

JOSÉ RUI CASTRO DE SOUSA

UM MÉTODOS MULTIOBJETIVO PARA O
POSICIONAMENTO DE BARRAGENS

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2011

JOSÉ RUI CASTRO DE SOUSA

**UM MÉTODO MULTIOBJETIVO PARA O
POSICIONAMENTO DE BARRAGENS**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa,
como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em
Ciência da Computação, para
obtenção do título de *Magister
Scientiae*.

APROVADA: 02 de março de 2011.

Fernando Falco Pruski
(Co-Orientador)

Jugurta Lisboa Filho
(Co-Orientador)

Heleno do Nascimento Santos

Marcus Vinícius Alvim Andrade
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, meu pai e amigo, mais essa etapa concluída.

Aos meus pais José Félix e Maria Aparecida que sempre me deram todo amor para chegar até aqui.

Às minhas irmãs, irmãos, cunhados(as), sobrinhos, tios(as) e primos(as) todo apoio e incentivo.

À minha noiva Bruna que, juntamente com toda sua família, muito me ajudou nessa conquista.

À todos os professores do DPI, ao meu orientador Marcus Vinícius, ao meu co-orientador Fernando Pruski, ao companheiro Keiller Nogueira e aos meus amigos, muito obrigado.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABELAS	vii
RESUMO	viii
ABSTRACT	x
1 Introdução	1
1.1 Objetivos	3
2 Referencial teórico	4
2.1 Formas de representação de terrenos	4
2.2 Rede de drenagem	5
2.3 Reservatórios de água	9
2.3.1 Construção de reservatórios	9
2.3.2 Volume por seções consecutivas (Volume do trapézio)	10
3 Materiais e métodos	13
3.1 Definição do curso do rio	14
3.2 Altura da barragem	14
3.2.1 Definição da altura máxima	15
3.2.2 Obtenção da altura	16
3.2.3 Orientação e comprimento da barragem	17
3.3 Área de secção da barragem	18
3.4 Região alagada	19
3.4.1 Componente conexa	19
3.4.2 <i>Busca em largura</i>	20
3.4.3 Volume do reservatório gerado pela barragem	20

3.4.4	Busca pela seção mais adequada	21
3.5	Avaliação da área alagada	22
3.5.1	Seleção das melhores seções com programação multiobjetivo . .	22
3.5.2	Construção da função objetivo	24
3.5.3	Interseção de dois mapas	27
3.6	Área de estudo	27
4	Experimentos para avaliação dos métodos	30
4.1	Descrição do Sistema	30
4.2	Experimentos sem mapas de conflito	34
4.2.1	Posicionamento de reservatório com 90 milhões de metros cúbicos de água	34
4.2.2	Avaliando novos pesos para o posicionamento de reservatório de capacidade 90 milhões m^3	36
4.2.3	Posicionamento de reservatório com 500 milhões de metros cúbicos de água	38
4.2.4	Avaliando novos pesos para o posicionamento de reservatório de capacidade 500 milhões m^3	40
4.3	Experimentos com mapas de conflito	42
4.3.1	Avaliando novos pesos para o posicionamento de reservatório de capacidade 90 milhões m^3 com a presença de mapas temáticos .	47
5	Conclusões	51
5.1	Trabalhos futuros	51
	Referências Bibliográficas	53

LISTA DE FIGURAS

2.1	Modelos de representação	4
2.2	Modelos digital de elevação	5
2.3	Direcionamento de fluxo	6
2.4	MDE, fosso e platô	8
2.5	Preenchimento de fosso	8
2.6	Volume por secções consecutivas	11
2.7	Fórmula de Gauss para obtenção da área	11
3.1	Maior altura possível da barragem situado em um ponto p	15
3.2	Extensão da barragem	17
3.3	Área da seção da barragem	18
3.4	Área alagada encontrada através da BL	20
3.5	Volume de uma célula p	21
3.6	Curva Pareto-ótimo	23
3.7	Sobreposição de mapas	26
3.8	Ilustração do bloco de terreno SRTM que será utilizado	28
3.9	Terreno de teste renderizado.	28
4.1	Tela de entrada do sistema.	31
4.2	Funcionamento do sistema, informa o tempo gasto, o total de soluções e as soluções do Pareto-Ótimo.	32
4.3	Término da execução.	33
4.4	Classificação das soluções situadas na fronteira de Pareto com peso 1 atribuído as variáveis em teste de 90 milhões de m^3	34
4.5	Teste de 90 milhões de m^3	36
4.6	Classificação das soluções da fronteira de Pareto, segundo os pesos $w_1 = 2$, $w_2 = 8$, para teste de 90 milhões de m^3	37

4.7	Classificação das soluções da fronteira de Pareto, segundo os pesos $w_1 = 8$, $w_2 = 2$, para teste de 90 milhões de m^3	38
4.8	Classificação das soluções situadas na fronteira de Pareto com peso 1 atribuído as variáveis em teste de 500 milhões de m^3	39
4.9	Teste de 500 milhões de m^3	40
4.10	Classificação das soluções da fronteira de Pareto, segundo os pesos $w_1 = 10$, $w_2 = 1$, para teste de 500 milhões de m^3	41
4.11	Classificação das soluções da fronteira de Pareto, segundo os pesos $w_1 = 1$, $w_2 = 10$, para teste de 500 milhões de m^3	42
4.12	Mapas teste, área de reserva e área urbana	43
4.13	Teste de 90 milhões de m^3 mais mapas socioambientais com conflito	44
4.14	Classificação das soluções situadas na fronteira de Pareto com peso 1 atribuído as variáveis em teste de 500 milhões de m^3	45
4.15	Teste de 90 milhões de m^3 mais mapas socioambientais	47
4.16	Classificação das soluções da fronteira de Pareto, segundo os pesos $w_1 = 1$, $w_1 = 8$, $w_3 = 8$, $w_4 = 4$, para teste de 90 milhões de m^3 , com mapas temáticos	48
4.17	Classificação das soluções da fronteira de Pareto, segundo os pesos $w_1 = 8$, $w_2 = 1$, $w_3 = 8$, $w_4 = 4$, para teste de 90 milhões de m^3 , com mapas temáticos	49
4.18	Classificação das soluções da fronteira de Pareto, segundo os pesos $w_1 = 1$, $w_2 = 8$, $w_3 = 4$, $w_4 = 8$, para teste de 90 milhões de m^3 , com mapas temáticos	50

LISTA DE TABELAS

3.1	Tabela das variáveis de decisão	25
4.1	Resumo dos resultado da represa 90 milhões m^3	35
4.2	Resumo dos resultado da represa 500 milhões m^3	39
4.3	Resumo dos resultado da represa 90 milhões m^3 com mapas de conflito . .	46

RESUMO

SOUSA, José Rui Castro de. M.Sc, Universidade Federal de Viçosa, março de 2011. **Um método multiobjetivo para o posicionamento de barragens.** Orientador: Marcus Vinícius Alvim Andrade. Co-orientadores: Fernando Falco Pruski e Jugurta Lisboa Filho.

Este trabalho apresenta um método para determinar, aproximadamente, a posição mais apropriada em um terreno representado por um modelo digital de elevação para construir uma barragem tal que o reservatório gerado possa armazenar um dado volume de água. A posição será selecionada considerando os pontos do rio e será feita baseando no custo de construção da barragem e os impactos ambientais. A idéia é definir uma função objetivo que deve ser minimizada. A área alagada é determinada tendo por base a rede de drenagem, isto é, a direção de fluxo e o fluxo acumulado. A primeira etapa é computar a altura, a direção e a extensão da barragem usando a direção do rio e a elevação da matriz. Posteriormente, a área alagada é obtida aplicando a busca em largura (*BFS – Breadth First Search*) para computar a componente conexa do ponto do rio onde a barragem será construída. De fato, a área alagada é um subconjunto da componente conexa do ponto do rio composto por todos os pontos cuja elevação não é maior que a altura da barragem e estão à montante do rio. Após conhecer a região alagada, a capacidade do reservatório é calculada usando um novo método mais simples e mais preciso que os métodos descritos na literatura. Finalmente, dado os pontos candidatos onde há possibilidade para construir uma barragem que gere um reservatório com uma capacidade desejada (ou mais), os pontos são avaliados considerando alguns fatores como: o custo para construir a barragem, o tamanho da lâmina d'água, o número de pontos alagados de áreas urbanas, áreas de reserva, áreas indígenas etc. A análise dos pontos é feita usando a classificação Pareto-ótimo. Para efeito de teste, os cálculos deste estudo foram feitos utilizando dados captados pela *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). As principais contribuições deste trabalho são: a direção, extensão e altura da barragem, são determinadas automaticamente; a capa-

cidade do reservatório é computada usando um método mais simples e mais preciso (usando terrenos com boa resolução); e a determinação, aproximada, da posição mais "adequada" do rio para construção da barragem, considerando uma função objetivo que pode ser ajustada pelo usuário.

ABSTRACT

SOUSA, José Rui Castro de. M.Sc, Universidade Federal de Viçosa, March, 2011. **A multiobjective method for placement of dams**. Adviser: Marcus Vinícius Alvim Andrade. Co-Advisers: Fernando Falco Pruski and Jugurta Lisboa Filho.

This paper presents a method to determine, approximately, the more appropriated position in a terrain represented by a digital elevation model to build a dam such that the generated reservoir can keep a given volume of water. The position will be selected considering points in a river and will be made based on the dam construction cost and environmental impacts. The idea is to define an objective function that should be minimized. The flooded area is determined using the basic drainage network, that is, the flow direction and accumulation flow. The first step is to compute the dam height, direction and length using the river direction and the elevation matrix. Next, the flooded area is obtained applying a breadth first search to compute the connected component of the point in the river where the dam will be build. In fact, the flooded area is a subset of the connected component of the river point composed by all points whose elevation is no higher than the dam height and are in the river upstream. After knowing the flooded region, the reservoir capacity is calculated using a new method simpler and more accurate than the methods described in the literature. Finally, given the candidate points where is possible to build a dam that generates a reservoir with a desired capacity (or more), the points are evaluated considering some factors as: financial cost to build the dam, the reservoir area surface, the reservoir will flood urban, indian, forest areas, etc. The points analysis is done using the Pareto-optimal classification. The proposed method is tested using data captured by Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). The main contributions of this work are: the dam direction, length and height are automatically determined, the reservoir capacity is computed using a simpler and more precise method (using the terrain with good resolution) and the more appropriated river position where to build a dam is approximately determined

considering an objective function that can be adjusted by the user.

Capítulo 1

Introdução

A água é um elemento essencial à vida humana, sendo necessária em muitas atividades como: abastecimento urbano, geração de energia elétrica, irrigação, navegação, pesca etc.

Visto que a quantidade de água disponível para o consumo existente na natureza é finita, é natural pensar na redução da sua disponibilidade e escassez no futuro. A disponibilidade hídrica no mundo tem diminuído de forma considerável, tendo como principais fatores o crescimento populacional, a expansão das fronteiras agrícolas e a degradação do meio ambiente. O relatório anual das Nações Unidas JACOBI [2007] faz projeções preocupantes para o futuro da humanidade. O relatório prevê que em 2050 mais de 45% da população mundial não poderá contar com a quantidade mínima per capita de água para necessidades básicas.

De toda a água disponível na Terra, 97,6% está concentrada nos oceanos e portanto a água potável corresponde a apenas 2,4% restantes sendo que destes, somente 0,31% não estão concentrados nos pólos na forma de gelo. Resumindo, de toda a água na superfície da Terra, menos de 0,02% está disponível em rios e lagos na forma de água potável, pronta para consumo.

Portanto é de fundamental importância a discussão sobre o uso responsável da água, uma vez que a sobrevivência das gerações futuras depende diretamente das decisões que hoje estão sendo tomadas.

Assim torna-se necessário adotar mecanismos de suporte ao gerenciamento de recursos hídricos, incluindo o uso de sistemas de informações geográficas para o auxílio efetivo neste gerenciamento. No Brasil, isso é ainda mais importante, visto que 8% da água potável disponível no mundo se encontra em território brasileiro JACOBI [2007].

Entretanto, por muito tempo não foi dada a devida atenção ao uso e à preservação dos recursos hídricos que o país dispõe. É fácil notar que a falta de planejamento do

uso e administração do recurso gera grandes conflitos, pela importância que a água tem na sociedade e na vida humana.

Atualmente, os gestores dos recursos hídricos têm buscado adotar mecanismos para auxiliar este gerenciamento e aproveitar, de forma racional, o potencial hídrico que o país dispõe. Neste sentido, diversas leis ambientais têm sido criadas para aumentar o poder de fiscalização, além das várias campanhas promovidas no intuito de conscientizar a população. Vários projetos científico-tecnológicos têm sido apoiados financeiramente para que novos mecanismos de gestão sejam desenvolvidos. Em geral, utilizam-se os sistemas de informação geográficos para esse fim. Por exemplo, pode-se citar o desenvolvimento de sistemas para análise e gestão de recursos hídricos, para dimensionamento de sistemas de drenagem e bacias de acumulação, sistema para gerenciamento de outorgas e etc MATOS et al. [2003].

Dentre as diversas aplicações envolvendo hidrologia, uma questão importante é a necessidade da construção de reservatórios. Uma importante contribuição é o aumento da disponibilidade natural para as demandas de água de uma região. Os reservatórios têm grande destaque em regiões e/ou comunidades em situação de intermitência de água, pois através deles é possível manter este bem disponível por um maior período do ano LOPES & FREITAS [2003].

A CODEVASF apresentou o relatório síntese dos estudos visando atender às suas necessidades referentes aos Estudos Preliminares dos Sistemas de Abastecimento de Água para Usos Múltiplos na Bacia do Rio São Francisco [CODEVASF]. Tais estudos tem por finalidade dar sustentabilidade ao desenvolvimento agrícola como forma de geração de emprego e renda, seu objetivo foi avaliar as disponibilidades hídricas da bacia do São Francisco para atender a irrigação, beneficiando também a navegação, o controle das cheias e o controle ambiental.

Estudos como este, viabilizam estudos paralelos, como por exemplo, a necessidade de construção de reservatórios de água em determinada região. Além de manterem a água disponível por mais tempo, os reservatórios contribuem bastante com a regularização das vazões, principalmente em épocas de cheias. O controle das cheias, além da melhoria das condições de navegabilidade na hidrovia, evitam diversos transtornos como inundação de cidades e povoados, inundação de rodovias, inundação de áreas irrigadas, inundação de áreas como potencial agrícola ou mineral etc [CODEVASF].

Para se determinar a necessidade da construção de um reservatório numa determinada região é necessário avaliar o consumo e/ou demanda juntamente com a disponibilidade hídrica da região LOPES & FREITAS [2003]. Identificada a necessidade (conveniência) da construção do reservatório, a questão proeminente é a identificação do local mais adequado ao longo do curso do rio para a sua construção.

O processo de escolha e implantação envolve diversas questões sociais e econômicas importantes, como a demanda de água na região, a qual determina o volume de água que deverá ser armazenado. Deve-se levar em consideração fatores como a extensão da área de inundação, que corresponde à área a ser alagada pela construção dessa barragem, e a existência de núcleos populacionais, rodovias, ferrovias, sítios arqueológicos, etc na região a ser alagada. Estes fatores, se desconsiderados, geram impactos negativos, como o alto custo econômico e social de implantação do reservatório e um grande desperdício de água por evaporação, caso a área do reservatório de acumulação for muito grande.

1.1 Objetivos

O objetivo geral do trabalho foi o de desenvolver um sistema de apoio para a identificação do "melhor" posicionamento de reservatório para a acumulação de água. Mais precisamente, dado um terreno representado por uma matriz de elevação e um valor k representando certo volume de água, o objetivo é identificar o ponto do terreno onde se possa construir uma barragem que gere um reservatório com capacidade de armazenar no mínimo k litros de água, sendo que o "custo" da construção da barragem seja "o menor possível".

Para alcançar o objetivo geral, têm-se alguns objetivos específicos a serem atingidos, tais como:

- Elaborar uma heurística para encontrar a altura máxima da barragem que é possível ser construída num ponto do rio;
- Definir a área alagada gerada pelo posicionamento de uma barragem;
- Apresentar um método alternativo para a determinação do volume do reservatório correspondente a essa região alagada;
- Analisar o local alagado, procurando minimizar a área da inundada, o comprimento da barragem e os impactos socioambientais.

Capítulo 2

Referencial teórico

A determinação da região alagada foi realizada utilizando como elemento básico a rede de drenagem do terreno JENSON & DOMINGUE [1988]; O'CALLAGHAN & MARK [1984]; TARBOTON [1997]. De um modo geral, a rede de drenagem é composta, dentre outros elementos, pela direção do escoamento e acumulação de fluxo cuja obtenção são descritos a seguir.

2.1 Formas de representação de terrenos

As formas mais comuns de representação de um terreno são: rede triangular irregular (TIN, *triangulated irregular network*) ou modelo digital de elevação (MDE) armazenado numa matriz, conforme Figura 2.1.

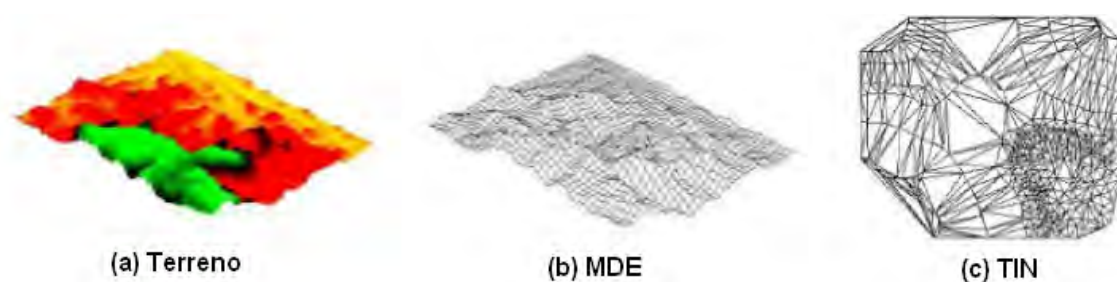


Figura 2.1. Modelos de representação de terreno. (a) Terreno. (b) Modelo digital de elevação (c) *Triangulated Irregular Network*

Uma TIN é uma representação vetorial da superfície do terreno formada por pontos de coordenadas (x, y, z) irregularmente distribuídos. As coordenadas são conectadas entre si, formando uma rede de triângulos não sobrepostos BERG et al. [2000]. Assim

a superfície é aproximada pelos retalhos triangulares. A elevação (coordenada z) de um ponto qualquer pode ser obtida interpolando os vértices do triângulo cuja projeção planar contém a projeção (x, y) do ponto em questão.

