Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro de Tecnologia e Ciências
Faculdade de Geologia

Ingrid Ferreira Lima

O fluxo de massa doVieira, Teresópolis-RJ, megadesastre da Serra em 2011: análise das feições sedimentológicas e de sua fenomenologia

Rio de Janeiro
2013

Ingrid Ferreira Lima

O fluxo de massa doVieira, Teresópolis-RJ, megadesastre da Serra em 2011: análise das feições sedimentológicas e de sua fenomenologia

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Geologia, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Análise de Bacias.

Orientador : Prof. Dr. Sérgio Bergamaschi

Rio de Janeiro

2013

Ingrid Ferreira Lima

O fluxo de massa doVieira, Teresópolis-RJ, megadesastre da Serra em 2011: análise das feições sedimentológicas e de sua fenomenologia

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Geologia, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Análise de Bacias.

Aprovada em 20 de março de 2013.

Banca Examinadora

_____

Prof. Dr. Sérgio Bergamacshi (Orientador)

Faculdade de Geologia -UERJ

_____

Claudio Palmeiro do Amaral

Faculdade de Geologia – UERJ

_____

Eurípedes do Amaral Vargas Júnior

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio

Rio de Janeiro

2013

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, o Professor Doutor Sergio Bergamacshi, pela dedicação na orientação do trabalho e por aceitar o desafio.

Ao mestre amigo Professor Doutor Claudio Amaral pela confiança e apoio que me permitiram desenvolver este trabalho com liberdade para aventurar, mas, também, pelo prazer de ter sido orientada com notável conhecimento.

À Faculdade de Geologia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Ao DRM-RJ - Serviço Geológico do Estado do Rio de Janeiro - pelo apoio institucional e pela logística necessária para execução desta dissertação, em especial ao motorista Aldemir C. Rocha “Ping-Pong” e motorista Eckner Junior.

Aos integrantes do grupo de Pesquisa PRONEX PUC-Rio pelos dados gentilmente fornecidos.

Aos moradores do bairro Vieira, Vale de Bonsucesso, Teresópolis. Exemplo de simplicidade e resiliência.

Aos amigos do Mestrado da Faculdade de Geologia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Adoro vocês.

À minha querida e amada mãe, Giselda Medrado Ferreira Lima, pela paciência e carinho; muito obrigada por tudo. Amo você.

E àqueles que, de alguma forma, contribuíram para a elaboração deste trabalho, em especial aos amigos: Bruno Carvalho, Bárbara Gonçalves, Carol Dutra, Ingrid Seifert, Juliana Rodrigues, Felipe Leite, Marcela Lobato, Pati Toledo e Tatiana Maia pelo ajuda e os momentos de alegria.

capacidade de identificar e perceber
precisamente as causas, as relações e as implicações
dos problemas, dos conflitos
e das adversidades presentes no ambiente

autor desconhecido

RESUMO

LIMA, Ingrid Ferreira. *O fluxo de massa doVieira, Teresópolis-RJ, megadesastre da Serra em 2011: análise das feições sedimentológicas e de sua fenomenologia* . 2013. 96 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

Em janeiro de 2011, o grande número de escorregamentos naturais e induzidos que afetaram a Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro, durante o Megadesastre, são processos destruidores de grande impacto, mas com tempo de recorrência maior. Em particular a bacia do rio Vieira (noroeste de Teresópolis), afetada pelo evento, apresentou magnitude espetacular do desastre registrado, com os materiais mobilizados em fluxos gravitacionais de massa atingindo quilômetros de distâncias das suas escarpas principais, o que causou, horas depois, prejuízos significativos. A pesquisa da presente dissertação discutiu a caracterização destes processos e dos ambientes deposicionais, a partir da análise das feições sedimentológicas e apreciação das características mecânicas, do vale do rio Vieira para estabelecer base de conhecimento da evolução da paisagem local. O método de trabalho utilizou o reconhecimento dos condicionantes geológicos e a leitura do registro sedimentar. A corrida de massa do Vieira foi zoneada em diferentes estágios de comportamento baseado na classificação de fluxos gravitacionais de massa de Middleton e Hampton (1973). Esta classificação é adequada para linha de pesquisa, pois os autores definem fluxos gravitacionais de sedimentos como um termo geral para fluxos de sedimentos ou misturas sedimentos/fluidos, que fluem sob a ação da gravidade. Os resultados obtidos caracterizam o fenômeno do ponto de vista geológico, estratigráfico e geomorfológico. Uma corrida de massa afetou o canal do rio Vieira desde a sua nascente, na cota 1750m, até o fim da sua planície de inundação, na cota 900m; o movimento de massa com extensão de 7,5km, 30-100m de largura máxima e 4m de espessura média, causou diretamente 86 mortes e a destruição de casas e lavouras da zona rural do bairro Vieira, Teresópolis-RJ. O fluxo gravitacional do Vieira aparentemente contou com diferentes condicionantes e envolveu diferentes fases, passando pelo *debrisflow* e pelo *mudflow*, provavelmente em diferentes pulsos, e no seu estágio final para o *waterflow*.

Palavras-chave*:* Fluxos de Massa. Vieira.Teresópolis.

ABSTRACT

LIMA, Ingrid Ferreira. The mass flow of Vieira, Teresópolis, RJ, “megadesastre” in 2011: analysis of phenomenology and sedimentological features. 2013. 96 f. Dissertation (MSc in Geology) - Faculty of Geology, State University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

In January 2011, a large number of natural and induced landslides hit the mountainous region of Rio de Janeiro State, during the “megadesastre”, which is destructive processes of great impact, but with greater recurrencetime. In particular, the Vieira River basin (northwest of Teresópolis), affected by the event, registered a big magnitude of the disaster with mobilized materials in mass flows reaching distances of kilometers from their main scarps, what caused hours later, significant damages. This dissertation research discussed these processes characterization and its depositional environments, from a sedimentological analysis of those features and assessing their mechanical characteristics of Vieira river valley to establish the knowledge of local landscape evolution. The results characterize the phenomenon in geological, geomorphological and stratigraphicterms. Vieira river channel was afcted by a gravity flow from its source, at 1750m in elevation, to its end on its floodplain, at elevation 900m, was carachterized as a mass movement with an extension of 7.5 km, 30-100m wide and 4m thick, directly caused 86 deaths and alsohouses and crops destruction at rural neighborhood from Vieira, Teresópolis, Rio de Janeiro. The gravity flow of Vieira River apparently had different conditions and different stages involved, from debrisflow to mud-flow, probably in different pulses, and in its final stage being water flow.

Keywords: Mass Flow. Vieira. Teresópolis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Localização da área de estudo; Estado do Rio de Janeiro, com destaque para o município de Teresópolis; Município de Teresópolis com destaque para Bacia Hidrográfica do Rio Vieira..... 17

Figura 2 - Fácies turbidíticas de Mutti et al. (1999) e processos relacionados..... 20

Figura 3 - Gradiente ou inclinação da encosta e movimentação do fluxo..... 23

Figura 4 - Taxonomia de uma corrida de massa..... 26

Figura 5 - Entrada das massas de ar provenientes da ZCAS (Zona de Convergência do Atlântico Sul), direção NNW, na região serrana do Estado do Rio de Janeiro. Fonte: DRM..... 54

Tabela 1 Precipitação no dia 12 de Janeiro de 2011 na Estação Sítio Santa Paula. Fonte: INEA..... 55

Tabela 2 Associações de fácies estabelecidas para os depósitos recentes e atuais da corrida de massa do rio Vieira..... 61

Figura 6 - Área antes do evento do fluxo gravitacional do Vieira, imagem Google Earth, 26 de novembro de 2006 (destaque para Perfil A-B)..... 65

Figura 7 - Área pós-evento do fluxo gravitacional do Vieira, imagem Geoeye-1, 19 de janeiro de 2011 (destaque para Perfil A-B)..... 65

Figura 8 - Perfil transversal composto por fácies C3 cascalhos suportados por matriz arenosa, com blocos rochosos e matacões com volume variando de 5 a 10m3 – topo - e fácies Am material mais fino (e diluído) na base. Verifica-se um arredondamento das arestas dos blocos entre os quais se acumula solo granular e matéria orgânica. O depósito apresenta inclinação de 60°, largura do canal 17,56m e a litologia predominante dos blocos rochosos é granito mesocrático..... 66

