

IV-008 - UTILIZAÇÃO DE MODELAGEM COMPUTACIONAL HIDRÁULICO-HIDROLÓGICA PARA APOIO AO DIMENSIONAMENTO DE BARRAGENS DE CONTROLE DE VAZÃO

Marina Fernandes Alvarenga⁽¹⁾

Engenheira Civil pela Universidade Federal de Viçosa

Lineker Max Goulart Coelho⁽²⁾

Engenheiro civil, 2011, Duplo-diploma: UFMG e Ecole des Ponts Paristech; M. S. Engenharia Sanitária e Ambiental, 2011, Ecole des Ponts Paristech (Validado em 2012 pela UFMG); Especialista em Engenharia de Estruturas, 2014, UFMG; Doutorado em Saneamento Meio ambiente e Recursos Hídricos, UFMG.

Endereço⁽¹⁾: Rua José Vicente, 180 – Novo Horizonte – Lagoa Formosa - MG - CEP: 38720-000 - Brasil - Tel: (34) 9-9228-0760 - e-mail: alvarengamarinaf@gmail.com

RESUMO

Tendo em vista a ocorrência de falta de água para o abastecimento urbano na cidade de Rio Paranaíba no período de seca do ano de 2014, esse trabalho visou o estudo de viabilidade hidrológica da construção de uma barragem de regularização de vazão como alternativa para solucionar este problema. Foi realizada a análise de séries históricas de dados pluviométricos da região. Fazendo-se a caracterização hidrológica da bacia de contribuição do ponto de estudo, analisando tempo de concentração, hietogramas e hidrogramas de projeto, além da variação do volume de acumulação de água em função da altura da barragem. Com o auxílio do programa HEC-HMS foi dimensionado o vertedouro da barragem. Foi determinado que seria necessário um volume aproximado de 520 mil metros cúbicos de água a ser acumulado. Prevendo um crescimento da demanda, ficou determinado uma altura ideal da lâmina d'água na barragem de 5,5 metros. Foi determinado a necessidade de um vertedouro em perfil Creager de 40 metros de comprimento, atingindo uma altura de lâmina d'água no vertedouro de 1,3 metros para a precipitação de tempo de retorno de 500 anos.

PALAVRAS-CHAVE: Controle de Vazão, Reservatório, Simulação Computacional.

INTRODUÇÃO

A cidade de Rio Paranaíba em Minas Gerais possui, aproximadamente, 11.885 habitantes (IBGE, 2010), sendo que, a partir do ano de 2006, apresentou um crescimento acentuado, devido à instalação do campus de Rio Paranaíba da Universidade Federal de Viçosa. Esse crescimento ocorreu sem nenhum planejamento urbano. Durante o período de seca do ano de 2014, a população enfrentou a falta de água para o abastecimento da cidade, visto que a Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA) não possuía reservatório de água suficiente para atender a demanda.

O barramento de cursos d'água para a formação de lagos artificiais constitui uma das mais antigas técnicas para aumentar as disponibilidades hídricas para atendimento de demandas por água pela sociedade. As barragens são dotadas de mecanismos de controle com a finalidade de obter a elevação do nível de água ou criar um reservatório de acumulação de água ou de regularização de vazões (ATLAS, 2011).

O objetivo desse trabalho é por meio da modelagem computacional hidráulico-hidrológica dimensionar uma barragem de controle vazão como solução para a falta de água para o abastecimento urbano de Rio Paranaíba.

METODOLOGIA

A princípio foi feito um levantamento da demanda de água do município de Rio Paranaíba por meio de dados fornecido pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA) responsável pelo fornecimento de água para a cidade. Foram fornecidos dados da localização do atual sistema de captação de água e a forma de captação, capacidade de tratamento de água e quantificação atual e futura de consumo de água do município.

Para o estudo hidrológico e hidráulico primeiramente foi determinada uma série histórica de dados pluviiais da região, para essa determinação foram analisados dados de estações pluviométricas da Agência Nacional das Águas disponibilizados no site HidroWeb (ANA, 2014). Primeiro foi determinada a sub-bacia a que o município de Rio Paranaíba pertence de acordo com a caracterização da ANA. A partir desse dado, foram selecionadas as estações próximas ao município que pertencem à mesma sub-bacia e que possuem dados históricos completos e de grande amplitude, superior a 30 anos. A empresa Cooxupé, Cooperativa Regional de Cafeicultores em Guaxupé Ltda, possui uma estação meteorológica localizada na cidade de Rio Paranaíba, com dados pluviométricos dos anos de 2010 a 2014. Esses dados foram utilizados para determinar a consistência da série histórica escolhida no HidroWeb

A seleção da área para localização da bacia foi feita por sensoriamento remoto utilizando pela metodologia desenvolvida por Faria Filho (2007) utilizando dados de modelo de elevação do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) disponibilizados pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) no site Topodata (INPE, 2015) e os recursos do programa ArcGis 10.1. A determinação das curvas cota \times volume e das características topográficas das bacias de contribuição e seus parâmetros foi feita utilizando o programa ArcGis. A figura 1 apresenta a sequência seguida para determinação dos volumes e área ocupados pela água em relação à altura da barragem. Com os dados extraídos do ArcGis foram determinadas as curvas Cota \times Volume e Cota \times Área.

