Entrada Incremental 3	0,1492	0,1453	0,1138
	Entrada Incremental 4	0,0167	0,0158	0,0115
Córrego Morro Redondo	Condição de Contorno	0,0635	0,0603	0,0454
	Entrada Pontual 1	0,1327	0,1262	0,0996
	Entrada Pontual 2	0,0525	0,0499	0,0368
	Entrada Pontual 3	0,0291	0,0281	0,0281
	Entrada Incremental 1	0,0833	0,0791	0,0588
	Entrada Incremental 2	0,0807	0,0767	0,0608
	Entrada Incremental 3	0,0501	0,0476	0,0351
Córrego Água Suja	Condição de Contorno	0,0920	0,0886	0,0708
	Entrada Pontual 1	0,0180	0,0185	0,0168
	Entrada Pontual 2	0,1001	0,0972	0,0740
	Entrada Pontual 3	0,0699	0,0664	0,0482
	Entrada Incremental 1	0,1449	0,1378	0,1030
	Entrada Incremental 2	0,1987	0,1961	0,1572
Reservatório	Entrada Incremental 3	0,0799	0,0759	0,0552
	Córrego Bela Vista	0,1588	0,1536	0,1154
	Bacia Lateral	0,2083	0,1982	0,1455

2.1.4 Condições de Contorno

As condições de contorno correspondem aos valores de DBO, oxigênio dissolvido, fósforo total, vazões e temperatura da água, considerados no início do trecho de montante dos rios simulados, de forma a substituir o trecho anterior não modelado.

As concentrações de cada parâmetro foram calculadas através do balanço de massa entre as concentrações naturais dos corpos hídricos modelados em cada cenário e as concentrações de DBO e fósforo geradas pelos núcleos urbanos situados no trecho de montante. Destaca-se que a vazão total considerada no balanço de massa é a correspondente à soma das vazões natural e de esgotos domésticos no ponto considerado, como apresentado na Tabela 6 (período de estiagem) e na Tabela 9 (período de cheia).

O valor da temperatura (°C) foi obtido fazendo a média dos valores medidos disponibilizados para o período de julho a setembro entre os anos de 2015 e 2017. As concentrações de DBO, OD e Fósforo total utilizadas para o rio em condição natural foram de 2 mg/l, 90% do OD de saturação (calculado a partir de informações acerca de altitude e temperatura) e 0,01 mg/l, respectivamente. É importante relembrar que, na composição do fósforo total foram considerados 40% de fósforo orgânico e 60% de fósforo inorgânico (Salla *et. al*, 2013).

A Tabela 10 e a Tabela 11 apresentam, respectivamente, as condições de contorno utilizadas na simulação do Cenário Futuro 1 – Macrozoneamento da RMBH e do Cenário Futuro 2 – Plano Municipal de Contagem para o período de estiagem.

Tabela 10 – Condições de Contorno de cada Rio Simulado – Cenário Futuro 1 - Macrozoneamento da RMBH – Período de Estiagem

Rio	Vazão Total (m³/s)	T (°C)	Altitude (m)	OD saturação (mg/l)	OD (mg/l)	DBO (mg/l)	Fósforo Orgânico (mg/l)	Fósforo Inorgânico (mg/l)
Betim	0,0210	21	852	8,04	3,69	172,7	0,89	1,34
Morro Redondo	0,0076	22	851	7,89	6,84	9,9	0,06	0,08
Água Suja	0,0165	21	860	8,04	4,68	99,4	0,64	0,96

Tabela 11 – Condições de Contorno de cada Rio Simulado – Cenário Futuro 2 - Plano Municipal de Contagem – Período de Estiagem

Rio	Vazão Total (m³/s)	T (°C)	Altitude (m)	OD saturação (mg/l)	OD (mg/l)	DBO (mg/l)	Fósforo Orgânico (mg/l)	Fósforo Inorgânico (mg/l)
Betim	0,0177	21	852	8,04	3,18	197,3	1,02	1,53
Morro Redondo	0,0071	22	851	7,89	5,35	55,6	0,36	0,54
Água Suja	0,0184	21	860	8,04	3,03	162,1	1,05	1,57

A Tabela 12 e a Tabela 13 apresentam, respectivamente, as condições de contorno utilizadas na simulação do Cenário Futuro 1 – Macrozoneamento da RMBH e do Cenário Futuro 2 – Plano Municipal de Contagem para o período de cheia.

Tabela 12 - Condições de Contorno de cada Rio Simulado – Cenário Futuro 1 - Macrozoneamento da RMBH – Período de Cheia

Rio	Vazão Total (m³/s)	T (°C)	Altitude (m)	OD saturação (mg/l)	OD (mg/l)	DBO (mg/l)	Fósforo Orgânico (mg/l)	Fósforo Inorgânico (mg/l)
Betim	0,1043	21	852	8,04	6,52	36,3	0,18	0,27
Morro Redondo	0,0603	22	851	7,89	7,07	3,0	0,01	0,02
Água Suja	0,0886	21	860	8,04	6,76	20,1	0,12	0,18

Tabela 13 - Condições de Contorno de cada Rio Simulado – Cenário Futuro 2 - Plano Municipal de Contagem – Período de Cheia

Rio	Vazão Total (m³/s)	T (°C)	Altitude (m)	OD saturação (mg/l)	OD (mg/l)	DBO (mg/l)	Fósforo Orgânico (mg/l)	Fósforo Inorgânico (mg/l)
Betim	0,0782	21	852	8,04	6,32	46,2	0,23	0,35
Morro Redondo	0,0454	22	851	7,89	6,83	10,3	0,06	0,09
Água Suja	0,0708	21	860	8,04	6,14	43,7	0,28	0,41

As condições de contorno também consideram as hipóteses de remoção e decaimento utilizados para a estimativa das cargas e concentrações dos esgotos domésticos.

2.1.5 Resultados da Modelagem dos Principais Afluentes ao Reservatório

Os itens a seguir apresentam, por curso d'água, os resultados das simulações do modelo para os cenários de uso do solo previstos, considerando vazões de estiagem e de cheia.

2.1.5.1 Rio Betim

A Figura 6 apresenta o trecho modelado do rio Betim, indicando o ponto inicial da simulação, ou condição de contorno (km 0,0), o ponto final na entrada do reservatório de Vargem das Flores (km 11,0).

Os perfis longitudinais de concentração de DBO, OD e Fósforo Total do Rio Betim, para a simulação de qualidade da água referente ao período de estiagem, são apresentados na Figura 7, na Figura 8 e na Figura 9, respectivamente. Destaca-se que, nesses gráficos, o ponto inicial (km 0,0) é o início do trecho modelado e o ponto final (km 11,0) o final da modelagem na chegada do reservatório, conforme mostra a Figura 6.

As concentrações de DBO do rio Betim (Figura 7) encontram-se fora de classe ao longo de todo o rio em todos os cenários simulados, o que mostra o grave comprometimento em relação à poluição por matéria orgânica. O mesmo ocorre em relação ao OD e ao fósforo total (Figura 8 e Figura 9), que também apresentam concentrações fora de classe ao longo de praticamente todo o rio Betim. A exceção ocorre no Cenário Atual, com alguns trechos em classe 4.

No que diz respeito à simulação de qualidade da água do período de cheia, os perfis longitudinais de concentração de DBO, OD e Fósforo Total do Rio Betim são apresentados na Figura 10, na Figura 11 e na Figura 12, respectivamente. Da mesma forma que no período de estiagem, nesses gráficos, o ponto inicial (km 0,0) é o início do trecho modelado e o ponto final (km 11,0) é o final da modelagem na chegada do reservatório, conforme Figura 6.

Observa-se, de uma forma geral, uma melhora nas concentrações de DBO, OD e fósforo total nas simulações do período de cheia. No entanto, mesmo com essa melhora, as concentrações de DBO e fósforo total do rio Betim (Figura 10 e Figura 12) encontram-se fora de classe ao longo de todo o rio, nos cenários atual e futuros. Já o OD (Figura 11), apresenta concentrações acima de classe 2 em todos os cenários simulados.

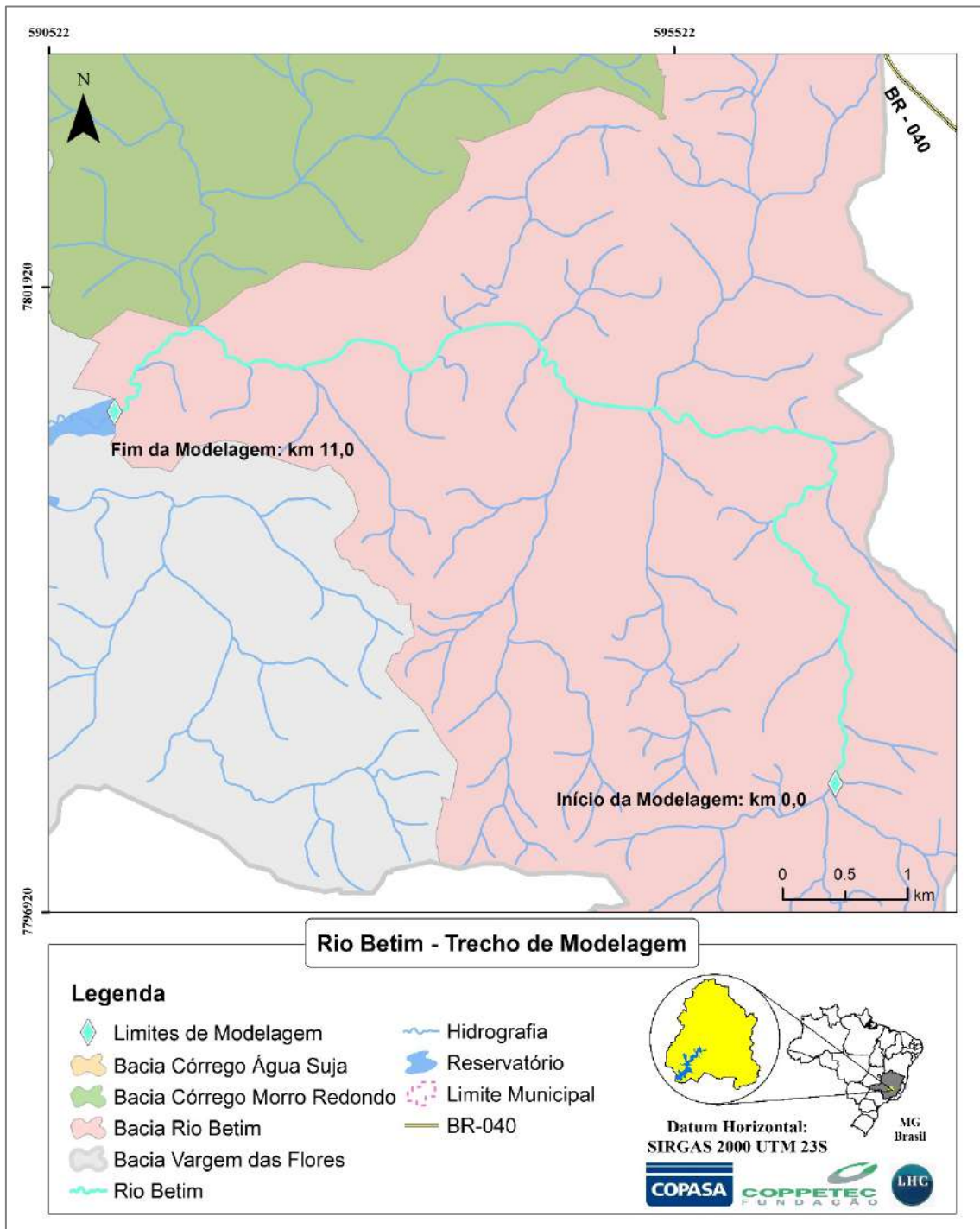


Figura 6 - Rio Betim: Localização do início e do fim da modelagem e da estação de qualidade da água

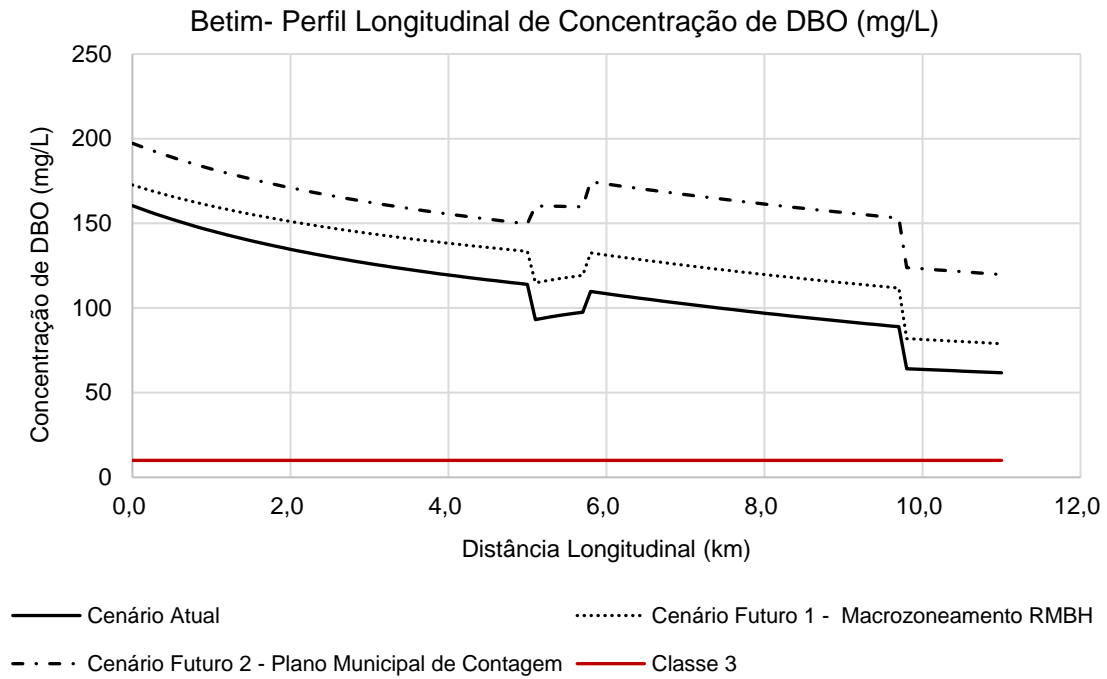


Figura 7 - Perfil Longitudinal de Concentração de DBO (mg/L) no Rio Betim - Estiagem

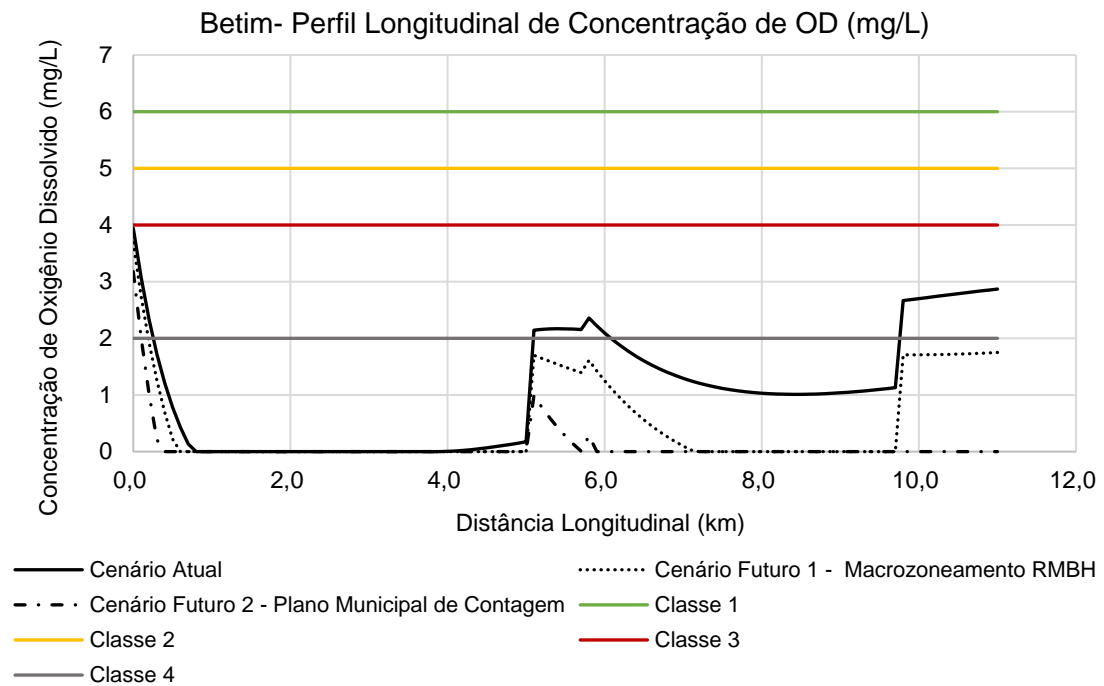


Figura 8 - Perfil Longitudinal de Concentração de OD (mg/L) no Rio Betim - Estiagem

2.1.5.2 Córrego Morro Redondo

A Figura 13 apresenta o trecho modelado do córrego Morro Redondo, onde são indicados o ponto inicial da simulação, ou condição de contorno (km 0,0) e o ponto final na confluência com o rio Betim (km 8,2).

Os perfis longitudinais de concentração de DBO, OD e Fósforo Total do Córrego Morro Redondo para a simulação do período de estiagem são apresentados na Figura 14, na Figura 15 e na Figura 16, respectivamente. Destaca-se que, nesses gráficos, o ponto inicial (km 0,0) é o início do trecho modelado e o ponto final (km 8,2) é o final da modelagem na confluência com o rio Betim, conforme Figura 13.

As concentrações de DBO do córrego Morro Redondo (Figura 14) encontram-se fora de classe para o Cenário Futuro 2 - Plano Municipal de Contagem, apresentando valores elevados para este parâmetro. Para os demais cenários, o córrego Morro Redondo apresenta concentrações bem menores, mas ainda com trechos oscilando entre classes 3 e 4 e fora de classe.

Em relação ao oxigênio dissolvido (Figura 15), as simulações dos Cenários Atual e Futuro 1 - Macrozoneamento da RMBH mostram concentrações em classe 1 ao longo de praticamente toda a extensão do rio, apenas com um pequeno trecho em classe 2. Para esses mesmos cenários, as concentrações de fósforo total (Figura 16) se encontram em classes 2 e 3 em quase todo o rio, com o trecho final fora de classe. Para o Cenário Futuro 2 - Plano Municipal de Contagem, o córrego Morro Redondo encontra-se em classe 4 e fora de classe para OD e para fósforo total.

No que diz respeito ao período de cheia, os perfis longitudinais de concentração de DBO, OD e Fósforo Total do córrego Morro Redondo são apresentados na Figura 17, na Figura 18 e na Figura 19, respectivamente. Observa-se uma melhora significativa nas concentrações de todos os parâmetros, em todos os cenários simulados. Para DBO, Figura 17, as concentrações obtidas considerando o Cenário Atual e Futuro 1 - Macrozoneamento da RMBH, variam entre classes 1 e 2 e no Cenário Futuro 2 - Plano Municipal de Contagem, as condições de qualidade da água são críticas, apresentando trechos em classes 3 e 4 e fora de classe.

Já o OD (Figura 18), apresenta concentrações em classe 1 em praticamente todos os trechos do rio, em todos os cenários simulados, até mesmo no Cenário Futuro 2 - Plano Municipal de Contagem. No que se refere ao fósforo total (Figura 19), as simulações dos Cenários Atual e Futuro 1 - Macrozoneamento da RMBH mostram que o córrego Morro Redondo apresenta concentrações em classes 1 e 2. Para o Cenário Futuro 2 - Plano Municipal de Contagem, as concentrações estão variando entre classes 3 e 4 e fora de classe em todo o trecho simulado.

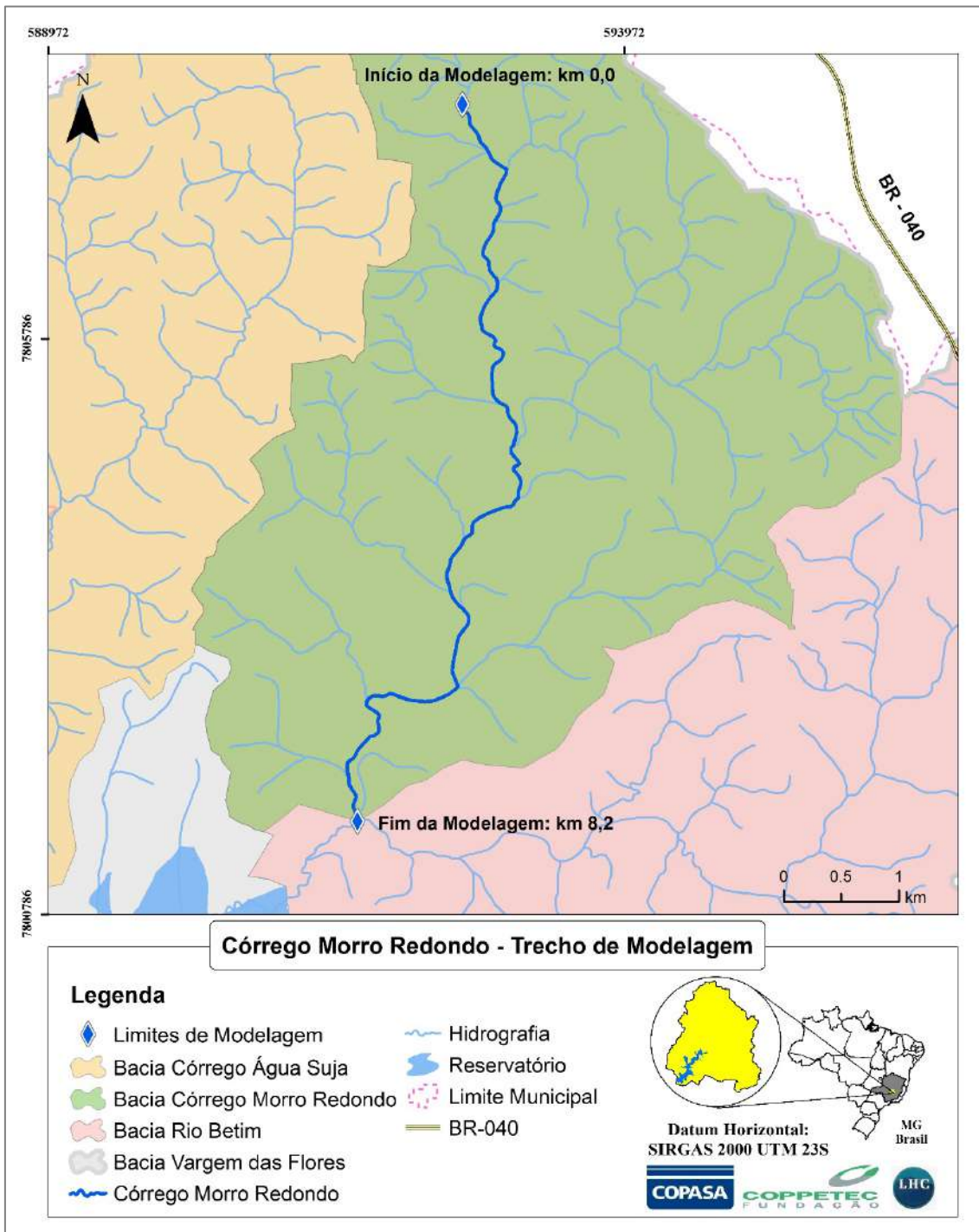


Figura 13 - Córrego Morro Redondo: Localização do início e do fim da modelagem e da estação de qualidade da água

2.1.5.3 Córrego Água Suja

A Figura 20 apresenta o trecho modelado do córrego Água Suja, indicando o ponto inicial da simulação, ou condição de contorno (km 0,0) e o ponto final na entrada do reservatório de Vargem das Flores (km 9,9).

Os perfis longitudinais de concentração de DBO, OD e Fósforo Total do Córrego Água Suja para a simulação do período de estiagem são apresentados na Figura 21, na Figura 22 e na Figura 23, respectivamente. Destaca-se que, nesses gráficos, o ponto inicial (km 0,0) é o início do trecho modelado e o ponto final (km 9,9) é o final da modelagem na chegada do reservatório conforme Figura 20.

As simulações realizadas para os parâmetros DBO e fósforo total (Figura 21 e Figura 23) mostram condições críticas de qualidade da água em todos os cenários simulados. Observa-se que esses parâmetros apresentam concentrações fora de classe ao longo de todo o córrego Água Suja. Em relação ao OD (Figura 22), no Cenário Futuro 2 - Plano Municipal de Contagem, o córrego Água Suja encontra-se fora de classe ao longo de toda a extensão.

No que se refere ao período de cheia, os perfis longitudinais de concentração de DBO, OD e Fósforo Total do córrego Água Suja são apresentados na Figura 24, na Figura 25 e na Figura 26, respectivamente. Vale destacar que, para esse período, as concentrações de todos os parâmetros são melhores do que as concentrações obtidas para o período de estiagem.

As concentrações de DBO de todos os cenários (Figura 24) estão fora de classe em toda a extensão do córrego Água Suja. O rio encontra-se em classes 3 e 4 em um trecho de pequena extensão na simulação do Cenário Atual.

Em relação ao OD (Figura 25), as simulações dos Cenários Atual e Futuro 1 - Macrozoneamento da RMBH mostram que as concentrações estão em classe 1, ao longo de quase todo o trecho simulado. Apenas em um pequeno trecho, no Cenário Futuro 1 – Macrozoneamento da RMBH, as concentrações estão em classe 2. No Cenário Futuro 2 - Plano Municipal de Contagem, as concentrações variam entre classes 2 e 3.

Já o fósforo total (Figura 26), encontra-se fora de classe em todos os cenários simulados.

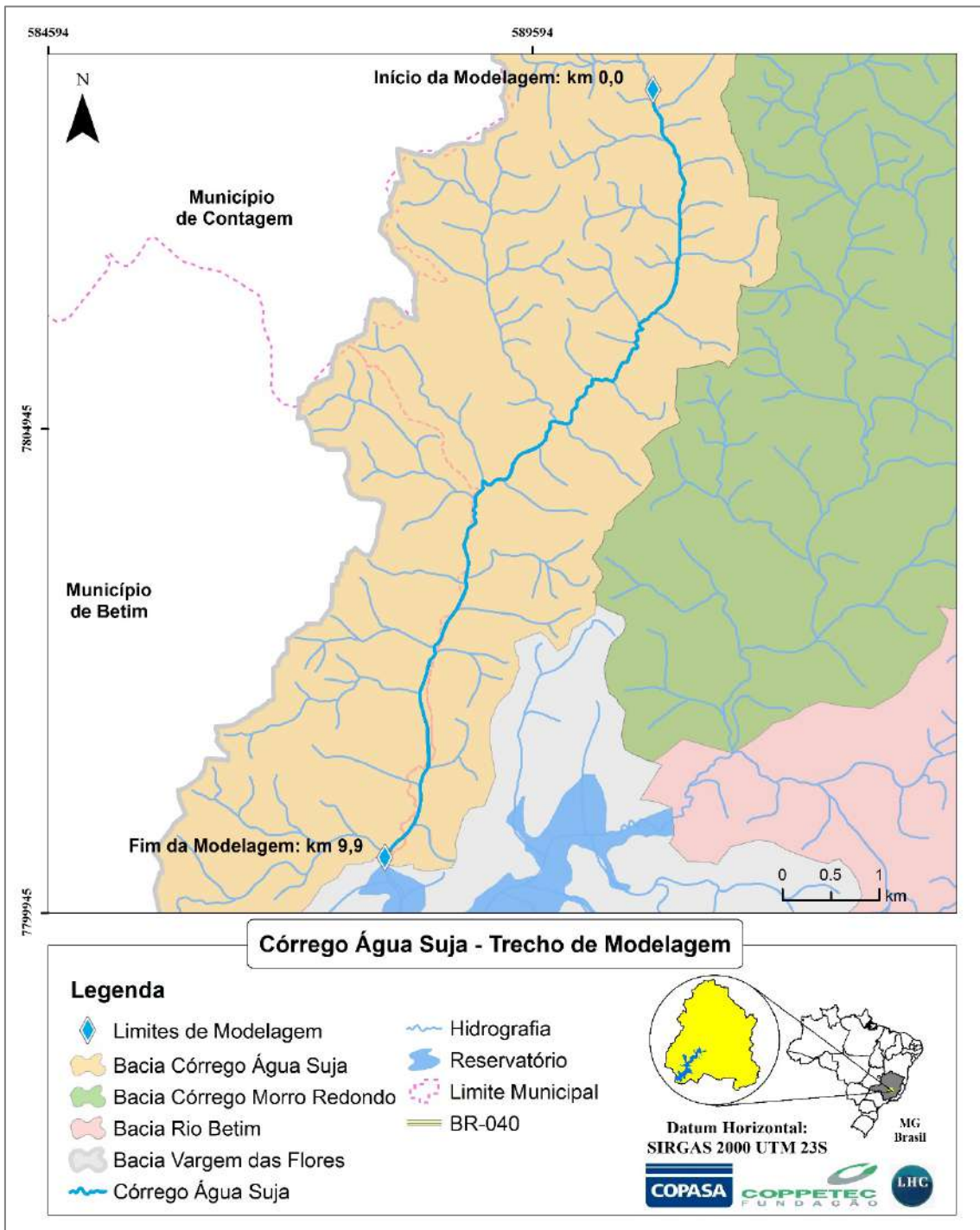


Figura 20 - Córrego Água Suja: Localização do início e do fim da modelagem e da estação de qualidade da água

Água Suja - Perfil Longitudinal de Concentração de DBO (mg/L)

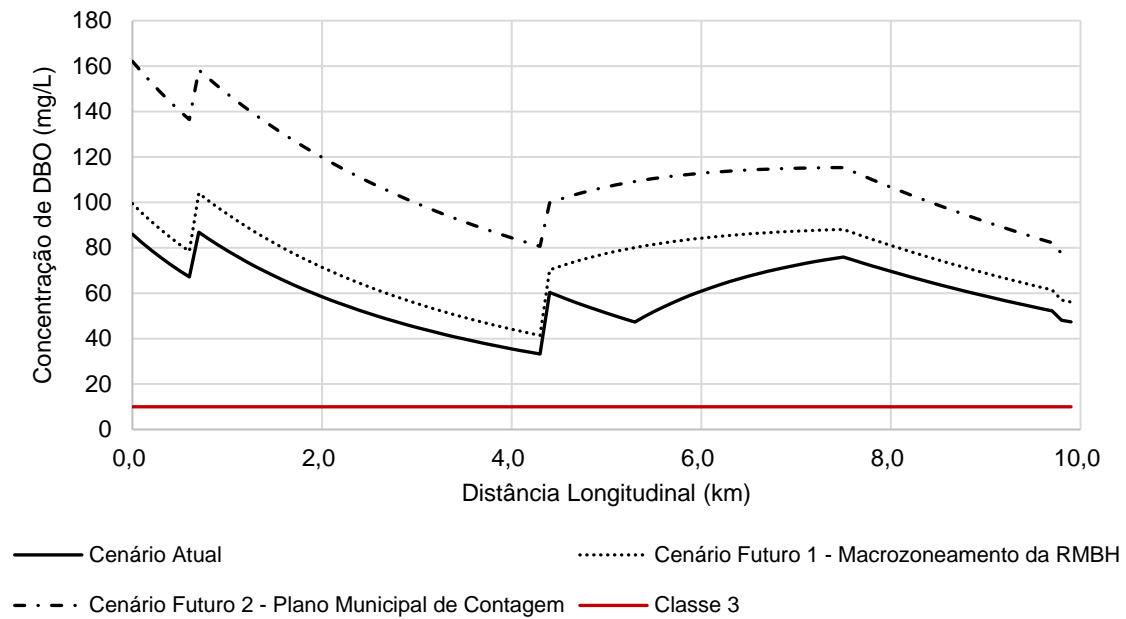


Figura 21 - Perfil Longitudinal de Concentração de DBO (mg/L) no Córrego Água Suja - Estiagem

Água Suja - Perfil Longitudinal de Concentração de OD (mg/L)

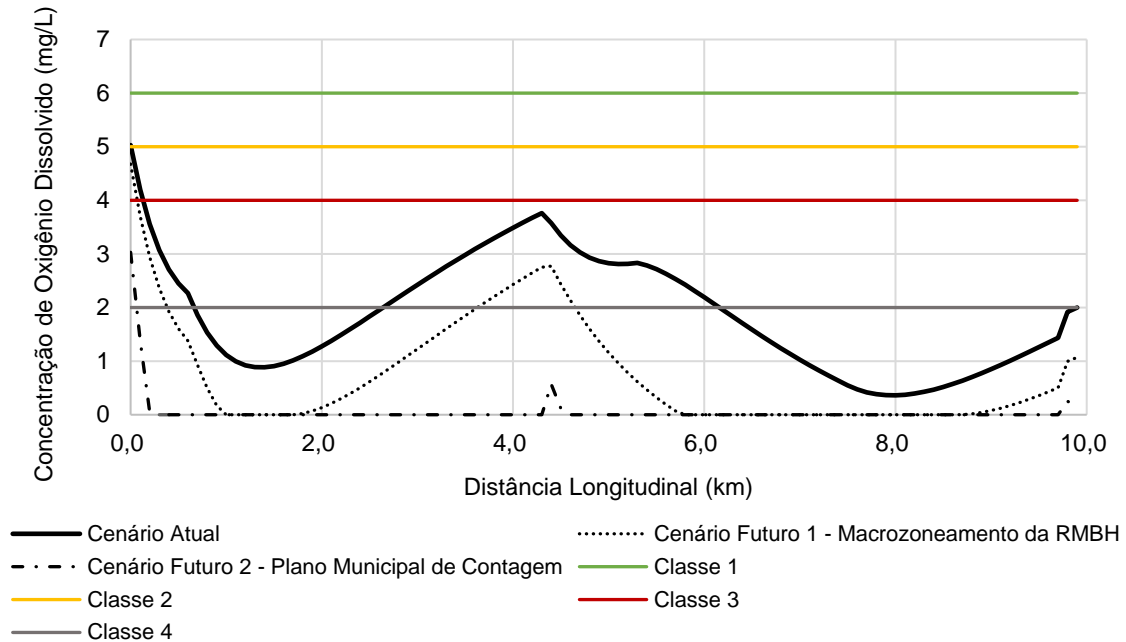


Figura 22 - Perfil Longitudinal de Concentração de OD (mg/L) no Córrego Água Suja - Estiagem

Água Suja - Perfil Longitudinal de Concentração de Fósforo Total (mg/L)

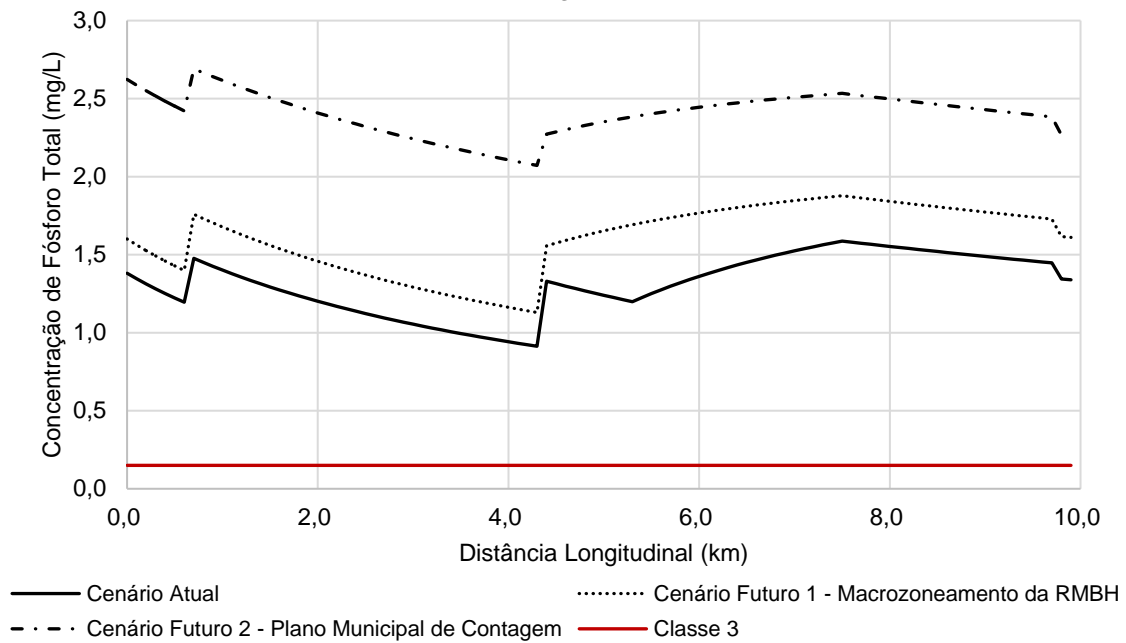


Figura 23 - Perfil Longitudinal de Concentração de Fósforo Total (mg/L) no Córrego Água Suja - Estiagem

Água Suja - Perfil Longitudinal de Concentração de DBO (mg/L)

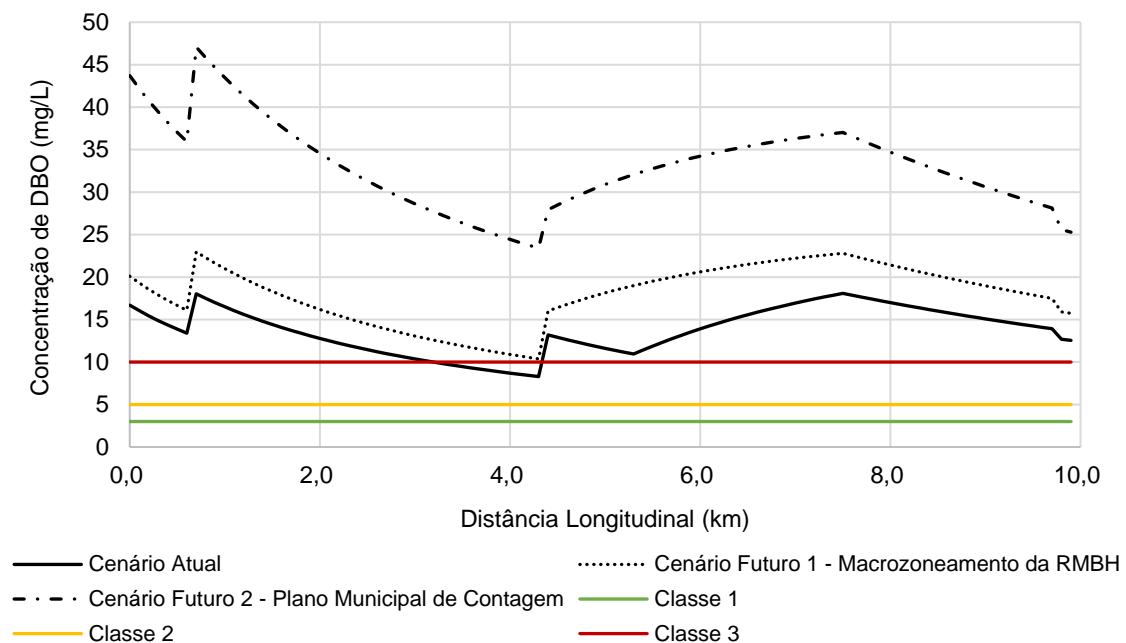


Figura 24 - Perfil Longitudinal de Concentração de DBO (mg/L) no Córrego Água Suja - Cheia

Água Suja - Perfil Longitudinal de Concentração de OD (mg/L)

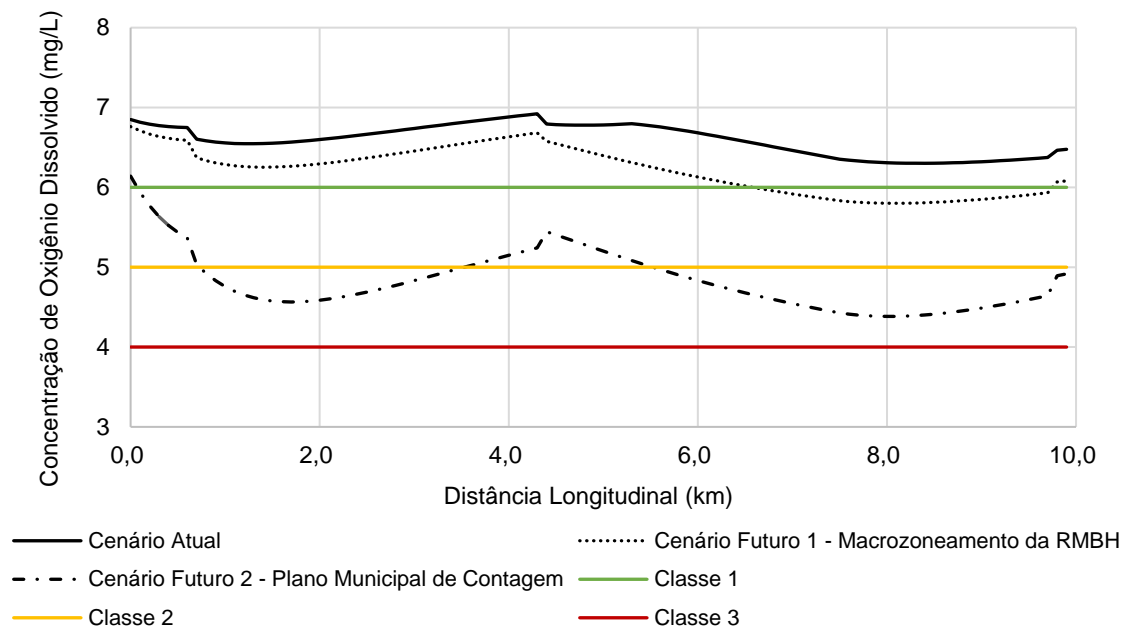


Figura 25 - Perfil Longitudinal de Concentração de OD (mg/L) no Córrego Água Suja - Cheia

Água Suja - Perfil Longitudinal de Concentração de Fósforo Total (mg/L)

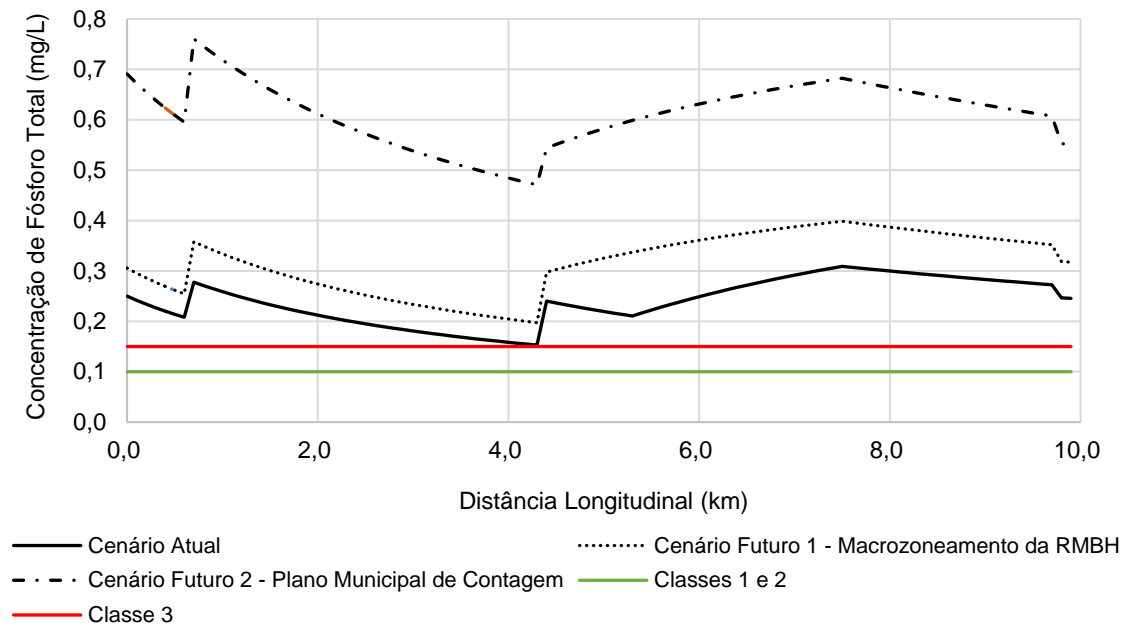


Figura 26 - Perfil Longitudinal de Concentração de Fósforo Total (mg/L) no Córrego Água Suja - Cheia

2.1.6 Análise dos resultados

Os resultados das simulações mostram a evolução ao longo do tempo das condições de qualidade da água dos rios simulados. Os cenários futuros de uso do solo (Macrozoneamento da RMBH e Plano Municipal de Contagem), mostram um agravamento das condições de qualidade da água em todos os rios avaliados, devido ao aumento dos lançamentos de efluentes domésticos sem qualquer tipo de tratamento, considerados na mesma proporção de hoje, porém associados a uma maior área urbanizada.

