

## Modelagem de áreas de escoamento superficial a partir do Modelo Digital de Terreno

Angelo Moura Araujo<sup>1</sup>  
Ardemírio de Barros Silva<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Programa de Pós Graduação em Modelagem em Ciência da Terra e do Ambiente  
BR 116, Km 03, Avenida Universitária, CEP: 44.031-460

<sup>1</sup> arangeo@gmail.com

<sup>2</sup> abarros@uefs.br (orientador)

**Abstract.** The present study was developed in the municipal district Teofilândia, Bahia, of semiarid climate, with a total population of 21.461 habitants. This paper is based on the analysis and identification of potential areas of moisture and the morphodynamics of the drainage channels in semi-arid regions. The methodological approach comprises: the theoretical discussion of the use of MDT and the use of GIS. Thematic maps were produced such as sinuosity, quotas and humidity to classify existing drainage pattern and to evaluate potential areas of moisture available. From the index of sinuosity and quota levels, rivers and streams were analyzed, showing, the tendency of surface flows in the channels. Using map algebra was possible to separate areas with different levels of humidity in the studied area. The areas of high humidity are identified in general as potential areas for construction of dams, since this is areas more likely to remain for a longer period of time the existing water thus favoring the deployment of these dams. The obtained final map allows us to evaluate and identify areas with increased possibility of surface water accumulation, enabling to develop action plans for the intended use of these areas for various purposes, such as the implementation of agricultural and dams construction.

**Palavras-chave:** GIS, drainage channels, sinuosity index, humidity index, quotas, SIG, canais de drenagem, índice de sinuosidade, índice de umidade, cotas.

### 1. Introdução

O uso dos recursos hídricos em áreas semiáridas caracteriza-se pelo aproveitamento do volume das águas ecoadas superficialmente, a partir do armazenamento em reservatórios superficiais e subterrâneos, fundamentais para o uso humano e animal em períodos de maior estiagem.

Com base no MDT, o presente trabalho apresenta uma análise espacial dos canais de escoamento superficial avaliando a partir do cruzamento entre os índices de sinuosidade, umidade e das cotas dos canais de drenagem, a morfodinâmica das variações de altitudes do canal e sua influência no comportamento das águas superficiais para a identificação de áreas favoráveis a implantação de barragens. Compreendido como uma representação matemática da diferença de altitude de uma determinada área, em forma contínua, o MDT tem um papel importante para a configuração de superfícies.

Localizado no nordeste baiano, o município de Teofilândia está compreendido entre as coordenadas 11°22'00" e 11° 36' 00" de latitude sul e 38° 49' 00" e 39°04'00" de longitude oeste, especificamente na região de planejamento Nordeste do Estado da Bahia, limitando-se a leste com o Município de Biritinga, a sul com Serrinha, a oeste com Barrocas e a norte com Araci (Figura 1). A área municipal é de 318 km<sup>2</sup> e está inserida nas folhas cartográficas (SC.24-Z-C-I), (SC.24- Z-C-IV), Santaluz (SC.24-Y-D-III) e Serrinha (SC.24-Y-D-VI) na escala 1:100.000, estas últimas, editadas pelo MINTER/SUDENE em 1977. O acesso, a partir de Salvador, é efetuado pelas rodovias BR-324 e BR-116 num percurso total de 194 km (Figura 1), segundo BAHIA (2005). Está inserido no polígono das secas, portanto, uma região de clima semi-árido com a maioria da população residente na zona rural de um total de 21.481 habitantes IBGE (2010).

