

DETERMINAÇÃO AUTOMÁTICA DA CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO DE UM RESERVATÓRIO

Automatic Determination of Storage Capacity of a Reservoir

Kelson Jubini Machado¹
Maria Lúcia Calijuri¹
Carlos Antônio A. S. Ribeiro²
Roziane Sobreira dos Santos¹
Gustavo Barreto Franco¹

¹**Universidade Federal de Viçosa – UFV**

Departamento de Engenharia Civil

Laboratório de Informações Espaciais

Avenida Peter Henry Rolfs, s/n, Campus Universitário 36570-000 Viçosa – MG

kelison.machado@ufv.br

calijuri@ufv.br

roziane.santos@ufv.br

gustavopraia@yahoo.com.br

²**Universidade Federal de Viçosa – UFV**

Departamento de Engenharia Florestal

Avenida Peter Henry Rolfs, s/n, Campus Universitário 36570-000 Viçosa – MG

cribeiro@ufv.br

RESUMO

Fatores como o crescimento populacional, o processo intensivo de urbanização, a expansão da fronteira agrícola e a implantação de indústrias de grande porte, são apontadas como responsáveis pelo aumento na demanda de água. Muitas vezes para atender as demandas hídricas ao longo do tempo, garantindo fornecimento seguro e continuado, depara-se com a necessidade de retenção e armazenamento da água. Em geral, os reservatórios são formados por barragens implantadas nos cursos d'água. Suas características físicas, em especial a capacidade de armazenamento, dependem das características topográficas do vale no qual está inserido. Tal fato aumenta a complexidade da definição dos parâmetros de alagamento (área e volume), importantes variáveis no gerenciamento global dos reservatórios. Este artigo tem como objetivo o desenvolvimento de um módulo para determinação automática da capacidade de armazenamento de um reservatório com uso de Sistema de Informação Geográfica. Realizou-se simulação de uma barragem na sub-bacia do ribeirão São Bartolomeu e determinou-se a capacidade de armazenamento do reservatório. O resultado da simulação apresentou um volume de 165.814.688 m³ e área de 7.306.352 m². Este módulo constitui-se em importante ferramenta para dar suporte às análises e aquisição de parâmetros, bem como à gestão e tomadas de decisão em recursos hídricos.

Palavras chaves: Volume do Reservatório, Recursos Hídricos, Sistema de Informação Geográfica.

ABSTRACT

From the first civilizations the man has inhabited along the water courses. Various factors such as population growth, the intensive process of urbanization, the expansion of the agricultural frontier and deployment of large-scale industries, are identified as responsible for the increase in demand for water. Therefore, there is a need for retention and storage of water to ensure a secure supply and continued, ensuring meet the various demands water over time. Generally, the reservoirs are formed by dams located in water courses. Its physical characteristics, particularly the storage capacity depend on the topographic features of the valley in which it is located. This fact increases the complexity of defining the parameters of flooding (area and volume), important variables in the overall management of reservoirs. This article aims to develop a module for automatically determining the storage capacity of a reservoir with the use of Geographic Information System. There was simulation of a dam in the sub-basin of Ribeirao St. Bartolomeu and were determined

storage capacity of the reservoir. The result of simulation showed a volume of 165.814.688 m³ and area of 7.306.352 m². This module is an important tool to support analysis and acquisition of parameters, as well as the management and decision-making on water resources.

Keywords: Reservoir, Hydric Resources, Geographical Information System (GIS).

1. INTRODUÇÃO

Diversos fatores, tais como: o crescimento populacional, o processo intensivo de urbanização, a expansão da fronteira agrícola e a implantação de indústrias de grande porte, são apontadas como responsáveis pelo aumento na demanda da água (MÜLLER, 1996). Logo, há necessidade de retenção e armazenamento da água de modo a assegurar um fornecimento seguro e continuado, com vistas a atender às demandas hídricas ao longo do tempo (REVISTA RURAL, 2007).

O Brasil é um país favorável à implantação de reservatórios devido ao seu grande potencial hídrico. Estes reservatórios têm por finalidade suprir as necessidades de abastecimento d'água, irrigação e fornecimento de energia elétrica, dentre outras.