Observa-se que o cenário mais crítico corresponde ao cenário do Plano Municipal de Contagem, que apresentou concentrações de DBO, OD e fósforo total muito superiores aos dos demais cenários simulados. A situação mais crítica ocorre no córrego Morro Redondo, onde os valores encontrados fazem com que o curso d'água passe a ter concentrações fora de classe para DBO (cheia e estiagem), classe 3 para OD (estiagem) e também classe 3 para fósforo total (cheia).

2.2 Modelagem do Reservatório de Vargem das Flores

A modelagem de DBO e OD do reservatório de Vargem das Flores foi realizada tendo em vista duas abordagens diferentes, que consideram, de forma simplificada, o modelo de mistura completa do reservatório. A primeira abordagem considera o volume total do reservatório em uma avaliação mensal ao longo do ano (focando nas variações sazonais) e a segunda divide o reservatório em três parcelas de volume, para o mês em que o reservatório está no máximo de sua depleção, para fazer uma avaliação espacial ao longo da área ocupada pelo reservatório, onde as concentrações em cada parcela seguem o modelo de mistura completa.

Para a modelagem do fósforo total, foi utilizada também uma metodologia simplificada, que consiste na avaliação do estado trófico do reservatório, conforme utilizado pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2017).

Os itens a seguir apresentam uma avaliação dos dados de qualidade da água das estações localizadas no reservatório, os dados e critérios utilizados para as simulações, considerando a situação atual e os cenários de uso do solo, e os resultados obtidos.

2.2.1 Avaliação dos dados de DBO e OD das estações de qualidade da água

A avaliação dos dados de DBO e OD tem por finalidade caracterizar a qualidade da água do reservatório em relação a esses parâmetros, verificar a disponibilidade de informações e identificar períodos onde há mudanças nas concentrações ao longo do tempo. Nessa análise, foram utilizadas as séries de dados de qualidade da água das estações E1 e E4, localizadas no corpo principal do reservatório (Figura 27).

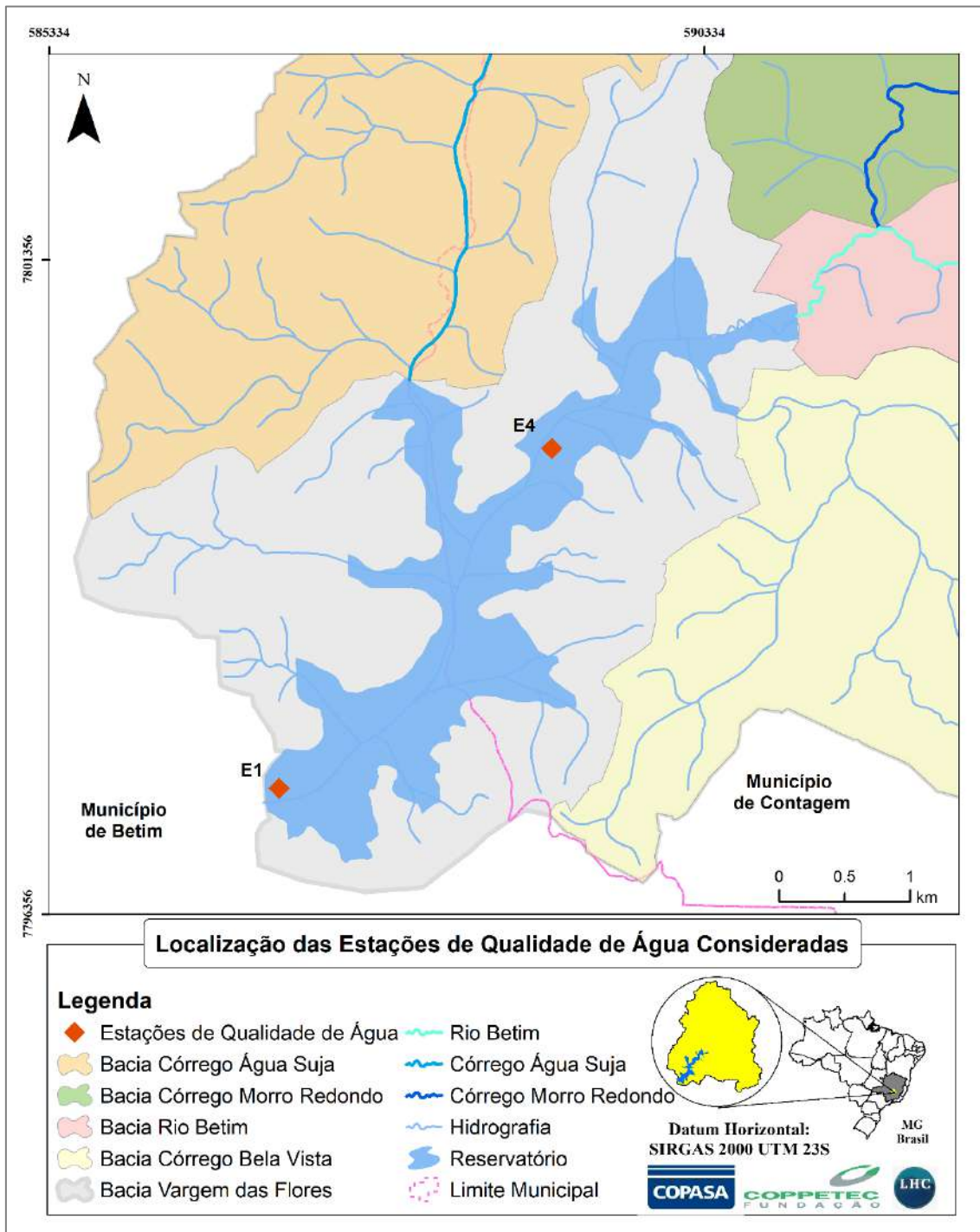


Figura 27 – Localização das Estações de Qualidade de Água consideradas na análise dos dados

A Figura 28 e a Figura 29 apresentam as concentrações de OD e DBO da estação E1 e a Figura 30 e a Figura 31 as respectivas concentrações da estação E4, na superfície (0 e 0,5m), nas profundidades de 5m, 10m e no fundo, ao longo dos anos.

No que diz respeito ao oxigênio dissolvido, observa-se tanto na estação E1 como na E4, conforme Figura 28 e Figura 30, que as concentrações na profundidade de 10m e no fundo apresentam valores baixos, inferiores aos observados nas camadas superiores, mostrando condições anaeróbicas em determinados períodos.

No entanto, os dados de OD referentes à estação E1 mostram que, a partir de 2014, das 18 medições realizadas no fundo do reservatório, 55% apresentam valores superiores a 5mg/l, que é o limite de classe 2 para esse parâmetro. Assim, mesmo com alguns períodos com valores reduzidos, observa-se uma renovação de oxigênio dissolvido das águas do reservatório. Vale ressaltar que o mesmo ocorre na estação E4, onde as medições recentes apresentam valores superiores a classe 2.

Em relação à DBO, a Figura 29 e a Figura 31 mostram grandes períodos com ausência de medições, destacando-se o intervalo de cerca de 15 anos sem informações em ambas as estações. Ressalta-se que a estação E1 possui, neste período, medições para outras profundidades. No entanto, cada medição foi realizada para uma profundidade diferente.

Assim, há poucas medições para caracterizar a DBO da situação atual, sendo duas no ano de 2016 em E1 e duas no decorrer de 2017 em E1 e E4, para diferentes profundidades. Observa-se que, dos dados disponíveis dessas estações, três medições apresentam valores superiores a 5 mg/l (limite de classe 2).

É importante destacar que a modelagem de qualidade da água para os parâmetros OD e DBO depende, para ambos os parâmetros, fortemente dos dados disponíveis de DBO. Isso se deve ao fato de que a DBO reflete o oxigênio consumido no processo de estabilização da matéria orgânica.

Portanto, é necessário que a calibração do modelo para a DBO seja realizada com uma série abrangente e confiável de dados medidos, para que possa refletir da melhor forma a situação atual de qualidade da água do reservatório. Assim, é fundamental que essas medições sejam realizadas com regularidade ao longo do tempo, para que os resultados dos estudos de modelagem de qualidade da água sejam cada vez mais confiáveis.

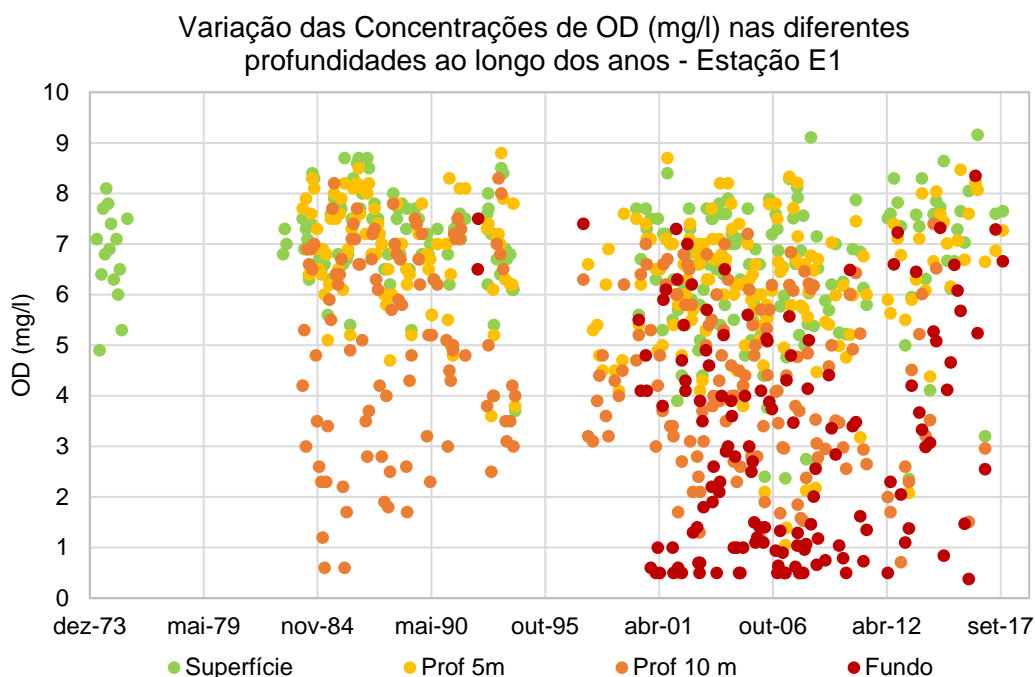


Figura 28 – Concentrações de OD (mg/l) na Estação E1

Varição das Concentrações de DBO (mg/l) nas diferentes profundidades ao longo dos anos - Estação E1

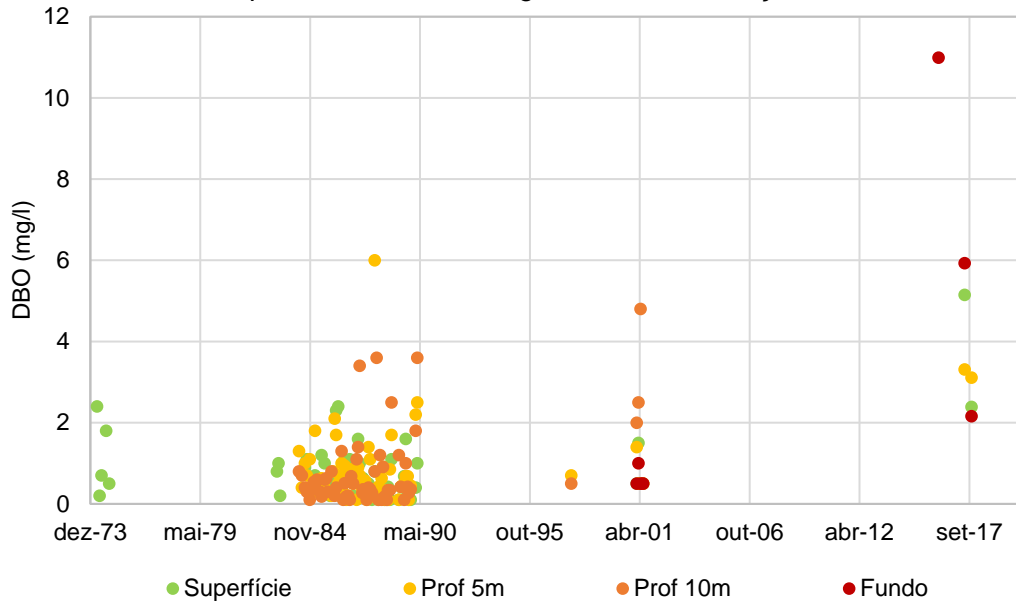


Figura 29 – Concentrações de DBO (mg/l) na Estação E1

Varição das Concentrações de OD (mg/l) nas diferentes profundidades ao longo dos anos - Estação E4

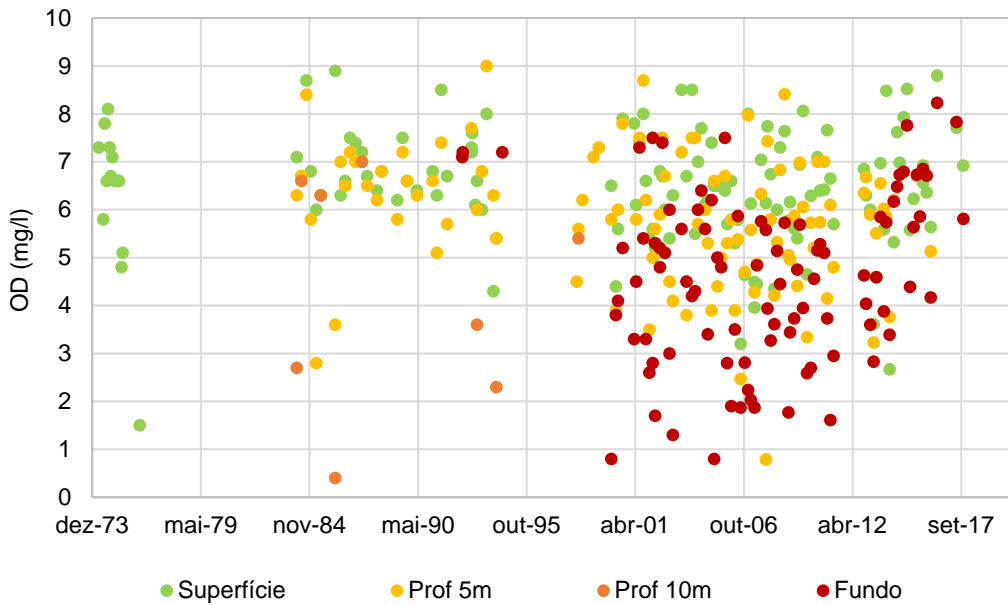


Figura 30 – Concentrações de OD (mg/l) na Estação E4

Destaca-se que essas metodologias utilizadas para a modelagem de qualidade da água são simplificadas e não têm a pretensão de determinar as concentrações exatas que de fato estão ocorrendo no reservatório. Seus resultados são indicativos de uma condição média atual, que serão usados como base para as simulações de cenários futuros de uso do solo, de forma a comparar os resultados obtidos. Assim, as simulações de qualidade da água poderão ser usadas futuramente como uma espécie de ferramenta auxiliar de planejamento e de controle de poluição hídrica na bacia, oferecendo um alerta para as condições potencialmente mais críticas para o reservatório de Vargem das Flores.

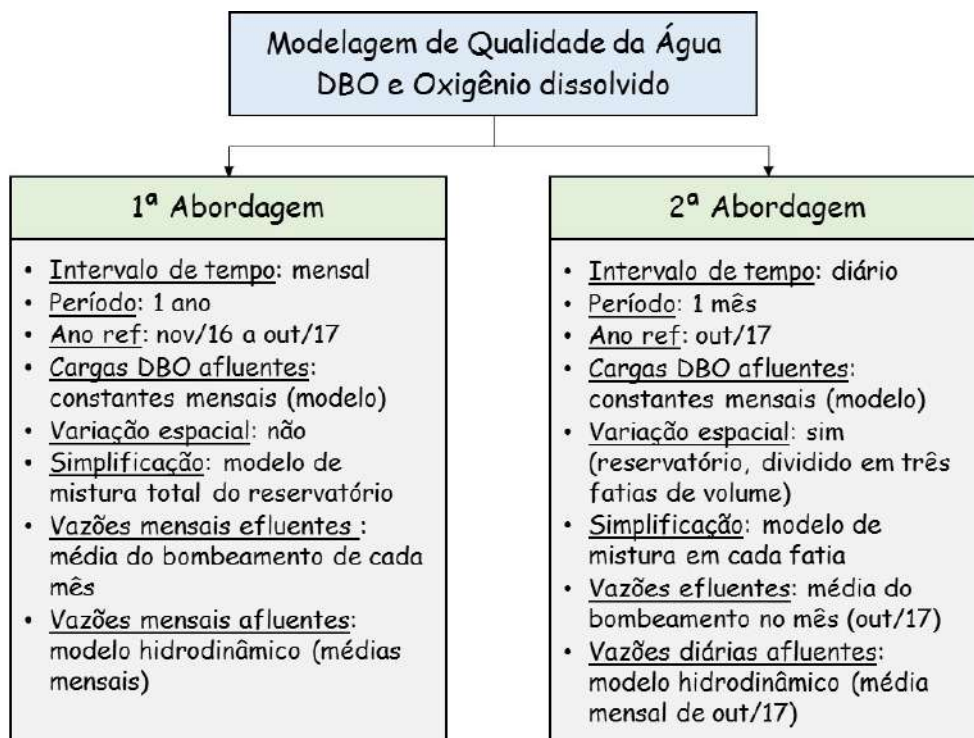


Figura 32 – Descrição das abordagens utilizadas para a modelagem de DBO e OD

2.2.2.1 1ª Abordagem – Variação no tempo

No que diz respeito à primeira abordagem, a simulação do Cenário Atual do reservatório, considerando intervalos de tempo mensais e período de um ano, variando de novembro/2016 a outubro/17, teve como base as seguintes atividades:

- Estimativa do volume inicial do reservatório - Foi considerado o volume do reservatório do mês anterior ao início da simulação (outubro de 2016), determinado utilizando-se a curva cota x área x volume e a cota média referente a esse mês, obtida a partir dos resultados do modelo hidrodinâmico do reservatório (relatório R2);
- Determinação das vazões médias mensais dos principais afluentes e das bacias incrementais ao reservatório, no período de novembro/2016 a outubro/17, obtidas a partir dos resultados da modelagem hidrodinâmica (relatório R2);

- Determinação das vazões médias mensais de bombeamento do reservatório, no período de novembro/2016 a outubro/17, obtidas a partir dos dados fornecidos pela COPASA, relativos a níveis e vazões captadas no período de 2011 a 2018;
- Cálculo dos volumes do reservatório em cada mês: soma do volume inicial do reservatório (mês anterior) com as vazões afluentes do mês, subtraindo-se a vazão média bombeada no mês.

Para a verificação dos volumes calculados, determinou-se os valores das cotas médias mensais associadas a esses volumes a partir da curva cota x área x volume. As cotas médias mensais foram comparadas com as cotas médias observadas e com as cotas determinadas através do modelo hidrodinâmico. Essa comparação mostrou o bom ajuste encontrado, conforme a Figura 33.

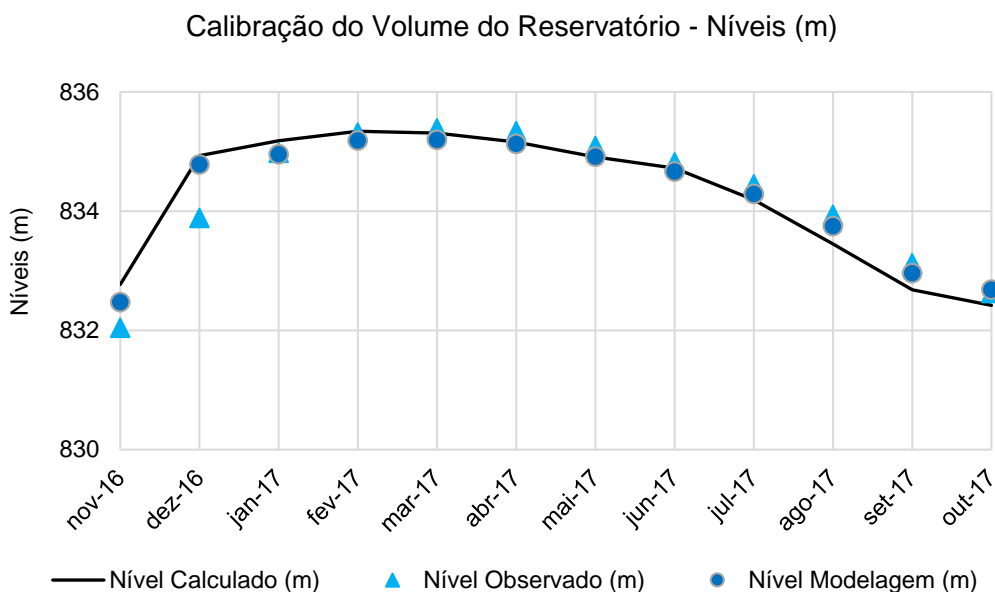


Figura 33 – Cotas médias mensais observadas, obtidas pelo modelo hidrodinâmico e calculadas na 1ª Abordagem

- Estimativa da concentração de DBO e de oxigênio dissolvido inicial do reservatório - Foi utilizada a média dos dados medidos nas estações de qualidade da água do reservatório, no mês anterior ao início da simulação. Em função da indisponibilidade de dados de DBO, foi utilizada a média da medição de agosto/2016 realizada em diferentes profundidades. Assim, para DBO foi utilizado o valor de 1,95mg/l e para o oxigênio dissolvido o valor de 7,98mg/l;
- Estimativa das cargas de DBO afluentes ao reservatório, por mês, para o cenário atual, considerando: (a) vazões totais na foz dos principais afluentes (Rio Betim, já considerando o Córrego Morro Redondo, e Córrego Água Suja), conforme o item 2.1.3; (b) concentrações de DBO na foz dos principais afluentes, resultantes da modelagem de qualidade da água; (c) vazões e concentrações calculadas para a foz do córrego Bela Vista e para a Bacia Lateral contribuinte ao reservatório. As cargas de DBO são apresentadas na Tabela 14 (Cenário Atual);

Tabela 14 – Cargas de DBO (mg/d) afluentes ao reservatório

Rio	Vazão (m³/s)	Concentração de DBO (mg/L)	Carga de DBO (mg/d)
Água Suja	0,124	47,36	507.516.997,92
Betim	0,185	61,74	986.727.261,49
Bela Vista	0,013	162,75	175.988.563,06
Lateral	0,030	48,78	126.685.611,88

Também foi realizada uma estimativa da carga de DBO proveniente de poluição difusa referente à bacia lateral que contribui diretamente para o reservatório. Para isso, foi determinada a área correspondente a cada tipo de uso do solo nessa bacia, tendo como base o mapa de uso do solo do Cenário Atual (MATOS *et al.*, 2017).

A carga de DBO foi então estimada multiplicando-se a área correspondente a cada uso do solo pelo seu respectivo coeficiente de exportação, segundo Tabela 15.

Tabela 15 – Estimativa da Carga Difusa de DBO segundo os coeficientes de exportação utilizados em Moruzzi et al. (2012)

Uso	Área (km²)	CE [kg/(km².dia)]	Carga Difusa (kg/dia)
Mancha Urbana	2,50	5,54	13,83
Solo Exposto	0,61	5,54	3,40
Usos Agropastoris	1,68	7,32	12,30
Vegetação Densa	3,45	1,20	4,13
Vegetação Esparsa	2,88	1,06	3,05
TOTAL			36,71 kg/dia

- Cálculo da concentração de DBO e de oxigênio dissolvido, em cada mês, de acordo com o modelo simplificado de Streeter Phelps, representado nas equações (1) e (2).

$$L = L_0 \cdot e^{-K_d t} \quad (1)$$

$$C_t = C_s - \left[\frac{K_d \cdot L_0}{K_2 - K_d} \cdot (e^{-K_d t} - e^{-K_2 t}) + (C_s - C_0) \cdot e^{-K_d t} \right] \quad (2)$$

Onde:

L – DBO remanescente em um tempo t qualquer (mg/L);

L_0 – DBO remanescente em $t=0$ (mg/L);

K_d – Coeficiente de desoxigenação, em dia⁻¹;

t – tempo (dia) – utilizado $t=28, 30$ ou 31 dias, dependendo do mês, visto que a simulação é mensal;

- C_t – Concentração de oxigênio dissolvido no tempo t, em mg/L;
 C_s – Concentração de saturação de oxigênio dissolvido, em mg/L;
 C_0 – Concentração de oxigênio dissolvido inicial da mistura, em mg/L;
 K_2 – Coeficiente de reaeração, em dia⁻¹.

Destaca-se que foi utilizada como condição inicial do reservatório a concentração resultante da média dos dados medidos (agosto/2016). Por sua vez, o valor de L_0 foi calculado através do balanço entre a concentração inicial do reservatório (e seu volume correspondente) e as concentrações dos afluentes e bacia lateral contribuinte ao reservatório (com suas respectivas vazões). O processo foi repetido para cada mês simulado.

O valor do coeficiente de desoxigenação, K_d , obtido na calibração foi de 0,023. Para o coeficiente de reaeração, K_2 , foi considerado o valor de 0,025 para os meses onde o reservatório estava com níveis elevados (acima da cota 835m) e 0,021 para os demais meses.

Os resultados da simulação das condições atuais (Cenário Atual) de DBO são apresentados na Tabela 16 e na Figura 34 e de oxigênio dissolvido são apresentados na Tabela 17 e na Figura 35. As concentrações obtidas nessas simulações foram comparadas aos valores mínimos, máximos e percentis de 25%, 50% e 75% dos dados de todas as estações do reservatório, no período de 2007 a 2017 para DBO e de 2012 a 2017 para oxigênio dissolvido. Ressalta-se que apenas a estação E1 possui dados de DBO que abrangem este período. As demais estações só possuem dados em 2017. Também é importante destacar que os períodos de dados utilizados são diferentes em função da maior disponibilidade de dados de oxigênio dissolvido.

Os resultados obtidos mostram um bom ajuste para DBO em relação aos dados medidos, com exceção do mês de junho/17, onde a concentração resultante da simulação é menor do que o valor mínimo medido. Em julho/17, a faixa de variação entre os valores máximos e mínimos medidos é pequena, fazendo com que o valor simulado esteja bem próximo dos valores observados, mesmo que seja superior ao máximo medido.

No que diz respeito ao oxigênio dissolvido, os resultados obtidos também mostram um bom ajuste quando comparados aos dados medidos. A exceção também ocorre em julho/17, como esperado em função dos resultados já discutidos de DBO, onde o valor simulado é menor que o valor mínimo medido.

Destaca-se que as concentrações do reservatório simuladas para a situação atual tanto para a DBO como para o oxigênio dissolvido estão entre as classes 1 e 2 do CONAMA. Vale que lembrar que as simulações representam um valor médio de concentrações em todo o reservatório considerando que estão totalmente misturadas, e, portanto, não são identificadas as variações de concentrações ao longo da profundidade e do eixo longitudinal.

Tabela 16 – Resultados da Calibração da Modelagem de DBO (mg/l) - 1ª Abordagem

Mês	DBO (mg/l) - Observado					DBO (mg/l) Obtido
	Mínimo	Q25%	Q50%	Q75%	Máximo	
Nov -2016	-	-	-	-	-	2,44
Dez – 2016	-	-	-	-	-	1,97
Jan – 2017	-	-	-	-	-	2,04
Fev – 2017	0,58	1,30	2,20	4,75	22,76	2,09
Mar - 2017	1,82	4,11	6,41	8,70	10,99	2,10
Abr – 2017	-	-	-	-	-	2,18
Mai – 2017	-	-	-	-	-	2,26
Jun – 2017	2,64	3,66	4,02	5,68	5,93	2,34
Jul – 2017	2,30	2,33	2,36	2,39	2,42	2,50
Ago – 2017	0,94	1,51	1,89	1,98	2,90	2,72
Set – 2017	-	-	-	-	-	3,00
Out - 2017	2,12	2,40	2,62	3,43	6,62	3,19

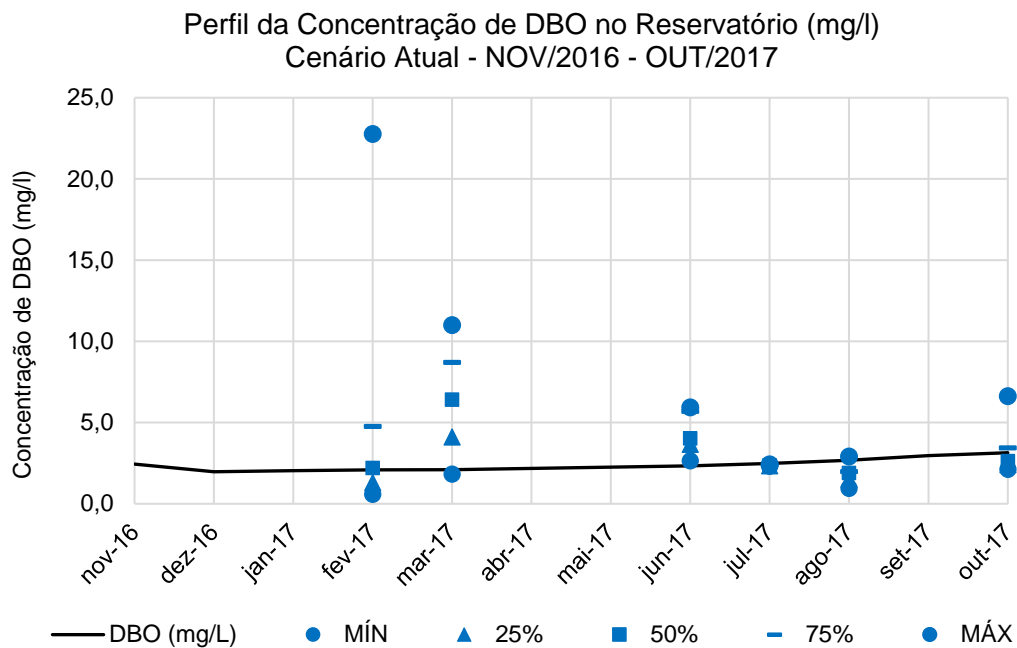


Figura 34 – Perfil da Concentração de DBO no Reservatório (mg/l) – 1ª Abordagem

Tabela 17 - Resultados da Calibração da Modelagem de OD (mg/l) - 1ª Abordagem

Mês	OD (mg/l) - Observado					OD (mg/l) Obtido
	Mínimo	Q25%	Q50%	Q75%	Máximo	
Nov - 2016	-	-	-	-	-	6,43
Dez - 2016	0,71	5,86	6,75	7,81	10,62	6,17
Jan - 2017	-	-	-	-	-	6,14
Fev - 2017	1,10	3,74	5,65	6,07	7,55	6,21
Mar - 2017	0,38	5,13	6,71	7,35	8,14	6,13
Abr - 2017	0,50	3,00	5,00	5,90	7,51	6,04
Mai - 2017	-	-	-	-	-	6,27
Jun - 2017	1,70	5,85	6,70	7,43	8,31	6,25
Jul - 2017	7,63	8,19	8,27	8,50	9,18	6,19
Ago - 2017	5,08	6,54	7,07	7,62	9,45	6,01
Set - 2017	-	-	-	-	-	5,73
Out - 2017	3,67	6,32	6,93	7,58	8,62	5,45

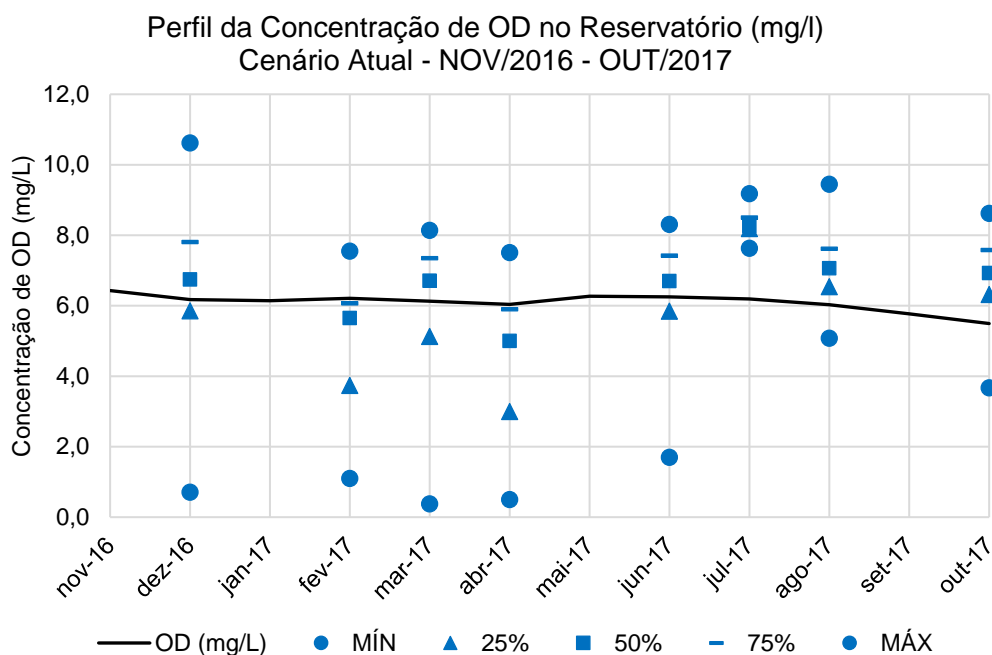


Figura 35 - Perfil da Concentração de OD no Reservatório (mg/l) – 1ª Abordagem

2.2.2.2 2ª Abordagem – Variação no espaço

Em relação à segunda abordagem, a simulação do Cenário Atual do reservatório, considerou o intervalo de tempo diário, ao longo de um mês, no momento mais seco do reservatório, em um período de 31 dias (1 a 31 de outubro/17), tendo como base as seguintes etapas:

- Divisão do reservatório em três parcelas de volume (Figura 36), para as quais foram realizadas as simulações diárias. Essa divisão teve como base a posição de entrada dos principais afluentes no reservatório.

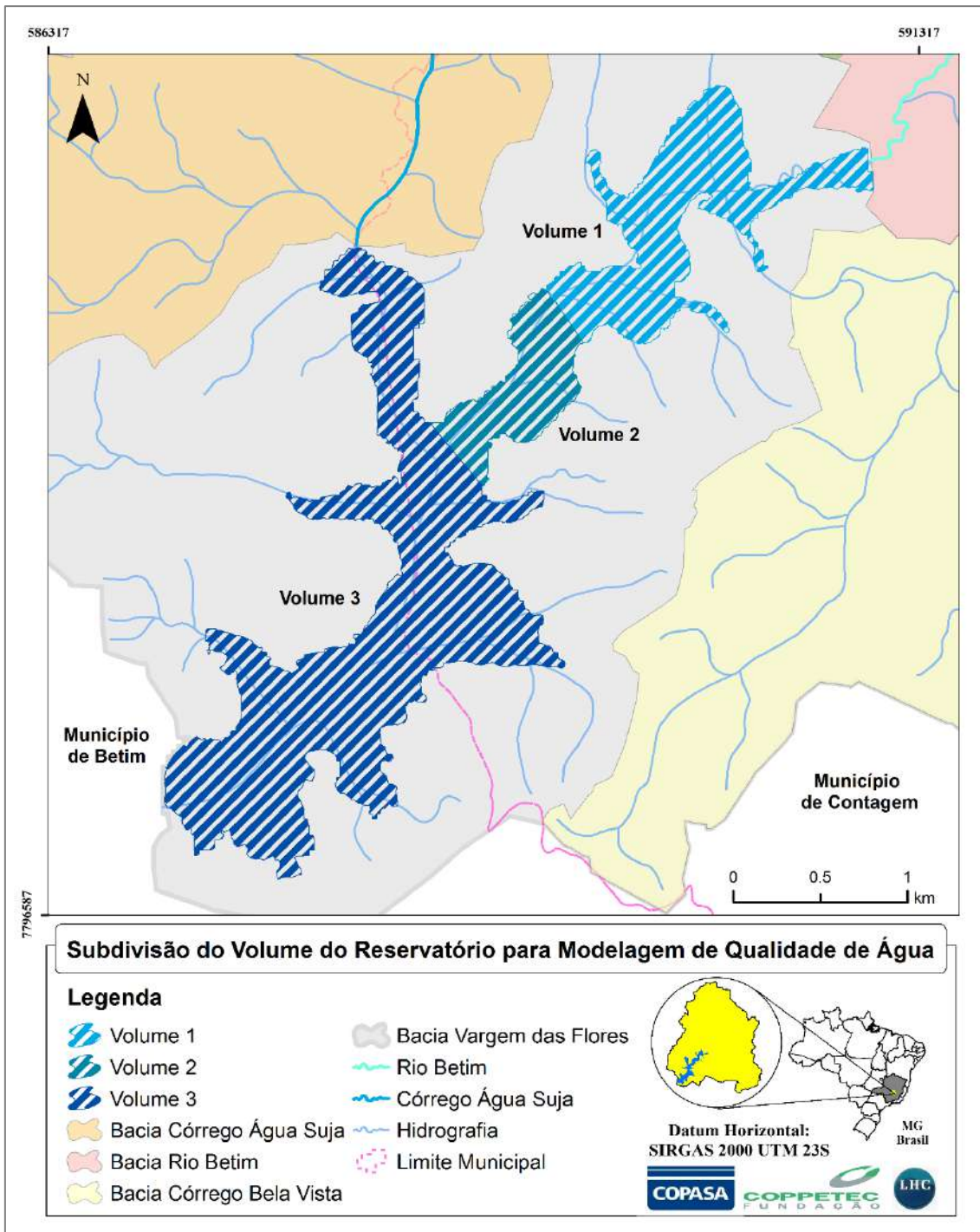


Figura 36 – Representação esquemática da subdivisão do volume do reservatório em três parcelas para a simulação conforme a 2ª Abordagem

- Estimativa do volume inicial das três parcelas de volume do reservatório - O volume inicial foi estimado para o dia anterior ao início da simulação (30/9/2017), utilizando-se a curva cota-área-volume e a cota referente a esse dia (832,61 m), obtida a partir dos resultados do modelo hidrodinâmico do reservatório (relatório R2);
- Determinação das vazões diárias de outubro de 2017 dos principais afluentes e das bacias incrementais ao reservatório - Como simplificação, foi utilizada a vazão média mensal desse mês, constante ao longo dos 31 dias, obtida a partir dos resultados da modelagem hidrodinâmica (relatório R2);
- Determinação das vazões diárias de bombeamento de outubro de 2017 - Como simplificação, foi utilizada a vazão média mensal desse mês, constante ao longo dos 31 dias, obtida a partir dos dados fornecidos pela COPASA, relativos a níveis e vazões captadas no período de 2011 a 2018.

