



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA  
DE ENGENHARIA E AMBIENTAL

**RBGEA**

**REVISTA BRASILEIRA DE  
GEOLOGIA DE ENGENHARIA  
E AMBIENTAL**



**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA  
DE ENGENHARIA E AMBIENTAL**

**REVISTA BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL**

*Publicação Científica da Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental*

**EDITORES**

Prof. Dr. Emílio Velloso Barroso - UFRJ  
Prof. Dra. Kátia Canil - UFABC  
Prof. Dra. Malva Andrea Mancuso - UFSM

**REVISORES**

Adalberto Aurélio Azevedo - IPT	José Augusto de Lollo - UNESP
Alberto Pio Fiori - UFPR	José Domingos Gallas - USP
Aline Freitas da Silva - DRM-RJ	José Eduardo Rodrigues - USP
Angelo José Consoni - TSAP	José Eduardo Zaine - UNESP
Antonio Cendrero - Univ. da Cantabria (Espanha)	José Luiz Albuquerque Filho - IPT
Antonio Manoel Santos Oliveira - UNG	Leandro Eugênio da Silva Cerri - UNESP
Candido Bordeaux Rego Neto - IPUF	Lídia K. Tominaga - IG/SMA
Clovis Gonzatti - CIENTEC	Luis de Almeida Prado Bacellar - UFOP
Denise de la Corte Bacci - USP	Luiz Nishiyama - UFU
Diana Sarita Hamburger - UFABC	Luiz Fernando D'Agostino - Nucleo
Dirceu Pagotto Stein - Geoexec	Marcelo Fischer Gramani - IPT
Edilson Pissato - USP	Marcilene Dantas Ferreira - UFSCar
Eduardo Brandau Quitete - IPT	Marcia Pressinotti - IG/SMA
Eduardo Goulart Collares - UEMG	Marcio A. Cunha - Consultor
Eduardo Soares de Macedo - IPT	Maria Cristina Jacinto Almeida - IPT
Emilio Velloso Barroso - UFRJ	Maria Heloisa B.O. Frascá - Consultora
Eraldo L. Pastore - Consultor	Maria José Brollo - IG/SMA
Fábio Soares Magalhães - Vogbr	Marta Luzia de Souza - UEM
Flávio Almeida da Silva - Engecorps	Nelson Meirim Coutinho - GEORIO
Frederico Garcia Sobreira - UFOP	Newton Moreira de Souza - UnB
Ginaldo Campanha - USP	Noris Costa Diniz - UnB
Guido Guidicini - Geoenergia	Oswaldo Augusto Filho - USP
Helena Polivanov - UFRJ	Reinaldo Lorandi - UFSCar
Jair Santoro - IG/SMA	Renato Luiz Prado - USP
João Francisco Alves Silveira - Consultor	Ricardo Vedovello - IG/SMA
Jorge Kazuo Yamamoto - USP	Yociteru Hasui - Consultor
José Alcino Rodrigues de Carvalho - Univ. Nova de Lisboa (Port.)	

**APOIO EDITORIAL**

Renivaldo T. Campos  
Nill Cavalcante

**PROJETO GRÁFICO E DIAGRAMAÇÃO**

Rita Motta - Editora Tribo da Ilha

---

**Volume 4 - Número 2**

2014

ISSN 2237-4590

---

## DIRETORIA ABGE GESTÃO 2014/2015

**Presidente:** Adalberto Aurélio Azevedo  
**Vice Presidente:** Delfino Luiz Gouveia Gambetti  
**Diretora Secretária:** Alessandra Cristina Corsi  
**Diretor Secretário Adjunto:** Fabricio Araujo Mirandola  
**Diretor Financeiro:** José Luiz Albuquerque Filho  
**Diretor Financeiro Adjunto:** Marcelo Denser  
**Diretora de Eventos:** Kátia Canil  
**Diretor de Eventos Adjunto:** Fernando F. Kertzman  
**Diretor de Comunicação:** Luiz Antonio Pereira de Souza  
**Diretor de Comunicação Adjunto:** Emílio V. Barroso  
**Diretor de Publicação:** Eduardo Soares de Macedo  
**Diretor de Publicação Adjunto:** Cássio Roberto da Silva

### CONSELHO DELIBERATIVO

Adalberto Aurélio Azevedo, Alessandra Cristina Corsi, Cassio Roberto da Silva, Delfino Luiz Gouveia Gambetti, Eduardo Soares de Macedo, Emilio Velloso Barroso, Fabrício Araújo Mirandola, Fernando Facciolla Kertzman, João Jeronimo Monticeli (Presidente do Conselho Consultivo) José Luiz Albuquerque Filho, Kátia Canil, Luiz Antonio Pereira de Souza e Marcelo Denser Monteiro.  
**Suplentes:** Andrea Bartorelli, Daniela Girio Marchiori Faria, Eraldo Luporini Pastore, Flávio Almeida da Silva, Gláucia Cuchierato, Ivan José Delatim.

