

APLICAÇÃO DE METODOLOGIA PARA ANÁLISE DAS VULNERABILIDADES AMBIENTAIS EM CURSOS D'ÁGUA TRANSPOSTOS POR UM OLEODUTO

ALOISIO FERREIRA¹, AFONSO H SANTOS², ARTHUR OTTONI³, DENIS SILVA⁴,
NATHALIA RIBEIRO⁵

¹Eng. Hídrico, Msc. Eng. de Energia, Pesquisador Sênior GPRH – UNIFEI, Itajubá – MG, aloisio80@gmail.com

²Eng. Eletricista, Msc. Eng. Elétrica, Dr. Eng. Elétrica, Pós-Doutor (1991) no Centre International de la Recherche sur l'Environnement et le développement, Professor Titular da Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, Itajubá – MG, afonso@unifei.edu.br

³Eng. Civil, Especialista em Eng. Sanitária e do Meio Ambiente, Msc. Saúde Pública, Dr. Eng. Civil, Professor Associado I da Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, Itajubá – MG, arthurotoni@unifei.edu.br

⁴Eng. Hídrico, Pesquisador Pleno GPRH – UNIFEI, Itajubá – MG, denisdesouza @gmail.com

⁵Eng. Hídrica, Pesquisadora Júnior GPRH – UNIFEI, Itajubá – MG, nath.d.ribeiro@gmail.com

RESUMO

Oleodutos, como quaisquer outras obras de engenharia executadas pelo homem, apresentam susceptibilidade à ocorrência de acidentes, decorrentes de quaisquer motivos, como, por exemplo, ocorrência de escorregamentos de taludes, descalçamento de fundações de blocos de apoio e ancoragem, deslocamento ou rompimento de tubulação devido a cheias em corpos hídricos, choques com veículos pesados, entre outros. Os possíveis acidentes ambientais decorrentes destes vazamentos podem adquirir grandes proporções, sendo praticamente impossíveis de serem valorados. Neste contexto o desenvolvimento de metodologias visando as práticas preventiva e preditiva tornam-se cada vez mais necessários. O presente trabalho objetiva desenvolver uma metodologia para determinar a localização de uma mancha de óleo em um corpo hídrico qualquer oriunda de um vazamento no oleoduto, que no presente estudo tem origem em Duque de Caxias – RJ e destino em Betim – MG.

Palavras-chaves: Hec-Ras, oleodutos, simulação hidráulica.

Tema: Sistemas hídricos sustentáveis (6)

1 INTRODUÇÃO

O Mapeamento do Risco Ambiental de um oleoduto deve identificar, diagnosticar e quantificar as vulnerabilidades ambientais relacionadas ao meio físico e biótico, com especial atenção aos sistemas hídricos presentes nas faixas de dutos, quando da ocorrência de acidentes envolvendo o sistema de dutos.

As variações sazonais de temperaturas, ventos dominantes, níveis de incidência solar e intensidades de precipitação, entre outros, que ocorrem sobre as bacias hidrográficas, dão origem aos eventos fluviométricos extremos que se desenvolvem ao longo dos cursos d'água. Desta forma, o entendimento do comportamento hidrológico de um determinado corpo hídrico, juntamente com o conhecimento das características físicas de sua bacia de drenagem, permite o estudo hidráulico dos escoamentos, relacionando grandezas como cotas máximas atingidas, vazões extremas, velocidades de fluxo e períodos de retorno.

O estudo consiste de uma análise preliminar, sendo elaborado a partir de dados secundários, sem a devida calibração do modelo utilizado. Entretanto, os resultados obtidos são de grande valia, visto que permitem vislumbrar os benefícios advindos da previsão de acidentes, como a rápida e eficiente mobilização das equipes de contenção, a economia de recursos e a minimização dos danos ambientais, biológicos e sociais, entre outros.