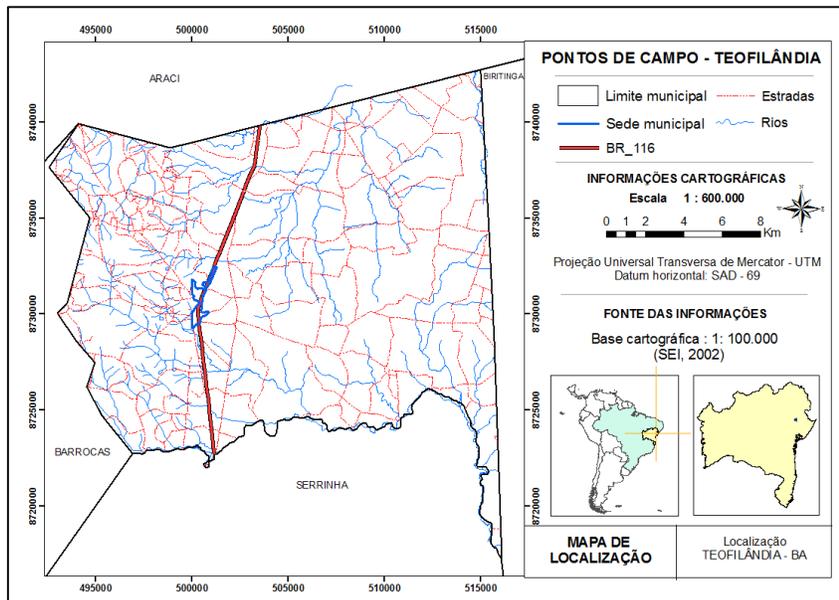


Figura 1 – Localização do Município de Teofilândia

## 2. Metodologia do Trabalho

Considerando a necessidade de apresentar planos de aproveitamento das águas superficiais, foram utilizadas técnicas de modelagem a partir do Modelo Digital de Terreno, disponibilizado pelo INPE (2009), para identificação das características físico-estruturais dos sistemas hídricos que tem como principal unidade de análise as micro-bacias locais. Os materiais utilizados foram: arquivos vetoriais dos canais de drenagem e do limite municipal e o Modelo Digital de Terreno (resolução de 30 metros) para a extração das declividades (em graus), da direção de fluxo e das sub-bacias; utilizou-se o software Idrisi Kilimanjaro para o processamento do MDT e extração das variáveis topográficas dos canais e o Argis para edição das tabelas de atributo para a inserção dos valores obtidos a partir do processamento e para o layout final dos mapas.

Para a modelagem dos canais de drenagem, foi obtida a partir do MDT, a variação de cotas dos canais de drenagem (maior e menor cota) tendo como base as áreas das sub-bacias e o índice de sinuosidade, e a partir tabulação entre estas variáveis obtiveram-se as características morfodinâmicas de cada canal de drenagem. O cálculo do índice de umidade foi associado a outros planos temáticos (escoamento, direção de fluxo) através de álgebra de mapas.

## 3. Modelagem das áreas de drenagem a partir do MDT

O uso de tecnologias computacionais tornou-se um dos principais e importantes meios para a representação e análise espacial de áreas que envolvem grandes quantidades de dados/informações. Tal motivo está diretamente relacionado às melhorias, disponibilidade e rapidez com que essas tecnologias adquiriram para o desenvolvimento de pesquisas cada vez mais precisas e com uma representação aproximada da realidade.

A análise espacial de modelos topográficos constitui-se como o processo que envolve a compreensão das variações de altitudes do terreno e sua influência no comportamento e nas características de um determinado fenômeno (Miranda, 2005). O Modelo Digital de Terreno (MDT) se estabelece como um dos meios importantes para a extração de sub-bacias entre

outros temas e também para a análise topográfica, pois, a partir dele é possível calcular volumes, áreas, representar perfis, traçar planos altimétricos, construir curvas de nível, representar perspectivas tridimensionais, que sem o auxílio da computação seria muito mais complexo de se elaborar. Segundo Silva (2003) o Modelo Digital de Terreno corresponde à descrição espacial dos diversos tipos de terreno, expressando de forma contínua o tipo de relevo.

Compreendido como uma representação matemática computacional da distribuição de um determinado fenômeno, o MDT tem um papel importante para a configuração de superfícies. Das representações possíveis, temos: a elaboração de mapas de declividade, direção de fluxo (escoamento), topográficos, de aspecto, de acumulação, além de servir de base para compreensão de processos erosivos e construções tridimensionais de diversas variáveis.