A área do reservatório representa a superfície do terreno inundada pelo represamento da água de um rio, na cota correspondente ao nível máximo de operação. Os reservatórios se caracterizam pela superfície inundada e pela capacidade de geração de energia. Sua capacidade depende do volume ativo de água, que é definido pelos níveis máximos e mínimos operativos (MÜLLER, 1996)

De acordo com a Deliberação Normativa do Conselho Estadual de Política Ambiental, COPAM, nº 87 de 17 de junho de 2005, o volume do reservatório é o volume total do material, líquido e/ou sólido, depositado após a construção da barragem e durante os possíveis alteamentos, nele incluindo o material de assoreamento, vinculado ou não às atividades do empreendimento. Para isto, sempre se deve tomar como base a topografia da fundação do reservatório (Deliberação Normativa COPAM nº 87).

O estudo topográfico que determina o volume de um reservatório depende da organização de bases de dados georeferenciados, isto aliado a modelagem subsidia a simulação de sistemas e problemas mais complexos. Neste sentido, a formulação de modelos com uso de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) aumenta a rapidez e a eficiência na determinação automática da capacidade de armazenamento de um reservatório.

Na elaboração de projetos de localização e implantação de reservatórios destinados a necessidades básicas, o uso de SIG torna-se uma ferramenta imprescindível para obtenção de informações com maior agilidade. Os SIGs utilizam a representação computacional da informação para armazenar e gerenciar dados espaciais, o qual pode ser diretamente usado no processo de tomada de decisão (GOODCHILD, 1986). Segundo ARONOFF (1989), a

aquisição de dados por parte do SIG permite recuperar, manipular e combinar diversos dados nas mais complexas tarefas seja em formatos de mapas, imagens de satélite ou até mesmo na modelagem de um SIG.

Nas aplicações hidrológicas em SIG, os dados de relevo são comumente representados por Modelos Digitais de Elevação Hidrograficamente Condicionados (MDEHC). Esses modelos permitem que as delimitações das bacias sejam realizadas com maior precisão, pois consideram os dados altimétricos do terreno em suas etapas de processamento (RIBEIRO, 2005). Eles também apresentam uma coincidência acentuada entre a drenagem derivada numericamente e a hidrografia real, estando isentos de sumidouros (depressões espúrias) que bloqueiem o trajeto do escoamento de água superficial (HUTCHINSON, 1989).

Os SIGs possibilitam uma obtenção rápida e acurada de parâmetros fisiográficos, como a declividade, comprimento do curso de água principal, densidade de drenagem e outros. Os principais SIGs comercialmente disponíveis já contam com diversos recursos, e bastantes precisos, para uma elaboração de mapas e modelos que possuam caráter dinâmico perante os desafios estabelecidos para determinação das características físicas da localização do empreendimento. O relevo em formato de modelos digitais de elevação hidrograficamente condicionados, viabilizam a determinação automática de vários parâmetros.

Em geral, os reservatórios são formados por barragens implantadas nos cursos d'água. Suas características físicas, em especial a capacidade de armazenamento, dependem das características topográficas do vale no qual está situado. Tal fato aumenta a complexidade da definição dos parâmetros de alagamento (área e volume), importantes variáveis no gerenciamento global dos reservatórios sejam eles hidrelétricos ou não (SOUSA JUNIOR, 1998).

Segundo TIAGO FILHO *et al.* (2008), tem crescido a necessidade de se desenvolver ferramentas para detecção de potenciais para estudo de inventário e análise de viabilidade para implantação de centrais hidroenergéticas de pequeno porte utilizando ferramentas SIG.

Diante do exposto, o presente trabalho teve por objetivo o desenvolvimento de um módulo para determinação automática da capacidade de armazenamento (Volume e Área) de um reservatório com uso de Sistema de Informação Geográfica.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Para desenvolvimento do aplicativo fez-se uso dos softwares *ArcINFO Workstation*, e *ArcGIS 9.3*.

Foram utilizadas curvas de nível equidistantes de 20 m e hidrografia, obtidas de cartas topográficas na escala 1:50.000. Estes dados estão disponíveis no site do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), no formato vetorial. Para a individualização da sub-bacia do Ribeirão São Bartolomeu utilizou-se as folhas topográficas digitais de Porto Firme (SF-23-X-B-V-5), Teixeira (SF-23-X-B-V-1) e Viçosa (SF-23-X-B-V-3) (IBGE, 2006).

A hidrografia foi digitalizada em mesa digitalizadora, com a utilização do programa computacional *CartaLinx*.

No que se refere às curvas de nível na escala 1:50.000, realizou-se uma análise visual e, quando necessário, fêz-se a correção de suas inconsistências, ajustando-as à hidrografia. Foi necessário inserir, na tabela de atributos das curvas de nível, o valor das cotas. A hidrografia foi orientada no sentido do escoamento superficial, verificando-se a conexão de todos os arcos.

A sub-bacia do ribeirão São Bartolomeu está localizada na Zona da Mata Mineira, mais precisamente no município de Viçosa e inserida na Bacia Hidrográfica do Rio Doce. Localiza-se entre os paralelos 20°44' e 20°50' latitude sul e os meridianos 42°51' e 42°53' longitude oeste de Greenwich, como pode ser visto na Figura 1.

Esta sub-bacia é formada pelos córregos Santa Catarina, Engenho, Posse, Araújo e Palmital. Possui área de aproximadamente 55,10 km², o que representa cerca de 18,4 % da superfície do município de Viçosa. Além de, estar localizada em uma área de elevadas altitudes e relevo acidentado.

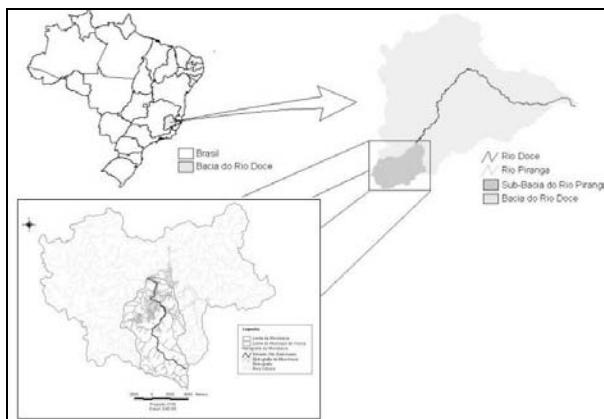


Fig. 1 – Localização da sub-bacia do ribeirão do São Bartolomeu.

2.1 Modelagem

Considerando-se a utilização dos reservatórios de acumulação com a finalidade de atender seus múltiplos usos, o conhecimento da demanda de água necessária e da capacidade de acumulação do

reservatório são informações importantes, tanto para o gerenciamento dos recursos hídricos quanto para elaboração de projetos de reservatórios (ALBUQUERQUE *et al.*, 2004).

O desenvolvimento de aplicativo incorporado ao SIG possibilita integração entre a análise e a gestão da bacia hidrográfica, bem como simulação apropriada à elaboração de projetos e obtenção de informação principalmente visual.

O processamento do aplicativo para a determinação do volume de água do reservatório parte da hipótese de que o usuário já tenha obtido o Modelo Digital de Elevação (MDE).

O MDE é criado no módulo *Topogrid* do *ArcInfo* (ESRI, 1997) utilizando o método de interpolação *Topogrid Interpolation*. O *Topogrid* emprega o algoritmo desenvolvido por HUTCHINSON (1989). Esse algoritmo produz um acurado MDE que contém propriedades das drenagens e os dados de direção de fluxo.

O procedimento conjuga tanto o esforço de manter as características hidrográficas, a remoção de dados espúrios relativos a pontos de depressões ou de elevações e uma técnica de interpolação por diferenças finitas (HUTCHINSON, 1989). Ele requer o limite da área, dados de hidrografia simplificada e orientada na direção do escoamento, altimetria com curvas de nível ou pontos cotados.

A Figura 2 apresenta o MDE que é utilizado como parâmetro de entrada no aplicativo.