Os resultados das simulações executadas apresentam curvas de correlação entre as distâncias percorridas pelos volumes de contaminantes vazados e os períodos de retorno das vazões simuladas, obtidas nos estudos hidrológicos, ao longo do tempo, para os pontos selecionados para análise.

São apresentados, no decorrer deste documento, os detalhes metodológicos utilizados no estudo, os procedimentos para elaboração dos estudos hidrológicos, a modelagem de terreno realizada, as premissas utilizadas nas simulações hidráulicas bem como seus resultados e, finalmente, as conclusões acerca das análises dos resultados e as recomendações para a melhoria do trabalho.

2 METODOLOGIA

A metodologia proposta para a determinação das distâncias percorridas pelos contaminantes ao longo dos cursos d'água simulados se baseia na análise hidráulica unidimensional dos escoamentos destes cursos d'água.

A modelagem do escoamento em cursos d'água de grandes extensões pode ser realizada de maneira satisfatória a partir de simulações unidimensionais, considerando que todos os vetores de deslocamento de fluxo são paralelos ao alinhamento do talvegue.

A adoção do modelo unidimensional é válida para casos onde não há extravasamentos de calha significativos. Para estes, modelos em duas ou mais dimensões são mais adequados, pois admitem que as linhas de fluxo possam se desenvolver em outras direções, representado melhor os efeitos hidrodinâmicos de inundações de planícies aluvionares e áreas marginais às calhas fluviais.

No presente estudo todos os dados e informações utilizados são de origem secundária, compreendendo as seguintes informações:

- Base de informações geométricas que compõem o MDT gerado:

- Modelo Digital de Elevação – MDE obtido a partir de imagens SRTM;
- Imagens na faixa do visível de sensores orbitais do BingMaps e do GoogleEarth;
- Registros de secções transversais de cursos d'água obtidos no Sistema de Informações Hidrológicas – HIDROWEB da Agência Nacional de Águas – ANA;
- Base de dados hidrológicos:
 - Registros históricos de estações fluviométricas obtidos no HIDROWEB/ANA;
- Informações fisiográficas dos cursos d'água estudados:
 - Coeficientes de Manning dos cursos d'água obtidos em artigos e publicações técnicas sobre temas relacionados a recursos hídricos.

As características e as fontes de cada uma destas informações serão apresentadas em detalhes nos capítulos que se seguem.

A determinação do tempo de percurso de uma onda em um trecho de rio ou córrego pode ser obtida pelo cálculo da vazão entre duas secções transversais quaisquer.

Assim, a velocidade do fluxo pode ser determinada pela aplicação do cálculo da vazão em cada secção transversal do curso d'água, dada pela Equação 01 a seguir.

$$v = \frac{Q}{A} \quad \text{Equação 01}$$

Onde:

- v – velocidade média na secção transversal [m/s];
- Q – vazão [m³/s];
- A – Área molhada da secção transversal [m²].

Conhecida a velocidade do fluxo, o tempo de percurso pode ser calculado conhecendo-se a distância entre cada seção e a velocidade média do fluxo que passa por elas, conforme a Equação 02, que se segue.

$$t = \frac{X}{3600 \times v} \quad \text{Equação 02}$$

Onde:

- t – tempo de percurso [h];
- X – Distância entre secções do curso d'água [m²];
- v – velocidade média na secção transversal [m/s].

Assim, pode ser obtida a correlação entre as distâncias percorridas pelo fluxo de interesse e seus tempos de percurso.

Realizando esta análise para diferentes vazões, simulando diversos regimes de escoamento, pode-se obter esta correlação para vazões com diferentes períodos de retorno.

3 MODELO DIGITAL DE TERRENO

Para a geração da base topográfica foi utilizado um Modelo Digital de Elevação – MDE obtido por imagens Shuttle Radar Topography Mission – SRTM. Tal modelo, gerado por imagens orbitais com 90 metros de resolução espacial, encontra-se georreferenciado no

datum WGS84 em coordenadas geográficas decimais. As imagens SRTM são disponibilizadas livremente no site do U. S. Geological Survey – USGS com cobertura para quase todo o globo terrestre, sendo que para os Estados Unidos, as cenas possuem resolução espacial de 30 metros.

