

Suscetibilidade de enchentes a partir da análise das variáveis morfométricas na bacia hidrográfica do rio dos Sinos/RS

João Paulo Brubacher
Guilherme Garcia de Oliveira
Laurindo Antonio Guasselli

Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)
Centro Estadual de Pesquisa em Sensoriamento Remoto e Meteorologia (CEPSRM)
Av. Bento Gonçalves, 9.500 – 91.501-970. Caixa Postal 15.044
Porto Alegre, RS/Brasil.
jp.brubacher@hotmail.com; g.g.oliveira10@gmail.com; laurindo.guasselli@ufrgs.br

Abstract: With the advent of remote sensing new techniques and geoprocessing for the development of digital elevation models, the basin morphometric analysis has become feasible and of rapid implementation. This analysis allows the understanding of the processes arising of geomorphological and hydrological dynamics, such as floods and flooding. The aim of this study is to analyze the influence of morphometric variables in the Sinos River Basin/RS, so define the highest risk of flooding areas. For this, SRTM data were used and Directorate Army's Geographic Services data (DSG). Initially, we performed manipulation of SRTM data and hence the division into sub-basins and regions, the morphometric indices extraction (ranging altimetry, drainage density, circularity index, etc.) and analyze of data. The data provided to distinguish the short duration floods areas, with high velocity of flow, as the Rolante and Paranhana Rivers Regions, from the long-term flooding areas, as in the floodplain of the Sinos River. The results obtained allow to identify priority areas for future installation of rainfall stations.

Palavras-chave: morfometria, modelo digital de elevação, SRTM, morphology, digital elevation model.

1. Introdução

A análise morfométrica de uma bacia hidrográfica compreende, de modo geral, a extração de índices que expressam, empírica ou fisicamente, uma determinada característica ou grandeza do relevo. Com o advento de novas técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento, para a elaboração de modelos digitais de elevação, como os dados *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), esse tipo de análise se torna viável e de rápida aplicação, contribuindo para o diagnóstico e o entendimento dos processos decorrentes da dinâmica geomorfológica e hidrológica, como as enchentes e as inundações. Esses eventos ocorrem naturalmente em todos os ambientes fluviais e podem trazer graves conseqüências para a sociedade.

O projeto SRTM resultou de uma missão espacial da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), NIMA (*National Imagery and Mapping Agency*), DLR (Agência Espacial Alemã) e ASI (Agência Espacial Italiana) com o objetivo de gerar um modelo digital de elevação (MDE) da terra usando a interferometria. Diversos trabalhos já utilizaram dados SRTM para realizar análises morfométricas, como por exemplo, Barros e Steinke (2009) e Oliveira et al. (2010).

A partir da publicação de Horton (1945), na qual se estabelecem parâmetros do desenvolvimento dos rios e de suas bacias, diversos índices foram propostos para o estudo analítico das bacias de drenagem. Um dos índices mais conhecidos e utilizados é o de densidade de drenagem, definido por Horton (1945), que relaciona o comprimento da drenagem e a área da bacia, e auxilia na compreensão do escoamento superficial. Quanto à velocidade de escoamento, um dos índices mais utilizados é o de relação do relevo, proposto por Schumm (1956), o qual relaciona a amplitude altimétrica e o comprimento do canal principal da bacia. Para analisar a forma da bacia, um dos índices mais utilizados é o de

circularidade, estabelecido por Müller (1953), que relaciona a área da bacia com a área de um círculo de mesmo perímetro.

De modo geral, todos esses índices estão relacionados com a suscetibilidade à ocorrência de enchentes e inundações (Oliveira et al., 2010), uma vez que expressam, mesmo que empiricamente, a maneira como se dá a infiltração e o escoamento das águas das chuvas no interior de uma bacia hidrográfica. Nesse contexto, este estudo tem como **objetivo** analisar as variáveis morfométricas em sub-bacias da bacia hidrográfica do rio dos Sinos/RS, para definir as áreas com menor capacidade de escoamento – mais suscetíveis à ocorrência de enchentes –, e as áreas que mais contribuem às enchentes no exutório da bacia.