### NÚCLEO RIO DE JANEIRO

**Presidente:** Aline Freitas da Silva  
**Vice-Presidente:** Marcela Carvalho Lages da Silva  
**Diretora Secretário:** Ingrid Ferreira Lima  
**Diretora Financeiro:** Rúbia Nascimento de Azevedo  
**Diretora de Eventos:** Joana de Oliveira Ramalho

### NÚCLEO MINAS GERAIS

**Presidente:** Luis de Almeida Prado Bacellar  
**Vice-Presidente:** Lucas Mucio Souza Lima Murta  
**Conselho Deliberativo:** Carla Tâmilis Fonseca Chaves, Evandro Moraes da Gama, Lucas Mucio Souza Lima Murta, Luis de Almeida Prado Bacellar, Maria Giovana Parizzi, Oscar de Mattos Junior, Sérgio de Lima Delgado Delgado.

### NÚCLEO SUL

**Presidente:** Andrea V. Nummer  
**Vice-Presidente:** Alberto Pio Fiori  
**Vice-Presidente:** Candido Bordeaux Rego Neto  
**Diretor Financeiro:** Cezar Augusto Burkert Bastos  
**Diretora Secretária:** Malva Andrea Mancuso  
**Diretor de Eventos:** Rodrigo Martins Saraiva  
**Diretor de Publicações:** Clóvis Gonzatti



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA  
DE ENGENHARIA E AMBIENTAL

### SECRETARIA EXECUTIVA

**Gerente Executivo:** Renivaldo Campos  
Av. Profº Almeida Prado, 532 - IPT (Prédio 11) - São Paulo - SP  
Telefone: (11) 3767-4361 - Email: abge@abge.org.br - Home Page: www.abge.org.br





A ABGE apresenta mais um número da Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental (RBGEA) a todos os interessados no campo da aplicação das Geociências aos estudos relativos aos projetos e execuções de empreendimentos de Engenharia e suas implicações ambientais. Neste número os artigos publicados abordam estudos e pesquisas em uma grande diversidade de temas. Sandra Gabas e colaboradores publicam interessante estudo experimental e numérico sobre a difusão e a retenção de metais tóxicos (Pb e Cd) em solo laterítico argiloso compactado, comumente utilizado como camada de impermeabilização de aterros (*liners*).

O artigo de Marcelo Eduardo Dantas e seus colaboradores do Serviço Geológico do Brasil tratam da aplicação da Geomorfologia, mais especificamente do mapeamento dos padrões de relevo, como instrumento para avaliação da suscetibilidade a movimentos de massa e inundação para o município de Mimoso do Sul no estado do Espírito Santo.

Carlos Geraldo de Freitas e Vilma Campanha (*in memoriam*), ambos do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT), discutem a elaboração de planos diretores e a gestão territorial municipal. Após um breve histórico sobre o tema, o texto enfoca aspectos de natureza legal e técnica que, na avaliação dos autores, muitas vezes não são considerados pelos gestores.

Um estudo que busca entender o papel desempenhado por fluxos subterrâneos em escorregamentos translacionais rasos ocorridos na região serrana fluminense nos é apresentado por Roberta Pereira e coautores de diversas unidades de ensino e pesquisa da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Ao investigarem um escorregamento na cidade de Nova Friburgo os autores apresentam evidências de heterogeneidades de propriedades hidráulicas dos materiais geológicos presentes na encosta como a principal causa da deflagração de movimentos de massa com a tipologia citada.

Ainda com foco na estabilidade de taludes, Gabriel Soares e colaboradores nos apresentam os resultados de um estudo desenvolvido em conjunto pela Universidade de São Paulo e pela Yamana Gold Inc. para a implantação da mineração Santaluz, no estado da Bahia. Seis taludes foram investigados com relação às características geológicas e propriedades geotécnicas. O estudo incluiu a um extenso levantamento estrutural através de scanlines e análise cinemática da estabilidade. Ao final os autores comparam as respostas dos sistemas de classificação de maciços rochosos RMR, SMR e Q.

No último artigo deste número da RBGEA, Sandra Silva (Serviço Geológico do Brasil) e Omar Bitar (Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo) apresentam uma síntese muito bem elaborada sobre os resultados dos mapeamentos executados no âmbito do Plano Nacional de Gestão de Riscos e Resposta a Desastres Naturais. Com base na experiência do mapeamento de 279 municípios, os autores enfatizam o desenvolvimento de método de mapeamento adequado para produção de cartas de suscetibilidade a processos que podem gerar desastres naturais, visando subsidiar o planejamento territorial e a prevenção de desastres.

Estamos certos que o conjunto das informações disponíveis em mais este número da RBGEA configura contribuição relevante dos profissionais da área de Geologia de Engenharia e Ambiental para o desenvolvimento de práticas seguras e econômicas para a implantação de empreendimentos civis e mineiros, bem como reflete o nível de excelência alcançado no Brasil na avaliação de riscos aos desastres naturais, no desenvolvimento de instrumentos de gestão para o planejamento urbano e na capacidade técnica para a proteção ao meio ambiente. Desejamos a todos uma ótima leitura!

**Prof. Dr. Emílio Velloso Barroso - UFRJ**  
**Profa. