



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO TRÊS RIOS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DO MEIO AMBIENTE - DCMA**

**METODOLOGIAS PARA CÁLCULO DE RESERVAS DE ÁGUA
SUBTERRÂNEA: O ESTUDO DE CASO DA BACIA HIDROGRÁFICA
DO ENTORNO DA REPRESA DE TRÊS MARIAS - MG.**

Rian da Silva Carvalho Pires

**ORIENTADOR: Prof. Dra. Fabiola de Sampaio Rodrigues G. Garrido
CO-ORIENTADOR: M.Sc Luis Gustavo de Moura Reis**

**TRÊS RIOS - RJ
DEZEMBRO – 2014**



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO TRÊS RIOS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DO MEIO AMBIENTE - DCMA**

**METODOLOGIAS PARA CÁLCULO DE RESERVAS DE ÁGUA
SUBTERRÂNEA: O ESTUDO DE CASO DA BACIA HIDROGRÁFICA
DO ENTORNO DA REPRESA DE TRÊS MARIAS - MG.**

Rian da Silva Carvalho Pires

Monografia apresentada ao curso de Gestão Ambiental,
como requisito parcial para obtenção do título de
bacharel em Gestão Ambiental da UFRRJ, Instituto Três
Rios da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

**TRÊS RIOS - RJ
DEZEMBRO – 2014**

Pires, Rian, 2014-

Metodologias para Cálculo de Reservas de Água Subterrânea: O estudo de caso da Bacia Hidrográfica do Entorno da Represa de Três Marias - MG. - 2014. 40f. : grafs., tabs.

Orientador: Fabiola de Sampaio Rodrigues G. Garrido.
Monografia (bacharelado) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Instituto Três Rios.

Bibliografia: f. 57-60.

1. Hidrologia – Hidrogeologia – Aquífero Sedimentar – Reserva Permanente – Monografia. I. Pires, Rian. II. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Instituto Três Rios. III.

Título



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO TRÊS RIOS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DO MEIO AMBIENTE - DCMA

**METODOLOGIAS PARA CÁLCULO DE RESERVAS DE ÁGUA SUBTERRÂNEA:
O ESTUDO DE CASO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ENTORNO DA REPRESA
DE TRÊS MARIAS - MG.**

Rian da Silva de Carvalho Pires

Monografia apresentada ao Curso de Gestão Ambiental
como pré-requisito parcial para obtenção do título de
bacharel em Gestão Ambiental da Universidade Federal
Rural do Rio de Janeiro, Instituto Três Rios da
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

Aprovada em ____/____/____

Banca examinadora:

Prof. Dra. Fabiola de Sampaio Rodrigues G. Garrido

Prof. Dr. Erika Cortines

Prof. Dr. Fábio Souto de Almeida

TRÊS RIOS - RJ
DEZEMBRO – 2014

Aos meus pais e meu irmão pelo amor e confiança.

AGRADECIMENTO

À minha mãe Rosimeri, ao meu pai Nilo Sérgio e meu irmão Emmanuel pelo apoio e incentivo em toda minha vida.

A Prof. Dra. Olga Venimar de Oliveira Gomes, pela amizade, grande incentivo, orientação no desenvolvimento desta monografia.

A Prof. Dra. Fabiola de Sampaio Rodrigues G. Garrido, pela orientação e toda contribuição na realização desta monografia.

Ao Co-orientador M.Sc Luis Gustavo de Moura Reis, por sua grande e indispensável contribuição ao longo de todo desenvolvimento desta monografia.

Aos professores integrantes da banca de defesa da monografia, Prof. Dra. Erika Cortines e Prof. Dr. Fábio Souto de Almeida.

À amizade, incentivo e companhia dos colegas de faculdade, que muito contribuíram durante todo o curso de gestão ambiental.

À Minha terna Mãe dos Céus, Maria Santíssima espelho de perfeição.

A Deus ao qual tudo foi feito por ele, e sem ele nada foi feito (Jo 1,3).

Se te parece que sabes e entendes bem muitas coisas, lembra-te que é muito mais o que ignoras. (Tomás de Kempis, 1441)

RESUMO

A quantificação das reservas de águas subterrâneas consiste em um passo fundamental para gerenciamento dos recursos hídricos em uma bacia hidrográfica, uma vez que, a partir disso, é possível estabelecer a quantidade de água que poderá ser extraída sem que seja produzido algum efeito indesejável no aquífero. Na maior parte do tempo, aquíferos contribuem na composição do efetivo de água superficial. Todas as metodologias para quantificação das reservas dos sistemas aquíferos consistem em técnicas indiretas. Este estudo se propôs a demonstrar a metodologia para cálculo da reserva permanente, reguladora e total que se baseia na área, dimensões e porosidade efetiva da unidade aquífera estudada e ainda, baseando-se nas análises de escoamento de base de séries históricas fluviométricas, esse estudo estimou reservas hídricas subterrâneas para a bacia hidrográfica do entorno da represa de Três Marias / MG. Os fluxos de base calculados e as reservas reguladoras estimadas pela vazão dos rios foram comparados com análises de reservas hídricas subterrâneas calculadas anteriormente no Plano de Recursos Hídricos da referida Bacia. A reserva reguladora calculada em ano seco a partir do escoamento de base apresentou relação com os dados das reservas reguladoras calculadas a partir de parâmetros hidrogeológicos.

Palavras-chave: Escoamento de base, Reserva reguladora, Balanço hídrico.

ABSTRACT

Quantification of groundwater reserves is a key to managing water resources since from it you can set the amount of water that can be extracted, without producing any undesirable effect on the aquifer. All methodologies to quantify the reserves of aquifer systems consist of indirect techniques. This study aimed to present the methodology for calculating permanent and regulatory reserves and based on the analysis of base flow from historical series from rains and output of the rivers, this study estimated the groundwater reserves for the basin surrounding the Três Marias dam / MG. The base flow calculated and regulatory reserves estimated by river discharge were compared to analyzes of groundwater reserves calculated previously for the Hidric Resources Plan this basin. The regulatory reserve calculated in dry years from the base flow were related to the data of regulatory reserves calculated from hydrogeological parameters.

Keywords: Base flow, regulatory reserve, hidric balance

LISTA DE ABREVIACÕES E SÍMBOLOS

ANA - Agência Nacional de Águas

CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerias

CPRM - Serviço Geológico do Brasil

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IGAM - Instituto Mineiro de Gestão de Águas

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Ciclo hidrológico.....	15
Figura 2.	Esquema das zonas saturadas, zona não saturada e franja capilar.....	17
Figura 3.	Esquema de aquíferos poroso, fissural e cárstico.....	18
Figura 4.	Hidrografia mostrando a separação do escoamento superficial da vazão base.....	20
Figura 5.	Mapa do entorno da represa de Três Marias com localização das estações pluviométricas e pluviométricas.....	25
Figura 6.	Avaliação da reserva permanente em aquífero livre.....	26
Figura 7.	Balanço Climatológico próximo a Bacia Hidrográfica do Entrono da Represa de Três Marias.....	30
Figura 8.	Mapa geológico da Bacia Hidrográfica do Entrono da Represa de Três Marias.....	32
Figura 9.	Vazão e escoamento de base do Ribeirão Marmelada em 1975 – Est. Abaeté....	34
Figura 10.	Precipitação diária em Abaeté no ano hidrológico de 1975.....	34
Figura 11.	Vazão e escoamento de base do Ribeirão Marmelada em 1984 – Est. Abaeté....	34
Figura 12.	Precipitação diária em Abaeté no ano hidrológico de 1984.....	35
Figura 13.	Vazão e escoamento de base do Ribeirão Marmelada em 1981 – Est. Abaeté....	35
Figura 14.	Precipitação diária em abaeté no ano hidrológico de 1981.....	35
Figura 15.	Vazão e escoamento de base do Rio Borrachudo em 1994 – Est. Faz. São Felix..	36
Figura 16.	Precipitação diária em S. Gonçalo do Abaeté no ano hidrológico de 1994.....	36
Figura 17.	Vazão e escoamento de base do Rio Borrachudo em 1972 – Est. Faz. São Felix..	36
Figura 18.	Precipitação diária em S. Gonçalo do Abaeté no ano hidrológico de 1972.....	37
Figura 19.	Vazão e escoamento de base do Rio Borrachudo em 1971 – Est. Faz. São Felix...	37
Figura 20.	Precipitação diária em S. Gonçalo do Abaeté no ano hidrológico de 1971.....	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Área, rio principal e domínio hidrogeológico de cada sub-bacia da Bacia Hidrográfica do Entorno da Represa de Santa Maria.....	28
Tabela 2.	Estações com anos selecionados e constante k.....	33
Tabela 3.	Volume da reserva de água subterrânea na região de Abaeté e Fazenda São Félix.....	38
Tabela 4.	Parâmetros utilizados no cálculo da UPRGH SF4. Fonte: GAMA Engenharia de Recursos Hídricos (2014).	38
Tabela 5.	Volume da reserva de água subterrânea para região do entorno da represa de Três Marias.....	39

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
1.1 REVISÃO TEÓRICA PARA OS CÁLCULOS DE RESERVAS DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	16
1.1.1. Bacia hidrográfica e balanço hídrico.....	16
1.1.2. Relação das águas superficiais e águas subterrâneas	17
1.1.3. Água subterrânea e sistema aquífero.....	17
1.1.4. Análise do escoamento.....	19
1.1.5. Análise dos tipos de reservas	20
1.2 OBJETIVO GERAL	21
1.2.1 Objetivos Específicos.....	21
2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	23
2.1 MÉTODO PARA O CÁLCULO DA RESERVA DE ÁGUA SUBTERRÂNEA A PARTIR DO ESCOAMENTO DE BASE.....	23
2.2 MÉTODO PARA O CÁLCULO DA RESERVA PERMANENTE, REGULADORA E TOTAL A PARTIR DE DADOS HIDROGEOLÓGICOS	27
2.2.1 Reserva Permanente	27
2.2.2. Reserva Reguladora.....	28
2.2.3. Reserva Totais ou Naturais	28
2.3. ÁREA DE ESTUDO	28
2.3.1. Caracterização Geral	28
2.3.2. Caracterização Hidrogeológica	31
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	34
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	40
5. REFERÊNCIAS	41

1. INTRODUÇÃO

A água é substância necessária para a sobrevivência de todo ser vivo. A disponibilidade de recursos hídricos é o fator fundamental no desenvolvimento das grandes civilizações, sua escassez é fator de conflito entre povos, e isso é comprovado ao longo da história da humanidade. O estudo da distribuição, circulação e da relação da água com o meio ambiente é fundamental para a atualidade, considerando-se principalmente o crescimento populacional mundial.

A água é a substância mais abundante na superfície do planeta, chegando a cobrir mais de 70% do globo terrestre. Do total de água no planeta 97% é água salgada presente nos oceanos. Dos 3% restante de água doce, 1,7% está na forma de geleiras nas calotas polares, 0,76% são águas subterrâneas, 0,001% está na atmosfera, 0,0001% está na biota como parte da composição de seres vivos, rios e lagos compõe 0,0072% e 0,001% constitui a umidade dos solos (Gleick, 2000 apud Collischonn, 2008). No planeta Terra a água está disponível em todos os seus estados, ou seja, sólido, líquido e gasoso e se movimenta através do ciclo hidrológico.