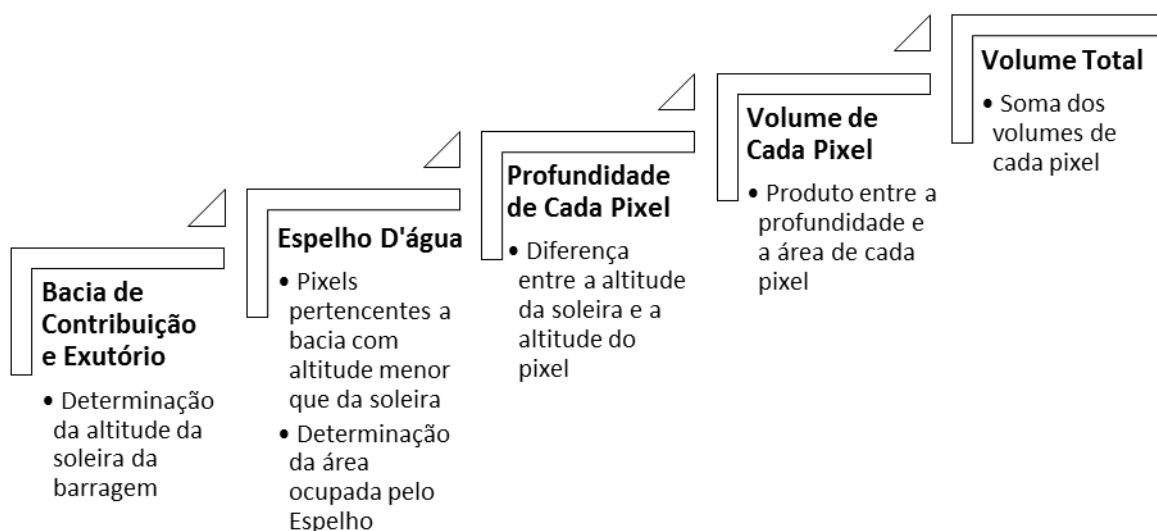


Figura 1: Sequência para determinação da relação cota x volume

O tempo de concentração da bacia de estudo foi estimado pelas seguintes formulações: Fórmula de Kirpich; Escoamento Superficial SCN, 1975; Método NRCR, 1972; Fórmula Califórnia Curverts Practice; Fórmula de Dooze e Fórmula de Bransby-Williams, a primeira proposta por Tucci (2013) e as demais apresentadas por Tomaz (2013). O valor final utilizado no estudo foi a média encontrada nos métodos desprezando os valores de máximo e mínimo, visando a média com menor desvio padrão entre os valores considerados.

O hidrograma unitário, que consiste na relação entre o escoamento e o tempo para um determinado evento de chuva, neste caso uma precipitação de volume unitário, foi determinado para bacia através do método sintético simplificado do *Soil Conservation Service* (SCS). O método do SCS determina o hidrograma unitário como sendo um triângulo, cujas fórmulas para a sua determinação dependem da área da bacia e do tempo de concentração (TUCCI, 2013).

A figura 2 apresenta os parâmetros de um hidrograma unitário triangular pelo método SCS, sendo t_r a duração da precipitação unitária, t_p o tempo de pico, t'_p o tempo contado do início da precipitação até o ponto de pico, t_e o tempo de descida e q_p a vazão de pico.

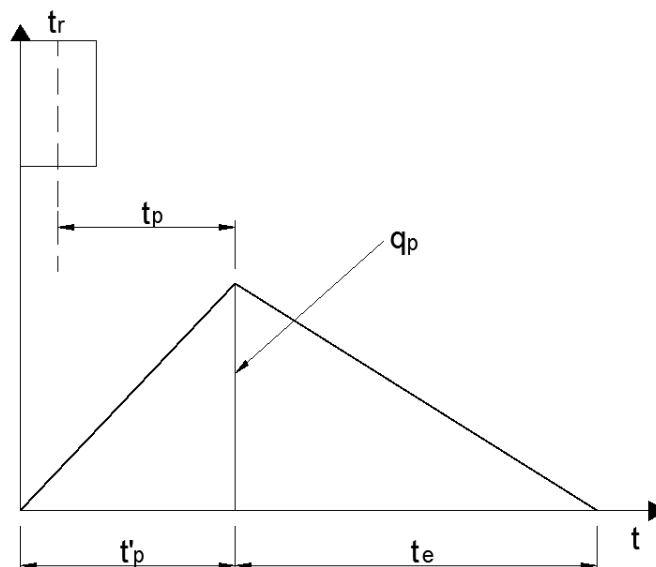


Figura 2: Hidrograma triangular SCS.
Fonte: Tucci, 2013.

A precipitação máxima é entendida como a ocorrência extrema, com duração, distribuição temporal e espacial críticas para uma área ou bacia hidrográfica. O estudo das precipitações máximas é um dos caminhos para conhecer-se a vazão de enchente de uma bacia. Essas precipitações são retratadas pontualmente pelas curvas de intensidade, duração e frequência (i-d-f) (TUCCI, 2013). Pela equação de intensidade, duração e frequência, obtida no programa Plúvio 2.1 (GPRH, 2015), foi determinada a intensidade máxima média de precipitação da região, para o tempo de retorno de 100 e 500 anos e tempo de duração igual ao tempo de concentração. Esse valor foi utilizado para determinação do hietograma de projeto por meio do Diagrama de Huff.