LISTA DE FOTOS

Foto 1 –	Vista de fluxo hipercentrado no Vale do Príncipe, Teresópolis, mobilizando depósitos pretéritos, com velocidades médias a altas, com grandes volumes e alta capacidade de destruição, englobando os depósitos de sedimentos e blocos rochosos. Fonte: DRM.....	13
Foto 2 -	Zona agrícola de Vieira (Teresópolis), foto de 08 de novembro de 2007. Fonte Prof. Nelson Fernandes.....	17
Foto 3 –	Depósitos expostos na margem direita do *Canyon Creek,* nítidas descontinuidades. Fonte Prof M. Jakob.....	29
Foto 4 –	Sobrevoo de helicóptero realizado na cidade de Teresópolis com apoio do DRM.....	35
Foto 5 –	Vista da área deposicional da frente do fluxo gravitacional do Vieira.....	36
Foto 6 –	Cabeceira de drenagem do rio Vieira, poucos deslizamentos a montante. Fonte: DRM.....	40
Foto 7 –	"Barramento natural"; zona de acúmulos de influxos de sedimentos oriundos de antigos depósitos.....	40
Foto 8 -	Visada do campo de futebol antes do fluxos de detritos.....	41
Foto 9 –	Visada do campo de futebol após o fluxo de detritos (mar de blocos), frente de fluxo gravitacional. Fonte: Sra. Maria de Jesus.....	41
Foto 10 –	Bloco rochoso, com diâmetro superior a 2m, exumado.....	41
Foto 11 –	No primeiro plano bloco rochoso transportado e ao fundo blocos rochosos, de grande diâmetro, exumados, indicado pela seta.....	41
Foto 12 –	Tributário à direita (leste) contribuindo com influxo de água e finos. Fonte: DRM.....	42
Foto 13 –	"Mar" de blocos rochosos e matacões exumados, largura do canal neste trecho 132m.....	42
Foto 14 –	Zona de deposição de material fino e água, importante *knickpoint* a jusante. Fonte: DRM.....	42
Foto 15 –	Zona de deposição: altura da lâmina d'água neste trecho 3m.....	43
Foto 16 –	Deslizamentos translacionais, alcançando o eixo de canais tributários, a montante do barramento principal, na localidade da fazenda Paquequer. Fonte: Sr. Rafael Correa de Melo.....	47
Foto 17 –	Registro sedimentar observado no principal alvéolo de deposição, próximo ao Haras do Vale da Boa Esperança, Itaipava, Petrópolis-RJ, notar que há três superfícies de discordância.Fonte: Sr. Rafael Correa de Melo.....	47
Fotos 18 e 19 –	Vista geral e de detalhe do canal do rio Santo Antonio após a corrida de massa: presença de blocos rochosos exumados pelo fluxo viscoso e características dos materiais que compuseram a massa deslocada.....	48
Foto 20 –	Vista de detalhe do canal do rio Príncipe após a corrida.....	48

Foto 21 – Corrida de massa no Corrego D'Antas, Nova Friburgo..... 48
Foto 22 – Biotita gnaisse típico da área mapeada..... 49
Foto 23 – Biotita gnaisse cortado por veio quartzo feldspático (espessura decimétrica)..... 50
Foto 24 – Dique de direção NE cortando unidade gnaisse alto da cabeceira do rio Vieira..... 51
Foto 25 – Alto do grande "barramento natural", cota 1450m, canyon altamente fraturado (espaçamento centimétrico)..... 52
Foto 26 – Próximo à cabeceira os "*Knickpoints*" são zona de acúmulo de sedimentos..... 53
Foto 27 – Corte em maciço rochoso bastante fraturado condicionando a direção do canal de drenagem..... 53
Foto 28 – Vale não confinado e o canal passa assumir caráter meandrante. Fonte: DRM..... 53
Foto 29 – Cascalhos métricos e areias médias a grossas desorganizadas..... 58
Foto 30 – Grânulos e seixos com matriz arenosa..... 59
Foto 31 – Cascalhos (arredondados) suportados por matriz silto-arenosa..... 59
Foto 32 – Composto por silte e argila, e grãos dispersos, podem aparecer com estruturas laminadas (rítmicas); depósito mais distal da corrida de massa em RJ-130, KM 33,5..... 60
Foto 33 – Depósito antigo de corrida de massa com estruturas de granocrescência ascendente (gradação invertida), incremento de fração cascalho em relação ao topo..... 61
Foto 34 – Depósito antigo de corrida de massa; ocorrência de cascalhos em associação com areias media a grossas, depositados por processos de fluxos de detritos..... 62
Foto 35 – Perfil deposicional recente de corrida de massa (evento de 11-12 de janeiro de 2011), geometria de canal, onde predominam fácies de cascalhos, seixos e areias de caráter erosivo, representando a porção mais proximal do sistema (Alto Vieira). Setas de cor amarela indicam a direção dos clastos imbricados..... 62
Foto 36 – Natureza da matriz suportada dos depósitos é característica de eventos com elevada concentração de sedimentos. Depósito antigo de corrida, representando porções mais distais do canal..... 63
Foto 37 – Base composta por seixos arredondados a angulosos de tamanho métrico, imersos em matriz arenosa; e topo constituído de areias finas a grossas, maciças de porte métrico. Depósito pretérito de corrida..... 64
Foto 38 – Blocos rochosos e matacões de com marcas de impacto, o que revela o transporte de blocos rochosos..... 64
Foto 39 – Seta verde indica bloco rochoso transportado, segundo informações dos moradores (Srs. Jurandir e Luiz Fernando), por 60 metros de extensão..... 70

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO.....	12
1	**CONHECIMENTO DO PROBLEMA**.....	18
1.1	**Conceito e Classificação dos Fluxos Gravitacionais**.....	22
1.2	**Gênese e Condicionantes para a ocorrência**.....	22
1.2.1	Fator Predisponente 1 – Geomorfologia.....	23
1.2.2	Fator Predisponente 2 - Geologia.....	24
1.2.3	Fatores Imediatos.....	25
1.3	**Estudos sedimentológicos de fluxos gravitacionais**.....	26
1.3.1	Transportes de matacões e suspensão de sólidos.....	27
1.3.2	Deposicao de fluxos gravitacionais.....	27
1.3.3	"*Levees*" e lóbulos.....	28
1.3.4	*"Boulder berms"*.....	28
1.3.5	Evidências sedimentológica.....	29
1.4	**Parâmetros mecânicos associados aos fluxos gravitacionais**.....	30
1.4.1	Concentração de sólidos.....	30
1.4.2	Velocidade do Fluxo.....	30
1.4.3	Volume Mobilizado.....	31
1.4.4.	Força de Impacto.....	31
1.4.5	Mecanismo de Fluxo Sedimentares Gravitacionais.....	33
2	**MATERIAIS E MÉTODOS**.....	33
2.1	**Etapas e Atividades Desenvolvidas**.....	33
2.1.1	Fase de Inventário.....	34
2.1.2	Fase de Expedições de Campo.....	37
2.1.3	Fase de Análise da Fenomenologia.....	38
2.1.4	Fase de Avaliação de Resultados.....	38
3	**RESULTADOS**.....	38
3.1	**O Fluxo Gravitacional do Vieira**.....	43
3.2	**A diferença do Vieira para outros fluxos gravitacionais ocorridos no Megadesastre'11**.....	43

3.2.1 Vale do Cuiabá e Vale do Santo Antônio (Petrópolis)..... 45
3.2.2 Vale do rio Principe (Teresopolis)..... 46
3.2.3 Corrego D'Antas (Nova Friburgo)..... 49
3.3 **Condicionantes geológicas e estruturais**..... 54
3.4 **Fatores Imediatos e Deflagradores**..... 57
3.5 **Estudos sedimentologicos do fluxo gravitacional do Vieira**..... 57
3.6 **Mapeamento sistemático de blocos rochosos na frente do fluxo gravitacional do Vieira**..... 64
4 **DISCUSSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS**..... 66
REFERÊNCIAS..... 71
APÊNDICE A – Mapa geológico de detalhe do Alto Vieira, escala 1:5.000..... 75
APÊNDICE B – Seções Geológicas..... 76
APÊNDICE C – Tabela de Pontos Mapeados..... 88
APÊNDICE D – Mapa da distribuição dos deslizamentos e fluxos gravitacionais na bacia do rio Vieira..... 96

INTRODUÇÃO

Na noite de 11 para 12 de Janeiro de 2011, entre 21h e 07h, a Região Serrana do Rio de Janeiro foi palco da maior catástrofe da história do Brasil, o Megadesastre de 2011 da Serra Fluminense. (RIO DE JANEIRO, 2011).

Diversos escorregamentos, representados por movimentos de massa generalizados em encostas urbanas e rurais, e ao longo de canais de drenagem que cruzam 07 municípios, deflagrados por chuvas extremas vindas do Norte, deixaram 20.000 desabrigados, resultaram R$ 2 bilhões em prejuízos econômicos, e, principalmente causaram 983 mortes – 503 em Friburgo, 358 em Teresópolis, 95 em Petrópolis, 22 em Sumidouro, 04 em São José do Vale do Rio Preto e uma em Bom Jardim (não houve mortos em Areal).

Um mês após a catástrofe, o Núcleo de Análise e Diagnóstico de Escorregamentos do Serviço Geológico do Estado do Rio de Janeiro (NADE/DRM) divulgou em www.drm.rj.gov.br, um Relato do Megadesastre de 2011 da Serra Fluminense. Milhares de movimentos de massa com alto poder de destruição foram descritos no relatório, e associados a mecanismos de ruptura e propagação específicos. Esta associação permitiu a classificação dos movimentos de massa descritos na região de acordo com as suas geometrias, seus materiais mobilizados e suas velocidades de deslocamento.

O primeiro e mais frequente é definido como o deslizamento planar *"na parroca"*, sendo típico da região serrana. Ele se inicia no contato solo/rocha, especificamente no setor de transição da escarpa rochosa para o topo quase plano da encosta, que apresenta condições de saturação da capa de solo e ocorrência de rupturas rasas. O segundo deslizamento mais frequente é também o mais raro, é classificado como translacional. Este tipo é controlado pela subida da poropressão na base dos anfiteatros, e afeta o solo residual jovem que embasa as seções côncavas das encostas suaves. O terceiro mais frequente dos tipos, contudo, é o mais destrutivo. Trata-se dos fluxos gravitacionais de massa (torrenciais, hiper-concentrados ou de detritos), magníficos e destrutivos fluxos viscosos que serpentearam ao longo de vales e drenagens naturais, com raios de alcance da ordem de 10 km ou mais.

Os fluxos gravitacionais de massa têm realmente características e propriedades que aguçam o interesse na pesquisa de suas causas e de suas consequências. Isto se deve não só à variabilidade de sua composição, com diferentes concentrações de sedimentos, por vezes limitada a fluxos puros d'água, com limitada capacidade de destruição, e noutros, como resultado da incorporação de detritos, adquirindo características de fluido muito denso, com alta capacidade de destruição, mas também por modificarem suas características ao longo da sua ocorrência. Fluxos gravitacionais podem incrementar seu volume (dilatação) e depois se depositarem em forma de lóbulos com superfícies irregulares; espalharem-se sobre grandes áreas quando o gradiente da encosta é constante. Além disso, podem ainda mobilizar matacões e grande blocos rochosos dispostos no leito e dos taludes laterais dos canais de drenagem principais, transformando-se em fluxos de detritos, os chamados *debris flows,* Foto 1.

Foto 1 – Vista de fluxo hipercentrado no Vale do Príncipe, Teresópolis, mobilizando depósitos pretéritos, com velocidades médias a altas, com grandes volumes e alta capacidade de destruição, englobando os depósitos de sedimentos e blocos rochosos.

Fonte: DRM

Objetivo

O Megadesastre de 2011 da Região Serrana criou oportunidades excelentes para o estudo dos fluxos gravitacionais de massa. Ao todo foram cerca de 10 destes processos geodinâmicos de grande magnitude, nos quais os efeitos erosivos e deposicionais, acompanhados dos processos de inundação, impressionaram pela escala e dimensão, com alguns deles inclusive exibindo feições de retrabalhamento e mobilização de paleodepósitos. Esta realidade permitia muitos caminhos de pesquisa, dentre as quais, em destaque, o entendimento das relações entre os depósitos atuais e pretéritos e as formas de relevo atuais e no passado recente. Dentro desta perspectiva, são os seguintes os objetivos a serem alcançados neste trabalho:

(1) analisar a fenomenologia de um fluxo gravitacional de massa registrado no Megadesastre de 2011 da Serra Fluminense, sob o ponto de vista geológico, estratigráfico e geomorfológico;

(2) classificar o fluxo gravitacional de massa, descrever as feições sedimentares associadas e fazer considerações sobre o seu mecanismo de propagação, com a definição de zonas de transporte e zonas de deposição;

(3) identificar geometrias deposicionais dos paleodepósitos sedimentares; definir processos sedimentares responsáveis por sua acumulação, a fim de contribuir para a reconstrução da evolução paleogeográfica do Alto Vieira;

(4) estudar os depósitos antigos e atuais para definir as fácies sedimentares presentes; estudar a evolução dos depósitos antigos e dos processos registrados recentemente, criando condições para melhor compreender o que pode acontecer no futuro, associado aos processos catastróficos que assolam episodicamente as encostas montanhosas da região.

Justificativa do tema

Como afirma Mello (1994), toda e qualquer oportunidade de estudo detalhado do breve período Quaternário (e dos depósitos correlatos) deve ser aproveitada e, de preferência, no âmbito de bacias de drenagem, dada a sua importância na modelagem da paisagem.

No caso do Megadesastre de 2011 da Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro, tratou-se de uma interessante oportunidade de estudo destes processos e de caracterização dos seus ambientes deposicionais para conhecimento da evolução da paisagem local, com grande controle de campo. Contudo, as opções para escolha do fluxo gravitacional de massa eram muitas. A escolha acabou recaindo no processo destrutivo de grande impacto do vale do rio Vieira, a noroeste de Teresópolis, primeiro em função da sua extensão, 7.5km, e depois pelo número de mortes associadas – 86.

O interesse da investigação de cunho técnico-científico da área de estudo foi despertado após expedições em diversos setores de encostas e canais de drenagem dos municípios afetados pelo Megadesastre da serra fluminense. A oportunidade de participar de vistorias de campo e sobrevoo de helicóptero, com diferentes especialistas da academia e do poder público, desde o primeiro minuto do pós-Megadesastre, foi essencial para nortear os estudos na região.

Dentre tantas bacias afetadas, porque Vieira? O que mais chamou a atenção foi o espetacular fenômeno catastrófico o qual mobilizou depósitos de movimentos de massa antigos e atingiram quilômetros de distâncias da sua área fonte principal, com danos para pacata comunidade rural do bairro Vieira. Outro ponto importante é o fato da região dispor de grande volume de informação temática, tornando viável a execução do estudo. Para conhecer o desencadeamento do fenômeno catastrófico que afetou a área do Vieira, foi primordial observar as feições e estruturas geradas e encontrar uma explicação de como elas adquiriram essa forma.

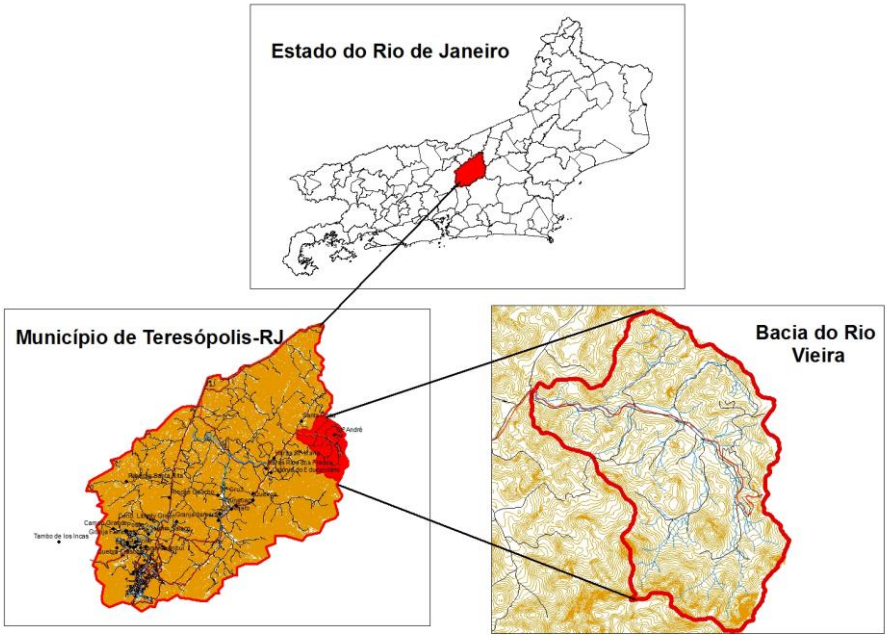
Localização e acesso da área de estudo

O município de Teresópolis apresenta uma área de 849,6km^2 localizando-se na Região Serrana Fluminense e fazendo parte do entorno da Região Metropolitana do Rio de Janeiro. De acordo com o Censo Demográfico de 2010 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o município tem 163.805 habitantes. Limita-se com os municípios de: Cachoeiras de Macacu, Guapimirim, Nova Friburgo, Petrópolis, Sapucaia, São José do Vale do Rio Preto e Sumidouro. A população distribui-se pelos Distritos de Teresópolis – distrito sede; Vale do Bonsucesso e Vale do Paquequer Pequeno. A maior parte da população urbana acha-se concentrada no distrito sede de Teresópolis, representando 96,28%.

Em contrapartida, os distritos do Vale do Bonsucesso e do Vale do Paquequer Pequeno apresentam um contingente populacional predominantemente rural, 71,40% e 84,40%, respectivamente. Nestes desenvolvem-se, em área, predominantemente atividades consideradas como de pecuária extensiva e secundariamente atividades de cultivo, representado principalmente pela produção de hortaliças que se desenvolvem sempre ao longo das bacias de drenagem nas baixas encostas ou terraços e com o uso indiscriminado de agrotóxicos pelos agricultores, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). O distrito Vale do Bonsucesso é o 3º Distrito da cidade de Teresópolis. O distrito é composto por 09 bairros (Venda Nova, Vista Alegre, Frades, Bonsucesso, Motas, Santa Rosa, Vieira, Morro Agudo, Boa Vista). A antiga sede do distrito era Nhuguaçu, a partir de 1990 passou a ser Vale de Bonsucesso. (IBGE, 2010).