A distribuição da água nos continentes, oceanos, rios, lagos, na atmosfera e nos aquíferos se dá através do ciclo hidrológico. A energia que move o ciclo hidrológico é proveniente do sol, que aquece o ar, o solo, viabiliza a fotossíntese feita pela vegetação e pelo fitoplâncton, movimenta as águas superficiais, resultando assim na evaporação da água e no movimento das massas de ar.

O ar pode conter uma determinada quantidade de vapor de água, o que depende da sua temperatura. O ar mais quente pode conter maior quantidade de vapor de água do que o ar frio. Quando a quantidade de vapor é superior ao limite que o ar pode conter, ocorre a condensação do vapor. O ar atmosférico apresenta uma variação de temperatura de acordo com a altitude, com temperaturas altas, próximas ao nível do mar e temperaturas baixas em maiores altitudes. O movimento ascendente de uma massa de ar úmida que encontra temperaturas menores em maiores altitudes faz com que o vapor de água se condense, formando pequenas gotículas de águas que ficam suspensas no ar por correntes ascendentes e pela turbulência, está aí a formação das nuvens. Quando as gotas das nuvens atingem maior tamanho e peso elas ficam mais sujeitas à força da gravidade, então elas precipitam e retornam à superfície da Terra. É a formação das chuvas. A água da chuva pode evaporar

antes de chegar à superfície da Terra e/ou ser interceptada pela vegetação (evapotranspiração), pode atingir diretamente um curso d'água, pode escoar sobre o solo até chegar a um corpo d'água (escoamento superficial) ou pode infiltrar no solo umedecendo-o e posteriormente abastecendo os aquíferos que associado a força da gravidade origina o fluxo de água subterrânea. A figura 1 apresenta todo o ciclo hidrológico. Um parâmetro essencial para o estudo do comportamento do ciclo hidrológico no continente é a bacia hidrográfica.

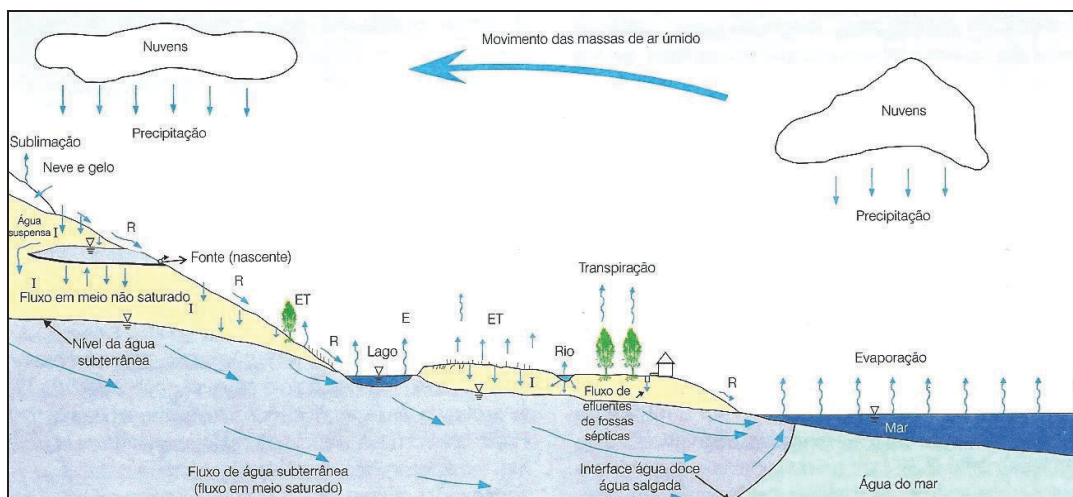


Figura 1. Ciclo hidrológico. Fonte: Feitosa, 2008.

Quando há frequentes e intensas chuvas numa bacia hidrográfica, parte da água precipitada que não infiltra no solo gera uma lâmina d'água que escoar pela superfície até atingir um curso d'água. Esse é o escoamento superficial, que compõe a maior parte da vazão dos rios em períodos chuvosos. Já nos períodos de estiagem a vazão do rio é mantida pela água subterrânea armazenada na bacia. Trata-se do fluxo subterrâneo ou a água reservada na bacia hidrográfica que se torna responsável pelo escoamento de base de um rio.

A Lei n. 9.433/1997, que institui o Plano Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), imprimiu à gestão das águas um caráter descentralizado e participativo, descrevendo água como um recurso natural limitado e dotado de valor econômico. Nesse sentido, propostas destinadas ao processamento de dados e à geração de modelos são defendidos por Carvalho et al. (2010) para o suprimento de demandas por água e contra a degradação da qualidade.

No presente estudo serão revisadas metodologias para os cálculos da reserva da água subterrânea da Bacia Hidrográfica do Entorno da Represa de Três Marias, no estado de Minas Gerais, anteriormente ao Plano de Recursos Hídricos da referida bacia. Os cálculos

envolveram análise de dados, tais como: variação do nível d'água, porosidade efetiva, análises de consistências das séries históricas de chuva e vazão, análise de hidrogramas de rios e cálculo da reserva reguladora para o período de estiagem.

A importância em avaliar a reserva de água subterrânea está em estimar o volume máximo que pode ser explorado no(s) aquífero(s) de uma determinada região sem causar efeitos indesejáveis como: exaustão do aquífero, recalque do terreno, prejuízo dos usuários de poços, prejuízo dos usuários que utilizam um rio que tem seu fluxo de base no aquífero, desequilíbrio ambiental através da diminuição da vazão ou cota de rios e lagos.

1.1 REVISÃO TEÓRICA PARA OS CÁLCULOS DE RESERVAS DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

1.1.1. Bacia hidrográfica e balanço hídrico

A bacia hidrográfica é uma área onde o fluxo de água precipitada é drenado e direcionado para um ponto de saída, o exutório da bacia. Na bacia hidrográfica há entrada de água através da precipitação (P) e saída de água através do escoamento (Q) e da evapotranspiração (ETr). A determinação da área de uma bacia é feita a partir de um mapa topográfico através da delimitação dos seus divisores. Sendo a bacia hidrográfica a região de captação de água da chuva, estimar a medida de sua área é fundamental para calcular o volume de água recebido ao longo de um intervalo de tempo de precipitação.

O conhecimento da diferença entre o volume de água de entrada e de saída em um determinado intervalo de tempo em uma bacia hidrográfica consiste na tomada do balanço hídrico.

Para saber a quantidade de entrada de água em uma bacia hidrográfica é necessário medir a quantidade de água precipitada sobre a região. Essa medição é realizada através de pluviômetros, pluviógrafos mecânicos ou pluviógrafos eletrônicos. O pluviômetro é um recipiente de dimensões padronizadas que coleta a água precipitada e a medição é realizada por um observador. O pluviógrafo é um pluviômetro que faz a medição automática, o mecânico através de uma balança e marcação automática no papel e o eletrônico através da memória. A leitura realizada por estes aparelhos correspondem a altura em milímetros (mm), da camada de água que incidiu sobre o solo, considerando este último plano e impermeável.

Um milímetro de chuva corresponde a um litro de chuva distribuído por uma área de um metro quadrado (m^2).

1.1.2. Relação das águas superficiais e águas subterrâneas

Na maioria dos casos e especialmente em períodos de estiagem as águas superficiais estão intimamente relacionadas com águas subterrâneas, por isso estes recursos não podem, via de regra, serem tratados individualmente. Para ilustrar tal situação, imaginemos um rio, começando pela sua nascente mais distante que brota das águas subterrâneas e, ao longo de seu curso devemos considerar que ele irá interagir com os sistemas aquíferos por onde escoar e desta forma, a água do rio pode abastecer um aquífero (rio influente) bem como a água de um aquífero pode fluir para o rio (rio efluente). Em regiões tropicais, ocorre geralmente que em períodos de grande volume de precipitação o rio recarrega o aquífero e nos períodos de estiagem é o aquífero quem garante o fluxo do rio.

1.1.3. Água subterrânea e sistema aquífero

De acordo com Ministério do Meio Ambiente (2007) as águas subterrâneas são aquelas que se encontram sob a superfície da Terra, preenchendo os espaços vazios existentes entre os grãos do solo, das rochas e nas fissuras (rachaduras, fendas, quebras, descontinuidades e espaços vazios).

Relacionado com a água subterrânea, o subsolo tem duas classificações: zona não saturada e zona saturada. Zona não saturada é onde os poros do solo estão preenchidos por ar e água. A zona saturada é onde todos os poros do solo estão preenchidos por água. A zona de transição entre essas duas zonas é denominada franja capilar e geralmente, no caso de aquíferos livres, delimita a superfície potenciométrica. Na figura 2 apresenta-se um esquema da zona saturada e insaturada.

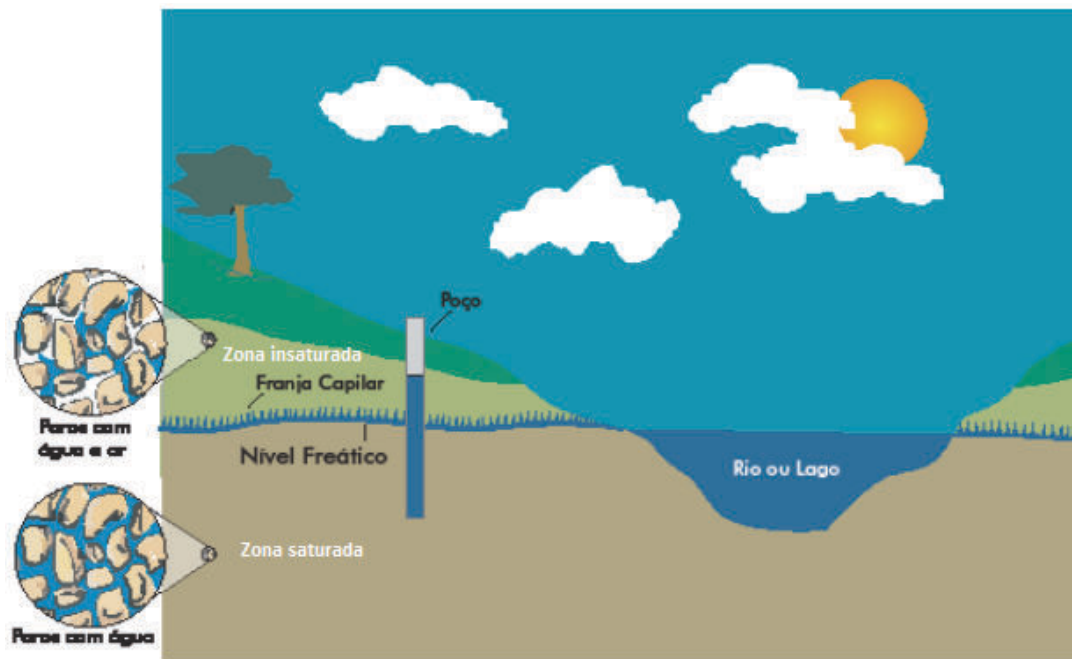


Figura 2. Esquema das zona saturadas, zona não saturada e franja capilar. Fonte: Ministério do Meio ambiente, 2007.