Para determinação de um hietograma de projeto é necessário o conhecimento da distribuição temporal da chuva máxima. Uma forma de obter essa distribuição é através do Diagrama de Huff que são curvas dos valores acumulados adimensionais de chuva em função da porcentagem do tempo decorrido.

Segundo o Atlas Digital das Águas de Minas (2011) o período de retorno recomendado para o dimensionamento da vazão máxima de cheia para pequenas barragens é de 500 anos para as regiões hidrográficas dos rios Paranaíba e Grande em território mineiro e 100 anos para as demais regiões hidrográficas. Por isso foi utilizado os hietogramas de 500 anos para o dimensionamento da barragem e os de 100 anos para verificação da altura da lâmina d'água. O hidrograma de projeto foi estabelecido pela interpolação do hietograma de projeto e o hidrograma unitário anteriormente determinados considerando um tempo unitário igual à 5% do tempo de concentração.

O dimensionamento do volume útil do reservatório foi estimado pelos métodos do Balanço Hídrico e Método do Diagrama de Massas. O método do Balanço Hídrico é feito considerando a diferença entre o somatório das vazões que contribuem positivamente ao reservatório e o somatório das vazões de retirada, sendo vazões positivas as precipitações e vazões afluentes do rio, e vazões negativas as perdas por evaporação e infiltração, vazão de restituição e vazões derivadas ou de consumo (TUCCI, 2013). O método do Diagrama de Massas ou Diagrama de Rippl é um diagrama de volumes acumulados que afluem ao reservatório, e tem, nas ordenadas, os valores acumulados das vazões médias e, nas abscissas, os respectivos intervalos de tempo considerados. O volume necessário para o reservatório é ($Vol_{nec} - Vol_{af}$) que é igual à soma de δ_1 e δ_2 , esses termos são mostrados na figura 3 (LOPES e SANTOS, 2002).

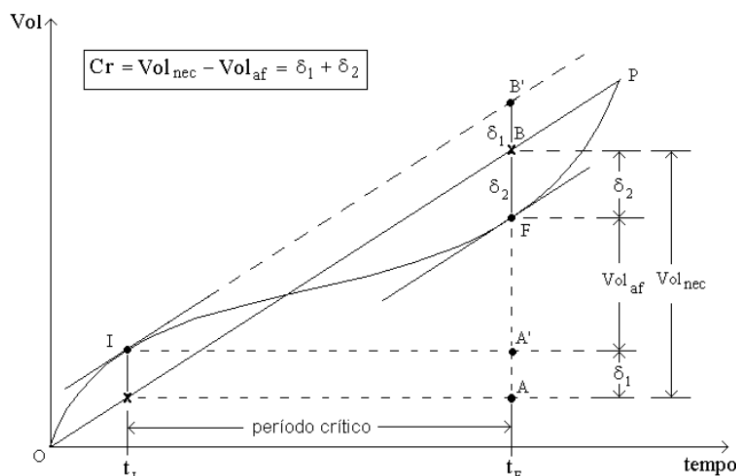


Figura 3: Diagrama de Rippl.
Fonte: Lopes e Santos, 2012.

O perfil de vertedor Creager costuma ser adotado para barragens pois além de favorecer o rápido escoamento da vazão ou descarga, impede a ocorrência de efeitos nocivos à estrutura, a exemplo das pulsações e vibrações da veia líquida (HELLER e PÁDUA, 2010). A figura 4 apresenta a representação gráfica do perfil Creager, identificando h_c , que é a altura da lâmina d'água no vertedor, e a delimitação do perfil para $h_c = 1$ m.

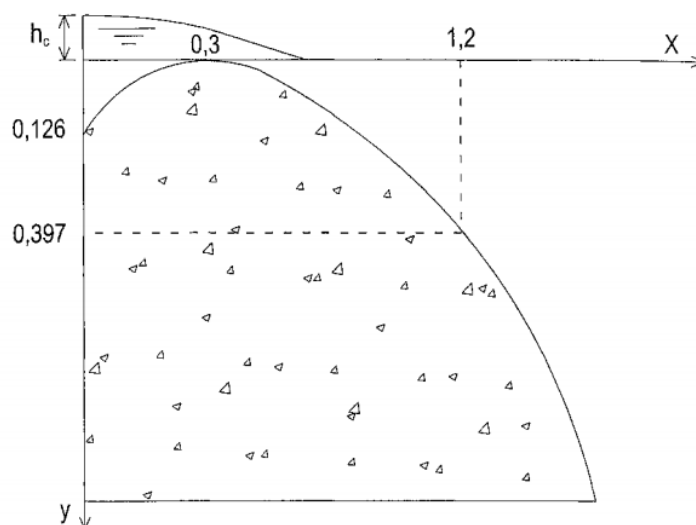


Figura 4: Perfil Creager para vertedor de barragem.
Fonte: Heller e Pádua, 2010

Foi dimensionado o vertedouro de perfil Creager para a barragem com hidrograma de projeto de tempo de retorno de 500 anos e verificada a altura da lâmina d'água pra a chuva de 100 anos. Essa verificação foi realizada com auxílio do programa HEC-HMS que é um programa desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos da América (*US Army Corps of Engineers*), Centro de Engenharia Hidrológica (Hydrologic Engineering Center - HEC) com a finalidade de simular os processos de chuva-deflúvio em bacias hidrográficas. O software pode ser utilizado para várias situações, como, por exemplo, previsão de eventos de infiltração, evaporação, hidrogramas unitários e simulação de escoamento, sendo aplicável a grandes e pequenas bacias. Além disso, é de domínio público com grande aceitação em todo mundo (USACE, 2015). Os dados de vazão do perfil creager foram detemrinados pela equação apresentada por Heller e Pádua (2010) para vazão de saída de vertedouro Creager.