Um MDE, normalmente armazenada numa matriz, contém as elevações de um conjunto de pontos regularmente distribuídos sobre uma determinada região (Figura 2.2) FELGUEIRAS [2001].

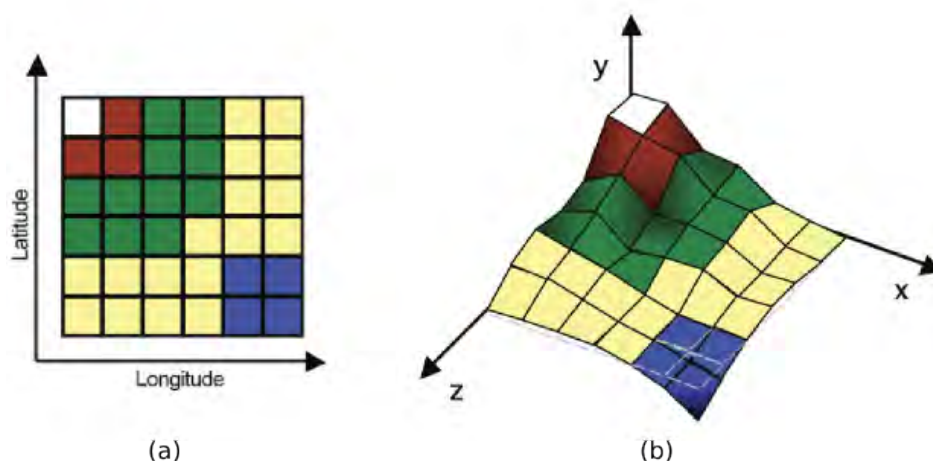


Figura 2.2. (a) Modelo digital de elevação, matriz. (b) Modelo tridimensional, cada posição dessa estrutura representa a elevação do terreno original.

Um terreno também pode ser representado por mapas de contorno (isolinhas). Embora estes mapas possam ser facilmente interpretados pelos usuários, não são muito adequados para o processamento computacional, devido à ausência de informações sobre a morfologia do terreno entre duas linhas do mapa.

Vale observar que, a opção por um modelo de representação não significa uma restrição, pois há diversos métodos FELGUEIRAS [2001]; KREVELD [1997] que realizam a conversão entre as três formas de representação descritas anteriormente.

2.2 Rede de drenagem

O elemento básico da hidrografia de um terreno é a sua rede de drenagem JENSON & DOMINGUE [1988]; O'CALLAGHAN & MARK [1984]; TARBOTON [1997], sendo ela o ponto de partida para muitos estudos nesta área. A rede é composta pela área de contribuição, pela direção do escoamento e pelo fluxo acumulado.

A área de contribuição pode ser entendida como a área de um terreno que contribui para a formação do escoamento na seção considerada JENSON & DOMINGUE

[1988]; O'CALLAGHAN & MARK [1984]; TARBOTON [1997]. É a área que recebe a água da chuva e a direciona para a formação dos rios.

A direção do escoamento é definida para cada ponto do terreno. Supondo que uma unidade de água alcance uma determinada posição do terreno, a direção do escoamento caracteriza para onde essa unidade de água seguirá devido o escoamento. Como será mostrado adiante, essa direção é definida pela cota das células dos vizinho (s) mais baixo (s).

O fluxo acumulado é uma propriedade de cada *pixel* do terreno e corresponde à quantidade de água que escoar para aquele *pixel* MOORE et al. [1991].

Há diversos métodos para a obtenção da rede de drenagem JENSON & DOMINGUE [1988]; O'CALLAGHAN & MARK [1984]; TARBOTON [1997] que, em geral, adota dois tipos de vizinhanças para uma célula: D4 ou D8. Estes métodos supõem que cada célula, que não se localize nas bordas do terreno, possui quatro ou oito células vizinhas respectivamente.

Além do tipo de vizinhança deve-se também definir o tipo de escoamento, considerando um dos modelos (Figura 2.3).

- Fluxo em direção única (SFD - *Single-flow-direction*): o fluxo é direcionado numa única direção para a célula vizinha que possua o menor valor de elevação e que seja menor que a elevação da célula em questão;
- Fluxo em varias direções (MFD - *Multi-flow-directions*): o fluxo é dividido igualmente e distribuído para todas as células vizinhas que possuam elevação menor do que a célula em questão.

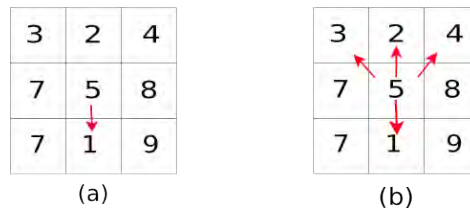


Figura 2.3. Modelos de direcionamento de fluxo baseado na vizinhança D8: (a) SFD - fluxo em direção única; (b) MFD - fluxo em varias direções. Os valores nas células representam a elevação

Do ponto de vista computacional, a escolha dos modelos SFD ou MFD não é crítica, pois em ambos os modelos, a direção de fluxo e o fluxo acumulado podem ser computados com a mesma complexidade assintótica. Do ponto de vista prático, é

importante essa escolha porque o modelo SFD geralmente produz uma rede de fluxo com menor número de trechos convergentes, estes mais longos; enquanto o modelo MFD produz uma rede mais difusa, com um maior número de trechos, porém mais curtos.

Na determinação da direção de fluxo, há algumas situações em que a determinação da direção de fluxo não é possível de imediato. Isso pode ocorrer porque a célula é um mínimo local ou porque pertence a uma região horizontalmente plana.

Um mínimo local é uma célula do terreno cuja elevação é menor ou igual à elevação de todas as suas vizinhas. Já uma região plana corresponde a um conjunto de células adjacentes, que possuem mesma elevação. A igualdade entre as elevações impede a imediata definição da direção do escoamento. As células pertencentes à borda de uma região plana e que não são mínimos locais são denominados pontos de escoamento. Isto é, que possuem pelo menos uma célula vizinha com elevação menor que a sua.

Segundo ROSIM et al. [2003], as regiões planas podem ser classificadas de duas formas:

- **Platôs:** definem-se como planos altos, ou seja, são regiões planas que possuem pelo menos um *pixel* de escoamento. Desta maneira é possível afirmar que existe pelo menos um vizinho com elevação inferior as células deste platô.
- **Fossos:** são regiões do terreno onde nenhuma de suas célula vizinha possuem elevação menor. Caracterizam-se como regiões planas sem ponto de escoamento.

A água sempre segue o caminho que apresenta menor resistência. A direção de escoamento segue gradientes menores, e conseqüentemente, menos obstáculos. O fluxo num platô é orientado na direção dos *pixels* de menor potencial.

Já na determinação do escoamento de um fosso é necessário induzir um alagamento na região. O alagamento é uma espécie de preenchimento artificial com a intenção de descobrir a direção do fluxo apresentado no fosso. Então haverá acumulação de água, que "transbordará" escoando através das células vizinhas com menor elevação. Assim, as posições das células vizinhas indicarão a direção do escoamento das células do fosso. Na Figura 2.4a, a orientação do escoamento da água no platô de elevação igual a quatro será direcionado aos vizinhos de elevação três.

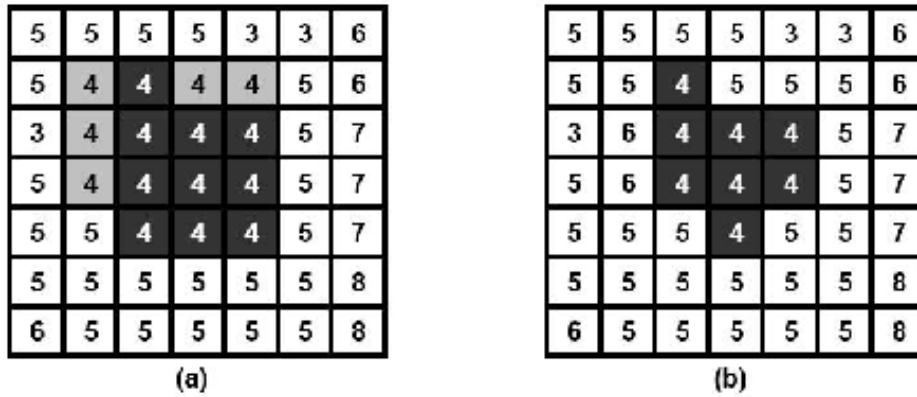


Figura 2.4. Ocorrência de região plana: (a) Platô; (b) Fosso. As células cinza mais escuras representam a região plana e as cinzas mais claras (no platô) representam os *pixels* de escoamento.

Diversos métodos de obtenção da rede de drenagem como, por exemplo, os apresentados por ROSIM et al. [2003]; TARBOTON [1997], eliminam os fossos (depressões espúrias) realizando um pré-processamento do terreno, a fim de preenchê-lo até que um *pixel* da grade com valor de elevação maior que a elevação máxima do fosso seja encontrada, conforme mostra a Figura 2.5.

Uma maneira de realizar este processo é definir uma rampa de distância geodésica, partindo-se da(s) célula(s) da borda da área plana vizinha(s) à célula de menor valor de elevação que se encontra fora dela.

Na Figura 2.4 este processo preencherá todo o fosso de elevação quatro até atingir a cota cinco. Neste momento, o que era fosso se torna platô, o fluxo das células se direciona aos *pixels* de elevação igual a três. Fazendo um corte no terreno se objetivando traçar um perfil deste, é possível entender este preenchimento pela Figura 2.5.

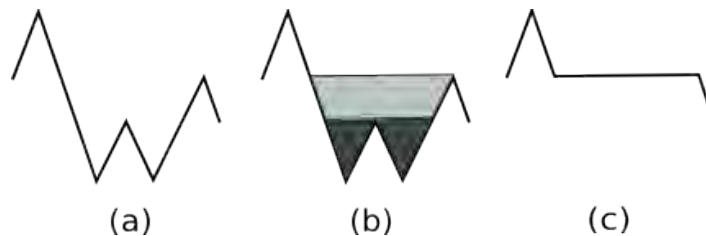


Figura 2.5. Preenchimento e transbordamento de um fosso, transformando-o num platô.

O processamento de um platô é realizado após a primeira etapa da obtenção das direções de escoamento, quando a direção de escoamento em todas as células é

conhecida, exceto nas células dos platôs. Conhecidos os *pixels* de escoamento de cada platô, a direção de escoamento de suas células é definida de modo que este seja orientado na direção das células de escoamento.

2.3 Reservatórios de água

2.3.1 Construção de reservatórios

Os reservatórios, barragens, açudes ou represas são utilizados, sobretudo para abastecimento de zonas residenciais, agrícolas, industriais; para produção de energia elétrica; regularização de vazões. A finalidade principal de sua construção é a de regularizar as vazões. O processo de determinação do local a ser construída a barragem envolve uma série de questões sociais, ambientais e econômicas, que devem ser levadas em conta como, por exemplo:

- **Consumo humano:** Água é fonte da vida. O seu consumo é indispensável à vida humana. Desta forma, a água deve ser um bem acessível a qualquer região habitada, principalmente nas localidades de maior concentração de pessoas.
- **Desenvolvimento agrícola:** A agricultura irrigada é a atividade humana que demanda maior quantidade de água. Em termos mundiais, estima-se que esse uso responda por cerca de 80% das derivações de água. No Brasil, esse valor supera os 60% FGV [1998]. Por isso, com o desenvolvimento agrícola é necessário a criação de reservatórios que garantam água próximo a estas atividades.
- **Rios intermitentes:** Regiões cuja presença de rios intermitentes é uma realidade, necessitam de uma atenção maior no processo de determinação da construção de reservatórios de água. Ou seja, barragens que represando a água, interferirão no regime fluvial dos cursos d'água e sobre o meio ambiente. Segundo RASSOL [1984], de toda a superfície terrestre, 40% classifica-se como zonas áridas, e esta proporção vem aumentando devido a processos de desertificação, variação climática e destruição das grandes florestas. Atualmente 20% da população humana vive nas regiões áridas e semi-áridas GRAF [1988]. Neste contexto, os rios intermitentes são fundamentais para a sobrevivência da população e economia da região e, a construção de reservatórios de água surge como uma boa opção para a regularização da vazão destes rios ao longo do ano.
- **Controle das cheias:** Regiões cuja determinada época do ano sofrem com o aumento do volume de água no leito do rio, também merecem atenção no processo

de posicionamento de barragens. Para estes casos a regularização de vazão evita diversos transtornos como inundação de cidades e povoados, inundação de rodovias, inundação de áreas irrigadas, inundação de áreas como potencial agrícola ou mineral etc [CODEVASF]

- **Prejuízos sociais e ambientais:** Os custos ambientais e sociais decorrentes da implantação de uma grande barragem são bastante altos. Embora não sejam tradicionalmente contabilizados pelos construtores, os prejuízos são claramente observados e pagos por toda a sociedade. Entre os principais custos socioambientais envolvidos na fundação de uma barragem destacam-se: deslocamento forçado de centenas ou milhares de famílias em decorrência da inundação de suas terras; inutilização de áreas para cultivo agrícola; destruição de florestas, lagoas marginais e outros ecossistemas; invasão de áreas destinadas à reserva indígena e ambientais; transposição de vias rodoviárias, ferroviárias devido ao alagamento da região.

Atender todos essas questões satisfatoriamente motivou a criação de uma estratégia de busca, que permita de forma automatizada encontrar uma ou mais solução viável. A busca por soluções que abarquem o maior número de requisitos atendidos, com interseção de fatores diversificados torna o trabalho mais rico, interessante e relevante.

As barragens são feitas de forma a maximizar o aproveitamento de água dos reservatórios. Deve-se assegurar que a barragem será assentada sobre um leito de terra estável, com baixa permeabilidade. A taxa de permeabilidade pode ser detectada por meio de criteriosas sondagens, executadas no sentido longitudinal do eixo de instalação do respectivo aterro MATOS et al. [2003].

2.3.2 Volume por seções consecutivas (Volume do trapézio)

No projeto de um reservatório, o volume a ser represado deve ser conhecido e estudado. Essa variável é bastante importante nos estudos de regularização de vazões, levando em consideração as demandas hídricas da região. Um método simples e muito utilizado descrito em MATOS et al. [2003], consiste em traçar várias curvas de nível, tomando um espaçamento uniforme entre elas. Determina-se o volume do trapézio compreendido entre elas, conforme ilustrado na Figura 2.6.

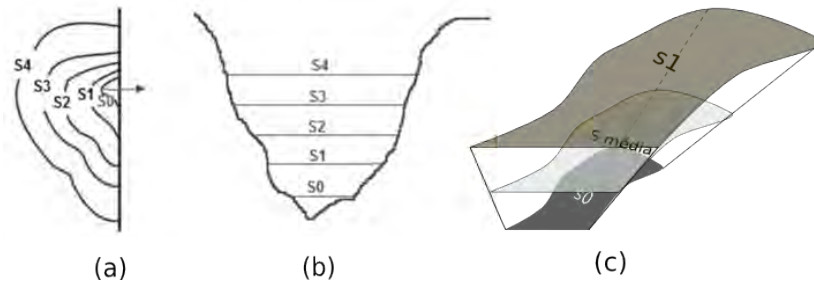


Figura 2.6. (a) Curvas de nível de um terreno.(b) Visão da seção transversal.
(c) Visão tridimensional do trapézio compreendido entre S_0 e S_1

Neste método, a primeira etapa é encontrar a área das superfícies geradas pelas curvas de nível (área superficial), pois elas serão elementos básicos na obtenção do volume.

De forma geral, a superfície de um terreno não segue nenhum padrão ou polígono conhecido. O que dificulta o processo, já que não permite a aplicação de fórmulas elementares. Uma possibilidade para o estudo da curva de nível seria usar como parâmetro alguns pontos desta curva, interpolá-los, e assim gerar a função matemática que descreve a curva de nível. O conceito de integral definida surge como uma boa opção para solução do volume compreendido sob a função matemática que descreve a curva de nível. Basta integrar a função e obter a área da superfície estudada.

Um método mais simples e rápido para o cálculo da área de um polígono qualquer é o método de Gauss BEYER [1978]; WEISSTEIN [2007]. Ele recebe como parâmetro as coordenadas (x_i, y_i) dos pontos conhecidos do polígono, todos ou parte deles, que alimentam sua função (Figura 2.7). Ao aplicar a função de Gauss para essas variáveis obtém-se uma aproximação da área geométrica (S_n) desejada. Quanto mais pontos conhecidos, mais próxima estará a área obtida da área verdadeira.

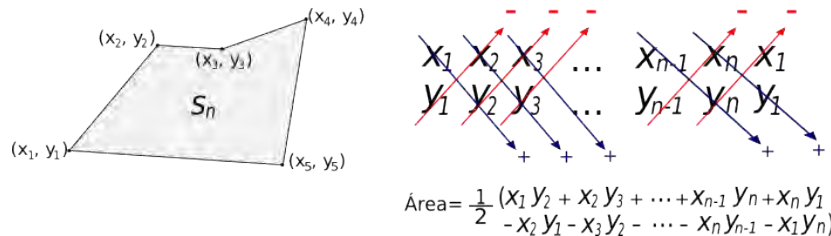


Figura 2.7. Aplicação do método de Gauss para obtenção da área S_n do polígono.

