



## Resumo Expandido

<b>Título da Pesquisa:</b> HIDROGEOMORFOLOGIA APLICADA AO ZONEAMENTO DE ÁREAS DE RISCO HIDROLÓGICO NA BACIA DO RIO DOCE (MG/ES)		
<b>Palavras-chave:</b> Bacia hidrográfica do rio Doce, enchentes, risco hidrológico, fragilidade ambiental, danos sócio-ambientais.		
<b>Campus:</b> Governador Valadares	<b>Tipo de Bolsa:</b> PIBIC	<b>Financiador:</b> IFMG
<b>Bolsista (as):</b> Laura Pereira do Nascimento e Gustavo Henrique do Lago Villar		
<b>Professor Orientador:</b> Fábio Monteiro Cruz		
<b>Professor Co-orientador:</b> Fulvio Cupollilo		
<b>Área de Conhecimento:</b> Engenharias		

**Resumo:** As bacias hidrográficas constituem unidades físicas básicas para o estudo de fenômenos e processos hidrológicos. Em seu interior o comportamento hidrológico pode ser determinado por variados fatores, dentre os quais as características físicas e climáticas. Enchentes e inundações geram prejuízos que vão desde perdas materiais até vidas humanas. Dessa forma a delimitação de áreas de risco de enchentes (riscos hidrológicos) passa a ter caráter estratégico, uma vez que pode subsidiar ações e políticas de planejamento ambiental e ordenamento territorial das bacias e de atenção às vítimas desses eventos extremos. Dado o fato de que a bacia do rio Doce (MG) apresenta problemas recorrentes de enchentes gerando transtornos e prejuízos variados a população distribuída ao longo da bacia foi realizado zoneamento de áreas de risco hidrológico de enchentes, na bacia do rio Doce (MG/ES), baseado na fragilidade ambiental decorrente da forma do relevo da bacia e na distribuição espacial da precipitação pluviométrica. Para tanto, foram utilizadas bases de dados geográficos e hidrometeorológica da bacia, manipuladas em ambiente SIG (Sistema de Informações Geográficas), gerando ao final o mapa de risco hidrológico da bacia do rio Doce.

### INTRODUÇÃO:

O comportamento hidrológico das bacias é determinado pela relação entre variados fatores, dentre os quais se podem destacar os físicos e climáticos, como o regime de precipitações pluviométricas. Logo, o estudo dos processos hidrológicos nestas unidades deve considerar conjuntamente ambos, uma vez que as características climáticas determinam o escoamento superficial, e, portanto, a ocorrência de eventos extremos como as enchentes; e as físicas das bacias hidrográficas possibilitam o estabelecimento de relações entre estas e os processos hidrológicos (BARBOSA-JUNIOR, 2012).

Em condições especiais, somadas as características físicas e climáticas criam-se cenários nas bacias hidrográficas com propensão a eventos hidrológicos bastante danosos (fragilidade ambiental), que

podem trazer prejuízos de ordem material, social e ambiental. Neste rol merecem destaque as enchentes e inundações, que são eventos naturais que ocorrem com periodicidade nos cursos d'água, frequentemente disparados por chuvas fortes e rápidas ou chuvas de longa duração (TOMINAGA; SANTORO; AMARAL, 2009).

No Estado de Minas Gerais, em particular, a bacia do rio Doce (MG/ES) registra problemas recorrentes relativos a enchentes e inundações, ao longo de vários anos, trazendo prejuízos de ordens variadas, sobretudo em seu médio e baixo curso, indo desde perdas materiais até vidas humanas (ECOPLAN-LUME, 2010).

Neste sentido a presente pesquisa realizou zoneamento de áreas de risco hidrológico de enchentes, na bacia do rio Doce, baseado na fragilidade ambiental decorrente da forma e do relevo da bacia e na distribuição espacial da precipitação pluviométrica, de forma a subsidiar ações efetivas de planejamento ambiental e ordenamento territorial na bacia e direcionar os esforços de atenção às populações atingidas pelos eventos hidrológicos dessa natureza, nas áreas evidenciadas como de maior risco.

## **METODOLOGIA:**

A área de estudo é compreendida pela bacia do rio Doce, que está situada entre os paralelos 18° 45' e 21° 15' de latitude sul e os meridianos 39° 55' e 43° 45' de longitude oeste (Sistema de coordenadas geográficas SAD-69), compreendendo uma área de drenagem de cerca de 83.400 km<sup>2</sup>, dos quais 86% pertencem ao Estado de Minas Gerais e o restante ao Estado do Espírito Santo. (CBH-DOCE, 2012).