RESULTADOS

Em fevereiro de 2015, o sistema de abastecimento de água de Rio Paranaíba atendia à aproximadamente 11.000 habitantes, com produção média de 53.717 m³ de água por mês e consumo médio de 42.248 m³ de água por mês. Sua captação era feita em surgências através de minas, o sistema possuía capacidade média de produção de 2,2 milhões de litros de água por dia e reservação de 834 mil litros. A empresa responsável pelo abastecimento da cidade não possuía previsão da demanda futura, desta forma o aumento da população foi estimado pelos dados do IBGE que apresentou uma taxa de crescimento de 4% em 4 anos.

A série histórica de dados pluviométricos utilizada no estudo foi da estação 1946022 da Agência Nacional das Águas localizada na cidade de Carmo do Paranaíba, e teve a consistência dos seus dados comprovada pela comparação com os dados da estação 1946008 da cidade de Serra do Salitre e com a estação local pertencente à empresa Cooxupé (COXUPÉ, 2014). A tabela 1 apresenta as características de precipitação das três estações pluviométricas estudadas. Sendo que a primeira estação possui dados desde 1942, a segunda desde 1975 e a última desde 2010. A figura 5, que é o hietograma comparativo de precipitação acumulada média mensal entre as três estações, permite comparar visualmente seus valores.

Tabela 1: Características totais, médias, mínimas e máximas mensais de precipitação (mm) das estações selecionadas.

		JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	Total Anual
Carmo do Paranaíba	Méd	277,3	179,5	187,4	74,4	40,6	14,9	12,0	16,1	48,4	130,5	201,8	291,5	1455,8
	Mín	45,9	27,8	44,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	11,4	27,8	103,6	719,3
	Máx	580,9	432,0	777,7	210,4	188,2	83,4	72,6	84,4	158,1	388,2	379,1	533,8	2281,1
Serra do Salitre	Méd	275,5	178,5	224,1	81,4	41,5	16,2	8,9	18,5	50,6	107,4	206,0	287,2	1418,2
	Mín	45,9	27,8	44,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	11,4	27,8	103,6	719,3
	Máx	580,9	432,0	777,7	210,4	188,2	83,4	72,6	84,4	158,1	388,2	379,1	533,8	2281,1
Rio Paranaíba (Cooxupé)	Méd	274,5	94,9	277,8	122,4	29,4	25,3	14,2	1,9	42,0	177,9	283,2	269,2	1612,7
	Mín	65,8	13,6	195,4	10,4	4,0	0,0	0,0	0,0	8,6	85,4	195,2	222,8	1289,2
	Máx	397,6	144,0	374,6	207,2	70,4	72,2	69,6	9,6	63,2	248,2	397,4	316,4	1874,1

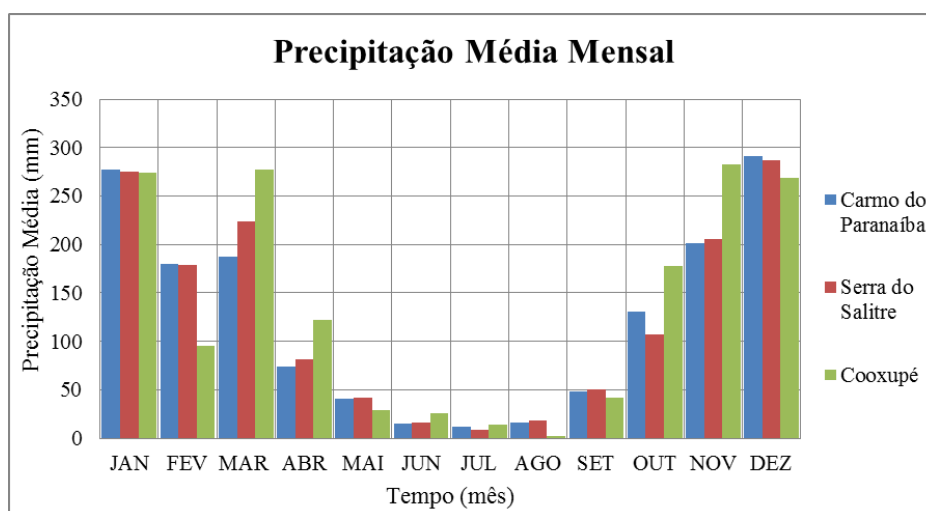


Figura 5: Hietograma comparativo de precipitação acumulada média mensal entre as três estações (mm)

A figura 6 apresenta o mapa topográfico da bacia hidrográfica de estudo e o ponto de construção da barragem, a tabela 2 mostra os parâmetros geométricos da bacia e a tabela 3 as relação entre a altura da barragem pela área de acumulação de água e o volume armazenado. Esses dados foram obtidos por sensoriamento remoto pelo Google Earth e pelo ArcGis.