Para Felgueiras (2001) a geração de um modelo de terreno pode ser dividida em duas etapas: na primeira tem-se a aquisição de amostras ou amostragem que representa a aquisição de um conjunto representativo de amostras do fenômeno analisado, podendo ser por curvas de isovalores ou por modelo de triangulação (TIN), na segunda etapa tem-se a geração do modelo ou simplesmente interpolação. A declividade corresponde segundo Miranda (2005) “à taxa de variação da elevação do terreno, podendo ser calculada na direção X e Y ou na direção da declividade máxima” ou corresponde ainda segundo Silva (2003) ao gradiente de um determinado terreno que pode ser medido em porcentagem ou graus.

A variação da elevação de uma superfície é adquirida a partir de pontos de controle que são interpolados para assim se obter um modelo do terreno, ou seja, a criação de superfícies contínuas a partir de pontos que estão mais próximos no espaço e que por sua vez apresentam valores de atributos semelhantes, além de se constituírem como base para a geração das curvas de nível.

### 3.1 Índice de sinuosidade

O *índice de sinuosidade* determina as características morfométricas dos canais fluviais. O cálculo se dá pela expressão (Schumm, 1963).

$$I_s = \frac{Dv}{L} \quad (01)$$

Onde:

*I<sub>s</sub>* = índice de sinuosidade

*Dv* = distância vetorial entre os pontos extremos do canal principal.

*L* = comprimento do canal principal

Este índice determina a relação entre o comprimento verdadeiro do canal com a distância vetorial (linha reta) entre dois pontos extremos de um canal principal, em que os valores igual ou próximo de 1 expressam que o canal possui características retilíneas, enquanto que valores próximos de 0 passam a representar canais com maior sinuosidade. Os valores intermediários representam canais cujas características apresentam formas regulares e irregulares ou transicionais.

### 3.2 Cotas dos canais de drenagem

Outra variável importante para a característica dos fluxos superficiais está diretamente relacionada às diferentes cotas dos canais fluviais, ou seja, a diferença entre a cota máxima (nascente) e mínima (foz) do curso d'água. A partir da variação da cota determina-se a maior ou menor velocidade e a acumulação dos fluxos superficiais.

Canais sinuosos com grande diferença de cota entre a nascente e a foz se comparada a um canal retilíneo em uma área plana, conseqüentemente possuirá um fluxo superficial mais rápido do que o retilíneo. Assim, a declividade é fator preponderante para o comportamento do fluxo superficial na superfície do terreno. Com a determinação das cotas dos canais traçou-se as classes para cada um dos cursos d'água na área do município.

Para determinar o número de classes para o índice de sinuosidade e para as cotas, foi adotada a Regra de Sturges (Finger, 1992):

$$K = 1 + 3,3 \log_{10} N \quad (02)$$

Onde:

$K$  = número de classes

$K = 1 + 3,3 * \log(209)$ , onde 209 é o número de canais

$N$  = número total de observações

$K = 9$  classes

### 3.3 Índice de umidade

O *índice de umidade* corresponde ao logaritmo natural da razão entre a área de contribuição ( $A_c$ ) e o ângulo da declividade em graus ( $\beta$ ) como pode ser visto na equação.

$$w = \ln \left( \frac{A_c}{\tan \beta} \right) \quad (03)$$

Sendo:

$w$  = índice de umidade

$\beta$  = ângulo da declividade em graus

$A_c$  = área de contribuição

$\ln$  = logaritmo natural

O índice de umidade é função apenas da declividade variando a partir das funções da tangente e do logaritmo natural. A partir desta característica é possível compreender que este índice apresenta a seguinte restrição: se a declividade do terreno aproxima-se de  $0^\circ$  torna-se uma função infinita e aproximando-se de  $90^\circ$  tende a 0 (zero).

A partir do mapa de umidade é possível avaliar em uma determinada área o comportamento dos fluxos superficiais em relação à permanência destes na superfície do terreno. De maneira isolada, esse índice permite identificar áreas mais aplainadas onde a água da chuva tende a permanecer por um maior tempo após as precipitações, podendo esse resultado se modificar se outras variáveis forem associadas, a exemplo da influência dos tipos de solos.