Um aquífero é uma formação geológica com suficiente permeabilidade e porosidade interconectada para armazenar e transmitir quantidades significativas de água, sob gradientes hidráulicos naturais. (Cleary 2007)

Os aquíferos podem ser classificados de acordo com os tipos de espaços vazios e consequentemente sua capacidade de armazenamento e transmissão da água, e ainda de acordo com a pressão das águas nas suas superfícies limítrofes.

Quanto a tipologia podemos caracterizar os aquíferos em poroso, fissural e cársticos. Os aquíferos porosos têm água armazenada nos espaços entre os grãos criados durante a formação da rocha, é o caso das rochas sedimentares. Aquífero fissural tem fissuras resultantes do fraturamento das rochas relativamente impermeáveis (ígneas ou metamórficas), são nessas fissuras que a água circula. Já os aquíferos cársticos são formados em rochas carbonáticas, nele as fraturas devido a dissolução do carbonato pela água podem alcançar aberturas muito grandes, criando rios subterrâneos. Esses esquemas podem ser visualizados na figura 3.

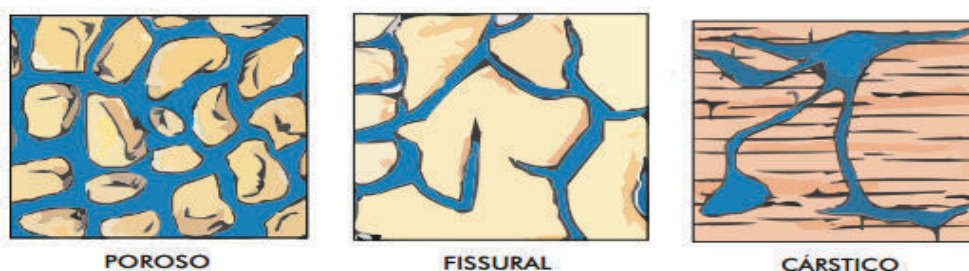


Figura 3. Esquema de aquíferos poroso, fissural e cárstico. Fonte: Ministério do Meio ambiente, 2007.

Quanto a classificação temos os aquíferos livres e confinados. Os aquíferos livres são aqueles que o seu limite superior corresponde ao nível freático, onde a pressão existente no aquífero é equivalente à pressão atmosférica. Os aquíferos confinados têm os seus limites superiores e inferiores impermeáveis, tendo a pressão da água subterrânea maior que a pressão atmosférica. Como os aquíferos confinados tem uma camada impermeável como limite superior, a água não se infiltra diretamente até eles, a infiltração ocorre majoritariamente através de uma área de recarga.

A água subterrânea tem origem nas águas da chuva que se infiltram no solo e percolam até camadas mais profundas e impermeáveis do solo. As águas subterrâneas têm velocidades muito menores do que as águas superficiais, pois, ao passo que num rio a vazão é medida na ordem de m^3/s , para a água subterrânea a medida normalmente é m^3/dia .

A água subterrânea responde as variações sazonais de precipitação mais lentamente, sendo assim uma reserva confiável a médio, longo prazo. Isto ocorre em razão do maior tempo de residência se comparada às águas dos rios na bacia. Segundo Lvovitch (1970) *apud* Cleary (2007), o tempo médio de residência da água subterrânea é estimado em 280 anos. Essa propriedade das águas subterrâneas tem grande valor em períodos de estiagem, pois durante esse período a situação do ponto de vista hidrológico pode ser tornar crítica com o surgimento de conflitos pelo uso da água.

1.1.4. Análise do escoamento

Vazão ou escoamento é o volume de água que passa por uma seção do rio em um determinado intervalo de tempo. Como dito anteriormente, para o caso dos rios a medida mais utilizada é o m^3/s . O escoamento resulta da interação entre a bacia hidrográfica e a precipitação, tendo em conta as características da bacia que irão condicionar a capacidade de infiltração, de armazenamento e de evapotranspiração.

Quanto ao escoamento superficial, a água precipitada não infiltra no solo e sim esco pela superfície até atingir um curso d'água. Esse parâmetro também é denominado deflúvio. O deflúvio será maior em período chuvoso devido a maior contribuição da água da chuva. Já para os períodos de estiagem, normalmente o deflúvio é regulado pela água subterrânea que é denominado de escoamento de base.

O resultado da soma entre o momento do fim da chuva e o tempo de concentração da bacia é o período a partir do qual toda a vazão do rio é abastecida pela água subterrânea (Collischon, 2008). Ao analisar um hidrograma podemos ver um pico de vazão após um evento de chuva, e logo depois a parte decrescente do hidrograma, conhecida como recessão do hidrograma, que mostra a diminuição do nível da água no(s) aquífero(s) da bacia ao longo do tempo (Figura 4). A partir dessa análise é possível avaliar a reserva de água subterrânea para a bacia.

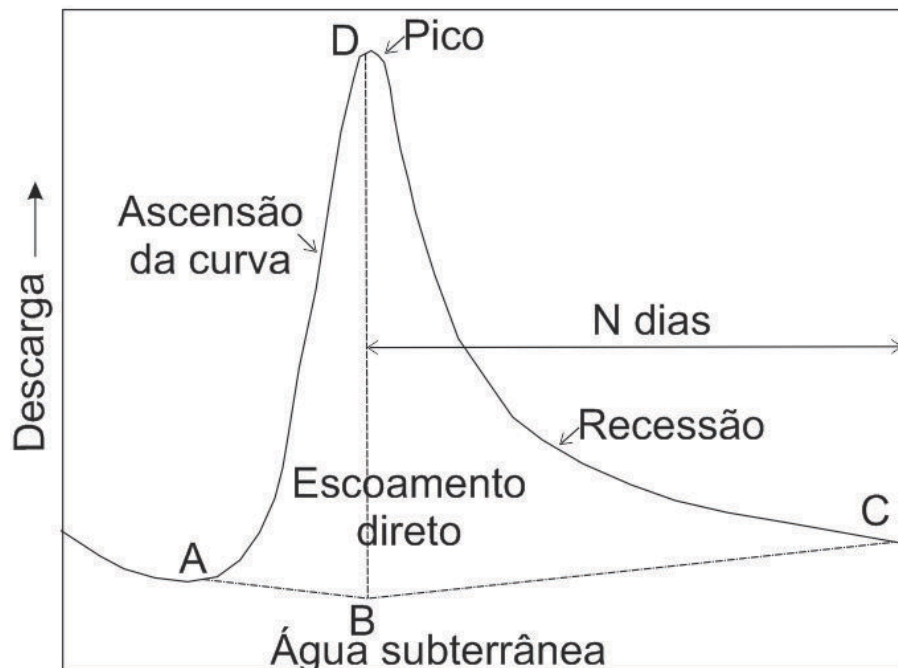


Figura 4. Hidrografa mostrando a separação do escoamento superficial da vazão base.
Fonte: Linsley e Franzini, 1992.

1.1.5. Análise dos tipos de reservas

Baseados nas análises de dados hidrogeológicos, além de estimar a quantidade das reservas de água subterrânea, também é preciso classificá-las em suas quatro grandes categorias como define Feitosa (2008):

- Reservas reguladoras: também chamadas de reservas renováveis, foram definidas como reservas associadas ao balanço hídrico das águas

subterrâneas. Embora a magnitude dessas reservas mude, de um ano para o outro, de acordo com as variações do ciclo hidrológico, admite-se que a reserva reguladora representa o comportamento mediano secular das variações sazonais do nível da água subterrânea, produzidas por entradas supostamente iguais às saídas. Levando em conta que esse volume renova-se a cada ano (teoricamente com risco de 50%), ele pode ser encarado como descarga passível de exploração.

- Reservas geológicas ou permanentes: águas armazenadas no tempo geológico, dos quais é possível dispor de uma certa quantidade regularizada, durante um certo período de tempo.
- Reservas naturais ou totais: representam a soma das reservas geológicas e das reservas reguladoras.
- Reservas de exploração: são definidas como descarga segura ou descarga permissível. Conkling (1946) a define como vazão média anual extraída artificialmente do aquífero sem que se produzam resultados indesejáveis.

1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é revisar metodologias para cálculo de reservas de água subterrânea e calcular valores de reservas hídricas subterrâneas para sub-bacias da Bacia Hidrográfica do Entorno da Represa de Santa Maria, baseando-se nas análises do escoamento de base das séries históricas fluviométricas.

1.2.1 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral foi necessário cumprir os objetivos específicos a seguir:

- Avaliação dos parâmetros do balanço hídrico estabelecido para a bacia com cálculo de ETR e ETPs para série histórica pluviométrica como parâmetro de consistência para utilização dos dados;
- Análises baseadas em dados diários para hidrograma de rios da bacia;
- Escolha das vazões em períodos de estiagem para cálculo da reserva;
- Cálculos de reservas de águas subterrâneas a partir dos escoamentos de base de sub-bacias;

- Comparação das reservas permanentes, reguladoras e totais calculadas previamente a partir de parâmetros hidrogeológicos no Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Entorno da Represa de Três Marias com as reservas de águas subterrâneas calculadas a partir do escoamento de base de sub-bacias.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MÉTODO PARA O CÁLCULO DA RESERVA DE ÁGUA SUBTERRÂNEA A PARTIR DO ESCOAMENTO DE BASE

Nesse estudo foram avaliadas e aplicadas metodologias para os cálculos das reservas de água subterrânea; a partir de cálculos para o escoamento de base realizado durante este trabalho foram realizadas comparações com as análises da reserva de água subterrânea permanente, reguladora e total, realizadas previamente no Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Entorno da Represa de Três Marias.

Para análise do escoamento de base foram realizadas minuciosas verificações dos comportamentos das curvas de recessão dos hidrogramas dos rios das sub-bacias que compõe a Bacia Hidrográfica do Entorno da Represa de Três Marias.

Os dados de vazão dos rios utilizados na elaboração dos hidrogramas deste trabalho foram obtidos através de estações do banco de dados do Sistema Informações Hidrológicas da Agência Nacional de Água (ANA). As seguintes estações foram selecionadas:

- Estação Fazenda São Félix no município de São Gonçalo do Abaeté, operada pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM) sob a responsabilidade da ANA, no rio Borrachudo com área de drenagem de 970 km².
- Estação Major Porto no município de Patos de Minas, operada pelo CPRM sob a responsabilidade da ANA, no ribeirão Areado com área de drenagem de 672 km².
- Estação Barra do Funchal no município Serra da Saudade, operada pelo CPRM sob a responsabilidade da ANA, no rio Indaiá com área de drenagem de 897 km².
- Estação Abaeté no município Abaeté, operada pelo CPRM sob a responsabilidade da ANA, no ribeirão Marmelada com área de drenagem de 471 km².
- Estação Ponte BR-040 no município de São Gonçalo do Abaeté, operada pelo Instituto Mineiro de Gestão de Águas (IGAM) sob a responsabilidade da Companhia Energética de Minas Gerias (CEMIG), no rio Abaeté com área de drenagem de 5186,2 km².