A fim de representar o esvaziamento do volume do reservatório de forma homogênea, foi considerada que a vazão efluente de cada parcela de volume é a soma das vazões afluentes na parcela, com a porcentagem da diferença entre as vazões totais afluentes ao reservatório e a vazão de bombeamento. Essa porcentagem foi calculada a partir da relação entre o volume da parcela e o volume total do reservatório. A Figura 37 apresenta, de forma esquemática, a metodologia utilizada.

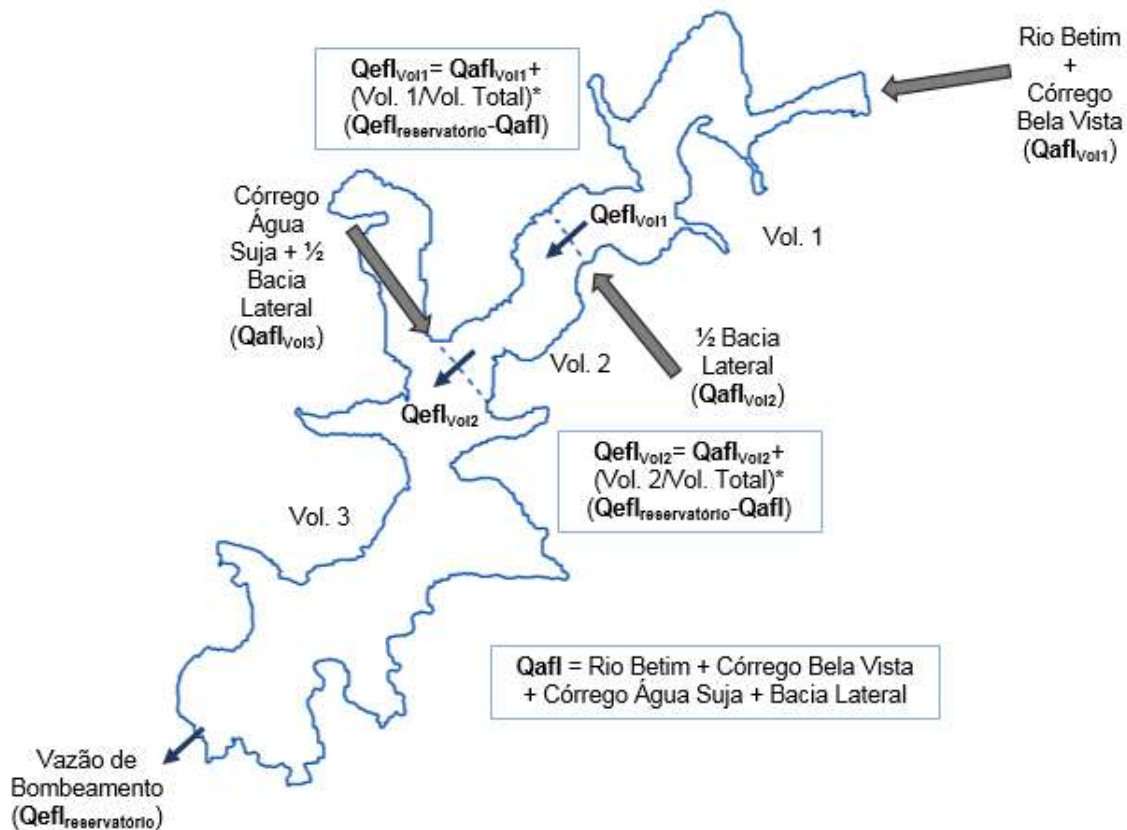


Figura 37 – Esquema da metodologia de cálculo utilizada para estimar a vazão efluente de cada parcela de volume do reservatório

- Estimativa da concentração inicial de DBO e oxigênio dissolvido das três parcelas do reservatório - Nessa estimativa, foi utilizado como referência o mês de setembro/17 e utilizados os dados da estação E1, localizada na parcela de Volume 3 e da estação E4, localizada na parcela de Volume 2.

Essas estações possuem medições em junho/17 e outubro/17. As concentrações de setembro/17 em cada estação foram calculadas por interpolação linear entre as medições nessas datas, admitindo-se de forma simplificada que a variação delas é linear. Assim, considerou-se que a concentração de setembro/2017 na estação E1 representa a parcela correspondente ao Volume 3 e na estação E4 a parcela relacionada ao Volume 2. A concentração referente ao Volume 1 foi calculada proporcionalmente, através da relação entre as diferenças de concentrações e de volumes 2 e 3. A Tabela 18 apresenta as concentrações iniciais de DBO e OD de cada parcela de volume do reservatório.

Tabela 18 – Concentrações iniciais de DBO e OD em cada parcela de volume do reservatório

Volume	DBO Inicial (mg/l)	OD Inicial (mg/l)
Volume 1	3,87	6,80
Volume 2	3,85	6,82
Volume 3	3,10	7,32

- Estimativa das cargas diárias de DBO afluentes ao reservatório para Cenário Atual - Foram utilizados os mesmos critérios da primeira abordagem. Desta forma, as cargas de DBO são aquelas apresentadas na Tabela 14.
- Cálculo da concentração de DBO e de oxigênio dissolvido, em cada dia, de acordo com o modelo simplificado de Streeter Phelps, representado pelas equações (1) e (2) apresentadas anteriormente. O coeficiente de desoxigenação K_d e o coeficiente de reaeração K_2 utilizados são os mesmos da primeira abordagem e o tempo de decaimento igual a 1 dia.

Os resultados da simulação das condições atuais (Cenário Atual) de DBO e oxigênio dissolvido, ao longo dos trinta e um dias, para cada parcela de Volume, são apresentados na Figura 38 e na Figura 39. A Figura 40 e a Figura 41 apresentam os resultados finais das simulações para o dia 31/10 nas três subdivisões do reservatório, além dos valores mínimos, máximos e médios de DBO e oxigênio dissolvido, respectivamente, de outubro de 2017 nas estações E1 e E4. Na Tabela 19 e na Tabela 20, podem ser comparados os valores obtidos na simulação (dia 31/10) e os dados dos postos E1 e E4.

Observa-se que as concentrações de DBO e OD obtidas na simulação do Volume 3 estão próximas dos valores observados na estação E1 (Figura 40 e Figura 41). Na Parcela 2, os valores de oxigênio dissolvido estão abaixo do valor mínimo observado e os de DBO estão um pouco acima do máximo observado. Ressalta-se que as concentrações obtidas na Parcela 1 são elevadas, possivelmente além do valor real, muito provavelmente em função do seu volume reduzido e das simplificações utilizadas na modelagem. Para esse local, não existem dados medidos que possam ser comparados com os valores simulados. Portanto, os resultados para essa parcela de volume devem ser interpretados com certo cuidado.

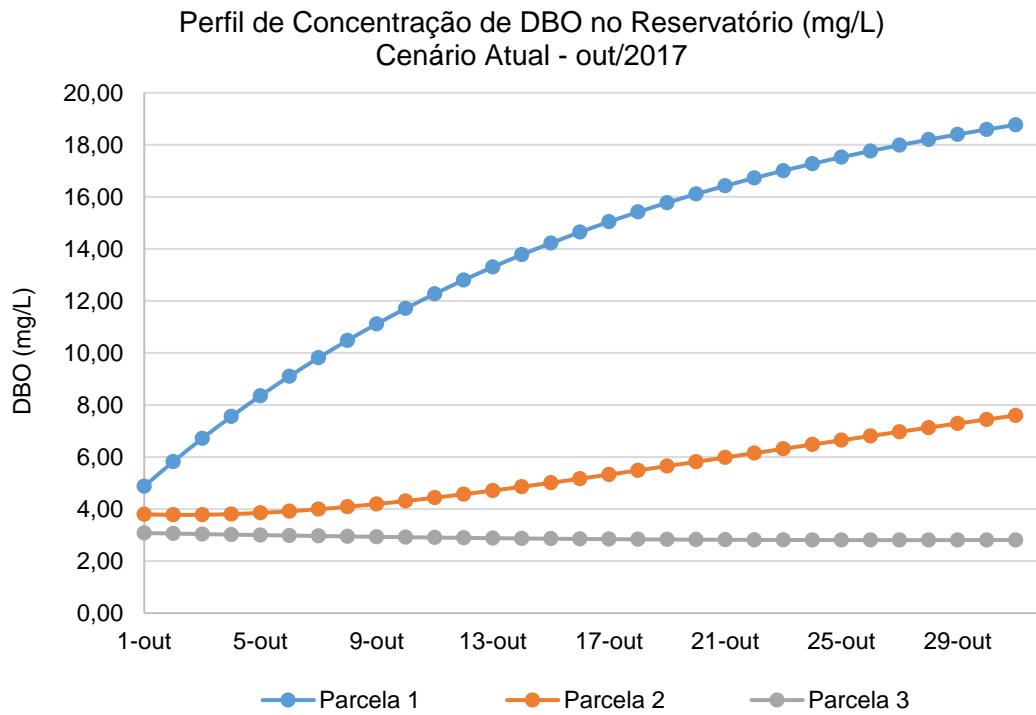


Figura 38 – Perfil de Concentração de DBO (mg/l) em cada parcela de volume, ao longo dos 31 dias de simulação – out/2017 – 2ª Abordagem

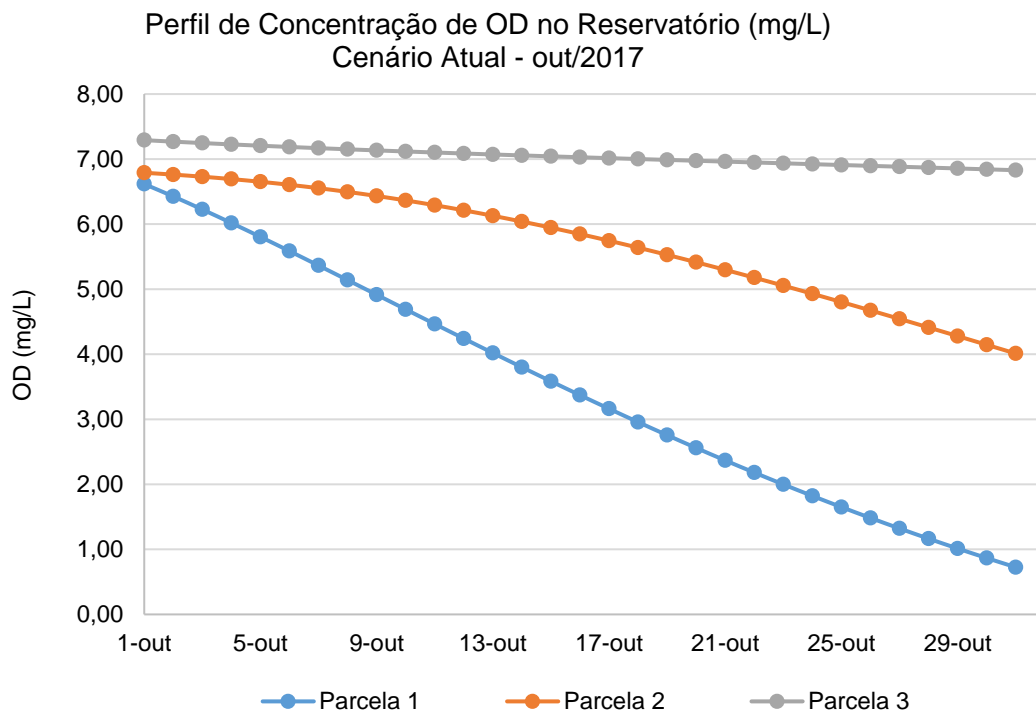


Figura 39 - Perfil de Concentração de OD (mg/l) em cada parcela de volume, ao longo dos 31 dias de simulação – out/2017 – 2ª Abordagem

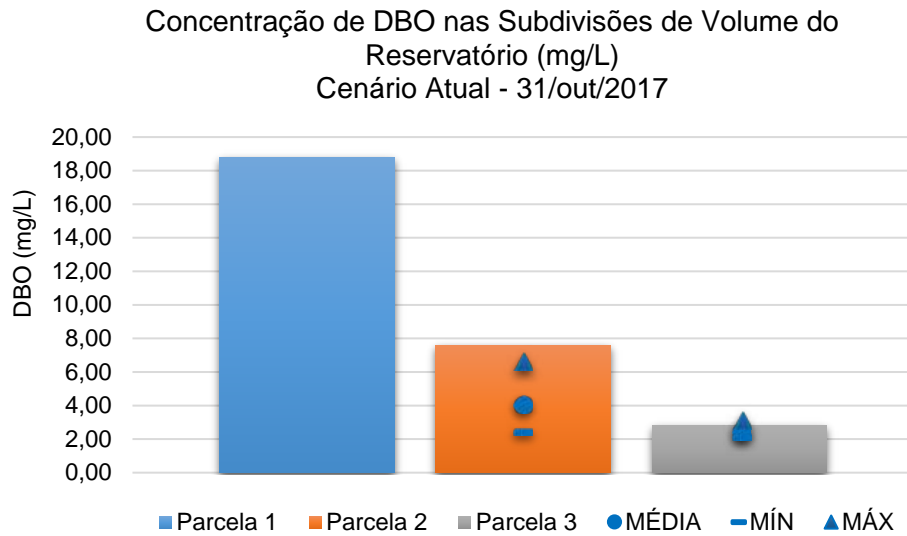


Figura 40 – Variação da Concentração de DBO (mg/l) nas Subdivisões de Volume do Reservatório – 31/out/2017 – 2ª Abordagem

Tabela 19 – Valores mínimos, máximos e médios observados e valor obtido no dia 31/out/2017 de DBO (mg/l)

Volume/Estação	DBO (mg/l)		DBO (mg/l) Obtido
		Observado	
Volume 2/ Estação E4	Mínimo	2,40	7,60
	Média	4,06	
	Máximo	6,62	
Volume 3/ Estação E1	Mínimo	2,12	2,81
	Média	2,45	
	Máximo	3,11	

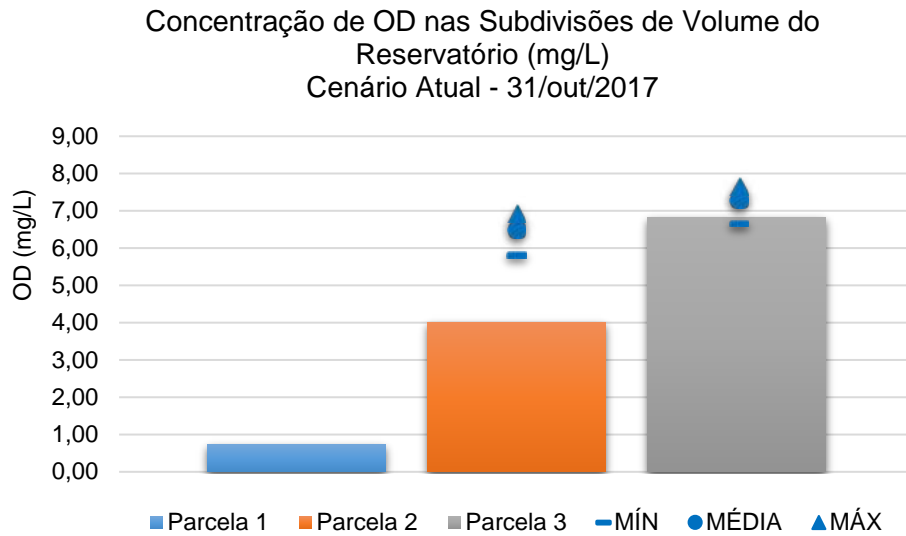


Figura 41 - Variação da Concentração de OD (mg/l) nas Subdivisões de Volume do Reservatório – 31/out/2017 – 2ª Abordagem

Tabela 20 - Valores mínimos, máximos e médios observados e valor obtido no dia 31/out/2017 de OD (mg/l)

Volume/Estação	OD (mg/l)		OD (mg/l) Obtido
	Mínimo	Média	
Volume 2/ Estação E4	Mínimo	5,81	4,01
	Média	6,51	
	Máximo	6,92	
Volume 3/ Estação E1	Mínimo	6,66	6,83
	Média	7,30	
	Máximo	7,65	

2.2.3 Modelagem de DBO e Oxigênio dissolvido – Cenários de uso do solo

Para simulação de DBO e oxigênio dissolvido dos cenários futuros de uso do solo (Plano Municipal de Contagem e Macrozoneamento da RMBH), foram considerados os mesmos critérios, coeficientes de decaimento e de reaeração, discretização temporal e espacial utilizados em cada uma das abordagens empregadas, descritas no item 2.2.2.

A estimativa do volume inicial e das vazões médias afluentes, tanto para a 1ª Abordagem quanto para a 2ª Abordagem, também seguiu a mesma metodologia do item 2.2.2, tendo seus valores apenas atualizados para os cenários futuros, assim como as estimativas de cargas de DBO afluentes ao reservatório.

As cargas de DBO de cada cenário são apresentadas na Tabela 21 (Cenário Futuro 1 – Macrozoneamento RMBH) e na Tabela 22 (Cenário Futuro 2 – Plano Municipal de Contagem).

Tabela 21 – Cargas de DBO (mg/d) afluentes ao reservatório – Cenário Futuro 1 – Macrozoneamento RMBH

Rio	Vazão (m³/s)	Concentração de DBO (mg/L)	Carga de DBO (mg/d)
Água Suja	0,130	56,11	630.211.710,81
Betim	0,194	78,94	1.321.611.466,87
Bela Vista	0,015	185,78	234.055.839,54
Lateral	0,029	50,83	126.594.244,92

Tabela 22 – Cargas de DBO (mg/d) afluentes ao reservatório – Cenário Futuro 2 – Plano Municipal de Contagem

Rio	Vazão (m³/s)	Concentração de DBO (mg/L)	Carga de DBO (mg/d)
Água Suja	0,126	76,31	827.822.746,62
Betim	0,203	119,74	2.103.316.642,10
Bela Vista	0,014	212,79	265.143.010,35
Lateral	0,022	65,66	127.441.165,54

As cargas de DBO referentes à poluição difusa da bacia lateral que contribui diretamente para o reservatório são apresentadas na Tabela 23 (Cenário Futuro 1 – Macrozoneamento RMBH) e na Tabela 24 (Cenário Futuro 2 – Plano Municipal de Contagem).

Tabela 23 – Estimativa da Carga Difusa de DBO segundo os coeficientes de exportação utilizados em Moruzzi et al. (2012) - Cenário Futuro 1 – Macrozoneamento RMBH

Uso	Área (km²)	CE [kg/(km².dia)]	Carga Difusa (kg/dia)
Mancha Urbana	7,0	5,54	38,65
Solo Exposto	0,0	5,54	0,00
Usos Agropastoris	0,0	7,32	0,28
Vegetação Densa	5,3	1,20	6,39
Vegetação Esparsa	0,0	1,06	0,00
TOTAL			45,32 kg/dia

Tabela 24 – Estimativa da Carga Difusa de DBO segundo os coeficientes de exportação utilizados em Moruzzi et al. (2012) - Cenário Futuro 2 – Plano Municipal de Contagem

Uso	Área (km²)	CE [kg/(km².dia)]	Carga Difusa (kg/dia)
Mancha Urbana	6,2	5,54	34,27
Solo Exposto	0,0	5,54	0,00
Usos Agropastoris	1,1	7,32	8,19
Vegetação Densa	4,9	1,20	5,90
Vegetação Esparsa	0,1	1,06	0,13
TOTAL			48,48 kg/dia

As concentrações iniciais de DBO e OD foram determinadas a partir do percentual de aumento/redução das concentrações médias afluentes ao reservatório (Tabela 25), de cada cenário em relação ao atual.

Tabela 25 – Percentuais de aumento da concentração de DBO e de redução da concentração de OD em cada cenário de uso e ocupação do solo

Cenário	Aumento na DBO	Redução no OD
Futuro 1 – Macrozoneamento RMBH	23%	84%
Futuro 2 – Plano Municipal de Contagem	78%	23%

As vazões de bombeamento foram mantidas iguais às do Cenário Atual.

Os resultados das simulações dos cenários em cada abordagem são apresentados nos itens a seguir.

2.2.3.1 Resultados da 1ª Abordagem

Os resultados obtidos na simulação de DBO e de OD no Reservatório de Vargem das Flores, para cada cenário, são apresentados na Figura 42 e na Figura 43, respectivamente.

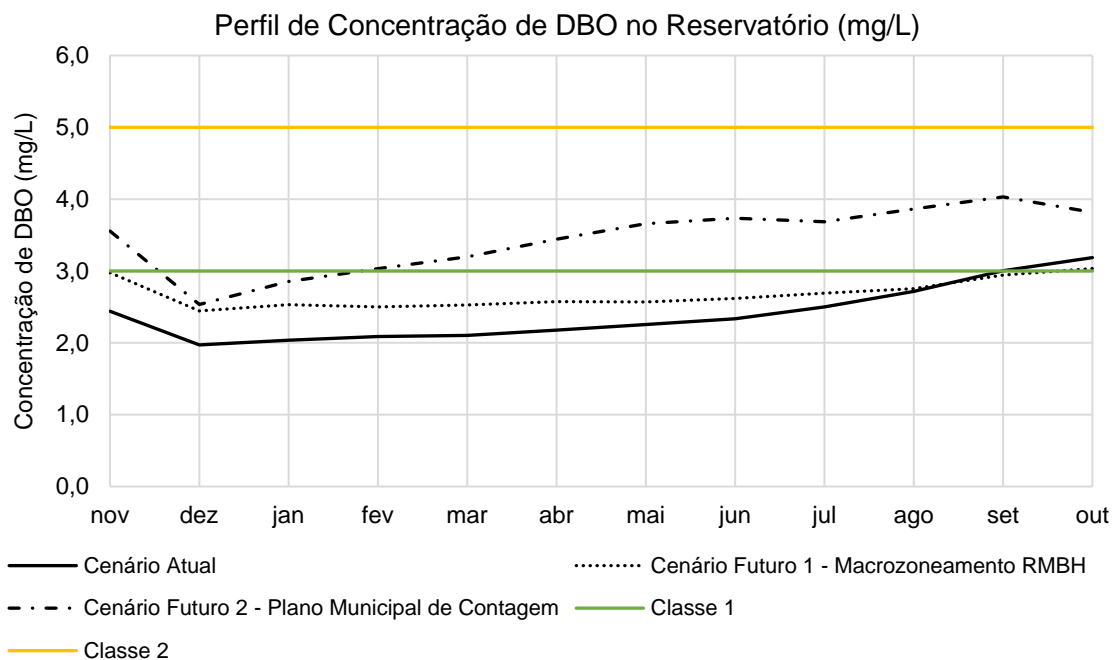


Figura 42 - Perfil da Concentração de DBO no Reservatório (mg/l) – 1ª Abordagem – Comparação entre Cenários

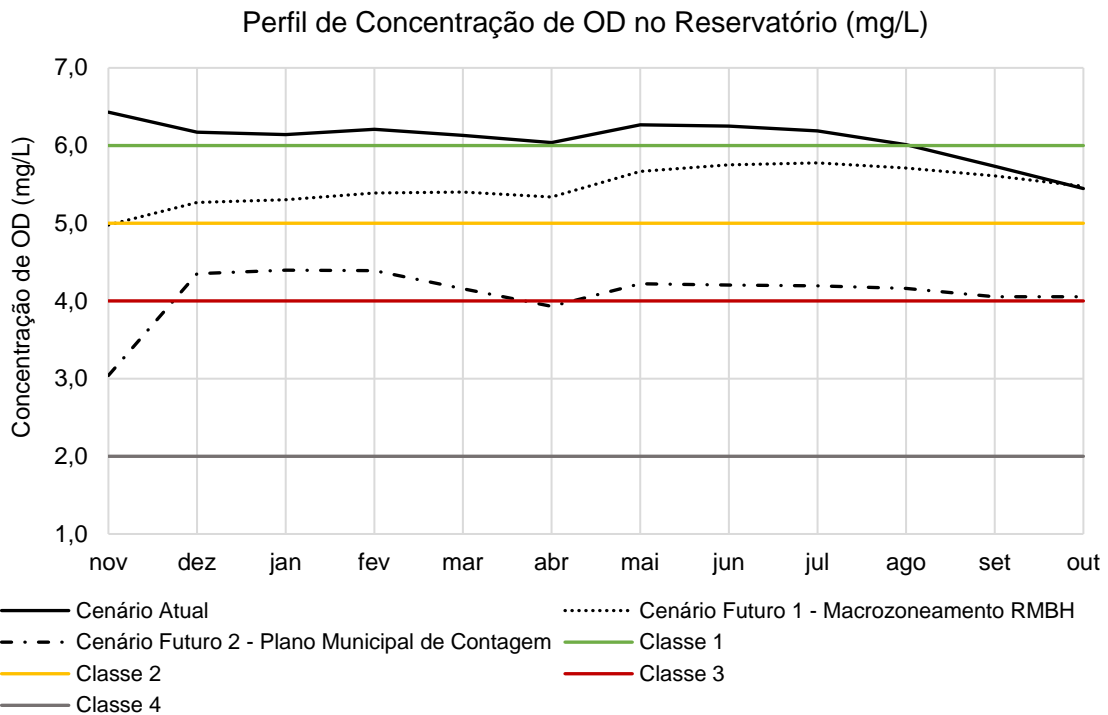


Figura 43 - Perfil da Concentração de OD no Reservatório (mg/l) – 1ª Abordagem – Comparação entre Cenários

Os resultados da Figura 42 e da Figura 43 mostram como as condições se agravam para os cenários futuros de uso do solo, principalmente em relação ao cenário do Plano Municipal de Contagem. Nesse cenário, as concentrações de DBO são muito superiores ao Cenário Atual e as concentrações de oxigênio dissolvido estão em Classe 3 e 4 da resolução CONAMA 357/05, bem inferiores aos demais cenários.

Destaca-se que, a partir do mês de agosto, as concentrações de DBO do Cenário Futuro 1 – Macrozoneamento da RMBH são menores do que as obtidas no Cenário Atual. Isso se deve ao fato de que o aumento de volume neste cenário futuro, a partir desse mês, é maior que o aumento das cargas afluentes. O mesmo ocorre para OD, sendo que neste caso, as concentrações são ligeiramente maiores do que o Cenário Atual, ao fim da simulação.

2.2.3.2 Resultados da 2ª Abordagem

Com a simulação do Cenário Futuro 1 – Macrozoneamento da RMBH, foram obtidos, na segunda abordagem, os resultados de DBO e oxigênio dissolvido apresentados nas Figura 44 a Figura 47. Já a simulação do Cenário Futuro 2 – Plano Municipal de Contagem, teve como resultados aqueles apresentados nas Figura 48 a Figura 51.

Os resultados mostram que as concentrações de DBO referentes ao Cenário Futuro 2 - Plano Municipal de Contagem são superiores aos obtidos para o Cenário Futuro 1 – Macrozoneamento da RMBH, ao longo de todo o período simulado, nas parcelas de Volume 2 e 3. Em relação ao oxigênio dissolvido, as simulações mostram valores muito baixos quando comparados ao Cenário Atual. No Cenário do Plano Municipal de Contagem, os valores de oxigênio dissolvido estão fora de classe na parcela de volume 2 e em classe 4 e fora de classe na parcela de volume 3.

A parcela de volume 1, por seu volume reduzido e pelas simplificações utilizadas nesta abordagem, apresentam concentrações elevadas de DBO e baixas de oxigênio dissolvido em todas as simulações. Conforme mencionado anteriormente, por não haver medições de qualidade da água nesta parcela, seus resultados devem ser tomados com cuidado.

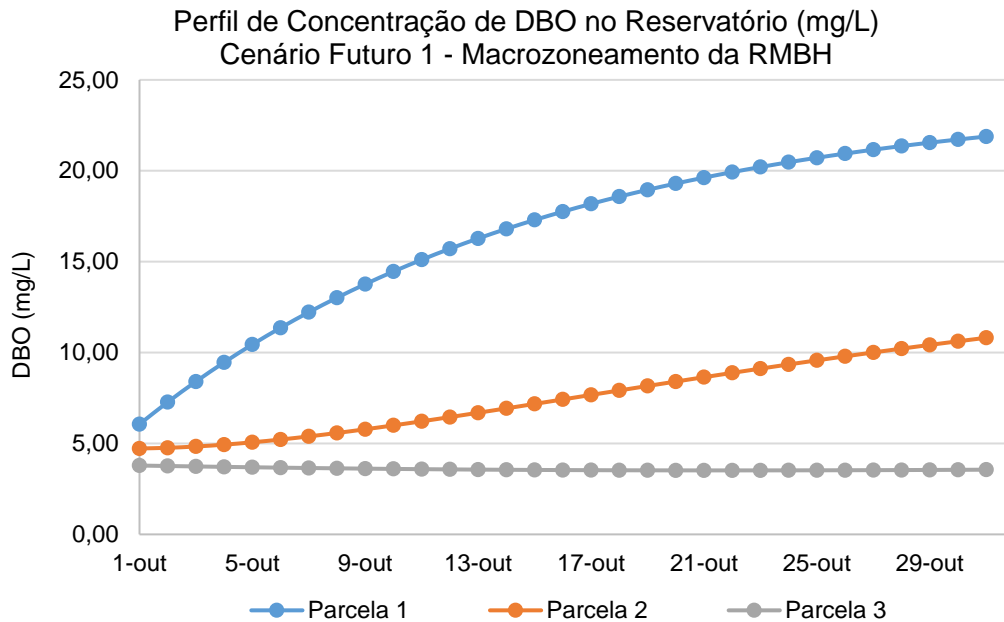


Figura 44 - Perfil de Concentração de DBO (mg/l) em cada parcela de volume, ao longo dos 31 dias de simulação (mês de referência: outubro) – 2ª Abordagem – Cenário Futuro 1 – Macrozoneamento da RMBH

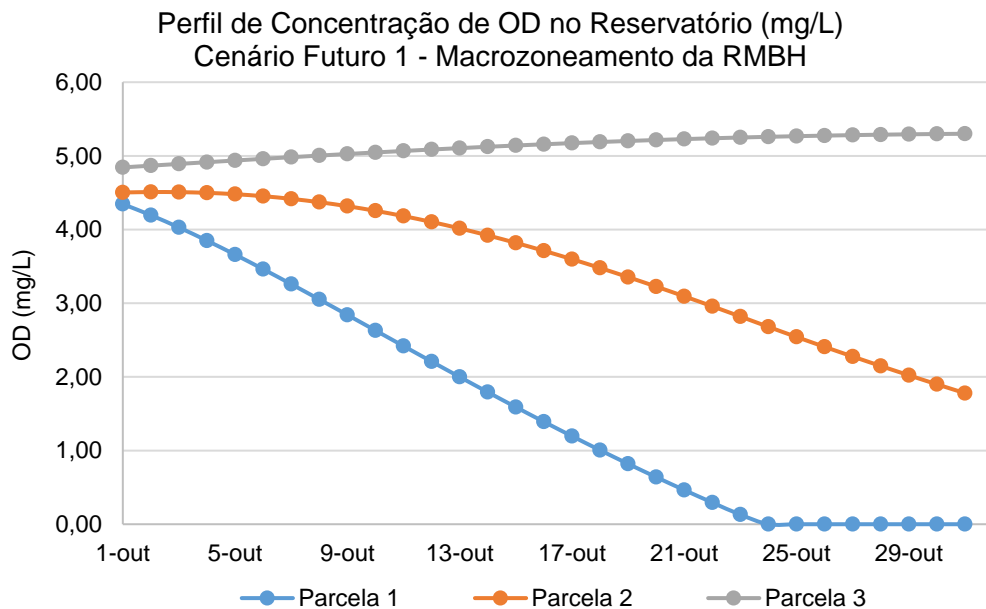


Figura 45 - Perfil de Concentração de OD (mg/l) em cada parcela de volume, ao longo dos 31 dias de simulação (mês de referência: outubro) – 2ª Abordagem – Cenário Futuro 1 – Macrozoneamento da RMBH

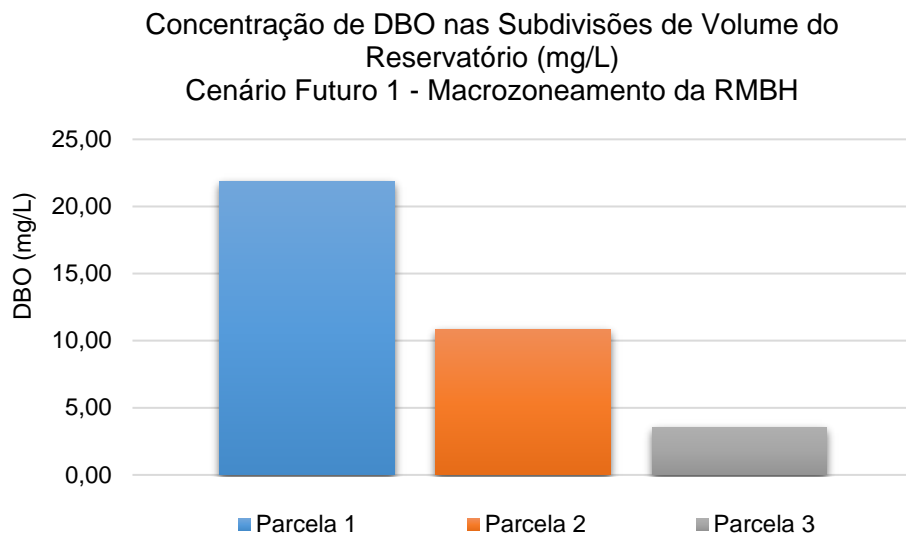


Figura 46 - Variação da Concentração de DBO (mg/l) nas Subdivisões de Volume do Reservatório – 31/out – 2ª Abordagem – Cenário Futuro 1 – Macrozoneamento da RMBH

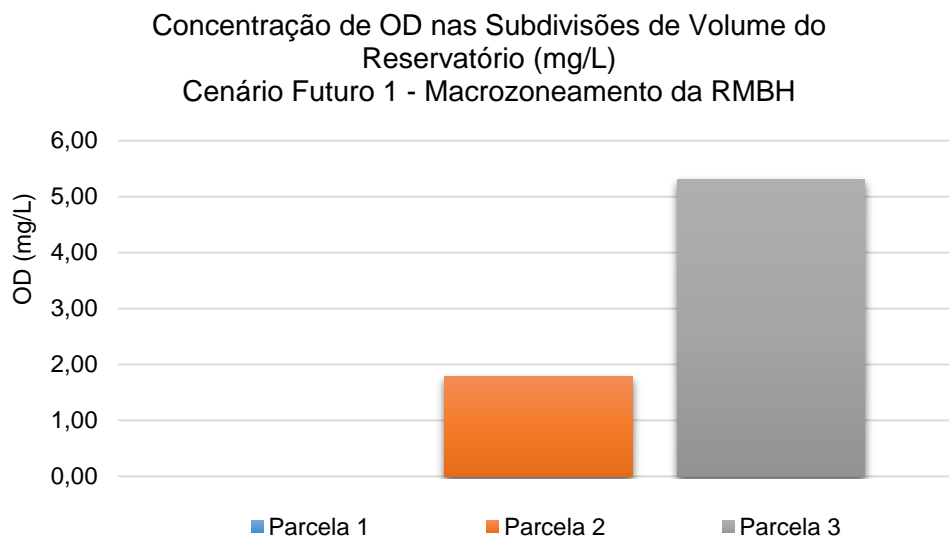


Figura 47 - Variação da Concentração de OD (mg/l) nas Subdivisões de Volume do Reservatório – 31/out – 2ª Abordagem – Cenário Futuro 1 – Macrozoneamento da RMBH

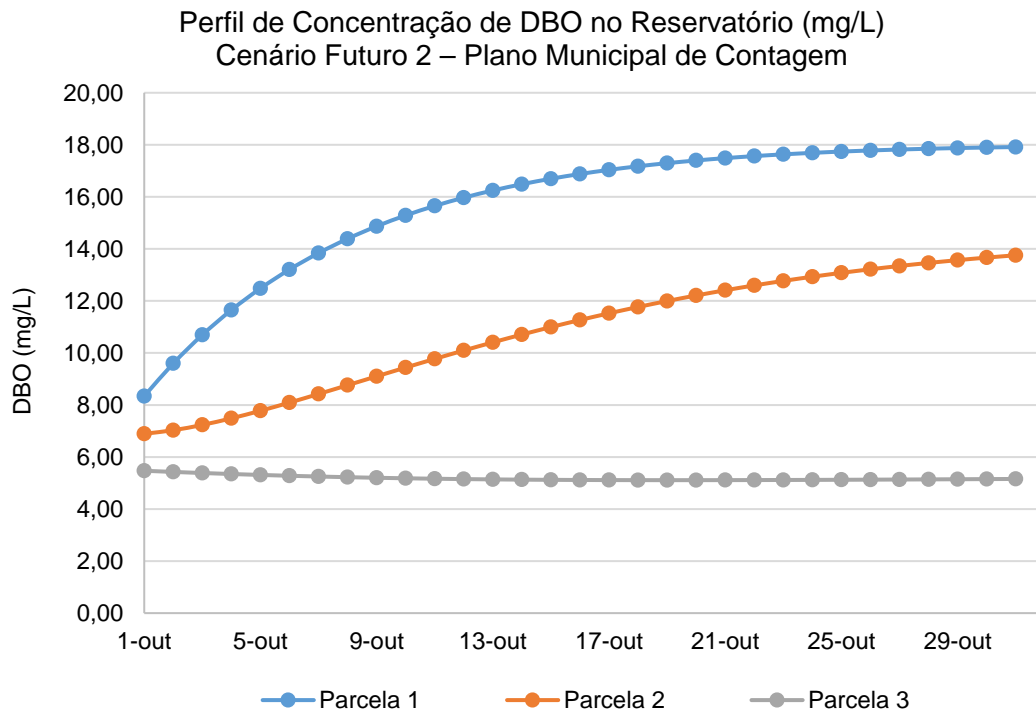


Figura 48 - Perfil de Concentração de DBO (mg/l) em cada parcela de volume, ao longo dos 31 dias de simulação (mês de referência: outubro) – 2ª Abordagem – Cenário Futuro 2 – Plano Municipal de Contagem

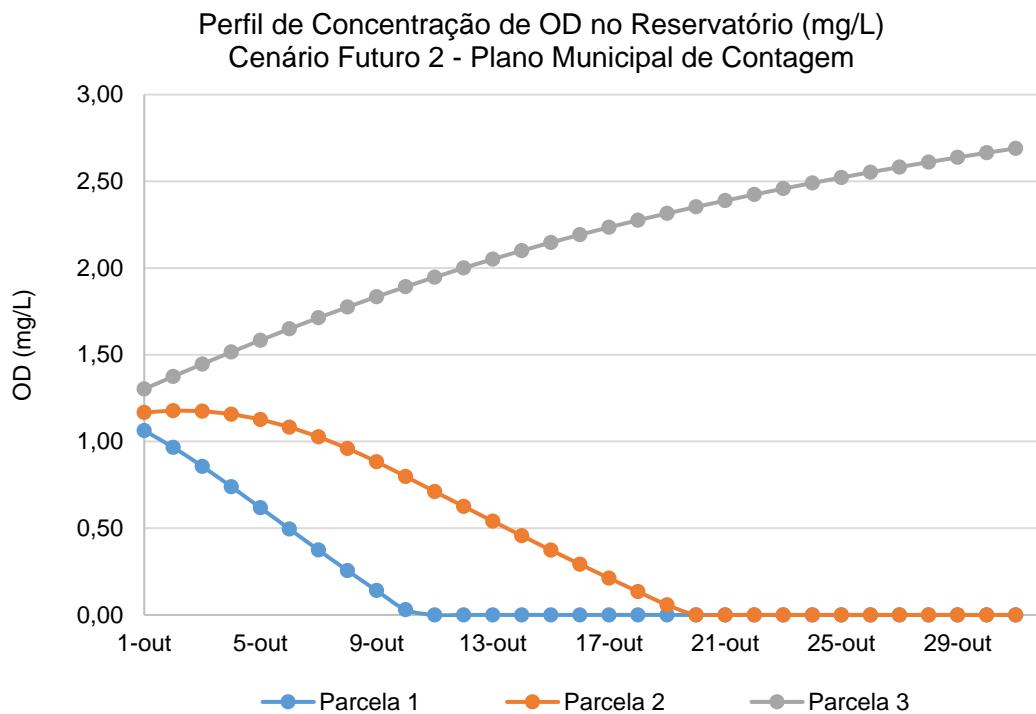


Figura 49 - Perfil de Concentração de OD (mg/l) em cada parcela de volume, ao longo dos 31 dias de simulação (mês de referência: outubro) – 2ª Abordagem – Cenário Futuro 2 – Plano Municipal de Contagem

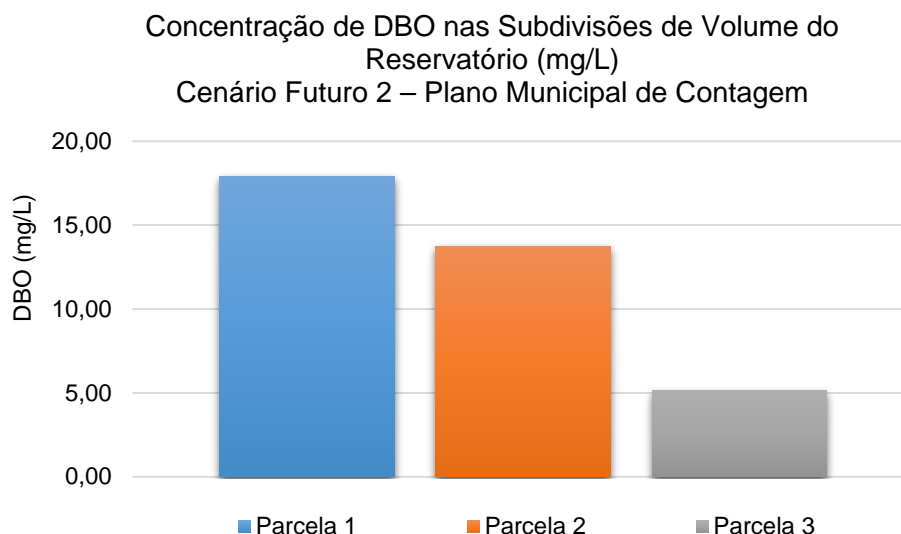


Figura 50 - Variação da Concentração de DBO (mg/l) nas Subdivisões de Volume do Reservatório – 31/out – 2ª Abordagem – Cenário Futuro 2 – Plano Municipal de Contagem

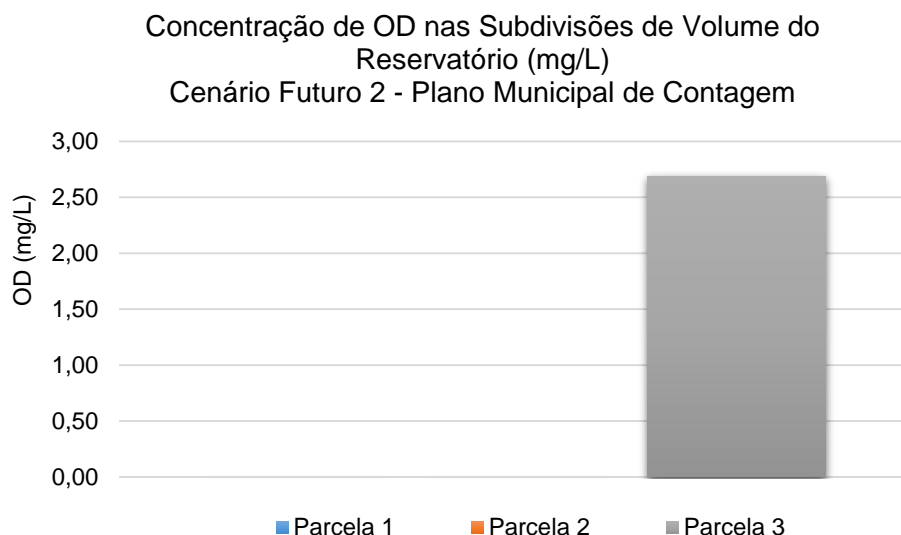


Figura 51 - Variação da Concentração de OD (mg/l) nas Subdivisões de Volume do Reservatório – 31/out – 2ª Abordagem – Cenário Futuro 2 – Plano Municipal de Contagem

A Figura 52 e a Figura 53 apresentam a comparação das simulações realizadas para a parcela de volume 3 do reservatório, para os cenários atual e futuros de uso do solo, ao longo dos 31 dias de simulação. Observa-se a diferença significativa entre as concentrações de DBO e OD das simulações do cenário do Plano Municipal de Contagem e as concentrações dos demais cenários. O oxigênio dissolvido oscila entre fora de classe e classe 4 ao longo tempo.