## 4. Resultados e discussão

Dependendo da declividade do canal o escoamento superficial passa a percorrer os canais de drenagem ganhando velocidade. Canais retilíneos com grande diferença de cota entre a nascente e a foz tendem a possuir velocidade maior do que nos canais sinuosos, fazendo com que o tempo de percurso do fluxo d'água superficial nestes últimos seja maior do que nos canais retilíneos, favorecendo assim, uma maior permanência dos fluxos superficiais nestes canais. No mapa de sinuosidade, os valores variaram de 0,579 (sinuosos) à aproximadamente 0,998 (retilíneos).

Na análise da Figura 1 e do Quadro 1, observa-se que os canais retilíneos caracterizam-se por possuir menor extensão de seus cursos, os chamados rios tributários, com índice de sinuosidade que varia de 0.865 - 0.998; os intermediários são também alguns tributários, porém, com maior extensão do canal de drenagem, apresentando níveis de sinuosidade cujos índices apresentam-se na faixa entre 0.722 - 0.864 e por último os canais sinuosos que variam entre 0.579 - 0.721, representados por canais principais, caracterizados por grande extensão do seu curso.

	Classes de Sinuosidade	Cores	Canais (Quant.)	Percentual (%)
<b>Sinuosos</b>	0.579 - 0.626		5	2.4
	0.627 - 0.673		28	13.4
	0.674 - 0.721		27	12.9
<b>Interme diários</b>	0.722 - 0.769		24	11.5
	0.770 - 0.816		27	12.9
	0.817 - 0.864		32	15.3
<b>Retilíneo</b>	0.865 - 0.911		21	10.0
	0.912 - 0.959		23	11.0
	0.960 - 0.998		22	10.5
<b>TOTAIS</b>			209	100

Quadro 01: Índices de sinuosidade dos canais fluviais no município de Teofilândia.

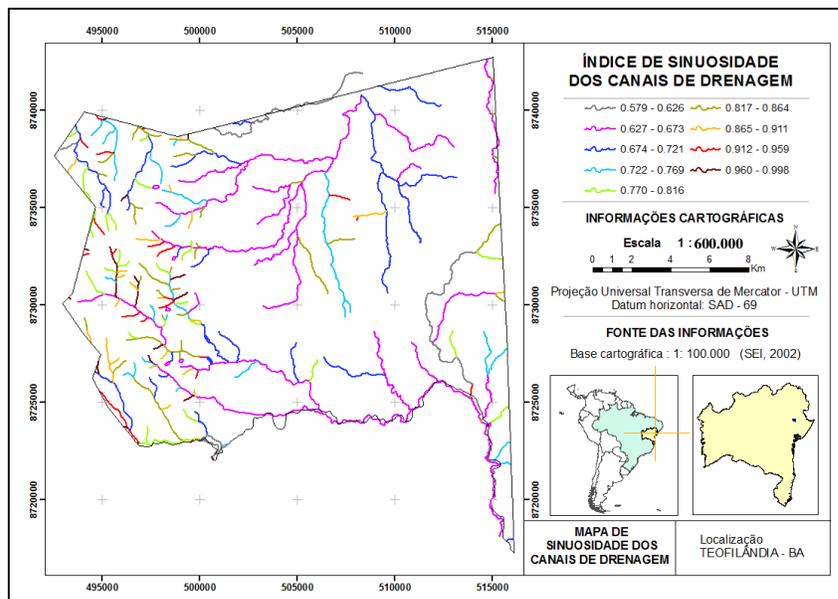


Figura 2: Índice de sinuosidade dos canais

Classes	Nível	Cotas dos Rios	Cores	Canais	Percentual (%)
<b>Baixa</b>	1	1.0 - 2.0		37	17.7
	2	2.1 - 4.0		11	5.3
	3	4.1 - 8.0		15	7.2
<b>Média</b>	4	8.1 - 14.0		26	12.4
	5	14.1 - 22.0		37	17.7
	6	22.1 - 35.0		38	18.2
<b>Alta</b>	7	35.1 - 55.0		24	11.5
	8	55.1 - 86.0		10	4.8
	9	86.1 - 134.00		11	5.3
<b>TOTAIS</b>				209	100%

Quadro 2: Classes com valores de cotas dos canais superficiais.