Grohmann et al. (2008) ressalta que os produtos gerados pela missão são resultados da reflexão de sinais de radar e podem existir incoerências entre o MDE e o terreno natural. Tais variações podem ser causadas, por exemplo, pela reflexão do sinal no dossel de áreas densamente florestadas, superfícies de telhados e prédios em áreas urbanas, entre outros. A Figura 1 que se segue apresenta uma visão em perspectiva do MDE SRTM em um trecho do Rio Preto.

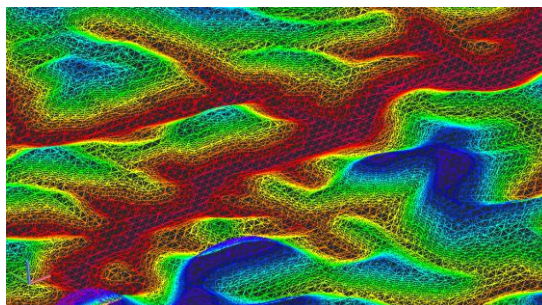


Figura 1 – MDE SRTM de um trecho do Rio Preto.

As extensões dos trechos fluviais estudados foram determinadas a partir do cálculo da extensão necessária para que o tempo de percurso do fluxo fosse igual ou superior a 5 horas, considerando as vazões nas secções de entrada e as declividades médias dos cursos d'água. As extensões variaram de cerca de 30 a 50 quilômetros para cada trecho, conforme Quadro 1, a seguir.

Quadro 1 – Extensões dos trechos fluviais analisados

Curso d'água	Extensão (km)
Rio Carandaí	24,95
Rio das Mortes	29,82
Rio do Peixe	37,66
Rio Paraíba do Sul	38,24
Rio Paraibuna	42,05
Rio Paraopeba	158,21
Rio Piau	21,80
Rio Preto	40,00

Definidas as extensões dos trechos foram obtidos seus MDEs SRTM e, utilizando imagens de satélites do Google Earth e BingMaps, foram vetorizadas suas margens e linhas representativas de seus talwegues estimados.

Para os eixos estimados dos trechos fluviais foram gerados perfis longitudinais, apresentando a superfície do MDE SRTM em corte vertical.

Analisando os perfis longitudinais dos rios simulados observa-se a presença de depressões ao longo das calhas fluviais. Tais depressões são inerentes ao modelo de terreno utilizado, pois devido a sua resolução espacial de 30 metros, reamostrada para 90 metros por pixel

para áreas fora dos Estados Unidos, a representação de secções encaixadas de cursos d'água e feições de grandes declividades são “filtradas” pelo modelo.

Com o intuito de confeccionar uma calha fluvial isenta de depressões, o perfil vertical do modelo SRTM foi utilizado como base para o traçado de uma linha de referência altimétrica com a finalidade de conectar os pontos baixos do modelo, ou seja, conectar os fundos das depressões ao longo das calhas fluviais. Assim, é possível projetar a seção topobatimétrica típica de cada curso d'água ao longo de seu perfil planimétrico e desta linha de referência altimétrica, obtendo-se como resultado uma superfície representativa da calha fluvial, com declividades sempre no sentido de jusante e referenciada nas cotas mínimas do modelo de terreno.

As secções transversais dos cursos d'água foram obtidas dos registros históricos de secções fluviométricas do Serviço de Informações Hidrológicas – Hidroweb, mantido pela Agência Nacional das Águas – ANA. Os registros históricos de estações fluviométricas dos rios transpostos pelo oleoduto que dispõem de registros de secções transversais foram analisadas e, para cada série histórica, foi selecionada uma calha representativa.