Perfil de Concentração de DBO na Parcela 3 de Volume do Reservatório (mg/L)

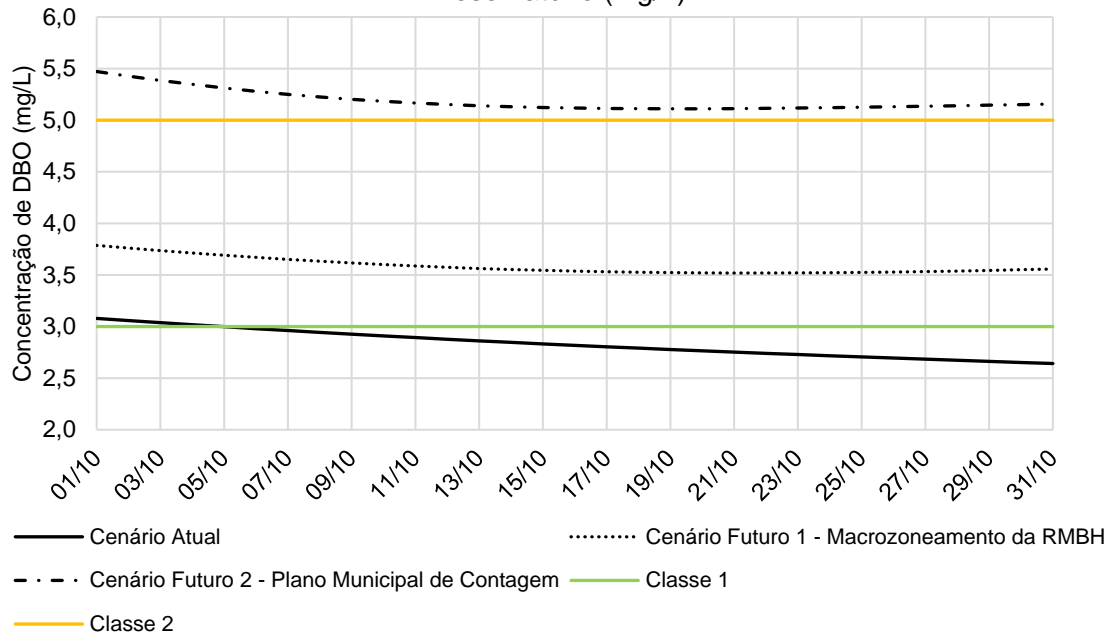


Figura 52 - Perfil de Concentração de DBO (mg/l) na Parcela 3, ao longo dos 31 dias de simulação (mês de referência: outubro) – 2ª Abordagem – Comparação entre os cenários

Perfil de Concentração de OD na Parcela 3 de Volume do Reservatório (mg/L)

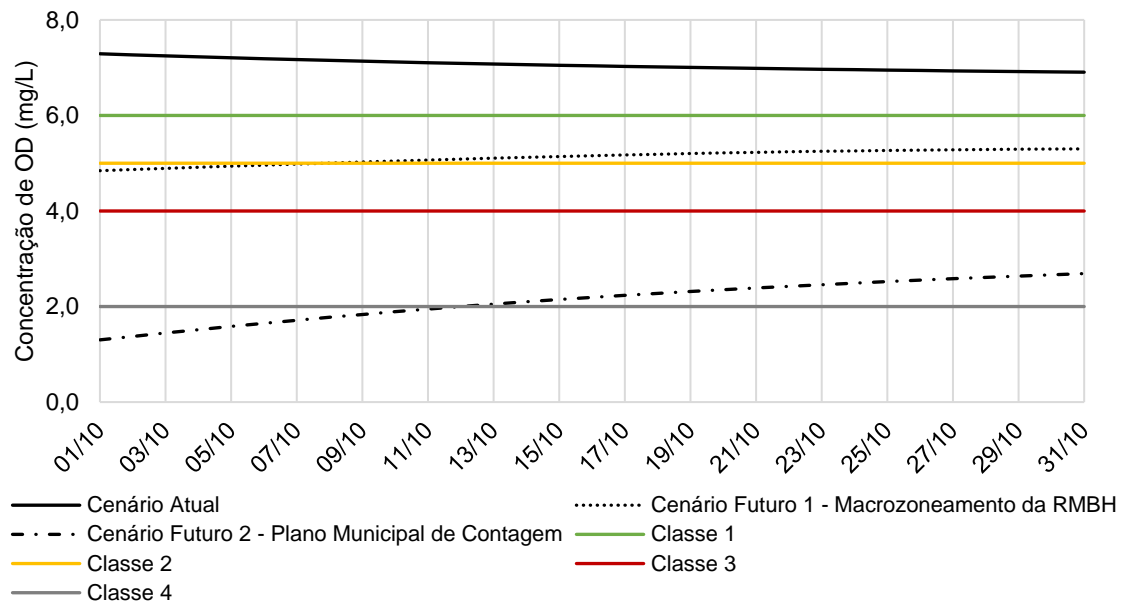


Figura 53 - Perfil de Concentração de OD (mg/l) na Parcela 3, ao longo dos 31 dias de simulação (mês de referência: outubro) – 2ª Abordagem – Comparação entre os cenários

Comparando-se os resultados obtidos para DBO e OD na Parcela 1 para os Cenários Atual e futuros (Figura 40, Figura 41, Figura 46, Figura 47, Figura 50 e Figura 51), observa-se que no Cenário Futuro 2 – Plano Municipal de Contagem as concentrações de DBO, apesar de elevadas, são inferiores ao Cenário atual e ao Cenário Futuro 1 – Macrozoneamento da RMBH. Para OD, os valores são superiores aos demais cenários.

A análise dos volumes de todos os cenários mostrou que, diferentemente do Cenário Atual e do Cenário Futuro 1 – Macrozoneamento da RMBH, em que outubro é o mês com menor volume, no Cenário Futuro 2 – Plano Municipal de Contagem, o mês em que o reservatório se encontra nessa condição, e, portanto, em situação mais crítica de qualidade da água, é o mês de setembro. Assim, para o Cenário Futuro 2, foram realizadas simulações de DBO e OD para o mês de setembro. Os resultados são apresentados na Figura 54, na Figura 55, na Figura 56 e na Figura 57.

Os resultados mostram um agravamento nas condições de qualidade da água do reservatório chegando no último dia do mês com os valores de DBO de 30,9 mg/L (Parcela 1), 17,3 mg/L (Parcela 2) e 5,2 mg/L (Parcela 3), superiores aos demais cenários. Para o OD, também há um agravamento nas concentrações, com valores nulos nas duas primeiras parcelas e 2,8 mg/L na terceira parcela.

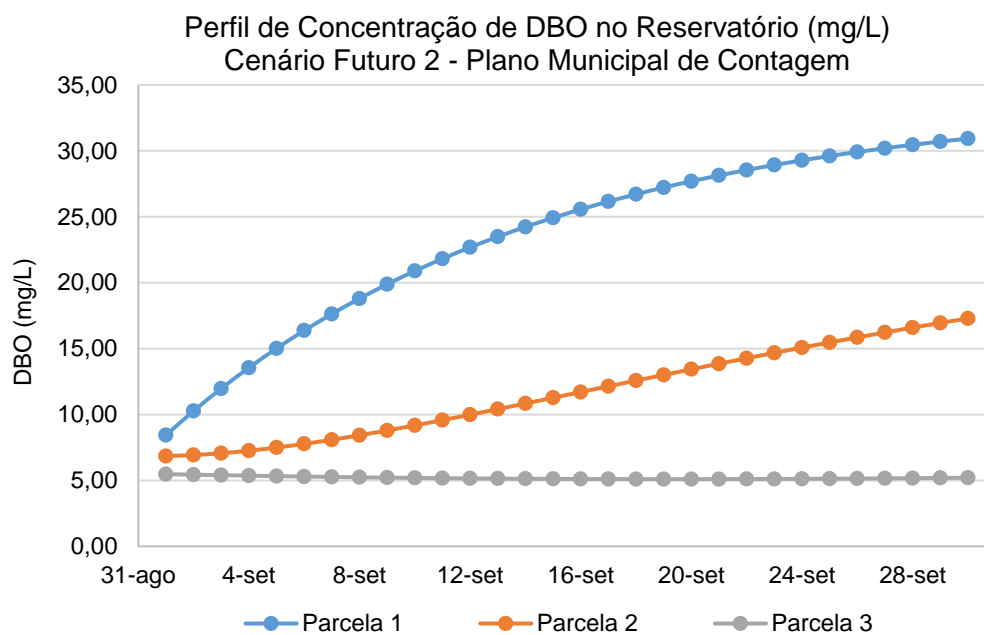


Figura 54 - Perfil de Concentração de DBO (mg/l) em cada parcela de volume, ao longo dos 30 dias de simulação (mês de referência: setembro) – 2ª Abordagem – Cenário Futuro 2 – Plano Municipal de Contagem

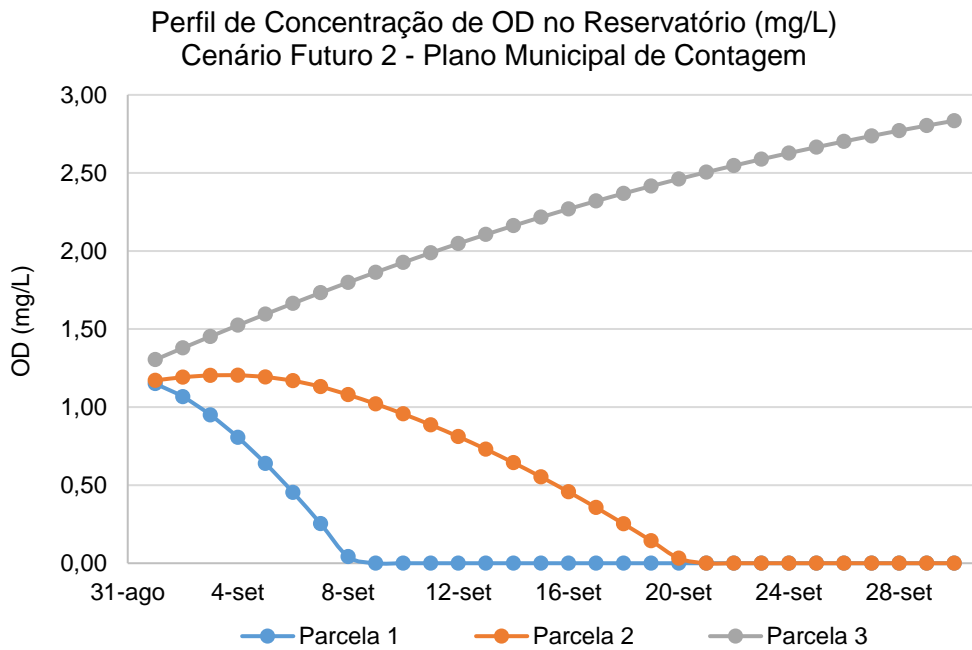


Figura 55 - Perfil de Concentração de OD (mg/l) em cada parcela de volume, ao longo dos 30 dias de simulação (mês de referência: setembro) – 2ª Abordagem – Cenário Futuro 2 – Plano Municipal de Contagem

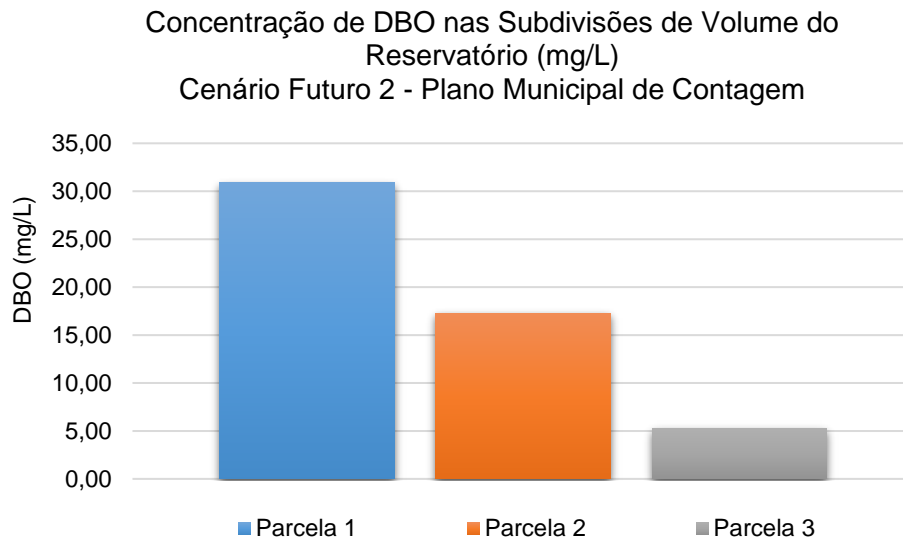


Figura 56 - Variação da Concentração de DBO (mg/l) nas Subdivisões de Volume do Reservatório – 30/set – 2ª Abordagem – Cenário Futuro 2 – Plano Municipal de Contagem

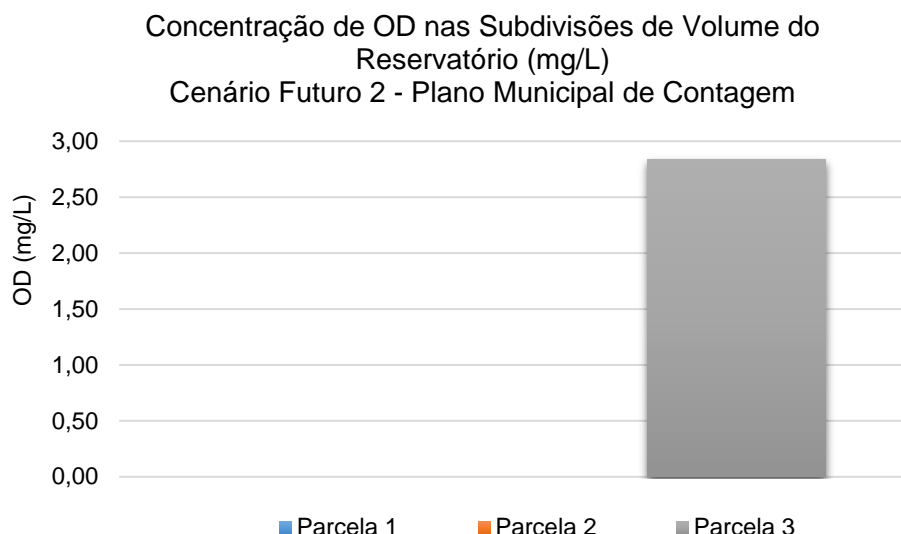


Figura 57 - Variação da Concentração de OD (mg/l) nas Subdivisões de Volume do Reservatório – 30/set – 2ª Abordagem – Cenário Futuro 2 – Plano Municipal de Contagem

2.2.4 Avaliação do Estado Trófico do Reservatório

A modelagem do fósforo total no reservatório de Vargem das Flores foi realizada de forma simplificada, por meio da avaliação do estado trófico do reservatório. Essa avaliação consistiu no cálculo do Índice do Estado Trófico (IET), utilizado pela CETESB, que tem por finalidade classificar corpos d'água em diferentes graus de trofia. Para a avaliação do reservatório, foi calculado o IET para o fósforo total, conforme a Equação (3). Destaca-se que os resultados obtidos devem ser interpretados como uma medida do potencial de eutrofização, já que este nutriente atua como o agente causador do processo (CETESB, 2017).

$$IET (PT) = 10 \left[6 - \left(\frac{1,77 - 0,42 \ln(PT)}{\ln(2)} \right) \right] \quad (3)$$

Onde: PT = concentração de fósforo total medida à superfície da água (mg/m³).

A Tabela 26 apresenta a Classificação do estado trófico para reservatórios segundo o Índice de Carlson modificado (CETESB, 2017).

Tabela 26 – Classificação do estado trófico para reservatórios segundo o Índice de Carlson modificado (CETESB, 2017)

Estado Trófico	IET	P total (mg/m ³)
Ultraoligotrófico	IET ≤ 47	P ≤ 8
Oligotrófico	47 < IET ≤ 52	8 < P ≤ 19
Mesotrófico	52 < IET ≤ 59	19 < P ≤ 52
Eutrófico	59 < IET ≤ 63	52 < P ≤ 120
Supereutrófico	63 < IET ≤ 67	120 < P ≤ 233
Hipereutrófico	IET > 67	P > 233

Para a estimativa da concentração de fósforo total no reservatório, foi utilizada a seguinte metodologia:

- Determinação da vazão média captada no reservatório a partir dos dados fornecidos pela COPASA para o período de 2011 a 2018, resultando no valor de 0,95 m³/s.
- Cálculo da cota média do reservatório a partir dos dados também fornecidos pela COPASA (2011-2018), obtendo-se o valor de 835m. Com esse valor de cota, foi determinado o volume do reservatório correspondente.
- Subdivisão do volume do reservatório considerando o local de entrada das cargas e cálculo do tempo de detenção hidráulica de cada subdivisão segundo a Equação (4);

$$T = \frac{Vol}{Q_{jus}} \quad (4)$$

Onde: T = tempo de detenção hidráulica; Vol é o volume do reservatório e Q_{jus} é a vazão a jusante do reservatório, ou a vazão captada;

A subdivisão do volume do reservatório com os respectivos valores de volume e tempo de detenção hidráulica são apresentados na Figura 58.

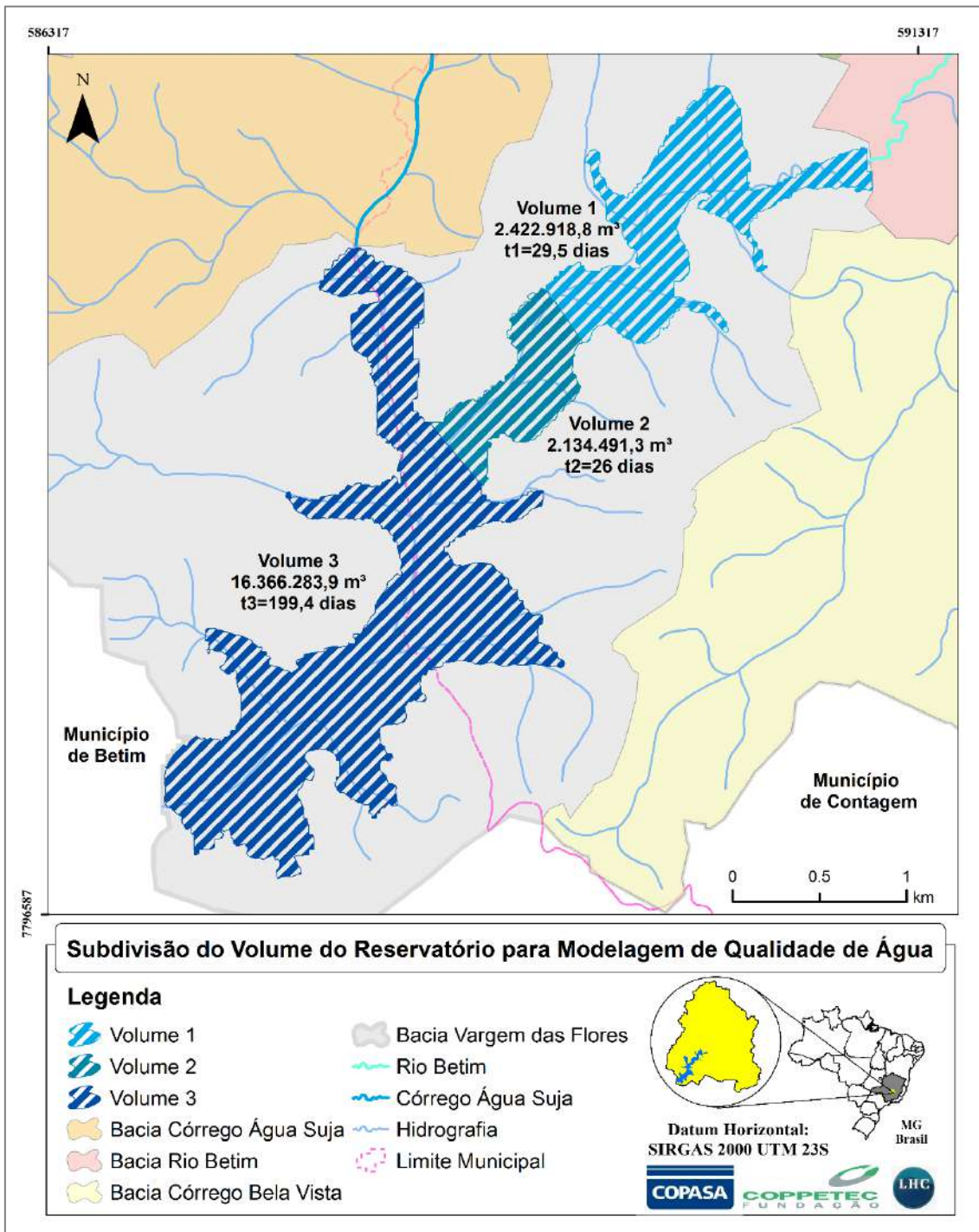


Figura 58 – Subdivisão do Volume do Reservatório para Modelagem do Fósforo Total (correspondente à cota 835m)

- Cálculo do coeficiente de perda de fósforo por sedimentação (1/ano) para cada subdivisão de volume, dado pela Equação (5), onde T é o tempo de detenção hidráulica em ano.

$$K_s = \frac{2}{\sqrt{T}} \quad (5)$$

- Estimativa das cargas de fósforo total afluentes ao reservatório para cada cenário de uso do solo, considerando: (a) vazões totais na foz dos principais afluentes (Rio Betim, já considerando o Córrego Morro Redondo, e Córrego Água Suja), conforme o item 2.1.3; (b) concentrações de fósforo total na foz dos principais afluentes, resultantes da modelagem de qualidade da água; (c) vazões e concentrações calculadas para a foz do córrego Bela Vista e para a Bacia Lateral contribuinte ao reservatório. As cargas de fósforo são apresentadas na Tabela 27 (Cenário Atual), na Tabela 28 (Cenário Futuro 1 – Macrozoneamento RMBH) e na Tabela 29 (Cenário Futuro 2 – Plano Municipal de Contagem).

Tabela 27 – Cargas de Fósforo Total – Cenário Atual

Bacia Contribuinte	Vazão (m³/s)	P total (mg/L)	Carga de P total (kgP/ano)
Rio Betim + Córrego Morro Redondo	0,185	0,93	5409,3
Córrego Bela Vista	0,013	1,05	430,5
Bacia Lateral	0,030	0,62	587,7
Córrego Água Suja	0,124	1,34	5240,0

Tabela 28 – Cargas de Fósforo Total – Cenário Futuro 1 – Macrozoneamento RMBH

Bacia Contribuinte	Vazão (m³/s)	P total (mg/L)	Carga de P total (kgP/ano)
Rio Betim + Córrego Morro Redondo	0,194	1,16	7114,0
Córrego Bela Vista	0,015	1,20	552,4
Bacia Lateral	0,029	0,65	587,2
Córrego Água Suja	0,130	1,61	6604,6

Tabela 29 – Cargas de Fósforo Total – Cenário Futuro 2 – Plano Municipal de Contagem

Bacia Contribuinte	Vazão (m³/s)	P total (mg/L)	Carga de P total (kgP/ano)
Rio Betim + Córrego Morro Redondo	0,203	1,76	11309,5
Córrego Bela Vista	0,014	1,38	626,3
Bacia Lateral	0,022	0,84	594,4
Córrego Água Suja	0,126	2,26	8955,6

A entrada das cargas em cada subdivisão do volume do reservatório está representada na Figura 59. Conforme pode-se observar, foi considerada uma entrada pontual no início de cada uma das parcelas de volume do reservatório (1, 2 e 3). Assim, no início do volume 1 foi considerada a entrada de cargas do rio Betim e do córrego Bela Vista, no início do volume 2 a entrada de cargas da bacia Lateral e no início do volume 3 a entrada de cargas do córrego Água Suja.

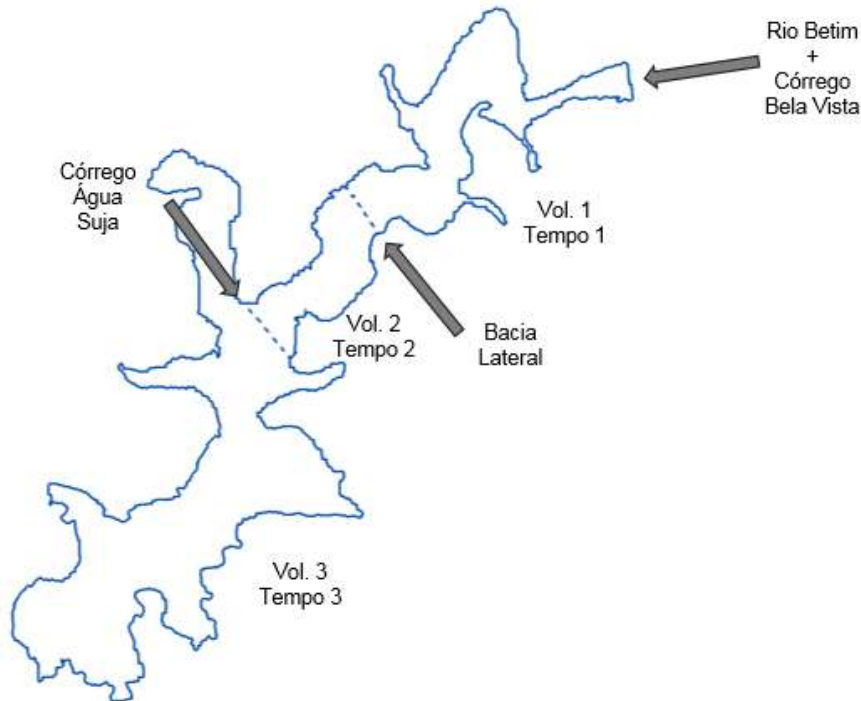


Figura 59 – Esquema de entrada das cargas consideradas na modelagem

- Cálculo da concentração de fósforo total no trecho final do Volume 1 (limite com o volume 2), utilizando o modelo empírico de Vollenweider (1976), representado na Equação (6).

$$P = \frac{L \cdot 10^3}{V \cdot \left(\frac{1}{t} + K_s\right)} \quad (6)$$

Onde: P = concentração de fósforo (gP/m³);

L = carga afluyente de fósforo (kgP/ano);

V = volume do reservatório (m³);

T = tempo de detenção hidráulica (ano);

K_s = coeficiente de perda de fósforo por sedimentação (1/ano).

Destaca-se que, na primeira etapa, os dados de entrada para determinação da concentração P deverão ser referentes ao volume 1.

- Cálculo da carga de fósforo total no final do Volume 1 (limite com o volume 2), multiplicando-se o volume pela concentração de fósforo obtida pela Equação (6). A carga obtida foi então somada à carga de entrada referente à Bacia Lateral para a estimativa da concentração de fósforo no final do Volume 2 (limite com o volume 3). O mesmo procedimento foi realizado para a obtenção da concentração final do reservatório, no Volume 3.
- Cálculo do IET, segundo a Equação (3), a partir da concentração de fósforo total obtida para o Volume 3 no passo anterior.
- Classificação do reservatório quanto ao seu estado trófico, segundo a Tabela 26.

2.2.4.1 Resultados

Como resultado da modelagem do Cenário Atual, foi obtido um valor de concentração de fósforo total de 71 mg/m³, resultando em um IET igual a 60. Com esses resultados, a partir da classificação dada pela Tabela 26, pode-se concluir que o reservatório é **eutrófico**. A classificação se mostra coerente com o resultado obtido por Dos Santos (2012), que concluiu que o reservatório de Vargem das Flores apresentou maior probabilidade de ser um ambiente eutrófico, sendo as chances de aproximadamente 80%.

A simulação dos cenários de uso do solo seguiu a mesma metodologia de cálculo da simulação do Cenário Atual, sendo atualizadas, para cada cenário, o valor das cargas de fósforo total afluentes aos volumes.

Os resultados obtidos e a respectiva classificação do estado trófico são apresentados na Tabela 30 para todos os cenários simulados, incluindo o Cenário Atual para fins comparativos.

Tabela 30 – Resultados para a Modelagem do Fósforo Total – Avaliação do Estado Trófico do Reservatório

Cenário	P total (mg/m ³)	IET	Estado Trófico
Atual	71	60	Eutrófico
Futuro 1 – Macrozoneamento RMBH	90	62	Eutrófico
Futuro 2 – Plano Municipal de Contagem	121	64	Supereutrófico

Os resultados da Tabela 30 mostram como as condições tróficas atuais do reservatório já estão críticas, em estado eutrófico. Observa-se que, no cenário futuro considerando o Plano Municipal de Contagem, o IET e as concentrações de fósforo total do reservatório aumentarão significativamente, comprometendo a qualidade da água. Nesse cenário, o reservatório passará para supereutrófico. Em relação ao cenário futuro 1 (Macrozoneamento RMBH), há um aumento nas concentrações de fósforo, mas o reservatório permanece como eutrófico.

Vale lembrar que os resultados da avaliação de estado trófico do reservatório são apenas indicativos e medem uma situação potencial, considerando a presença de nutrientes (fósforo total).

3 Aporte de Sedimentos ao Reservatório de Vargem das Flores e Estimativa de sua Vida Útil

Do ponto de vista sedimentológico, as barragens geram diminuição da capacidade de transporte (devido à redução das velocidades do curso d'água), ocasionando assoreamento pela deposição gradual dos sedimentos que chegam ao reservatório. O final da vida útil do reservatório é considerado quando os depósitos passam a interferir na operação normal do aproveitamento, além de ocasionar problemas ambientais.

Neste relatório, é apresentado o estudo para a avaliação do volume de assoreamento e vida útil do reservatório de Vargem das Flores. O estudo foi realizado considerando o passado, a tendência atual e dois cenários futuros, (1) que contempla o Macrozoneamento da Região Metropolitana de Belo Horizonte e (2) que adota a ocupação prevista no Plano Diretor de Contagem. Para todos os cenários considerados, a avaliação do assoreamento foi realizada considerando as seguintes fases:

- levantamento das condições de erosão da bacia (uso do solo, desmatamentos etc.) para avaliar a produção de sedimentos e parcela de aporte ao reservatório;
- uso de dados hidrológicos e sedimentológicos necessários (série de vazões, descarga sólida, granulometria do sedimento e outros) para a modelagem da vida útil do reservatório.

3.1 Estimativa do aporte de sedimentos ao reservatório de Vargem das Flores

Para estimativa do aporte de sedimentos gerado na bacia do reservatório de Vargem das Flores, foi utilizada a Equação Universal de Perda de Solo Revisada (RUSLE - *Revised Universal Soil Loss Equation*), com base na determinação das áreas de vulnerabilidade à erosão hídrica.

Conforme apresentado no relatório *Avaliação da vida útil do reservatório de Vargem das Flores - R2 – Relatório Parcial 2 -RESULTADOS PRELIMINARES DA MODELAGEM* foram levantados os parâmetros necessários para o cálculo do volume de sedimentos como uso da RUSLE, por célula de modelagem.

A fórmula RUSLE é baseada na relação expressa na equação a seguir (Renard *et al.*, 1996):

$$A = R K L S C P \quad (7)$$

Com:

- A – Perda de solo por unidade de área (t/ha)
- R – Fator de erosividade da chuva (t.m/ha)(mm/h)
- K – Fator de erodibilidade do solo (t/ha)/[(t.m/ha)(mm/h)]
- L – Fator de comprimento do declive (adimensional)
- S – Fator de declividade (adimensional)
- C – Fator de uso e manejo do solo (adimensional)
- P – Fator de prática conservacionista (adimensional)

O relatório R2 apresentou a fonte dos dados de cada parâmetro da equação. O território da bacia foi dividido em “células de escoamento”, para a modelagem hidrodinâmica e estas foram utilizadas como células também para cálculo da produção de sedimentos. A seguir são apresentados os valores de cada parâmetro por célula da modelagem.

3.1.1 R - Fator de erosividade da chuva

As informações de erosividade foram obtidas por meio do programa netErosividade MG® (Moreira *et al.*, 2008), desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos (GPRH) do Departamento de Engenharia Agrícola (DEA) da Universidade Federal de Viçosa (UFV).

Foi utilizado, para todas as células, o valor anual para a cidade de Contagem, igual a 7.401 MJ.mm /h.ha.ano. O valor da erosividade foi o mesmo para todos os cenários da modelagem

3.1.2 K – Fator de erodibilidade do solo

A erodibilidade do solo, fator K, foi obtido do mapa de solos da Universidade Federal de Viçosa. No mapa da Figura 60, acham-se apresentados os tipos de solo encontrados na bacia contribuinte ao reservatório. Para as células que apresentam mais de um tipo de solo, foi calculado o coeficiente ponderado, considerando a área referente a cada tipo de solo no interior da célula.

Os valores da erodibilidade do solo por célula do modelo hidrodinâmico, considerando os tipos de solo encontrados na bacia do reservatório de Vargem das Flores, estão apresentados na Tabela 31 e no mapa da Figura 61. O coeficiente K apresentado por célula foi considerado para todos os cenários.

Tabela 31 - Fator de erodibilidade K do solo, de acordo com os tipos de solo da bacia, em Mg h MJ⁻¹ mm⁻¹.

Célula	K ponderado	Célula	K ponderado	Célula	K ponderado	Célula	K ponderado
6001	0,029	6325	0,053	6532	0,020	6634	0,029
6002	0,029	6326	0,020	6533	0,020	6635	0,027
6003	0,029	6327	0,020	6534	0,020	6636	0,020
6004	0,027	6328	0,020	6535	0,020	6637	0,020
6005	0,020	6329	0,030	6536	0,022	6638	0,028
6006	0,023	6330	0,021	6537	0,020	6639	0,029
6007	0,020	6331	0,020	6538	0,020	6640	0,029
6008	0,020	6332	0,020	6539	0,020	6641	0,029
6009	0,020	6333	0,020	6540	0,020	6642	0,029
6010	0,024	6334	0,020	6541	0,020	6643	0,029
6011	0,020	6335	0,020	6542	0,020	6644	0,029
6012	0,020	6336	0,020	6543	0,020	6645	0,029
6013	0,020	6337	0,020	6544	0,020	6646	0,029
6014	0,020	6338	0,020	6545	0,020	6647	0,029
6015	0,020	6339	0,020	6546	0,021	6648	0,029
6016	0,020	6340	0,020	6547	0,020	6649	0,029
6017	0,020	6341	0,020	6548	0,021	6650	0,029
6018	0,020	6342	0,020	6549	0,028	6651	0,029
6019	0,020	6343	0,020	6550	0,029	6652	0,029
6020	0,020	6344	0,020	6551	0,029	6653	0,023

Tabela 31 - Fator de erodibilidade K do solo, de acordo com os tipos de solo da bacia, em Mg h MJ⁻¹ mm⁻¹.(Cont.)

Célula	K ponderado	Célula	K ponderado	Célula	K ponderado	Célula	K ponderado
6021	0,020	6345	0,020	6552	0,029	6654	0,020
6022	0,020	6346	0,020	6553	0,029	6655	0,020
6023	0,020	6347	0,020	6554	0,024	6656	0,020
6024	0,026	6348	0,020	6555	0,020	6657	0,025
6025	0,020	6349	0,020	6556	0,020	6658	0,029
6026	0,020	6350	0,020	6557	0,020	6659	0,029
6027	0,020	6351	0,020	6558	0,029	6660	0,029
6028	0,020	6352	0,020	6559	0,029	6661	0,027
6029	0,020	6353	0,020	6560	0,029	6662	0,020
6030	0,020	6354	0,020	6561	0,029	6663	0,020
6031	0,020	6355	0,020	6562	0,026	6664	0,026
6032	0,026	6356	0,020	6563	0,024	6665	0,029
6033	0,026	6357	0,020	6564	0,020	6666	0,029
6034	0,025	6358	0,020	6565	0,020	6667	0,029
6035	0,029	6359	0,020	6566	0,027	6668	0,029
6036	0,029	6360	0,020	6567	0,026	6669	0,029
6037	0,029	6361	0,021	6568	0,029	6670	0,029
6038	0,029	6362	0,020	6569	0,029	6671	0,029
6039	0,029	6363	0,020	6570	0,029	6672	0,029
6101	0,027	6364	0,020	6571	0,029	6673	0,029
6102	0,029	6365	0,020	6572	0,029	6674	0,029
6103	0,029	6366	0,020	6573	0,029	6675	0,025
6104	0,029	6367	0,020	6574	0,024	6676	0,022
6105	0,029	6368	0,020	6575	0,020	6677	0,020
6106	0,029	6369	0,020	6576	0,020	6678	0,020
6107	0,029	6370	0,020	6577	0,020	6679	0,020
6108	0,029	6371	0,020	6578	0,029	6680	0,020
6109	0,026	6372	0,020	6579	0,029	6681	0,020
6201	0,020	6373	0,020	6580	0,029	6682	0,020
6202	0,020	6374	0,020	6581	0,029	6683	0,024
6203	0,020	6375	0,020	6582	0,023	6701	0,020
6204	0,028	6376	0,020	6583	0,020	6702	0,026
6205	0,029	6377	0,020	6584	0,020	6703	0,029
6206	0,029	6401	0,020	6585	0,020	6704	0,029
6207	0,029	6402	0,020	6586	0,020	6705	0,029
6208	0,029	6403	0,020	6587	0,020	6706	0,029
6209	0,029	6404	0,020	6588	0,020	6707	0,021
6210	0,029	6405	0,020	6589	0,021	6708	0,025
6211	0,029	6406	0,020	6590	0,022	6709	0,020
6212	0,028	6407	0,020	6591	0,029	6710	0,029
6213	0,029	6408	0,020	6601	0,020	6711	0,029
6214	0,029	6409	0,020	6602	0,020	6712	0,029
6215	0,029	6501	0,020	6603	0,020	6713	0,029
6216	0,029	6502	0,020	6604	0,020	6714	0,029
6217	0,029	6503	0,020	6605	0,025	6715	0,029
6218	0,026	6504	0,020	6606	0,026	6716	0,025
6219	0,021	6505	0,020	6607	0,020	6717	0,029
6220	0,026	6506	0,020	6608	0,020	6718	0,029
6221	0,020	6507	0,020	6609	0,028	6719	0,029

Tabela 31 - Fator de erodibilidade K do solo, de acordo com os tipos de solo da bacia, em Mg h MJ⁻¹ mm⁻¹.(Cont.)