A partir daí determina-se o volume entre duas seções transversais consecutivas S_n e S_{n-1} segundo a equação 2.1. O volume V_n compreendido entre duas curvas de

nível é realizado pela soma das áreas de suas superfícies imaginárias multiplicada pela distancia média entre elas. Ou seja, este resultado é obtido através do produto da distância d pela superfície média entre S_n e S_{n-1} . Portanto, os volumes parciais são obtidos aplicando-se a equação.

$$V_n = \left(\frac{S_{n-1} + S_n}{2} \right) d \quad (2.1)$$

A capacidade de um reservatório, que usa como base do cálculo do volume as curvas de nível, é definida pela aplicação da equação (2.1) sobre cada curva de nível, tomadas duas a duas. E por fim, se executa o somatório dos n volumes parciais executados. Obtém-se então o volume total do reservatório em questão.

Capítulo 3

Materiais e métodos

No posicionamento do eixo da barragem para a construção do reservatório, o terreno foi representado por uma matriz digital de elevação T devido a simplicidade da representação e do grande volume de dados atualmente disponível SOUSA & MATOS [2006]. Os mapas temáticos correspondentes ao(s) local(is) onde há núcleo(s) populacional(is), indígena(s) e/ou de proteção ambiental, ferrovias e rodovias foram representados por matrizes binárias, 0 ou 1 sendo que a célula do terreno onde não houver empecilhos para o alagamento recebeu o valor 0 e valores iguais à 1 indicam áreas cujo alagamento deve ser evitado, por conter áreas urbanas, indígenas, etc.

A rede hidrográfica deste terreno foi obtida através do *software* livre *Geographic Resources Analysis Support System* Team [2004]; SOUSA & MATOS [2006]; The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) [2007]. Esse sistema adota os métodos descritos no Capítulo 2 para determinar a matriz de escoamento e a matriz de acumulação.

No processo de escolha do local para a construção da barragem, o aspecto topológico considerado foi a procura por locais do rio que tenham lagura pequena (garganta do rio), que contribui para diminuir o custo da construção da barragem [DNOCS].

Antes da construção de pequenas barragens de terra, as investigações geológicas devem ser desenvolvidas a fim de se assegurar uma fundação estável e segura. Uma boa investigação pode ser feita baseando-se essencialmente em observações de campo, no bom-senso e em informações disponíveis a respeito da área; podendo assim fazer uso de poucos instrumentos MATOS et al. [2003].

A partir do MDE do terreno e das matrizes de direção de escoamento e fluxo acumulado em cada *pixel* do terreno, a idéia básica é percorrer o trecho do rio onde se deseja construir a barragem à procura do local mais apropriado para tal. Este processo consiste em determinar, para cada seção do rio, a altura da barragem necessária para

obter o reservatório capaz de armazenar o volume desejado. Ou seja, o elemento central do processo é a determinação da altura da barragem para cada seção do rio conforme descrito a seguir.

Uma vez definida a posição, a altura e o comprimento da barragem, o próximo passo é investigar a área alagada (Seção 3.4), para determinar o volume do reservatório que será gerado utilizando o processo descrito na Seção 3.4.3. Caso o volume atenda o valor desejado para aquela região, a área alagada é avaliada de acordo com os impactos socioambientais.

Para realizar esta avaliação definiu-se uma função objetivo a ser minimizada, apontando, assim, a "melhor posição" do terreno para construção do reservatório. A função objetivo e suas restrições está descritas na Seção 3.5.2.

3.1 Definição do curso do rio

Dada a rede de drenagem, em especial a matriz de acumulação, é possível definir quais coordenadas do MDE pertencem ao rio. Esta determinação do rio é feita fixando uma cota c e, assim, todas as células do terreno que contiverem valor de fluxo acumulado maior ou igual a c , fazem parte do rio.

Outra forma de informar ao sistema quais pontos do terreno fazem parte do rio é conhecê-los previamente e passá-los como parâmetro de entrada, sendo que as coordenadas devem estar em arquivo texto (ASCII), em que cada linha desse arquivo contém a coordenada x e y , correspondente à linha e à coluna do *pixel* em questão.

A primeira abordagem é a padrão, sendo que, a cota c que definirá os *pixel* do rio deve ser informada, juntamente com os requisitos iniciais do sistema.

3.2 Altura da barragem

O processo de posicionamento do reservatório tem como aspecto inicial a determinação da altura h da barragem a ser construída de modo que o reservatório gerado possa armazenar o volume desejado SOUSA et al. [2010].

Uma maneira simples de obter a altura da barragem é utilizar um processo de busca seqüencial, calculando o volume do reservatório para cada valor da altura, fazendo esta altura assumir a seqüência de valores $1, 2, 3, \dots, hMax$, em que $hMax$ é a maior altura possível obtida, considerando os divisores de água da bacia de contribuição. É fácil perceber que este método é bastante ineficiente, pois o cálculo do volume do reservatório consome um tempo considerável.

Para contornar este inconveniente foi utilizado uma adaptação do processo de busca binária DEITEL & DEITEL [2001]; ASCENCIO [2005], em que o objetivo é encontrar o valor da altura no intervalo $[1..hMax]$, tal que o volume do reservatório gerado seja maior ou igual ao volume desejado.

Para realizar este processo, o primeiro passo é obter o valor de $hMax$ descrito a seguir.

3.2.1 Definição da altura máxima

Dado um ponto $p_i = (x_i, y_i)$ e a direção de escoamento nesta célula, a barragem terá orientação perpendicular a esta direção. A partir daí é possível analisar a região ao longo do eixo de construção da barreira e determinar a maior altura que a barragem pode atingir. Esse valor é o $hMax$.

A obtenção de $hMax$ se baseia no mínimo entre os máximos locais à "direita" (M_d) e à "esquerda" (M_e) de p_i (Figura 3.1) denominado $pMax$. A obtenção desses valores é feita partindo do ponto p e seguindo em ambas as direções procurando as células de maior elevação. Para evitar que o máximo local esteja muito afastado de p , ou ainda, que este ponto pertença à outra bacia de acumulação, o processo segue até encontrar um novo curso d'água.

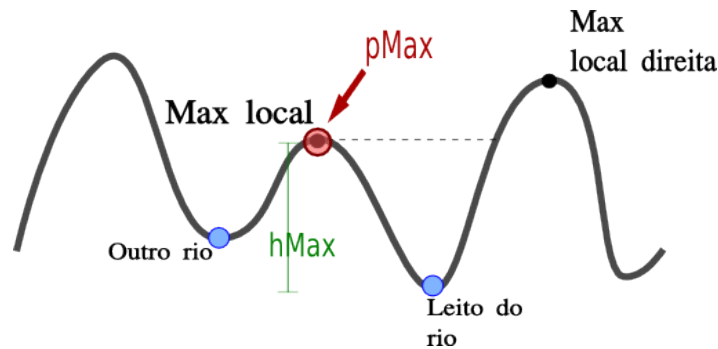


Figura 3.1. Para este caso o máximo à esquerda é também o $pMax$. Ele é menor que o máximo à direita. A maior altura possível para o posicionamento de uma barragem neste ponto do leito do rio é o $hMax$ que corresponde a diferença da elevação de $pMax$ e do leito do rio. O máximo local é investigado até o próximo curso d'água

A partir da obtenção de $pMax$, a determinação de $hMax$ se torna tarefa simples. Basta efetuar a diferença entre a elevação da célula $pMax$ e a elevação do ponto p_i analisado.

3.2.2 Obtenção da altura

Uma vez definido o $hMax$ para um *pixel* $p_i = (x_i, y_i)$ do rio, o processo de obtenção da altura ideal da barragem para atingir o volume desejado, é feito da seguinte forma:

Etapa (1): Atribui-se $hMax$ a h_i e calcula-se o volume v_i gerado por h_i .

Etapa (2): Se v_i é menor do que o volume desejado não é possível construir uma barragem naquele *pixel* para obter um reservatório como o volume desejado e o processo é realizado considerando o próximo ponto do rio. Caso contrário, pode existir uma altura entre 1 e $hMax$ que atenda o volume requerido e passe à etapa (3).

Etapa (3): O próximo valor da altura a ser verificado é determinado utilizando uma adaptação do algoritmo de busca binária. Essa nova altura é o elemento situado no "meio" do espaço de busca corrente obtido conforme descrito a seguir.

Etapa (4): Uma vez definido o valor da altura determina-se a extensão da barragem (Seção 3.2.3.1), a região alagada (Seção 3.4) e o volume v_i produzido (Seção 3.4.3).

Etapa (5): Caso o volume v_i seja menor que o volume k desejado ou superior a este valor em 20%, retorna-se à etapa (3) para se tentar uma nova altura; senão, este h_i é o adequado para construção do reservatório.

O primeiro valor da altura a ser analisado sempre é o $hMax$. O intuito é tornar o processo mais eficiente evitando testes desnecessários, pois, se uma barragem de altura $hMax$ não for capaz de armazenar o volume desejado, nenhum outro valor da faixa $[1..hMax]$ será.

Na etapa (3), a escolha do próximo valor da altura segue as diretrizes da pesquisa binária. Mais precisamente seja:

$$h_1 = \left(\frac{1 + hMax}{2} \right) \quad (3.1)$$

Caso o volume do reservatório gerado pela barragem de altura h_1 seja maior que v_i em 20%, é testado um novo h_2 , repetindo o processo no intervalo $[1..h_1]$. Caso contrário, avalia-se uma nova altura h_3 no intervalo $[h_1..hMax]$. E assim sucessivamente até que o volume v_i seja atendido.

Portanto, a proposta da pesquisa binária é obter a altura da barragem de forma mais eficiente evitando o cálculo do volume do reservatório para várias alturas inadequadas.

3.2.3 Orientação e comprimento da barragem

O processo real de projeto de uma barragem passa obrigatoriamente: pelo estudo da topografia da área, com análise dos seus mapas topográficos; pela elaboração do projeto civil-arquitetônico de acordo com os interesses especificados e por todo o cálculo estrutural da obra.

Segundo Departamento Nacional de Obras Contra as Secas [DNOCS], a fundação de uma barragem é a região que suporta o maciço, incluindo as ombreiras e o fundo do vale. A sua preparação deve ser cuidadosa, pois, em geral, os pontos fracos de uma barragem se encontram no subsolo de fundação e no maciço.

3.2.3.1 Orientação

Neste trabalho, adotou-se que a barragem será construída sempre perpendicular à direção do fluxo. Será assentada de modo que o leito do rio seja perpendicular ao seu eixo longitudinal.

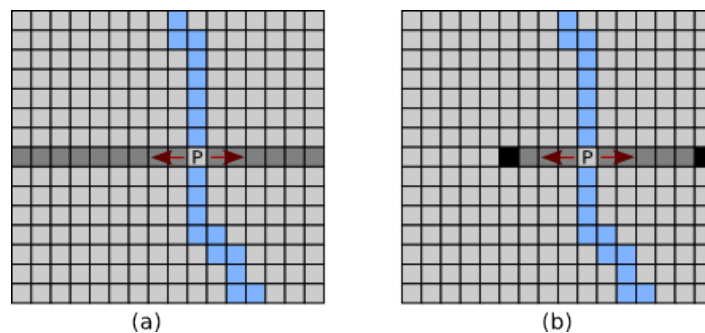


Figura 3.2. (a) A direção do escoamento no ponto P é vertical portanto a direção da barragem será na horizontal; (b) P é o ponto de partida para construção do reservatório que se estende até os pontos cuja altura seja maior que h (*pixels* pretos). No desenho a barragem será construída sobre 9 *pixels*.

3.2.3.2 Comprimento

Determinada a direção da barragem, o passo seguinte é definir seu comprimento, isto é, as células do terreno ao longo do eixo da barragem.

Supõe-se, no ponto p , a construção de um barreira de altura h . O comprimento da edificação é definida como sendo todos os *pixels* ao longo da "linha" perpendicular ao rio, cuja elevação é menor do que a altura h . Para definir os *pixels* do terreno que fazem parte da barragem é realizado um percurso a partir da célula escolhida, em ambas as direções. O percurso sobre a "linha" perpendicular ao rio vai até uma posição

do terreno cuja altura maior do que h seja alcançada (Figura 3.2b). Este percurso se estende até as ombreiras de cada lado. Ao final do percurso têm-se o conjunto dos pontos do terreno onde é proposta a construção da barragem.

3.3 Área de secção da barragem

O custo real para a construção da barragem não é trivial e não está no escopo deste trabalho. Conforme mencionado anteriormente, essa tarefa requer uma análise mais apurada da topologia e da geologia do terreno [DNOCS]. Contudo, a definição dessa variável é importante, uma vez que, na obtenção do ponto mais adequado, procura-se minimizar os custos. Desta forma, foi proposto uma estimativa para este valor que foi definido como a área da seção da barragem.

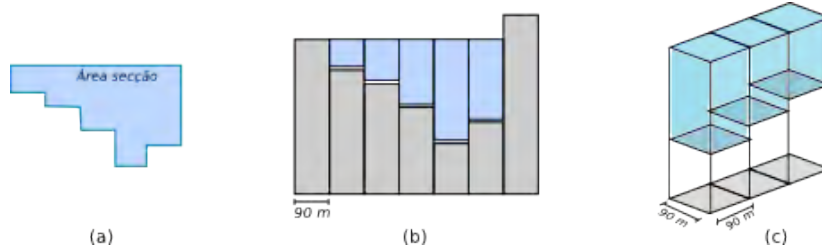


Figura 3.3. (a) Representa a seção da barragem. (b) Ilustra a área de seção da figura (a) definida em função de cada célula ao longo da extensão da barragem. (c) Um visão 3D da extensão da barragem.

No intuito de simplificar, barragem foi considerada como sendo a seção transversal necessária para represar o fluxo do rio, uma espécie de "parede". Assim a área de seção da barragem (Figura 3.3a) é definida como sendo a área de cada "retângulo" produzido pelas células pertencentes ao comprimento da barragem. Sejam $s_1, s_2, \dots, s_n$ o conjuntos dos *pixels* pertencentes a barragem. A área de seção produzida por um ponto s_i , onde $i = 1, 2, \dots, n$, é obtida pela diferença entre a altura h da barragem e sua elevação e_p , multiplicado pelo comprimento (resolução) de cada célula do MDE.

$$A(p) = (h - e_p) r \quad (3.2)$$

onde r é a resolução do MDE.

Conseqüentemente, o resultado A_{total} , referente à seção da barragem é dada pelo somatório da área dos "retângulo"gerado por cada *pixel* s_i .

$$A_{total} = \Sigma A(p) \quad (3.3)$$

3.4 Região alagada

A partir da determinação da posição, da altura e da extensão da barragem, o passo seguinte é identificar a região do terreno alagada devido ao represamento do rio. Uma célula pertence a região alagada se ela atende todos os seguintes critérios:

1. É conexa a pelo menos um ponto do rio;
2. É conexa a pelo menos uma célula do comprimento da barragem;
3. Está situada à montante da barreira construída;
4. Apresentar elevação inferior a altura h da barragem;

Essas características comuns definem as células numa mesma componente conexa cuja obtenção pode ser realizada utilizando um método de determinação de componentes conexas.

Para encontrar essa componente foi utilizado o algoritmo de busca em largura (*BFS – Breadth First Search*) KNUTH [1994].

3.4.1 Componente conexa

Em síntese, uma componente conexa pode ser entendida como um conjunto de células que têm características em comum. Esta similaridade entre os *pixels* confere a possibilidade de criar um caminho entre cada par de *pixel*. No presente estudo, o aspecto semelhante considerado foi a elevação das células isto é, células cuja elevação seja inferior à altura da barragem mais precisamente, dada uma matriz M e uma posição $p=(p_i, p_j)$ nesta matriz, as posições vizinhas a p são (p_{i+1}, p_j) , (p_{i+1}, p_{j+1}) , (p_i, p_{j+1}) , (p_{i-1}, p_{j+1}) , (p_{i-1}, p_j) , (p_{i-1}, p_{j-1}) , (p_i, p_{j-1}) e (p_{i+1}, p_{j-1}) . Dois pontos p_1 e p_2 são conexos se existe uma seqüência de pontos $q_1, q_2, \dots, q_n$ com $q_1 = p_1$ e $q_n = p_2$ tal que q_i é vizinho a q_{i+1} para todo $i = 1, 2, \dots, n-1$. Uma componente conexa na matriz M é um conjunto de *pixels* conexos que possuem uma determinada característica em comum. Em particular, uma $cc(h)$ é uma componente conexa formada pelos *pixels* conexos cuja altura é no máximo h .

Definição: A região alagada gerada por uma barragem de altura h construída numa seção p do rio é formada pela componentes conexa ao *pixel* p composta pelas células do terreno que estão à montante ¹ da barragem, que tangenciam o rio e o comprimento da barragem e cuja elevação é menor ou igual a h .

¹Montante de um *pixel* p é toda célula do terreno que está situada na direção contrária à direção do escoamento do *pixel* p . Portanto, a foz de um rio é o *pixel* mais a jusante deste rio, assim como a nascente é o seu *pixel* mais a montante.

3.4.2 Busca em largura

O método de busca em largura (*BFS – Breadth First Search*) KNUTH [1994] para o modelo digital de elevação funciona da seguinte forma: na matriz de elevação foi adotado o tipo de vizinhança *D8* onde cada ponto (i, j) da matriz, que não esteja situado na borda, tem oito vizinhos. O algoritmo inicia o processo de visita pelo ponto p onde esta sendo construída a barragem e explora de forma recursiva todos os seus vizinhos. Então, para cada um desses pontos adjacentes ainda inexplorados, visita-os e assim por diante, até que ele encontre o alvo da busca ou finalize as células (nós). Ele percorre sistematicamente as posições da matriz que pertencem à mesma componente conexa numa ordem bem definida e sem repetições desnecessárias.