A metodologia de análise compreendeu as etapas de elaboração de mapa de fragilidade ambiental associado à declividade, elaboração de mapa de fragilidade ambiental associada à precipitação e mapa de risco hidrológico.

A determinação da distribuição de declividade (mapa clinográfico) foi obtido diretamente do MDE da bacia (mapa hipsométrico), através de aplicação de técnicas de geoprocessamento no aplicativo SIG ArcGIS 10.0<sup>TM</sup>. Foi necessário realizar download das cenas do MDE SRTM, disponibilizado pela EMBRAPA MONITORAMENTO POR SATÉLITE que recobrem a área de estudo e realizar procedimentos de geoprocessamento; que incluíram a mosaicagem das cenas (*Mosaic to New Raster*), eliminação das áreas excedentes (*Extract to by Mask*), e geração do mapa clinográfico a partir do mapa de distribuição de altitudes (*Slope*). O mapa clinográfico passou, então, por um processo de reclassificação (*Reclassify*), segundo os critérios da EMBRAPA para classes de terreno (EMBRAPA, 1979), que posteriormente sofreu uma nova reclassificação baseada em composição das classes anteriores. O índice de fragilidade ambiental compreendeu, ao final, uma ponderação em níveis de fragilidade, cujos pesos variaram de 1 a 3 por meio de composição de classes, conforme o aumento do nível de declividade associado ao critério descrito (tabela 01).

Tabela 01: Índice de fragilidade ambiental associada à declividade  
 Fonte: Adaptado de EMBRAPA (1979)

CLASSES DE RELEVO	%	NÍVEL DE FRAGILIDADE AMBIENTAL	PESOS
PLANO	0 - 3	BAIXO	1
SUAVEMENTE ONDULADO	3 - 8		
ONDULADO	8 - 20	MÉDIO	2
FORTEMENTE ONDULADO	20 - 45		
MONTANHOSO	45 - 75	ALTO	3
FORTEMENTE MONTANHOSO	> 75		

Para o estabelecimento do mapa de risco associado à precipitação foi necessário a princípio realizar inventário e analisar a consistência das séries históricas de precipitação pluviométrica da bacia, disponibilizadas pela Agência Nacional de Águas em seu portal Hidroweb (ANA, 2012). Por meio de diagrama de barras pôde-se determinar o horizonte temporal para geração do índice de fragilidade ambiental associada à precipitação, que compreendeu o período de 1970 a 2002. Em grande parte das séries por haver falhas foi realizada etapa de preenchimento baseada no método da regressão linear, onde para cada estação que havia falha foi feita regressão linear simples com três outras ao redor, sendo ao final a que apresentou o melhor coeficiente de determinação ( $r^2$ ) a escolha do modelo para o preenchimento.

A etapa seguinte foi à criação de banco de dados de precipitação total anual da bacia, onde para cada estação foi realizada a média aritmética entre os valores de precipitação total anual e o número de anos de monitoramento. A seguir então foi gerado modelo de distribuição espacial da precipitação média total anual da bacia por meio de aplicação de interpolador inverso do quadrado da distância (IQD), citado na literatura como o interpolador que mais se aplica ao clima regional (CUPOLILLO, 2008). O IQD admite que os pontos mais próximos, para o processamento da célula, influam mais fortemente que aqueles mais afastados. O uso de interpolador IQD é recomendado quando a variável a ser mapeada diminui com a distância na localização amostrada (WEI; MCGUINNESS *apud* AMORIM, 2008).

O modelo gerado passou, posteriormente por uma classificação (*Reclassify*) baseada em três classes distintas de fragilidade ambiental associada à precipitação, cujos intervalos e pesos atribuídos a cada classe estão dispostos na tabela 02, demonstrando espacialmente a distribuição destes níveis na bacia do rio Doce.

Tabela 02: Índice de fragilidade ambiental associado à precipitação

NÍVEL DE FRAGILIDADE	INTERVALOS DE CLASSE (mm)	PESOS
BAIXO	876.2 - 1134.11	1
MÉDIO	1134.11 - 1392.02	2
ALTO	1392.02 - 1649.92	3

O mapa de risco hidrológico foi elaborado a partir de lógica de álgebra de mapas, com auxílio da ferramenta *Map Algebra* do toolbox *Spatial Analyst Tools* do ArcGIS 10.0<sup>TM</sup>. Segundo Barbosa (1997) a álgebra de mapas pode ser entendida como uma extensão da álgebra tradicional aplicada a dados geográficos. O autor ainda afirma que o comportamento espacial de uma variável ambiental sobre uma região geográfica é tratado como um operador de álgebra, neste ramo da análise espacial.