2. Materiais e Métodos

2.1. Área de Estudo

A bacia hidrográfica do rio dos Sinos se localiza na porção nordeste do Estado do Rio Grande do Sul, RS (Figura 1). Possui uma área de aproximadamente 3.820 km² e população de cerca de 1,3 milhões de habitantes (12% do RS), distribuída em 32 municípios (COMITESINOS, 2009). A bacia hidrográfica do rio dos Sinos compõe, juntamente com outras oito bacias, a Região Hidrográfica do Lago Guaíba, onde está localizada a maior concentração demográfica do RS. O rio dos Sinos é um dos principais rios do Estado e seus principais afluentes são os rios Paranhana, da Ilha e Rolante.

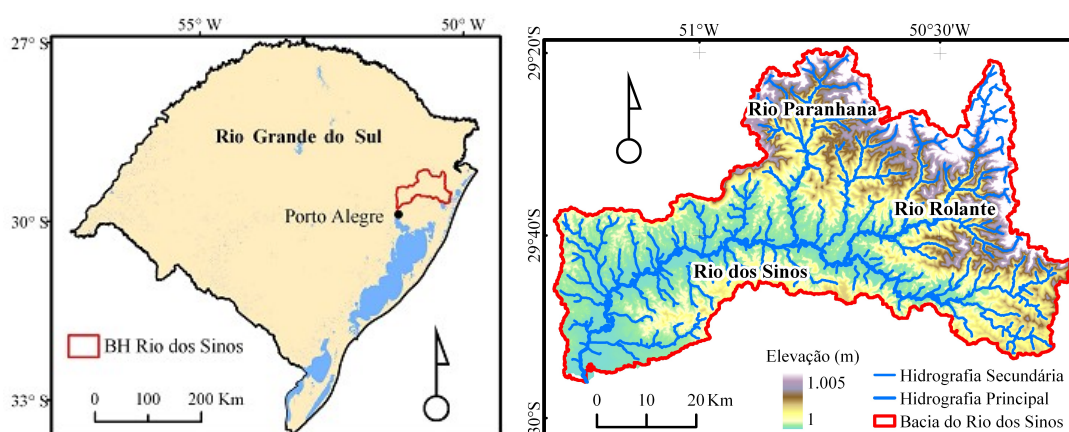


Figura 1 – Localização da bacia hidrográfica do rio dos Sinos, RS.

2.2 Materiais

Foram utilizados no trabalho os seguintes materiais: a) Dados SRTM, modelo de elevação com resolução espacial de 90 m, disponibilizados pela NASA; b) Dados da Diretoria de Serviço Geográfico do Exército (DSG), órgão de apoio da Secretaria de Tecnologia da Informação para superintender os assuntos ligados à cartografia nacional.

2.3 Métodos

O trabalho foi estruturado em quatro etapas: a) manipulação dos dados SRTM; b) divisão de sub-bacias e regiões; c) extração dos índices morfométricos por sub-bacias e regiões; d) análise dos dados.

A manipulação dos dados SRTM compreendeu a filtragem do modelo de elevação para a remoção de informações discrepantes (variações abruptas e inconsistentes). Esse processo garante a continuidade do fluxo de drenagem no modelo, imprescindível para a extração de variáveis morfométricas mais coerentes. As direções de fluxo foram extraídas conforme o método de Jenson e Domingue (1988), no qual se considera, pela lógica da maior declividade, uma única direção de fluxo para cada pixel do modelo (janela 3x3). A partir das direções de

fluxo é gerada uma grade com as áreas acumuladas de drenagem, onde cada pixel tem um valor correspondente à soma das áreas dos pixels que deságuam nele (Jenson e Domingue, 1988; Tarboton et al., 1991). A extração automática da drenagem, organizada de forma hierárquica conforme Strahler (1952), foi realizada com base nas direções de fluxo e na grade de áreas acumuladas, no software ArcGIS 9.3.

A segunda etapa compreendeu a fragmentação da bacia hidrográfica do rio dos Sinos em seis regiões e 47 sub-bacias, com objetivo de verificar a variação dos índices morfométricos em diferentes pontos da bacia. Essas sub-bacias e regiões foram nomeadas de acordo com a cartografia da DSG. O critério para a delimitação das sub-bacias considerou os tributários do rio dos Sinos com ordem igual ou superior a quatro de acordo com a drenagem extraída automaticamente a partir dos dados SRTM. As 47 sub-bacias estão inseridas em seis regiões: rio Paranhana, rio da Ilha e rio Rolante, os três principais afluentes do rio dos Sinos; Alto, Médio e Baixo rio dos Sinos, dividido desse modo devido às diferentes características que o curso do rio apresenta de montante à foz.

Para cada sub-bacia foram extraídas oito variáveis morfométricas: área (A), amplitude altimétrica (Δa); distância (D); densidade de drenagem (Dd); índice de circularidade (Ic); relação do relevo (Rr); declividade (G) e sinuosidade (Is). A amplitude altimétrica é obtida pela diferença entre as altitudes máxima e mínima. A distância entre o exutório de cada sub-bacia e a foz do rio dos Sinos foi calculada considerando a drenagem, isto é, o percurso sinuoso dos cursos d'água.

A densidade de drenagem, definida por Horton (1945), relaciona o comprimento da drenagem e a área da bacia (Eq. 1). O índice de circularidade, proposto por Müller (1953), relaciona a área da sub-bacia com a área de um círculo de mesmo perímetro (Eq. 2). A relação do relevo foi concebida por Schumm (1956), e utiliza a amplitude altimétrica e o comprimento do canal principal da sub-bacia (Eq. 3). O índice de sinuosidade, proposto por Schumm (1963), relaciona o comprimento do canal principal com a distância vetorial entre os extremos do canal (Eq. 4).

$$Dd = \frac{C}{A} \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde: C é o comprimento total da drenagem; A é a área da sub-bacia.

$$Ic = \frac{A}{Ac} \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde: A é a área da sub-bacia; Ac é a área de um círculo de perímetro igual à sub-bacia.

$$Rr = \frac{\Delta a}{L} \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde: Δa é a amplitude altimétrica da sub-bacia; L é o comprimento do canal principal da sub-bacia.

$$Is = \frac{L}{dv} \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde: L é o comprimento do canal principal; dv é a distância vetorial entre os pontos extremos do canal.

Quanto à influência dessas variáveis nas enchentes em cada sub-bacia e no exutório da bacia do rio dos Sinos, foram considerados os seguintes critérios:

a) Área: trata-se da variável morfométrica mais importante, uma vez que define de modo geral o volume de água que será escoado pela sub-bacia. Quanto maior for a

área da sub-bacia, maior será o volume de água que passará pelo seu exutório, incrementando o efeito das enchentes no interior da sub-bacia e a jusante da mesma;

b) Amplitude altimétrica, relação do relevo e declividade: definem, em parte, a velocidade de escoamento. Quanto maiores forem os valores, mais rápido é o escoamento, reduzindo o acúmulo de água na sub-bacia. Geralmente, no interior de sub-bacias com elevados valores desses índices, ocorrem poucas enchentes, predominantemente de rápida duração. Por outro lado, esse fluxo em alta velocidade pode incrementar o efeito das enchentes a jusante da sub-bacia.

c) Distância: quanto maior a distância do exutório de uma sub-bacia à foz do rio dos sinos, menor será a influência que ela irá exercer nas enchentes na foz;

d) Densidade de drenagem: quanto maior a densidade de drenagem, maior é a velocidade com que a água atinge o rio, incrementando o efeito de enchentes a jusante da sub-bacia. Em sub-bacias com substrato rochoso mais permeável, a capacidade de formação de canais é reduzida, diminuindo a densidade de drenagem;

e) Índice de circularidade: a forma da sub-bacia influencia na retenção da água das chuvas. Quanto mais circular, maior a retenção de água na sub-bacia, aumentando a suscetibilidade às enchentes na sub-bacia e reduzindo os efeitos a jusante;

f) Índice de sinuosidade: a relação entre o comprimento verdadeiro do canal e o seu comprimento vetorial permite identificar a sinuosidade. Quanto maior o índice, menor a velocidade do escoamento e, conseqüentemente, menor a influência nas enchentes a jusante da sub-bacia (maior retenção de água no interior da sub-bacia).

3. Resultados e discussões

3.1. Análise morfométrica

Neste item são apresentados os resultados e as discussões referentes à análise das variáveis morfométricas da bacia do rio dos Sinos. A Tabela 1 apresenta os valores obtidos por cada variável morfométrica nas seis regiões delimitadas na bacia, e a Figura 2 apresenta a fragmentação dessas regiões e de suas sub-bacias.

Tabela 1. Valores das variáveis morfométricas por região.

Região	A (km ²)	H (m)	Dd (km/km ²)	Ic	Rr	Is	G (%)	D (km)
Rio Paranhana	572,22	924	1,08	0,20	40,75	1,35	22,86	66,80
Rio da Ilha	251,79	917	1,05	0,24	45,08	1,26	21,40	72,98
Rio Rolante	828,04	965	1,09	0,17	37,93	1,35	23,21	83,80
Alto Sinos	591,09	901	1,15	0,21	29,85	1,35	17,01	83,89
Médio Sinos	788,90	764	1,30	0,17	19,42	1,33	9,98	28,82
Baixo Sinos	648,76	339	1,41	0,22	11,19	1,32	5,43	0,00