O tempo de concentração da bacia de estudo é de aproximadamente 43,5 minutos. As tabelas 4 e 5 apresentam numericamente os dados obtidos no hidrograma unitário, hietogramas e hidrogramas de projeto.

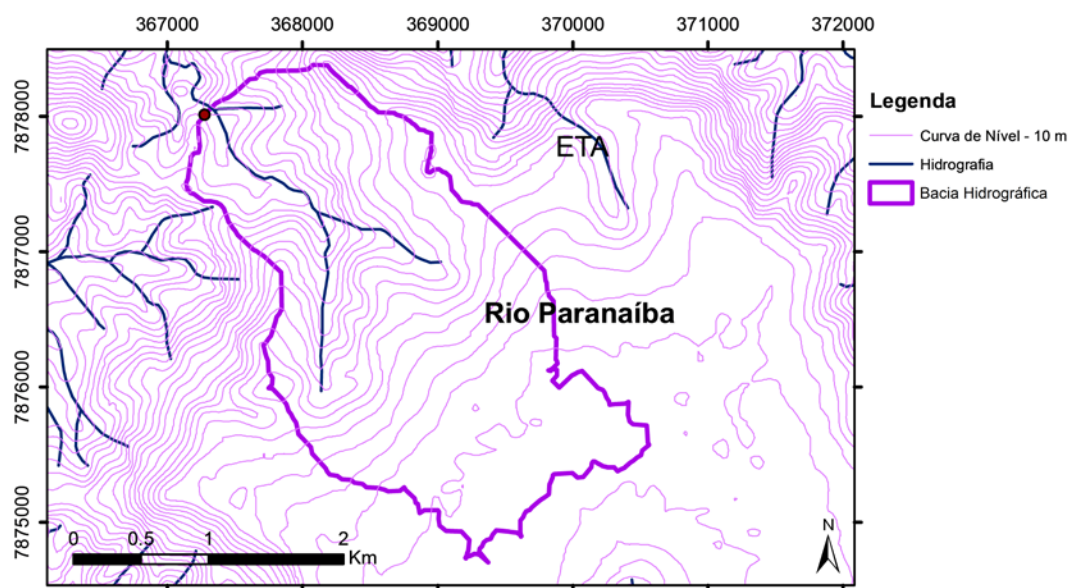


Figura 6: Delimitação de Bacia Hidrográfica do ponto de construção da barragem

Tabela 2: Dados da bacia hidrográfica.

Área da Bacia (A):	6,23	km ²
Perímetro da Bacia:	12,59	km
Elevação Exutório:	950	m
Elevação Nascente do Rio Principal:	1066	m
Elevação Nascente do Rio Menor:	1060	m
Maior Elevação da Bacia:	1147	m
Comprimento do Rio Principal (Lc):	2,55	km
Comprimento dos Rios Secundários:	1,50	km
Comprimento da Bacia:	3,73	km
Distância em Linha Reta da Nascente do Rio Principal ao Exutório:	2,25	km
Fator de Forma:	0,958	
Coefficiente de Compacidade:	1,412	
Densidade de Drenagem:	0,650	km ⁻¹
Sinuosidade do Curso d'água Principal:	1,133	
Declividade da Bacia:	0,053	m/m
Declividade do Curso d'água Principal:	0,045	m/m

Tabela 3: Relações entre altura da barragem, área de ocupação e volume de acumulação.

Altura (m)	Área (m ²)	Volume (m ³)
1	62.653	245.217
2	72.898	312.899
3	83.870	391.133
4	94.777	480.252
5	106.108	580.516
6	118.566	692.644
7	132.713	817.909
8	150.425	959.292
9	167.367	1.118.060
10	185.441	1.294.160

Tabela 4: Valores do hidrograma unitário.

Hidrograma Unitário		
Área da Bacia	3,66	km ²
Tempo de Concentração	43,46	min
Duração da chuva unitária (Δt)	2,17	min
Tempo de Pico (tp)	27,16	min
Tempo de Descida (td)	45,28	min
Vazão Máxima	16,82	m ³ /s

Tabela 5: Valores utilizados para os hietogramas e obtidos nos hidrogramas de projeto.

Tempo de Retorno (anos)	100	500
Intensidade máxima média de precipitação (mm/h)	123,27	163,37
Intensidade de precipitação (mm)	118,76	157,40
Precipitação efetiva (mm)	49,56	80,13
Tempo de pico (min)	36,9	36,9
Vazão de pico (m ³ /s)	54,49	88,39

Foi determinado pelo Método do Balanço Hídrico que uma altura de barragem igual a 5 metros atingiria o volume útil requerido de 516.853 m³, sendo que para os 5 metros o volume de acumulação é 580.516 m³ ocupando uma área de 106.108 m². Por esse mesmo método, prevendo um aumento na demanda de 15%, estimado para 2030, seria necessária uma altura de barragem de entre 5 a 6 metros para armazenar um volume útil de 596.147 m³, sendo o volume máximo possível de ser armazenado à 6 metros de 692.644 m³ em uma área de 118.566 m².