Célula	K ponderado	Célula	K ponderado	Célula	K ponderado	Célula	K ponderado
6301	0,020	6508	0,020	6610	0,020	6720	0,029
6302	0,020	6509	0,020	6611	0,020	6721	0,025
6303	0,020	6510	0,020	6612	0,020	6722	0,021
6304	0,020	6511	0,020	6613	0,020	6723	0,025
6305	0,020	6512	0,020	6614	0,023	6724	0,027
6306	0,025	6513	0,020	6615	0,029	6725	0,029
6307	0,020	6514	0,020	6616	0,029	6726	0,029
6308	0,021	6515	0,020	6617	0,029	6727	0,029
6309	0,032	6516	0,020	6618	0,029	6728	0,029
6310	0,028	6517	0,020	6619	0,029	6729	0,029
6311	0,029	6518	0,020	6620	0,029	6730	0,029
6312	0,037	6519	0,020	6621	0,029	6731	0,029
6313	0,044	6520	0,025	6622	0,029	6732	0,029
6314	0,029	6521	0,022	6623	0,029	6733	0,029
6315	0,055	6522	0,020	6624	0,029	6734	0,028
6316	0,028	6523	0,024	6625	0,029	6735	0,029
6317	0,021	6524	0,022	6626	0,029	6736	0,029
6318	0,054	6525	0,020	6627	0,029	6737	0,028
6319	0,050	6526	0,022	6628	0,026	6738	0,029
6320	0,060	6527	0,020	6629	0,020	6739	0,029
6321	0,060	6528	0,020	6630	0,020	6740	0,029
6322	0,059	6529	0,020	6631	0,020	6741	0,029
6323	0,048	6530	0,020	6632	0,020	6742	0,029
6324	0,060	6531	0,020	6633	0,026	6743	0,027

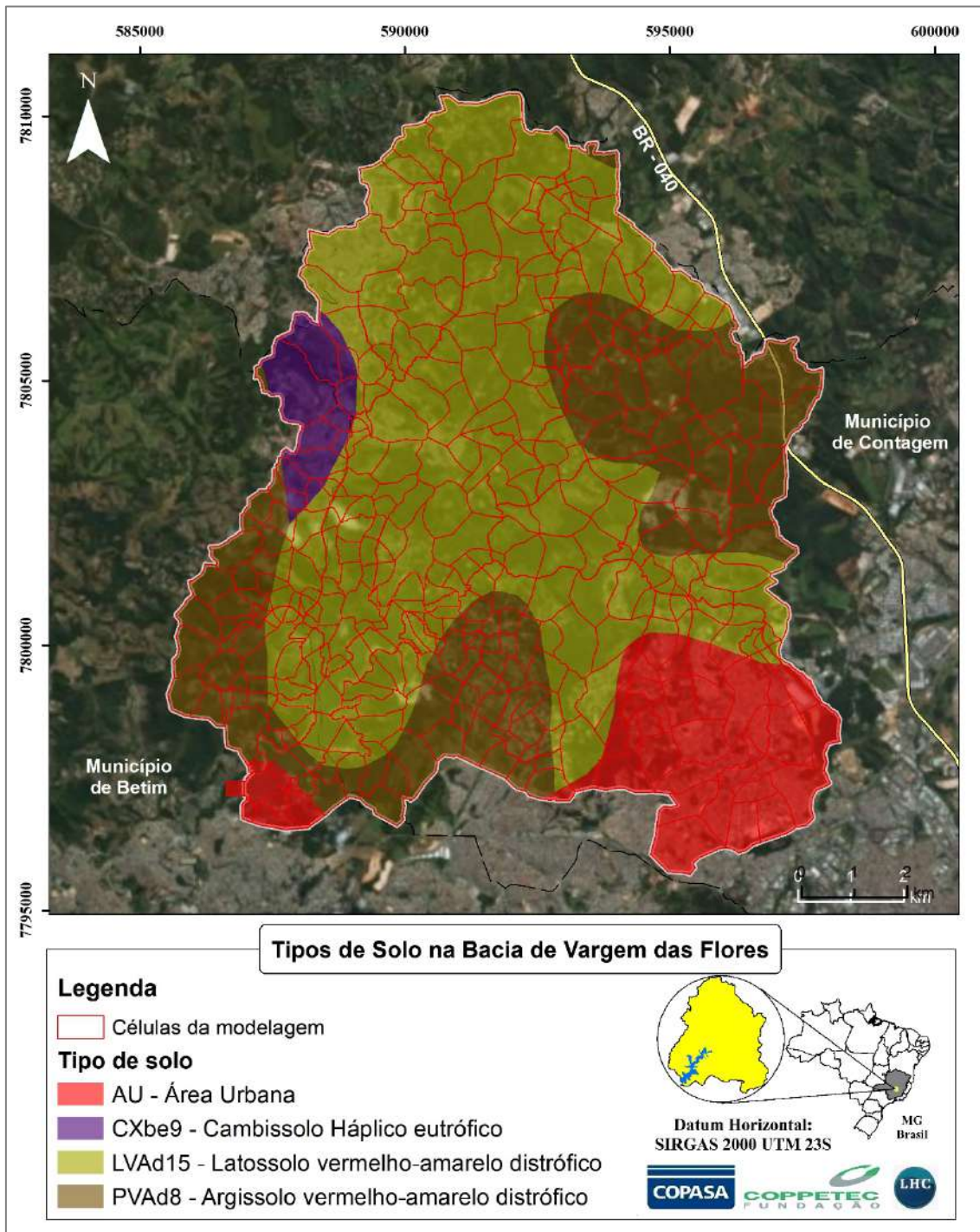


Figura 60 - Tipos de solo da bacia do reservatório de Vargem das Flores.

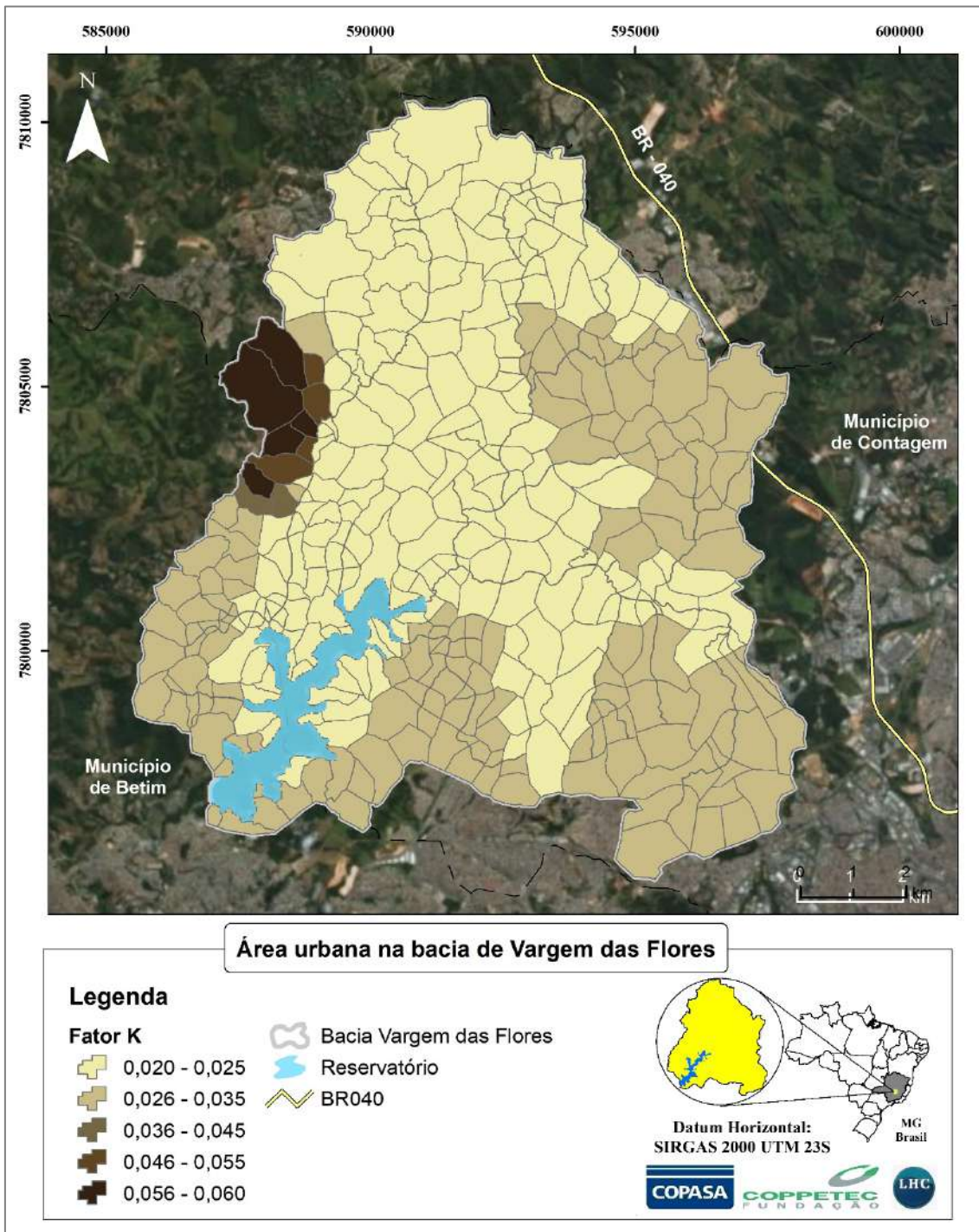


Figura 61 - Fator K por célula para a bacia do reservatório de Vargem das Flores.

3.1.3 LS - Fator topográfico

O fator topográfico LS representa o efeito conjugado da declividade e do comprimento de declive sobre a erosão e foi calculado pela equação (8) (Bertoni& Lombardi Neto, 2014):

$$LS = (\sqrt{L}/100) \cdot (1,36 + 0,97 S + 0,1385S^2) \quad (8)$$

Com:

L – Comprimento do declive, em m;

S – Declividade da encosta em percentagem

Os valores do fator LS por célula estão apresentados na sequência, na Tabela 32 e no mapa da Figura 62. Esses valores foram aplicados na modelagem de todos os cenários.

Tabela 32 - Fator topográfico LS por célula da modelagem hidrodinâmica.

Célula	Declividade média	Comprimento médio da rampa (m)	Fator LS	Célula	Declividade média	Comprimento médio da rampa (m)	Fator LS
6001	0,09	307,70	3,59	6532	0,06	505,28	2,46
6002	0,05	577,10	2,16	6533	0,08	338,53	3,29
6003	0,10	278,37	3,96	6534	0,13	214,26	5,74
6004	0,07	362,24	3,09	6535	0,12	228,88	4,84
6005	0,10	258,23	4,27	6536	0,13	252,01	5,64
6006	0,05	567,62	2,17	6537	0,05	582,85	2,13
6007	0,09	289,96	3,81	6538	0,09	307,23	3,60
6008	0,07	403,46	2,82	6539	0,11	280,42	4,59
6009	0,04	725,40	1,85	6540	0,17	162,38	7,09
6010	0,12	233,56	5,24	6541	0,10	276,19	3,99
6011	0,10	269,95	4,09	6542	0,08	358,70	3,33
6012	0,15	181,11	6,26	6543	0,18	147,19	7,96
6013	0,12	221,05	5,02	6544	0,07	412,78	2,76
6014	0,07	380,05	3,00	6545	0,14	264,96	6,57
6015	0,13	207,65	5,38	6546	0,10	313,91	4,59
6016	0,14	197,50	5,68	6547	0,07	364,05	3,08
6017	0,08	364,97	3,34	6548	0,05	569,52	2,16
6018	0,10	280,86	4,41	6549	0,08	394,61	3,28
6019	0,07	401,65	2,83	6550	0,08	357,92	3,13
6020	0,10	260,41	4,24	6551	0,07	361,61	3,10
6021	0,13	212,62	5,24	6552	0,06	480,62	2,73
6022	0,16	167,73	6,83	6553	0,05	498,31	2,40
6023	0,11	243,16	4,54	6554	0,10	293,34	4,34
6024	0,13	222,99	5,37	6555	0,12	221,15	5,02
6025	0,15	192,14	6,73	6556	0,09	305,45	3,81
6026	0,04	737,68	1,83	6557	0,07	437,08	2,84
6027	0,05	596,20	2,09	6558	0,10	309,94	4,19
6028	0,20	156,31	9,91	6559	0,12	231,99	4,92
6029	0,12	240,33	5,18	6560	0,06	433,70	2,65
6030	0,05	496,31	2,39	6561	0,18	148,18	7,90
6031	0,13	210,80	5,51	6562	0,20	139,18	8,93

Tabela 32 - Fator topográfico LS por célula da modelagem hidrodinâmica.(Cont.)

Célula	Declividade média	Comprimento médio da rampa (m)	Fator LS	Célula	Declividade média	Comprimento médio da rampa (m)	Fator LS
6032	0,13	203,10	5,63	6563	0,13	208,70	5,43
6033	0,13	220,49	5,55	6564	0,15	230,48	7,16
6034	0,09	306,46	3,73	6565	0,16	177,88	6,93
6035	0,12	228,41	5,05	6566	0,13	219,68	5,77
6036	0,11	249,06	4,76	6567	0,14	205,73	5,74
6037	0,10	272,79	4,04	6568	0,07	392,65	3,08
6038	0,09	303,16	3,65	6569	0,05	582,18	2,13
6039	0,09	308,36	3,59	6570	0,11	281,21	4,67
6101	0,08	320,83	3,46	6571	0,12	217,22	5,16
6102	0,07	394,20	2,87	6572	0,11	256,36	4,71
6103	0,07	362,08	3,09	6573	0,12	229,37	5,11
6104	0,05	598,89	2,09	6574	0,11	291,05	4,79
6105	0,04	692,07	1,90	6575	0,16	173,22	6,97
6106	0,08	328,81	3,38	6576	0,05	540,13	2,24
6107	0,10	288,80	3,96	6577	0,12	232,43	4,79
6108	0,09	303,70	3,64	6578	0,07	457,19	3,17
6109	0,10	266,04	4,15	6579	0,07	407,75	2,82
6201	0,08	331,32	3,35	6580	0,13	224,31	5,41
6202	0,09	301,02	3,67	6581	0,13	212,01	5,59
6203	0,10	281,70	3,92	6582	0,12	250,33	4,98
6204	0,08	359,63	3,53	6583	0,08	332,99	3,38
6205	0,24	111,60	11,16	6584	0,09	306,21	3,77
6206	0,17	160,97	7,63	6585	0,04	640,60	2,00
6207	0,10	292,31	4,19	6586	0,17	230,48	8,63
6208	0,13	231,32	5,61	6587	0,15	179,92	6,30
6209	0,08	318,72	3,48	6588	0,11	247,32	4,47
6210	0,21	131,04	9,15	6589	0,05	543,47	2,23
6211	0,12	220,92	5,03	6590	0,12	233,91	4,74
6212	0,12	221,41	5,02	6591	0,10	262,89	4,20
6213	0,17	156,24	7,42	6601	0,04	721,13	1,86
6214	0,12	235,48	4,95	6602	0,10	304,96	4,14
6215	0,08	344,31	3,37	6603	0,10	294,42	4,23
6216	0,17	171,86	7,83	6604	0,09	327,40	3,92
6217	0,12	251,80	5,01	6605	0,09	322,69	3,92
6218	0,12	233,39	4,74	6606	0,13	226,54	5,71
6219	0,09	316,34	3,50	6607	0,06	422,39	2,71
6220	0,12	230,68	5,00	6608	0,09	304,69	3,63
6221	0,10	280,50	3,93	6609	0,12	259,04	5,26
6301	0,28	97,35	13,27	6610	0,14	223,24	6,59
6302	0,13	211,57	5,27	6611	0,11	255,98	4,31
6303	0,09	293,19	3,77	6612	0,23	119,81	10,22
6304	0,09	310,67	3,56	6613	0,09	346,46	3,71
6305	0,10	267,23	4,35	6614	0,07	387,19	2,92
6306	0,10	317,69	4,24	6615	0,13	257,77	5,74
6307	0,09	298,38	3,89	6616	0,11	265,26	4,55
6308	0,09	331,44	3,61	6617	0,11	255,93	4,72
6309	0,14	200,75	5,98	6618	0,13	269,67	6,03
6310	0,11	330,51	4,94	6619	0,13	217,73	5,63
6311	0,14	209,71	5,76	6620	0,11	244,10	4,57
6312	0,11	256,21	4,42	6621	0,07	392,91	3,07
6313	0,13	204,73	5,56	6622	0,09	295,90	3,95

Tabela 32 - Fator topográfico LS por célula da modelagem hidrodinâmica.(Cont.)

Célula	Declividade média	Comprimento médio da rampa (m)	Fator LS	Célula	Declividade média	Comprimento médio da rampa (m)	Fator LS
6314	0,05	538,97	2,25	6623	0,10	368,71	4,48
6315	0,38	70,69	20,16	6624	0,07	407,12	2,80
6316	0,13	216,45	5,24	6625	0,11	262,01	4,38
6317	0,13	207,73	5,48	6626	0,11	275,33	4,69
6318	0,18	149,91	7,79	6627	0,09	316,65	3,51
6319	0,10	276,02	4,00	6628	0,08	392,76	3,28
6320	0,09	301,73	3,66	6629	0,14	225,07	6,24
6321	0,13	203,63	5,49	6630	0,15	187,07	6,30
6322	0,11	265,93	4,89	6631	0,13	236,97	5,53
6323	0,13	219,89	5,33	6632	0,14	194,61	5,77
6324	0,12	239,96	4,95	6633	0,23	121,76	10,70
6325	0,06	484,02	2,43	6634	0,03	811,29	1,83
6326	0,15	190,46	6,65	6635	0,13	232,46	5,93
6327	0,13	206,93	5,40	6636	0,17	160,53	7,19
6328	0,06	418,72	2,74	6637	0,18	152,30	7,65
6329	0,07	455,93	2,93	6638	0,18	205,25	8,94
6330	0,16	181,39	7,03	6639	0,05	592,26	2,22
6331	0,09	349,50	4,02	6640	0,17	169,02	7,49
6332	0,14	205,21	6,20	6641	0,10	287,70	4,52
6333	0,04	604,82	2,07	6642	0,13	220,34	5,29
6334	0,10	260,03	4,24	6643	0,10	299,89	4,43
6335	0,20	134,71	8,85	6644	0,12	232,68	5,00
6336	0,15	190,96	6,26	6645	0,06	423,54	2,71
6337	0,06	429,24	2,72	6646	0,10	281,24	4,45
6338	0,14	203,21	6,02	6647	0,09	329,35	3,92
6339	0,12	240,02	4,94	6648	0,12	239,45	4,95
6340	0,10	295,62	4,16	6649	0,17	188,88	7,79
6341	0,10	281,96	3,95	6650	0,05	499,84	2,37
6342	0,17	163,33	7,04	6651	0,13	216,65	5,32
6343	0,14	192,23	5,85	6652	0,11	300,17	4,77
6344	0,11	317,68	4,88	6653	0,09	339,28	4,13
6345	0,08	345,89	3,23	6654	0,06	446,17	2,59
6346	0,17	397,56	11,45	6655	0,10	271,60	4,06
6347	0,15	200,34	6,73	6656	0,23	118,40	10,37
6348	0,12	237,09	5,23	6657	0,08	404,87	3,44
6349	0,10	281,57	4,37	6658	0,07	414,19	3,31
6350	0,07	457,62	3,36	6659	0,06	446,13	2,67
6351	0,16	178,28	6,94	6660	0,06	442,16	2,62
6352	0,09	461,09	4,66	6661	0,14	260,13	6,77
6353	0,09	310,70	3,97	6662	0,09	302,27	3,66
6354	0,12	255,06	5,07	6663	0,06	456,98	2,54
6355	0,13	225,94	5,34	6664	0,06	457,55	2,68
6356	0,04	612,87	2,06	6665	0,06	439,27	2,63
6357	0,10	270,25	4,10	6666	0,10	260,82	4,24
6358	0,11	258,66	4,35	6667	0,17	170,19	7,20
6359	0,09	338,86	4,06	6668	0,07	434,98	2,85
6360	0,08	343,78	3,24	6669	0,10	286,28	4,00
6361	0,09	310,35	3,57	6670	0,12	222,19	5,00
6362	0,07	383,99	2,94	6671	0,13	210,37	5,30
6363	0,11	246,40	4,51	6672	0,18	154,31	8,24
6364	0,10	329,14	4,19	6673	0,07	444,71	3,07

Tabela 32 - Fator topográfico LS por célula da modelagem hidrodinâmica. (Cont.)

Célula	Declividade média	Comprimento médio da rampa (m)	Fator LS	Célula	Declividade média	Comprimento médio da rampa (m)	Fator LS
6365	0,16	173,96	6,85	6674	0,08	329,78	3,43
6366	0,11	244,00	4,53	6675	0,14	302,35	7,20
6367	0,23	123,29	10,79	6676	0,10	304,90	4,46
6368	0,15	203,76	6,91	6677	0,10	295,00	4,43
6369	0,10	281,77	3,91	6678	0,09	297,43	3,71
6370	0,09	302,71	3,82	6679	0,09	389,97	4,54
6371	0,16	169,03	6,77	6680	0,13	251,72	6,27
6372	0,18	164,59	8,05	6681	0,10	294,83	3,97
6373	0,07	384,78	2,93	6682	0,09	288,72	3,82
6374	0,07	396,58	2,86	6683	0,09	325,91	3,78
6375	0,10	280,14	3,98	6701	0,11	236,26	4,68
6376	0,15	179,54	6,32	6702	0,14	197,32	5,71
6377	0,15	178,13	6,38	6703	0,21	131,04	9,16
6401	0,12	233,64	4,74	6704	0,11	265,19	4,45
6402	0,09	296,95	3,72	6705	0,08	342,66	3,27
6403	0,13	214,18	5,20	6706	0,10	267,62	4,27
6404	0,14	193,68	6,16	6707	0,11	245,66	4,50
6405	0,16	191,34	7,55	6708	0,13	235,88	5,42
6406	0,18	180,84	8,75	6709	0,12	245,00	5,42
6407	0,12	227,18	4,99	6710	0,07	362,63	3,09
6408	0,08	320,01	3,46	6711	0,09	312,64	3,54
6409	0,09	301,11	3,67	6712	0,08	322,39	3,46
6501	0,05	516,14	2,32	6713	0,09	302,48	3,74
6502	0,07	408,76	2,79	6714	0,12	231,04	5,12
6503	0,05	527,74	2,28	6715	0,12	234,53	5,27
6504	0,08	352,39	3,65	6716	0,10	283,07	4,30
6505	0,11	235,13	4,71	6717	0,12	223,48	4,98
6506	0,08	345,32	3,63	6718	0,08	341,26	3,26
6507	0,13	267,39	6,11	6719	0,09	297,47	3,71
6508	0,11	263,14	4,41	6720	0,16	168,40	6,80
6509	0,10	270,67	4,08	6721	0,11	246,27	4,63
6510	0,09	297,67	3,75	6722	0,11	265,89	4,94
6511	0,07	415,88	2,80	6723	0,11	257,93	4,39
6512	0,08	367,25	3,38	6724	0,10	282,03	4,29
6513	0,08	341,72	3,35	6725	0,13	259,71	6,24
6514	0,11	292,92	4,70	6726	0,10	279,63	3,99
6515	0,14	209,36	5,83	6727	0,12	269,24	5,56
6516	0,12	255,85	5,28	6728	0,08	364,19	3,50
6517	0,06	459,17	2,54	6729	0,15	179,63	6,32
6518	0,10	263,44	4,19	6730	0,06	462,36	2,52
6519	0,11	263,20	4,58	6731	0,08	331,35	3,35
6520	0,07	381,64	2,95	6732	0,08	337,30	3,30
6521	0,08	356,71	3,14	6733	0,11	258,78	4,52
6522	0,10	285,76	4,40	6734	0,07	436,53	2,88
6523	0,06	438,80	2,63	6735	0,16	178,16	7,26
6524	0,08	326,48	3,50	6736	0,10	299,08	4,34
6525	0,10	289,26	4,18	6737	0,10	300,04	4,27
6526	0,08	320,05	3,46	6738	0,05	525,00	2,29
6527	0,09	300,95	3,82	6739	0,18	153,63	7,60
6528	0,05	536,94	2,25	6740	0,08	323,31	3,43
6529	0,11	302,79	5,02	6741	0,12	227,04	4,88

Tabela 32 - Fator topográfico LS por célula da modelagem hidrodinâmica.(Cont.)

Célula	Declividade média	Comprimento médio da rampa (m)	Fator LS	Célula	Declividade média	Comprimento médio da rampa (m)	Fator LS
6530	0,08	383,37	3,65	6742	0,07	438,93	2,83
6531	0,12	219,44	5,20	6743	0,11	254,12	4,34

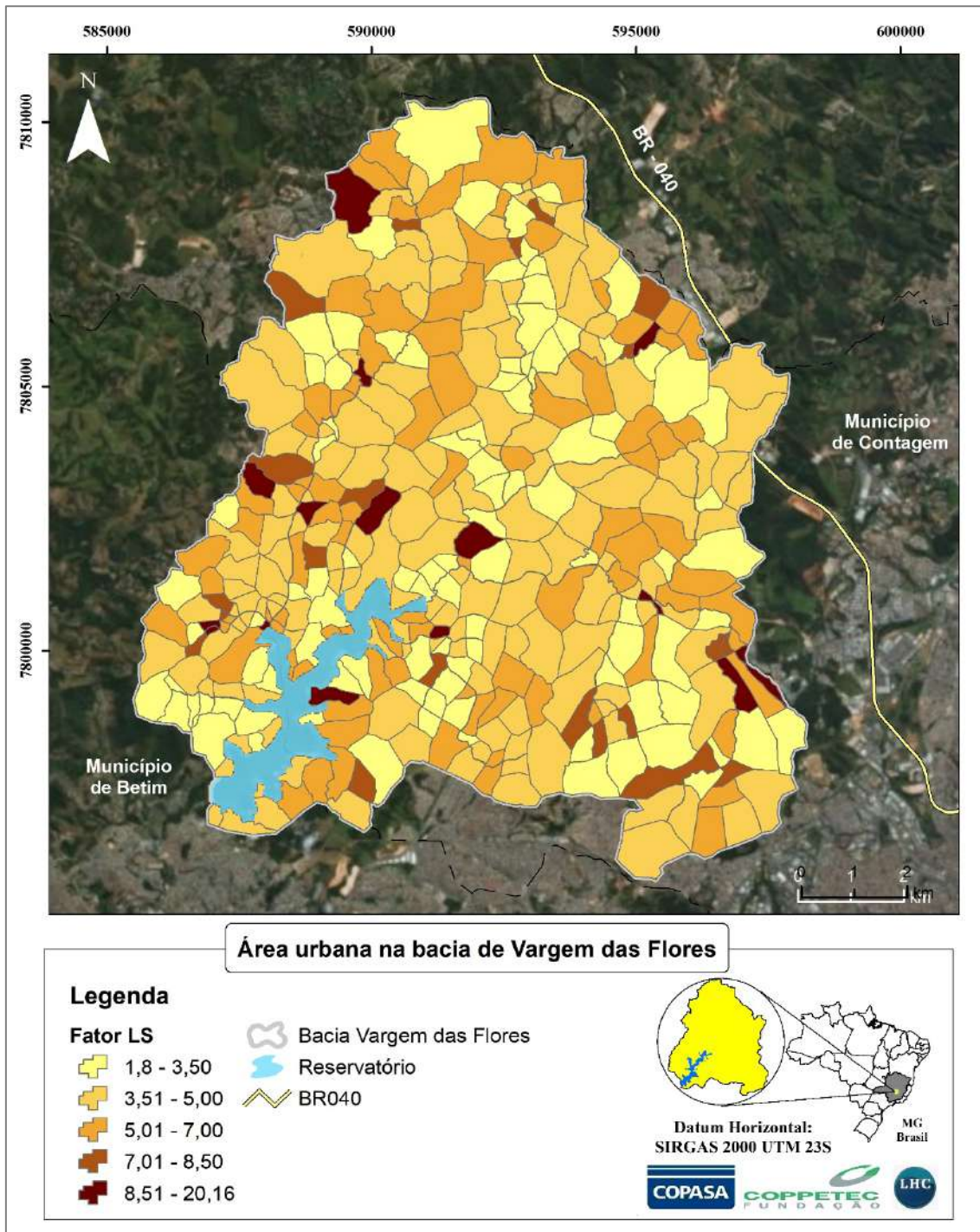


Figura 62 - Fator LS por célula da modelagem.

3.1.4 CP - Fator de uso e manejo do solo

Os fatores C e P, que representam respectivamente o uso e o manejo do solo, foram utilizados em conjunto, conforme indicado por Wischmeier e Smith (1978), chamado de fator CP. Os valores de CP foram baseados em Stein *et al.* (1987) e adaptados para as condições observadas na bacia hidrográfica do reservatório de Vargem das Flores, tais como áreas urbanas não consolidadas com parcelas consideráveis de solo exposto e estradas sem pavimentação com alto potencial de produção de sedimentos.

A Tabela 33 apresenta os valores de Stein *et al.* (1987) para o fator CP considerando alguns usos e cobertura do solo.

Tabela 33 - Fator CP para alguns tipos de uso e cobertura do solo de acordo com Stein *et al.* (1987).

Grupo	Descrição	Categoria	Fator CP
1	Vegetação de porte alto a médio, cobertura total do terreno	a Floresta	0,00004
		b Vegetação secundária	0,00004
		c Cerradão	0,00004
		d Reflorestamento	0,0001
2	Vegetação de porte médio a baixo, cobertura total do terreno	a Cobertura residual	0,0007
		b Cerrado	0,0007
		c Cultura permanente	0,02
		d Cana-de-açúcar	0,05
3	Vegetação de porte médio a baixo, cobertura parcial do terreno	a Cobertura residual	0,25
		b Cultura perene	0,25
4	Vegetação de porte baixo a rasteiro, cobertura total do terreno	a Cobertura residual	0,01
		b Pastagem	0,01
		c Cultura temporária	0,2
		d Campo cerrado	0,01
		e Campo natural	0,01
5	Vegetação de porte baixo a rasteiro, cobertura parcial do terreno	a Cobertura residual	0,1
		b Pastagem	0,1
		c Cultura temporária	0,2
6	Ocupações naturais diversas	a Várzea	0
		b Espelho d'água	0
7	Ocupações antrópicas diversas	a Área urbanizada consolidada	0
		b Estrada pavimentada	0

Stein *et al.* (1987) consideram que os usos antrópicos como Urbano, Industrial e Mineração possuem potencial zero na produção de sedimentos, pois, de acordo com os autores, esses usos não possuem solo para ser erodido. No entanto, a análise de imagens de satélite da região mostrou que o processo de ocupação da bacia do reservatório de Vargem das Flores, assim como ocorre normalmente nas cidades brasileiras, tem enorme capacidade de produção de sedimentos (Carvalho, 2008), com grande quantidade de solo exposto, tanto em lotes quanto em vias não pavimentadas. Áreas com uso urbano produzem mais sedimentos, uma vez que o processo de urbanização expõe o solo à ação da erosão (Cabral *et al.*, 2013). Após a consolidação da área urbana, de fato, tende a haver uma redução da produção de sedimentos, mas esta consolidação leva tempo e a urbanização acaba sempre se expandindo deixando uma periferia ainda com muito solo exposto. Além disso, quanto maior e mais rápido o espalhamento espacial da urbanização, maior tende a ser o déficit de infraestrutura e a possibilidade de produzir sedimentos.

A preparação do local para receber um novo uso, especialmente para a ocupação urbana, faz necessário remover a maior parte da vegetação existente, assim como a zona de raízes, deixando a superfície do solo completamente sem proteção e potencializando os processos erosivos. Na observação das imagens de satélite da bacia foram mapeadas todas as áreas que apresentaram urbanização em processo de consolidação e constatou-se que 28% da área urbana é não consolidada. O mapa da Figura 63 apresenta as áreas não consolidadas na bacia do reservatório de Vargem das Flores.

Adicionalmente, foram levantadas três áreas urbanas não consolidadas, utilizadas como amostras, e observou-se que, em média, o processo de urbanização deixa exposta cerca de 27% da área, entre lotes e vias. Com base nessas observações, os coeficientes CP foram ponderados e são apresentados na Tabela 34. Esses valores foram utilizados para o cenário passado e para o cenário atual.

A Tabela 35 e o mapa da Figura 64 apresentam os valores do fator CP para cada célula no cenário passado e teve como fonte o mapa de uso do solo de 1987 (MATOS *et al.*, 2017).

Tabela 34 - Adaptação do coeficiente CP de Stein et al. (1987) para a realidade da bacia do reservatório de Vargem das Flores.

Uso	CP adaptado de Stein	Composição do coeficiente
Corpos Hídricos	0	0 Não se considera produção de sedimentos em corpos hídricos, no cálculo da RUSLE
Mancha Urbana Atual	0,10	0 72% referente à parcela consolidada, áreas impermeabilizadas onde a produção de sedimentos pode ser desprezada
		0,1 20% referente à parcela não consolidada e semelhante ao que Stein indica para vegetação de porte baixo a rasteiro, cobertura parcial do terreno - cobertura residual (5a de Stein)
		1 8% referente à solo exposto = 27% (solo exposto) de 28% (área não consolidada)
Solo Exposto	1	solo exposto possui nenhuma proteção contra a ação erosiva da chuva
Usos Agropastoris	0,11	0,2 50% da área referente a cultura temporária (5c de Stein)
		0,02 50% da área referente a cultura permanente (2c de Stein)
Vegetação Densa	0,00004	Floresta (1a de Stein)
Vegetação Esparsa	0,0007	Cobertura residual (2a de Stein)
Afloramento Rochoso	0	Produção de sedimentos desprezada em períodos curtos

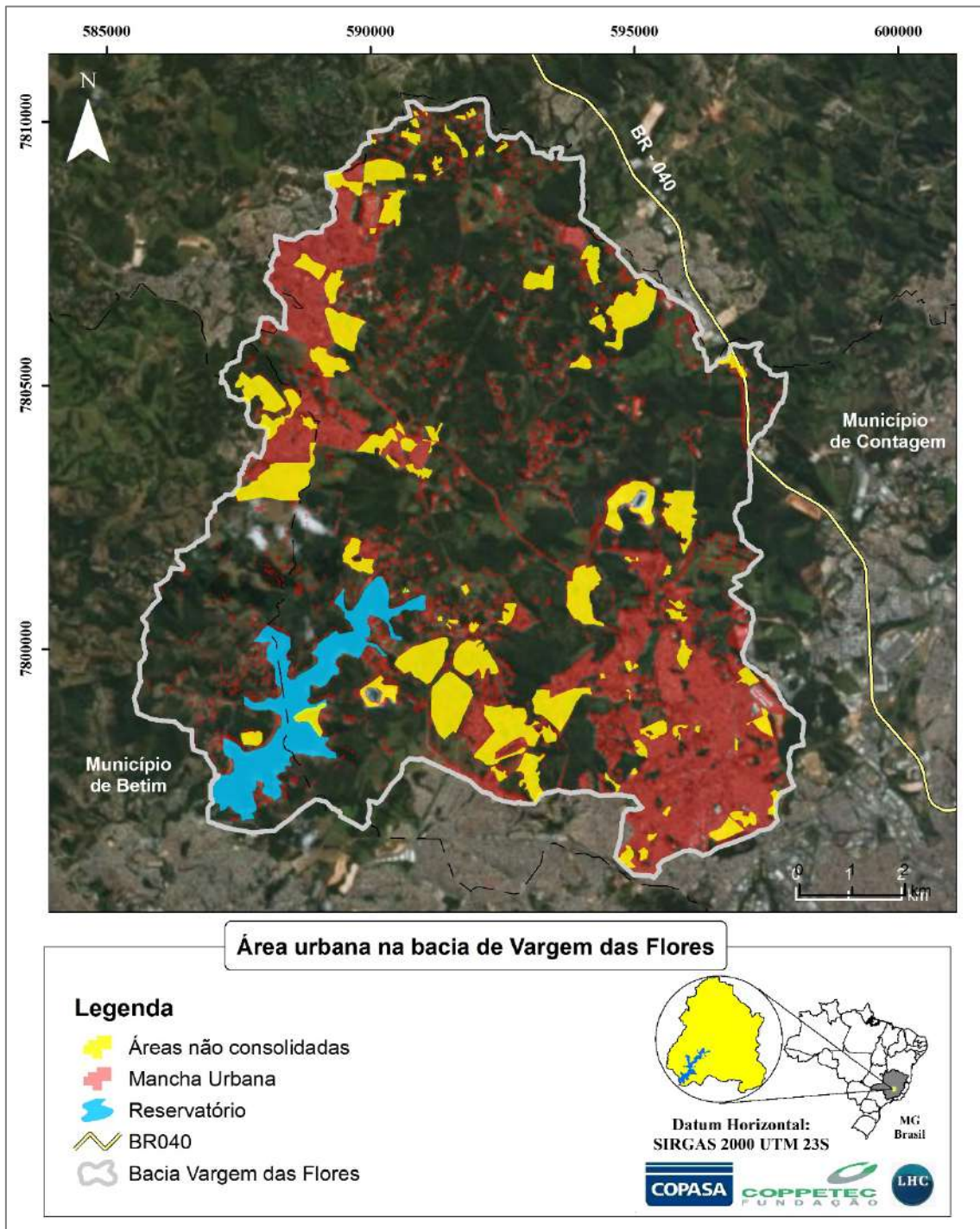


Figura 63 - Mapa com as áreas urbanas consolidadas e não consolidadas na bacia do reservatório de Vargem das Flores.

Tabela 35 - Valores do fator CP para cada célula, considerando o cenário passado.

Célula	CP	Célula	CP	Célula	CP	Célula	CP
6001	0,2012	6325	0,0927	6532	0,0352	6634	0,0784
6002	0,1802	6326	0,1231	6533	0,0549	6635	0,1135
6003	0,2942	6327	0,1150	6534	0,0573	6636	0,1229
6004	0,6825	6328	0,1364	6535	0,0590	6637	0,1114
6005	0,1370	6329	0,1449	6536	0,0544	6638	0,1072
6006	0,3727	6330	0,0813	6537	0,0364	6639	0,1194
6007	0,3089	6331	0,1028	6538	0,0325	6640	0,1698
6008	0,2016	6332	0,0831	6539	0,1002	6641	0,1087
6009	0,2507	6333	0,1322	6540	0,0571	6642	0,1263
6010	0,1783	6334	0,0765	6541	0,2422	6643	0,1297
6011	0,0202	6335	0,1120	6542	0,0423	6644	0,1295
6012	0,0214	6336	0,0908	6543	0,0351	6645	0,1106
6013	0,0174	6337	0,0631	6544	0,0560	6646	0,1279
6014	0,0437	6338	0,0753	6545	0,0391	6647	0,1297
6015	0,0066	6339	0,0982	6546	0,0716	6648	0,1546
6016	0,0169	6340	0,0568	6547	0,0588	6649	0,1101
6017	0,0279	6341	0,0419	6548	0,0510	6650	0,0820
6018	0,1991	6342	0,0176	6549	0,1285	6651	0,1532
6019	0,1472	6343	0,0803	6550	0,0656	6652	0,1293
6020	0,1556	6344	0,0730	6551	0,0293	6653	0,2315
6021	0,0318	6345	0,0609	6552	0,0625	6654	0,1158
6022	0,4598	6346	0,0720	6553	0,0475	6655	0,3806
6023	0,1544	6347	0,0179	6554	0,0325	6656	0,0813
6024	0,2240	6348	0,0400	6555	0,2522	6657	0,1257
6025	0,2249	6349	0,0192	6556	0,0852	6658	0,0956
6026	0,1320	6350	0,0343	6557	0,0988	6659	0,1173
6027	0,0495	6351	0,0146	6558	0,0142	6660	0,0821
6028	0,1086	6352	0,0176	6559	0,0719	6661	0,1371
6029	0,1314	6353	0,0739	6560	0,0349	6662	0,0965
6030	0,2764	6354	0,0608	6561	0,0031	6663	0,0490
6031	0,1324	6355	0,0526	6562	0,0001	6664	0,1217
6032	0,0380	6356	0,0509	6563	0,0410	6665	0,1311
6033	0,1320	6357	0,0630	6564	0,1222	6666	0,0911
6034	0,1828	6358	0,1265	6565	0,0270	6667	0,1280
6035	0,0825	6359	0,1156	6566	0,0039	6668	0,0966
6036	0,0878	6360	0,1771	6567	0,0044	6669	0,1438
6037	0,3067	6361	0,2326	6568	0,0635	6670	0,1268
6038	0,1210	6362	0,1731	6569	0,4808	6671	0,1122
6039	0,0087	6363	0,1204	6570	0,1264	6672	0,0978
6101	0,3543	6364	0,0930	6571	0,0925	6673	0,0563
6102	0,4194	6365	0,0345	6572	0,1182	6674	0,0705
6103	0,2162	6366	0,0569	6573	0,0573	6675	0,0706
6104	0,1657	6367	0,0630	6574	0,1433	6676	0,1365
6105	0,1903	6368	0,0239	6575	0,0711	6677	0,1123
6106	0,0276	6369	0,0517	6576	0,1104	6678	0,0329
6107	0,0973	6370	0,0318	6577	0,3268	6679	0,2015
6108	0,1666	6371	0,0982	6578	0,0880	6680	0,1460
6109	0,3497	6372	0,0308	6579	0,0428	6681	0,1394
6201	0,2253	6373	0,1962	6580	0,0643	6682	0,0795
6202	0,0823	6374	0,0945	6581	0,0061	6683	0,1374

Tabela 35 - Valores do fator CP para cada célula, considerando o cenário passado. (Cont.)