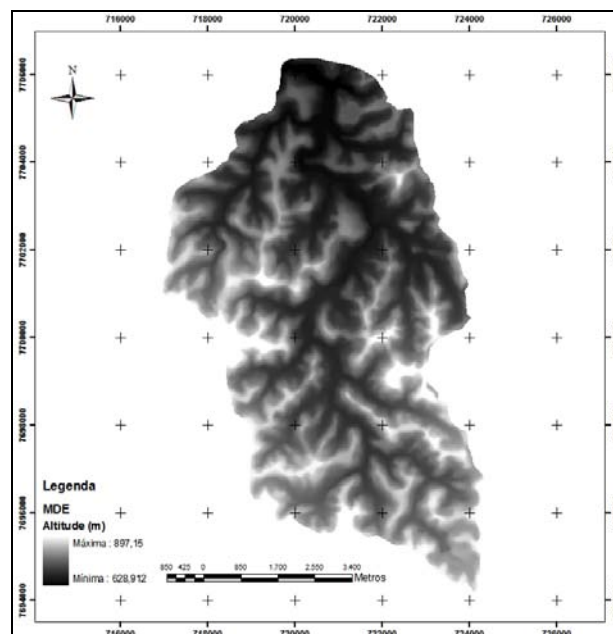


Fig. 2 – Modelo Digital de Elevação.

Além do MDE, é necessário um *shapefile* (um arquivo vetorial) da soleira da barragem perpendicular a hidrografia, e a hidrografia mapeada. O *shapefile* da soleira (denominado barragem) é uma feição do tipo linha criado utilizando a ferramenta *Create Feature Class* da função *Feature Class* em *Data Management Tools* no *ArcToolbox*.

Antes do processamento fez-se a introdução do arquivo da barragem por meio da seção de edição. Traçou-se uma reta perpendicular a hidrografia colocando-se as coordenadas UTM nas extremidades esquerda e direita da barragem. O processo de edição é encerrado salvando-se o *shapefile* da barragem recém criado.

Alguns critérios gerais e restrições devem ser requisitos na escolha dos eixos do barramento, por exemplo, a conformidade topográfica do terreno favorável a implantação da barragem.

O local mais propício ao barramento é o ponto de maior estreitamento entre as curvas de nível. Com isso obtém-se menor custo na construção da barragem, maior capacidade de acumulação de água, menor extensão de barragem e área alagada.

A Fig. 3 apresenta a locação da soleira e suas respectivas coordenadas UTM, ($X_0 = 721.353,741$ m ; $Y_0 = 7.702.197,866$ m) e ($X_1 = 721.852,910$ m ; $Y_1 = 7.701.733,574$ m).

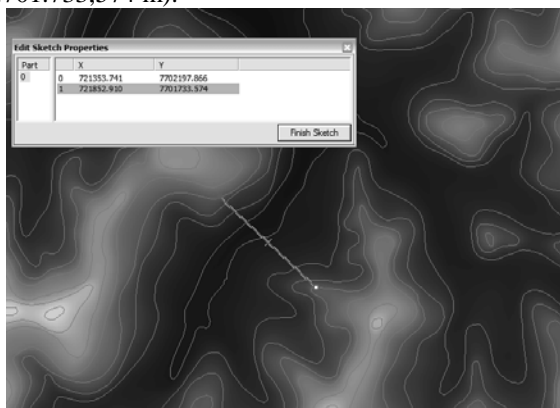


Fig. 3 – Representação da soleira da barragem.

O arquivo shapefile é então convertido ao formato *raster* (*shape_raster*: soleira no formato *raster*) e incorporado aos processos.

Para aumentar a precisão dos dados do relevo converte-se os valores de metros para milímetros, conforme Comando 1 (C1) e daí por diante.

$$mde_mm = Times [mde] * 1000 \quad (C1)$$

A remoção das depressões espúrias do MDE é feita pelo comando *Fill*, Eq. 2. As depressões interrompem o escoamento superficial da água, geram imperfeições no modelo cujo escoamento deve ser direcionado à jusante da bacia de contribuição. A Fig. 4 apresenta a depressão espúria e seu preenchimento.

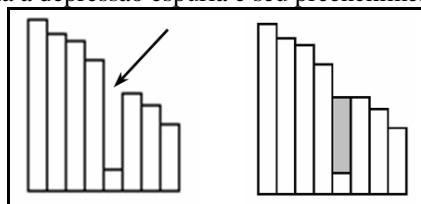


Fig. 4 – Caracterização de uma depressão espúria à esquerda e seu preenchimento à direita.

Fonte: (Ribeiro, 2008)

O comando faz com que o sentido preferencial do escoamento superficial, que na natureza ocorre da maior para a menor elevação, seja sempre obedecido, representando fielmente o fenômeno observado na realidade.

$$Fill_mde_mm = fill[mde_mm] \quad (C2)$$

O resultado dos modelos isentos de depressões espúrias é um MDE dito hidrograficamente condicionado, ou hidrologicamente consistente.