- Estação Porto Indaiá no município de Biquinhas, operada pelo IGAM sob a responsabilidade da CEMIG, no rio Indaiá com área de drenagem de 2214,8 km².

Todas as estações pertencem ao estado de Minas Gerias e à Bacia do rio São Francisco.

Antes da análise do hidrograma foi necessário testar a consistência dos dados das estações, usando para este fim a comparação dos dados de evapotranspiração real (ETR) e de evapotranspiração potencial (ETP) e tendo como parâmetro a condição de validade que a ETR deve ser menor ou igual a ETP. Segundo Tucci (2001), a ETR é a perda de água por evaporação do solo e transpiração da planta. O valor da ETR é obtido pela equação:

$$ETR = P - Q \quad (1)$$

Onde: P (mm) é precipitação e Q (mm) consiste na vazão do rio principal para a bacia analisada.

A ETP é a quantidade máxima de água transferida para atmosfera por evaporação e transpiração, na unidade de tempo, de uma superfície extensa completamente coberta de vegetação de porte baixo e bem suprida de água (Penman, 1956 *apud* Tucci, 2001). Para estimar o valor da ETP foi usado o software CROPWAT 8.0®. O referido software consiste em um programa para o cálculo de irrigação em regiões para plantações com base em dados de solo, clima e culturas. Com referência aos dados climatológicos, foi necessário usar dados de temperatura mínima e máxima, umidade relativa do ar, velocidade do vento e insolação. Esses dados de elementos do tempo e clima foram retirados das normais climatológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), das cidades de Pompéu, Patos de Minas, Bambuí e Curvelo do estado de Minas Gerais.

A partir da conclusão do teste de consistência dos dados das estações foram selecionados em cada estação o ano com menor precipitação, o ano com maior precipitação e o ano com taxa de precipitação média, baseando-se nos dados históricos das chuvas entre os anos de 1961 – 1990.

Para esses anos foi aplicada a equação do comportamento da vazão do rio segundo Collischon (2008):

$$Q_{(t)} = Q_0 \cdot e^{-t/k} \quad (2)$$

Onde: t é o tempo; Q₀ é vazão num instante t₀; Q_(t) é a vazão no instante t; e é a base dos logaritmos naturais; e k é uma constante (em unidade de tempo).

A constante k é estimada conforme mostra Collischon (2008) utilizando dois valores conhecidos de vazão espaçados por um intervalo de tempo Δt e rearranjando a equação exponencial, como na equação a seguir:

$$k = -\Delta t / \ln(Q_{(t+\Delta t)} / Q_{(t)}) \quad (3)$$

As equações 2 e 3 devem ser aplicadas à períodos sem precipitação.

Collischon (2008) admitindo a ideia que a relação entre armazenamento de água subterrânea e descarga do aquífero para o rio é linear expõe a seguinte equação:

$$V = Q \cdot k \quad (4)$$

Onde: V é o volume de água armazenado pelo aquífero (m^3); Q é a vazão que passa pelo rio durante a estiagem ($m^3.s^{-1}$); e k é uma constante com unidades de tempo (s).

Para estimar a recarga média dos aquíferos é preciso fazer a separação do escoamento superficial de um rio e do escoamento subterrâneo. Para isso foi utilizado um filtro proposto por Eckardt (2005) apud Collischon (2008):

$$b_i = (1 - BFI_{max}) \cdot a \cdot b_{i-1} + (1-a) \cdot BFI_{max} \cdot y_i / 1-a \cdot BFI_{max} \quad (5)$$

Onde: BFI_{max} é o percentual de escoamento subterrâneo que assume valor de 0,80 para rios perenes e aquíferos porosos; b_{i-1} é a vazão do rio para um dia $i - 1$, admitindo-se que toda a vazão desse rio neste dia tenha origem no escoamento subterrâneo; y_i é a vazão no dia i ; a é obtido na seguinte equação:

$$a = e^{-\Delta t/k} \quad (6)$$

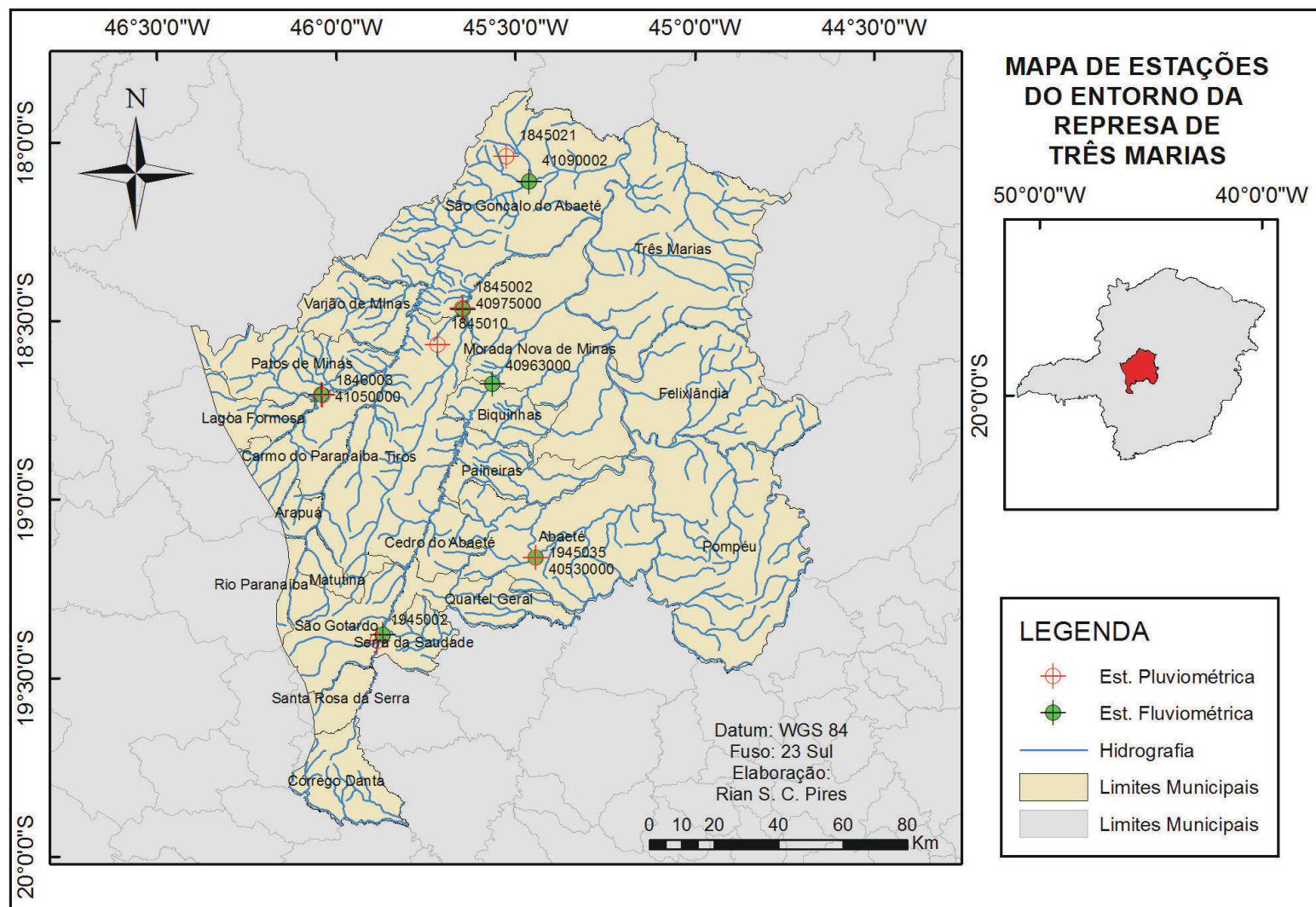
Para certificar-se que em um determinado dia um rio teve toda sua vazão de origem subterrânea foi usada a seguinte equação que de acordo ainda com Collischon (2008) supondo que o escoamento superficial termina D dias após o pico de vazão:

$$D = 0,827 \cdot A^{0,2} \quad (7)$$

Onde: A é a área da bacia em Km^2 e D é dado em dias.

Somando-se a equação 7 com a data quando ocorreu a última precipitação temos a data onde tem fim a contribuição do escoamento superficial para vazão do rio.

A escolha das estações pluviométricas que dão base para os cálculos e avaliação dos dados das estações fluviométricas foi feita através da proximidade dos dois tipos de estação ilustrado na figura 5.



Fonte: ANA, IBGE

Figura 5. Mapa do entorno da represa de Três Marias com localização das estações fluviométricas e pluviométricas.

2.2 MÉTODO PARA O CÁLCULO DA RESERVA PERMANENTE, REGULADORA E TOTAL A PARTIR DE DADOS HIDROGEOLÓGICOS

O cálculo das reservas reguladora, geológicas ou permanentes e totais ou naturais para as unidades aquíferas calculadas no Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Entorno da Represa Três Marias baseou-se nas características hidrodinâmicas definidas a partir dos dados disponíveis no Serviço Geológico do Brasil através do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) e através de porosidades efetivas estipuladas pela literatura. A descrição a seguir é do cálculo das reservas de águas subterrâneas que consta no Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Entorno da Represa Três Marias com todos os créditos de elaboração para a empresa GAMA Engenharia de Recursos Hídricos.

2.2.1 Reserva Permanente

Reserva Permanente ou Geológica (R_p) em aquíferos livres, corresponde ao volume hídrico armazenado no aquífero, na zona saturada e abaixo da variação mínima do nível da superfície potenciométrica por oscilação da variação sazonal (Figura 6). De acordo com GAMA Engenharia de Recursos Hídricos (2014) a reserva permanente é o volume de água armazenada nos aquíferos, enquanto que a reserva reguladora indica as condições de recarga. No caso de aquíferos livres pode-se assumir que a reserva permanente seja igual ao volume de saturação (V_s).

Assim:

$$V_s = A \times h_0 \times n_e = R_p \quad (8)$$

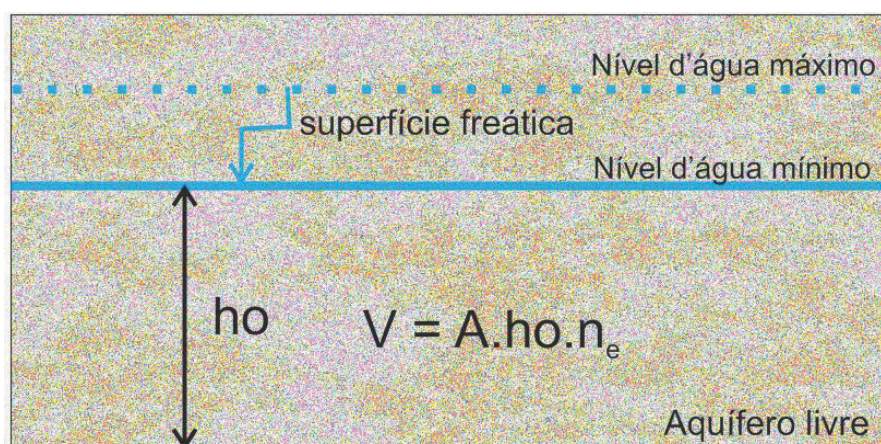


Figura 6. Avaliação da reserva permanente em aquífero livre. Fonte: GAMA Engenharia de Recursos Hídricos (2014).