Pelo Método do Diagrama de Rippl para uma altura de barragem de 5 metros o volume encontrado foi de 483.976 m³, valor inferior ao calculado pelo Balanço Hídrico. Esse método não considera o limite de volume acumulado no reservatório para a altura especificada, por isso o volume calculado é menor. A figura 7 mostra o Diagrama de Rippl para a bacia de estudo para uma altura de barragem de 5 metros.

Foi estimado valores usuais para o comprimento do vertedouro para os cálculos da vazão de saída e verificação da altura da lâmina d'água no programa. Para cada comprimento analisado era feita uma simulação no programa HEC-HMS, visando encontrar as proporções entre o comprimento do vertedouro e altura da lâmina d'água mais viável. O início do vertedouro está a uma altura de 5,5 m de altura da barragem. A figura 8 mostra os gráficos de entrada no programa de "altura da barragem \times volume de acumulação do reservatório" e "altura da barragem \times vazão de saída do vertedouro" para o comprimento de 40 metros.

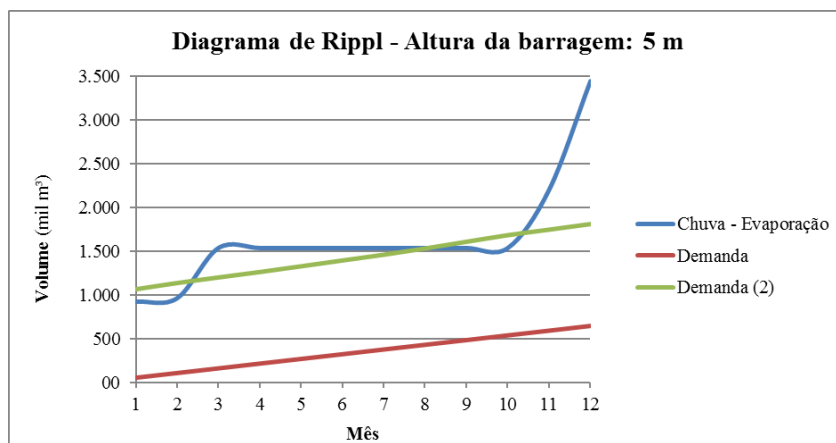


Figura 7: Diagrama de Rippl considerando altura da barragem de 5m.

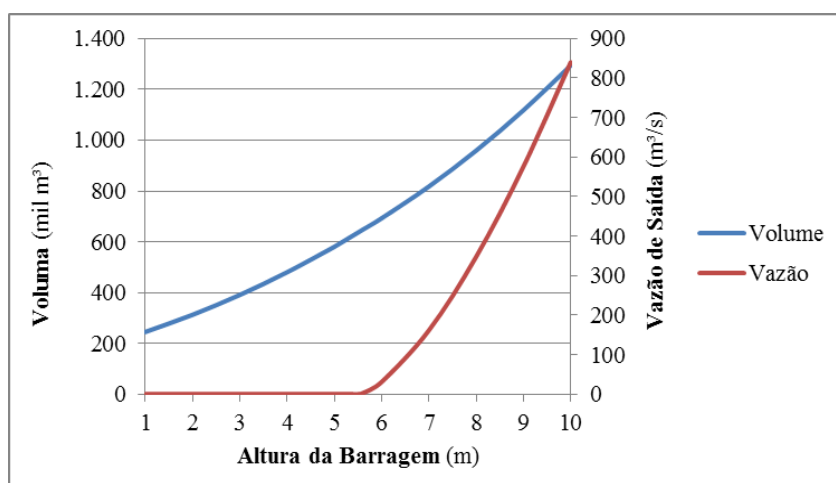


Figura 8: Volume de acumulação e vazão de saída em função da altura da lâmina d'água na barragem.

As figuras 9 a 12 mostram os resultados da simulação hidráulica realizada pelo software HEC-HMS, na figura 9 e 10 observa-se a variação da altura da lâmina d'água na barragem em função do tempo, devido à ocorrência da chuva de 500 e 100 anos de tempo de retorno respectivamente e nas figuras 11 e 12 observa-se a variação do volume do reservatório em função do tempo para as chuvas de 500 e 100 anos de tempo de retorno respectivamente.

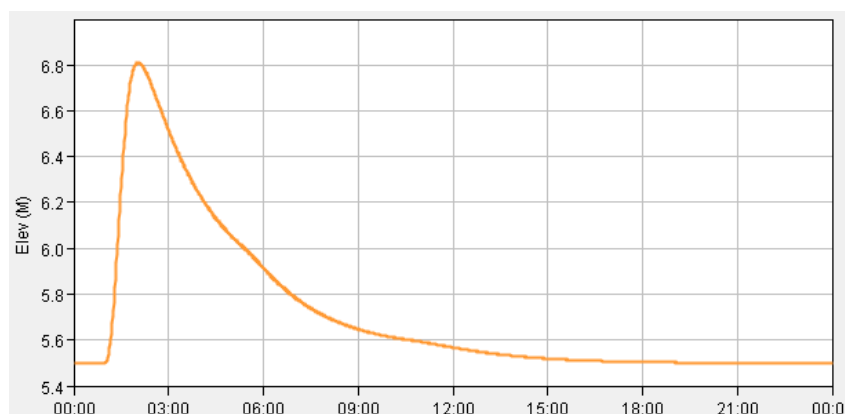


Figura 9: Variação da altura da lâmina d'água em função do tempo devido à ocorrência da chuva de 500 anos.