Para garantir que as duas extremidades da barragem estejam em uma mesma cota e apoiadas, introduziu-se ao modulo uma análise de consistência. Ele assegura a correta localização e apoio da soleira, evitando que fique suspensa.

A Fig. 5 apresenta a locação do barramento representado pela linha pontilhada. A hipótese da análise de consistência é que as extremidades da barragem estejam posicionadas na mesma cota, na horizontal.

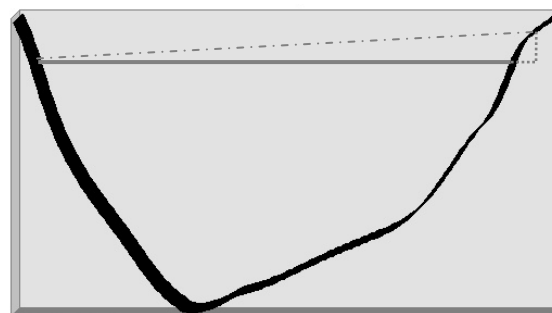


Fig. 5 – Visualização da análise de consistência.

Na análise de consistência multiplica-se a soleira no formato *raster* pelo MDE para retirar o valor da cota das extremidades. Filtra-se o mínimo desta cota, atribuindo o mesmo a toda a soleira. Realiza-se uma verificação junto ao perfil para, se necessário, eliminar parte da soleira que estiver adentrando ao talude. Ao final deste processo a soleira estará na posição correta.

A partir daí obtém-se a direção de escoamento de cada célula do MDE, pela aplicação do comando *Flow Direction*, (C3). A direção do escoamento superficial é calculada pelo método determinístico de oito células vizinhas, que considera apenas oito possíveis direções de escoamento para cada uma das células.

$$Flowdir = flowdirection ([fill_mde_mm]) \quad (C3)$$

A Fig. 6 apresenta as direções do escoamento.

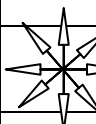
32 (NO)	64 (N)	128 (NE)
16 (O)		1 (E)
8 (SO)	4 (S)	2 (SE)

Fig. 6 – Direções do escoamento.

Para obter-se a área de contribuição da bacia à montante da soleira, utilizou-se o comando *Watershed*, apresentado na (C4).

$$acb = watershed ([Flowdir], [shape_raster]) \quad (C4)$$

O espelho d'água foi calculado com o comando *condicional evaluation (con)*, apresentado no comando 5. O cálculo é realizado em um conjunto de células pertencentes à área de contribuição que possuem a altitude menor ou igual à altitude da soleira da barragem (maior valor possível da soleira). Ou seja, o espelho d'água formado pela barragem, quando esta está com 100% da sua capacidade de armazenamento.

$$espelho = con (float ([acb]) * [fill_mde_mm] <= zonalmax ([acb], float ([shape_raster]) * [fill_mde_mm]), 1) \quad (C5)$$

A área represada é calculada com a função *Zonal Geometr*, apresentada no (C6).

$$Área = zonalarea ([espelho]) \quad (C6)$$

A profundidade de cada célula do reservatório é calculada pelo comando *zonalmax*, (C7).

$$prof_lago = zonalmax ([espelho], [fill_mde_mm]) - [fill_mde_mm] \quad (C7)$$

A profundidade do reservatório é convertida para metros, (C8).

$$prof_lago_m = divide \text{ float } ([prof_lago]) / 1000 \quad (C8)$$

O volume de cada célula da represa é calculado pela (C9).

$$Vol_cel = [prof_lago_m] * zonalarea([espelho]) / zonalsum ([espelho], [espelho]) \quad (C9)$$

O volume total do reservatório é calculado pela função *Zonal Statistics*, (C10).

$$Volume = zonalsum ([espelho], [vol_cel]) \quad (10)$$

Tem-se então a área e o volume do reservatório. Os procedimentos estão sintetizados no fluxograma apresentado na **Figura 7**.