2.2.2. Reserva Reguladora

A Reserva Reguladora ou Renovável (Rr), em aquíferos livres, pode ser medida pela variação da superfície piezométrica, entre o seu nível mais baixo e o mais alto. Estas reservas também são chamadas de Vazão de Escoamento Natural (VEN) e caracterizam o volume de recarga do aquífero (GAMA Engenharia de Recursos Hídricos, 2014).

A reserva reguladora é obtida pela equação:

$$Rr = A \times \Delta s \times n_e \quad (9)$$

Onde: A é a Área da bacia (m²); Δs = Variação do nível potenciométrico e n_e = Porosidade efetiva.

2.2.3. Reserva Totais ou Naturais

A Reserva Total ou Natural (Rt) são representadas pelo somatório das reservas permanentes com as reservas reguladoras constituindo, assim, a totalidade de água existente em um aquífero ou sistema hidrogeológico (GAMA Engenharia de Recursos Hídricos, 2014). Assim:

$$Rt = Rp + Rr \quad (10)$$

2.3. ÁREA DE ESTUDO

A caracterização da área de estudo baseou-se no Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Entorno da Represa Três Marias elaborado pela empresa GAMA Engenharia de Recursos Hídricos.

2.3.1. Caracterização Geral

A extensão da Bacia Hidrográfica do Entorno da Represa de Três Marias (Figura 5) é de 18.710 Km², com um perímetro de 791,7 Km, abrangendo parcial ou totalmente 23 municípios e uma população estimada de mais de 380.000 habitantes. Ela é caracterizada como a Unidade de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos – UPGRH SF4 de Minas Gerais. Seus principais cursos d'água são: Ribeirão Canabrava, Ribeirão Marmelada, Ribeirão da Extrema, Rio Indaiá, Rio Borrachudo, Ribeirão do Boi, Rio Abaeté, Córrego Santo Inácio e Ribeirão São Bento. As sub-bacias e suas áreas estão apresentadas na Tabela 1.

As análises e avaliações da climatologia da UPGRH SF4 foram realizadas a partir dos dados de três estações climatológicas: Bambuí (83582), Patos de Minas (83531) e Curvelo (83536), fornecidas no banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Tabela 1. Área, rio principal e domínio hidrogeológico de cada sub-bacia da Bacia Hid. do Entorno da Represa de Santa Maria. Fonte: GAMA Engenharia de Recursos Hídricos (2014).

Domínios hidrogeológicos por sub-bacia da UPGRH SF4			
Sub-bacia	Domínios hidrogeológicos	Ha	%
1 - Rio Abaeté	Formações Cenozoicas	32478	6
	Bacias Sedimentares	259068	45
	Poroso/Fissural	287562	50
	Total	579109	100
2 - Rio Borrachudo	Formações Cenozoicas	8500	6
	Bacias Sedimentares	32959	24
	Poroso/Fissural	95426	70
	Total	136885	100
3 - Rio Indaiá	Formações Cenozoicas	3223	1
	Bacias Sedimentares	41663	18
	Poroso/Fissural	187537	81
	Total	232423	100
4 - Ribeirão Sucuriú	Formações Cenozoicas	2853	13
	Poroso/Fissural	19937	87
	Total	22790	100
5 - Ribeirão da Estrema	Formações Cenozoicas	9225	56
	Poroso/Fissural	7369	44
	Total	16594	100
6- Ribeirão São Vicente	Formações Cenozoicas	15049	65
	Bacias Sedimentares	58	0
	Poroso/Fissural	8145	35
	Total	23251	100
7- Ribeirão Marmelada	Formações Cenozoicas	18608	21
	Bacias Sedimentares	457	1
	Poroso/Fissural	68745	78
	Total	87810	100
8-Ribeirão Cana Brava	Formações Cenozoicas	6615	16
	Poroso/Fissural	34723	84
	Total	41338	100
9 - Rio do Bagre	Formações Cenozoicas	7929	49
	Poroso/Fissural	8235	51
	Total	16164	100
10 - Riacho Fundo	Formações Cenozoicas	7510	69
	Poroso/Fissural	3449	31
	Total	10959	100
11- Ribeirão Peixe	Formações Cenozoicas	15130	41
	Poroso/Fissural	21797	59
	Total	36927	100

Tabela 1. Área, rio principal e domínio hidrogeológico de cada sub-bacia da Bacia Hidrográfica do Entorno da Represa de Santa Maria. Fonte: GAMA Engenharia de Recursos Hídricos (2014) - CONTINUAÇÃO.

Domínios hidrogeológicos por sub-bacia da UPGRH SF4 - CONTINUAÇÃO			
Sub-bacia	Domínios hidrogeológicos	Ha	%
12 - Córrego Riachão	Formações Cenozoicas	1650	33
	Poroso/Fissural	3278	67
	Total	4928	100
13 – Ribeirão Estrema Grande	Formações Cenozoicas	7675	20
	Poroso/Fissural	31432	80
	Total	39108	100
14 -Ribeirão do Boi	Formações Cenozoicas	3579	47
	Poroso/Fissural	4082	53
	Total	7661	100
15–Córrego do Barrão	Formações Cenozoicas	18774	34
	Poroso/Fissural	36096	66
	Total	54870	100
16 -Córrego da Tolda	Formações Cenozoicas	8061	35
	Poroso/Fissural	15102	65
	Total	23162	100

A temperatura média anual da UPGRH SF4 oscila entre 19 e 24°C. O verão e a primavera são os períodos mais quentes, quando as máximas diárias variam em torno de 26 a 32°C. Os dados calculados para as temperaturas são das normais climatológicas do período entre 1961 a 1990.

De acordo com o balanço hídrico climatológico que se baseou na série histórica de precipitação, o ano hidrológico inicia em outubro, onde ocorre excedente hídrico que vai até abril (Figura 7). A partir de março inicia o período de estiagem, consistindo o mês de agosto de maior déficit hídrico.

A bacia hidrográfica do entorno da barragem de Três Marias (MG) está situada em uma região de clima tropical, caracterizado por verões quentes e com grande volume de chuva e inverno frio com período de estiagem. Para o presente estudo foi destacado o período de estiagem como subsídio para verificar o comportamento típico da recessão dos hidrogramas dos rios da região, conhecendo assim o nível da água subterrânea de aquíferos da região da Bacia Hidrográfica do Entorno da Represa de Três Marias.

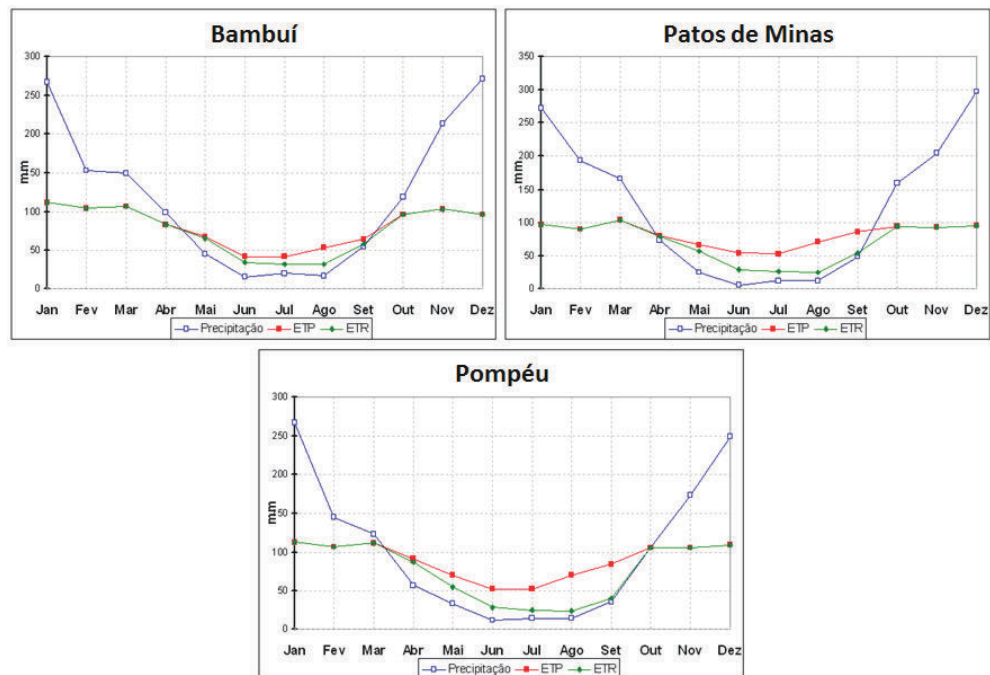


Figura 7 – Balanço Climatológico próximo a Bacia Hidrográfica do Entrono da Represa de Três Marias. Fonte: INMET (2014).

2.3.2. Caracterização Hidrogeológica

As descrições sobre a água subterrânea no Brasil baseiam-se, principalmente, nos resultados obtidos pioneiros da elaboração do Mapa Hidrogeológico do Brasil (BRASIL, DNPM, 1983). Diante dessa metodologia, a caracterização das águas subterrâneas da UPGRH SF4 fundamentou-se na caracterização dos Domínios Hidrogeológicos determinados pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2007), nos dados hidrogeológicos contidos no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS – CPRM), observações em campo e na caracterização geológica realizada neste estudo para a UPGRH SF4. Desta forma, na área de estudos são encontrados 3 domínios hidrogeológicos subordinados a unidades geológicas verificadas na bacia, sendo eles:

- ✓ Domínio Hidrogeológico Formações Cenozoicas: formado pelos Depósitos aluvionares, Depósitos aluvionares antigos, Coberturas detrito-lateríticas ferruginosas. O domínio hidrogeológico Formações Cenozoicas é do tipo poroso;
- ✓ Domínio Hidrogeológico Bacias Sedimentares: formado a partir das unidades Grupo Mata da Corda e Grupo Aerado. O domínio hidrogeológico Bacias Sedimentares é do tipo poroso;

- ✓ Domínio Hidrogeológico Poroso/Fissural: formado a partir das unidades Formação Três Marias, Subgrupo Paraopeba, Formação Lagoa do Jacaré, Formação Serra da Saudade, Formação Serra de Santa Helena e Formação Canastra Indiviso. Apesar de também ser do tipo poroso predomina, ao longo do domínio hidrogeológico Poroso/Fissural, o tipo fissural. Esse domínio prevalece como área aflorante da bacia hidrográfica do entorno da represa de Três Marias. A Figura 8 apresenta o mapa geológico da Bacia.