A área de estudo localiza-se no bairro de Vieira, pertencente ao 3º Distrito (Vale de Bonsucesso) do município de Teresópolis, entre as coordenadas geográficas de longitudes 42°72’ – 42°77’W e latitudes 22°25’ – 22°30’S, com altitude média de 1700 metros. Vieira está localizado a partir do km 32 da Estrada Teresópolis-Friburgo (RJ-130), logo após o bairro Bonsucesso. O centro da cidade de Teresópolis está situado aproximadamente 50 km a oeste da localidade de Vieira, Figura 1. Vieira encontra-se fisiograficamente em uma área serrana, com encostas de gradiente elevados, estruturadas sobre rochas fraturadas e constituída por rochas em diferentes estágios de alteração. O clima insere-se no domínio tropical e a cobertura vegetal é intensa na mata que bordeja os contrafortes da Serra dos Órgãos e nas partes de topografia mais agressiva no bairro. Nas áreas de baixada e meia encosta, a mata vem sendo sistematicamente destruída, para dar lugar a pastagem e cultura agrícola. O sistema de drenagem encontra-se disposto em vales encaixados com alto poder erosivo, sendo alimentado por altos índices pluviométricos, principalmente nas estações de chuvas (Foto 2).

Figura 1 - Localização da área de estudo; Estado do Rio de Janeiro, com destaque para o município de Teresópolis; Município de Teresópolis com destaque para Bacia Hidrográfica do Rio Vieira



.

Foto 2 - Zona agrícola de Vieira (Teresópolis), foto extraída em 08 de novembro de 2007.

Fonte: Prof. Nelson Fernandes.

1 **CONHECIMENTO DO PROBLEMA**

1.1 **Conceito e Classificação dos Fluxos Gravitacionais**

Os fluxos gravitacionais são misturas de sedimentos e água altamente concentrados comumente compostos por matéria orgânica, solo, rocha e detritos diversos mal selecionados. Os depósitos de fluxos típicos são maciçamente texturizados, mal classificados, verdadeiras misturas de sedimento variando em tamanho de argila para matacões com diâmetro métrico. (COSTA, 1984). Os fluxos gravitacionais são influenciados por muitos fatores, entre os quais: a tectônica da bacia, a dinâmica do rio, a composição do material de origem e a quantidade de precipitação são importantes. Os depósitos são comumente sem gradação, embora alguns exibem gradação normal ou inversa das frações mais grossas. Os produtos detríticos, provenientes dos fluxos, constituem estruturas subsuperficiais da paisagem. O seu estudo fornece dados valiosos no que concerne a interpretação das condições dos sistemas deposicionais atuais e do passado recente. E o estudo dos processos, por sua vez, auxilia a investigação das condições e dos mecanismos que atuaram do modelado das vertentes. Neste capítulo foi realizada uma revisão das diferentes classificações para processos de fluxos gravitacionais realizadas no intuito de caracterizar os fluxos sedimentares gravitacionais:

Middleton e Hampton (1973) introduzem o termo “fluxo gravitacional de sedimentos”. Definem fluxos gravitacionais de sedimentos como um termo geral para fluxos de sedimentos ou misturas sedimentos/fluidos, que fluem sob a ação da gravidade. Os autores dividem os fluxos gravitacionais de sedimentos em quatros tipos principais, de acordo com a natureza do mecanismo de suporte de grãos: (i) corrente de turbidez, nas quais o sedimento é suportado pelo movimento ascendente da turbulência do fluido; (ii) fluxos de sedimentos fluidizados, cujo mecanismo de suporte é o fluxo ascendente de escape de fluidos; (iii) fluxos de grãos (grain flows), nos quais o sedimento é suportado por colisões grão a grão; e (iv) fluxos de detritos (*debris flows*), em que os grãos maiores são suportados pela coesão da matriz, composta por uma mistura de sedimento fino e fluido intersticial. Os fluxos gravitacionais de sedimento foram definidos e classificados de acordo com o mecanismo predominante de suporte dos grãos.

Lowe (1979) apresenta uma classificação de fluxos gravitacionais, baseado na classificação de Middleton e Hampton (1973), segundo o comportamento reológico dos fluxos - fluidos e plástico - e pelo mecanismo de suspensão das partículas sólidas em cinco categorias: (i) corrente de turbidez onde o sedimento é suportado pela turbulência do fluxo; (ii) fluxo fluidizado, sedimento suportado por escape de fluido dos poros; (iii) fluxos liquefeitos, sedimento suportado parcialmente por escape de fluido dos poros; (iv) fluxo de grãos, suportados pela força da matriz; e (v) fluxo de grãos coesivo, cujo o mecanismo de suporte é a coesão da matriz (densidade da matriz). Umas das classificações elementares em considerar aspectos mais reológicos da interação entre a fase sólida e líquida.

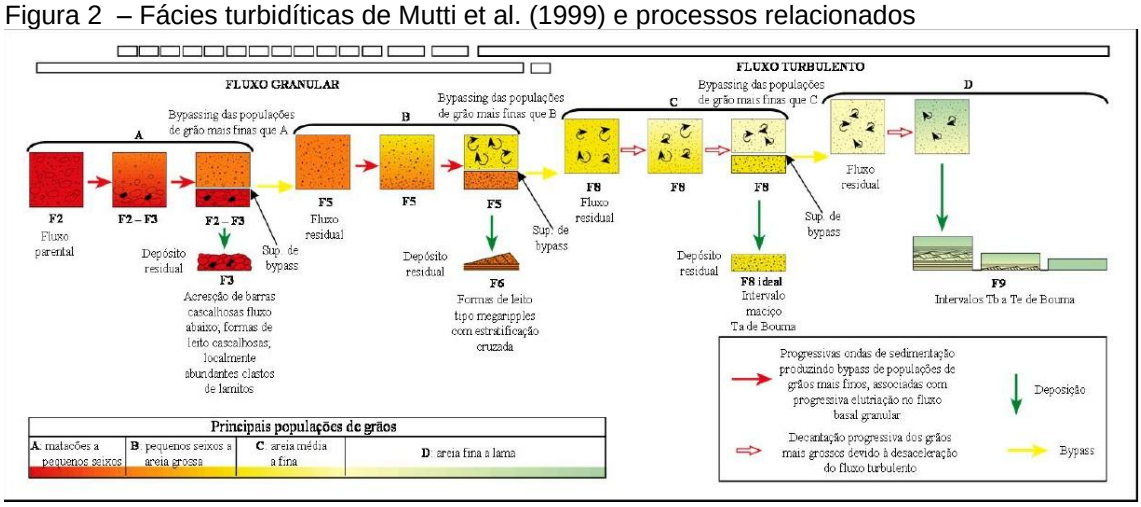
Postma et al. (1986) avaliam que os depósitos de fluxos sedimentares gravitacionais podem ser comparativamente fáceis de classificar de acordo a zona deposição. A classificação pelos autores é baseada na reologia do fluxo durante a deposição de sedimentos, e divide em quatro classes de depósitos: turbidítico, turbidito coeso, depósito de fluxo de detritos menos coesivo, e depósito de fluxo de detritos coeso. O grupo incluindo o fluxo fluidizado, fluxo liquefeito, fluxo de grãos, e fluxo de grãos modificados (o que inclui o fluxo de carpete de tração na base do fluxo turbulento de alta densidade) pode ser descrito aludindo à sua fase deposicional: fluxo de detritos menos coesivo.

Iverson (1997) considera os fluxos gravitacionais como fluxos de detritos formados por misturas de água, finos, rocha e detritos originados nas encostas que correm a jusante em canais naturais e depositados em vales ou zonas abertas de baixa declividade. Outros critérios são: a concentrações de sedimentos, as distribuições de tamanho de grãos e partículas, a velocidade do fluxo, forças de cisalhamento e taxas de cisalhamento. A forte interação entre a fase sólida e fase líquida influencia o comportamento destes fluxos e diferenciam este evento de outros similares como avalanches de rochas e enchentes.

A interação de forças de sólidos e líquidos não só distingue fluxos de detritos fisicamente, mas também lhe dá poder destrutivo único. Como as avalanches de detritos, fluxos de detritos podem ocorrer sem aviso prévio como consequência da ruptura de talude continental ou subaquaso e eles podem exercer grandes cargas impulsivas sobre os materiais que encontram. Como fluxos hidráulicos, fluxos de detritos são fluidos o suficiente para viajar longas distâncias em canais com encostas de gradientes moderados e inundas vastas áreas.