A seqüência apresentada no fluxograma é:

- 1 – Entrada de dados;
- 2 – MDE convertido para milímetros;
- 3 – Eliminação das depressões espúrias;
- 4 – Conversão do *shapefile* da soleira para *raster*;
- 5 – Execução da análise de consistência, para a soleira;
- 6 – Direção do escoamento;
- 7 – Determinação da área de contribuição a partir da soleira;
- 8 – Determinação do espelho d'água;
- 9 – Determinação da profundidade do lago;
- 10 – Saída: Área alagada pelo barramento;
- 11 – Saída: Volume do reservatório;

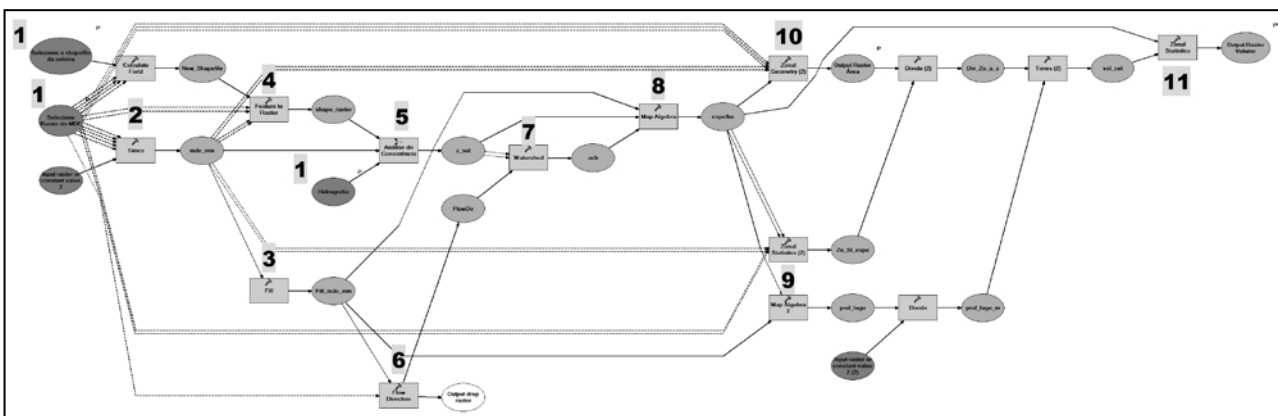


Fig. 7 – Modelagem dos processos.

As rotinas específicas foram desenvolvidas com o *ModelBuilder*, disponibilizado junto ao *ArcToolbox*, do *ArcMap 9.3*, ESRI, conforme **Figura 8**.

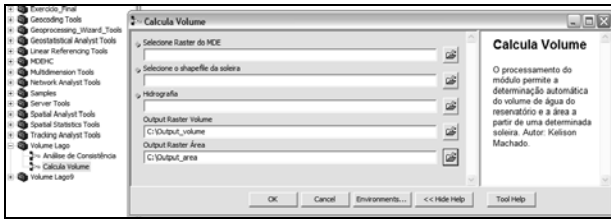


Fig. 8 – Interface do modelo para cálculo do volume do reservatório.

Utilizando o modelo desenvolvido para determinar a capacidade de armazenamento de um reservatório de forma automática, produziu-se como forma de simulação uma barragem na sub-bacia do ribeirão São Bartolomeu.

3. RESULTADOS

Após a realização do processamento automático, a capacidade de armazenamento gerada pelo processo foi encontrado para o reservatório um volume de 165.814.688 m³, conforme a Figura 9.

STUDART e CAMPOS (2005) mostraram que para rios com baixos coeficientes de variação dos deflúvios naturais, típicos de regiões temperadas, a escolha do volume inicial a ser adotado na simulação de um reservatório não é uma questão importante. Arbitrar-se o reservatório inicialmente cheio ou vazio, não altera os resultados encontrados para a vazão regularizada, uma vez que o processo de armazenamento já pode ser considerado no seu estado de equilíbrio, na pior das hipóteses, a partir de um tempo de retorno de 20 anos.