A título de conhecimento, a Bacia sedimentar do São Francisco é caracterizada principalmente por sedimentos pelítico-carbonáticos do Grupo Bambuí e por quartzitos, metassiltitos e filitos do Super-Grupo Araí. O Grupo Bambuí é constituído pelo Subgrupo Paraopeba e pela Formação Três Marias. O Subgrupo Paraopeba está subdividido em 4 Formações: Formação Serra da Saudade, Formação Lagoa do Jacaré, Formação Serra de Santa Helena e Formação Sete Lagoas. Essas Formações são caracterizadas basicamente por siltitos e folhelhos intercalados com calcários e dolomitos; a Formação Sete Lagoas caracterizada por conglomerados e diamictitos que são denominados de Formação Jequitaí. A Formação Três Marias é caracterizada por intercalações de arcósios e siltitos (Braun et al., 1990).

Mesmo com a classificação sedimentar que poderia conferir um comportamento poroso (granular) para as formações do Grupo Bambuí há um controle lito-estrutural relevante nesses sedimentos pelíticos-carbonáticos que apresenta um comportamento fissural para muitas formações desse Grupo (GAMA Engenharia de Recursos Hídricos, 2014). Atman et. al (2011) caracterizaram que as rochas siliciclásticas do Grupo Bambuí têm baixa porosidade primária devido a textura, cimentação ferruginosa e/ou recristalização sendo que as referidas autoras em seus mapeamentos hidrogeológicos no norte de Minas Gerais optaram por agrupar essas rochas de acordo com suas propriedades hidrogeológicas, em lugar de utilizar sua divisão litoestratigráfica, compelindo, em muitos casos, o controle estrutural para a circulação da água subterrânea no Grupo Bambuí. O controle estrutural predominante nas unidades geológicas do Grupo Bambuí também foi observado para o Domínio Hidrogeológico Poroso/Fissural da bacia UPGRH SF4 durante a etapa de reconhecimento e levantamento de campo para este trabalho (GAMA Engenharia de Recursos Hídricos, 2014).

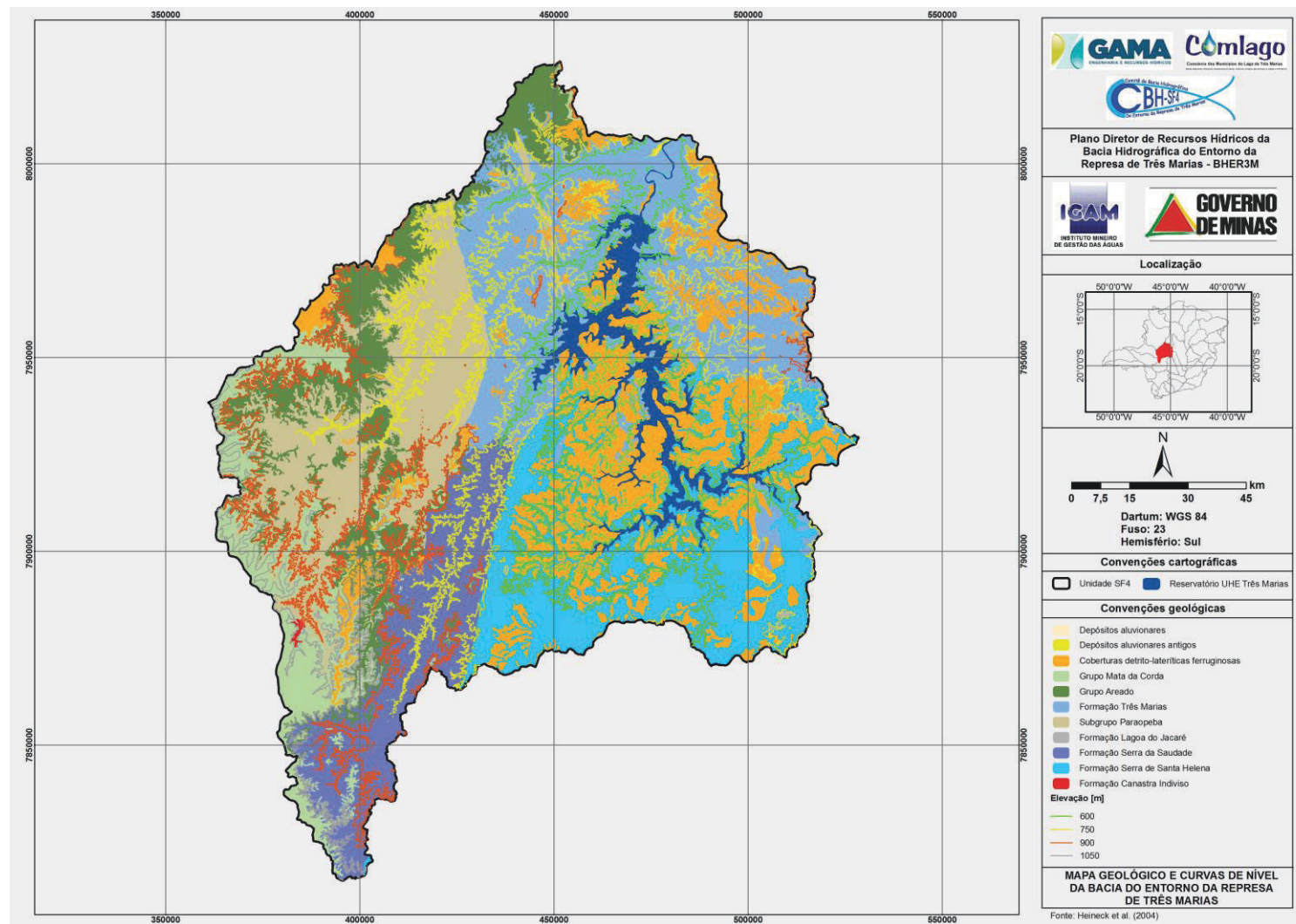


Figura 8 – Mapa geológico da Bacia Hidrográfica do Entorno da Represa de Três Marias. Fonte: GAMA Engenharia de Recursos Hídricos (2014).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A estimativa do volume da reserva reguladora a partir da análise da recessão do hidrograma tem início com o tratamento de dados de estações fluviométricas. Os dados utilizados no estudo foram retirados das já citadas estações: Fazenda São Felix, Major Porto, Barra do Funchal, Abaeté e Ponte BR-040.

Foi feito um teste de consistência dos dados porque conforme informa Tucci, 2005 antes de qualquer simulação é necessário examinar os dados básicos utilizados em conjunto, pois podem criar forte tendenciosidade nas estimativas como no ajuste dos parâmetros. Para tanto usamos o método de comparação entre a ETP, calculado pelo programa CROPWAT 8.0 com dados das normais climatológicas do INMET, e ETR calculada a partir dos dados de estações fluviométricas e pluviométricas. Com esse teste foi observado que apenas duas estações apresentavam dados consistentes que permitiriam o cálculo da reserva reguladora de água subterrânea baseando-se no escoamento de base, sendo elas as estações Fazenda São Felix e Abaeté. Logo, em função da inconsistência dos dados de precipitação e/ou dados fluviométricos, as estações de Major Porto, Barra do Funchal e Ponte BR-040 não puderam ser consideradas para cálculo da reserva reguladora.

A partir de análise minuciosa para as duas estações foram definidos, no período de 1968 – 2014, os anos de maior precipitação, o de menor precipitação e um ano com precipitação média. Utilizando dados de meses de estiagem do ano com menor precipitação, 27 de julho à 1 de agosto de 1975 na estação Abaeté e 1 à 4 de outubro de 1994 na estação Fazenda São Felix, foi definida a constante k para ambas estações através da equação 3. Os anos e a constante k de cada estação estão discriminados na Tabela 2.

Tabela 2: Estações com anos selecionados e a constante k calculada.

Estações	Ano seco	Ano médio	Ano úmido	Constante k (dias)
Fazenda São Felix	1994	1972	1971	40,4
Abaeté	1975	1984	1981	72,47

A partir das análises dos pluviogramas e com dados diários das vazões das estações, onde foram montados hidrogramas das vazões dos rios para os anos selecionados, foi aplicada a equação 5 aos dados do hidrograma e obtidas as separações dos escoamentos de bases dos rios (Figuras 9 a 20).

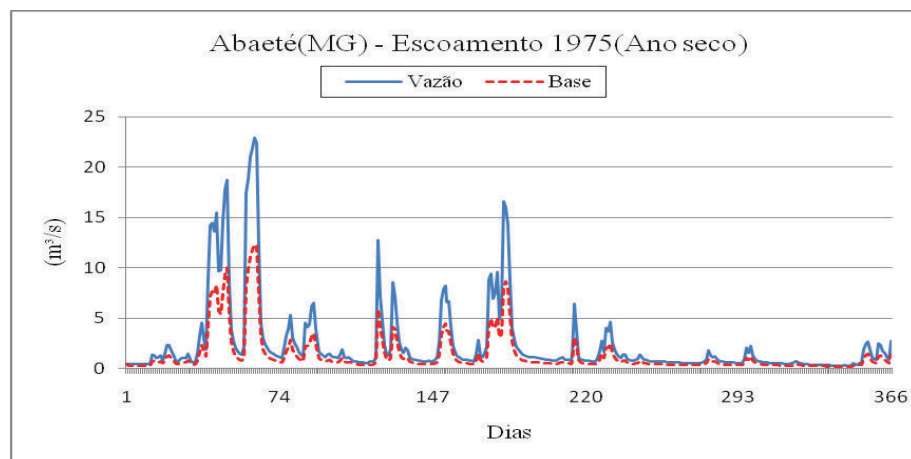


Figura 9. Vazão e escoamento de base do Ribeirão Marmelada em 1975 – Est. Abaeté.

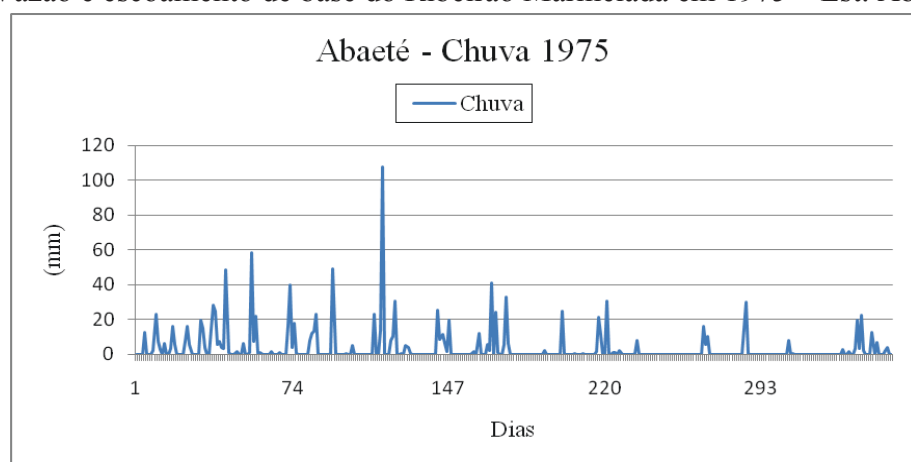


Figura 10. Precipitação diária em Abaeté no ano hidrológico de 1975.