Mutti et al. (1999) apresentam uma proposta de classificação baseada em arcabouço com oito fácies turbidíticas – F2 a F9 – baseado em quatro populações de tamanho de grãos: (i) matacões a seixos pequenos; (ii) seixos pequenos a areia grossa; (iii) areia média a areia fina; e (iv) areia fina a lama. Fluxos de grandes volumes (como grandes escorregamentos) e de longa duração (como fluxos hiperpicnais gerados por inundações catastróficas) serão altamente eficientes, segregando desde fácies F2, mais proximal, até a fácies F9, mais distal, (Figura 2), Della Fávera (2001); Mutti et al. (1996) apresentaram um novo modelo de sistemas deposicionais flúvio-deltaicos, dominados por inundações catastróficas. Na maior parte das ocorrências apresentam depósitos do tipo *Johkulhaupt,* nome de origem finlandesa, resultante de fenômenos ligados ao rompimento de barreiras que represam lagos glaciais. O conceito de inundação catastrófica é pouco uniformitarista porque são raros os exemplos atuais aos quais se poderiam comparar alguns depósitos antigos e eventos interpretados. (MUTTI,1992). Segundo a visão de Mutti (1992) teríamos como principais fluxos gravitacionais: o fluxo detrítico coeso, fluxo hiperconcentrado, corrente de turbidez seixosa de alta densidade e a corrente de turbidez arenosa de alta e de baixa densidades. Isto quer dizer que quando se forma um determinado fluxo e ele passa a correr por uma superfície deposicional, seja um talude, seja o flanco de uma montanha, vai havendo uma evolução progressiva deste fluxo, com sucessivas transformações. Cada uma dessas etapas será representada por uma determinada fácies ou associações de fácies.

Figura 2 – Fácies turbidíticas de Mutti et al. (1999) e processos relacionados



Hungr et al. (2001) propuseram 4 principais definições para fluxos gravitacionais de massas baseado nos critérios de granulometria e velocidades: (i) fluxo de detrito (*debris flow*) movimento muito rápido a extremamente rápido de detritos não plástico saturado em um canal íngreme. O processo de formação de ondas, condicionada pela presença de um canal, dar ao fluxo mobilidade e caráter destrutivo. Uma concentração de fragmentos grossos na parte frontal da onda, seguido por detritos cada vez mais finos e diluído. As propriedades físicas do material que forma a onda são heterogêneas e a velocidade dos pulsos é determinada pela composição e teor da água do material de onda no pico; (ii) fluxo de Lama *(mud flow*), movimento rápido a extremamente rápido de lama e/ou detritos saturados em um canal, com alto teor de água e alta plasticidade, IP >5%; (iii) inundação de detritos (*debris flood*) movimento muito rápido, com grandes quantidades de detritos ; e (iv) avalanche de detritos (*debris avalanche*) movimento muito a extremamente rápido de material superficial, parcial ou totalmente saturado, sem confinamento em canal.

Assim surge o conceito de mistura de sedimentos hiperconcentrados ou fluxo hiperconcentrado para descrever aqueles fenômenos regidos por uma reologia determinada pela interação de partes sólidas e líquidas em movimento. Um fluxo hiperconcentrado é um fluido em movimento que transporta uma alta porcentagem de material sólido. Dita mistura é chamada de fluxo bifásico. Mas o problema é que nem sempre pode-se considerar as mistura como em bi-fase ou fases separadas. (ALVARADO, 2002). Os problemas surgem na tentativa de definir o fluxo de hiperconcentrado. No fluxo de água, as mecânicas de fluidos são dominadas por forças de fluidos viscosos que atuam sobre os limites dos canais individuais e em grãos de sedimento em suspensão que têm pouca interação significativa entre si. No fluxo de detritos e lama, a mecânica de fluxo envolvem complexas combinações de interações de partículas físicas (atrito e transferência momentânea entre partículas grossas) e interações de partículas eletroquímicas (dupla camada e ligações de Van der Waals entre as partículas finas), interações físicas entre a carga de sedimentos e o leito, mas variando as interações entre os grãos de sedimento e do fluido. (COUSSOT E PIAU, 1994; COUSSOT, 1995; IVERSON, 1997).

Beverage e Culbertson (1964) foram os primeiros autores apresentarem o termo “fluido hiperconcentrado” para descrever a mistura água/sedimentos que compõem o fluxo de detritos. Os critérios mais utilizados na análise destes autores são concentração de sólidos e porcentagem de água (corrente, corrente densa, fluxo de corrente hiperconcentrado e fluxo de lama). O termo fluxo hiperconcentrado é mais frequentemente aplicado aos fluxos intermediários regidos pelas fases sólidas e fases líquidas em movimento, embora cheias de detritos e inundações de lama também podem ser usado. Inundação detritos e cheias de lama são de magnitude extrema, de sedimentos ricos em eventos de fluxo, que podem ou não envolver os mecanismos físicos característicos dos fluxos hiperconcentrados.

1.2 **Gênese e Condicionantes para a ocorrência**

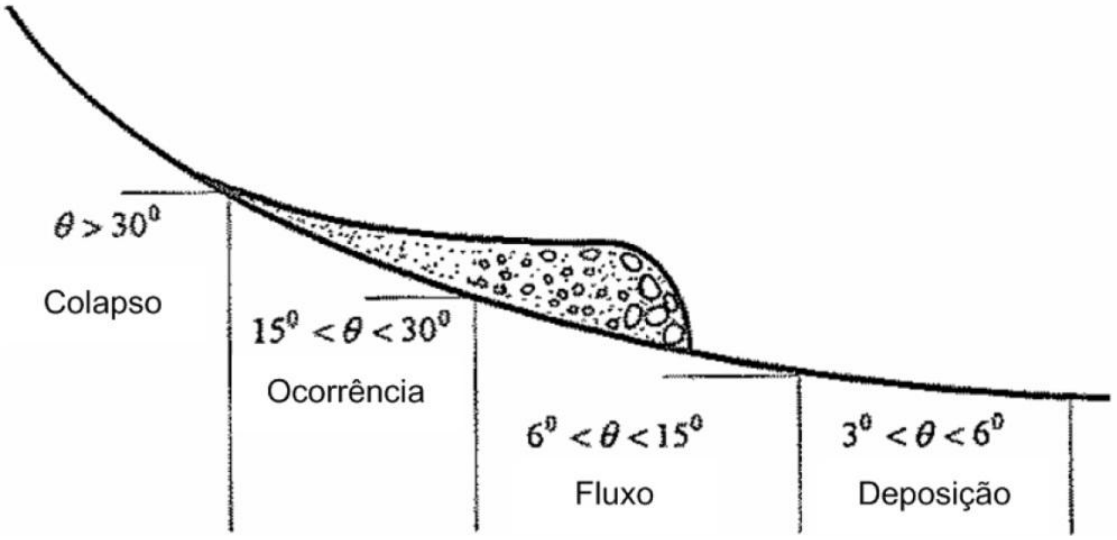
A geração de um fluxo gravitacional está geralmente associada com numerosos e simultâneos deslizamentos que trazem material para o leito, o qual é temporariamente represado. É uma observação frequente que neste período o rio diminui de até mesmo cessar. Quando a barragem temporária é rompida, a massa de água retida é libertada bruscamente, transportando os materiais sólidos acumulados e removido do leito. A massa transportada viaja com alta velocidade e descargas de pico. É importante reconhecer as condições que provocam um fluxo gravitacional, principalmente, a fim de prever quando um evento pode ocorrer, para tomar medidas preventivas ou de mitigação. (KANJI ET AL., 2003). A bibliografia nacional, neste item, parece mais didática. Baseado em Kanji et al. (1997; 2001), serão descritos os principais fatores para a formação de fluxos de detritos:

1.2.1 <u>Fator predisponente 1 - Geomorfologia</u>

Umas das condições principais para a ocorrência de fluxos de gravitacionais é a existência de declives elevados, o que explica por que eles ocorrem geralmente em regiões montanhosas. Quanto maior for o ângulo, maior é a probabilidade de ocorrência, desde que outras condições também estejam presentes (Figura 3). Baseado em Massad et al. (2000), em termo de inclinação media: os ângulos de inclinação mínimos geralmente mencionados na literatura estão acima de 20° a 25°.

A zona de ocorrência costuma ter gradientes maiores do que 25°, mas tem-se reportado até gradientes de 15°. Por outro lado, gradiente maiores o material não se acumula de forma que não existe o fluxo. As outras zonas se apresentam em gradiente maiores do que 10°. Durante o transporte deve ter confinação suficiente para manter a velocidade caso contrário não existe fluxo gravitacionais de massa. Ainda que aos 15° começa o depósito das bordas externas da massa e as línguas do material de deposição aparecem após dos 10° quando o gradiente e confinamento são quase nulos. O ângulo de inclinação mínima requerida para o seu início está aproximadamente acima de 25 graus, mas maior a área da bacia menor é esse ângulo.