Essa estratégia de busca marca as células já visitadas para não entrar em *loop* e não processar uma posição mais de uma vez. Além disso, para cada célula visitada, é verificada se a sua elevação é menor ou igual a h . Em caso afirmativo, ela é incluída na componente conexa (isto é, na região alagada) e é incluída na fila para que o processo possa prosseguir a partir dela. Em caso negativo, se a elevação da célula é maior do que h , a célula é descartada. A Figura 3.5 apresenta o resultado da execução desse processo numa região de um terreno.

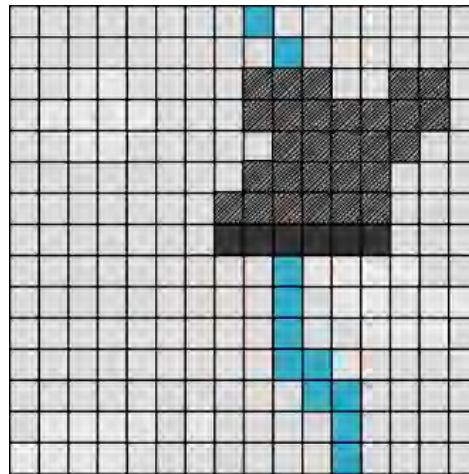


Figura 3.4. A região hachurada representa as células do MDE que fazem parte de uma mesma componente conexa e que foram alcançadas pelo algoritmo BL e indicam a região que será alagada.

3.4.3 Volume do reservatório gerado pela barragem

Uma vez obtida a região alagada, o passo seguinte é o cálculo do volume de água acumulado pelo alagamento. Neste propósito, aqui é apresentado um método mais simples

e mais preciso para determinar o volume do reservatório MATOS et al. [2003]. Esta abordagem produz melhores resultados (valores mais próximos da realidade) quando o terreno é representado com boa resolução (células com 90m ou menos).

O princípio deste cálculo é a soma sucessiva dos volumes acumulados em cada célula da região alagada e a precisão do algoritmo está na utilização na resolução das células do MDE.

Basicamente, o método consiste em somar o volume de água que cada célula da região alagada é capaz de armazenar. Mais precisamente, supondo que a resolução do MDE é r , isto é, que cada célula tem área $r \times r$ metros quadrados e supondo uma barragem de altura h , o volume que uma célula $p = (i, j)$ cuja elevação é e_p é capaz de armazenar é dado por:

$$V(p) = r^2 (h - e_p) \quad (3.4)$$

A Figura 3.5 ilustra essa equação. A altura do paralelepípedo é a diferença entre a altura h e a elevação de p . A capacidade total do reservatório é dada pelo somatório do volume de todas as células que pertencem à região alagada.

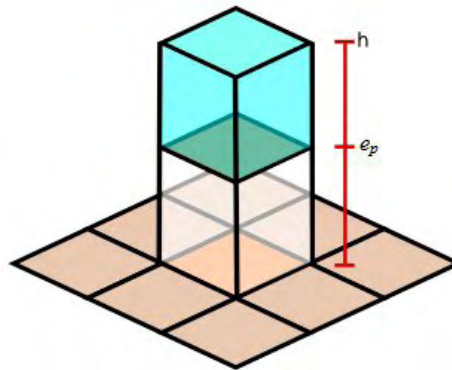


Figura 3.5. Volume de uma célula do MDE. Calculado pela multiplicação da "área da célula" pela diferença entre a altura da lâmina d'água e a altura da célula.

3.4.4 Busca pela seção mais adequada

Uma vez definido o trecho do rio onde se deseja construir a barragem, o passo final é determinar, dentre todas as seções nesse trecho, aquela onde é "mais adequada" a construção. Isto é feito verificando todas as seções do trecho de rio. Ou seja, para cada seção p_i obtêm-se a altura h_i , a área alagada e, por fim, o volume v_i produzido. Caso o volume encontrado atenda o volume desejado, esta seção é considerada candidata. Caso contrário, é descartada.

Ao final da avaliação de todas as seções pertencentes ao trecho do rio tem-se um conjunto de células que estão aptas à construção de um reservatório. Entretanto o objetivo é determinar a seção "mais adequada".

Para realizar esta avaliação, é utilizada uma função objetivo (Capítulo 4) que, uma vez minimizada, retorna a célula do rio mais adequada para o posicionamento do reservatório.

3.5 Avaliação da área alagada

O fato de encontrar uma posição p no rio onde a construção da barragem gere um reservatório que satisfaça o volume de água especificado, não implica que p seja o local mais adequado. É necessário avaliar os seus impactos socioambientais e seus custos.

O processo de avaliação das seções mais adequadas se baseia em identificação da área de inundação. Para isso, uma nova matriz é criada baseada no MDE e no conjunto de células submersas. A nova matriz tem a mesma dimensão da matriz de elevação. O valor de suas células é definido da seguinte maneira: valor 1 (um) indica que a respectiva posição no MDE será alagada, isto é, faz parte do reservatório; valor 0 (zero), que a célula no MDE não será alagada.

A avaliação dos custos e dos impactos de um reservatório é feita através da minimização de uma função objetivo que é descrita na seção 3.5.2. O modelo tem como requisito básico: o conjunto de pontos do rio aptos à construção da barragem, os *pixels* alagados e os mapas socioambientais. No intuito de minimizar a função objetivo e ranquear as seções candidatas, aplica-se um "filtro", eliminando as coordenadas do rio que estão fora da curva Pareto-Ótimo (seção 3.5.1).

3.5.1 Seleção das melhores seções com programação multiobjetivo

A Programação Linear tem sido amplamente CHENG & LI [1997] aplicada nas mais diversas áreas, por exemplo, na busca pela melhor solução possível a um problema de otimização, onde mais de um objetivo pode ocorrer simultaneamente, muitas vezes conflitantes. Nestes casos, a Programação Linear Multiobjetivo (PLMO) CHENG & LI [1997] se apresenta como uma forma de encontrar uma solução. Na otimização de um problema linear multiobjetivo (ou na otimização vetorial) é possível obter um conjunto de soluções eficientes, também chamadas de não dominadas, cuja característica é que elas não são comparáveis entre si em termos dos valores das funções objetivo. Assim,

a decisão seria tomada ordenando as soluções considerando os aspectos operacionais e gerenciais TAKAHASHI [2007].

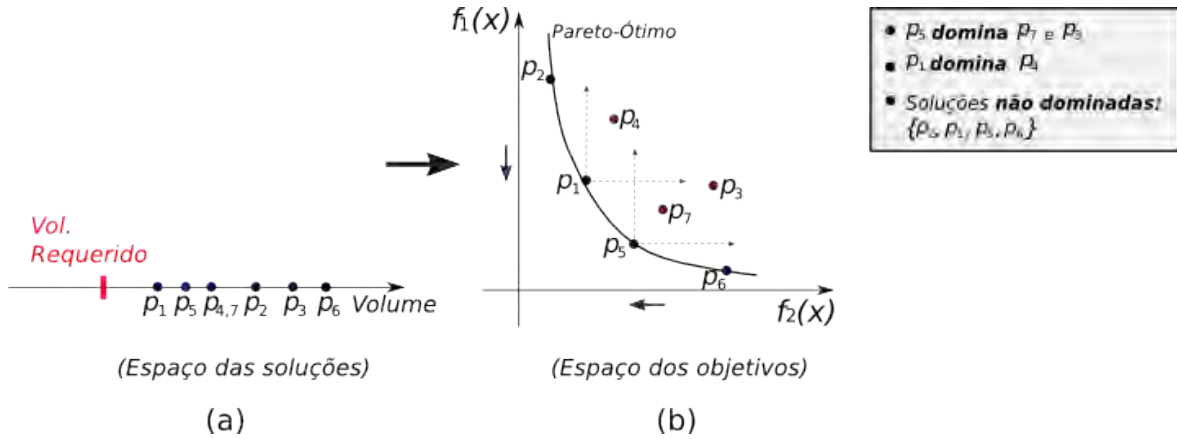


Figura 3.6. (a) Os pontos de p_1 à p_7 atendem o requisito inicial do volume e estão no espaço solução. (b) O espaço dos objetivos leva em conta os objetivos f_1 e f_2 nos quais deseja-se minimizá-los. É apresentada a relação de dominância entre algumas soluções.

Assim, suponha um conjunto $B = (p_1, p_2, \dots, p_n)$ de soluções viáveis, representando seções do rio onde é possível construir uma barragem com uma certa altura para atender o requisito de volume. O processo de comparação dessas seções pode ser realizado utilizando o conceito de dominância e fronteira de Pareto ou fronteira eficiente CHENG & LI [1997]. Mais precisamente, esta comparação pode ser realizada com base nas seções que não são dominados, situados na fronteira de Pareto, seguindo as seguintes definições:

- **Definição1: (Dominância)** Seja $L = F_1, F_2, \dots, F_n$, o conjunto de funções objetivo a serem otimizadas em processo de minimização. Diz-se que $p_1 \in B$ domina o ponto $p_2 \in B$ se para todo $i = 1, 2, \dots, n$, $F_i(p_1) \leq F_i(p_2)$ e se existe i , tal que, $F_i(p_1) < F_i(p_2)$.
- **Definição2: (Pareto-ótimo)** Diz-se que $p_1 \in B$ é uma solução Pareto-ótima se p_1 não é dominado por nenhum outro ponto em B , isto é, o conjunto Pareto-ótimo é definido por $P = \{ p_i \in B \mid \nexists p_j \in B : p_i \text{ é dominado por } p_j \}$

De acordo com os objetivos inicialmente definidos, (por exemplo, minimizar a área alagada e minimizar a área de seção da barragem) faz-se o estudo da fronteira de Pareto para os pontos. Assim, a construção da barragem pode ser realizada considerando a fronteira de Pareto, isto é, as relações de dominância onde as soluções são avaliadas

para se gerar o conjunto Pareto-ótimo e as soluções deste conjunto são classicadas utilizando critérios definidos pelo usuário (seção 3.5.2).

Dados dois pontos do rio p_1 e p_2 , onde a construção de uma barragem gere um reservatório que atenda os requisitos de volume então, considerando as funções objetivo, as relações de dominância entre p_1 e p_2 são analisadas e, caso haja dominância entre eles, o ponto dominado é descartado, caso contrário, eles pertencem à fronteira Pareto-ótimo. Este processo é executado considerando todas as seções onde a construção da barragem produza um reservatório cuja capacidade atinja o volume desejado. Por exemplo, considere três seções p_1 , p_2 e p_3 onde a construção de uma barragem de altura h_1 , h_2 e h_3 gere reservatórios cuja lâmina d'água possuam 100, 80 e 120 metros quadrados respectivamente e cujas áreas de seção sejam 50, 70 e 75 metros quadrados respectivamente. Logo, ao comparar p_1 e p_2 nota-se que não há dominância entre elas; entretanto, ao verificar a dominância entre p_1 e p_3 nota-se que a segunda é dominada pela primeira, então p_3 é descartada.

A razão de utilizar a fronteira de Pareto é não armazenar soluções dominadas, isto é, seções do rio que, independente do peso definido pelo usuário para cada variável, produz um valor da função objetivo (seção 3.5.2) sempre maior que o valor produzido por uma outro seção. Com isso, são matidos apenas os pontos do rio candidatos presentes na fronteira de Pareto.

3.5.2 Construção da função objetivo

As seções do rio candidatas à receber a barragem são avaliadas utilizando uma função multiobjetivo que leva em conta os seguintes fatores:

- Área inundada: Quanto maior a área alagada maiores serão os impactos ambientais, os custos com possíveis desapropriações de áreas produtivas, etc. Além disso, também será maior o desperdício com a evaporação MOLLE [1989]. Logo, quanto menor a área da lâmina d'água melhor;
- Comprimento do reservatório (área de seção): Quanto maior a extensão da barragem, maior será o custo de construção baseado no volume de terra requerido para a sua construção;
- Conflito com sítios arqueológicos, áreas urbanas, indígenas e/ou de proteção ambiental além de ferrovias e rodovias: se a área alagada cobrir algumas dessas áreas isso trará dificuldades. Assim o objetivo é evitar ao máximo estas sobreposições.

Cada um desses fatores se transformou em variáveis de decisão para a função de custo do modelo (Tabela 3.1). As variáveis são classificadas por meio de pesos, de acordo com sua importância. Por exemplo, se o objetivo principal é minimizar a área da seção da barragem, ela recebe o maior peso. Ou, se o tamanho da área inundada for o segundo fator mais importante, esse receberá o segundo maior peso e assim por diante.

Tabela 3.1. Tabela referente as variáveis de decisão.

Fator Considerado (Área)	Nome da variável	Variável
Área inundada multiplicado pela resolução do mapa	Lamina d'água	L
Área da seção da barragem	Extensão da barragem	S
Número de <i>pixels</i> que fazem interseção com área de preservação ambiental multiplicado pela resolução do mapa	Reserva	A
Número de <i>pixels</i> que fazem interseção com área indígena (reserva) multiplicado pela resolução do mapa	Indígena	I
Número de <i>pixels</i> que fazem interseção com área urbana multiplicado pela resolução do mapa	Urbana	U
Número de <i>pixels</i> que fazem interseção com ferrovias multiplicado pela resolução do mapa	Ferrovia	F
Número de <i>pixels</i> que fazem interseção com Rodovias multiplicado pela resolução do mapa	Rodovia	R

Para cada variável existe um peso w_j fornecido como parâmetro pelo usuário. O valor w_j está compreendido numa faixa de números inteiros de 1 a 10, sendo o valor 1 atribuído aos objetivos menos relevantes e o valor 10 aos objetivos de maior importância. Os pesos são comparativos, isto é, uma vez atribuído ao peso w_1 de uma variável o valor 1 e a w_2 o valor 8 isso significa que a segunda variável possui uma relevância 8 vezes maior que primeira. Desta forma, $Z(p)$ é uma combinação linear das funções associadas aos objetivos, e está definida da seguinte forma:

$$Z(p_i) = w_1 L + w_2 S + w_3 A + w_4 I + w_5 U + w_6 F + w_7 R \quad (3.5)$$

A variável L que representa a área inundada terá como valor o número de pontos (*pixels*) da matriz de elevação que serão alagados multiplicado pela resolução da célula

do MDE. Por exemplo, se a lâmina d'água cobre 18 *pixels* na matriz de elevação do terreno cuja resolução do terreno é de 90m então à variável é atribuído o valor $18 \times 90^2 = 145.800$.

A variável de decisão "área seção da barragem" funciona um pouco diferente, embora também tenha o número de *pixels* como base. A área de seção da barragem é obtida conforme a seção 3.3 e o resultado do procedimento é atribuída a restrição S .

Os demais termos, respectivos aos mapas de rodovias, ferrovias, áreas urbanas, áreas indígenas e áreas de proteção ambiental, têm seus valores definidos pela área de interseção entre suas áreas e a região alagada. É feita a sobreposição (seção 3.5.3) de cada mapa com a região alagada a fim de quantificar os *pixels* comuns que são multiplicados pela resolução do MDE (Figura 3.7). Por exemplo, suponha que haja sete *pixels* de interseção da represa com o mapa da área urbana, então a variável U da equação terá o valor $7 \times 90^2 = 56.700$. Analogamente, imagine que a interseção da represa com o mapa ferroviário tenha computado quatro *pixels*, logo o valor F na equação será $4 \times 90^2 = 32.400$. Assim, o procedimento é repetido para os demais fatores considerados .

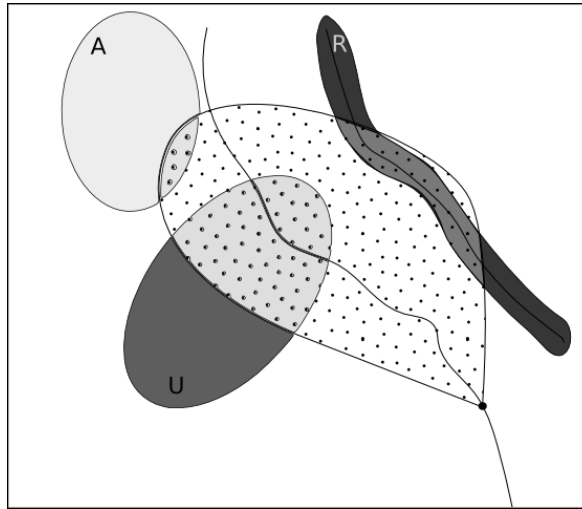


Figura 3.7. A região pontilhada indica a área alagada pelo reservatório. Já as demais regiões representam os mapas de restrições. Neste exemplo, A (reserva ambiental), R (rodovias) e U (área urbana)

Cada seção p_i analisada terá um valor $Z(p_i)$ para a sua função objetivo. O objetivo do trabalho é minimizar $Z(p_i)$, classificando as seções de acordo com o valor da função objetivo. Quanto menor for o valor da função objetivo, mais adequada é a seção. O sistema armazena as melhores soluções permitindo que o usuário possa fazer uma avaliação mais criteriosa do local mais adequado para a construção da barragem.

Vale lembrar que os pesos das variáveis de decisão, assim como os mapas que representam áreas urbanas, indígenas, de proteção ambiental, de ferrovias e de rodovias são fornecidos como parâmetros pelo usuário. Como as melhores soluções foram armazenadas, então o usuário pode melhor avaliar as possíveis soluções.

3.5.3 Interseção de dois mapas

Para executar a comparação dos mapas, o algoritmo recebe como entrada duas matrizes. A primeira é a matriz que informa a área alagada após o posicionamento da barragem num ponto do rio e a outra matriz é referente a algum mapa temático.

Cada matriz contém apenas valores 0 e 1, também chamada de matriz binária. A matriz base, referente à informação das células do terreno que estão submersas pela água, apresenta valor 1 para região alagada e 0 para as regiões que estão fora do reservatório. Já a segunda matriz, que representa, por exemplo, os locais de área urbana traz o valor 1 nas células que pertencem à área em questão e o valor 0 nas outras células.