As variações nas larguras dos fundos das calhas fluviais foram determinadas pelo traçado planimétrico das margens dos corpos hídricos, e as profundidades e inclinações de suas margens foram estimadas com base nas secções transversais selecionadas. Desta forma, foi possível a obtenção de modelos digitais de terreno que representam as calhas fluviais com seus alargamentos e estrangulamentos, mantendo suas proporções ao longo dos trechos.

4 ESTUDO HIDROLÓGICO

O presente estudo hidrológico compreende a análise dos corpos hídricos existentes na área de influência do Oleoduto, como pode ser visualizado na figura 2 a seguir.

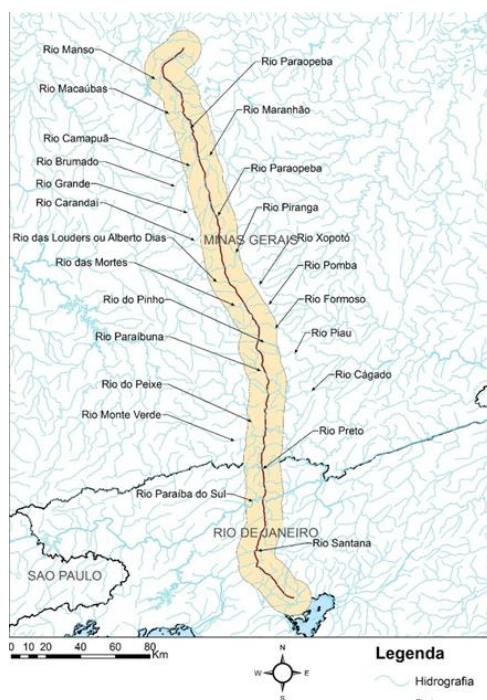


Figura 2 - Detalhe interação da área de influência do oleoduto e os recursos hídricos

Como pode ser observado na Figura 2, o duto estende-se por uma grande área territorial, transpondo aproximadamente 30 rios principais. Inicialmente foi considerado simular a ocorrência dos vazamentos em todos os corpos hídricos transpostos pelo oleoduto. Porém, como este trabalho tem como premissa inicial a utilização apenas de dados secundários, os rios selecionados para simulação se limitam aqueles que possuem dados batimétricos disponibilizados pelo Hidroweb/ANA. Este filtro reduziu a abrangência do estudo para a análise de oito rios, conforme apresentado no Quadro 1 apresentado anteriormente.

4.1 Transposição de Vazões

Para a execução da transposição das vazões, em um primeiro momento, foram traçadas as áreas de drenagem relativas aos pontos de fragilidade correspondentes aos rios selecionados. De posse das áreas de drenagem, foi utilizada a metodologia de transposição de vazões, observando os critérios de verificação da metodologia adotada.

4.2 Cálculo Das Vazões Máximas

Para o cálculo das vazões que serão utilizadas para a simulação dos vazamentos provenientes do oleoduto foram aplicadas análises estatísticas, de modo a determinar as vazões mais críticas para as simulações.

4.2.1 Cálculo das Vazões Máximas Instantâneas

Vazão máxima instantânea é a maior vazão ocorrida num dado período. Este dado é utilizado, principalmente, em projetos de drenagem. Os dados diários de vazões disponibilizados pelo HidroWeb/ANA são resultados da média de duas leituras realizadas diariamente em horários diferentes, não se tratando de vazões máximas instantâneas. Portanto, para a obtenção das máximas instantâneas multiplicam-se as vazões máximas mensais pelo fator CM dado pela Equação 04 (Fragoso Júnior e Tucci, s.d.).

$$C_M = 1 + \frac{2,66}{A^{0,3}} \quad \text{Equação 04}$$

4.2.2 Cálculo de Vazões Extremas

O ajuste de vazões extremas consiste em determinar a vazão do curso d'água que corresponde a um determinado período de retorno (representado pela letra "T" ou também pelas letras "TR", em algumas bibliografias), sendo elaborado por meio de distribuições estatísticas. Neste estudo, foram testadas três distribuições estatísticas: Gumbel, Log-normal e Log-Pearson III. A aderência delas à distribuição empírica pode ser testada, elegendo-se a de melhor representatividade estatística.