Figura 3 - Gradiente ou inclinação da encosta e movimentação do fluxo



1.2.2 Fator Predisponente 2 - Geologia

Nas descrições dos fluxos gravitacionais apresentados na literatura uma grande variedade de configurações geológicas é mencionada. Quatro fatores geológicos são de grande importância: (a) colapso do material geológico, que pode ser removidos ou deslocados para contribuir para a formação de fluxos gravitacionais; (b) saturação do material; (c) uma definição geológica que promove encostas íngremes; e (d) potencial para converter energia gravitacional em energia cinética interna para passar da simples ruptura por cisalhamento do material a um estado de deformação mais difusa reconhecida como fluxo.

A precipitação é o principal fator desencadeador de fluxos gravitacionais e, por esta razão, a determinação de intensidade de chuva crítica é uma questão de interesse. No Brasil, se apresentam frequentemente em solos residuais ou maciços rochosos altamente fraturados durante vários dias de chuvas contínuas. Os fluxos gravitacionais podem ocorrer em praticamente qualquer configuração geológica, proporcionando cobertura do solo ou depósito mobilizado ou depósito remobilizado, juntamente com as demais condições exigidas.

1.2.3 Fatores imediatos

Em diversos casos descritos na literatura, os fluxos gravitacionais ocorrem apenas sob chuvas de alta intensidade. De acordo com Tianchi e Minghua (1985) as diferentes intensidades, durações e precipitações, além da topografia da área, estruturas geológicas dos taludes, permeabilidade das rochas e depósitos não consolidados são responsáveis pela diversidade de magnitude apresentados nos mais variados casos mundiais. Há controvérsias na definição do tipo de chuva que favorece o desenvolvimento das corridas de detritos: longa duração e pequena intensidade ou curta duração e grande intensidade horária. Ikeya (1976) classificou fluxos gravitacionais em função das chuvas em 3 níveis: Tipo I – ocorre logo após uma chuva súbita (quando a precipitação horária é de 50 a 80mm, para “chuvas consecutivas” de 100 a 300mm); Tipo III – ocorrem após chuva prolongada (20 a 30 horas), sujeito a “chuvas consecutivas” ; e o do Tipo II – intermediários para o Tipo I e Tipo III. No que diz respeito às chuvas de alta intensidade, o valor limiar é geralmente definido em mm/min (ou menos), durante vários minutos, no entanto, é necessária uma precipitação de menor intensidade, durante alguns dias no período que precede a chuva mais intensa. Os deslizamentos de terra podem ocorrer em condições de tempo mais prolongado de chuva; seu grau catastrófico é maior quanto maior a precipitação acumulada (por exemplo, períodos de maior retorno). É necessário estudar melhor fluxos gravitacionais para determinar com mais precisão as leis de seu comportamento, principalmente por meio da investigação do local de ocorrência, monitoramento e laboratório.

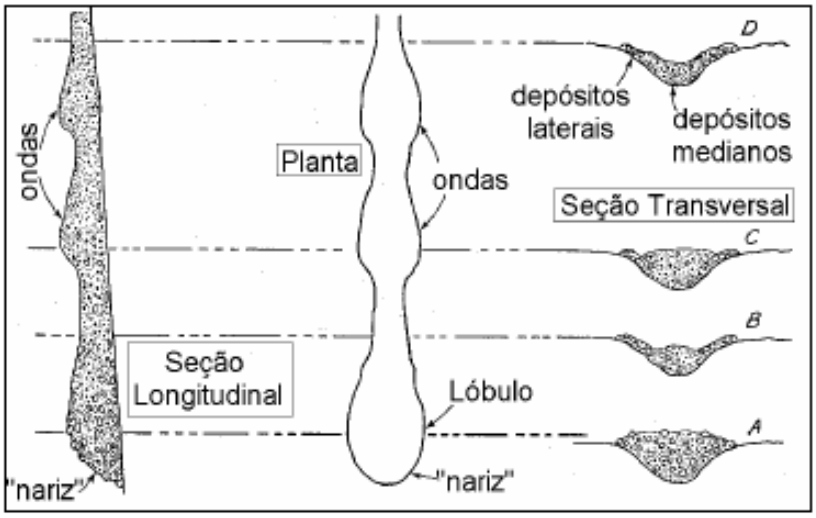
1.3 **Estudos sedimentológicos de fluxos gravitacionais**

O processo de transporte e deposição dos fluxos gravitacionais é responsável pela formação de estruturas sedimentares distintas e bastante particulares, quando enchentes com sedimentos em suspensão. Fluxos de detritos que ocorrem em pequenos canais de drenagem em regiões montanhosas têm sido confundidos com enchentes em algumas porções do mundo. Algumas feições típicas dos fluxos de detritos e lama são utilizadas para diferenciar os dois tipos de processos.

As evidências baseiam-se em dados sedimentológicos, correspondendo os dados de granulometria, forma dos depósitos, sistema de transporte, selecionamento das partículas, presença de depósitos não estratificados e a composição da matriz dos depósitos. (COSTA E JARRET, 1981). Nos fluxos de detritos, os sedimentos são depositados em conjunto, mantendo a disposição de todas as partículas e a distribuição granulométrica. Os materiais de diferentes granulometrias que compõem as corridas são depositados simultaneamente, como se fosse “congelados”. (FISHER, 1971). Essa deposição é diferente do que ocorre em transportes em meios aquosos, onde há uma seleção granulométrica durante o fluxo, ocorrendo uma deposição parcial dos grãos, isto é, seleção granulométrica.

Johnson (1970) representa, de maneira esquemática, algumas feições gerais dos fluxos gravitacionais e seus respectivos depósitos, em planta e perfil, mostrando como os materiais são transportados e depositados ao longo da drenagem pela passagem do fluxo, em seção transversal. A observação da figura 04 mostra que os fluxos seguem preferencialmente canais de drenagem, movimentando-se na forma de ondas e pulsos. No perfil se observam as diferentes fácies sedimentares (predominantemente de granulometria grossa na porção frontal do primeiro pulso). Em planta, nota-se que as frentes de ondas são mais largas e provavelmente responsáveis pela maior erosão dos materiais localizados no fundo e nas margens dos canais. Na seção transversal, tem-se a evolução da massa dentro de um determinado canal, onde a frente de onda é mais alta e composta de material mais grosso. À medida que o fluxo avança, novas ondas de menores dimensões se formam, com granulometrias mais finas.

Figura 4 – Taxonomia de uma corrida de massa



Portanto, as observações de grandes blocos de rocha “flutuando” numa matriz constituída de partículas finas, com certo imbricamento e má seleção dos grãos, representam típicos depósitos de corrida de detritos. Estes depósitos são classificados como matriz-sustentados, não ocorrendo contato entre os matacões. A gradação granulométrica invertida é um dos aspectos a ressaltar nos depósitos de corridas. Os mecanismos atuantes no transporte (pressão de dispersão devido aos entre choques de partículas) contribuem para que as partículas de maiores diâmetros migrem para as porções superiores e laterais de massa (porções desconfinadas), gerando uma gradação invertida de partículas. (FISHER, 1971).

1.3.1 Transportes de matacões e suspensão de sólidos

Muitos autores têm relatado o transporte de grandes blocos de rochas, alguns com vários metros de diâmetro, por fluxos gravitacionais. Essas pedras parecem "flutuar" ou fracamente cair ao longo do fluxo de detritos e são encontrados mais tarde em superfícies de fãs ou em canais com inclinações muito rasa, com o apoio e cercada por destroços e material fino.

Estes isolados, partículas grossas tendem a afundar no fluxo devido à gravidade, mas permanecem apoiadas na matriz de granulação fina. Cinco mecanismos foram sugeridos: a coesão; flutuabilidade; pressões dispersivas; turbulência, e apoio estrutural. Todos os cinco mecanismos podem operar com maior

ou menor grau, durante os fluxos gravitacionais, mas só a força coesiva, flutuação, e um suporte estrutural podem agir de forma estática. (COSTA, 1984).

1.3.2 Deposição de fluxos gravitacionais

Embora excepcionalmente fluxos de detritos e fluxos hidráulicos podem fluir por muitos quilômetros além de suas áreas de origem, fluxos viscosos param ao atingir um gradiente relativamente baixo ou em áreas de confinamento diminuem como leques aluviais na foz de pequenas bacias e canyons. A proporção de depósitos de fluxos de detritos e depósitos de fluxos de água podem variar na vertical. O mecanismo exato pelo qual os fluxos de detritos interrompe o fluxo é incerto. Espalhamento lateral pode permitir que a espessura do fluxo diminua; a extensão da área de depósitos de fluxos de detritos é controlada pelo volume, intensidade dos fluxos, e pela a inclinação da superfície. (COSTA, 1984).