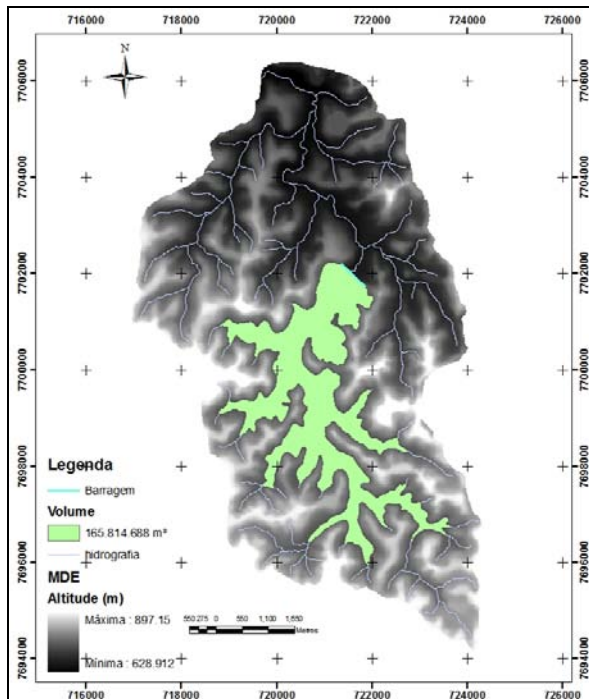


Fig. 9 – Imagem final do volume do reservatório

A Figura 10 apresenta uma área de 7.306.352 m² encontrada para o espelho d'água.

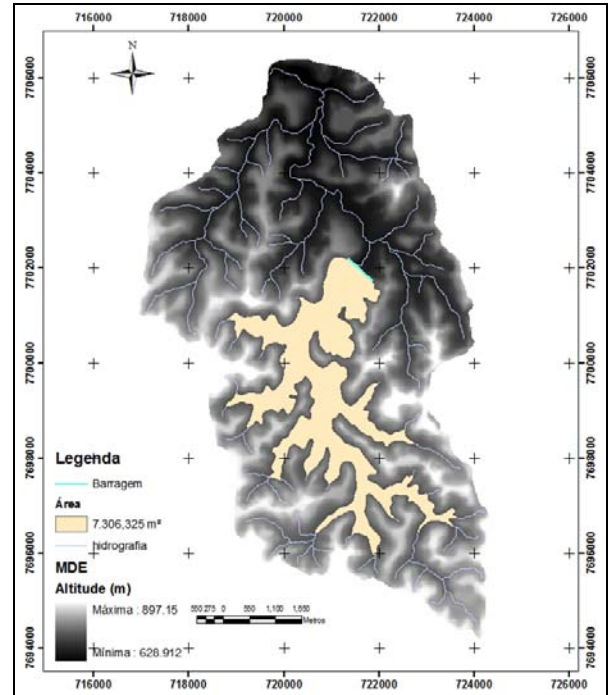


Fig. 10 – Imagem final da Área do reservatório.

Como os resultados são expressos no formato *raster* (matricial), possibilita a visualização em forma de *layers* no SIG, podendo ser convertidos para outros formatos possibilitando a realização de sobreposições com outros mapas.

A obtenção de forma rápida e eficiente da capacidade do reservatório, definido pelo módulo, possibilita uma tomada de decisão quando efetuadas análises junto a outros objetos de estudo, como conflitos de uso do solo além de sobreposição do alagamento de áreas de preservação permanente, dentre outros. Além de torna-se um instrumento de apoio ao conhecimento prévio do impacto da construção da obra, à visita de campo e validação do modelo gerado.

Na Figura 11, pode ser visto uma prévia de como estaria posicionada a barragem e o alcance do alagamento proporcionado pela barragem.

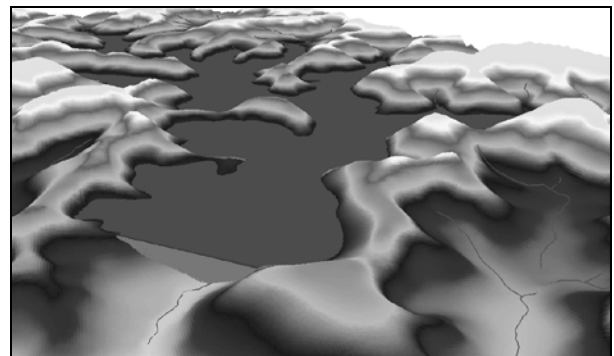


Fig. 11: Visualização 3D da barragem.

4. CONCLUSÕES

A integração entre SIG e os dados obtidos permitem, com eficiência, precisão e rapidez, a elaboração do MDE hidrograficamente condicionado, permitindo a modelagem das possíveis alterações da construção de uma barragem, a determinação da direção do fluxo superficial, da área de contribuição, do espelho d'água; determinação da profundidade e volume da água acumulada no reservatório.