Por se tratarem de metodologias de ajustes de extremos amplamente difundidas no Brasil, decidiu-se por aplicá-las aos dados analisados e comparar os resultados, adotando a que mais convergiu para curva empírica. O resultado obtido foi: Rio Carandaí – Gumbel; Rio das Mortes – Gumbel; Rio do Peixe - Log-Normal; Rio Paraíba do Sul – Gumbel; Rio Paraibuna - Log-Normal; Rio Paraopeba - Log-Normal; Rio Piau - Log Pearson III; Rio Preto– Gumbel;

5 ESTUDO HIDRÁULICO

A metodologia utilizada no presente estudo baseia-se na premissa de que caso ocorra vazamento em um dos pontos de fragilidade do oleoduto, especificamente naqueles onde há transposição de curso d'água, os hidrocarbonetos bombeados serão lançados diretamente na água, formando uma emulsão entre a água e óleo, e que, assim, de acordo com

GOGOASE-NISTORAN et al., 2008; POPESCU et al., 2008 o óleo se deslocará com a mesma velocidade da água.

Foram executadas simulações hidráulicas para diversos rios, considerando vazões com diferentes períodos de retorno, calculadas no item anterior, utilizando a ferramenta computacional HEC-RAS.

A partir da obtenção da velocidade de escoamento entre as secções através do HEC-RAS, foi calculado o tempo de percurso do escoamento entre uma secção e outra, permitindo estimar a distância percorrida pelo óleo após um determinado tempo, em diferentes cenários de vazões. Para este estudo, foi adotado como tipo de escoamento base, o escoamento permanente. O escoamento permanente é aquele em que a velocidade em ponto qualquer da corrente permanece invariável no tempo e, em consequência, os parâmetros hidráulicos também permanecem. Desta forma existe uma continuidade de vazão entre as secções (Mello Porto, 2001).

6 RESULTADOS DOS ESTUDOS HIDRÁULICOS

Os resultados tabulares obtidos nas simulações hidráulicas não serão apresentados em função do pequeno espaço disponível. Os resultados principais do estudo são apresentados nas figuras deste item, que contém os gráficos que relacionam tempo de percurso com a distância a partir dos pontos de ruptura simulados, gerados a partir dos resultados das simulações hidráulicas.

Conhecendo-se o tempo decorrido desde o início de um determinado vazamento e a vazão instantânea do curso d'água impactado é possível obter, nestes gráficos, a distância aproximada percorrida pela mancha de hidrocarbonetos.