Célula	CP	Célula	CP	Célula	CP	Célula	CP
6203	0,0966	6375	0,0678	6582	0,1027	6701	0,0204
6204	0,3509	6376	0,1212	6583	0,1326	6702	0,0060
6205	0,3351	6377	0,0098	6584	0,1349	6703	0,0689
6206	0,1777	6401	0,0042	6585	0,0674	6704	0,0939
6207	0,1669	6402	0,0087	6586	0,0550	6705	0,0600
6208	0,0853	6403	0,0218	6587	0,0285	6706	0,0757
6209	0,0359	6404	0,0373	6588	0,1287	6707	0,0417
6210	0,1880	6405	0,0165	6589	0,0867	6708	0,0586
6211	0,3741	6406	0,0046	6590	0,0815	6709	0,0997
6212	0,3764	6407	0,0794	6591	0,1099	6710	0,1346
6213	0,7091	6408	0,0696	6601	0,0219	6711	0,0927
6214	0,1809	6409	0,0863	6602	0,1114	6712	0,0563
6215	0,1013	6501	0,1230	6603	0,1160	6713	0,0699
6216	0,0943	6502	0,0575	6604	0,0637	6714	0,0904
6217	0,0165	6503	0,0304	6605	0,1566	6715	0,0520
6218	0,0554	6504	0,0898	6606	0,1938	6716	0,1087
6219	0,0196	6505	0,0915	6607	0,4850	6717	0,0977
6220	0,0557	6506	0,0661	6608	0,0064	6718	0,0620
6221	0,0068	6507	0,0880	6609	0,1026	6719	0,0536
6301	0,0312	6508	0,0931	6610	0,0096	6720	0,1122
6302	0,0000	6509	0,1706	6611	0,0258	6721	0,1019
6303	0,0082	6510	0,0329	6612	0,0555	6722	0,0797
6304	0,0147	6511	0,0950	6613	0,3034	6723	0,1465
6305	0,2124	6512	0,0522	6614	0,2723	6724	0,1272
6306	0,2068	6513	0,1301	6615	0,1508	6725	0,1169
6307	0,0903	6514	0,0621	6616	0,2355	6726	0,1323
6308	0,1819	6515	0,1098	6617	0,0814	6727	0,1221
6309	0,0494	6516	0,0328	6618	0,0523	6728	0,0578
6310	0,0202	6517	0,0311	6619	0,1855	6729	0,2452
6311	0,0775	6518	0,0306	6620	0,0401	6730	0,2386
6312	0,2818	6519	0,0238	6621	0,0515	6731	0,0503
6313	0,2445	6520	0,0894	6622	0,0473	6732	0,0563
6314	0,0290	6521	0,0439	6623	0,0665	6733	0,1113
6315	0,1420	6522	0,0098	6624	0,0090	6734	0,0917
6316	0,3878	6523	0,0194	6625	0,0114	6735	0,0561
6317	0,4057	6524	0,0737	6626	0,0238	6736	0,0464
6318	0,3351	6525	0,0401	6627	0,0758	6737	0,1071
6319	0,5260	6526	0,0582	6628	0,0819	6738	0,0800
6320	0,2078	6527	0,0398	6629	0,1085	6739	0,2123
6321	0,2208	6528	0,0403	6630	0,1402	6740	0,2294
6322	0,1539	6529	0,0172	6631	0,0612	6741	0,1192
6323	0,1193	6530	0,0315	6632	0,0263	6742	0,2213
6324	0,1221	6531	0,3362	6633	0,0480	6743	0,6477

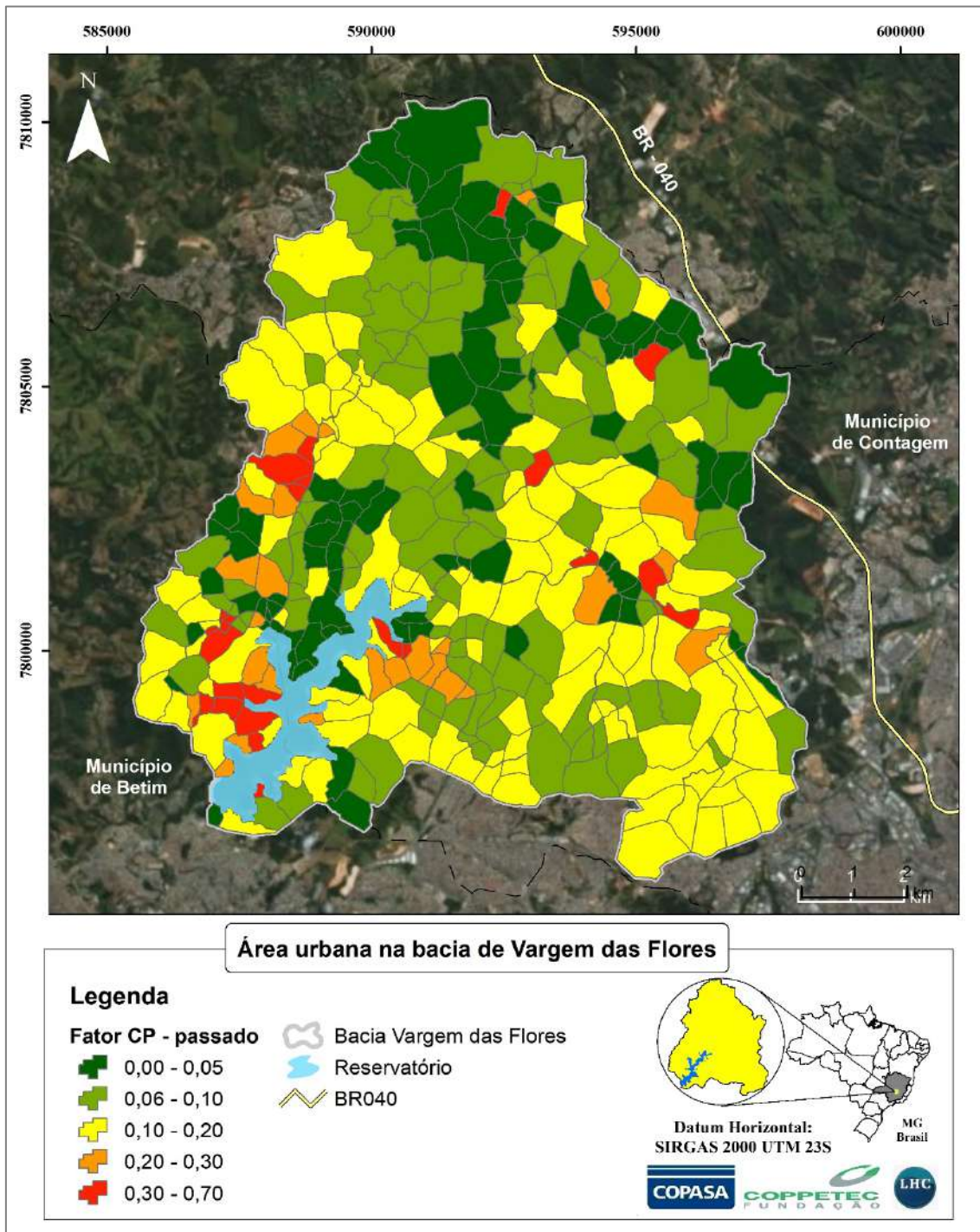


Figura 64 - Fator CP do cenário passado, para cada célula de modelagem.

Na Tabela 36 e no mapa da Figura 65 são apresentados os valores do fator CP para cada célula no cenário atual, de acordo com os usos existentes no mapa de cobertura do solo de 2016.

Tabela 36 - Valores do fator CP para cada célula, considerando o uso do solo atual.

Célula	CP	Célula	CP	Célula	CP	Célula	CP
6001	0,0779	6325	0,1177	6532	0,2783	6634	0,0752
6002	0,1114	6326	0,1162	6533	0,3904	6635	0,1301
6003	0,0659	6327	0,1306	6534	0,1120	6636	0,0927
6004	0,1299	6328	0,1320	6535	0,0380	6637	0,0714
6005	0,0929	6329	0,1113	6536	0,0933	6638	0,1101
6006	0,0311	6330	0,1195	6537	0,0108	6639	0,1114
6007	0,1182	6331	0,1015	6538	0,0049	6640	0,1030
6008	0,1213	6332	0,1397	6539	0,0676	6641	0,1450
6009	0,1413	6333	0,1046	6540	0,2332	6642	0,0998
6010	0,1402	6334	0,0619	6541	0,0873	6643	0,0971
6011	0,0131	6335	0,1336	6542	0,2320	6644	0,0887
6012	0,0652	6336	0,0881	6543	0,0987	6645	0,1028
6013	0,0591	6337	0,0891	6544	0,1771	6646	0,0999
6014	0,0722	6338	0,1444	6545	0,1856	6647	0,1039
6015	0,0211	6339	0,1481	6546	0,1432	6648	0,0975
6016	0,0249	6340	0,0403	6547	0,1382	6649	0,0953
6017	0,0438	6341	0,0125	6548	0,1265	6650	0,1078
6018	0,1858	6342	0,0257	6549	0,1184	6651	0,1011
6019	0,1859	6343	0,0593	6550	0,1629	6652	0,1080
6020	0,2148	6344	0,1041	6551	0,1963	6653	0,1062
6021	0,0836	6345	0,0939	6552	0,0614	6654	0,1158
6022	0,3246	6346	0,1173	6553	0,0593	6655	0,1229
6023	0,1488	6347	0,1458	6554	0,0740	6656	0,0537
6024	0,1115	6348	0,1034	6555	0,1218	6657	0,0849
6025	0,1223	6349	0,0829	6556	0,1433	6658	0,1070
6026	0,0466	6350	0,1061	6557	0,1355	6659	0,1009
6027	0,0332	6351	0,0305	6558	0,1315	6660	0,1579
6028	0,0611	6352	0,0018	6559	0,0605	6661	0,0983
6029	0,0793	6353	0,1304	6560	0,0779	6662	0,1131
6030	0,1163	6354	0,1496	6561	0,0046	6663	0,0990
6031	0,0498	6355	0,0404	6562	0,0239	6664	0,1095
6032	0,0182	6356	0,0838	6563	0,0585	6665	0,0988
6033	0,0210	6357	0,1223	6564	0,1209	6666	0,1361
6034	0,0523	6358	0,1428	6565	0,1201	6667	0,1209
6035	0,0666	6359	0,0891	6566	0,0453	6668	0,0931
6036	0,0799	6360	0,1000	6567	0,1560	6669	0,1105
6037	0,0962	6361	0,1000	6568	0,0393	6670	0,1094
6038	0,1260	6362	0,1403	6569	0,0054	6671	0,0997
6039	0,0002	6363	0,1299	6570	0,0953	6672	0,1155
6101	0,1209	6364	0,0452	6571	0,0362	6673	0,0949
6102	0,2504	6365	0,0490	6572	0,0924	6674	0,0115
6103	0,1380	6366	0,0686	6573	0,0401	6675	0,0552
6104	0,0409	6367	0,0870	6574	0,1639	6676	0,1204
6105	0,0512	6368	0,0266	6575	0,0154	6677	0,0796
6106	0,1277	6369	0,0550	6576	0,0410	6678	0,1474
6107	0,0701	6370	0,0434	6577	0,1513	6679	0,0975
6108	0,0385	6371	0,0411	6578	0,0822	6680	0,0650
6109	0,2088	6372	0,0040	6579	0,0682	6681	0,1675
6201	0,1952	6373	0,0500	6580	0,0508	6682	0,0231
6202	0,0756	6374	0,0509	6581	0,0037	6683	0,2268

Tabela 36 - Valores do fator CP para cada célula, considerando o uso do solo atual. (Cont.)

Célula	CP	Célula	CP	Célula	CP	Célula	CP
6203	0,0980	6375	0,0011	6582	0,0495	6701	0,0644
6204	0,1310	6376	0,0196	6583	0,1914	6702	0,0942
6205	0,0761	6377	0,0376	6584	0,0795	6703	0,3156
6206	0,2200	6401	0,0265	6585	0,0659	6704	0,2408
6207	0,0293	6402	0,0111	6586	0,0353	6705	0,1471
6208	0,0336	6403	0,0197	6587	0,0020	6706	0,1676
6209	0,0315	6404	0,0313	6588	0,2298	6707	0,0340
6210	0,0368	6405	0,0064	6589	0,1175	6708	0,0663
6211	0,0379	6406	0,0160	6590	0,1436	6709	0,0853
6212	0,0480	6407	0,1272	6591	0,2083	6710	0,2031
6213	0,0145	6408	0,0866	6601	0,1080	6711	0,1840
6214	0,0105	6409	0,1034	6602	0,0788	6712	0,1221
6215	0,0337	6501	0,1769	6603	0,0357	6713	0,1219
6216	0,1583	6502	0,0902	6604	0,0581	6714	0,1246
6217	0,0483	6503	0,0495	6605	0,0454	6715	0,1291
6218	0,3859	6504	0,0455	6606	0,0719	6716	0,1127
6219	0,0362	6505	0,1279	6607	0,0785	6717	0,1229
6220	0,0394	6506	0,1113	6608	0,0084	6718	0,1412
6221	0,0297	6507	0,1507	6609	0,0625	6719	0,2036
6301	0,0954	6508	0,0900	6610	0,0014	6720	0,1193
6302	0,0000	6509	0,0905	6611	0,1296	6721	0,0964
6303	0,0017	6510	0,0504	6612	0,0424	6722	0,1027
6304	0,0001	6511	0,0649	6613	0,1064	6723	0,1455
6305	0,0806	6512	0,0416	6614	0,0896	6724	0,0994
6306	0,0896	6513	0,1089	6615	0,0917	6725	0,1109
6307	0,1258	6514	0,0660	6616	0,0928	6726	0,2910
6308	0,0621	6515	0,0740	6617	0,0537	6727	0,3962
6309	0,0486	6516	0,0852	6618	0,0342	6728	0,1440
6310	0,0221	6517	0,0348	6619	0,1039	6729	0,1629
6311	0,0408	6518	0,1170	6620	0,0646	6730	0,1650
6312	0,1131	6519	0,0841	6621	0,0234	6731	0,1188
6313	0,1442	6520	0,0613	6622	0,0817	6732	0,1005
6314	0,0314	6521	0,0577	6623	0,0874	6733	0,1639
6315	0,1129	6522	0,0334	6624	0,0082	6734	0,0891
6316	0,1020	6523	0,0079	6625	0,0041	6735	0,0297
6317	0,1132	6524	0,0170	6626	0,0484	6736	0,0294
6318	0,1097	6525	0,0454	6627	0,0167	6737	0,0573
6319	0,0996	6526	0,0599	6628	0,1858	6738	0,0547
6320	0,0992	6527	0,0503	6629	0,1914	6739	0,1604
6321	0,1093	6528	0,0251	6630	0,1179	6740	0,1997
6322	0,1145	6529	0,0473	6631	0,0892	6741	0,1171
6323	0,1049	6530	0,1230	6632	0,0919	6742	0,1464
6324	0,2338	6531	0,3494	6633	0,0601	6743	0,3776

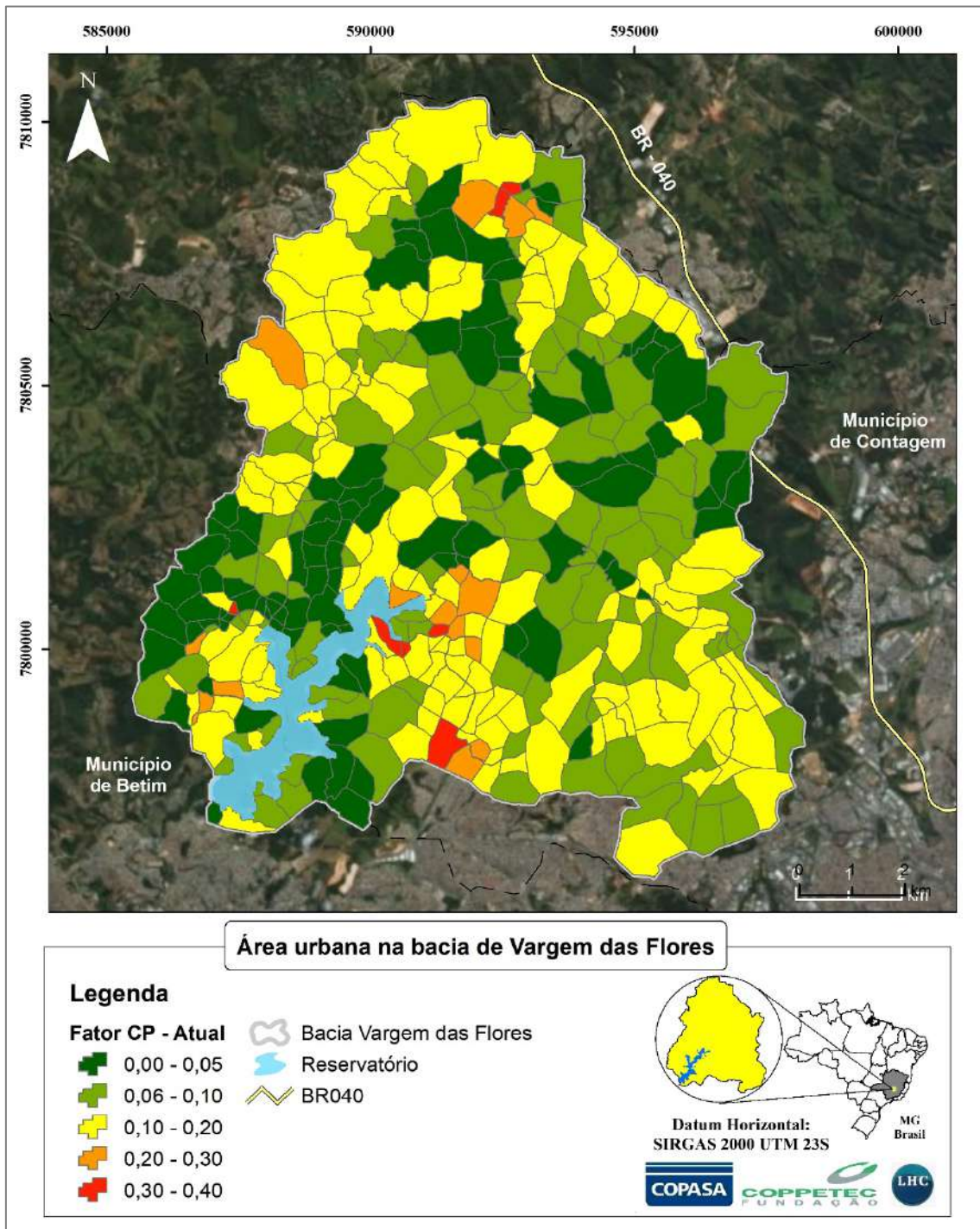


Figura 65 - Fator CP para cada célula no cenário atual.

Para os cenários Futuro 1 e Futuro 2 levaram-se em conta as mudanças no uso do solo indicadas no Macrozoneamento da Região Metropolitana de Belo Horizonte e no Plano Municipal de Contagem, respectivamente. O processo de urbanização, em ambos os cenários, foi composto de forma gradual ao longo do horizonte temporal de cada plano.

Para o cenário Futuro 1 – Macrozoneamento da RMBH, verificou-se que a proposta de reestruturação territorial da RMBH tem como horizonte temporal de longo prazo o ano de 2050 (UFMG, 2015). Portanto, foram considerados, para o processo de reestruturação do território, 4 períodos de 8 anos, a partir de 2018. Dessa maneira, nos primeiros 8 anos (2018-2026) todas as áreas destinadas à preservação ambiental foram consideradas reflorestadas e as áreas onde é previsto o crescimento urbano foram urbanizadas em 25%. Nos demais períodos, foi considerado o processo de urbanização crescendo em 25% por período, até alcançar 100% das áreas onde é prevista a ocupação urbana. Considerando os usos do solo da situação atual e os usos previstos pelo Macrozoneamento da RMBH, foram estimados os usos futuros para a bacia do reservatório de Vargem da Flores. Os critérios utilizados para a evolução do uso do solo para o cenário Futuro 1 estão apresentados na Tabela 37.

Tabela 37 - Critério para evolução das áreas de uso do solo, de acordo com as zonas, para o Cenário Futuro 1.

Uso do solo	ZP-1	ZP-2	ZP-3	ZAC-2, ZAC-3
Corpos hídricos (CH)	100%CH	100%CH	100%CH	100%CH
Mancha urbana (MU)	100%MU+ 50%SE	100%MU+ 100%SE+ 100%AR	100%MU+ 100%SE+ 100%AR+ 100%UA+ 50%VE	100%MU+ 100%SE+ 100%AR+ 100%UA+ 50%VD+ 100%VE
Solo exposto (SE)	0	0	0	0
Afloramento rochoso (AR)	100%AR	0	0	0
Uso agropastoril (UA)	50%UA	100%UA	0	0
Vegetação densa (VD)	100%VD+ 50%SE+ 50%UA+ 100%VE	100%VD+ 100%VE	100%VD+ 50%VE	50%VD
Vegetação esparsa (VE)	0	0	0	0

No processo de urbanização gradual considerou-se que a relação entre áreas urbanas consolidadas e não consolidadas da situação atual se repetiria ao longo do processo e que, ao final de 8 anos 50% da urbanização não consolidada no período anterior seria consolidada. A evolução do crescimento urbano e as áreas urbanas não consolidadas por período estão apresentadas na Tabela 38.

Tabela 38 - Processo de urbanização do cenário Futuro 1 – Macrozoneamento da RMBH, com áreas urbanizadas consolidadas e não consolidadas ao longo do horizonte temporal do PDDI-RMBH.

Período	Atual	2018-2026	2026-2034	2034-2042	2042-2050
Mancha Urbana (área em m ²)	38.544.908,56	43.233.280,59	47.921.652,61	52.610.024,64	57.298.396,7
Crescimento por período (área em m ²)		4.688.372,03	4.688.372,03	4.688.372,03	4.688.372,03
% Área urbana não consolidada	28%	25%	22%	20%	18%
% Área urbana consolidada	72%	75%	78%	80%	82%

Para a composição do fator CP da Mancha Urbana para o cenário Futuro 1 – Macrozoneamento da RMBH, foram feitas ponderações semelhantes às aplicadas ao cenário atual, conforme apresentado na Tabela 39. Foi calculado um coeficiente CP por período, considerando as particularidades de cada intervalo de tempo, no que se refere à ocupação urbana. Para os demais usos do solo, foram aplicados os mesmos coeficientes do cenário atual (Tabela 34).

Os valores do fator CP obtidos para cada célula no cenário Futuro 1 – Macrozoneamento da RMBH, considerando os 4 períodos, estão apresentados na Tabela 40. O mapa da Figura 66 apresenta o fator CP para o último período (2042-2050), que considera todos os usos previstos no PDDI-RMBH.

Tabela 39 - Adaptação do coeficiente CP para Mancha urbana de Stein et al. (1987), considerando o cenário Futuro 1 – Macrozoneamento da RMBH e a urbanização gradual.

Período	Uso	CP adaptado de Stein	Composição do coeficiente
2018-2026	Mancha Urbana Futuro	0,088	0 75% referente à parcela consolidada, áreas impermeabilizadas onde a produção de sedimentos pode ser desprezada
			0,1 18% referente à parcela não consolidada e semelhante ao que Stein indica para vegetação de porte baixo a rasteiro, cobertura parcial do terreno - cobertura residual (5a de Stein)
			1 7% referente à solo exposto = 27% (lotes e vias sem pavimentação) de 25% (área não consolidada no período)
2026-2034	Mancha Urbana Futuro	0,076	0 78% referente à parcela consolidada, áreas impermeabilizadas onde a produção de sedimentos pode ser desprezada
			0,1 16% referente à parcela não consolidada e semelhante ao que Stein indica para vegetação de porte baixo a rasteiro, cobertura parcial do terreno - cobertura residual (grupo 5)
			1 6% referente à solo exposto = 27% (lotes e vias não pavimentadas) de 21% (área não consolidada no período)
2034-2042	Mancha Urbana Futuro	0,065	0 80% referente à parcela consolidada, áreas impermeabilizadas onde a produção de sedimentos pode ser desprezada
			0,1 15% referente à parcela não consolidada e semelhante ao que Stein indica para vegetação de porte baixo a rasteiro, cobertura parcial do terreno - cobertura residual (grupo 5)
			1 5% referente à solo exposto = 27% (lotes e vias não pavimentadas) de 20% (área não consolidada no período)
2042-2050	Mancha Urbana Futuro	0,063	0 82% referente à parcela consolidada, áreas impermeabilizadas onde a produção de sedimentos pode ser desprezada
			0,1 13% referente à parcela não consolidada e semelhante ao que Stein indica para vegetação de porte baixo a rasteiro, cobertura parcial do terreno - cobertura residual (grupo 5)
			1 5% referente à solo exposto = 27% (vias não pavimentadas) de 18% (área não consolidada no período)

Tabela 40 - Valores do fator CP para cada período do cenário Futuro 1.

Célula	CP 2018-2026	CP 2026-2034	CP 2034-2042	CP 2042-2050
6001	0,0715	0,0631	0,0532	0,0484
6002	0,0952	0,0768	0,0566	0,0399
6003	0,0602	0,0531	0,0453	0,0422
6004	0,1116	0,0914	0,0701	0,0549
6005	0,0808	0,0667	0,0512	0,0394
6006	0,0288	0,0254	0,0209	0,0177
6007	0,0998	0,0796	0,0579	0,0402
6008	0,1053	0,0866	0,0661	0,0503
6009	0,1206	0,0972	0,0717	0,0510
6010	0,1162	0,0902	0,0625	0,0374
6011	0,0188	0,0227	0,0249	0,0294
6012	0,0598	0,0526	0,0442	0,0398
6013	0,0552	0,0491	0,0414	0,0368
6014	0,0654	0,0561	0,0447	0,0360
6015	0,0228	0,0232	0,0226	0,0243
6016	0,0235	0,0214	0,0189	0,0183
6017	0,0421	0,0383	0,0326	0,0289
6018	0,1529	0,1178	0,0810	0,0491
6019	0,1523	0,1159	0,0771	0,0417
6020	0,1765	0,1353	0,0921	0,0539
6021	0,0748	0,0636	0,0505	0,0412
6022	0,2601	0,1927	0,1232	0,0594
6023	0,1250	0,0994	0,0726	0,0514
6024	0,0959	0,0788	0,0608	0,0483
6025	0,1048	0,0860	0,0666	0,0537
6026	0,0435	0,0388	0,0327	0,0291
6027	0,0319	0,0292	0,0253	0,0234
6028	0,0554	0,0480	0,0390	0,0329
6029	0,0704	0,0594	0,0468	0,0375
6030	0,1013	0,0848	0,0675	0,0569
6031	0,0452	0,0390	0,0315	0,0262
6032	0,0183	0,0173	0,0155	0,0148
6033	0,0224	0,0222	0,0205	0,0200
6034	0,0490	0,0437	0,0369	0,0328
6035	0,0588	0,0490	0,0375	0,0281
6036	0,0698	0,0578	0,0441	0,0331
6037	0,0849	0,0725	0,0598	0,0537
6038	0,1094	0,0902	0,0688	0,0522
6039	0,0031	0,0053	0,0067	0,0086
6101	0,1027	0,0818	0,0585	0,0380
6102	0,2050	0,1558	0,1033	0,0552
6103	0,1176	0,0940	0,0677	0,0449
6104	0,0390	0,0351	0,0293	0,0251
6105	0,0478	0,0425	0,0356	0,0316
6106	0,1079	0,0853	0,0603	0,0382
6107	0,0609	0,0497	0,0369	0,0258
6108	0,0427	0,0433	0,0406	0,0400
6109	0,1710	0,1303	0,0874	0,0487
6201	0,1620	0,1260	0,0879	0,0545
6202	0,0711	0,0644	0,0557	0,0485

Tabela 40 - Valores do fator CP para cada período do cenário Futuro 1.(Cont.)

Célula	CP 2018-2026	CP 2026-2034	CP 2034-2042	CP 2042-2050
6203	0,0891	0,0795	0,0693	0,0602
6204	0,1094	0,0873	0,0646	0,0426
6205	0,0681	0,0602	0,0520	0,0441
6206	0,1799	0,1390	0,0972	0,0565
6207	0,0280	0,0266	0,0252	0,0243
6208	0,0301	0,0267	0,0232	0,0202
6209	0,0270	0,0225	0,0180	0,0146
6210	0,0309	0,0248	0,0186	0,0126
6211	0,0345	0,0312	0,0279	0,0249
6212	0,0451	0,0424	0,0398	0,0394
6213	0,0142	0,0142	0,0142	0,0142
6214	0,0097	0,0089	0,0081	0,0074
6215	0,0292	0,0248	0,0204	0,0171
6216	0,1354	0,1121	0,0885	0,0667
6217	0,0424	0,0364	0,0303	0,0244
6218	0,3073	0,2267	0,1443	0,0632
6219	0,0342	0,0323	0,0303	0,0288
6220	0,0376	0,0337	0,0278	0,0232
6221	0,0267	0,0235	0,0200	0,0170
6301	0,0825	0,0682	0,0531	0,0430
6302	0,0001	0,0002	0,0003	0,0003
6303	0,0016	0,0015	0,0014	0,0015
6304	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
6305	0,0762	0,0719	0,0676	0,0645
6306	0,0858	0,0820	0,0781	0,0744
6307	0,1121	0,0980	0,0839	0,0718
6308	0,0600	0,0581	0,0561	0,0547
6309	0,0470	0,0451	0,0431	0,0413
6310	0,0220	0,0219	0,0219	0,0219
6311	0,0371	0,0333	0,0295	0,0264
6312	0,1016	0,0887	0,0750	0,0666
6313	0,1255	0,1036	0,0794	0,0603
6314	0,0288	0,0262	0,0235	0,0213
6315	0,0985	0,0831	0,0678	0,0601
6316	0,0887	0,0746	0,0607	0,0537
6317	0,1013	0,0872	0,0719	0,0632
6318	0,0959	0,0817	0,0679	0,0627
6319	0,0878	0,0760	0,0650	0,0630
6320	0,0874	0,0755	0,0646	0,0626
6321	0,0951	0,0808	0,0674	0,0630
6322	0,0974	0,0790	0,0597	0,0448
6323	0,0930	0,0798	0,0664	0,0606
6324	0,1922	0,1470	0,0989	0,0554
6325	0,1026	0,0863	0,0697	0,0608
6326	0,1034	0,0874	0,0691	0,0559
6327	0,1170	0,0987	0,0767	0,0587
6328	0,1157	0,0967	0,0760	0,0616
6329	0,0970	0,0823	0,0680	0,0623
6330	0,1029	0,0861	0,0701	0,0629
6331	0,0896	0,0773	0,0657	0,0627

Tabela 40 - Valores do fator CP para cada período do cenário Futuro 1.(Cont.)

Célula	CP 2018-2026	CP 2026-2034	CP 2034-2042	CP 2042-2050
6332	0,1198	0,0978	0,0744	0,0555
6333	0,0933	0,0805	0,0672	0,0611
6334	0,0548	0,0470	0,0383	0,0313
6335	0,1189	0,1038	0,0885	0,0750
6336	0,0784	0,0685	0,0586	0,0496
6337	0,0739	0,0586	0,0431	0,0290
6338	0,1196	0,0943	0,0686	0,0455
6339	0,1187	0,0885	0,0576	0,0282
6340	0,0350	0,0297	0,0242	0,0196
6341	0,0102	0,0080	0,0057	0,0035
6342	0,0252	0,0237	0,0214	0,0208
6343	0,0551	0,0493	0,0424	0,0393
6344	0,0927	0,0794	0,0652	0,0574
6345	0,0846	0,0738	0,0622	0,0570
6346	0,1018	0,0855	0,0692	0,0606
6347	0,1263	0,1056	0,0845	0,0689
6348	0,0876	0,0713	0,0549	0,0418
6349	0,0688	0,0544	0,0397	0,0267
6350	0,0897	0,0730	0,0563	0,0424
6351	0,0256	0,0207	0,0158	0,0116
6352	0,0015	0,0015	0,0015	0,0016
6353	0,1085	0,0861	0,0636	0,0440
6354	0,1214	0,0925	0,0632	0,0354
6355	0,0360	0,0316	0,0273	0,0237
6356	0,0737	0,0636	0,0535	0,0452
6357	0,1016	0,0806	0,0593	0,0395
6358	0,1231	0,1015	0,0783	0,0584
6359	0,0819	0,0727	0,0625	0,0590
6360	0,0880	0,0760	0,0650	0,0630
6361	0,0880	0,0760	0,0650	0,0630
6362	0,1215	0,1015	0,0810	0,0676
6363	0,1167	0,1026	0,0881	0,0764
6364	0,0413	0,0367	0,0315	0,0281
6365	0,0476	0,0462	0,0449	0,0440
6366	0,0529	0,0370	0,0208	0,0048
6367	0,0735	0,0598	0,0459	0,0332
6368	0,0252	0,0238	0,0223	0,0212
6369	0,0441	0,0330	0,0218	0,0114
6370	0,0363	0,0288	0,0210	0,0139
6371	0,0366	0,0322	0,0277	0,0243
6372	0,0038	0,0038	0,0036	0,0035
6373	0,0466	0,0429	0,0389	0,0361
6374	0,0438	0,0366	0,0297	0,0257
6375	0,0066	0,0107	0,0134	0,0171
6376	0,0205	0,0200	0,0180	0,0170
6377	0,0355	0,0327	0,0295	0,0299
6401	0,0252	0,0228	0,0193	0,0170
6402	0,0136	0,0147	0,0147	0,0156
6403	0,0190	0,0174	0,0153	0,0145
6404	0,0313	0,0295	0,0261	0,0244

Tabela 40 - Valores do fator CP para cada período do cenário Futuro 1.(Cont.)

Célula	CP 2018-2026	CP 2026-2034	CP 2034-2042	CP 2042-2050
6405	0,0057	0,0050	0,0042	0,0035
6406	0,0137	0,0110	0,0080	0,0052
6407	0,1078	0,0873	0,0664	0,0519
6408	0,0785	0,0693	0,0598	0,0574
6409	0,0937	0,0803	0,0638	0,0512
6501	0,1501	0,1195	0,0860	0,0571
6502	0,0811	0,0688	0,0538	0,0417
6503	0,0478	0,0437	0,0377	0,0343
6504	0,0421	0,0373	0,0311	0,0265
6505	0,1078	0,0873	0,0665	0,0476
6506	0,0938	0,0747	0,0542	0,0357
6507	0,1249	0,0987	0,0721	0,0482
6508	0,0810	0,0709	0,0602	0,0542
6509	0,0825	0,0734	0,0637	0,0585
6510	0,0436	0,0368	0,0299	0,0241
6511	0,0555	0,0460	0,0364	0,0284
6512	0,0352	0,0287	0,0222	0,0164
6513	0,0914	0,0736	0,0555	0,0392
6514	0,0554	0,0448	0,0342	0,0247
6515	0,0668	0,0589	0,0506	0,0457
6516	0,0714	0,0575	0,0434	0,0309
6517	0,0307	0,0269	0,0231	0,0202
6518	0,0950	0,0725	0,0494	0,0267
6519	0,0704	0,0564	0,0422	0,0293
6520	0,0570	0,0526	0,0481	0,0441
6521	0,0514	0,0451	0,0386	0,0332
6522	0,0277	0,0218	0,0159	0,0104
6523	0,0076	0,0073	0,0071	0,0071
6524	0,0156	0,0142	0,0127	0,0116
6525	0,0389	0,0323	0,0256	0,0201
6526	0,0547	0,0496	0,0447	0,0417
6527	0,0415	0,0327	0,0238	0,0160
6528	0,0237	0,0224	0,0211	0,0200
6529	0,0400	0,0327	0,0252	0,0185
6530	0,1001	0,0767	0,0529	0,0300
6531	0,2794	0,2074	0,1340	0,0651
6532	0,2251	0,1705	0,1147	0,0611
6533	0,3087	0,2249	0,1395	0,0567
6534	0,0946	0,0769	0,0589	0,0428
6535	0,0353	0,0328	0,0305	0,0301
6536	0,0785	0,0634	0,0480	0,0338
6537	0,0088	0,0069	0,0050	0,0032
6538	0,0045	0,0044	0,0043	0,0043
6539	0,0587	0,0499	0,0412	0,0358
6540	0,1870	0,1398	0,0916	0,0461
6541	0,0777	0,0680	0,0581	0,0492
6542	0,1890	0,1450	0,1003	0,0582
6543	0,0827	0,0665	0,0501	0,0346
6544	0,1478	0,1178	0,0873	0,0582
6545	0,1520	0,1176	0,0826	0,0497

Tabela 40 - Valores do fator CP para cada período do cenário Futuro 1.(Cont.)

Célula	CP 2018-2026	CP 2026-2034	CP 2034-2042	CP 2042-2050
6546	0,1159	0,0879	0,0596	0,0334
6547	0,1143	0,0901	0,0655	0,0428
6548	0,1039	0,0807	0,0572	0,0361
6549	0,0960	0,0732	0,0500	0,0284
6550	0,1326	0,1017	0,0704	0,0421
6551	0,1597	0,1223	0,0841	0,0478
6552	0,0531	0,0448	0,0365	0,0296
6553	0,0495	0,0395	0,0294	0,0207
6554	0,0631	0,0520	0,0409	0,0313
6555	0,1028	0,0835	0,0639	0,0463
6556	0,1202	0,0967	0,0731	0,0527
6557	0,1150	0,0940	0,0732	0,0568
6558	0,1076	0,0832	0,0587	0,0374
6559	0,0519	0,0432	0,0346	0,0277
6560	0,0664	0,0546	0,0426	0,0323
6561	0,0043	0,0041	0,0038	0,0038
6562	0,0209	0,0179	0,0148	0,0121
6563	0,0516	0,0447	0,0380	0,0342
6564	0,1018	0,0824	0,0632	0,0493
6565	0,1062	0,0921	0,0781	0,0670
6566	0,0406	0,0359	0,0312	0,0274
6567	0,1354	0,1143	0,0934	0,0767
6568	0,0331	0,0267	0,0202	0,0143
6569	0,0054	0,0053	0,0053	0,0053
6570	0,0836	0,0718	0,0598	0,0495
6571	0,0325	0,0288	0,0252	0,0229
6572	0,0764	0,0601	0,0437	0,0290
6573	0,0342	0,0284	0,0227	0,0176
6574	0,1390	0,1135	0,0879	0,0659
6575	0,0140	0,0128	0,0116	0,0110
6576	0,0380	0,0352	0,0324	0,0310
6577	0,1288	0,1058	0,0829	0,0643
6578	0,0717	0,0610	0,0503	0,0411
6579	0,0596	0,0508	0,0418	0,0334
6580	0,0441	0,0375	0,0308	0,0248
6581	0,0030	0,0023	0,0016	0,0009
6582	0,0463	0,0432	0,0400	0,0374
6583	0,1552	0,1182	0,0805	0,0448
6584	0,0703	0,0609	0,0515	0,0433
6585	0,0656	0,0653	0,0651	0,0650
6586	0,0336	0,0321	0,0304	0,0293
6587	0,0021	0,0022	0,0023	0,0024
6588	0,1876	0,1421	0,0939	0,0495
6589	0,0988	0,0777	0,0545	0,0341
6590	0,1215	0,0981	0,0741	0,0571
6591	0,1724	0,1336	0,0927	0,0573
6601	0,0856	0,0627	0,0394	0,0172
6602	0,0694	0,0587	0,0469	0,0373
6603	0,0339	0,0315	0,0284	0,0264
6604	0,0512	0,0443	0,0375	0,0315

Tabela 40 - Valores do fator CP para cada período do cenário Futuro 1. (Cont.)