O objetivo é comparar cada matriz, célula a célula. Caso a mesma coordenada (i, j) nas duas matrizes possuam o valor 1, caracteriza-se um conflito. O processo de comparação é feito usando o conectivo "&" da lógica proposicional, que é definido como conjunção. Assim, seja $n \times n$ a dimensão da matriz de elevação T e da matriz que apresenta a área urbana Q e, suas células dada na forma (T_i, T_j) e (Q_i, Q_j) , respectivamente. Assim, o valor de c corresponde ao número de posições nas matrizes T e Q cujos valores são simultaneamente 1. Desta forma, a variável da função objetivo relativa ao mapa temático em comparação, receberá o valor $c * r^2$, onde r é a resolução do mapa.

3.6 Área de estudo

Para efeito de teste, foram utilizados mapas captados pela *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)* SOUSA & MATOS [2006]; The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) [2007] que mapeou a elevação de todos os pontos do globo numa resolução de 90 metros e dimensão total de 1201 x 1201 (Figura 3.8) resultando em um MDE de 1.442.401 células. A região considerada (Figura 3.9) abrange a cidade de Viçosa, MG, Brasil, cujas coordenadas de latitude e longitude são $20^{\circ}45'14''S$, $42^{\circ}52'55''O$, respectivamente. A região utilizada inclui parte da bacia do ribeirão São Bartolomeu.

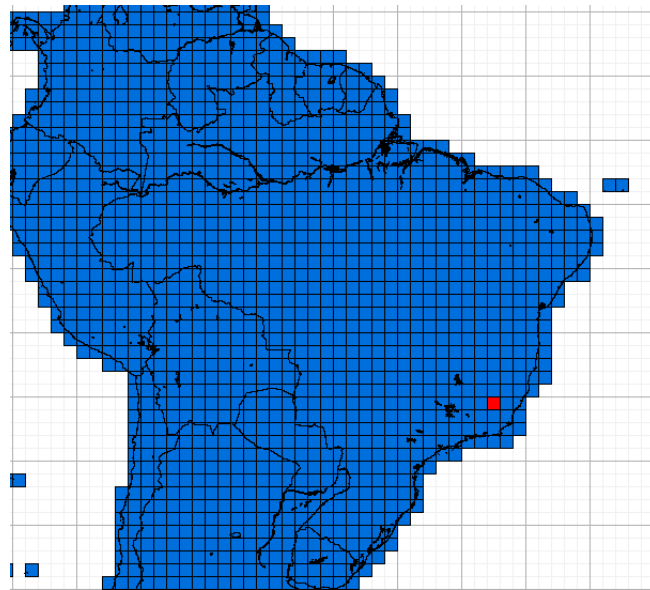


Figura 3.8. O bloco destacado de vermelho é referente ao terreno utilizado nos testes. Adaptados de The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) [2007]

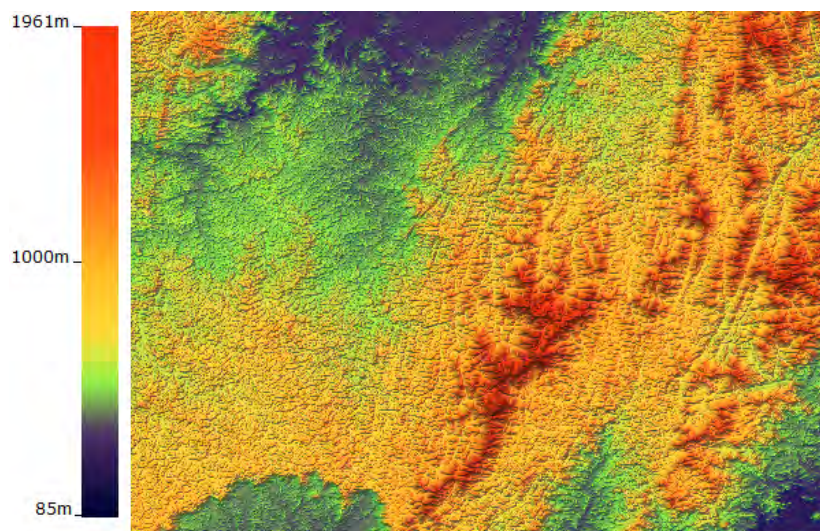


Figura 3.9. Terreno de dimensão 1201x1201, refere a uma parte do mapa utilizado nos testes abaixo. Essa visualização foi gerada pelo POV-RayPersistence of Vision (TM) Raytracer [2009]

Por saber que existem vários outros projetos concluídos e em andamento na captação de imagens com resoluções de $30m \times 30m$ e até $1m \times 1m$, o algoritmo recebe como parâmetro essa informação. Permitindo então uma maior flexibilidade e precisão nos resultados.

A rede hidrográfica deste terreno que servirá de parâmetro de entrada para o sistema, foi obtida através do *software* livre *Geographic Resources Analysis Support System* Team [2004]; SOUSA & MATOS [2006]; The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) [2007], entretanto pode ser obtida através de qualquer outro sistema de informação geográfico. Esses sistemas adotam os métodos descritos no Capítulo 2 para determinar a matriz de escoamento e a matriz de acumulação.

Capítulo 4

Experimentos para avaliação dos métodos

4.1 Descrição do Sistema

O sistema computacional que faz o posicionamento de um reservatório de água na "melhor" coordenada do rio foi desenvolvido na linguagem C++. Todos os testes foram executados em um computador com sistema operacional Linux Ubuntu 10.04, processador Core 2 Duo de 2.0 GHz com 3 GB de memória, disco rígido Samsung de 320 GB e 5400RPM. A implementação foi feita em C++ e compilados com o compilador g++ 4.3.4.

O sistema recebe como parâmetro de entrada o volume de água desejado para o reservatório (Figura 4.1). Além disso, devem ser informados os arquivos referentes à rede de drenagem, ou seja, o MDE, a direção de escoamento, e a acumulação de fluxo. Todos esse arquivos devem estar no formato *.txt* (*ASCII*).

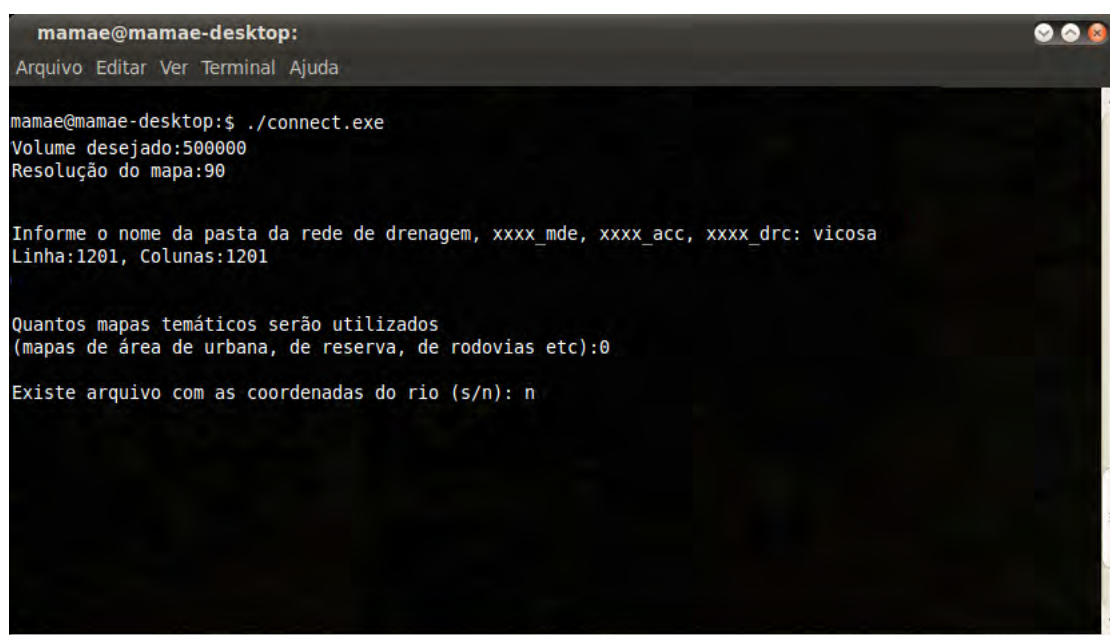


Figura 4.1. Tela de entrada do sistema.

Como se pode ver na Figura 4.1, os arquivos devem estar nomeados com *<nome-dapasta>* concatenado com *"_mde"*, *"_acc"*, *"_drc"*. Ou seja, se a pasta onde estão situado os arquivos da rede de drenagem está nomeada como *"vicosa"* (Figura 4.1), os arquivos referentes à rede de drenagem dentro dela tem os seguintes nomes: *vicosa_mde*, *vicosa_acc* e *vicosa_drc*. Onde, *vicosa_mde*, *vicosa_acc* e *vicosa_drc* são os arquivos referentes ao terreno MDE, à matriz de acumulação de fluxo e à matriz de direção de escoamento, respectivamente.

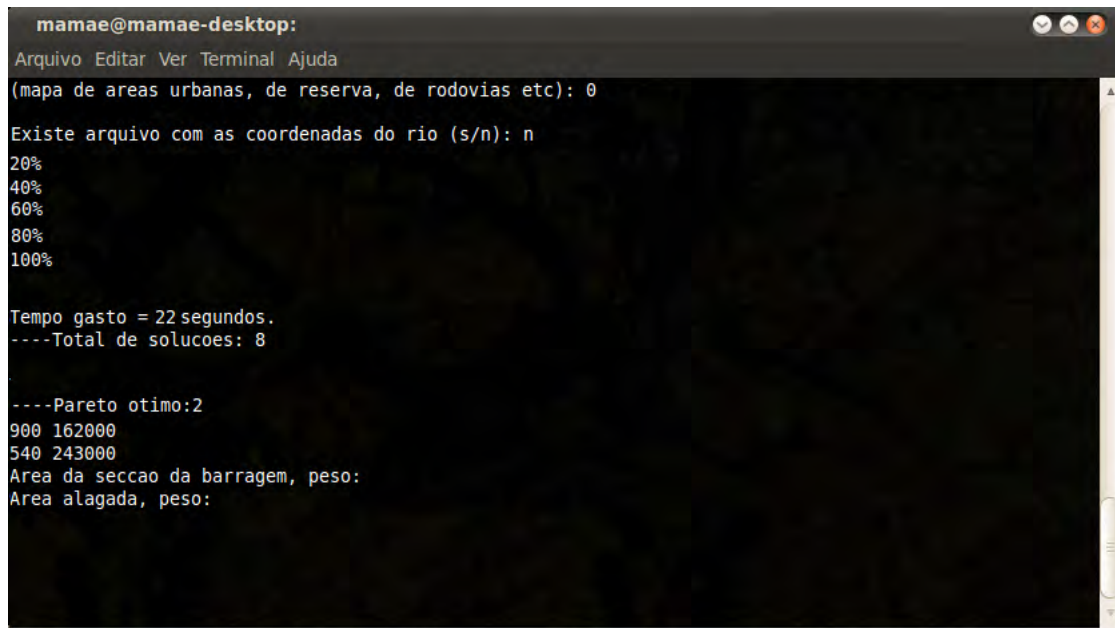
Da mesma forma, caso exista, o usuário deve informar os mapas temáticos para a verificação dos eventuais conflitos. Esses mapas podem ser nomeados de acordo com a vontade do usuário. A proposta é que o nome seja o mais sugestivo possível. Um exemplo: se o mapa temático é referente à área de reserva, um nome sugestivo seria *"areaReserva.txt"* e assim por diante.

Por fim, o último dado de entrada é o arquivo contendo as coordenadas de um trecho de rio. Essa informação também é facultativa (Figura 4.1).

A partir dos dados de entrada, o sistema inicia o processo de busca pela posição do terreno mais "adequada" para a construção da barragem. O processo mantém o usuário informado do andamento da execução (Figura 4.2). Ao final é relatado o tempo gasto, o total de soluções encontradas e o número de soluções que estão situadas na fronteira de Pareto.

Neste ponto o sistema pára e aguarda o conjunto de pesos que o usuário informará (Figura 4.2). Esse conjunto é essencial para a classificação das soluções pertencentes

ao Pareto-Ótimo.



```
mamae@mamae-desktop:
Arquivo Editar Ver Terminal Ajuda
(mapa de areas urbanas, de reserva, de rodovias etc): 0
Existe arquivo com as coordenadas do rio (s/n): n
20%
40%
60%
80%
100%
Tempo gasto = 22 segundos.
----Total de solucoes: 8
----Pareto otimo:2
900 162000
540 243000
Area da seccao da barragem, peso:
Area alagada, peso:
```

Figura 4.2. Funcionamento do sistema, informa o tempo gasto, o total de soluções e as soluções do Pareto-Ótimo. Aqui informa-se os pesos da variáveis.

Após o recebimento do conjunto de pesos (Figura 4.3), o sistema executa a classificação das soluções "ótimas" em ordem crescente, segundo o valor da função objetivo $Z(p)$, e imprime no arquivo "Solucao.txt".



```
mamae@mamae-desktop:
Arquivo Editar Ver Terminal Ajuda
(mapa de areas urbanas, de reserva, de rodovias etc): 0

Existe arquivo com as coordenadas do rio (s/n): n
20%
40%
60%
80%
100%

Tempo gasto = 22segundos.
----Total de solucoes: 8

----Pareto otimo:2
900 162000
540 243000
Area da seccao da barragem, peso: 1
Area alagada, peso: 10
mamae@mamae-desktop:$
```

Figura 4.3. Término da execução, classifica as soluções pertencentes a fronteira de Pareto e gera os arquivos de saída.

O sistema produz como saída 3 arquivos: todos no formato texto (*ASCII*). O primeiro é arquivo "*solucao.txt*". Ele contém todas as informações referentes às melhores soluções encontradas, dispostas em ordem crescente segundo o valor da função de custo. As melhores soluções são aquelas situadas na fronteira de Pareto. Esse arquivo também contém outros conteúdos relevantes, tais como: tempo de processamento, média de altura testada por ponto, número de soluções encontradas, quantidade de soluções não dominadas, entre outras. O próximo resultado é o "*mde+regiaoAlagada.txt*". Ele apresenta o MDE juntamente com a represa posicionada no melhor ponto. A elevação das células situadas na região alagada é 100 unidades menor que o ponto de menor elevação do terreno. Não há problema se essa elevação for negativa, pois esse arquivo é usado apenas para construção da imagem final. O terceiro arquivo produzido é denominado "*areaAlagada+Barragem.txt*". Seus valores são 0, 1 ou 2. Os valores iguais a 2 representam os pontos da barragem; os inteiros 0 indicam as células pertencentes à represa; e os valores iguais a 1 as demais regiões, regiões secas.

4.2 Experimentos sem mapas de conflito

4.2.1 Posicionamento de reservatório com 90 milhões de metros cúbicos de água

Neste primeiro experimento foi requerido um reservatório de capacidade 90 milhões de metros cúbicos de água. O peso das variáveis que representam a lâmina d'água e a área de seção da barragem foi 1 para as duas. Ou seja, o custo para cada unidade das condicionantes é igual. Foram investigados 10.679 pontos do terreno, referentes aos rios. O processo finalizou-se em 4667 segundos, aproximadamente 1 hora e 17 minutos. A fronteira de Pareto é composta por 17 soluções, resultado da análise de dominância entre os 478 pontos que atenderam os requisitos de volume. A Figura 4.4 classifica as soluções não dominadas para os pesos especificados.

Classificação	Nome	Latitude	Longitude	Seção - $S(p)$ m ²	Área alagada - $L(p)$ m ²	Resultado - $Z(p)$
1º	p1	-20,319583333	-42,599583333	97.740	1.806.300	1.904.040,00
2º	p2	-20,852916667	-42,338750000	39.060	1.879.200	1.918.260,00
3º	p3	-20,835416667	-42,326250000	36.180	2.729.700	2.765.880,00
4º	p4	-20,131250000	-42,043750000	22.770	2.843.100	2.865.870,00
5º	p5	-20,840416667	-42,327083333	22.410	3.029.400	3.051.810,00
6º	p6	-20,816250000	-42,006250000	13.860	3.199.500	3.213.360,00
7º	p7	-20,707083333	-42,081250000	11.610	3.531.600	3.543.210,00
8º	p8	-20,334583333	-42,325416667	10.350	4.892.400	4.902.750,00
9º	p9	-20,192083333	-42,824583333	8.910	5.346.000	5.354.910,00
10º	p10	-20,826250000	-42,002083333	6.750	5.362.200	5.368.950,00
11º	p11	-20,925416667	-42,337083333	6.570	5.410.800	5.417.370,00
12º	p12	-20,656250000	-42,696250000	4.590	5.580.900	5.585.490,00
13º	p13	-20,657083333	-42,697916667	4.320	6.228.900	6.233.220,00
14º	p14	-20,758750000	-42,998750000	3.780	6.577.200	6.580.980,00
15º	p15	-20,569583333	-42,663750000	2.970	6.779.700	6.782.670,00
16º	p16	-20,772083333	-42,971250000	2.700	7.727.400	7.730.100,00
17º	p17	-20,580416667	-42,996250000	1.440	10.173.600	10.175.040,00
				w1	w2	
				1	1	

Figura 4.4. Classificação das soluções situadas na fronteira de Pareto com peso 1 atribuído as variáveis em teste de 90 milhões de m^3

De acordo com os pesos atribuídos à lâmina d'água e à área de seção da barragem, a melhor coordenada obtida é 20,319583333S e 42,599583333W. O posicionamento da represa nesta coordenada geográfica resultou nos seguintes atributos (Tabela 4.2.1).

Tabela 4.1. Resumo dos resultado da represa 90 milhões m^3

Barragem	
hMax	136m
Altura	102m
Num. <i>pixels</i>	24
Área seção	97.740m ²
Tentativas até encontrar h	3
Represa	
<i>Pixels</i> alagados	223
Área alagada	1.806.300m ²
Volume	90.151.800m ³
Função objetivo	
Valor	1,90404 x 10 ⁶

Dado todos os 10.679 pontos do rio, o processo avaliou um total de 12.991 alturas. Esse número é resultado do somatório da quantidade de tentativas feitas em cada ponto do leito do rio, caracterizando uma média de 1,21 alturas analisadas para cada ponto. Considerando apenas as 478 soluções, a média do número de tentativas de alturas foi 4,58. A Figura 4.5, apresenta a barragem posicionada no ponto "mais adequado" do terreno e a região alagada pela represa.