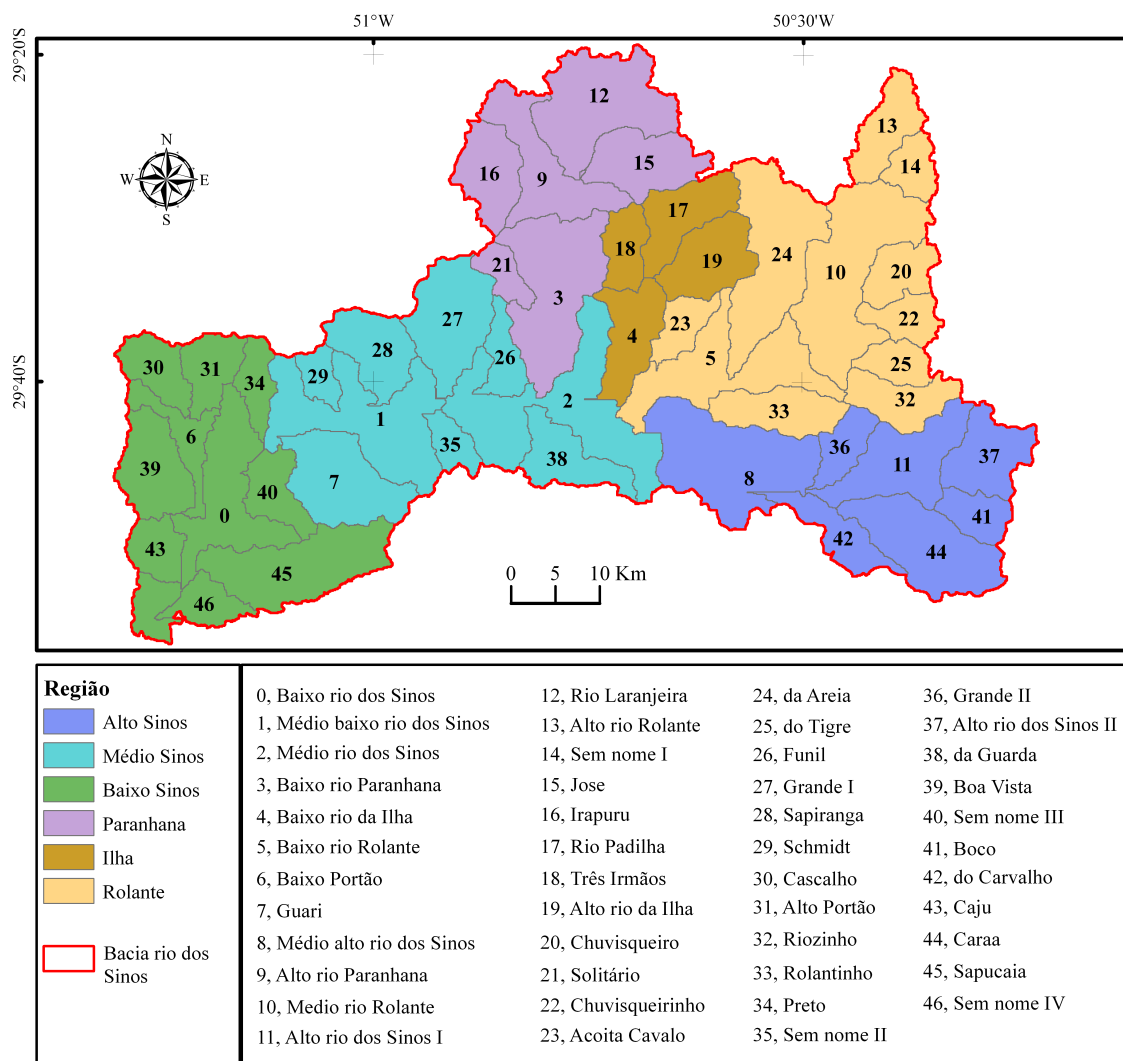


Figura 2 – Regiões e sub-bacias da bacia hidrográfica do rio dos Sinos, RS.

As regiões localizadas na porção mais a montante da bacia (áreas de cabeceira de drenagem), que compreendem os rios Paranhana, da Ilha, Rolante e Alto rio dos Sinos, foram as que apresentaram os maiores índices de amplitude altimétrica, relação de relevo e declividade média, e as menores proporções de densidade drenagem da bacia hidrográfica do rio dos Sinos. A região do rio Rolante apresenta a maior área de contribuição (828,04 km²), amplitude altimétrica (965 m), declividade média (23,21%) e índice de sinuosidade (1,35) entre as analisadas, além de elevada relação de relevo (37,93). É a área de drenagem menos circular com Ic de 0,17. Essa região possui algumas das sub-bacias de maior área entre as analisadas, entre as quais a do Médio rio Rolante (10) possui a maior área (179,78 km²). A região do rio da Ilha apresenta a menor área de contribuição (251,79 km²) e a menor sinuosidade da drenagem (1,26). Possui a maior relação do relevo (45,08) e índice de circularidade (0,24). As sub-bacias do rio Padilha (17) e do Alto rio da Ilha (19) apresentaram os índices mais elevados de declividade e amplitude altimétrica.

A região do rio Paranhana apresenta uma área de contribuição de 577,22 km², sendo as sub-bacias do rio Paranhana (3) e do rio Laranjeira (12) as maiores dessa região, com 156,99 e 149,92 km², respectivamente. A amplitude altimétrica da região é de 924 m, a declividade média de 22,86% e o índice de relação de relevo é de 40,75. Também na porção mais a montante da bacia, a região do Alto rio dos Sinos possui área de contribuição de 591,09 km² e

amplitude altimétrica de 901 m, semelhante ao Paranhana, embora apresente declividades inferiores (17,01%). É também a região mais distante da foz da bacia (83,89 km).