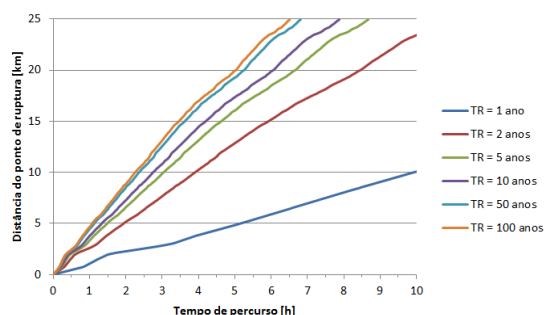


Figura 2 – Propagação de hidrocarbonetos no Rio Carandaí

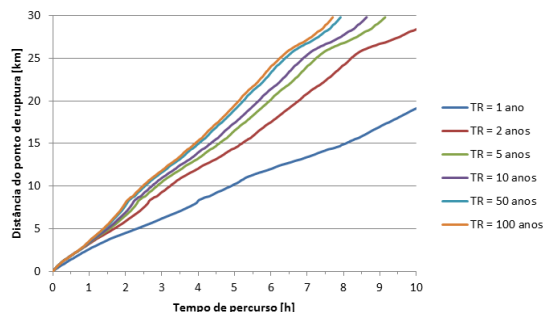


Figura 3 - Propagação de hidrocarbonetos no Rio das Mortes

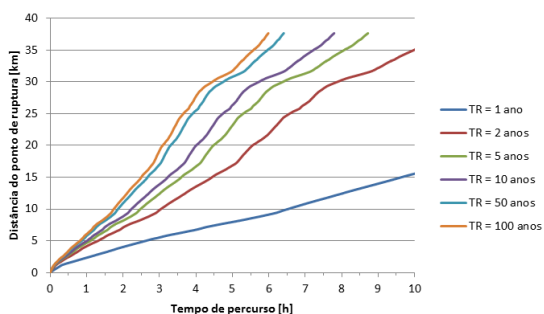


Figura 4 - Propagação de hidrocarbonetos no

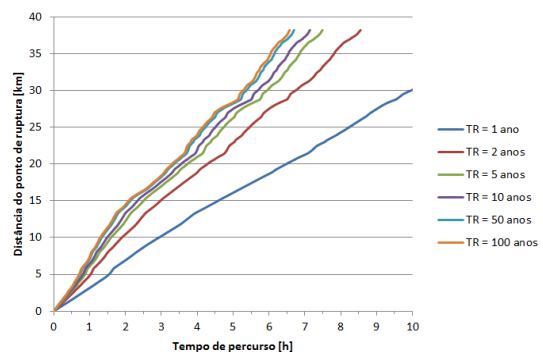


Figura 5 - Propagação de hidrocarbonetos no

Rio do Peixe

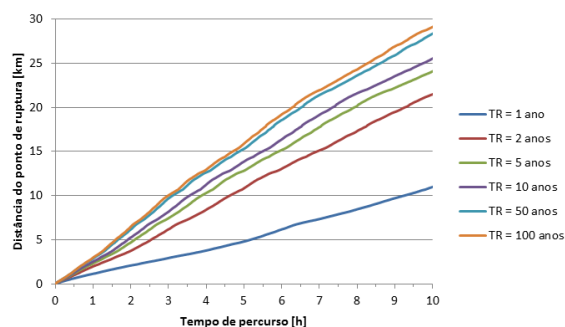


Figura 6 - Propagação de hidrocarbonetos no Rio Paraibuna

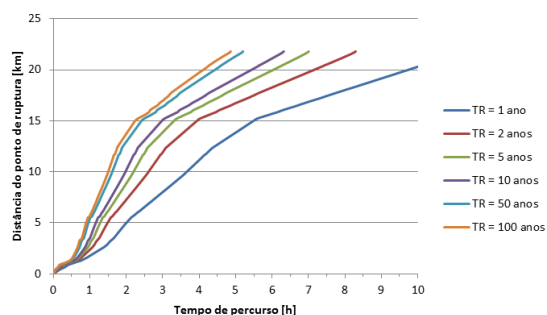


Figura 8 - Propagação de hidrocarbonetos no Rio Piauí

Rio Paraíba do Sul

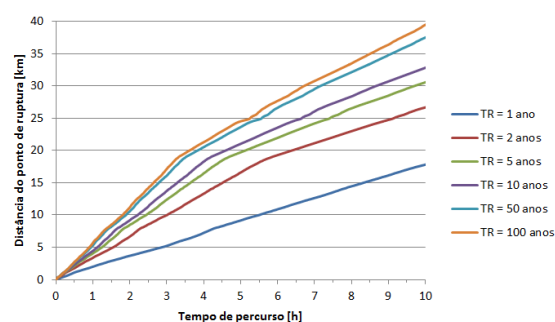


Figura 7 - Propagação de hidrocarbonetos no Rio Paraopeba

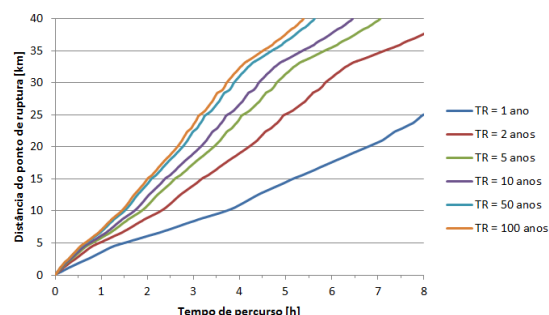


Figura 9 - Propagação de hidrocarbonetos no Rio Preto

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A análise dos resultados obtidos no presente estudo indica que o conhecimento da dinâmica de deslocamento dos fluxos de poluentes em cursos d'água possibilita a minimização dos impactos ao meio ambiente e aos recursos hídricos decorrentes de acidentes com sistemas de dutos.

Utilizando os gráficos de propagação de hidrocarbonetos ao longo das calhas fluviais as tomadas de decisão de ações mitigadoras e corretivas podem ser executadas com maior agilidade e precisão.

As equipes de contenção podem ser direcionadas aos locais exatos aonde o fluxo de contaminantes pode ser interceptado, garantindo o controle da ocorrência com maior eficácia, possibilitando economia de recursos financeiros e minimização da magnitude dos impactos ambientais gerados.

As incertezas dos resultados dos estudos elaborados são relevantes e devem ser apresentadas para que se tenha o devido cuidado na interpretação e utilização dos gráficos apresentados. Tais incertezas estão divididas entre quatro fatores principais: informações topográficas utilizadas, dados hidrológicos utilizados, estimativa do coeficiente de Manning para os cursos d'água e fluido considerado nas simulações.

No que diz respeito à base topográfica, as incertezas partem do MDE SRTM utilizado, que possui resolução de 90 metros (fruto da amostragem em pixels de 90 metros com a elevação média de 9 células de 30 por 30 metros, gerando um MDE suavizado do terreno)