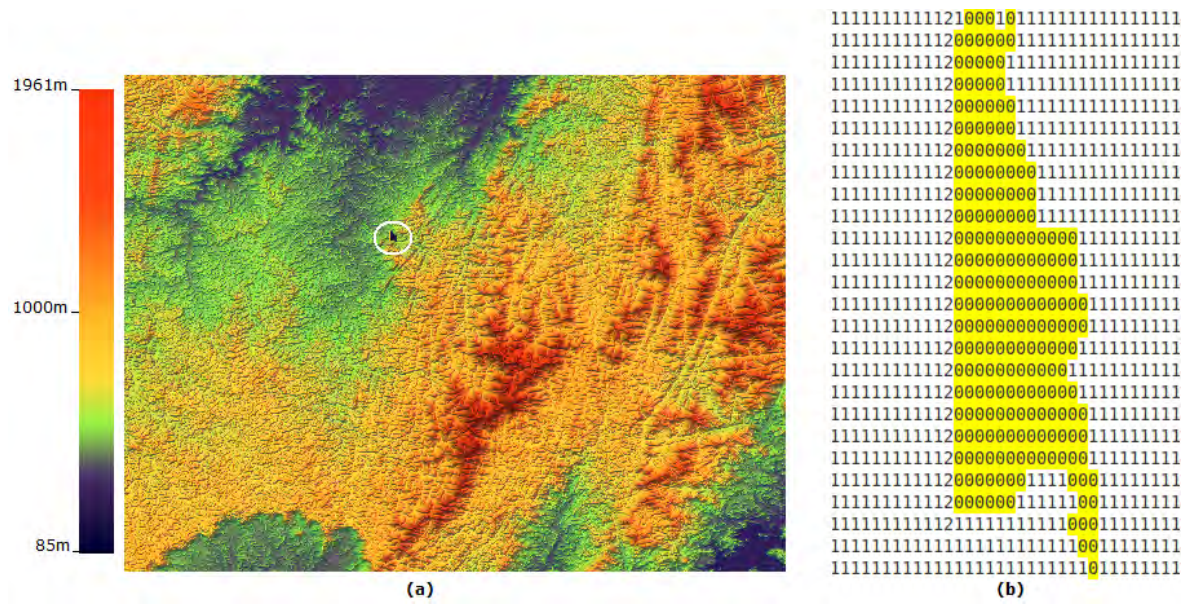


Figura 4.5. (a) A parte mais escura de figura representa a área alagada devido à construção de uma barragem de altura 102 metros. O volume do reservatório gerado é $90.161.800m^3$. Essa visualização foi gerada pelo POV-RayPersistence of Vision (TM) Raytracer [2009] (b) Arquivo que gera imagem, valor 2 é a barragem, 0 região alagada, 1 demais regiões.

4.2.2 Avaliando novos pesos para o posicionamento de reservatório de capacidade 90 milhões m^3

A inserção de um novo conjunto pesos modifica a função objetivo e pode produzir um resultado diferente. Com isso o sistema apresenta ao usuário uma nova ordeção das soluções situadas na fronteira Pareto-Ótimo. Para este caso, foi dado como parâmetro o valor 2 ao peso w_1 da variável lâmina d'água e 8 ao peso w_2 da área de seção da barragem e foi obtida a seguinte classificação (Figura 4.6). A partir daí pode-se notar uma nova ordem do conjunto solução, em especial, a "melhor solução" deixou de ser p_1 e passou a ser p_2 . Isso se deve ao fato do objetivo área alagada ter passado a ser 4 vezes menos importante que a área de seção da barragem.

Classificação	Nome	Latitude	Longitude	Seção - $S(p) m^2$	Área alagada - $L(p) m^2$	Resultado - $Z(p)$
1º	p2	-20,852916667	-42,338750000	39.060	1.879.200	4.070.880,00
2º	p1	-20,319583333	-42,599583333	97.740	1.806.300	4.394.520,00
3º	p3	-20,835416667	-42,326250000	36.180	2.729.700	5.748.840,00
4º	p4	-20,131250000	-42,043750000	22.770	2.843.100	5.868.360,00
5º	p5	-20,840416667	-42,327083333	22.410	3.029.400	6.238.080,00
6º	p6	-20,816250000	-42,006250000	13.860	3.199.500	6.509.880,00
7º	p7	-20,707083333	-42,081250000	11.610	3.531.600	7.156.080,00
8º	p8	-20,334583333	-42,325416667	10.350	4.892.400	9.867.600,00
9º	p9	-20,192083333	-42,824583333	8.910	5.346.000	10.763.280,00
10º	p10	-20,826250000	-42,002083333	6.750	5.362.200	10.778.400,00
11º	p11	-20,925416667	-42,337083333	6.570	5.410.800	10.874.160,00
12º	p12	-20,656250000	-42,696250000	4.590	5.580.900	11.198.520,00
13º	p13	-20,657083333	-42,697916667	4.320	6.228.900	12.492.360,00
14º	p14	-20,758750000	-42,998750000	3.780	6.577.200	13.184.640,00
15º	p15	-20,569583333	-42,663750000	2.970	6.779.700	13.583.160,00
16º	p16	-20,772083333	-42,971250000	2.700	7.727.400	15.476.400,00
17º	p17	-20,580416667	-42,996250000	1.440	10.173.600	20.358.720,00
				w1	w2	
				8	2	

Figura 4.6. Classificação das soluções da fronteira de Pareto, segundo os pesos $w_1 = 2$, $w_2 = 8$, para teste de 90 milhões de m^3

Suponha agora, $w_1=8$ e $w_2=2$, isto é, a área de seção da barragem 4 vezes menor que área alagada. O conjunto solução terá uma classificação diferente das duas anteriores conforme pode ser visto na Figura 4.7. Para esta ponderação a "melhor" solução foi novamente a p_1 . Entretanto, a solução p_9 passou da nona para a décima quarta colocação segundo o valor de $Z(p)$. Assim como p_9 , outras soluções, como por exemplo p_8 , p_{10} , p_{11} , p_{12} foram reclassificadas segundo a função objetivo.

Classificação	Nome	Latitude	Longitude	Seção - $S(p)$ m ²	Área alagada - $L(p)$ m ²	Resultado - $Z(p)$
1º	p1	-20,319583333	-42,599583333	97.740	1.806.300	14.645.880,00
2º	p2	-20,852916667	-42,338750000	39.060	1.879.200	15.111.720,00
3º	p3	-20,835416667	-42,326250000	36.180	2.729.700	21.909.960,00
4º	p4	-20,131250000	-42,043750000	22.770	2.843.100	22.790.340,00
5º	p5	-20,840416667	-42,327083333	22.410	3.029.400	24.280.020,00
6º	p6	-20,816250000	-42,006250000	13.860	3.199.500	25.623.720,00
7º	p7	-20,707083333	-42,081250000	11.610	3.531.600	28.276.020,00
8º	p10	-20,826250000	-42,002083333	6.750	5.362.200	42.911.100,00
9º	p11	-20,925416667	-42,337083333	6.570	5.410.800	43.299.540,00
10º	p12	-20,656250000	-42,696250000	4.590	5.580.900	44.656.380,00
11º	p8	-20,334583333	-42,325416667	10.350	4.892.400	39.159.900,00
12º	p13	-20,657083333	-42,697916667	4.320	6.228.900	49.839.840,00
13º	p14	-20,758750000	-42,998750000	3.780	6.577.200	52.625.160,00
14º	p9	-20,192083333	-42,824583333	8.910	5.346.000	42.785.820,00
15º	p15	-20,569583333	-42,663750000	2.970	6.779.700	54.243.540,00
16º	p16	-20,772083333	-42,971250000	2.700	7.727.400	61.824.600,00
17º	p17	-20,580416667	-42,996250000	1.440	10.173.600	81.391.680,00
				w1	w2	
				2	8	

Figura 4.7. Classificação das soluções da fronteira de Pareto, segundo os pesos $w_1 = 8$, $w_2 = 2$, para teste de 90 milhões de m^3

4.2.3 Posicionamento de reservatório com 500 milhões de metros cúbicos de água

Para essa mesma região, realizou-se uma nova avaliação. Agora, para um volume de 500 milhões de metros cúbicos d'água. O peso das variáveis que representam a lâmina d'água e a área de seção da barragem foi 1 para as duas. As soluções foram obtidas dentre as 10.679, referentes aos rios. O processo finalizou-se em 4619 segundos, aproximadamente um minuto a menos que o anterior. O sistema encontrou 187 pontos do rio aptos à construção da barragem, porém apenas 13 deles são não-dominados. A Figura 4.8 classifica as soluções através dos pesos definidos pelo usuário.

Classificação	Nome	Latitude	Longitude	Seção - $S(p) m^2$	Área alagada - $L(p) m^2$	Resultado - $Z(p)$
1°	p1	-20,795416667	-42,058750000	387.810	7.759.800	8.147.610,00
2°	p2	-20,856250000	-42,361250000	313.650	8.910.000	9.223.650,00
3°	p3	-20,852083333	-42,322083333	135.000	10.108.800	10.243.800,00
4°	p4	-20,858750000	-42,336250000	128.700	10.854.000	10.982.700,00
5°	p5	-20,874583333	-42,333750000	97.470	11.291.400	11.388.870,00
6°	p6	-20,707916667	-42,033750000	53.640	11.510.100	11.563.740,00
7°	p7	-20,722916667	-42,037083333	35.730	12.490.200	12.525.930,00
8°	p8	-20,925416667	-42,337083333	25.920	13.818.600	13.844.520,00
9°	p9	-20,237916667	-42,016250000	18.360	16.499.700	16.518.060,00
10°	p10	-20,119583333	-42,388750000	13.950	20.889.900	20.903.850,00
11°	p11	-20,688750000	-42,941250000	12.780	26.454.600	26.467.380,00
12°	p12	-20,582916667	-42,997083333	8.550	26.503.200	26.511.750,00
13°	p13	-20,937083333	-42,048750000	7.560	30.196.800	30.204.360,00
				w1	w2	
				1	1	

Figura 4.8. Classificação das soluções situadas na fronteira de Pareto com peso 1 atribuído as variáveis em teste de 500 milhões de m^3

De acordo com os pesos atribuídos à lâmina d'água e à área de seção da barragem, a melhor coordenada obtida é 20,795416667S e 42,058750000W. O posicionamento da barragem para esta latitude e longitude produziu os seguintes dados (Tabela 4.2.3):

Tabela 4.2. Resumo dos resultados da represa 500 milhões m^3

Barragem	
hMax	185m
Altura	173m
Num. <i>pixels</i>	49
Área seção	387.810m ²
Tentativas até encontrar <i>h</i>	5
Represa	
<i>Pixels</i> alagados	958
Área alagada	7.759.800m ²
Volume	509.311.800m ³
Função objetivo	
Valor	8,14761 x 10 ⁶

Dado os pontos do rio, avaliou-se um total de 11.649 alturas. A média de altura analisadas para cada ponto é 1,09. Considerando apenas as 187 soluções aceitas, a média do número de tentativas de alturas foi 4,49. A Figura 4.9, apresenta o MDE com o reservatório de água posicionado na região "mais adequada".

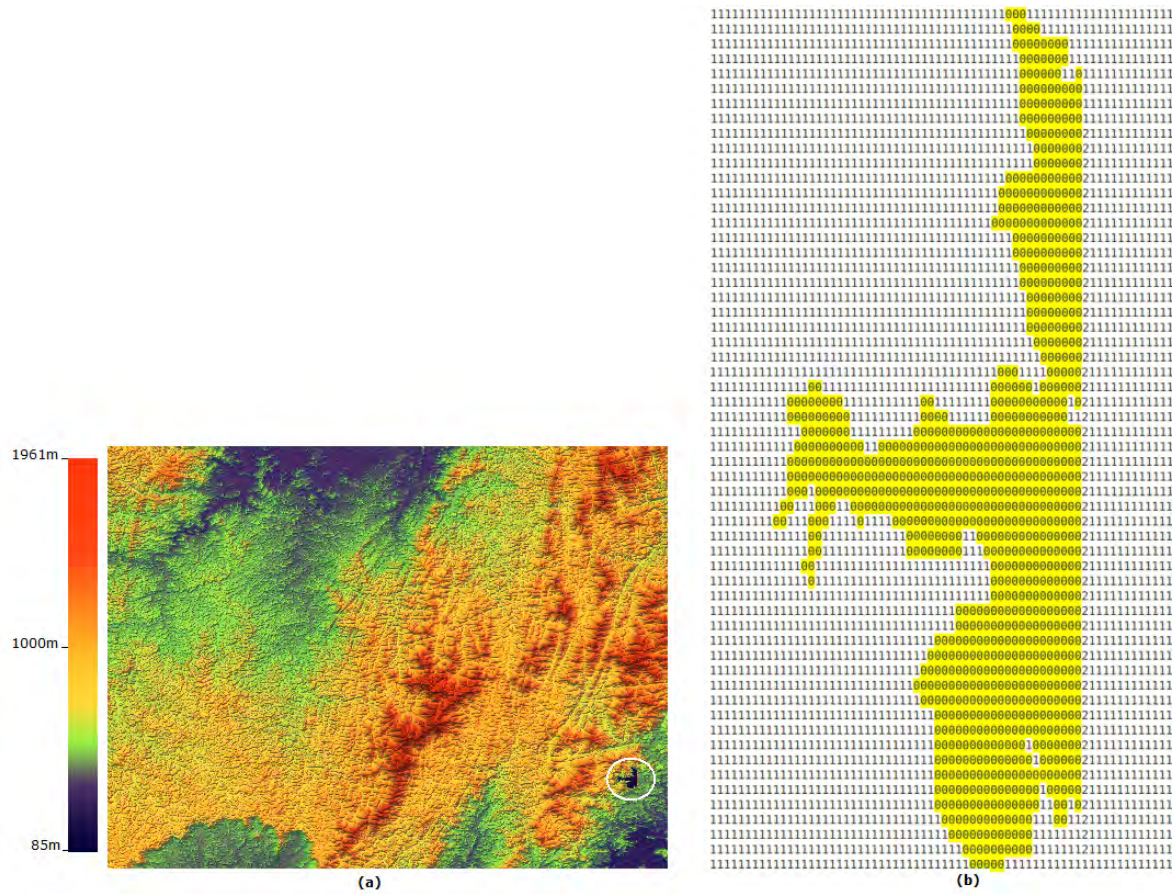


Figura 4.9. (a) A parte mais escura de figura representa a área alagada devido à construção de uma barragem de altura 173 metros. O volume do reservatório gerado é $509.311.800m^3$. (b) Arquivo que gera imagem, valor 2 é a barragem, 0 região alagada, 1 demais regiões.

Nota-se que o segundo procedimento gastou menor tempo que o primeiro. A primeira vista parece contraditório, pois o segundo teste buscou um volume 5,5 vezes maior que o primeiro, mas não é. Esse comportamento se deve exatamente à utilização do algoritmo busca binária na determinação da altura da barragem que alcançou o valor satisfatório mais rapidamente. Um fato que exemplifica esse resultado é a média de h 's testados para o volume 500 milhões ser menor que a média para o volume 90 milhões.

4.2.4 Avaliando novos pesos para o posicionamento de reservatório de capacidade 500 milhões m^3

Para este caso, foi dado como parâmetro o valor 10 ao peso w_1 da variável lâmina d'água e 1 ao peso w_2 da área de seção da barragem e foi obtida a seguinte classificação

(Figura 4.10). A partir daí pode-se notar uma nova ordem do conjunto solução, em especial, a "melhor solução" deixou de ser p_1 e passou a ser p_3 . Isso se deve ao fato do objetivo área alagada ter passado a ser 10 vezes menos importante que a área de seção da barragem e fazendo com que o valor de $Z(p_1)$ superasse o valor de $Z(p_2)$ e $Z(p_3)$.

Classificação	Nome	Latitude	Longitude	Seção - $S(p) m^2$	Área alagada - $L(p) m^2$	Resultado - $Z(p)$
1º	p3	-20,852083333	-42,322083333	135.000	10.108.800	11.458.800,00
2º	p1	-20,795416667	-42,058750000	387.810	7.759.800	11.637.900,00
3º	p2	-20,856250000	-42,361250000	313.650	8.910.000	12.046.500,00
4º	p6	-20,707916667	-42,033750000	53.640	11.510.100	12.046.500,00
5º	p4	-20,858750000	-42,336250000	128.700	10.854.000	12.141.000,00
6º	p5	-20,874583333	-42,333750000	97.470	11.291.400	12.266.100,00
7º	p7	-20,722916667	-42,037083333	35.730	12.490.200	12.847.500,00
8º	p8	-20,925416667	-42,337083333	25.920	13.818.600	14.077.800,00
9º	p9	-20,237916667	-42,016250000	18.360	16.499.700	16.683.300,00
10º	p10	-20,119583333	-42,388750000	13.950	20.889.900	21.029.400,00
11º	p11	-20,688750000	-42,941250000	12.780	26.454.600	26.582.400,00
12º	p12	-20,582916667	-42,997083333	8.550	26.503.200	26.588.700,00
13º	p13	-20,937083333	-42,048750000	7.560	30.196.800	30.272.400,00
				w1	w2	
				10	1	

Figura 4.10. Classificação das soluções da fronteira de Pareto, segundo os pesos $w_1 = 10$, $w_2 = 1$, para teste de 500 milhões de m^3

Seja $w_1=1$ e $w_2=10$, isto é, a área de seção da barragem é 10 vezes menor que área alagada. O conjunto solução adquirido por esse conjunto de pesos terá sua classificação igual à produzida pelos pesos $w_1=1$ e $w_2=1$ Figura 4.11, logo para esta ponderação a "melhor" solução foi novamente a p_1 . Para esta coleção de soluções, pode-se notar que para qualquer conjunto de pesos onde $w_2 > w_1$ a ordem será a mesma da primeira avaliação.