Célula	CP 2018-2026	CP 2026-2034	CP 2034-2042	CP 2042-2050
6605	0,0398	0,0342	0,0289	0,0266
6606	0,0630	0,0541	0,0455	0,0413
6607	0,0737	0,0684	0,0629	0,0610
6608	0,0189	0,0261	0,0304	0,0368
6609	0,0615	0,0578	0,0520	0,0508
6610	0,0117	0,0192	0,0242	0,0308
6611	0,0569	0,0450	0,0329	0,0217
6612	0,0314	0,0276	0,0241	0,0231
6613	0,0832	0,0714	0,0601	0,0559
6614	0,0675	0,0578	0,0487	0,0453
6615	0,0720	0,0633	0,0536	0,0483
6616	0,0775	0,0658	0,0536	0,0467
6617	0,0476	0,0406	0,0330	0,0261
6618	0,0326	0,0310	0,0293	0,0280
6619	0,0931	0,0821	0,0710	0,0613
6620	0,0535	0,0446	0,0354	0,0272
6621	0,0207	0,0181	0,0155	0,0131
6622	0,0649	0,0539	0,0428	0,0338
6623	0,0641	0,0538	0,0434	0,0349
6624	0,0036	0,0030	0,0024	0,0018
6625	0,0024	0,0024	0,0023	0,0023
6626	0,0221	0,0176	0,0131	0,0091
6627	0,0078	0,0067	0,0055	0,0044
6628	0,1276	0,1009	0,0727	0,0489
6629	0,1267	0,1003	0,0723	0,0480
6630	0,0868	0,0736	0,0604	0,0535
6631	0,0828	0,0736	0,0624	0,0568
6632	0,0821	0,0717	0,0618	0,0600
6633	0,0589	0,0554	0,0502	0,0501
6634	0,0699	0,0618	0,0514	0,0447
6635	0,1109	0,0908	0,0704	0,0574
6636	0,0883	0,0790	0,0654	0,0553
6637	0,0700	0,0652	0,0580	0,0556
6638	0,0961	0,0816	0,0676	0,0619
6639	0,0971	0,0822	0,0675	0,0608
6640	0,0903	0,0775	0,0658	0,0630
6641	0,1227	0,0997	0,0770	0,0625
6642	0,0879	0,0760	0,0650	0,0630
6643	0,0858	0,0744	0,0638	0,0618
6644	0,0798	0,0702	0,0610	0,0596
6645	0,0901	0,0774	0,0656	0,0628
6646	0,0879	0,0759	0,0650	0,0630
6647	0,0913	0,0784	0,0662	0,0627
6648	0,0863	0,0749	0,0641	0,0619
6649	0,0849	0,0740	0,0635	0,0613
6650	0,0939	0,0800	0,0670	0,0630
6651	0,0888	0,0765	0,0652	0,0627
6652	0,0943	0,0804	0,0672	0,0629
6653	0,0944	0,0809	0,0664	0,0587
6654	0,1032	0,0872	0,0685	0,0546

Tabela 40 - Valores do fator CP para cada período do cenário Futuro 1. (Cont.)

Célula	CP 2018-2026	CP 2026-2034	CP 2034-2042	CP 2042-2050
6655	0,1015	0,0854	0,0694	0,0611
6656	0,0421	0,0373	0,0329	0,0321
6657	0,0773	0,0687	0,0599	0,0584
6658	0,0939	0,0803	0,0672	0,0627
6659	0,0891	0,0769	0,0653	0,0623
6660	0,1345	0,1086	0,0811	0,0600
6661	0,0857	0,0742	0,0613	0,0539
6662	0,0854	0,0733	0,0620	0,0580
6663	0,0685	0,0577	0,0474	0,0426
6664	0,0915	0,0769	0,0628	0,0562
6665	0,0872	0,0751	0,0637	0,0605
6666	0,1165	0,0957	0,0747	0,0615
6667	0,1043	0,0872	0,0705	0,0623
6668	0,0841	0,0731	0,0608	0,0544
6669	0,0969	0,0825	0,0682	0,0621
6670	0,1016	0,0888	0,0715	0,0578
6671	0,0900	0,0775	0,0627	0,0529
6672	0,1002	0,0833	0,0658	0,0546
6673	0,0854	0,0730	0,0583	0,0479
6674	0,0209	0,0269	0,0301	0,0351
6675	0,0558	0,0528	0,0467	0,0436
6676	0,0951	0,0799	0,0649	0,0571
6677	0,0398	0,0327	0,0254	0,0194
6678	0,0692	0,0560	0,0427	0,0310
6679	0,0763	0,0655	0,0545	0,0489
6680	0,0612	0,0576	0,0521	0,0511
6681	0,1396	0,1098	0,0787	0,0517
6682	0,0211	0,0215	0,0207	0,0217
6683	0,1854	0,1429	0,0996	0,0591
6701	0,0564	0,0466	0,0350	0,0251
6702	0,0809	0,0660	0,0499	0,0376
6703	0,2525	0,1863	0,1178	0,0543
6704	0,1940	0,1456	0,0962	0,0516
6705	0,1213	0,0950	0,0687	0,0475
6706	0,1404	0,1109	0,0798	0,0535
6707	0,0407	0,0437	0,0433	0,0461
6708	0,0540	0,0480	0,0407	0,0366
6709	0,0517	0,0428	0,0342	0,0288
6710	0,1674	0,1299	0,0915	0,0601
6711	0,1507	0,1158	0,0801	0,0499
6712	0,1051	0,0869	0,0684	0,0568
6713	0,0959	0,0807	0,0651	0,0560
6714	0,0920	0,0780	0,0647	0,0594
6715	0,0846	0,0710	0,0579	0,0509
6716	0,0795	0,0670	0,0550	0,0494
6717	0,0997	0,0837	0,0682	0,0609
6718	0,0887	0,0735	0,0588	0,0502
6719	0,1472	0,1159	0,0846	0,0610
6720	0,1036	0,0871	0,0707	0,0625
6721	0,0858	0,0749	0,0644	0,0624

Tabela 40 - Valores do fator CP para cada período do cenário Futuro 1. (Cont.)

Célula	CP 2018-2026	CP 2026-2034	CP 2034-2042	CP 2042-2050
6722	0,0918	0,0791	0,0642	0,0543
6723	0,1246	0,1019	0,0782	0,0617
6724	0,0889	0,0767	0,0635	0,0567
6725	0,0972	0,0825	0,0676	0,0605
6726	0,1765	0,1344	0,0913	0,0529
6727	0,1726	0,1281	0,0830	0,0418
6728	0,0946	0,0791	0,0642	0,0562
6729	0,0965	0,0799	0,0637	0,0527
6730	0,1372	0,1097	0,0812	0,0595
6731	0,1028	0,0859	0,0684	0,0579
6732	0,0834	0,0691	0,0536	0,0424
6733	0,0946	0,0773	0,0587	0,0417
6734	0,0629	0,0533	0,0423	0,0331
6735	0,0293	0,0274	0,0237	0,0213
6736	0,0248	0,0217	0,0176	0,0143
6737	0,0522	0,0453	0,0370	0,0316
6738	0,0482	0,0403	0,0313	0,0244
6739	0,1350	0,1080	0,0802	0,0595
6740	0,1644	0,1275	0,0900	0,0596
6741	0,1017	0,0854	0,0691	0,0607
6742	0,1236	0,0992	0,0740	0,0553
6743	0,3005	0,2205	0,1383	0,0623

O cenário Futuro 2, que representa os usos previstos no Plano Municipal de Contagem, destina uma grande área da bacia para urbanização (Contagem, 2017), o que pode aumentar significativamente o volume de sedimentos gerados na bacia do reservatório de Vargem das Flores, especialmente nos momentos iniciais da expansão e enquanto durar este processo. De acordo com os usos do solo mapeados na situação atual da bacia do reservatório de Vargem das Flores e os usos previstos no Plano Municipal de Contagem, o critério utilizado para estimar as áreas de uso futuro estão apresentados na Tabela 41.

Para avaliar o impacto da urbanização e melhor representar o processo de ocupação, considerou-se que as áreas previstas para expansão da urbanização seriam ocupadas de forma gradual. Como horizonte temporal do Plano, foi adotado o que é contemplado no Estatuto da Cidade no art. 40 §3º (BRASIL, 2001), que prevê que Planos Diretores devem ser revisados a cada 10 (dez) anos. Portanto, foram considerados dois períodos de 5 anos cada, a fim de representar a urbanização gradual da bacia durante esse período de 10 anos tomado como referência para a expansão urbana. Note-se que este horizonte foi adotado como referência, por não se ter encontrado registro de qual seria o horizonte total do plano de Contagem. Nos primeiros 5 anos foi prevista a urbanização de 50% da área destinada para crescimento urbano no Plano Municipal de Contagem e a mesma relação de consolidação do cenário Futuro 1 – Macrozoneamento da RMBH. Nos 5 anos seguintes, é considerado que 100% da área prevista para crescimento urbano estaria urbanizada, com 50% da área do período anterior consolidada, conforme apresentado na Tabela 42.

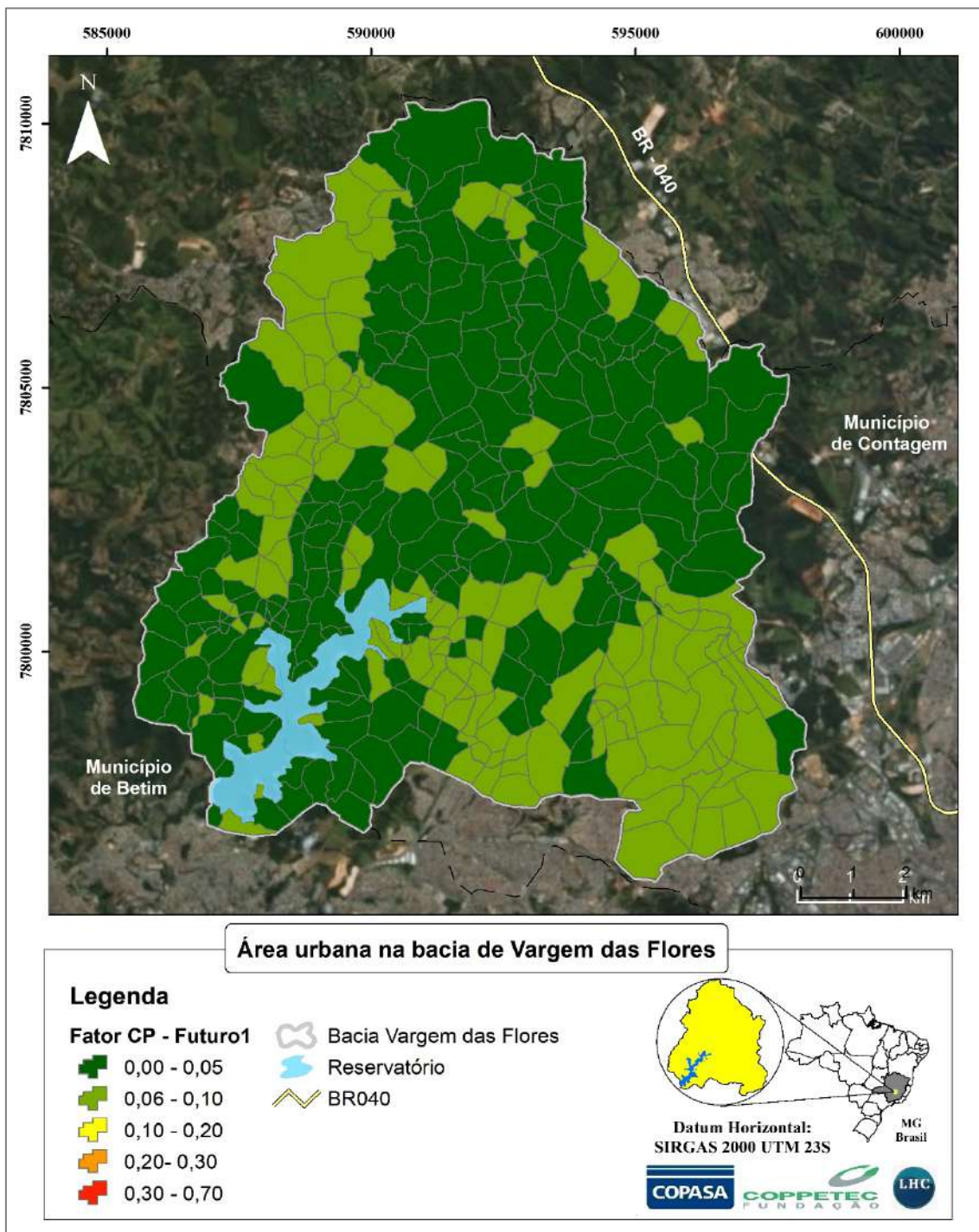


Figura 66 - Fator CP para cada célula no cenário Futuro 1 – Macrozoneamento da RMBH.

Tabela 41 - Critério para evolução das áreas de uso do solo, de acordo com as zonas, para o Cenário Futuro 2.

Uso do solo	ZEU-3, Urbano, ZUI-2	ZEIT	ZOR-1	ZOR-3	ZAD-1, ZAD-2
Corpos hídricos (CH)	100%CH	100%CH	100%CH	100%CH	100%CH
Mancha urbana (MU)	100%MU+ 100%SE+ 100%AR+ 100%UA+ 100%VD+ 100%VE	100%MU+ 100%AR	100%MU+ 100%SE+ 100%AR	100%MU+ 50%SE+ 100%AR	100%MU+ 100%SE+ 100%AR+ 100%VD+ 100%VE
Solo exposto (SE)	0	0	0	0	0
Afloramento rochoso (AR)	0	0	0	0	0
Uso agropastoril (UA)	0	100%UA	100%UA	100%UA	100%UA
Vegetação densa (VD)	0	100%VD+ 100%SE+ 100%VE	100%VD	100%VD+ 50%SE	0
Vegetação esparsa (VE)	0	0	100%VE	100%VE	0

Tabela 42 - Processo de urbanização do cenário Futuro 2, com áreas urbanizadas consolidadas e não consolidadas ao longo do horizonte temporal do Plano Municipal de Contagem.

Período	Atual	2018-2023	2023-2028
Mancha Urbana (área em m ²)	38.544.908,56	67.925.312,28	97.305.716,00
Crescimento por período (área em m ²)		29.380.403,72	29.380.403,72
% Área urbana não consolidada	28%	57,3%	58,8%
% Área urbana consolidada	72%	42,7%	41,2%

Seguindo a metodologia aplicada ao cenário Futuro 1 – Macrozoneamento da RMBH e à situação atual, foram feitas ponderações para a composição do fator CP da Mancha Urbana para o cenário Futuro 2 – Plano Municipal de Contagem. Foi calculado um coeficiente CP para cada período de 5 anos, conforme mostra a Tabela 43. Para os demais usos do solo, foram adotados os mesmos coeficientes do cenário atual (Tabela 34).

Tabela 43 - Adaptação do coeficiente CP para Mancha urbana de Stein *et al.* (1987), considerando o cenário Futuro 2 – Plano Municipal de Contagem e a urbanização gradual.

Período	Uso	CP adaptado de Stein	Composição do coeficiente
2018-2023	Mancha Urbana Futuro	0,192	0 43% referente à parcela consolidada, áreas impermeabilizadas onde a produção de sedimentos pode ser desprezada
			0,1 42% referente à parcela não consolidada e semelhante ao que Stein indica para vegetação de porte baixo a rasteiro, cobertura parcial do terreno - cobertura residual (grupo 5)
			1 15% referente à solo exposto = 27% (lotes e vias não pavimentadas) de 257,3% (área não consolidada)
2023-2028	Mancha Urbana Futuro	0,203	0 41% referente à parcela consolidada, áreas impermeabilizadas onde a produção de sedimentos pode ser desprezada
			0,1 43% referente à parcela não consolidada e semelhante ao que Stein indica para vegetação de porte baixo a rasteiro, cobertura parcial do terreno - cobertura residual (grupo 5)
			1 16% referente à solo exposto = 27% (lotes e vias não pavimentadas) de 60% (área não consolidada)

Os valores de CP obtidos para cada célula nos dois períodos considerados no cenário Futuro 2 – Plano Municipal de Contagem estão apresentados na Tabela 44. O mapa da Figura 67 apresenta o fator CP para cada célula no cenário Futuro 2.

Tabela 44 -Valores do fator CP para cada período do cenário Futuro 2.

Célula	CP		Célula	CP		Célula	CP	
	2018-2023	2023-2028		2018-2023	2023-2028		2018-2023	2023-2028
6001	0,1505	0,1946	6356	0,1465	0,2030	6603	0,1166	0,2020
6002	0,1628	0,2028	6357	0,1631	0,2030	6604	0,1295	0,2030
6003	0,1418	0,1881	6358	0,1743	0,1953	6605	0,1277	0,1897
6004	0,1777	0,1847	6359	0,1476	0,1565	6606	0,1526	0,2009
6005	0,1505	0,1918	6360	0,1920	0,2030	6607	0,1502	0,2002
6006	0,1147	0,2030	6361	0,1920	0,2030	6608	0,1012	0,2030
6007	0,1584	0,1801	6362	0,1921	0,1894	6609	0,1285	0,1733
6008	0,1703	0,1973	6363	0,1663	0,1881	6610	0,0015	0,0015
6009	0,1818	0,2016	6364	0,1108	0,1723	6611	0,1170	0,1020
6010	0,1668	0,1883	6365	0,1225	0,2023	6612	0,0685	0,0722
6011	0,0244	0,0256	6366	0,1303	0,2030	6613	0,1704	0,1726
6012	0,0831	0,0748	6367	0,1442	0,2030	6614	0,1499	0,1596
6013	0,0717	0,0673	6368	0,1044	0,1885	6615	0,1398	0,1614
6014	0,0643	0,0453	6369	0,1267	0,2030	6616	0,1447	0,1579
6015	0,0375	0,0406	6370	0,0999	0,1601	6617	0,1244	0,2030
6016	0,0409	0,0427	6371	0,1211	0,2030	6618	0,1146	0,2030
6017	0,0467	0,0435	6372	0,0769	0,1576	6619	0,1542	0,2030
6018	0,1603	0,1034	6373	0,0998	0,1475	6620	0,1324	0,2030
6019	0,1260	0,0519	6374	0,1360	0,2030	6621	0,1089	0,2030
6020	0,1772	0,1091	6375	0,0124	0,0244	6622	0,1428	0,1947
6021	0,0899	0,0762	6376	0,0274	0,0369	6623	0,1451	0,1958
6022	0,2477	0,1350	6377	0,0690	0,0727	6624	0,0998	0,2024
6023	0,1538	0,1187	6401	0,0274	0,0238	6625	0,0982	0,2030
6024	0,1363	0,1200	6402	0,0122	0,0122	6626	0,1223	0,2030
6025	0,1598	0,1463	6403	0,0284	0,0294	6627	0,1016	0,1962
6026	0,0500	0,0396	6404	0,0448	0,0548	6628	0,2028	0,1983
6027	0,0366	0,0304	6405	0,0878	0,1787	6629	0,2012	0,1962
6028	0,0624	0,0483	6406	0,0163	0,0166	6630	0,1650	0,1596
6029	0,0810	0,0639	6407	0,1598	0,1422	6631	0,1598	0,2009
6030	0,1583	0,1489	6408	0,1538	0,1628	6632	0,1819	0,2030
6031	0,0505	0,0399	6409	0,1114	0,1077	6633	0,1341	0,1799
6032	0,0218	0,0210	6501	0,1557	0,1120	6634	0,1413	0,1972
6033	0,0212	0,0192	6502	0,0838	0,0679	6635	0,1861	0,1834
6034	0,0586	0,0500	6503	0,0682	0,0781	6636	0,1403	0,1923
6035	0,0535	0,0324	6504	0,0679	0,0875	6637	0,1407	0,1884
6036	0,1434	0,2023	6505	0,1685	0,2030	6638	0,1892	0,1961
6037	0,1740	0,2016	6506	0,1187	0,1209	6639	0,1876	0,1965
6038	0,1753	0,2030	6507	0,1829	0,2030	6640	0,1933	0,2030
6039	0,0961	0,2030	6508	0,1465	0,1703	6641	0,2052	0,1956
6101	0,1624	0,2030	6509	0,1504	0,1799	6642	0,1915	0,2026
6102	0,2313	0,2030	6510	0,1259	0,2030	6643	0,1863	0,1991
6103	0,1730	0,2030	6511	0,1360	0,2030	6644	0,1753	0,1954
6104	0,1182	0,2030	6512	0,1198	0,2030	6645	0,1926	0,2025
6105	0,1199	0,1816	6513	0,1579	0,2030	6646	0,1919	0,2030
6106	0,1354	0,1382	6514	0,1341	0,2030	6647	0,1883	0,1963
6107	0,0792	0,0861	6515	0,1427	0,1911	6648	0,1858	0,1984
6108	0,1139	0,2002	6516	0,1460	0,2030	6649	0,1812	0,1955
6109	0,2134	0,2030	6517	0,1175	0,2030	6650	0,1955	0,2030

Tabela 44 -Valores do fator CP para cada período do cenário Futuro 2. (Cont.)

Célula	CP	CP	Célula	CP	CP	Célula	CP	CP
	2018-2023	2023-2028		2018-2023	2023-2028		2018-2023	2023-2028
6201	0,2094	0,2030	6518	0,1545	0,2030	6651	0,1916	0,2021
6202	0,1345	0,2030	6519	0,1435	0,2030	6652	0,1933	0,2007
6203	0,1488	0,2030	6520	0,1287	0,2030	6653	0,1760	0,1975
6204	0,1606	0,1980	6521	0,1293	0,2030	6654	0,1579	0,1811
6205	0,1343	0,2030	6522	0,1142	0,2030	6655	0,1860	0,1843
6206	0,2085	0,2030	6523	0,1010	0,2030	6656	0,0908	0,0952
6207	0,0420	0,0514	6524	0,1056	0,2030	6657	0,1678	0,1930
6208	0,0366	0,0369	6525	0,1237	0,2030	6658	0,1904	0,1999
6209	0,0782	0,1209	6526	0,1359	0,2030	6659	0,1879	0,2004
6210	0,1149	0,2030	6527	0,1257	0,2030	6660	0,1965	0,1945
6211	0,1166	0,2030	6528	0,1094	0,2030	6661	0,1316	0,1269
6212	0,1306	0,2030	6529	0,1226	0,2030	6662	0,1870	0,1960
6213	0,1033	0,2030	6530	0,1604	0,2030	6663	0,1667	0,1898
6214	0,1007	0,2004	6531	0,2877	0,2030	6664	0,1772	0,1808
6215	0,1183	0,2030	6532	0,2415	0,2030	6665	0,1795	0,1876
6216	0,1827	0,2030	6533	0,2982	0,2030	6666	0,1894	0,1795
6217	0,1205	0,2030	6534	0,1601	0,2030	6667	0,1932	0,1922
6218	0,2895	0,2030	6535	0,1247	0,2030	6668	0,1430	0,1531
6219	0,1163	0,2030	6536	0,1478	0,2030	6669	0,1818	0,1844
6220	0,1160	0,2030	6537	0,1018	0,2030	6670	0,1444	0,1828
6221	0,1122	0,2030	6538	0,0989	0,2030	6671	0,1478	0,1720
6301	0,1643	0,2024	6539	0,1457	0,2030	6672	0,1528	0,1411
6302	0,0960	0,2030	6540	0,2222	0,2030	6673	0,1535	0,1967
6303	0,0856	0,1777	6541	0,1437	0,2030	6674	0,0971	0,1931
6304	0,0831	0,1757	6542	0,2221	0,2030	6675	0,1212	0,1887
6305	0,1407	0,2000	6543	0,1489	0,2030	6676	0,1835	0,1860
6306	0,1420	0,2030	6544	0,1895	0,2029	6677	0,1368	0,1943
6307	0,1681	0,2030	6545	0,1967	0,2026	6678	0,1775	0,2030
6308	0,1298	0,2030	6546	0,1763	0,2030	6679	0,1701	0,2030
6309	0,1207	0,2030	6547	0,1725	0,2030	6680	0,1298	0,1723
6310	0,1074	0,2030	6548	0,1696	0,2030	6681	0,1912	0,1946
6311	0,1197	0,2030	6549	0,1614	0,2030	6682	0,1042	0,1866
6312	0,1628	0,1757	6550	0,1902	0,2030	6683	0,1931	0,1450
6313	0,1694	0,1688	6551	0,2005	0,2030	6701	0,0439	0,0191
6314	0,1067	0,1872	6552	0,1328	0,2030	6702	0,1017	0,0839
6315	0,1784	0,1796	6553	0,1320	0,2030	6703	0,2434	0,1463
6316	0,1657	0,1719	6554	0,1399	0,2030	6704	0,2156	0,1586
6317	0,1648	0,1685	6555	0,1585	0,1884	6705	0,1900	0,1949
6318	0,1897	0,1957	6556	0,1823	0,2030	6706	0,1934	0,1949
6319	0,1909	0,2022	6557	0,1847	0,2028	6707	0,1100	0,1874
6320	0,1901	0,2010	6558	0,1766	0,2030	6708	0,1406	0,2030
6321	0,1962	0,2030	6559	0,1344	0,2021	6709	0,1530	0,1985
6322	0,1305	0,1162	6560	0,1421	0,2030	6710	0,2045	0,1532
6323	0,1688	0,1712	6561	0,0993	0,2030	6711	0,1723	0,1194
6324	0,2155	0,1815	6562	0,1095	0,2030	6712	0,1677	0,1569
6325	0,1787	0,1778	6563	0,1399	0,2030	6713	0,1850	0,1995
6326	0,1513	0,1595	6564	0,1810	0,2007	6714	0,1984	0,2030
6327	0,1602	0,1833	6565	0,1679	0,1987	6715	0,1872	0,1940

Tabela 44 -Valores do fator CP para cada período do cenário Futuro 2. (Cont.)

Célula	CP		Célula	CP		Célula	CP	
	2018-2023	2023-2028		2018-2023	2023-2028		2018-2023	2023-2028
6328	0,1761	0,1795	6566	0,1228	0,2030	6716	0,1681	0,1684
6329	0,1904	0,1962	6567	0,1943	0,2030	6717	0,1960	0,1976
6330	0,1992	0,2013	6568	0,1178	0,2030	6718	0,1970	0,2030
6331	0,1859	0,1942	6569	0,0989	0,2030	6719	0,2340	0,2020
6332	0,1650	0,1651	6570	0,1508	0,2030	6720	0,1888	0,1900
6333	0,1649	0,1678	6571	0,1206	0,2030	6721	0,1801	0,1898
6334	0,1260	0,1892	6572	0,1497	0,2030	6722	0,1226	0,1136
6335	0,1712	0,2030	6573	0,1196	0,2030	6723	0,1833	0,1679
6336	0,1445	0,2030	6574	0,1945	0,2030	6724	0,1447	0,1419
6337	0,1464	0,2030	6575	0,1066	0,2030	6725	0,1783	0,1829
6338	0,1796	0,2029	6576	0,1229	0,2030	6726	0,2607	0,2030
6339	0,1745	0,2030	6577	0,1926	0,2030	6727	0,3062	0,1934
6340	0,1199	0,2027	6578	0,1442	0,2030	6728	0,2008	0,1984
6341	0,1023	0,2030	6579	0,1319	0,2030	6729	0,2021	0,1997
6342	0,0959	0,1646	6580	0,1243	0,2030	6730	0,1863	0,1565
6343	0,1105	0,1403	6581	0,0979	0,2030	6731	0,1659	0,1584
6344	0,1501	0,1480	6582	0,1230	0,2030	6732	0,1288	0,1302
6345	0,1499	0,1584	6583	0,1995	0,2030	6733	0,1552	0,1459
6346	0,1807	0,1791	6584	0,1413	0,2030	6734	0,0939	0,0935
6347	0,1871	0,1881	6585	0,1300	0,2030	6735	0,0267	0,0235
6348	0,1548	0,1847	6586	0,1156	0,2030	6736	0,0274	0,0239
6349	0,1352	0,1823	6587	0,0933	0,1950	6737	0,0683	0,0631
6350	0,1593	0,1969	6588	0,1748	0,1050	6738	0,0537	0,0414
6351	0,1143	0,2030	6589	0,1095	0,0933	6739	0,1930	0,1719
6352	0,0971	0,2030	6590	0,1754	0,1524	6740	0,2159	0,1785
6353	0,1749	0,2030	6591	0,1810	0,1200	6741	0,1832	0,1836
6354	0,1766	0,2030	6601	0,1539	0,2030	6742	0,1765	0,1581
6355	0,1200	0,2030	6602	0,1427	0,2030	6743	0,2740	0,1316

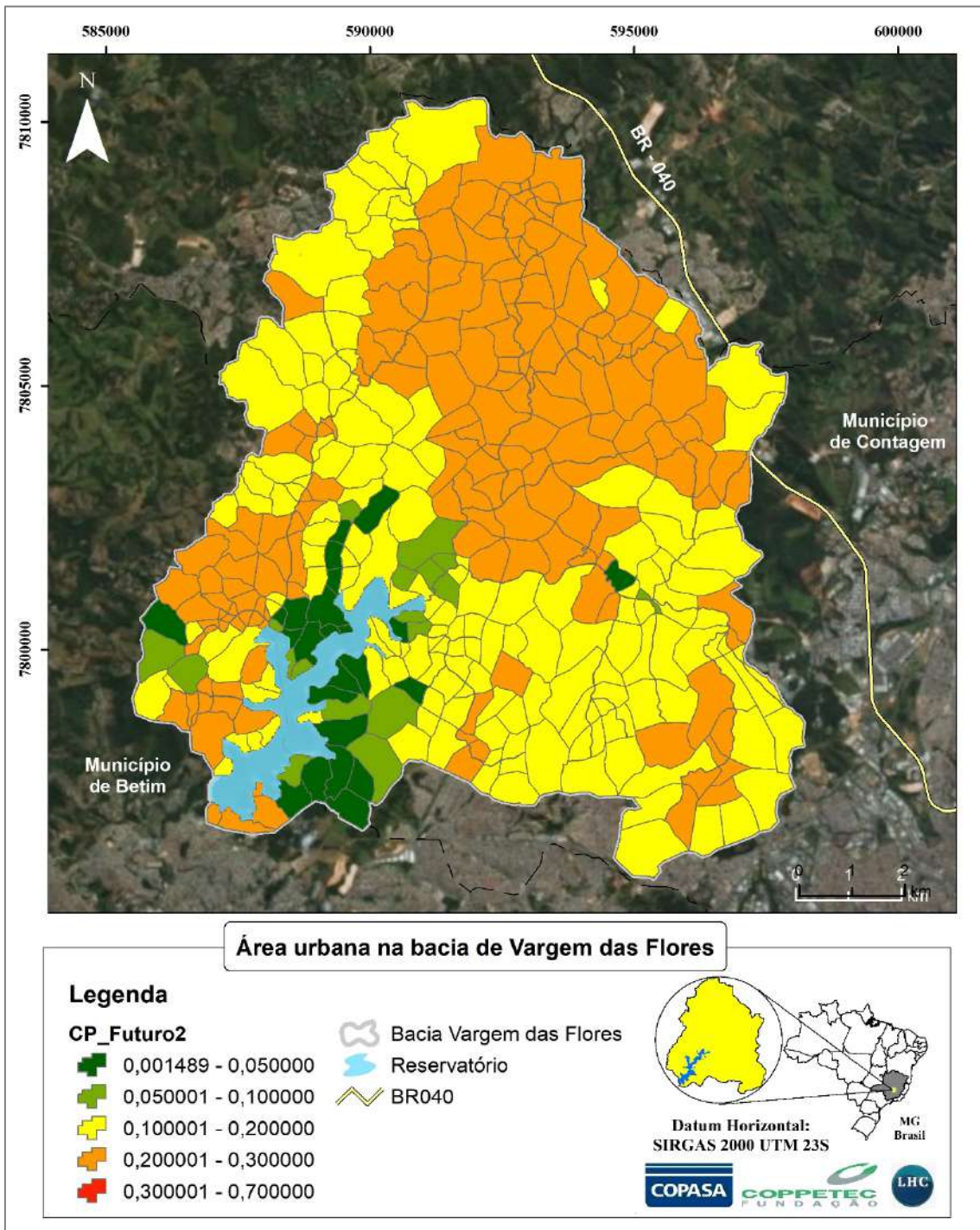


Figura 67 - Fator CP para cada célula no cenário Futuro 2 – Plano Municipal de Contagem.

3.1.5 Resultados da estimativa do aporte de sedimentos com o uso da RUSLE por cenário

Após a determinação de todos os fatores necessários para o cálculo da RUSLE, foi obtido o potencial de perda de solo por erosão laminar de acordo com as características da bacia e as particularidades de cada cenário. A Tabela 45 apresenta os valores de potencial de produção de sedimentos na bacia de acordo com a equação RUSLE.

Tabela 45 - Valores de RUSLE calculados para cada cenário na bacia do reservatório de Vargem das Flores.

Cenário	Período	RUSLE (tf/ano)
Passado	1972 - 1984	1.075.054,92
	1984 - 2000	-
	2000 - 2009	-
Atual	2009 - 2018	957.990,69
Futuro 1 – Macrozoneamento da RMBH	2018 - 2026	800.967,00
	2026 - 2034	665.775,94
	2034 - 2042	525.769,47
	2042 - 2050	424.096,64
Futuro 2 - Plano Municipal de Contagem	2018 - 2023	1.459.570,40
	2023 - 2028	1.716.996,22

A Tabela 46 apresenta as áreas referentes aos usos do solo na bacia do reservatório de Vargem das Flores, para cada cenário modelado. É notável o aumento na expansão urbana no cenário Futuro 2 – Plano Municipal de Contagem, que cresce 252% em relação ao cenário atual. Observa-se, na Tabela 45, que, no passado, o potencial de produção de sedimentos era maior que no período atual. Ao avaliar comparativamente as áreas por uso no cenário atual e passado, foi possível perceber que no passado havia maior área com solo exposto e maior área de usos agropastoris, como mostra a Tabela 46, usos esses que apresentam alto potencial na produção de sedimentos. Dentre as atividades que mais perturbam o meio ambiente estão as agropecuárias, pois expõe o solo à ação dos processos erosivos e aceleram a transferência de sedimentos aos corpos d'água (Miguel *et al.*, 2014 e Moraes, 2007). Apesar do maior potencial de produção de sedimentos no passado, nem todo o sedimento gerado na bacia efetivamente alcança o reservatório e se sedimenta (KIRKBY, 1990 e PAIVA, 2003). Portanto, foram avaliados estudos pregressos a fim de estimar a taxa de conversão entre o que é gerado na bacia e o que chega ao reservatório.

Tabela 46 – Áreas referentes aos usos do solo na bacia do reservatório de Vargem das Flores, para cada cenário. Áreas em m².

Período	Usos do solo									
	Afloramento Rochoso	Corpos Hídricos	Mancha Urbana	Solo Exposto	Usos Agropastoris	Vegetação Densa	Vegetação Esparsa			
Passado										
1987	598.508,74	463.895,81	9.853.661,26	6.008.679,61	45.522.988,54	37.504.855,30	15.042.861,63			
Atual										
2018	1.083.128,82	701.370,47	38.544.908,56	5.147.589,64	18.064.691,84	34.455.837,67	16.994.451,72			
2018-2026	893.312,39	701.370,47	43.233.280,59	3.657.875,89	15.751.829,17	47.582.339,00	3.171.971,22			
2026-2034	703.495,95	701.370,47	47.921.652,61	2.438.583,92	14.138.110,23	46.974.118,05	2.114.647,48			
Futuro 1										
2034-2042	513.679,52	701.370,47	52.610.024,64	1.219.291,96	12.524.391,28	46.365.897,10	1.057.323,74			
2042-2050	323.863,09	701.370,47	57.298.396,67	-	10.910.672,34	45.757.676,15	-			
Futuro 2										
2018-2023	541.564,41	701.370,47	67.925.312,28	2.573.794,82	11.503.197,90	22.507.443,66	9.239.295,17			
2023-2028	-	701.370,47	97.305.716,00	-	4.941.703,97	10.559.049,65	1.484.138,62			

3.2 Estudos progressos de assoreamento no reservatório de Vargem das Flores

Estudos anteriores levantaram informações do reservatório e analisaram o seu assoreamento, se tornando importantes fontes de dados para avaliar a situação atual do reservatório e estimar sua vida útil.

O estudo denominado *Levantamento Batimétrico do reservatório da Lagoa Várzea das Flores*, realizado pela HDC – Engenharia S/C Ltda. foi disponibilizado pela COPASA e faz uma análise da produção de sedimentos na bacia hidrográfica do reservatório de Vargem das Flores.

Esse estudo, a partir da batimetria do reservatório, apresentou o volume de sedimentos depositados até abril de 2000, além de apresentar cotas e volumes do reservatório no início de sua operação obtidos de outro estudo, denominado *Assoreamento Diagnóstico*, realizado pela Leme Engenharia em novembro de 1984.

Segundo dados apresentados no estudo de 1984, que contou com levantamentos batimétricos e medições de descargas líquidas e sólidas, em 12 anos de vida do reservatório, entre 1972 e 1984, chegou-se à conclusão de que cerca de 570.000 m³ (cerca de 1.510.500 tf) de sedimentos foram transportados e, deste volume, cerca de 370.000 m³ foram sedimentados no reservatório, com uma taxa média anual de sedimentos retidos de 30.833 m³/ano (HDC, 2000). A taxa média anual de sedimentos transportados foi de 125.875 tf/ano, entre 1972 e 1984.

Com base nessa informação de 1984, foi definido o volume de sedimentos produzido na bacia que chega ao reservatório. Foi feita uma comparação com a RUSLE calculada para o mesmo período, de 1.075.054,92tf/ano (Tabela 45), e chegou-se a taxa de 12%, que representa o potencial de produção de sedimentos na bacia e o que efetivamente é transportado ao reservatório.

Na ausência de mais dados medidos, para os períodos seguintes foi avaliada a relação entre as áreas vegetadas em 1984 e nos demais períodos calculados, considerando que nas áreas com vegetação, como florestas, arbustos e plantios, há retenção de sedimentos (Cabral *et al.*, 2013,) reduzindo o volume de sedimentos que efetivamente chega até o reservatório e que poderá ser sedimentado.

Os coeficientes encontrados para cada período, chamados de coeficientes de ajuste da RUSLE, estão apresentados na Tabela 47, e foram utilizados para estimar, nos períodos seguintes, a parcela de sedimentos gerada na bacia que efetivamente chega ao reservatório e sedimenta.

Tabela 47 - Relação entre área vegetada e área total para composição do coeficiente de ajuste da RUSLE.

	Período	Área vegetada (m ²)	Área total (m ²)	Área vegetada/Área total %	Taxa de retenção %	Coeficiente de ajuste da RUSLE
Passado	1972-1984	98.067.744,32	114.991.978,72	85%		
	1984-2000	68.831.501,62	114.991.978,72	60%	0,6177	0,3823
	2000-2009	68.145.393,47	114.991.978,72	59%	0,6115	0,3885
Atual	2009-2018	69.514.981,23	114.991.978,72	60%	0,6238	0,3762
	2018-2026	66.506.139,39	114.991.978,72	58%	0,5968	0,4032
Futuro 1	2026-2034	63.226.875,75	114.991.978,72	55%	0,5674	0,4326
	2034-2042	59.947.612,12	114.991.978,72	52%	0,5379	0,4621
	2042-2050	56.668.348,48	114.991.978,72	49%	0,5085	0,4915
	2018-2023	43.249.936,74	114.991.978,72	38%	0,3881	0,6119
Futuro 2	2023-2028	16.984.892,25	114.991.978,72	15%	0,1524	0,8476

Quanto aos volumes assoreados, cálculos considerando as batimetrias realizadas pela empresa HDC – Engenharia, entre 1984 e 2000, indicaram um volume de 5.237.530 m³ até a soleira do vertedor.

Outro estudo que serviu de fonte de informação foi o realizado por Santos (2012), que apresenta o levantamento batimétrico do reservatório em 2009 e calcula o volume assoreado entre 2000 e 2009.

O gráfico da Figura 68 apresenta a relação cota-volume do reservatório em três períodos: 1974 (volume original), 2000 e 2009. Os dados são provenientes de dois levantamentos batimétricos, um realizado em 2000 (HDC, 2000) e outro realizado em 2009 (Santos, 2012). Observa-se o encurtamento e deslocamento das curvas, demonstrando que o reservatório vem perdendo capacidade de armazenamento com o passar do tempo.

Santos (2012) estimou, com base na batimetria realizada em 2009, uma perda de volume de 4.045.318 m³ referente a 449.479 m³/ano de carga média anual de sedimento retido no reservatório de Vargem das Flores, o que mostra um aumento de 2,5 vezes a taxa de deposição calculada para o período de 1972 a 2000. Com base nessa estimativa, Santos (2012) concluiu que em menos de 60 anos o reservatório perderia completamente o seu espelho d'água, se essa tendência de deposição de sedimentos continuar, conforme mostra a Tabela 48. Seguindo a tendência do período anterior (1972-2000) a vida útil do reservatório seria de mais de 172 anos (Santos, 2012).

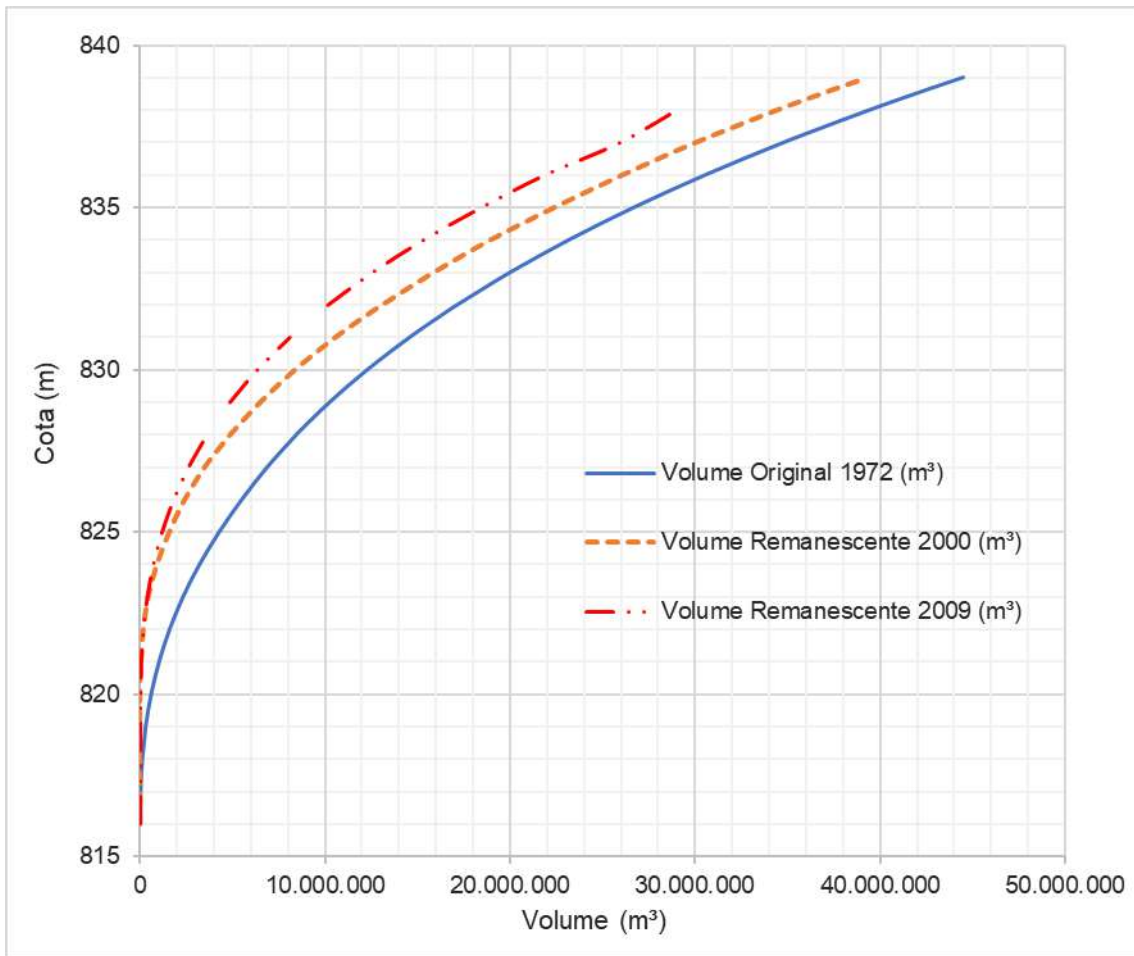


Figura 68 - Relações cota-volume do reservatório de Vargem das Flores de 1974, 2000 e 2009.
Fonte: adaptado de HDC (2000) e Santos (2012).