1.3.3 *"Levees"* e lóbulos

Os "*levees*" (ou diques) são feições típicas da passagem de uma corrente viscosa e são caracterizados por cordões laterais de sedimentos, mal graduados e que margeiam a passagem do fluxo central. Esses cordões são originados pela ação de choque entre partículas e com o fundo do leito, provocando a migração dos materiais para as superfícies livres. Caracterizam-se ainda por serem contínuos ao longo dos canais de drenagem, por vezes atingindo algumas dezenas de metros de extensão. Comumente nesses depósitos laterais encontramos grandes blocos de rocha dispersos numa matriz fina. Quando o fluxo de detritos para, a resistência do material, ou as concentrações de clastos grossos nas margens do fluxo permite a formação de frentes e lados íngremes, criando lóbulos terminais de espessura finita num plano inclinado. (COSTA, 1984; SHARPE, 1942).

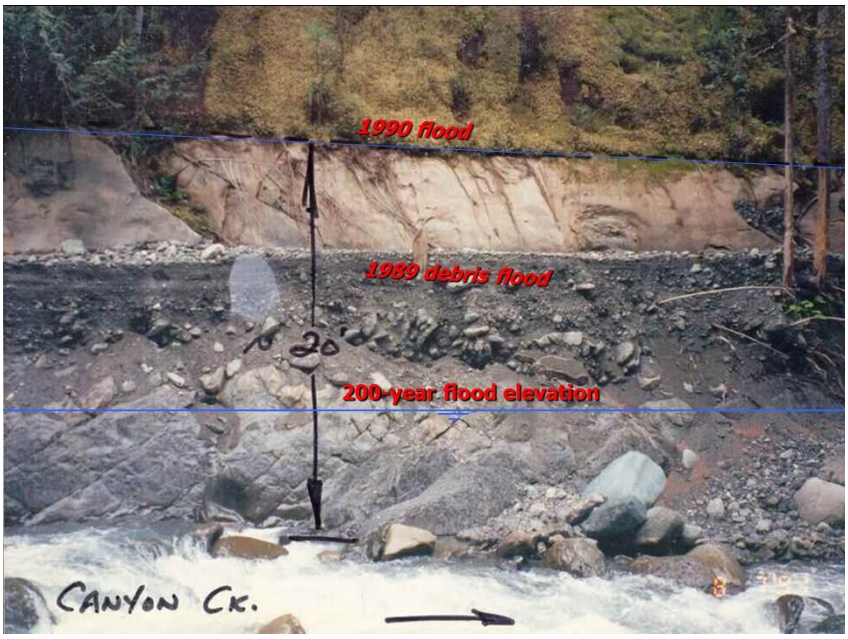
1.3.4 "*Boulder berms*"

Com *framework* de cascalho e pedregulhos grossos depositados através e ao lado de corrente de canais em vales e fãs. São criados por água, inundações, fluxo de lama, ao passo que os "*levees*" e lóbulos são o resultado de fluxos de detritos. (COSTA, 1984).

1.3.5 Evidências sedimentológica

Sedimentos de fluxos de água podem ser classificados como, estratificação cruzada, estratificado, ou maciço, com limites graduais. Depósitos de fluxos de detritos são mal classificados em relação aos depósitos de fluxo de água (Foto 3). Em leques aluviais, sedimentos de fluxos de água consistem em: cascalho, areia e silte depositado por canais distributários. Os depósitos de material grosso derivados das enchentes recebem o nome de "*sieves*" e apresentam: estrutura de material grosso e com maior porosidade; não possui matriz fina; normalmente não transportam grandes blocos; forma dos depósitos é geralmente mais curto e com maior espessura; contato com o substrato - gradacional ; superfície dos depósitos - declividade menor que o substrato; e depósitos restritos aos canais de drenagem. Já os depósitos de material grosso derivados dos fluxos de detritos apresentam: menor porosidade na grande maioria dos casos; possui matriz fina (argila, silte, areia); corpos transportados anormalmente grandes, vários metros de diâmetro e algumas toneladas; forma dos depósitos: mais finos e mais longos; contato com o substrato - bem definido; declividade coincide com o substrato (normalmente); e depósitos de canais de drenagem mais depósitos de encostas.

Foto 3 – Depósitos expostos na margem direita do *Canyon Creek,* nítidas descontinuidades



Fonte: Prof M. Jakob.

1.4 **Parâmetros mecânicos associados aos fluxos gravitacionais**

Os principais parâmetros a serem estimados para os fluxos gravitacionais são: a concentração de sólidos (c); a velocidade de transporte de detritos (v); o volume de sólidos transportados (Vs) e as forças de impacto dos detritos (F). Esses parâmetros podem ser estimados em função da área e forma da bacia, das características dos materiais envolvidos e das chuvas que antecedem o episódio. Existem diversas correlações para a determinação desses parâmetros, quase todas fundamentadas nas experiências regionais, associadas a geologias e geomorfologias particulares.

1.4.1 Concentração dos Sólidos

A concentração de sedimentos de fluxos gravitacionais raramente tem sido determinada com precisão (difícil mensuração) devido às dificuldades de amostragem; uma vez que a segregação e incorporação de novos materiais dar-se-á continuamente ao longo do curso. Este é um parâmetro para a grande maioria dos critérios de classificação de corrida de massa e líquidos e determinado para uma mistura em condições estáticas.

1.4.2 Velocidade do Fluxo

A velocidade do fluxo (v) é uma das variáveis de maior importância porque governa a capacidade de transporte de sedimentos e a energia do movimento. Segundo Gramani (2001), as corridas de detritos podem atingir altas velocidades durante o seu escoamento, dependentes diretamente das características do material (granulometria, concentração de sólidos, selecionamento e teor de argila) e da geometria dos canais de drenagem (declividade, formato, largura e raio hidráulico). Velocidades típicas vão desde 0.5m/s até 20m/s devido à variação do tamanho das partículas sólidas, da concentração de sedimentos, do gradiente, estreitamento e curvatura da trajetória do fluxo. De forma geral, diz-se que a velocidade no final é maior do que na região do corpo do fluxo e que a velocidade é maior na superfície do fluxo do que no contato com a superfície da trajetória. O máximo gradiente está presente no fundo enquanto que os gradientes são quase uniformes perto da superfície.

1.4.3 Volume Mobilizado

Os volumes de sólidos transportados (Vs) durante o fluxo gravitacional é o parâmetro necessário para dimensionar a capacidade das bacias de dissipação. O volume total de sólidos transportados por um fluxo gravitacional pode ser estimado com base no provável sedimentos de *run-off*. Basicamente, existem três fontes de material: depósitos de massa de escorregamentos; depósitos de leitos remobilizados; e material erodido do canal.

Os volumes gerados pelos "*debris flows*" variam de intensidade, contribuindo desde poucos m3 de sedimentos a milhões de m3, contabilizados em diversos eventos. Hutchinson (1988) utilizou a razão H/L (H = altura do deslocamento e L = distância percorrida pela massa) para correlacionar com os respectivos volumes de massa mobilizada por cada evento. A partir dos pontos obtidos nos diversos casos pesquisados, este autor determinou curva limite para diferentes tipos de escorregamentos ("*landslides*", "*debris flows*", "*rock falls*", "*sturzstroms*"). A razão H/L pode ser considerada como o ângulo de detrito da massa deslocada (tg α). No Brasil já foram feitas algumas medições deste parâmetro para eventos de Cubatão (SP) e Quitite (RJ). Os autores analisaram principalmente os fluxos de detritos em solos residuais, propondo uma nova configuração da curva limite da relação H/L x V para os "*debris flows*".

1.4.4 Força de Impacto

Os "*debris flows*" são capazes de exercer enormes forças de impacto sobre objetos localizados na sua trajetória. As edificações, os muros, as pequenas barragens, as árvores de grande porte, as pontes e as casas podem ser totalmente destruídas ou englobadas pelos fluxos. Por vezes, encontram-se fragmentos destas obras imersos no fluxo, transportados por grandes distâncias, Gramani (2001). As forças de impactos podem ser avaliadas a partir das formulações de energia de movimento.

1.4.5 Mecanismo de Fluxo Sedimentares Gravitacionais

Segundo Costa (1994), os principais mecanismos de corridas de detritos são:

- Dilatância – pode provocar a transformação de um sólido, ou uma massa rígida, em um fluido muito viscoso. É definida como um aumento no volume de massa de solo com aumento da porosidade, a qual ocorre durante a deformação acompanhando a ruptura de taludes, com mudança de forma.

O aumento da porosidade provoca uma incorporação ainda maior de umidade amolgamento, o que reduz a resistência do material, podendo a massa sólida tornar-se fluida, com comportamento viscoso, antes de atingir a base da encosta.