No Quadro 2 três classes de cotas foram identificadas (Baixa, média e alta) e estas subdivididas em níveis. As cotas encontradas para os canais de drenagem no município variaram entre 1 a 2 metros para canais com menores cotas e de 86.1 à 134 m para canais com maiores cotas.

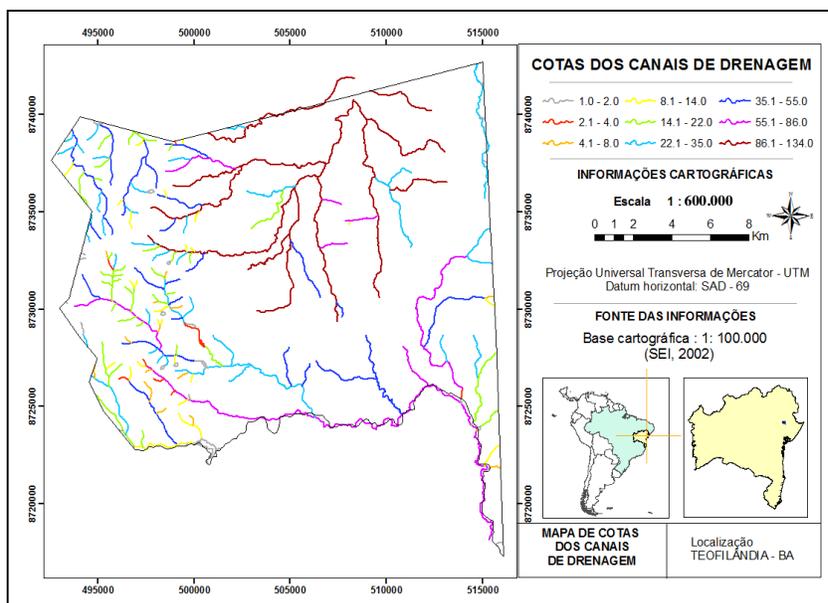


Figura 3: Representação dos valores das cotas dos principais canais de drenagem

Na tabulação cruzada dos dados foram identificados para cada classe de sinuosidade, níveis de cotas diferenciadas que ocorriam nos respectivos intervalos das classes. Esse procedimento forneceu um comparativo entre a forma do canal (sinuosos ou retilíneos) e as classes de cotas existentes (baixa, média e alta) buscando identificar a relação existente entre a forma do canal e o comportamento dos fluxos superficiais.

De acordo com o Quadro 3, a classe de sinuosidade **A** apresentou classes e níveis de cotas **Baixa (1) e Alta (8)** sem os níveis de cotas 2, 3, 7 e 9 e sem a ocorrência da classe de cotas **Média**; a classe de sinuosidade **B** apresentou canais com cotas **Baixa (1) e média(6)**, sem os níveis 2, 3, 4 e 5 e sem a classe de cotas **Alta**. Para a classe de sinuosidade **C** só uma classe e um nível de cota foram identificados (o nível 9 da classe **Alta**). As classes A, B e C se constituem pelos canais que apresentaram menores valores, ou seja, foram classificados como mais SINUOSOS. Nestes foram identificados todas as classes de cotas, porém, só um nível para cada classe de cotas.

Os resultados encontrados podem ser observados no Quadro 3:

		Classes de sinuosidade	COTAS (classes/nível)	Cotas encontradas
Sinuosos	<b>A</b>	0.579 - 0.626	Baixa (1) e Alta(8)	1 e 57
	<b>B</b>	0.627 - 0.673	Baixa (1) e Média (6)	1 e 26
	<b>C</b>	0.674 - 0.721	Alta (9)	93 e 124
Interme diários	<b>D</b>	0.722 - 0.769	Média (5) e Alta(8,9)	22 a 134
	<b>E</b>	0.770 - 0.816	Baixa (1), Média (6) e Alta (7,8,9)	1 a 102
	<b>F</b>	0.817 - 0.864	Baixa (1), Média (5,6) e Alta (7,8,9)	1 a 101
Retilíneo	<b>G</b>	0.865 - 0.911	Baixa(1,2,3), Média (4,5,6) e Alta(7,8,9)	1 a 123
	<b>H</b>	0.912 - 0.959	Baixa(1,2,3), Média (4,5,6) e Alta(7,8)	1 a 57
	<b>I</b>	0.960 - 0.998	Baixa(1,2,3), Média (4,5,6) e Alta(7,8)	1 a 83

Quadro 3: Cruzamentos de dados entre as classes de sinuosidade e as classes e níveis de cotas dos canais superficiais, tendo como base os quadros 01 e 02.