Classificação	Nome	Latitude	Longitude	Seção - $S(p)$ m ²	Área alagada - $L(p)$ m ²	Resultado - $Z(p)$
1°	p1	-20,795416667	-42,058750000	387.810	7.759.800	77.985.810,00
2°	p2	-20,856250000	-42,361250000	313.650	8.910.000	89.413.650,00
3°	p3	-20,852083333	-42,322083333	135.000	10.108.800	101.223.000,00
4°	p4	-20,858750000	-42,336250000	128.700	10.854.000	108.668.700,00
5°	p5	-20,874583333	-42,333750000	97.470	11.291.400	113.011.470,00
6°	p6	-20,707916667	-42,033750000	53.640	11.510.100	115.154.640,00
7°	p7	-20,722916667	-42,037083333	35.730	12.490.200	124.937.730,00
8°	p8	-20,925416667	-42,337083333	25.920	13.818.600	138.211.920,00
9°	p9	-20,237916667	-42,016250000	18.360	16.499.700	165.015.360,00
10°	p10	-20,119583333	-42,388750000	13.950	20.889.900	208.912.950,00
11°	p11	-20,688750000	-42,941250000	12.780	26.454.600	264.558.780,00
12°	p12	-20,582916667	-42,997083333	8.550	26.503.200	265.040.550,00
13°	p13	-20,937083333	-42,048750000	7.560	30.196.800	301.975.560,00
				w1	w2	
				1	10	

Figura 4.11. Classificação das soluções da fronteira de Pareto, segundo os pesos $w_1 = 1$, $w_2 = 10$, para teste de 500 milhões de m^3

4.3 Experimentos com mapas de conflito

Utilizando a mesma região, realizou-se agora uma nova avaliação supondo o volume desejado de 90 milhões de metros cúbicos d'água. Porém, levou-se em conta 2 mapas temáticos referentes à áreas de reserva e conjuntos habitacionais. Os mapas de área de reserva (Figura 4.12a), e de conjuntos habitacionais (Figura 4.12b), foram criados pelo autor, apenas para efeito de teste. Os mapas temáticos têm o mesmo tamanho do MDE, neste caso 1201x1201. O sistema aceita um número ilimitado de restrições, a construção dos mapas e a definição de seus respectivos pesos fica a cargo do usuário.

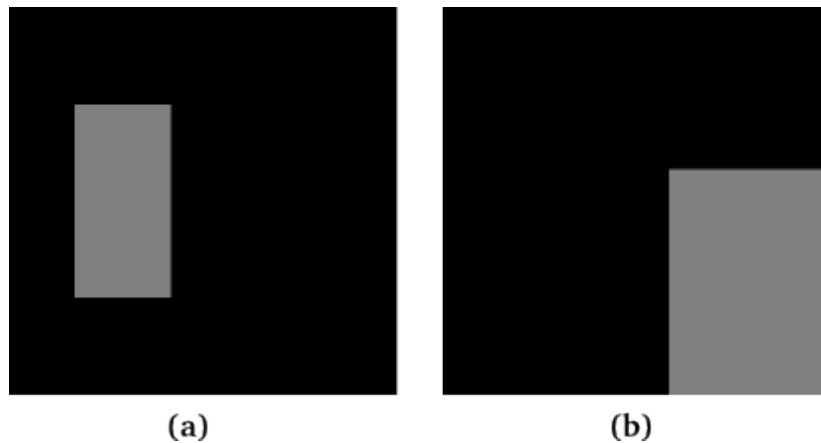


Figura 4.12. (a) A parte mais clara da figura representa a área de reserva ambiental. (b) A parte mais clara da figura indica a região no mapa onde existe um conjunto habitacional. A parte preta em ambos os casos representa área com ausência de restrição. Estes mapas foram elaborados pelo autor, para efeito de testes.

Devido à presença dos mapas de conflito, a solução mais adequada (20,319583333S e 42,599583333W), encontrada anteriormente (seção 4.2.1), continuou sendo uma possível solução, porém não é a mais adequada. A Figura 4.13 ilustra o conflito entre a represa e a área de reserva.

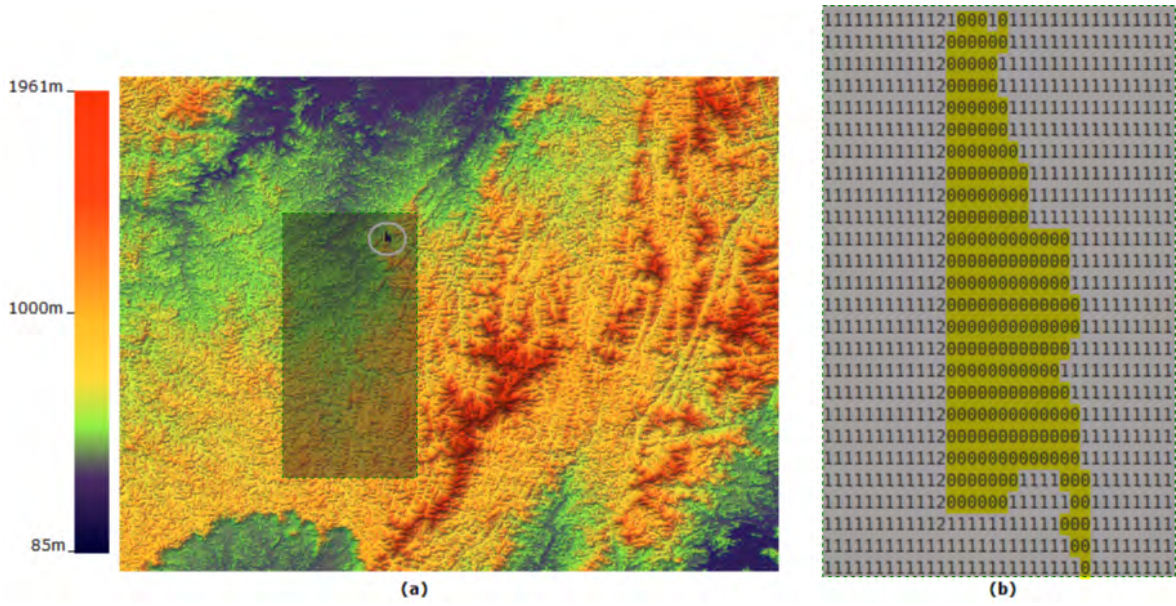


Figura 4.13. (a) Representa a represa de altura 102 metros e a sobreposição do quadrado referente a área de reserva. O volume do reservatório gerado é de $92.161.800m^3$, porém uma área de conflito igual a $1.806.300m^2$ (b) Arquivo que gera imagem, valor 2 é a barragem, 0 região alagada, 1 demais regiões. E a região em cinza representa a sobreposição com a área de reserva.

Foi atribuído peso 1 a todas as condicionantes, sendo elas: lâmina d'água, área de seção da barragem, área de reserva ambiental e conjuntos habitacionais. O processo avaliou 10.679 posições do rio e encontrou 478 pontos do rio aptos à construção da barragem. A execução finalizou em 6254 segundos, aproximadamente 1 hora e 44 minutos. O conjunto Pareto-Ótimo terminou com 30 soluções (Figura 4.14).

Classificação	Nome	Latitude	Longitude	Seção - $S(p)$ m^2	Área alagada - $L(p)$ m^2	Área Reserva - $A(p)$ m^2	Área urbana - $U(p)$ m^2	Resultado - $Z(p)$
1 ^o	p1	-20,113750000	-42,412083333	73.350	2.203.200	-	-	2.276.550,00
2 ^o	p2	-20,098750000	-42,855416667	71.280	2.632.500	-	-	2.703.780,00
3 ^o	p3	-20,106250000	-42,868750000	64.440	2.648.700	-	-	2.713.140,00
4 ^o	p4	-20,131250000	-42,043750000	22.770	2.843.100	-	-	2.865.870,00
5 ^o	p5	-20,260416667	-42,097083333	21.240	3.199.500	-	-	3.220.740,00
6 ^o	p6	-20,007083333	-42,190416667	19.170	3.264.300	-	-	3.283.470,00
7 ^o	p7	-20,319583333	-42,599583333	97.740	1.806.300	1.806.300	-	3.710.340,00
8 ^o	p8	-20,852916667	-42,338750000	39.060	1.879.200	-	1.879.200	3.797.460,00
9 ^o	p9	-20,157083333	-42,402916667	15.390	3.928.500	-	-	3.943.890,00
10 ^o	p10	-20,319583333	-42,600416667	89.460	1.984.500	1.984.500	-	4.058.460,00
11 ^o	p11	-20,156250000	-42,888750000	13.590	4.301.100	-	-	4.314.690,00
12 ^o	p12	-20,263750000	-42,037083333	13.410	4.770.900	-	-	4.784.310,00
13 ^o	p13	-20,318750000	-42,602916667	54.990	2.389.500	2.389.500	-	4.833.990,00
14 ^o	p14	-20,202083333	-42,867916667	12.150	4.860.000	-	-	4.872.150,00
15 ^o	p15	-20,334583333	-42,325416667	10.350	4.892.400	-	-	4.902.750,00
16 ^o	p16	-20,192083333	-42,824583333	8.910	5.346.000	-	-	5.354.910,00
17 ^o	p17	-20,581250000	-42,511250000	7.290	5.443.200	-	-	5.450.490,00
18 ^o	p18	-20,835416667	-42,326250000	36.180	2.729.700	-	2.729.700	5.495.580,00
19 ^o	p19	-20,278750000	-42,919583333	5.220	5.605.200	-	-	5.610.420,00
20 ^o	p20	-20,840416667	-42,327083333	22.410	3.029.400	-	3.029.400	6.081.210,00
21 ^o	p21	-20,816250000	-42,006250000	13.860	3.199.500	-	3.078.000	6.291.360,00
22 ^o	p22	-20,758750000	-42,998750000	3.780	6.577.200	-	-	6.580.980,00
23 ^o	p23	-20,707083333	-42,081250000	11.610	3.531.600	-	3.531.600	7.074.810,00
24 ^o	p24	-20,772083333	-42,971250000	2.700	7.727.400	-	-	7.730.100,00
25 ^o	p25	-20,580416667	-42,996250000	1.440	10.173.600	-	-	10.175.040,00
26 ^o	p26	-20,826250000	-42,002083333	6.750	5.362.200	-	5.224.500	10.593.450,00
27 ^o	p27	-20,925416667	-42,337083333	6.570	5.410.800	-	5.410.800	10.828.170,00
28 ^o	p28	-20,656250000	-42,696250000	4.590	5.580.900	5.580.900	-	11.166.390,00
29 ^o	p29	-20,657083333	-42,697916667	4.320	6.228.900	6.228.900	-	12.462.120,00
30 ^o	p30	-20,569583333	-42,663750000	2.970	6.779.700	6.779.700	-	13.562.370,00
				w1	w2	w3	w4	
				1	1	1	1	1

Figura 4.14. Classificação das soluções situadas na fronteira de Pareto com peso 1 atribuído às variáveis em teste de 500 milhões de m^3

De acordo com os pesos atribuídos às condicionantes, a melhor coordenada obtida foi 20,113750000S e 42,412083333W. Isto é, pautada no conjunto de pesos especificado, essa coordenada é a melhor dentre todas as outras. O posicionamento da represa para a latitude e longitude resultou num reservatório de água com as seguintes características Tabela 4.3:

Tabela 4.3. Resumo dos resultado da represa 90 milhões m^3 com mapas de conflito

Barragem	
hMax	146m
Altura	109m
Num. <i>pixels</i>	18
Área seção	73.350m ²
Tentativas até encontrar h	3
Represa	
<i>Pixels</i> alagados	272
Área alagada	2.203.200m ²
Volume	107.511.300m ³
Conflitos	
Reserva ambiental	0m ²
Conjunto habitacional	0m ²
Função objetivo	
Valor	2,27655 x 10 ⁶

Dado os pontos do rio, avaliou-se um total de 12.991 alturas. A quantidade média de alturas analisadas para cada célula foi 1,21. Considerando apenas as 478 soluções aceitas, a média das tentativas de alturas foi de 4,58. A Figura 4.15 apresenta a barragem posicionada no ponto "mais adequado" do terreno e a região alagada pela represa.

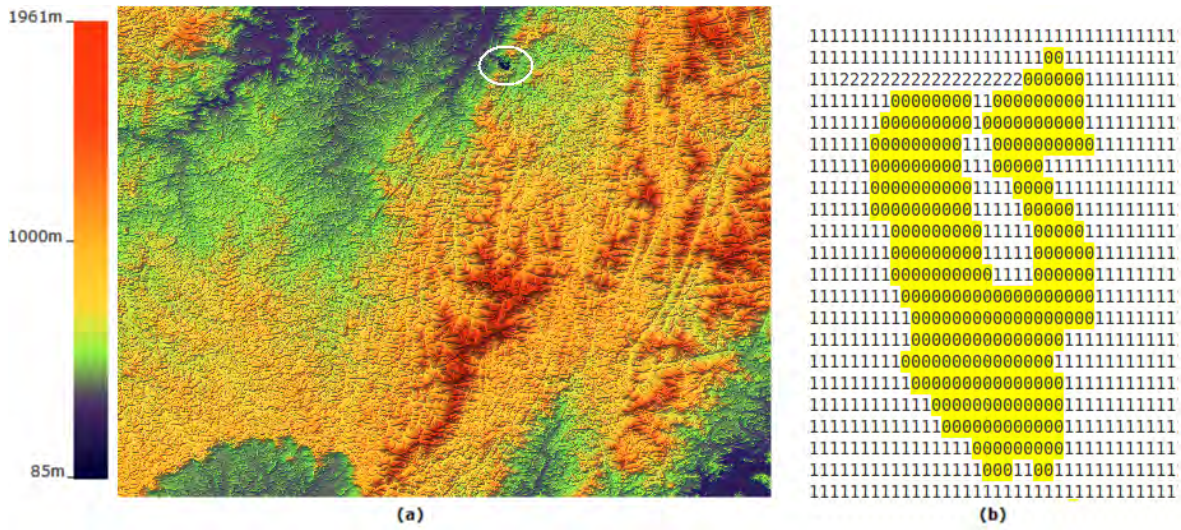


Figura 4.15. (a) A parte mais escura de figura representa a área alagada devido à construção de uma barragem de altura 109 metros. O volume do reservatório gerado é $107.511.300m^3$. (b) Arquivo que gera imagem, valor 2 é a barragem, 1 região alagada, 0 demais regiões. Não houve conflito para esta solução.

4.3.1 Avaliando novos pesos para o posicionamento de reservatório de capacidade 90 milhões m^3 com a presença de mapas temáticos

Um novo conjunto de pesos foi experimentado. Os pesos w_1 e w_2 das variáveis área alagada e área de seção da barragem receberam o valor 1. O peso w_3 da variável área de reserva ambiental recebeu o valor 8 e a w_4 , referente ao conflito com a área urbana, recebeu o valor 4. Desta maneira, o conjunto das soluções não dominadas foi reordenado conforme ilustra a Figura 4.16. Nota-se que, a solução mais "adequada" continuou a ser p_1 , obtendo $Z(p) = 2.276.550,00$. Uma mudança notória foi a mudança de p_7 da sétima para a vigésima segunda posição colocação, que ocorreu pelo fato sugerir um reservatório de água inteiramente dentro de uma área de reserva ambiental e cujo peso foi aumentado 8 vezes em relação ao primeiro experimento. Ao observar as quatro primeiras soluções fica claro que a diferença do valor $Z(p)$ entre elas é pequeno. Isso propicia ao usuário uma escolha mais subjetiva entre essas coordenadas, sem muitos prejuízos. Entretanto, nada o impede de optar por qualquer uma das 30 soluções, visto que a ordenação proposta foi feita segundo os objetivos matemáticos.

Classificação	Nome	Latitude	Longitude	Seção - $S(p)$ m ²	Área alagada - $L(p)$ m ²	Área Reserva - $A(p)$ m ²	Área urbana - $U(p)$ m ²	Resultado - $Z(p)$
1 ^o	p1	-20,113750000	-42,412083333	73.350	2.203.200	-	-	2.276.550,00
2 ^o	p2	-20,098750000	-42,855416667	71.280	2.632.500	-	-	2.703.780,00
3 ^o	p3	-20,106250000	-42,868750000	64.440	2.648.700	-	-	2.713.140,00
4 ^o	p4	-20,131250000	-42,043750000	22.770	2.843.100	-	-	2.865.870,00
5 ^o	p5	-20,260416667	-42,097083333	21.240	3.199.500	-	-	3.220.740,00
6 ^o	p6	-20,007083333	-42,190416667	19.170	3.264.300	-	-	3.283.470,00
7 ^o	p9	-20,157083333	-42,402916667	15.390	3.928.500	-	-	3.943.890,00
8 ^o	p11	-20,156250000	-42,888750000	13.590	4.301.100	-	-	4.314.690,00
9 ^o	p12	-20,263750000	-42,037083333	13.410	4.770.900	-	-	4.784.310,00
10 ^o	p14	-20,202083333	-42,867916667	12.150	4.860.000	-	-	4.872.150,00
11 ^o	p15	-20,334583333	-42,325416667	10.350	4.892.400	-	-	4.902.750,00
12 ^o	p16	-20,192083333	-42,824583333	8.910	5.346.000	-	-	5.354.910,00
13 ^o	p17	-20,581250000	-42,511250000	7.290	5.443.200	-	-	5.450.490,00
14 ^o	p19	-20,278750000	-42,919583333	5.220	5.605.200	-	-	5.610.420,00
15 ^o	p22	-20,758750000	-42,998750000	3.780	6.577.200	-	-	6.580.980,00
16 ^o	p24	-20,772083333	-42,971250000	2.700	7.727.400	-	-	7.730.100,00
17 ^o	p8	-20,852916667	-42,338750000	39.060	1.879.200	-	1.879.200	9.435.060,00
18 ^o	p25	-20,580416667	-42,996250000	1.440	10.173.600	-	-	10.175.040,00
19 ^o	p18	-20,835416667	-42,326250000	36.180	2.729.700	-	2.729.700	13.684.680,00
20 ^o	p20	-20,840416667	-42,327083333	22.410	3.029.400	-	3.029.400	15.169.410,00
21 ^o	p21	-20,816250000	-42,006250000	13.860	3.199.500	-	3.078.000	15.525.360,00
22 ^o	p7	-20,319583333	-42,599583333	97.740	1.806.300	1.806.300	-	16.354.440,00
23 ^o	p23	-20,707083333	-42,081250000	11.610	3.531.600	-	3.531.600	17.669.610,00
24 ^o	p10	-20,319583333	-42,600416667	89.460	1.984.500	1.984.500	-	17.949.960,00
25 ^o	p13	-20,318750000	-42,602916667	54.990	2.389.500	2.389.500	-	21.560.490,00
26 ^o	p26	-20,826250000	-42,002083333	6.750	5.362.200	-	5.224.500	26.266.950,00
27 ^o	p27	-20,925416667	-42,337083333	6.570	5.410.800	-	5.410.800	27.060.570,00
28 ^o	p28	-20,656250000	-42,696250000	4.590	5.580.900	5.580.900	-	50.232.690,00
29 ^o	p29	-20,657083333	-42,697916667	4.320	6.228.900	6.228.900	-	56.064.420,00
30 ^o	p30	-20,569583333	-42,663750000	2.970	6.779.700	6.779.700	-	61.020.270,00
				w1	w2	w3	w4	
				1	1	8	4	

Figura 4.16. Soluções situadas na fronteira de Pareto e ordenadas pelos pesos $w_1 = 1$, $w_2 = 1$, $w_3 = 8$, $w_4 = 4$.