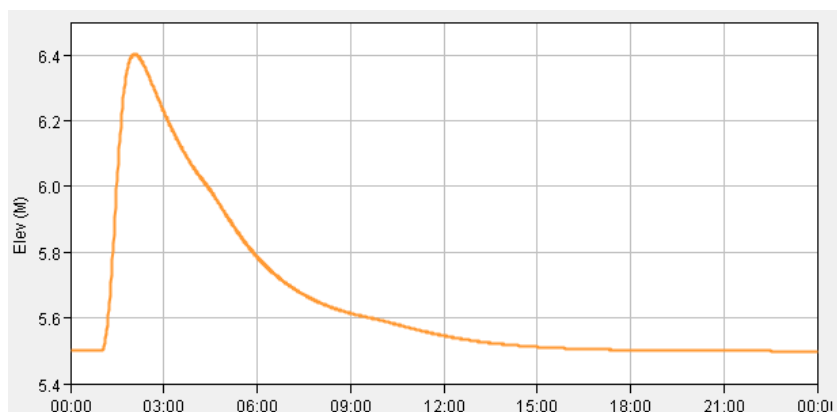


Figura 10: Variação da altura da lâmina d'água em função do tempo devido à ocorrência da chuva de 100 anos.

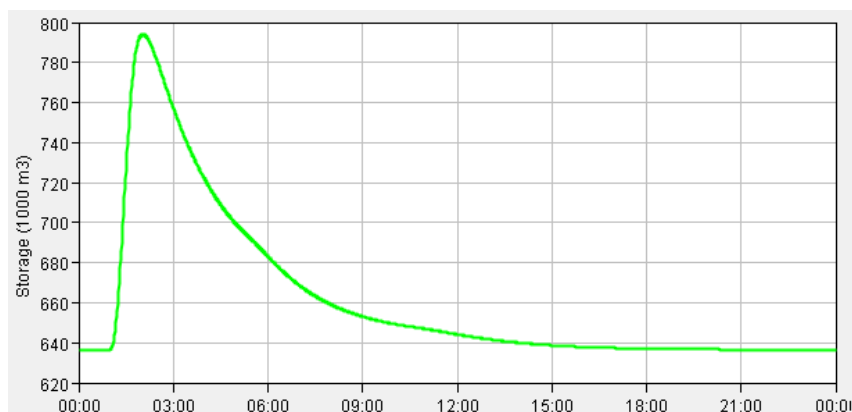


Figura 11: Variação do volume do reservatório em função do tempo devido à ocorrência da chuva de 500 anos.

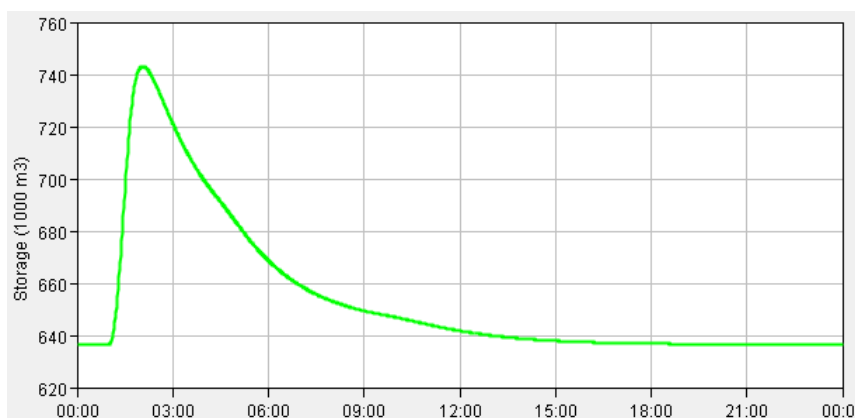


Figura 12: Variação do volume do reservatório em função do tempo devido à ocorrência da chuva de 100 anos.

Foi determinado que o vertedouro em perfil Creager deveria possuir um comprimento de 40 metros e alturas de lâmina d'água de 1,30 metros para uma chuva de tempo de retorno de 500 anos e atingindo uma altura de 90 centímetros para uma chuva de 100 anos de tempo de retorno. A tabela 6 apresenta as coordenadas para o traçado do perfil Creager do vertedor e a figura 13 a sua representação gráfica.