Nos canais INTERMEDIÁRIOS a classe de sinuosidade **D** apresentou classe de cota **Média** com nível 5 e classe **Alta** com nível 8 e 9; A classe **E** apresentou as três classes de cotas (**Baixa**, **Média** e **Alta**), contendo respectivamente, níveis 1-6 , 7-8 e 9. Na classe de sinuosidade **F** foram identificadas 3 classes de cotas e os respectivos níveis Baixa (1), Média (5,6) e Alta (7,8,9). Nas classes de sinuosidade **G**, **H** e **I** - canais RETILÍNEOS - a primeira classe **G** apresentou cotas: **Baixa** (1,2,3), **Média** (4,5,6) e **Alta**(7,8,9), as classes **H** e **I** apresentaram as mesmas classes e níveis de cotas: **Baixa**(1,2,3), **Média** (4,5,6) e **Alta**(7,8).

De acordo os valores obtidos a partir do índice de umidade (Figura 4), as áreas mais úmidas representam 121 Km<sup>2</sup> da área do município, caracterizadas por superfícies aplainadas geralmente próximas dos canais de drenagem. As áreas de umidade intermediária representam a maior parte do município com 199,3 Km<sup>2</sup>, e se caracterizam por áreas com cotas mais elevadas e próximas das áreas de maior umidade. Com 24,7 Km<sup>2</sup> as áreas de umidade baixa localizadas nas partes mais altas do município com menor tendência a acumulação e consequentemente menor umidade.

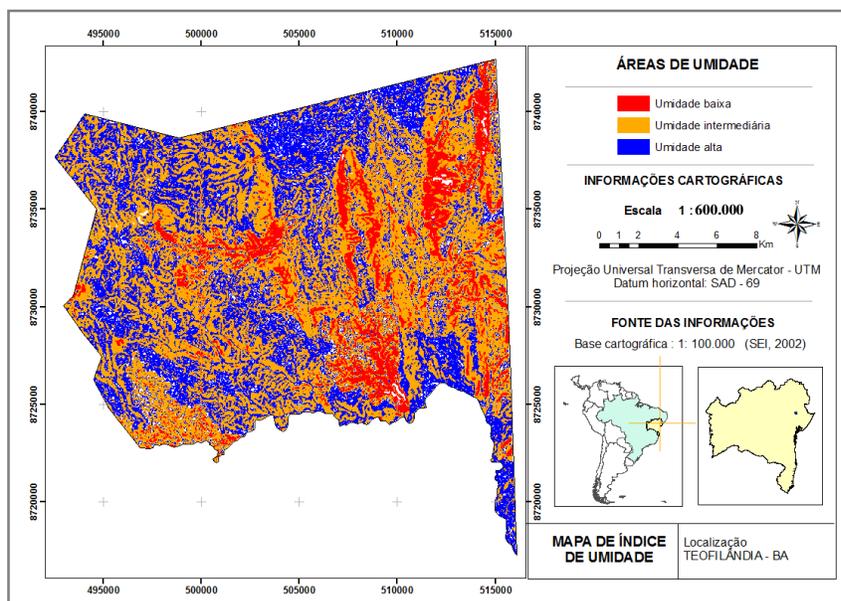


Figura 4: Áreas de umidade do município de Teofilândia.

## 5. CONCLUSÕES

Diante dos impasses que há anos permeiam o tema sobre a água, principalmente no que se refere ao acesso pelas populações mais carentes, que diversas pesquisas têm buscado identificar problemas de disponibilidade da água e tem desenvolvido métodos e técnicas que auxiliem no processo de universalização do acesso a água.