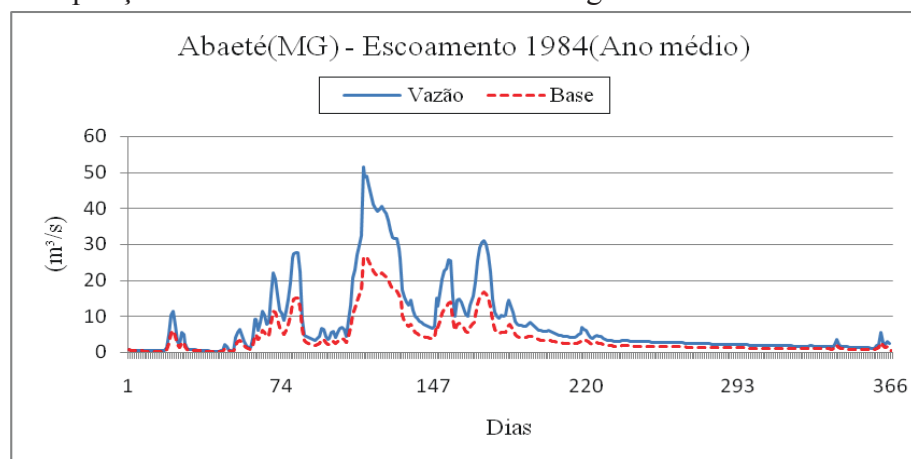


Figura 11. Vazão e escoamento de base do Ribeirão Marmelada em 1984 – Est. Abaeté.

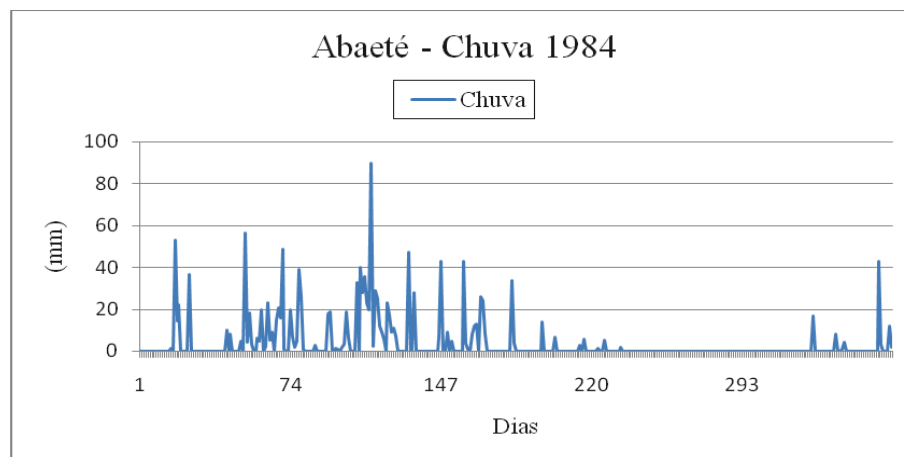


Figura 12. Precipitação diária em Abaeté no ano hidrológico de 1984.

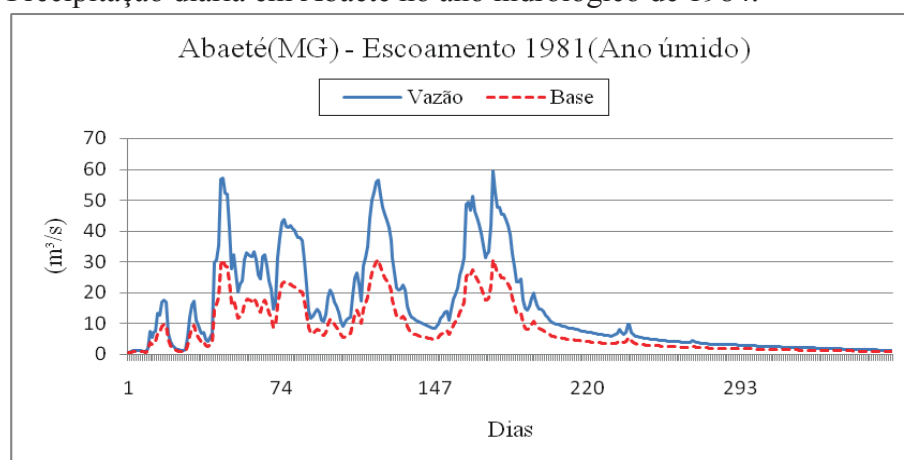


Figura 13. Vazão e escoamento de base do Ribeirão Marmelada em 1981 – Est. Abaeté.

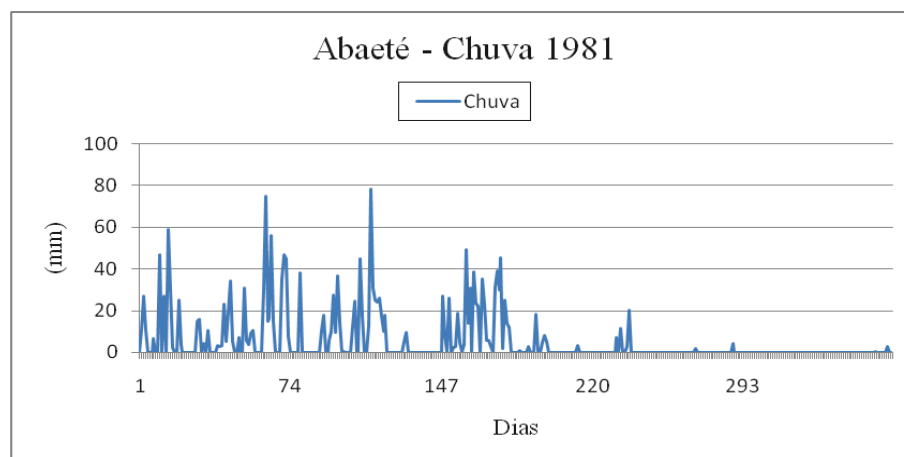


Figura 14. Precipitação diária em abaeté no ano hidrológico de 1981.

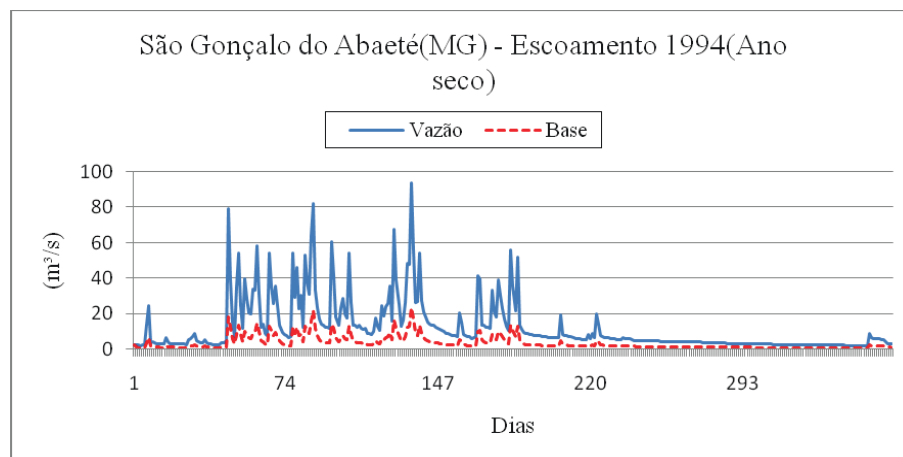


Figura 15. Vazão e escoamento de base do Rio Borrachudo em 1994 – Est. Faz. São Felix.

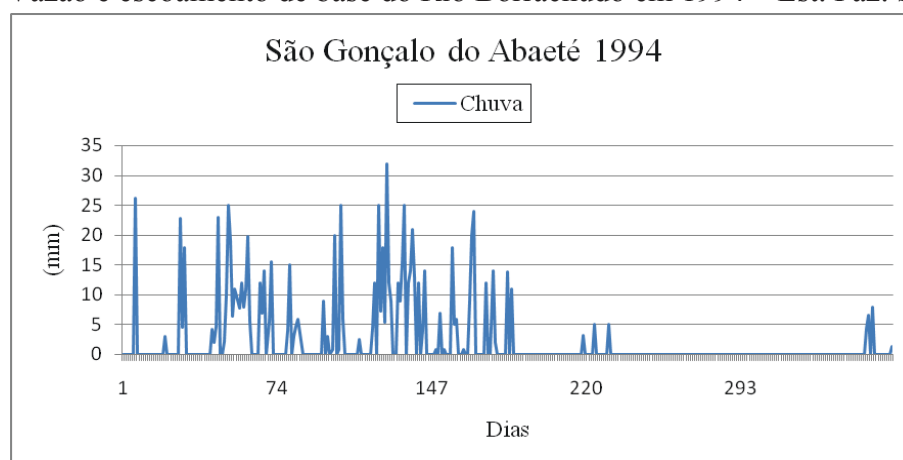


Figura 16. Precipitação diária em S. Gonçalo do Abaeté no ano hidrológico de 1994.

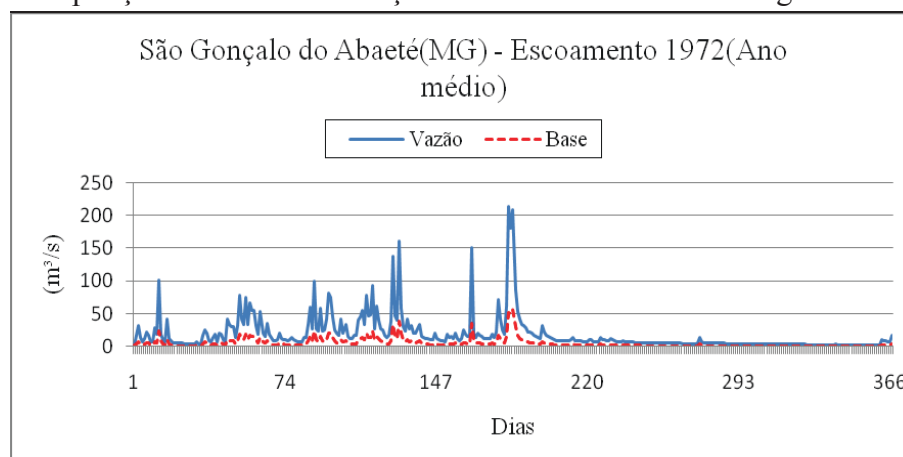


Figura 17. Vazão e escoamento de base do Rio Borrachudo em 1972 – Est. Faz. São Felix.

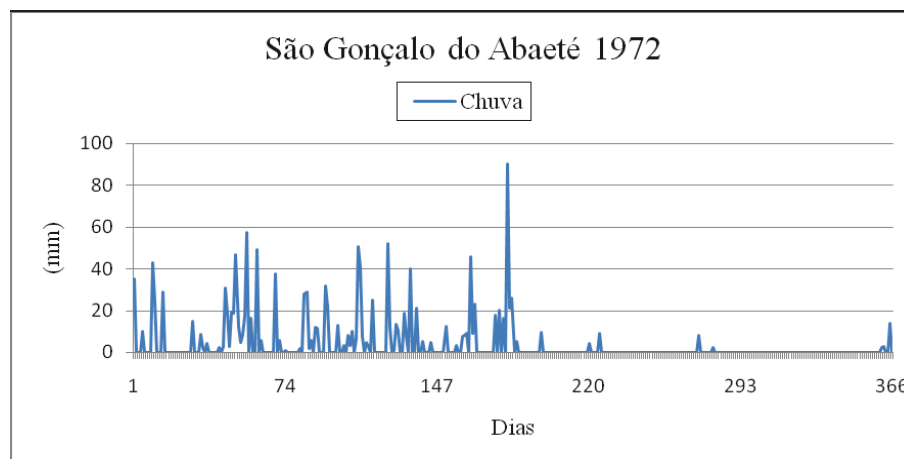


Figura 18. Precipitação diária em S. Gonçalo do Abaeté no ano hidrológico de 1972.