A região do Médio rio dos Sinos apresenta valores menores de amplitude altimétrica (764 m) e de declividade (9,98%), devido a sua proximidade com a foz da bacia (distância de 28,82 km). Essa região possui também uma grande área de contribuição (788,9 km²) e um alto valor de densidade de drenagem (1,30). Entre as sub-bacias da região, a do Médio rio dos Sinos (2) é a que possui a maior área de contribuição (192,89 km²) e também o menor índice de circularidade da bacia (0,09). Com relação à amplitude altimétrica, a sub-bacia do arroio Grande (27), localizada no ponto mais elevado da região, possui o maior valor (757 m), e a sub-bacia do arroio Funil (26), o menor (238 m).

Na região do Baixo rio dos Sinos, onde está localizado o exutório da bacia, a amplitude altimétrica é de apenas 339 m, a relação de relevo é de 11,19 e a declividade média de 5,43%. Essa região apresenta a maior densidade de drenagem da bacia hidrográfica (1,41), que está associada à baixa capacidade de infiltração de água no solo e no substrato rochoso, conforme Christofolletti (1981).

3.2. Relação entre a morfometria e as enchentes

Com base na análise dos aspectos morfométricos, torna-se possível estabelecer a relação de quais regiões e sub-bacias são mais propensas à ocorrência de enchentes, e também a influência que algumas regiões e sub-bacias tem nas enchentes mais a jusante.

As quatro regiões de montante (do Alto rio dos Sinos e rios Rolante, da Ilha e Paranhana) foram as que apresentaram mais características que favorecem ao rápido escoamento das águas, de acordo com os resultados dos índices morfométricos. Essas características indicam a ocorrência de enchentes de curta duração nessas regiões, com possibilidade de enxurradas – inundações com maior poder de destruição, devido à velocidade de escoamento, mas que atingem áreas reduzidas da bacia hidrográfica.

Entre as quatro regiões, a do rio Rolante se destaca como a que possui características que mais propiciam à ocorrência de enxurradas, e a região que mais contribui para as enchentes a jusante, principalmente nas sub-bacias do Baixo rio Rolante, Médio e Médio-baixo rio dos Sinos (5, 2 e 1, respectivamente). Isso se deve principalmente à maior área de contribuição, amplitude altimétrica e declividade média, e ao fato da bacia apresentar uma forma alongada e pouco circular. Além disso, a maior velocidade das águas nessa região, associada à grande área de contribuição, pode fazer com que esse escoamento influencie no represamento das águas (efeito de remanso) nas sub-bacias do Médio-alto rio dos Sinos, Baixo rio da Ilha e Baixo rio Paranhana (8, 4 e 3, respectivamente), intensificando o efeito das enchentes nessas áreas.

Outra região que se destaca pela ocorrência de grandes enxurradas, associadas ao rápido escoamento superficial, e pela grande contribuição nas enchentes a jusante é a do rio Paranhana. Ainda que em menor intensidade, se comparada ao rio Rolante, verificou-se na região do Paranhana uma série de enchentes de curta duração e de grande poder de destruição, características típicas de enxurradas, ao longo dos últimos anos na sub-bacia do Baixo rio Paranhana (3).

As regiões que apresentam maior risco de enchentes são as do Médio e Baixo rio dos Sinos. Essas regiões recebem todo o volume de água drenado pelas quatro regiões a montante da bacia, o que corresponde a uma área total de contribuição de 2.243,12 km². Nas sub-bacias mais próximas à foz do rio dos Sinos, fatores como a baixa amplitude altimétrica e relação de relevo, fazem com que o escoamento superficial seja mais lento, aumentando a possibilidade de inundação nessas regiões. Uma importante implicação desse fato é de que principalmente a partir dessa região, em direção a Região Metropolitana de Porto Alegre, se localizam cidades

muito urbanizadas, com residências fixadas próximas ao leito do rio principal e de seus afluentes.