para áreas fora dos Estados Unidos. Esta suavização do terreno faz com que as diferenças altimétricas sejam menores que as realmente existentes no terreno natural e acabam por gerar selas topográficas falsas em regiões baixas de planícies fluviais, em secções onde a topografia é mais encaixada, formando uma série de depressões ao longo das calhas fluviais do modelo.

Conforme discutido anteriormente, foram realizadas alterações do SRTM a partir do traçado de perfis verticais de referência sobre a superfície SRTM, interligando os pontos baixos representativas dos fundos das depressões visualizadas em planta, para, a partir dele, extrapolar a seção topobatimétrica representativa de cada calha fluvial. Este processo implica na inserção de incertezas no projeto, pois como o projeto atual não prevê levantamentos topográficos e batimétricos, a base topográfica final é resultado da fusão de cenas SRTM com informações de secções geradas manualmente e corrigidas planimetricamente a partir de imagens de satélite.

Outra parcela das incertezas provém dos dados hidrológicos utilizados, que foram obtidos no Hidroweb/ANA. Estes dados foram transpostos de outras secções de medição para os pontos de interesse. Como este estudo não contempla a execução de campanhas de medição de vazões nos pontos de interesse não foi realizada a aferição dos dados fluviométricos calculados. Outro ponto importante é que as vazões simuladas foram somente aquelas transpostas para os pontos de fragilidade estudados, acrescidas das vazões máximas vazadas do oleoduto, sem considerar acréscimo de vazão ao longo dos trechos fluviais, inclusive desconsiderando outros trechos fluviais afluentes aos cursos d'água.

A terceira parcela das incertezas presentes no processo se deve ao desconhecimento da geometria das secções topobatimétricas dos cursos d'água estudados, não considerando planícies de inundação e zonas de remanso, bem como o desconhecimento das características das coberturas vegetais marginais existentes (ou não), o que influencia nos coeficientes de Manning utilizados nas simulações. Além disso, conforme discutido no Capítulo III, como o MDT foi elaborado de modo a evitar extravasamentos de calha para as vazões simuladas, não foi considerado o efeito do atrito da emulsão água-óleo com a vegetação marginal e com as zonas de alagamento naturais das planícies fluviais nos trechos, o que faz com que os resultados sejam mais críticos. Estas incertezas também decorrem da falta de dados primários de topobatimetria para execução dos estudos.