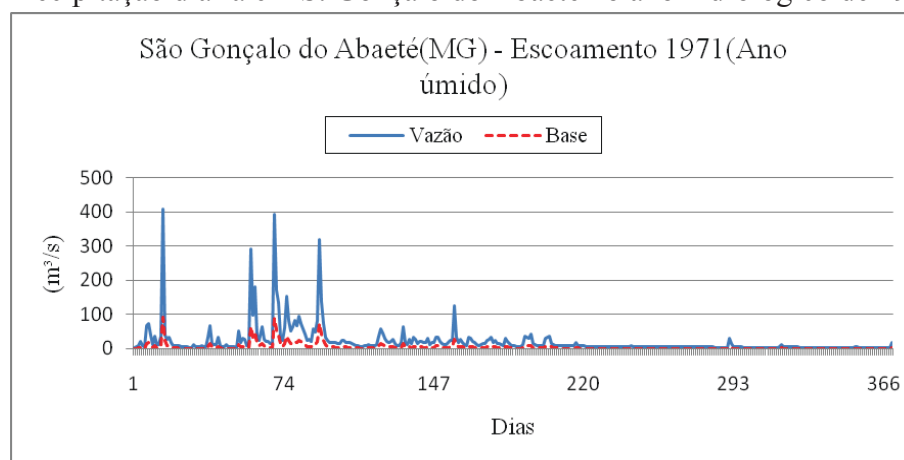


Figura 19. Vazão e escoamento de base do Rio Borrachudo em 1971 – Est. Faz. São Felix.

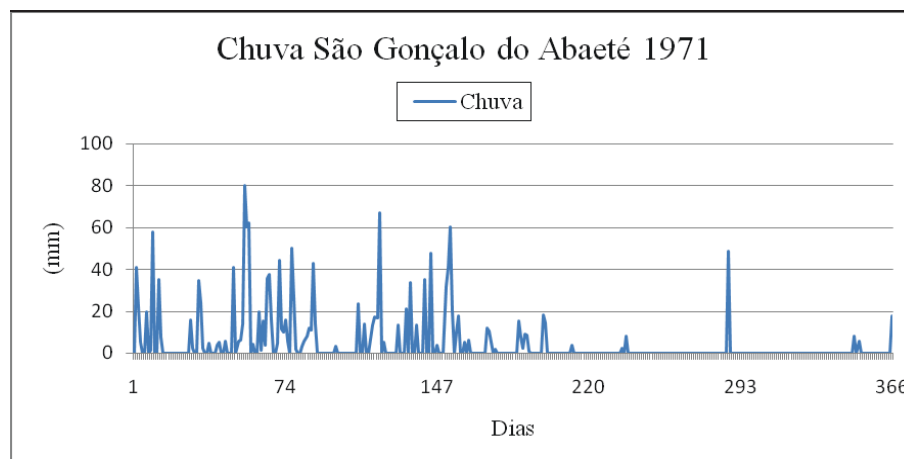


Figura 20. Precipitação diária em S. Gonçalo do Abaeté no ano hidrológico de 1971.

Através da equação 5 foi possível calcular o escoamento de base diário do Rio Borrachudo e do Ribeirão Marmelada. Posteriormente foi calculado para cada um, o total anual de escoamento de base. E o total foi usado na equação 4 para assim estimar o volume da reserva de água subterrânea. Os resultados apresentam-se na Tabela 3.

Tabela 3: Volume da reserva reguladora de água subterrânea na região de Abaeté e Fazenda São Félix calculada pelo escoamento de base.

Reserva de água subterrânea pelo escoamento de base				Unidade Aquífera
Estação Fluviométrica	Ano Seco	Ano Médio	Ano Úmido	
Abaeté	1975	1984	1981	Serra Santa Helena
Volume (m³/ano)	2995063815	9733406508	18157438793	
Volume (km³/ano)	3,00	9,73	18,16	
Fazenda São Félix	1994	1972	1971	Paraopeba
Volume (m³/ano)	1743240500	6372469824	7087716039	
Volume (km³/ano)	1,74	6,37	7,09	

A empresa GAMA Engenharia de Recursos Hídricos (2014) calculou os valores para as Reservas Permanentes (Equação 8), Reguladora (Equação 9) e Totais (Equação 10) para as unidades aquíferas, baseando-se nas características hidrodinâmicas definidas a partir dos dados disponíveis no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas do Serviço Geológico do Brasil e através de porosidades efetivas estipuladas pela literatura. Os dados utilizados nos cálculos das reservas foram apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros utilizados no cálculo da UPRGH SF4. Fonte: GAMA Engenharia de Recursos Hídricos (2014).

Unidade aquífera	Sedimento/ litologia	A (km²)	Ho (m)	n _e (%)	Δs (m)
Paraopeba	Arcóseo, siltito e argilito e, tma com arenitos	2.630,11	53	5,0	24
Serra da Saudade	Siltito e argilito verdes, arenito e arcóseo	1.887,83	140	5,0	19
Serra Santa Helena	Ardósia, folhelho, siltito, marga e calcário	2.758,20	114	5,0	22
Três Marias	tm com arcóseo, siltito e argilito e, tma com arenitos	3.627,97	86	5,0	23

A Tabela 5 apresenta as estimativas para reserva de água subterrânea realizada pela GAMA Engenharia de Recursos Hídricos (2014). A reserva reguladora calculada para a unidade aquífera Serra Santa Helena, baseada em dados hidrogeológicos (GAMA Engenharia de Recursos Hídricos, 2014) foi 3,03 km³/ano e o cálculo baseado no escoamento de base para o ano seco foi 3,00 km³/ano que corresponde a análise da estação fluviométrica de Abaeté.

Tabela 5: Volume das reservas de águas subterrâneas para região do entorno da represa de Três Marias. Fonte: GAMA Engenharia de Recursos Hídricos (2014).

Unidade Aquífera	Reserva Permanente (Km ³)	Reserva Reguladora (Km ³ /ano)	Reserva Total (Km ³)
Paraopeba	6,97	3,16	10,13
Serra da Saudade	13,21	1,79	15,01
Serra Santa Helena	15,72	3,03	18,76
Três Marias	15,6	4,17	19,77

Para a unidade aquífera Formação Paraopeba, a reserva reguladora do Plano de Recursos Hídricos da Bacia UPRGH SF4 foi 3,16 km³/ano e, a calculada para este trabalho foi mais conservadora, resultando num valor de 1,74 km³/ano que se baseou na análise da estação fluviométrica Fazenda São Felix para um ano de seca.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Seis estações foram selecionadas para o cálculo da reserva de água subterrânea no entorno da represa de Três Marias. Apenas as estações Abaeté e Fazenda São Félix apresentaram dados consistentes, que não representavam tendenciosidade nas estimativas.

A estação Abaeté encontra-se no ribeirão Marmelada, no município de Abaeté, na unidade aquífera Serra de Santa Helena. A estação Fazenda São Félix encontra-se no rio Borrachudo, no município de São Gonçalo do Abaeté, na unidade aquífera Paraopeba. As reservas calculadas a partir da curva de recessão para estação Abaeté e para estação Fazenda São Félix respectivamente foram de 3,00 km³ e 1,74 km³ para o ano seco; 9,73 km³ e 6,37 km³ para o ano médio e 18,16 km³ e 7,09 km³ para o ano úmido.

Comparando os resultados da reserva reguladora do Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do entorno da Represa de Três Marias foi apresentado uma correspondência de 99% em relação a estação Abaeté (Unidade aquífera Santa Helena) e de 55% em relação a estação Fazenda São Félix (Unidade aquífera Paraopeba) para o ano mais seco das sub-bacias.

5. REFERÊNCIAS

- ATMAN, D., MENEGASSE, L. N. V.; FANTINEL, L. M. Controle estrutural na circulação e composição das águas no sistema aquífero cárstico-fissural do Grupo Bambuí, norte de Minas Gerais. *Águas Subterrâneas*, v.25, n.1, p.74-90, 2011.
- BRAUN, O.P.G, MELLO, U. & DELLA PIAZZA, H. Bacias proterozóicas brasileiras com perspectivas exploratórias para hidrocarbonetos. Origem e Evolução de Bacias Sedimentares. Petrobras-Rio de Janeiro. 1990.
- CARVALHO, P. R DE S., GUIMARÃES, R. F. E CARVALHO-JR, O. A DE. Análise Comparativa de Métodos para Delimitação Automática das Sub-bacias do Alto Curso do Rio Preto. *Espaço & Geografia*, Vol.13, No 2 (2010), 227:307
- CLEARY R B. Águas subterrâneas ABRH. 112 p. 2007.
- COLLISCHON W; TASSI R.Introduzindo hidrologia Porto Alegre: IPHUFGRS. 149 p. 2008.
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Mapa de Domínios/Subdomínios Hidrogeológico do Brasil. 2007. http://www.cprm.gov.br/publique/media/evento_PAP002766.pdf
- FAO© 2009. CROPWAT versão 8.0. Has been developed by Joss Swennenhuis for the Water Ressources Development and Management Service of FAO.
- FEITOSA FAC et al. (2008) Hidrogeologia: conceitos e aplicações Rio de Janeiro: CPRM: LABHID. 812 p.
- HIDROWEB/ANA. Agência Nacional de Águas. Disponível: <http://hidroweb.ana.gov.br/>. Acessado em: 05 de outubro, 2014.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Malha geométrica dos municípios de Minas Gerais. Disponível: ftp://geoftp.ibge.gov.br/malhas_digitais/municipio_2010/mg.zip. Acessado em: 12 de novembro, 2014.
- INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. Normais climatológicas do Brasil 1961 - 1990. Disponível: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>. Acessado em: 05 de outubro, 2014.
- LEI Nº 9.433, DE 8 DE JANEIRO DE 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989.**
- LINSLEY, R. K., FRANZINI, J. B, FREYBERG, D. L. Water Resources Engineering Paperback. 1992.
- Ministério do Meio Ambiente (2007) Águas subterrâneas um recurso a ser conhecido e protegido Brasília: Secretaria de recursos hídricos e ambiente urbano. 38 p.

Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Entorno da Represa Três Marias elaborado pela empresa GAMA Engenharia de Recursos Hídricos. GAMA-COMLAGO-PLAN-RT-MG-02.00-REV00. 2013.

TUCCI CEM (2001) Hidrologia: ciência e aplicação Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS: ABRH. 943 p.

TUCCI CEM (2005) Modelos hidrologicos Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS: ABRH. 680 p.