O método que permitiu estabelecer os pesos, e assim os índices e respectivas classes de risco hidrológico, baseou-se em adaptação no método proposto por Siqueira et al. (2012). Tal método propõe o cruzamento de vários planos de informação de atributos que incluem a precipitação e a declividades, cujos níveis de fragilidade ambiental são determinados por pesos diferentes. O nível final de risco adaptado do método citado foi dado pela relação algébrica abaixo.

$$RH = (Fd * 10) + Fp$$

*Equação 01*

Onde,

RH: Risco hidrológico

Fd: Fragilidade ambiental associada à declividade

Fp: Fragilidade ambiental associada à precipitação

## RESULTADOS E DISCUSSÕES:

A disposição espacial dos níveis ou classes de fragilidade relativa à declividade, à precipitação e os níveis de risco hidrológico estão representadas em mapas distintos, dispostos na figura 01, abaixo.

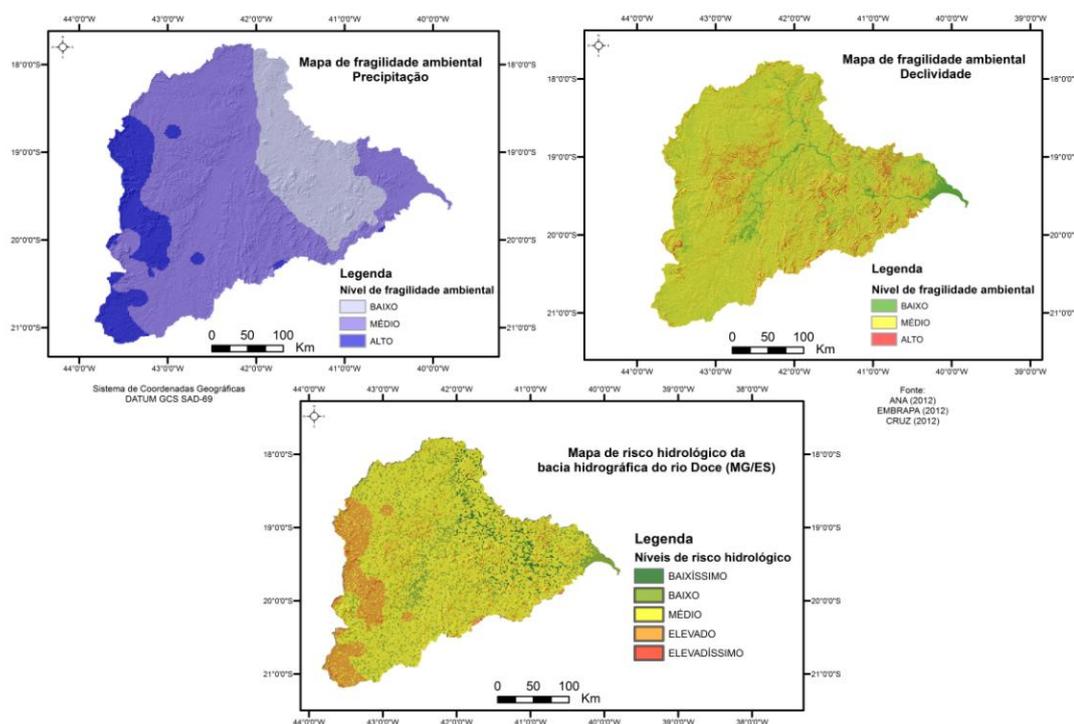


Figura 01: Mapas de fragilidade ambiental (precipitação e declividade) e mapa de risco hidrológico

A bacia do rio Doce em termos gerais apresenta predomínio de médios níveis de fragilidade ambiental associados à declividade, cerca de 53,61% de toda a área de drenagem. A segunda classe de maior fragilidade compreendeu a ALTA FRAGILIDADE, com representatividade em 36,54% da bacia,

aproximadamente. Dentre todas, a que apresentou o menor percentual de representatividade compreendeu a classe BAIXA FRAGILIDADE, com disposição em apenas 9,85% da bacia.

O nível BAIXA FRAGILIDADE pode ser compreendido como a própria calha de drenagem do rio Doce e demais afluentes, ao longo de toda sua extensão; e a região de foz, onde há a descarga da bacia no Oceano Atlântico. A MÉDIA FRAGILIDADE possui distribuição homogênea se estendendo desde o baixo até o alto curso do rio Doce. Já a classe de ALTA FRAGILIDADE, apresenta manchas muito características localizadas, na região setentrional e meridional da bacia, predominantemente. Na região setentrional, esta classe apresenta uma evidente proximidade com a região do médio rio Doce, onde historicamente há registros de pronunciados eventos de enchentes. Já a mancha da região meridional, localiza-se mais à montante, com relativa proximidade do baixo curso da bacia do rio Doce, onde há também registros históricos de enchentes como em Colatina (ES) (ECOPLAN-LUME, 2010).

O mapa de níveis de fragilidade ambiental associada à precipitação revela haver um padrão de aumento gradativo dos níveis de fragilidade, isto é, aumento da precipitação total anual, no sentido leste-oeste da bacia. Corrobora essa constatação Cupollilo (2008) ao afirmar que este padrão decorre de um escoamento com sentido nas regiões serranas do Espinhaço e Mantiqueira para o litoral. Em termos de distribuição espacial dos níveis de fragilidade associada à precipitação há uma notória predominância de MÉDIA FRAGILIDADE com cerca de 64,53% de representatividade na bacia. Já os níveis BAIXA FRAGILIDADE e ALTA FRAGILIDADE ocupam respectivamente; 21,96 e 13,51% da bacia do Rio Doce, sendo menos expressivos na unidade física em estudo.

Quanto ao risco hidrológico o método proposto reportou os índices e classes apresentados na tabela 03.

Tabela 03: Níveis e índice de risco hidrológico

ÍNDICE DE RISCO HIDROLÓGICO	NÍVEL DE RISCO HIDROLÓGICO
11	BAIXÍSSIMO
12	BAIXO
13	MÉDIO
21	
22	
23	ELEVADO
31	
32	
33	ELEVADÍSSIMO

Quanto à representatividade espacial o nível que apresenta a maior distribuição na bacia compreendeu o MÉDIO RISCO, com cerca de 70,94%. As demais classes possuem distribuições muito mais incipientes. As classes que compreendem o ELEVADO, BAIXO e BAIXÍSSIMO RISCO, são observadas em 15,91; 9,40 e 3,44% da área total de drenagem da bacia, respectivamente. A classe menos representativa constituiu a ELEVADÍSSMO RISCO com parcos 0,3% da bacia.

As áreas de MÉDIO RISCO distribuem-se de forma homogênea se estendendo por todas as regiões da bacia, isto é, no alto médio e baixo curso da bacia do rio Doce. As classes BAIXÍSSIMO e BAIXO RISCO se distribuem em geral acompanhando a malha hidrográfica da bacia, incorporando o rio Doce e demais

mananciais. Os maiores níveis de risco (ELEVADÍSSIMO RISCO) não apresentam nenhuma mancha que represente uma virtual concentração de fatores de risco, o que faz com que sua distribuição espacial seja pulverizada em alguns poucos pontos nas bordas da bacia (divisores topográficos) e nas regiões onde se identificou elevados níveis fragilidade associada à declividade, regiões setentrional e meridional da bacia.

A classe ELEVADA DECLIVIDADE apesar de não representar a classe que se distribui de maneira mais expressiva na bacia constituiu virtualmente a que apresentou a disposição espacial mais interessante para efeito de discussão e as manchas mais notáveis do mapa de risco. Há uma grande macha da classe na borda oeste, e outras duas manchas de formato arredando menores distribuídas na região setentrional e meridional da bacia, com relativa proximidade da macha localizada no extremo oeste.

A mancha oeste recobre a área de sub-bacias bastante importantes no contexto hidrológico do rio Doce. Grande parte da área de drenagem destas sub-bacias, incluindo suas cabeceiras, possuem ELEVADO RISCO HIDROLÓGICO. São elas: sub-bacias do rio Piracicaba, do rio Santo Antônio e do rio Santa Bárbara; que deságuam no rio Doce pela margem esquerda; sub-bacia do rio Xopotó, que deságua no rio Doce pela margem direita e ainda a sub-bacia do rio Peixe, que representa um dos principais afluentes do rio Santo Antônio. É ainda notável a representatividade de ELEVADO RISCO HIDROLÓGICO nas sub-bacias dos rios, incluindo suas nascentes, que constituem os principais formadores do rio Doce, a saber sub-bacias do rio Carmo e Piranga.

Disto ocorre que se pode inferir que as enchentes sazonais que ocorrem periodicamente no médio e baixo curso do rio Doce podem ser fortemente influenciadas pelo escoamento superficial que é gerado nas regiões de cabeceira dele próprio e de seus afluentes cujas bacias de drenagem estão presentes no oeste da bacia, em regiões muito distantes dos pontos mais críticos onde há historicamente a ocorrências destes eventos extremos.

Neste sentido, estas regiões devem ser observadas com especial atenção no processo de gestão territorial da bacia, uma vez que apresentam em uma primeira análise condições de potencializar o escoamento superficial, levando a enchentes de maior magnitude no médio e baixo rio Doce; assim como podem tamponar o pulso hidrológico, levando a enchentes de menor proporção com menores prejuízos, se gerida com ações especialmente direcionadas a gestão territorial e dos processos hidrológicos nestas áreas. Já as outras manchas localizadas mais ao norte e sul da bacia possuem pouca representatividade em termos de distribuição, porém recobrem áreas das sub-bacias dos rios Casca (afluente da margem direita do rio Doce) e rio Corrente Grande (afluente da margem esquerda do rio Doce).

## **CONCLUSÕES:**

A álgebra de mapas provou ser uma ferramenta que permite auxiliar de forma eficiente o processo de gestão de recursos hídricos nas bacias hidrográficas, uma vez que possui funcionalidades de cruzamentos de atributos ambientais que tem relação direta com o padrão dos processos hidrológicos ocorrentes em seu interior, podendo assim orientar claramente quais as áreas que merecem ações específicas de ordenamento territorial e gestão ambiental.

A região que suscita a maior atenção quanto ao nível de risco hidrológico compreende o extremo oeste da bacia, nestas regiões o escoamento superficial pode estar ocorrendo de forma bastante

pronunciada nos períodos chuvosos sazonais, em função de haver concomitantemente fatores que potencializam esse processo hidrológico, levando a efeitos bastante destrutivos no médio e baixo rio Doce, representados pelas enchentes sazonais.

Note-se que é interessante que futuras pesquisas nesta linha temática de planejamento hídrico e territorial da bacia do rio Doce devem incorporar em suas abordagens outros atributos ambientais que também possuem relação direta com os processos hidrológicos, tais como o uso/ocupação da terra, podendo assim gerar modelos de risco hidrológico mais completos.

Cabe ao poder público a partir dos resultados apresentados prover ações de gestão com vistas a preservação e conservação das áreas que apresentam o maior potencial de produção de escoamentos superficiais como forma de tamponar a magnitude destes processos e mitigar os efeitos das enchentes no médio e baixo rio Doce.

Também se deve compreender que a ocupação das margens do rio Doce é um fator que está diretamente relacionado aos prejuízos gerados pelas enchentes e que ações estruturantes, como o remanejamento das populações residentes nestas áreas são necessárias e devem somar-se aquelas de ordem não-estruturante, como o planejamento hídrico da bacia.

#### **REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA:**

Agência Nacional de Águas (ANA). **Hidroweb**. Disponível em: < <http://hidroweb.ana.gov.br/>>. Acessado em 05 de Maio de 2012.

AMORIM, R. C. F. de et. al. Avaliação do desempenho de dois métodos de espacialização da precipitação pluvial para o Estado de Alagoas. **Acta Sci. Technol.** v. 30, n.1, p.87-91, 2008.

BARBOSA, C. C. F. **Álgebra de mapas e suas aplicações em sensoriamento remoto e geoprocessamento**. 1997. 161 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1997

BARBOSA-JUNIOR, A. R. **Hidrologia Aplicada**. Disponível em: <<http://www.em.ufop.br/deciv/departamento/~carloveduardo/11Bacia%20Hidrografica.pdf>>. Acessado em 10 de Janeiro de 2012.

COMITÊ DE BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE (CBH DOCE). **Caracterização da bacia**. Disponível em: <[http://www.riodoce.cbh.gov.br/bacia\\_caracterizacao.asp](http://www.riodoce.cbh.gov.br/bacia_caracterizacao.asp)>. Acessado em: 31/06/2012.

CUPOLLILO, F. **Diagnóstico hidroclimático da bacia do rio Doce**. 2008. 153 f. Tese (Doutorado em Geografia), Instituto de Geociências, Universidade Federal Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

ECOPLAN – LUME. **Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Doce e dos Planos de Ações de Recursos Hídricos para as Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos no Âmbito da Bacia do Rio Doce: Relatório final**. Contrato nº 043/2008 – IGAM, 2010.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Súmula**. Rio de Janeiro: 1979. 83p. (Embrapa-SNLCS).

SIQUEIRA, R. V. et al. Mapa de fragilidade ambiental com apoio nas classes de declividade na bacia hidrográfica do rio João Leite. In: Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, IV. 2012, Goiânia. **Anais.... GOIÂNIA: EMBRAPA INFORMÁTICA AGROPECUÁRIA/INPE**, 2012. P. 700-711.

TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. do (org.). **Desastres naturais: conhecer para prevenir**. São Paulo: Instituto Geológico. 196 f. 2009.