- Liquefação espontânea - ocorre quando uma massa sólida se transforma repentinamente num fluido viscoso por grande incorporação de agua ou por meio de uma solicitação externa em sedimentos saturados. A água provoca um aumento da pressão neutra e reduz a coesão por eliminação da sucção e, portanto, diminui a resistência ao cisalhamento. Essa situação pode causar o colapso da estrutura interna, consequentemente, mudando o comportamento da massa. No caso estático, o aumento de carga pode provocar colapso, aumentando a poropressão (u). Ações externas, tais como sismos, quedas súbitas de massas de solo ou rocha entre outras, seriam as causas mais comuns. A liquefação em geral também ocorre nos materiais do leito, por impacto. O carregamento não drenado desempenha um papel fundamental nos fluxos de detritos. (SASSA e WANG, 2001).

- Barramento natural – concentram-se nas zonas de "*Knickpoints*" (quebra natural do relevo) e ocorre com a acumulação dos sedimentos depositados nas linhas de drenagem, os quais podem perder sua estabilidade, rompendo-se e transformando-se em corridas. Os barramentos naturais podem ser também formados por detritos provenientes das encostas que se depositam em conjunto com os sedimentos da drenagem. A acumulação de detritos ocorre pelo processo natural de transporte e evolução das vertentes (dinâmica das paisagens), por escorregamentos e queda de blocos localizados. (COSTA E JARRET, 1981; TAKAHASHI, 1991). O rompimento de sucessivos pontos de barramentos naturais pode explicar a ocorrência dos pulsos observados em "*debris flows*", que ocorrem em intervalos de tempo variáveis.

- Acumulação dos sedimentos nos cursos de drenagens - os materiais são mobilizados em eventos de chuvas extremas, onde uma massa de água considerável carreia os materiais, instabilizando-os e/ou exumando-os e transdormando-os em corridas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Etapas e Atividades Desenvolvidas

A metodologia de investigação, bem como os critérios de apresentação dos resultados, para efeito da análise das geometrias sedimentares deposicionais do Vieira, será descrita para contribuir com a reconstrução da evolução paleogeográfica e o diagnóstico da fenomenologia do evento ocorrido durante o Megadesaste de 11-12 de janeiro de 2011. A pesquisa foi estruturada em 4 (quatro) fases de trabalho: inventário, expedições de campo, análise da fenomenologia, formação do modelo deposicional.

2.1.1 Fase de Inventário

Após a definição da área de estudo (vale do Vieira), foi realizado um levantamento bibliográfico enfocando diferentes modelos propostos para a caracterização de fluxos gravitacionais e as diversas classificações que foram elaboradas a partir destes modelos. A revisão de bibliografia nacional e internacional sobre fluxos gravitacionais foram referências fundamentais para o estudo geológico do conhecimento do problema instalado. A pesquisa dirigida de mapas temáticos, imagens de satélite, ortofotos retificadas e dados pluviométricos representaram uma ferramenta básica de investigação (de campo e escritório):

- Mapa geológico Folha Nova Friburgo, na escala 1:50.000, fonte de dados Projeto Carta Geológica do Estado do Rio de Janeiro, DRM/GEOSOL, ano 1980;
- Mapa topográfico do Município de Teresópolis, IBGE: consiste na base planialtimétrica municipal, na escala 1:50.000 e equidistância de curva de nível de 20m em formato digital, através das folhas topográficas Antas,

Itaipava e Teresópolis, ano de 1981, produzidas pela Diretoria de Geodésica e Cartografia do IBGE - IBGE/DECAR.;

- Ortofotos digitais formato *GeoTiff* na escala 1:25.000 fonte de dados IBGE, ano 2007, Folhas 2716-3-SE e 2716-4-SO;
- Imagens de satélite stereo *Geoeye-1*, pós-Megadesastre, na escala 1:25.000, fonte de dados Instituto Estadual do Ambiente, ano 2011;
- Os dados de chuvas são referentes as estações pluviométricas do INEA (Instituto Estudual do Ambientete) e INMET (Instituto Nacional de Metereologia), que foram adquiridos através de portal *online*. Cabe ressaltar que a revisão bibliográfica não se limitou no acúmulo de dados mas também compreendeu uma avaliação crítica do conhecimento do problema e dos trabalhos consultados.

2.1.2 Fase de Expedições de Campo

A segunda fase consistiu no programa de investigações "*in situ*" realizado no "Vieira". Foram realizadas 15 visitas de campo ao longo de janeiro de 2011 e dezembro de 2012 na região de Vieira, divididas nas seguintes etapas:

- Sobrevoo de helicóptero: a partir de sobrevoos de helicóptero realizado nos dias 21 de janeiro de 2011 e 26 de janeiro de 2011, com o apoio do DRM-RJ, foram tiradas fotos oblíquas (em escala de detalhe) destacando o início do fluxo gravitacional do Vieira, sua dimensão e consequências, (Foto 4);

Foto 4 – Sobrevoo de helicóptero realizado na cidade de Teresópolis com apoio do DRM

- Estudos dos perfis sedimentares: as visitas de campo envolveram o uso de ferramentas simples como martelo, trena digital, mapas topográficos, bússola e lupa, e os dados coletados permitiram identificar feições características do fluxo de massa em função da litologia, estruturas geológicas e geomorfológicas, topografia, cobertura vegetal e pluviosidade. Essa coleta de dados foi valiosa e contou com auxílio de sistemas de posicionamento global (GPS) e registro por meio de croquis detalhados, complementados por fotografias, dados de atitudes e outras medidas estruturais e geométricas que possam ter relação com os croquis. Nos cortes estudados foram definidas as geometrias e fácies dos depósitos dos fluxos gravitacionais.

- Mapeamento da frente de fluxo de massa: este mapeamento determina as principais características do processo destrutivo, com destaque para os dados de campo necessários para a definição do seu mecanismo de fluxo, (Foto 5).

Foto 5 – Vista da área deposicional da frente do fluxo gravitacional do Vieira.

- Mapeamento geológico-estrutural: o mapeamento de campo, na escala 1:5.000, procurou estabelecer o papel desempenhado pela rochas e suas estruturas, sistemas de faturamento, perfis de alteração, depósitos antigos e atuais no mecanismo de fluxo. O mapeamento geológico-estrutural de detalhe concentrou-se na área do Alto Vieira para elucidar os fatores geológicos atuantes no processo.

- Entrevistas e Participação em Congresso: ao longo do ano de 2011, durante as expedições de campo, foram realizadas entrevistas com os técnicos da Defesa Civil de Teresópolis, agentes comunitários e moradores do bairro de Vieira aptos a fornecer informações (via relatos) relevantes para o estudo. Durante as entrevistas buscou-se estabelecer um roteiro de perguntas: "*Nome e endereço residencial e/ou comercial; O que aconteceu?; Quando aconteceu?; Qual foi o horário que a chuva começou?; Houve registro de perda ou dano de propriedade ou pessoas?; Existe acervo de fotografias terrestres?; Há registro histórico de evento similar no passado recente?".* Foram entrevistados 10 técnicos de Defesa Civil, incluindo o coordenador de Defesa Civil de Teresópolis da época do evento de 11-12 de janeiro de 2011, Cel. Flavio Monteiro, e 12 agentes comunitários e moradores do bairro Vieira. As entrevistas possibilitaram a avaliação do cenário de antes e depois do

evento de janeiro de 2011 para região. As participações em congressos e simpósios foram limitadas na área de desastres naturais. Nos meses de outubro e novembro de 2011 ocorreram, respectivamente, o *13° Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental*, em São Paulo-SP, e o *12° Simpósio de Geologia do Sudeste,* em Nova Friburgo-RJ. A conferência foi uma ótima oportunidade para troca de experiências sobre trabalhos de fluxos gravitacionais ocorridos no Brasil e visitar localidades afetadas por desastres. Já em 2012, a participação no *IV Simpósio Panamericano de Deslizamientos,* em Paipa, Colômbia, permitiu prestigiar diversos trabalhos sobre "*debris flows"* (p.ex. Prof. Dr W. Lacerda através do trabalho intitulado "*Catasthorophic events in Rio de Janeiro 2010-2011: new approaches for susceptibility mapping of landslides during heavy rains*" e Prof Dr. M. Jacob através do trabalho intitulado "*Advances in debris flows and debris avalanches hazard risk assessments*"). A reflexão sobre os trabalhos admitiu avaliar as possibilidades da inicialização de fluxos de massa em diferentes sistemas de deposicionais.

2.1.3 Fase da Análise da Fenomenologia

Os procedimentos para entender os processos e produtos gerados no evento do "Vieira" foram através das relações empíricas baseadas nas observações das similaridades entre outros eventos de fluxos gravitacionais ocorridos durante o Megadesastre da Serra Fluminense. Durante as expedições de campo foram reconhecidas feições nas bacias do vale dos rios Cuiabá, Boa Esperança e Santo Antônio em Petrópolis, vale do rio Príncipe, em Teresópolis, e, vale do Córrego D'Antas, em Nova Friburgo. Os conceitos obtidos da pesquisa bibliográfica, das observações e medições de campo, com ênfase nas feições sedimentares geradas pelo fluxo de massa foram tratados e analisados no sentido de se obter elementos para traçar o modelo ambiental deposicional.