Por fim, a última parcela das incertezas refere-se ao fato das simulações terem sido executadas considerando como fluido apenas a água, sem considerar os efeitos da mistura/dispersão de óleo no meio aquoso, o que também confere resultados mais seguros, uma vez que a água possui viscosidade cinemática inferior a do óleo, o que lhe garante menores fatores de atrito com as superfícies molhadas e, conseqüentemente, maiores velocidades de deslocamento, fazendo com que as ondas simuladas percorram extensões maiores que aquelas possivelmente percorridas por emulsões de óleos em meio aquoso.

Para a aplicação real da metodologia proposta é necessário promover melhorias no processo ora apresentado, de forma a minimizar suas incertezas, das quais pode-se citar:

- Utilização de informações reais de topografia e topobatimetria dos trechos fluviais a analisar;
- Elaboração de estudos de caracterização florestal e de vegetação marginal com foco na determinação adequada dos coeficientes de rugosidade das superfícies das diferentes calhas fluviais;

- Implantação de uma rede de estações limnimétricas telemétricas para a obtenção de dados instantâneos ou diários de níveis d'água nos corpos hídricos simulados;
- Execução da análise para todos os pontos de transposição de córregos, rios e demais corpos hídricos;
- Inclusão de pontos de fragilidade existentes fora de corpos hídricos à análise;
- Calibração do modelo com base em testes de dispersão de traçadores em cursos hídricos naturais.

Todavia, os resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia proposta apresentam coerência com os resultados esperados para o estudo, pois foi possível estabelecer correlações entre os tempos de percurso, as ordens de grandeza das vazões e as distâncias percorridas pelos poluentes, apesar das diversas incertezas presentes nos procedimentos realizados, conforme comentado anteriormente.

Em síntese, com a implementação das melhorias propostas, o método apresentado pode fornecer resultados confiáveis, exatos e extremamente valiosos para a minimização dos impactos ambientais, redução dos custos operacionais da estrutura de contenção de acidentes e para melhoria da segurança do sistema, além de contribuir para o marketing ecológico da companhia que resolver adotar tal metodologia.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

a. Livro

Mello Porto, R. Hidráulica Básica. 2ª edição—Publicação EESC USP-Projeto Reenge. São Carlos, SP. 519f, 2001.

b. Artigo em actas de congresso (ou equiparado)

Grohmann, C.H.; Riccomini, C.; Steiner, S.S. 2008. Aplicações dos modelos de elevação SRTM em geomorfologia. Revista Geográfica Acadêmica, v.2 n.2, p.73-83

Gogoase-Nistoran, D.E.; Popescu, D.M. E Panaitescu, V. Use of hydraulic modeling for river oil spills. 1. Travel time computation for quick response. Scientific Bulletin, series D, v. 70, n. 4, 2008.

Tomaz, P. Cálculos Hidrológicos e Hidráulicos. Acessado em: 17/02/2014. Disponível em: < http://www.pliniotomaz.com.br/livros_digitais.shtml>

U.S.A.C.E. HEC-RAS River Analysis System. Version 4.1.0. Hydrologic Engineering Center Davis CA, 2010.

c. Teses ou dissertações

Fragoso júnior, c.r; tucci, c. E. M. *Estimativa da vazão máxima instantânea de projeto através de um modelo matemático*. Porto Alegre. Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

d. Sítios na Internet

Hidroweb - ANA - Sistema de Informações Hidrológicas. Disponível em <<http://hidroweb.ana.gov.br/>>.

Global Mapper tm. Versão 11.0 – Copyright 2002 – 2009. Disponível em: <www.globalmapper.com>. 2009.