Um outro cenário foi gerado a partir dos seguintes pesos: $w_1 = 8$, $w_2 = 1$, $w_3 = 8$, $w_4 = 4$. Neste caso, houve uma pequena mudança na ordenação das soluções ao comparar com o da Figura 4.16. Por exemplo, p_4 saltou da quarta "melhor" solução para a segunda "melhor", devido ao seu pequeno coeficiente da seção transversal da barragem $S(p)$. A nova classificação é apresentada na Figura 4.17.

Classificação	Nome	Latitude	Longitude	Seção - $S(p)$ m ²	Área alagada - $L(p)$ m ²	Área Reserva - $A(p)$ m ²	Área urbana - $U(p)$ m ²	Resultado - $Z(p)$
1 ^o	p1	-20,113750000	-42,412083333	73.350	2.203.200	-	-	2.790.000,00
2 ^o	p4	-20,131250000	-42,043750000	22.770	2.843.100	-	-	3.025.260,00
3 ^o	p3	-20,106250000	-42,868750000	64.440	2.648.700	-	-	3.164.220,00
4 ^o	p2	-20,098750000	-42,855416667	71.280	2.632.500	-	-	3.202.740,00
5 ^o	p5	-20,260416667	-42,097083333	21.240	3.199.500	-	-	3.369.420,00
6 ^o	p6	-20,007083333	-42,190416667	19.170	3.264.300	-	-	3.417.660,00
7 ^o	p9	-20,157083333	-42,402916667	15.390	3.928.500	-	-	4.051.620,00
8 ^o	p11	-20,156250000	-42,888750000	13.590	4.301.100	-	-	4.409.820,00
9 ^o	p12	-20,263750000	-42,037083333	13.410	4.770.900	-	-	4.878.180,00
10 ^o	p14	-20,202083333	-42,867916667	12.150	4.860.000	-	-	4.957.200,00
11 ^o	p15	-20,334583333	-42,325416667	10.350	4.892.400	-	-	4.975.200,00
12 ^o	p16	-20,192083333	-42,824583333	8.910	5.346.000	-	-	5.417.280,00
13 ^o	p17	-20,581250000	-42,511250000	7.290	5.443.200	-	-	5.501.520,00
14 ^o	p19	-20,278750000	-42,919583333	5.220	5.605.200	-	-	5.646.960,00
15 ^o	p22	-20,758750000	-42,998750000	3.780	6.577.200	-	-	6.607.440,00
16 ^o	p24	-20,772083333	-42,971250000	2.700	7.727.400	-	-	7.749.000,00
17 ^o	p8	-20,852916667	-42,338750000	39.060	1.879.200	-	1.879.200	9.708.480,00
18 ^o	p25	-20,580416667	-42,996250000	1.440	10.173.600	-	-	10.185.120,00
19 ^o	p18	-20,835416667	-42,326250000	36.180	2.729.700	-	2.729.700	13.937.940,00
20 ^o	p20	-20,840416667	-42,327083333	22.410	3.029.400	-	3.029.400	15.326.280,00
21 ^o	p21	-20,816250000	-42,006250000	13.860	3.199.500	-	3.078.000	15.622.380,00
22 ^o	p7	-20,319583333	-42,599583333	97.740	1.806.300	1.806.300	-	17.038.620,00
23 ^o	p23	-20,707083333	-42,081250000	11.610	3.531.600	-	3.531.600	17.750.880,00
24 ^o	p10	-20,319583333	-42,600416667	89.460	1.984.500	1.984.500	-	18.576.180,00
25 ^o	p13	-20,318750000	-42,602916667	54.990	2.389.500	2.389.500	-	21.945.420,00
26 ^o	p26	-20,826250000	-42,002083333	6.750	5.362.200	-	5.224.500	26.314.200,00
27 ^o	p27	-20,925416667	-42,337083333	6.570	5.410.800	-	5.410.800	27.106.560,00
28 ^o	p28	-20,656250000	-42,696250000	4.590	5.580.900	5.580.900	-	50.264.820,00
29 ^o	p29	-20,657083333	-42,697916667	4.320	6.228.900	6.228.900	-	56.094.660,00
30 ^o	p30	-20,569583333	-42,663750000	2.970	6.779.700	6.779.700	-	61.041.060,00
				w1	w2	w3	w4	
				8	1	8	4	

Figura 4.17. Soluções situadas na fronteira de Pareto e ordenadas pelos pesos $w_1 = 8$, $w_2 = 1$, $w_3 = 8$, $w_4 = 4$.

Suponha agora que, w_1 recebeu o valor 1 e $w_2 = 8$, e os demais tenham permutado seus valores $w_3 = 4$, $w_4 = 8$, respectivamente. Novamente, assim como nos testes anteriores, a "melhor" solução ficou por conta de p_1 . Isso aconteceu por causa da coleção de pesos informada pelo usuário, mas nada impede que, para um novo conjunto de pontos, p_1 deixe de ser a solução "mais adequada". Um caso onde p_1 produziria um valor de função objetivo maior que p_2 e, consequentemente deixaria de ser a "melhor" opção aconteceria caso o peso w_1 fosse pelo menos 208 vezes maior que o peso w_2 . Entretanto neste trabalho isso não seria possível, uma vez que, o valor dos pesos foram definidos como sendo inteiros de [1 a 10]. A ordenação para tal conjunto de pesos está apresentada na Figura 4.18.

Classificação	Nome	Latitude	Longitude	Seção - $S(p)$ m ²	Área alagada - $L(p)$ m ²	Área Reserva - $A(p)$ m ²	Área urbana - $U(p)$ m ²	Resultado - $Z(p)$
1 ^a	p1	-20,113750000	-42,412083333	73.350	2.203.200	-	-	17.698.950,00
2 ^a	p2	-20,098750000	-42,855416667	71.280	2.632.500	-	-	21.131.280,00
3 ^a	p3	-20,106250000	-42,868750000	64.440	2.648.700	-	-	21.254.040,00
4 ^a	p7	-20,319583333	-42,599583333	97.740	1.806.300	1.806.300	-	21.773.340,00
5 ^a	p4	-20,131250000	-42,043750000	22.770	2.843.100	-	-	22.767.570,00
6 ^a	p10	-20,319583333	-42,600416667	89.460	1.984.500	1.984.500	-	23.903.460,00
7 ^a	p5	-20,260416667	-42,097083333	21.240	3.199.500	-	-	25.617.240,00
8 ^a	p6	-20,007083333	-42,190416667	19.170	3.264.300	-	-	26.133.570,00
9 ^a	p13	-20,318750000	-42,602916667	54.990	2.389.500	2.389.500	-	28.728.990,00
10 ^a	p8	-20,852916667	-42,338750000	39.060	1.879.200	-	1.879.200	30.106.260,00
11 ^a	p9	-20,157083333	-42,402916667	15.390	3.928.500	-	-	31.443.390,00
12 ^a	p11	-20,156250000	-42,888750000	13.590	4.301.100	-	-	34.422.390,00
13 ^a	p12	-20,263750000	-42,037083333	13.410	4.770.900	-	-	38.180.610,00
14 ^a	p14	-20,202083333	-42,867916667	12.150	4.860.000	-	-	38.892.150,00
15 ^a	p15	-20,334583333	-42,325416667	10.350	4.892.400	-	-	39.149.550,00
16 ^a	p16	-20,192083333	-42,824583333	8.910	5.346.000	-	-	42.776.910,00
17 ^a	p17	-20,581250000	-42,511250000	7.290	5.443.200	-	-	43.552.890,00
18 ^a	p18	-20,835416667	-42,326250000	36.180	2.729.700	-	2.729.700	43.711.380,00
19 ^a	p19	-20,278750000	-42,919583333	5.220	5.605.200	-	-	44.846.820,00
20 ^a	p20	-20,840416667	-42,327083333	22.410	3.029.400	-	3.029.400	48.492.810,00
21 ^a	p21	-20,816250000	-42,006250000	13.860	3.199.500	-	3.078.000	50.233.860,00
22 ^a	p22	-20,758750000	-42,998750000	3.780	6.577.200	-	-	52.621.380,00
23 ^a	p23	-20,707083333	-42,081250000	11.610	3.531.600	-	3.531.600	56.517.210,00
24 ^a	p24	-20,772083333	-42,971250000	2.700	7.727.400	-	-	61.821.900,00
25 ^a	p28	-20,656250000	-42,696250000	4.590	5.580.900	5.580.900	-	66.975.390,00
26 ^a	p29	-20,657083333	-42,697916667	4.320	6.228.900	6.228.900	-	74.751.120,00
27 ^a	p30	-20,569583333	-42,663750000	2.970	6.779.700	6.779.700	-	81.359.370,00
28 ^a	p25	-20,580416667	-42,996250000	1.440	10.173.600	-	-	81.390.240,00
29 ^a	p26	-20,826250000	-42,002083333	6.750	5.362.200	-	5.224.500	84.700.350,00
30 ^a	p27	-20,925416667	-42,337083333	6.570	5.410.800	-	5.410.800	86.579.370,00
				w1	w2	w3	w4	
				1	8	4	8	

Figura 4.18. Soluções situadas na fronteira de Pareto e ordenadas pelos pesos $w_1 = 1$, $w_2 = 8$, $w_3 = 4$, $w_4 = 8$.

Capítulo 5

Conclusões

Neste trabalho foi apresentado um método para a determinação de forma aproximada do ponto mais adequado para construção de uma barragem que produza um reservatório com capacidade mínima igual a um valor pré-determinado. As principais contribuições do trabalho são: a determinação automática da direção e a extensão da barragem, a definição da altura ideal da barragem para se obter o volume desejado; a região alagada formada pela barragem; o volume gerado por ela e os conflitos socioambientais produzidos pela construção da represa.

Como conseqüências deste trabalho podem também ser respondidas perguntas importantes, como "Qual área de um conjunto habitacional ficará submersa?", "Qual área de reserva será degradada pela inundação?" entre outras.

O processo de busca pela área alagada se mostrou eficiente uma vez que percorre apenas a componente conexa que poderá fazer parte da área alagada.

Foi desenvolvido um método para a determinação do volume de um reservatório que é mais simples e mais preciso do que o método descrito na literatura. Para essa abordagem pode se dizer que quanto maior a resolução da matriz que representa o terreno mais preciso será o método.

Pode-se considerar que esse trabalho alcançou seus objetivos dado a ausência de sistemas computacionais que realizem tarefa semelhante.

5.1 Trabalhos futuros

São apresentadas a seguir algumas sugestões de trabalhos futuros envolvendo o problema de posicionamento de barragens:

- Desenvolvimento de uma interface amigável: Uma melhoria interessante para

esse trabalho consiste em desenvolver uma interface gráfica onde os usuários possam visualizar as soluções geradas pelo sistema, facilitando o reordenamento das soluções dado um novo conjunto de pesos para as variáveis de decisão. Além disso permitir que o usuário selecione um ponto do rio manualmente e avalie o posicionamento da barragem para aquele local.

- Adaptação do sistema para aplicações que utilizem memória externa: um próximo passo para este sistema seria sua adaptação para trabalhar com grande volume de dados, o que exigem manipulação em memória externa.
- Otimização do código usando GPU's: uma outra possível forma de melhorar o trabalho seria utilizar o poder de processamento das GPU's e uma programação paralela, onde o resultado pode ser alcançado de forma mais ágil.

Referências Bibliográficas

- ASCENCIO, A. F. G. (2005). *Aplicações das estruturas de dados em Delphi*. Pearson, Prattice Hall, São Paulo edição.
- BERG, M.; KREVELD, M. V.; OVERMARS, M. & SCHWARZKOPF, O. (2000). *Computational Geometry: Algorithms and Applications*. Springer-Verlag.
- BEYER, W. H., editor (1978). *CRC Handbook of Mathematical Sciences*. CRC Press, pub-CRC:adr, 5 edição.
- CHENG, F. & LI, D. (1997). Multiobjective optimization desing with pareto genetic algorithm. *Journal of Structural Engineering*, 123:1252--1261.
- (CODEVASF), B. (2001). Assessoria e apoio em serviços técnicos visando atender às necessidades da codevasf referentes aos estudos preliminares dos sistemas de abastecimento de Água para usos múltiplos na bacia do rio são francisco, síntese do relatório final. In *Companhia de Desenvolvimento do Vale do Rio São Francisco e do Parnaíba*. ACL Assessoria e Consultoria LTDA, Brasília, DF.
- DEITEL, H. M. & DEITEL, P. J. (2001). *C++ Como programar*. Bookman, Porto Alegre edição.
- (DNOCS), B. (1981). Intruções gerais a serem observadas na construção das barragens de terra. In *Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS)*, pp. 21--46. 2 Edição revista e ampliada, Fortaleza, CE.
- FELGUEIRAS, C. A. (2001). Modelagem numérica de terreno. In In G. Câmara, C. Davis, A. M. V. M., editor, *Introdução à Ciência da Geoinformação*, volume 1. INPE.
- FGV (1998). Agroanalysis. In UFV, E., editor, *Revista de Economia Agrícola da Fundação Getúlio Vargas*, volume 18, p. 80p. São Paulo, SP.

- GRAF, W. L. (1988). *Fluvial processes in dryland rivers*. Springer-Verlag, Berlin edição.
- JACOBI, P. (2007). Acesso em: 01/12/2010. <http://www.geologo.com.br/aguahisteria.asp/>.
- JENSON, S. K. & DOMINGUE, J. O. (1988). Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. photogrammetric engineering and remote. *Sensing*, 54:1593--1600.
- KNUTH, D. E. (1994). *The Stanford GraphBase: A Platform for Combinatorial Computing*. Addison-Wesley Publishing Company, New York: acm press edição.
- KREVELD, M. V. (1997). Algorithms on triangulated terrains. In *In Proceedings of the 24th SOFSEM*, volume 1338, pp. 19--23. Springer-Verlag.
- LOPES, A. V. & FREITAS, M. A. S. (2003). Avaliação das demandas e ofertas hídricas na bacia do rio são francisco usando modelo de rede de fluxo. In *XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Curitiba, PR.
- MATOS, A. T.; SILVA, D. D. & PRUSKI, F. F. (2003). Barragens de terra de pequeno porte. In UFV, E., editor, *Caderno didático*, volume 73, chapter 3, pp. 25--60. 2ed, Viçosa. MG.
- Persistence of Vision (TM) Raytracer (2009). Acesso em: 01/12/2010. <http://www.povray.org/download/>.
- The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) (2007). Acesso em: 01/12/2010. <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>.
- MOLLE, F. (1989). Perdas por evaporação e infiltração em pequenos açudes. Série Brasil. SUDENE.Hidrologia. série.25. p. 11 a 70.
- MOORE, I.; GRAYSON, R. & LADSON, A. (1991). Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological Processes*, 5:3--30.
- O'CALLAGHAN, J. F. & MARK, D. M. (1984). The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 28:323--344.
- RASSOL, S. I. (1984). On dynamics of deserts and climate. In *The global climate*, pp. 107--120, New York: Cambridge University Press.

- ROSIM, S. A. M.; MONTEIRO, V. C.; RENNÓ, D. R. C. M. S. & SOARES, J. V. (2003). Terrahidro: Uma plataforma computacional para o desenvolvimento de aplicativos para análise integrada de recursos hídricos. In *XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR*, pp. 2589--2596, Belo Horizonte, MG.
- SOUSA, J. R. C.; ANDRADE, M. V. A. & NOGUEIRA, K. (2010). Heurística para o posicionamento de reservatórios d'água. In *Anais do XI Simposio Brasileiro de Geoinformatica*.
- SOUSA, L. N. & MATOS, J. F. (2006). Metodologias de processamento de dados srtm para a produção de modelos digitais de direção de escoamento. In *VIII Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos Países de Língua Oficial Portuguesa*, Figueira da Foz, Portugal.
- TAKAHASHI, R. H. C. (2007). Otimização escalar e vetorial. In de Matemática. Universidade Federal de Minas Gerais, D., editor, *Notas de aula*, volume 3.
- TARBOTON, D. G. (1997). A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*, 33:309--319.
- Team, G. D. (2004). Grass 5.3.0 release. ISSN 1614-8746.
- WEISSTEIN, E. W. (2007). Polygon area. Acesso em: 01/12/2010. <http://mathworld.wolfram.com/PolygonArea.html>.