O conhecimento da capacidade de um reservatório pode ser avaliado pelo módulo de geração automática de forma ágil, desde que o analista possua as informações dos possíveis locais para a construção do empreendimento.

O SIG constitui-se em importante ferramenta para dar suporte às análises e aquisição de parâmetros, bem como à gestão e tomadas de decisão sobre os recursos hídricos.

A estrutura *ModelBuilder* é eficiente. Ela permite a criação de modelo documentado. Com a descrição das ferramentas é possível perceber melhor cada passo realizado; relevante para usuários pouco familiarizados com as funções. Além disso, o *ModelBuilder* permite otimizar o tempo de trabalho e fornece um rico ambiente que envolve o SIG e a modelagem de processos.

Este módulo estará disponível no site <http://www.ufv.br/dec/eam/>, do Programa de Pós-Graduação em Informações Espaciais do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa. O mesmo é incorporado ao *Software ArcGIS – ArcToolbox*, como uma caixa de ferramenta. Junto ao download do aplicativo está disponível também uma explicação de como adicioná-lo ao *software*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, A. S. O.; LACERDA JÚNIOR, H. B.; AZEVEDO, J. R. G.; CAVALCANTI, G. L.; PEREIRA, T. S.; SILVA, F. H. C.. Desenvolvimento e aplicação de um software para cálculo das relações cota x área x volume de reservatórios. VII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, São Luiz, MA, 2004.

ARONOFF, S. **Geographic Information System: a Management Perspective**. WBL Publications. Ottawa, 1989.

Deliberação Normativa COPAM nº 87, de 17 de junho de 2005.

ESRI - **Environmental Systems Research Institute**, Inc. ArcInfo version 7.1.2 on-line documentation. Readlands, CA. 1997.

GOODCHILD, M.F., **Spatial Autocorrelation**, Catmog 47, Geo Books, Norwich, 1986. Disponível em <<http://www.geog.ucsb.edu/~good/>>. Acesso: 23 Setembro de 2007.

HUTCHINSON, M. F.. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. **Journal of Hydrology**, v. 106, p. 211-232, 1989.

MÜLLER, A.C. **Hidrelétricas, meio ambiente e desenvolvimento**. São Paulo: Makron Books, 1996.

REVISTA RURAL. **Barragens - As Pequenas São Boa Saída para o Pequeno Produtor.: Revista eletrônica**, São Paulo-SP, rev 107, jan. 2007. Disponível em: <http://www.revistarural.com.br/edicoes/2007/Artigos/rev107_barragens.htm>. Acesso: 28 Outubro de 2008.

RIBEIRO, C.A.A.S.; SOARES, V.P.; OLIVEIRA, A.M.S.; GLERIANI, J.M. O Desafio da delimitação de áreas de preservação permanente. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.29, n.2, p.203-212, 2005. Disponível em <<http://www.scielo.br/pdf/rarv/v29n2/a04v29n2.pdf>>. Acesso: 23 de julho de 2007.

RIBEIRO, C. A. A. S., ENF 613 – Tópicos Avançados em Sistema de Informação Geográfica, Apostila de Curso, UFV, 2008.

SAUNDERS, W. Preparation of DEMs for use in environmental modeling analysis. In: ESRI International User Conference. **Proceedings...** San Diego: 1999. CD-ROM.

SOUSA JÚNIOR, W. C. de Geoprocessamento aplicado à determinação de parâmetros de alagamento do reservatório da usina hidrelétrica de Serra da Mesa, Minaçu, Goiás. IX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Santos, SP; **Anais INPE**, p. 695-700, 1998.

STUDART, T. M. C., CAMPOS, J. N. B., A Escolha Do Volume Inicial Assumido Para Um Reservatório: Uma Questão Irrelevante? . Edições UFC. Fortaleza, 2005.

TIAGO FILHO, G. L.; NUNES, C. F.; ALVES, L. H. F.. Uso de Ferramenta SIG em Estudos de Inventário de Rios para Aproveitamento Hidroenergéticos de Pequeno Porte. **PCH Notícias SHP News** , v. 9, n. 38, p. 24-27, 2008.