Tabela 48 - Estimativas de tempo necessário para assoreamento de determinadas cotas do reservatório, com base em nas taxas de deposição de sedimento por ano. Fonte: Santos (2012).

Cota	Tempo (anos)	
	1972-2000 ¹	2000-2009 ²
837	172,7	57,7
828,1	28,9	8,3
831,8	72,2	21,7
825	9,1	2,9

¹considerando a taxa de assoreamento de 173.519 m³/ano.

²considerando a taxa de assoreamento de 449.479 m³/ano.

3.3 Modelagem para estimativa de vida útil do reservatório

Os estudos sedimentológicos que compõem a determinação da vida útil do reservatório e a avaliação do seu assoreamento, foram conduzidos utilizando-se o *software* Sediment, desenvolvido por Anderson Braga Mendes e que é descrito e fornecido no livro Hidrossedimentologia Prática, de Newton de Oliveira Carvalho (2ª Edição – 2008). Em Carvalho (2008) é abordada em maiores detalhes a base teórica dos métodos utilizados pelo programa, sendo indicadas aqui só as etapas de processamento e as informações de entrada.

O *software* utiliza a metodologia de Lara & Pemberton para o cálculo do peso específico aparente e permite a escolha entre as curvas de Brune e de Churchill para a determinação da eficiência de retenção de sedimentos no reservatório (Er). Permite também a escolha entre quatro tipos de operação do reservatório, quais sejam:

- 1 – Sedimento sempre ou quase sempre submerso;
- 2 – Depleção do reservatório de pequena a média;
- 3 – Reservatório com consideráveis variações de nível;
- 4 – Reservatório normalmente vazio

No presente estudo, nos cálculos para a opção de operação do reservatório foi adotado o tipo 2, que representa pequena a média depleção do reservatório. Apesar de ser pequena a influência nos resultados para os três primeiros tipos, devido ao baixo percentual de sedimentos finos, foi escolhida essa opção pois, segundo a contratante, é a situação que melhor representa o reservatório de Vargem das Flores.

Para o cálculo da Eficiência de Retenção (Er), do reservatório, como este é dependente do volume sólido depositado, o valor é computado ano a ano, a partir de um volume inicial. Para o presente trabalho, foi escolhido o método de Brune, indicado para reservatórios de médio ou grande porte considerando sua curva envoltória média. Esse método foi escolhido pois o reservatório de Vargem das Flores é um reservatório de médio porte (Carvalho, 2000).

São introduzidos para cada cenário os seguintes dados:

- - Volume do reservatório no NA máximo normal, para a data considerada (hm^3);
- - Volume assoreado inicial, ou seja, para $t=0$ anos (hm^3);
- - Descarga líquida média anual afluyente (m^3/s);
- - Descarga sólida média anual afluyente (t/ano);
- - Taxa média de aumento de transporte sólido ($\%/ \text{ano}$).
- - Granulometria do sedimento afluyente: percentuais de Argila, Silte e Areia.

A Figura 69 apresenta a tela de entrada de informações do programa Sediment, com os dados da modelagem do cenário passado.

*** SEDIMENT - Cálculo do Assoreamento de Reservatórios ***

Estudo: **Reservatório Vargem das Flores - CO** Registro: **7**

GRANULOMETRIA DO SEDIMENTO AFLUENTE
 Argila (%): **11** Silte (%): **11** Areia (%): **78**

CARACTERÍSTICAS GERAIS
 Tipo de operação do reservatório: **1**
 Volume do reservatório no N.A. máximo normal (hm³): **42,65**
 Volume assoreado para t= 0 anos (hm³): **0**
 Descarga líquida média anual afluente (m³/s): **0,63**
 Descarga sólida média anual afluente (t/ano): **125875**
 Taxa de aumento do transporte sólido (%/ano): **5,00**

OPÇÕES DE CÁLCULO
 Utilizar a curva de Brune no cálculo da Er do reservatório.
 Utilizar a curva de Churchill no cálculo da Er do reservatório.
 Inserir Er inicial e posteriormente utilizar a curva de Brune.
 Inserir Er inicial e posteriormente utilizar a curva de Churchill.
 Considerar o sedimento vindo de um reservatório de montante.
 Opção: **Curva de Brune**
 Seleccione a envolvente (curva) a utilizar: **Média**

SIMULAÇÃO

Tempo (anos)	Vsól. depos. (hm ³)	Vsól. efluente (hm ³)	Er (%)	Gama op. (t/m ²)	Qsól. afluente (t/ano) x10 ³	Qsól. efluente (t/ano) x10 ³	Vs depos. Vtotal reter
2	0,191	0,006	98,000	1,390	138,78	2,78	0,004
4	0,399	0,010	98,000	1,400	153,00	3,06	0,009
6	0,627	0,015	98,000	1,406	168,68	3,37	0,015
8	0,877	0,021	98,000	1,410	185,97	3,72	0,021
10	1,153	0,026	98,000	1,413	205,04	4,10	0,027
12	1,456	0,033	98,000	1,416	226,05	4,52	0,034
14	1,790	0,040	98,000	1,418	249,22	4,98	0,042
16	2,157	0,048	98,000	1,420	274,77	5,50	0,051
18	2,562	0,057	98,000	1,422	302,93	6,06	0,060
20	3,008	0,066	98,000	1,424	333,98	6,68	0,071
22	3,499	0,077	98,000	1,425	368,22	7,36	0,082
24	4,040	0,088	98,000	1,427	405,96	8,12	0,095

PROCESSAR DADOS

SEDIMENT - Cálculo do Assoreamento de Reservatórios

Segunda-feira, 05/11/2018 23:25:21

Figura 69 - Tela de entrada de informações do Programa Sediment.

Para a entrada de dados do programa foi utilizado o volume do início de operação do reservatório, ano de 1972, obtido do relatório da empresa HDC (2000). A descarga líquida média anual afluente foi obtida da modelagem hidrodinâmica do reservatório e apresentada no *Relatório Parcial 2 -RESULTADOS PRELIMINARES DA MODELAGEM*. Para a descarga sólida média anual afluente utilizaram-se os resultados obtidos pela RUSLE (Tabela 45), considerando o coeficiente de ajuste descrito no item 3.2. Os dados de granulometria do sedimento foram obtidos de Molozzi *et al.* (2011), que apresentou a composição granulométrica para o reservatório de Vargem das Flores com 78% de areia e 22% de silte/argila. Adotou-se para a composição granulométrica referente a silte e argila, por falta de dados, 11% de silte e 11% de argila.

Foi realizada a modelagem dos 4 cenários: Passado, Atual, Futuro 1 – Macrozoneamento da RMBH e Futuro 2 – Plano Municipal de Contagem. O cenário Passado foi utilizado para verificar a taxa de aumento do transporte sólido, que foi calibrada em função do volume sedimentado medido no reservatório no período de 1972 a 2009, obtido a partir das batimetrias realizadas em 1984, 2000 e 2009 e apresentadas no item 3.2. Logo, essa taxa calibrada foi aplicada nos outros 3 cenários.

Para o cenário Passado foram inseridos os dados do início de operação do reservatório e o aporte de sedimentos medido em 1984. Para o cenário Atual, foi inserido o volume assoreado para os primeiros 38 anos de operação do reservatório, conforme o resultado da modelagem do cenário Passado, e para o aporte de sedimentos foi utilizada a RUSLE ajustada. Para o cenário Futuro 1 – Macrozoneamento da RMBH, que foi dividido em 4 períodos de 8 anos, utilizou-se no período inicial o volume assoreado nos primeiros 46 anos do reservatório, obtido na modelagem do cenário atual e, para os demais períodos, foi inserido o valor calculado pelo programa até o final do período anterior. No cenário Futuro 2 – Plano Municipal de Contagem, dividido em 2 períodos de 5 anos, seguiu-se a mesma metodologia aplicada ao Futuro 1: volume assoreado até o ano de 2018 no primeiro período e, para o segundo período, foi inserido o valor obtido pelo programa após o primeiro período. Os dados inseridos no programa para cada cenário estão apresentados na Tabela 49.

Tabela 49– Dados de entrada do programa Sediment para cada cenário simulado.

Período	Aporte de sedimentos (RUSLE) ajustado (t/ano)	Q média anual (m ³ /s)	Vol. sedimentado Calculado ¹ (hm ³)
Passado	1972-1984		0,00
	1984-2009	125.875,00	0,63
Atual	2009-2018	360.410,51	12,30
	2018-2026	322.961,55	14,54
Futuro 1 – Macrozoneamento da RMBH	2026-2034	288.041,74	16,53
	2034-2042	242.940,60	18,21
	2042-2050	208.440,48	19,65
	2018-2023	893.113,32	15,89
Futuro 2 – Plano Municipal de Contagem	2023-2028	1.455.305,32	21,73

¹Volume calculado pelo programa Sediment e inserido para a modelagem dos cenários/períodos.

Após inserir os dados no modelo Sediment, foi calculado o assoreamento do reservatório para os cenários Passado, Atual, Futuro 1 – Macrozoneamento da RMBH e Futuro 2 – Plano Municipal de Contagem.

Os seguintes resultados são fornecidos, para cada intervalo de tempo modelado:

- Volume sólido depositado (hm³);
- Volume sólido efluente (hm³);
- Eficiência de retenção, Er (%);
- Peso específico aparente, Gama (t/m³);
- Vazão sólida afluente (t/ano);
- Vazão sólida efluente (t/ano);
- Razão entre Volume sólido depositado e Volume total do reservatório.

Os resultados para cada cenário estão apresentados nas tabelas a seguir (Tabela 50, Tabela 51, Tabela 52 e Tabela 53).

O gráfico da Figura 70 apresenta o volume de sólidos depositados para cada cenário, indicando a vida útil do reservatório de Vargem das Flores. Pode ser observado que os resultados da modelagem para o Passado são bem coerentes quando comparados com os assoreamentos obtidos através das diferenças entre as batimetrias. As curvas para os outros três cenários mostram a evolução do volume do reservatório (diminuição com o tempo), seguindo a tendência atual e para os 2 cenários futuros. Como pode-se observar, o cenário Futuro 2 – Plano Municipal de Contagem é o mais crítico para a operação do reservatório, reduzindo a vida útil do mesmo com relação aos demais cenários.

Tabela 50 – Resultados da modelagem do cenário Passado.

Tempo (anos)	Vsól. depos. (hm ³)	Vsól. Efluente (hm ³)	Er (%)	Gama ap. (t/m ³)	Qsól. Afluente (t/ano) x 10 ³	Qsól. Efluente (t/ano) x 10 ³	Vs depos./Vtotal reserv.
1972	0						0
1974	0,19	0,01	98,00	1,40	138,78	2,78	0,00
1976	0,40	0,01	98,00	1,41	153,00	3,06	0,01
1978	0,63	0,02	98,00	1,41	168,68	3,37	0,02
1980	0,88	0,02	98,00	1,41	185,97	3,72	0,02
1982	1,15	0,03	98,00	1,41	205,04	4,10	0,03
1984	1,46	0,03	98,00	1,42	226,05	4,52	0,03
1986	1,79	0,04	98,00	1,42	249,22	4,98	0,04
1988	2,16	0,05	98,00	1,42	274,77	5,50	0,05
1990	2,57	0,06	98,00	1,42	302,93	6,06	0,06
1992	3,02	0,07	98,00	1,42	333,98	6,68	0,07
1994	3,51	0,08	98,00	1,42	368,22	7,36	0,08
1996	4,06	0,09	98,00	1,42	405,96	8,12	0,10
1998	4,66	0,10	98,00	1,42	447,57	8,95	0,11
2000	5,32	0,12	98,00	1,42	493,45	9,87	0,13
2002	6,05	0,13	98,00	1,42	544,02	10,88	0,14
2004	6,86	0,15	98,00	1,42	599,79	12,00	0,16
2006	7,74	0,17	98,00	1,42	661,27	13,23	0,18
2008	8,72	0,19	98,00	1,42	729,04	14,58	0,20
2010	9,80	0,21	98,00	1,42	803,77	16,08	0,23

Tabela 51 - Resultados da modelagem do cenário Atual.

Tempo (anos)	Vsól. depos. (hm ³)	Vsól. Efluente (hm ³)	Er (%)	Gama ap. (t/m ³)	Qsól. Afluente (t/ano) x 10 ³	Qsól. Efluente (t/ano) x 10 ³	Vs depos./Vtotal reserv.
2010	9,80	0,21	98,00	1,42	803,77	16,08	0,23
2012	10,34	0,02	98,00	1,40	397,35	7,95	0,24
2014	10,93	0,03	98,00	1,41	438,08	8,76	0,26
2016	11,58	0,04	98,00	1,41	482,98	9,66	0,27
2018	12,30	0,06	98,00	1,41	532,49	10,65	0,29
2020	13,09	0,08	98,00	1,41	587,07	11,74	0,31
2022	13,96	0,09	98,00	1,42	647,25	12,94	0,33
2024	14,91	0,12	98,00	1,42	713,59	14,27	0,35
2026	15,97	0,14	98,00	1,42	786,73	15,73	0,37
2028	17,14	0,16	98,00	1,42	867,37	17,35	0,40
2030	18,42	0,19	98,00	1,42	956,28	19,13	0,43
2032	19,83	0,22	97,99	1,42	1054,29	21,20	0,47
2034	21,39	0,25	97,97	1,42	1162,36	23,60	0,50
2036	23,11	0,29	97,95	1,42	1281,50	26,31	0,54
2038	25,01	0,33	97,92	1,42	1412,86	29,39	0,59
2040	27,09	0,38	97,81	1,42	1557,67	34,11	0,64
2042	29,38	0,45	97,53	1,42	1717,33	42,49	0,69
2044	31,90	0,53	97,07	1,42	1893,36	55,42	0,75
2046	34,64	0,66	95,71	1,42	2087,43	89,66	0,81
2048	37,59	0,92	92,71	1,42	2301,39	167,85	0,88
2050	40,57	1,61	82,56	1,42	2537,29	442,46	0,95
2051	42,65						1,00

Tabela 52 – Resultados da modelagem do cenário Futuro 1 – Macrozoneamento da RMBH.

Tempo (anos)	Vsól. depos. (hm ³)	Vsól. Efluente (hm ³)	Er (%)	Gama ap. (t/m ³)	Qsól. Afluente (t/ano) x 10 ³	Qsól. Efluente (t/ano) x 10 ³	Vs depos./Vtotal reserv.
2018	12,30	0,06	98,00	1,41	532,49	10,65	0,29
2020	12,78	0,02	98,00	1,40	356,07	7,12	0,30
2022	13,31	0,03	98,00	1,41	392,56	7,85	0,31
2024	13,90	0,04	98,00	1,41	432,80	8,66	0,33
2026	14,54	0,05	98,00	1,41	477,16	9,54	0,34
2028	14,97	0,01	98,00	1,40	317,57	6,35	0,35
2030	15,44	0,02	98,00	1,41	350,12	7,00	0,36
2032	15,96	0,04	98,00	1,41	386,00	7,72	0,37
2034	16,53	0,05	97,99	1,41	425,57	8,54	0,39
2036	16,89	0,01	97,99	1,40	267,84	5,38	0,40
2038	17,29	0,02	97,99	1,41	295,30	5,95	0,41
2040	17,73	0,03	97,98	1,41	325,56	6,57	0,42
2042	18,21	0,04	97,98	1,41	358,93	7,26	0,43
2044	18,52	0,01	97,97	1,40	229,81	4,66	0,43
2046	18,86	0,02	97,97	1,41	253,36	5,14	0,44
2048	19,23	0,03	97,97	1,41	279,33	5,68	0,45
2050	19,65	0,04	97,96	1,41	307,96	6,28	0,46
2052	20,10	0,05	97,96	1,41	339,53	6,94	0,47
2054	20,60	0,06	97,95	1,42	374,33	7,68	0,48
2056	21,16	0,07	97,94	1,42	412,70	8,49	0,50
2058	21,77	0,08	97,94	1,42	455,00	9,40	0,51
2060	22,44	0,10	97,93	1,42	501,64	10,40	0,53
2062	23,18	0,11	97,92	1,42	553,05	11,53	0,54
2064	24,00	0,13	97,90	1,42	609,74	12,78	0,56
2066	24,90	0,15	97,84	1,42	672,24	14,51	0,58
2068	25,89	0,18	97,74	1,42	741,15	16,75	0,61
2070	26,98	0,21	97,62	1,42	817,11	19,45	0,63
2072	28,18	0,24	97,48	1,42	900,87	22,72	0,66
2074	29,50	0,28	97,31	1,42	993,21	26,74	0,69
2076	30,95	0,33	96,94	1,42	1095,01	33,55	0,73
2078	32,54	0,39	96,26	1,42	1207,25	45,19	0,76
2080	34,28	0,48	95,38	1,42	1330,99	61,50	0,80
2082	36,17	0,62	93,66	1,42	1467,42	93,11	0,85
2084	38,19	0,86	90,49	1,43	1617,83	153,90	0,90
2086	40,27	1,33	82,83	1,43	1783,66	306,20	0,94
2088	42,06	2,57	59,10	1,43	1966,48	804,34	0,99
2089	42,65						1,00

Tabela 53 - Resultados da modelagem do cenário Futuro 2 – Plano Municipal de Contagem.

Tempo (anos)	Vsól. depos. (hm ³)	Vsól. Efluente (hm ³)	Er (%)	Gama ap. (t/m ³)	Qsól. Afluente (t/ano) x 10 ³	Qsól. Efluente (t/ano) x 10 ³	Vs depos./Vtotal reserv.
2018	12,30	0,06	98,00	1,41	532,49	10,65	0,29
2019	12,92	0,03	97,92	1,40	937,77	19,48	0,30
2020	13,64	0,04	97,92	1,40	984,66	20,52	0,32
2021	14,36	0,06	97,91	1,41	1033,89	21,62	0,34
2022	15,11	0,08	97,90	1,41	1085,58	22,78	0,35
2023	15,89	0,09	97,86	1,41	1139,86	24,37	0,37
2024	16,92	0,05	97,79	1,40	1528,07	33,74	0,40
2025	18,07	0,08	97,71	1,40	1604,47	36,73	0,42
2026	19,24	0,11	97,62	1,41	1684,70	40,03	0,45
2027	20,46	0,14	97,53	1,41	1768,93	43,71	0,48
2028	21,73	0,18	97,42	1,41	1857,38	47,86	0,51
2029	23,07	0,22	97,31	1,41	1950,25	52,55	0,54
2030	24,48	0,26	97,13	1,41	2047,76	58,78	0,57
2031	25,94	0,32	96,74	1,41	2150,15	70,11	0,61
2032	27,47	0,39	96,29	1,41	2257,66	83,69	0,64
2033	29,07	0,47	95,78	1,41	2370,54	100,13	0,68
2034	30,74	0,57	95,15	1,42	2489,07	120,70	0,72
2035	32,47	0,71	94,03	1,42	2613,52	155,91	0,76
2036	34,25	0,88	92,66	1,42	2744,20	201,44	0,80
2037	36,08	1,13	90,36	1,42	2881,40	277,68	0,85
2038	37,92	1,51	86,59	1,42	3025,48	405,87	0,89
2039	39,71	2,10	80,32	1,42	3176,75	625,14	0,93
2040	41,29	3,20	67,37	1,42	3335,59	1088,27	0,97
2041	42,65						1,00

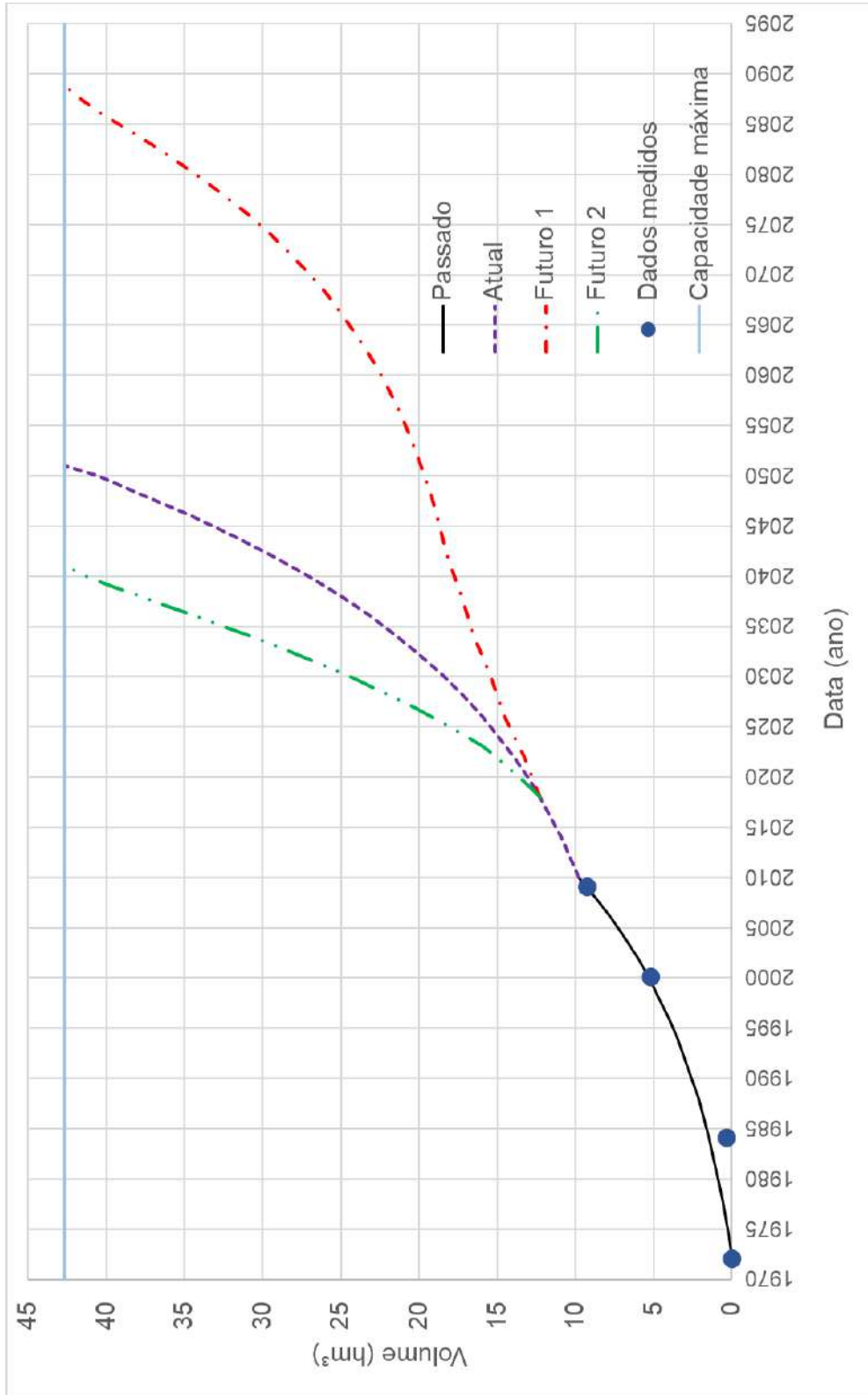


Figura 70 - Curvas com os volumes sólidos depositados ao longo do tempo para cada cenário, indicando a vida útil do reservatório de Vargem das Flores.

3.4 Conclusões sobre a produção de sedimentos e estimativa da vida útil do reservatório de Vargem das Flores

Com base nos resultados apresentados, é possível verificar que se a bacia do reservatório de Vargem das Flores sofrer as profundas modificações no seu uso do solo, sem a devida preocupação com os impactos que essas modificações podem causar ao meio ambiente e à operação do reservatório, a sua situação deverá se tornar crítica.

A gravidade da situação do reservatório de Vargem das Flores já é conhecida. Em estudo realizado por Viana (2009), que avaliou a situação de alguns reservatórios utilizados para abastecimento público no estado de Minas Gerais - Reservatório de Vargem das Flores, Reservatório de Serra Azul, Reservatório do Rio Manso, Reservatório do Juramento, Reservatório do Ribeirão e Reservatório do Soberbo - foi constatado que o reservatório de Vargem das Flores é o mais ameaçado pelas ações antrópicas devido à urbanização descontrolada e de grande porte na bacia contribuinte. Segundo Viana (2009) não foi prevista área de proteção no entorno do reservatório de Vargem das Flores, o que contribui para a entrada de sedimentos e o expõe à ação de fatores negativos à conservação da qualidade de suas águas.

Avaliando os estudos sedimentológicos observa-se que caso a ocupação da bacia continue seguindo a tendência atual o reservatório irá perder todo o seu espelho d'água em 33 anos, como mostrou a modelagem para o cenário Atual.

Se for adotada a ocupação prevista no Plano Diretor de Contagem, aqui denominado cenário Futuro 2 – Plano Municipal de Contagem, em 23 anos o reservatório estará completamente assoreado. O cenário Futuro 2 prevê a urbanização de grande parte da bacia, o que demonstrou um enorme potencial para a geração de sedimentos.

Diante disso, é necessário avaliar as alterações previstas no Plano Diretor de Contagem, com vistas a reduzir os impactos que o processo de expansão urbana de grande porte pode trazer ao reservatório, especialmente no que tange ao incremento nos processos erosivos e ao assoreamento do reservatório. De fato, a própria proposta de urbanização espalhada na bacia deve ser revista, favorecendo uma lógica de maior adensamento e compactação da cidade.

O cenário que menos impacta a operação do reservatório, ou seja, o que proporciona maior tempo de vida ao reservatório é o cenário Futuro 1 – Macrozoneamento da RMBH, que contempla uma urbanização mais controlada e a preservação de áreas de floresta. Caso seja adotado o macrozoneamento previsto no PDDI- RMBH, o reservatório terá mais 71 anos até perder todo o seu espelho d'água, o que representaria mais de 3 vezes mais tempo remanescente do que aquele oferecido pelo cenário futuro 2 – Plano Municipal de Contagem. Novamente, cabe destacar que o resultado relativo é mais significativo (em um projeto que visa avaliar cenários) do que os resultados absolutos.

A atual situação de assoreamento do reservatório de Vargem das Flores é crítica e, portanto, é necessário intervir na redução dos processos erosivos e na prevenção. Independentemente dos cenários futuros considerados, ressalta-se a importância de se considerar um plano de manejo dos sedimentos no reservatório visando melhorias na operação do mesmo, assim como programas de conservação ou recuperação da vegetação nas margens do reservatório.

4 Considerações Finais

O reservatório de Vargem das Flores é um dos principais mananciais para abastecimento de água potável à Região Metropolitana de Belo Horizonte. O macrozoneamento da Região Metropolitana de Belo Horizonte - RMBH classificou parte de território da bacia hidrográfica que contribui para este reservatório como Zona de Interesse Metropolitano - ZIM.

O município de Contagem encontra-se a montante de Vargem das Flores, parte de seu território está na ZIM e seu Plano Municipal apresenta pontos conflitantes com o zoneamento metropolitano.

A proposta de expansão da urbanização do município de Contagem é significativamente extensa, com mudanças significativas no território, em um horizonte relativamente curto, se comparada com a evolução da urbanização recente que, apesar de intensa, ainda seria de menor proporção. A proposta do plano metropolitano define uma área de expansão urbana mais contida e apresenta propostas de recuperação de vegetação na bacia.

De uma forma geral, se discute hoje os efeitos da urbanização sobre o meio ambiente e seu papel na degradação deste último. Muitas pesquisas vêm apontando para a necessidade de se trabalhar para construir cidades mais sustentáveis. Muitas vezes, o conceito de cidades compactas, consumindo menos território e menos recursos naturais, demandando menos deslocamentos (e gastando menos energia e gerando menos gases de efeito estufa, pela otimização dos deslocamentos) e reconhecendo a capacidade de suporte do ambiente que recebe a cidade, vem ganhando destaque nas discussões de sustentabilidade.

O adensamento urbano vem ocupando uma posição de destaque em oposição ao espalhamento urbano, que produz áreas rarefeitas, com grandes demandas de infraestrutura, nem sempre atendidas (ou nem sempre atendidas no tempo certo, devido à dificuldade de fazer os investimentos acompanharem esta expansão).

A proposta de Contagem parece caminhar em sentido do espalhamento espacial, o que tende a provocar mudanças significativas na paisagem natural e a gerar demandas difíceis de atender, com chances de surgirem lacunas no oferecimento de infraestrutura. O lançamento de esgotos nos rios que levam ao reservatório de Vargem das Flores, mantidas as mesmas proporções atuais, levará uma significativa carga para o reservatório, pelo montante de urbanização previsto. Além disso, a remoção de vegetação, que precede o processo de urbanização, deverá expor uma parcela importante de solo à erosão, o que só se reverte após a consolidação do solo urbano. Entretanto, percebe-se, na periferia do município, que ruas sem pavimentação e terrenos baldios aparecem com frequência nesta zona de transição entre a zona central urbana consolidada e as bordas da cidade.

No relatório anterior, em que se desenvolveu o conjunto de procedimentos de modelagem hidrológica e hidrodinâmica, as simulações realizadas para o Cenário Futuro Plano Municipal de Contagem mostram que o impacto no reservatório de Vargem das Flores, caso se materialize a proposta do Plano Municipal de Contagem tende a um viés negativo. A urbanização, devido ao processo de impermeabilização do solo, diminui as oportunidades de infiltração, o que faz diminuir a produção da vazão de base natural que aflui para o reservatório.

De forma geral, os trabalhos de modelagem hidrológica- hidrodinâmica mostram que a vazão de base é extremamente importante na conservação de níveis operacionais no reservatório. Além disso, as simulações mostraram que a urbanização traria um considerável aporte de esgotamento sanitário ao reservatório, caso mantenha a tendência atual de atendimento da rede. De certa forma, na estiagem, há perda de vazão de base e incremento da vazão de esgotos. Nas cheias, a maior produção de escoamentos superficiais, pelas superfícies impermeabilizadas, tende a incrementar as vazões de pico

Em comparação com os resultados do Cenário Futuro 2 - Plano Municipal de Contagem, o Cenário Futuro 1 - Macrozoneamento da RMBH apresenta menores variações em relação à quantidade de vazão de base natural e com um aporte de esgotamento sanitário menor.

A modelagem de qualidade da água nos principais cursos d'água afluentes ao reservatório de Vargem dos Flores mostrou que, de uma forma geral, as condições de qualidade já são bem críticas na situação atual, em especial na época de estiagem. Nos cenários futuros de uso do solo, há um agravamento das condições de qualidade da água, principalmente no cenário do Plano Municipal de Contagem, onde as concentrações de DBO e fósforo total são muito superiores e as de oxigênio dissolvido são inferiores. Dos rios simulados, o córrego Morro Redondo foi o que apresentou as maiores mudanças nas concentrações, piorando-as de forma significativa.

No que diz respeito à modelagem do reservatório, os resultados mostram também um agravamento da qualidade da água nos dois cenários futuros de uso do solo. Observa-se que a situação mais crítica de qualidade da água ocorre nas simulações do cenário do Plano Municipal de Contagem, devido ao aumento significativo de cargas de esgoto doméstico que afluem ao reservatório. Em relação ao fósforo total, as análises de estado trófico do reservatório mostram que, atualmente, o reservatório se encontra em estado eutrófico e que no cenário do Plano Municipal de Contagem, o reservatório passaria para supereutrófico, com o aumento do aporte de cargas de fósforo total.

Vale destacar, mais uma vez, que, em função da limitação de dados e informações disponíveis, foram adotadas algumas simplificações, hipóteses e critérios de modelagem, com a finalidade de reproduzir da melhor maneira possível a situação da qualidade da água na bacia e garantir comparações entre cenários com algum controle. Assim, os resultados das simulações não são exatos, em termos absolutos, mas sim uma medida aproximada e média das condições de qualidade da água atuais e futuras, onde os resultados comparativos, portanto, tomados de forma relativa, são mais confiáveis e podem ajudar no planejamento do território e na implantação de ações na bacia de contribuição ao reservatório.

Os estudos sedimentológicos, por sua vez, também indicam que a situação do reservatório de Vargem das Flores é crítica, com potencial de assoreamento significativo. Os resultados mostram a necessidade de intervenção para reversão da tendência atual de produção de sedimentos, com controle da urbanização a montante, somado a medidas de conservação ambiental na bacia, a fim de proporcionar maior vida útil e melhorias na operação do reservatório.

As estimativas de produção de sedimentos, caso o zoneamento previsto no Plano Municipal de Contagem seja implementado, mostram a piora dessa situação e a redução significativa da vida útil do reservatório, numa proporção 30% menor do que seria a sua vida útil, apenas seguindo a tendência atual, e mais de 3 vezes menor, quando se faz um comparativo com o macrozoneamento da RMBH.

Ainda que os resultados absolutos sejam menos confiáveis do que os resultados relativos, resultantes das comparações de cenários, se percebe que há muitos riscos para o reservatório Vargem das Flores, associados ao desenvolvimento urbano das áreas a montante do mesmo. É necessário um planejamento consistente com a importância deste reservatório, articulado dentro dos interesses metropolitanos, buscando também formas de desenvolvimento sustentável e seguro para os municípios a montante.

BIBLIOGRAFIA

- AGÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DA REGIÃO METROPOLITANA DE BELO HORIZONTE. RMBH e Colar Metropolitano. Disponível em: <<http://www.agenciarmbh.mg.gov.br/institucional/rmbh-e-colar-metropolitano/>>.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F.; 2014. Conservação do Solo, 9ª Ed., Ícone Editora, São Paulo, SP.
- BRASIL, 2001. Estatuto da Cidade: Lei 10.257/2001 que estabelece diretrizes gerais da política urbana. Brasília, Câmara dos Deputados, 2001, 1ª Edição.
- CABRAL, S.L.; Reis, R. S.; FRAGOSO JÚNIOR, C. R., 2013. Avaliação do efeito da urbanização na produção de sedimentos da bacia do rio Jacarecica/AL mediante uso de modelo hidrossedimentológico distribuído. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 37, n. 4.
- CARVALHO, N. O., 2008. Hidrossedimentologia Prática. 2ª edição, ver., atual. E ampliada. - Rio de Janeiro: Interciência.
- CARVALHO, N. O.; FILIZOLA JÚNIOR, N.P.; SANTOS, P.M.C. & LIMA, J.E.F.W., 2000. Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios. Brasília: ANEEL. 140p.
- CARVALHO, N. O.; FILIZOLA JÚNIOR, N.P.; SANTOS, P.M.C. & LIMA, J.E.F.W., 2000. Guia de práticas sedimentométricas. Brasília: ANEEL. 154p.
- CETESB, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2017. Apêndice D – Índices de Qualidade das Águas. In: Qualidade das águas interiores no estado de São Paulo. São Paulo, p. 301.
- CONTAGEM, 2017. Lei complementar nº. 26, de 21 de novembro de 2017. Institui o Plano Diretor do Município de Contagem e dá outras providências.
- HDC (HYDROLOGIC DATA COLLECTION ENGENHARIA S/C Ltda.), 2000. Levantamento batimétrico do reservatório da Lagoa Várzea das Flores. Relatório técnico. Belo Horizonte. 12p.
- KIRKBY, M. J., 1990. Drainage basins and sediment transfer. In: Geomorphology in environmental management (Cooke, R. U. e Doornkamp, J. C. org.).178-200. Oxford: Clarendon Press.
- LOMBARDI NETO, F.; MOLDENHAUER, W. C., 1992. Erosividade da chuva: sua distribuição e relação com as perdas de solo em Campinas (SP). Bragantia, Campinas, v. 51, n. 2, p.189-196.
- LOPES, A. M. M. B., 2009. Avaliação da ocorrência de cistos de *Cryptosporidium* spp. e de cistos de *Giardia* ssp. e sua associação com indicadores bacteriológicos e turbidez na represa de Vargem das Flores-MG.
- MATOS, A.C.S.; LEMOS, R.S.; SILVA, T.F.G.; ELEUTÉRIO, J.C.; NASCIMENTO, N.O., 2017. Evolução do Uso e Ocupação do Solo em Mananciais de Abastecimento Metropolitano na Região Metropolitana de Belo Horizonte, Estado de Minas Gerais. Em: XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2017, Florianópolis. Anais do XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos.

MIGUEL, P.; DALMOLIN, R.S.D.; PEDRON, F.A.; MOURA-BUENO, J.M. & Tiecher, T., 2014. Identificação De Fontes De Produção De Sedimentos Em Uma Bacia Hidrográfica De Encosta. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 38(2).

MOLOZZI, J., FRANÇA, J. S., ARAUJO, T. L., VIANA, T. H., HUGHES, R. M., & CALLISTO, M., 2011. Diversidade de habitats físicos e sua relação com macroinvertebrados bentônicos em reservatórios urbanos em Minas Gerais. *Iheringia. Série Zoologia*, 101(3), 191-199.

MORAES, E. S., 2007. Aplicação de modelos para estimativa de produção de sedimentos na bacia hidrográfica do ribeirão Maringá-PR. 2007. Monografia- Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2007.

MOREIRA, M. C. *et al.*, 2008. Neterosividade MG: erosividade da chuva em Minas Gerais. *R. Bras. Ci. Solo*, n. 32, p. 1349-1353.

MORUZZI, R. B. *et al.*, 2012. Avaliação de cargas difusas e simulação de autodepuração no córrego da Água Branca, Itirapina (SP). *Geociências (São Paulo)*, v. 31, n. 3, p. 447-458.

PAIVA, E. M. C. D., 2003. Métodos de estimativa da produção de sedimentos em pequenas bacias hidrográficas. In: *Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas*. (Paiva, J. B. D. e Paiva, E. M. C. org.). Porto Alegre: ABRH.

RENARD, K.G., FOSTER, G.A., WEESIES, D.K. *et al.*, 1996. "Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning With the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)", *Agriculture Handbook No. 703*, USDA – United States Department of Agriculture, USA.

SALLA, M. R.; PEREIRA, C. E.; FILHO, J. E. A.; PAULA, L. M.; PINHEIRO, A. M., 2013. Estudo de autodepuração do Rio Jordão, localizado na bacia hidrográfica do Rio Dourados. *Eng Sanit Ambient*, v.18, n.2, p.p. 105-114.

SANTOS, S. P., 2012. Morfometria, compartimentação e hidrodinâmica de um reservatório periurbano tropical: prognósticos sobre o tempo de vida útil do Reservatório de Vargem das Flores, Minas Gerais Brasil. Dissertação (Mestrado em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre), Instituto de Ciências Biológicas - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, 2016, Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2016.

STEIN, D. P.; DONZELI, A. F.; GIMENEZ, A. F.; PONÇANO, W. L.; LOMBARDI NETO, F., 1987. Potencial de erosão laminar, natural e antrópico na bacia do Peixe Paranapanema. In: *SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROSIÃO*, 4., São Paulo, 1987. [Anais] São Paulo: ABGE/DAEE, p. 105-136.

UFMG, 2015. Universidade Federal de Minas Gerais. Macrozoneamento da Região Metropolitana de Belo Horizonte, Produto 5. Agência de Desenvolvimento da Região Metropolitana de Belo Horizonte.

UFV, 2010. UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA; FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS; UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS; FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. *Mapa de solos do Estado de Minas Gerais* [Belo Horizonte].

VIANA, T., 2009. Estudo do conteúdo de calor e suas influências sobre variáveis limnológicas em reservatórios de abastecimento de água. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

VOLLENWEIDER, R. A., 1976. Advances in defining critical loading levels for phosphorus in lake eutrophication. OECD Cooperative Programme in Eutrophication. P. 55-83.

VON SPERLING, M., 2007, Estudos e Modelagem da Qualidade da Água de Rios. DESA/UFMG. MATOS, T. V. S., 2015. Determinação de Áreas de Vulnerabilidade à Erosão Hídrica com Base na Equação Universal de Perda de Solo (Usle). Dissertação de Mestrado. Programa de pós-graduação em saneamento – UFMG.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D., 1978. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. Washington: USDA. 58 p. (Agriculture Handbook, 537)