Dessa forma, seria interessante em um futuro processo de monitoramento das chuvas, priorizarem a instalação de estações pluviométricas nas regiões de maior contribuição, principalmente nas bacias dos rios Rolante e Paranhana, tendo em vistas que estas influenciam mais nas enchentes a jusante. Quanto ao monitoramento dos rios, as sub-bacias com maior suscetibilidade à ocorrência de enchentes são: Baixo, Médio-baixo, Médio e Médio-alto rio dos Sinos (0, 1, 2 e 8); Baixo rio Paranhana (3); Baixo rio da Ilha (4) e; Baixo rio Rolante (5). Estas seriam, portanto, as sub-bacias onde prioritariamente deveriam ser instaladas réguas para a medição da altura da lâmina d'água, e ser realizadas medições contínuas de vazão para estabelecer a curva-chave.

4. Conclusões

A partir da extração de variáveis morfométricas e, com base na análise das sub-bacias e regiões, foi possível compreender a dinâmica de escoamento no interior da bacia e destacar as áreas mais suscetíveis a enchentes e as que mais influenciam na ocorrência desses eventos na porção mais a jusante da bacia do rio dos Sinos. Também foi possível distinguir áreas com ocorrência de enchentes de curta duração e alta velocidade de escoamento (nas regiões do rio Rolante, da Ilha e Paranhana) das áreas com enchentes de longa duração, como na várzea do rio dos Sinos. Além disso, com base nos resultados obtidos, foram identificadas as áreas prioritárias para o monitoramento das chuvas (nas bacias dos rios Rolante e Paranhana), de cotas e de vazões dos rios (prioritariamente na várzea do rio dos Sinos).

5. Referências

Barros, L.L.; Steinke V.A. Análise morfométrica automatizada para bacia do rio Maranhão MODIS. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), Natal, Brasil, 25-30 abril 2009, INPE, p. 4655-4661. Anais. CD-ROM, On-line. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.17.17.11.47/doc/4655-4661.pdf>>. Acesso em: 25 set. 2010.

COMITESINOS – Comitê de Gerenciamento da Bacia Hidrográfica do Rio dos Sinos, 2009. Disponível em: <http://www.comitesinos.com.br/site/index.php?option=com_content&task=view&id=13&Itemid=27>. Acesso em: 22/09/2010.

Christofolletti. A. **Geomorfologia Fluvial**. V.1. São Paulo: Edgard Blücher. 1981.

Horton, R. E. **Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology**. Geological Society of America Bulletin, v.56, n.3, p. 275-370, 1945.

Jenson, S. K.; Domingue, J. O. **Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis**. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 54 (11), p. 1593-1600, 1988.

Müller, V. C. **A quantitative geomorphology study of drainage basin characteristic in the Clinch Mountain Area**. New York: Virginia and Tennessee. Dept. of Geology, n.3, p. 30, 1953.

Oliveira, G. G.; Guasseli, L. A.; Saldanha, D. L. **Influência de variáveis morfométricas e da distribuição das chuvas na previsão de enchentes em São Sebastião do Caí, RS**. Revista de Geografia (Recife), v.3, p.126-140, 2010.

Oliveira; P. T. S. de, Sobrinho T. A., Steffen J. L., Rodrigues D.B. B. **Caracterização morfométrica de bacias hidrográficas através de dados SRTM**. Revista brasileira engenharia agrícola ambiental. vol.14 no.8 Campina Grande, 2010.

Schumm, S. A. Evolution of drainage systems and slopes in badlands of Perth Amboy. Geological Society of America Bulletin, n.67, p. 597-646, 1956.

Schumm, S. A. **Sinuosity of alluvial rivers on the great plains.** Geological Society of America Bulletin, v.74, n.9, p. 1089-1100, 1963.

Strahler, A. N. **Dynamic basis of Geomorphology.** Geological Society of America Bulletin, v.63, p. 923-938, 1952.

Tarboton, D. G.; Bras, R. L.; Rodriguez-Iturbe, I. **On the Extraction of Channel Networks from Digital Elevation Data.** Hydrological Processes, nº 5, p. 81-100, 1991.