Dentre os métodos mencionados, o MDT representou a base primária para geração de todos os dados posteriores como o índice de sinuosidade, variação de cotas e o índice de umidade. Para entender a dinâmica dos fluxos superficiais aplicou-se o índice de sinuosidade e dos níveis de cotas dos canais de drenagem da região, permitindo identificar para cada canal as características morfométricas o que possibilitou determinar padrões de drenagem a partir da tabulação cruzada destas duas variáveis. A partir do índice de sinuosidade, constatou-se que de acordo o maior ou menor nível de sinuosidade, a tendência dos fluxos superficiais permanecerem em canais mais sinuosos é maior do que naqueles com características

retilíneas, pois por possuírem maior comprimento real o tempo em que a água percorre esses canais, seria a princípio maior.

Contudo, ao cruzar o índice de sinuosidade com a média dos valores de cotas entre estes mesmos canais, a dinâmica dos fluxos superficiais mudou completamente. Um exemplo é a presença de canais com alto índice de sinuosidade (maior retenção), mas com alto valor médio da cota altimétrica o que proporciona maior velocidade do fluxo d'água superficial naquele canal. Com os resultados do mapa de índice de umidade foi possível separar áreas com diferentes níveis de umidade do município. Este procedimento permite avaliar e identificar de forma generalizada, áreas com maior possibilidade de acumulação hídrica superficial, possibilitando desenvolver planos de ação para o uso planejado destas áreas para diversos fins, a exemplo da implantação de áreas agrícolas e construção de barragens.

As áreas de alta umidade identificadas se constituem de maneira geral como de alto potencial à construção de barragens e a prática da agricultura, já que estas possuem maior probabilidade de manter por um período de tempo maior as lâminas d'água existentes, favorecendo, assim, a implantação dessas barragens. É importante mencionar que a inserção de outras variáveis como tipos de solos, estrutura geológica, áreas de insolação, podem alterar os resultados de potencialidade do mapa de umidade devido às características de cada uma destas variáveis.

A importância em se identificar essas áreas potenciais é que a partir do seu reconhecimento é possível traçar planos de gestão que estabeleçam áreas prioritárias para a prática de projetos que sejam viáveis tecnicamente e ambientalmente e que atendam positivamente as comunidade envolvidas. Ao delimitar essas áreas, permite-se que ações planejadas sejam realizadas, proporcionando desenvolvimento econômico e social dos sujeitos que dependem diretamente do uso dos recursos hídricos locais para a sua sobrevivência.

## Referências Bibliográficas

BAHIA; SECRETARIA DO PLANEJAMENTO, Ciência e Tecnologia. **Recursos Hídricos do Estado da Bahia**: ênfase ao semi-árido. Salvador, CAR, 2005.

Felgueiras, C. A. Modelagem Numérica de Terreno. In: Câmara, Gilberto; Davis, Clodoveu; Monteiro, Antônio Miguel Vieira. **Introdução à Ciência da Geoinformação**. 2001. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/index.html>. Acesso em 26 nov. 2009

Finger, C. A. G. **Fundamentos de biometria florestal**. Santa Maria: UFSM/ CEPEF/FATEC, 1992. 201p.

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **TOPODATA: Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil**. 2009. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/topodata/dados.php> Acesso em: 22 nov. 2009

IBGE, 2010. **Acompanhamento da Supervisão do Censo: Bahia**. Disponível em: [http://www.censo2010.ibge.gov.br/accompanhamento\\_supervisao.php?&ue=29](http://www.censo2010.ibge.gov.br/accompanhamento_supervisao.php?&ue=29) Acesso em: 11 Nov. 2010

Miranda, J. I. **Fundamentos de Sistemas de Informações Geográficas**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2005.

Schumm, S.A. Sinuosity of alluvial rivers on the great plains. **Geological Society of America Bulletin**. v. 74, n. 9, p. 1089-1100, 1963. Disponível em: <http://www.scielo.br/scieloOrg/php/reflinks.php> Acesso em: 18 Out. 2010.

Silva, A. de B. **Sistemas de Informações Geo-referenciadas: conceitos e fundamentos**. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2003.