Tabela 6: Coordenadas para o traçado do perfil Creager para vertedor de barragem, $h_c = 1,3$ m.

x	y	x	y	x	y
0,00	0,164	0,78	0,078	2,21	1,131
0,13	0,047	1,04	0,185	2,60	1,586
0,26	0,009	1,30	0,334	3,25	2,548
0,39	0,000	1,56	0,516	3,90	3,666
0,52	0,009	1,82	0,735	4,55	4,966

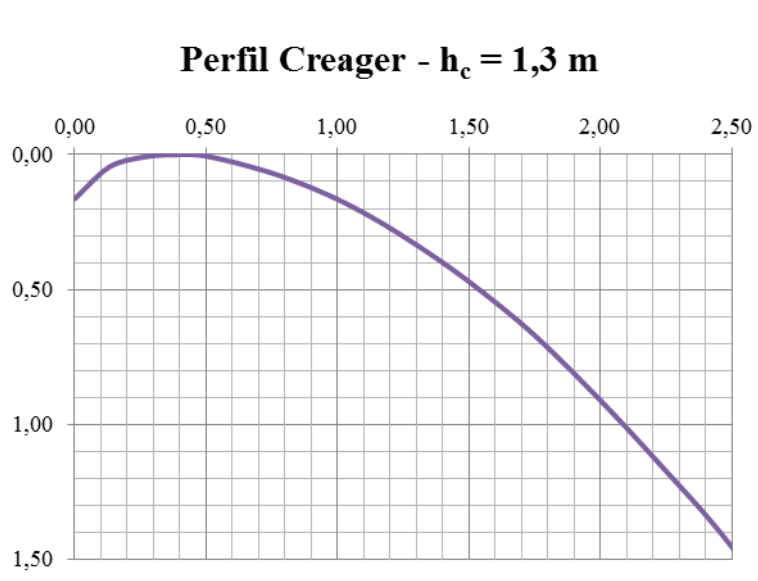


Figura 13: Perfil Creager para vertedor de barragem, $h_c = 1,3$ m.

O comprimento necessário para o vertedouro (40 metros) é um valor aceitável para a precipitação de 500 anos, tendo em mente o comprimento da barragem de aproximadamente 125 metros para uma altura de 6 m. Com a lâmina d'água atingindo altura de 6,8 metros é recomendável que a cota da crista da barragem possua valor superior a esse, sendo um valor de borda livre convencional igual a 0,5 m resultado em uma altura da crista da barragem de 7,3 m.

CONCLUSÕES

Neste trabalho foi feita a análise hidrológica da viabilidade da construção de uma barragem para o abastecimento urbano do município de Rio Paranaíba. Para uma barragem construída no ponto de coordenadas geográficas 19° 11' 12.98" S e 46° 15' 44.61" O, seria possível armazenar aproximadamente 640 mil metros cúbicos de água com uma barragem de 5,5 metros de altura útil.

Sendo necessário um vertedouro em perfil Creager de comprimento de 40 metros, atingindo uma lâmina d'água máxima no vertedouro de 1,3 m, ou seja, para o início do vertedouro a 5,5 m a altura na barragem é de 6,8 metros. Com isso além dos 5,5 metros para atingir o volume útil requisitado é necessário uma folga superior a 1,3 m, sendo assim recomentado uma altura total superior a 7,3 metros para garantia da borda livre de 0,5 m.

Desta forma, hidrológicamente, fica determinada a viabilidade da construção de uma barragem para resolver o problema de falta de água para o abastecimento urbano da cidade de Rio Paranaíba.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANA, Agência Nacional de Águas. HidroWeb. Séries Históricas. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/>> Acesso em: nov. 2014.
2. ATLAS digital das águas de minas - Roteiro básico para o dimensionamento de pequenas barragens de terra no estado de MG. 2011. Disponível em: <http://www.atlasdasaguas.ufv.br/exemplos_aplicativos/roteiro_dimensionamento_barragens.html>. Acesso em: 27 nov. 2014.
3. COXUPÉ, Cooperativa Regional de Cafeicultores em Guaxupé Ltda. Média Histórica - Rio Paranaíba. Dados pluviométricos. Disponível em: <https://www.cooxupe.com.br/media_interna/13/rio_paranaiba> Acesso em: Nov. 2014.
4. FARIA FILHO, R. F., Avaliação do Potencial Hidráulico em Bacias Hidrográficas Por Meio de Sistemas de Informação Geográficas. Dissertação de Mestrado, Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa - MG, 2007
5. GPRH, Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos, Plúvio 2.1. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG. Disponível em: < <http://www.gprh.ufv.br/?area=softwares>> Acesso em: fev 2015.
6. HELLER L. e PÁDUA, V. L., Abastecimento de Água para Consumo Humano. 2 ed. rev. e atual. Volume 1. Belo Horizonte – MG, Editora UFMG, 2010.
7. IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Informações Completas, Minas Gerais, Rio Paranaíba, Censo Demográfico 2010. Disponível em: <<http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=315550&search=minas-gerais|rio-paranaiba>>. Acesso em: 19 nov. 2014.
8. INPE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Topodata – Banco de Dados Geomorfológicos do Brasil, Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/topodata/index.php>>. Acesso em: mai. 2015.
9. LOPES, J. E. G. e SANTOS, R. C. P. Capacidade de Reservatórios. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. São Paulo, 2002.
10. TOMAZ, P. Curso de Manejo de Águas Pluviais. Capítulo 3 - Tempo de concentração. 2013.
11. TUCCI, C. E. M. Hidrologia: Ciência e Aplicação. 4 ed, 5ª reimp. Editora da UFRGS/ABRH, Porto Alegre, 2013.
12. USACE, US Army Corps of Engineers. HEC-HMS. Hydrologic Engineering Center. Disponível em < <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>> Acesso em: mai 2015.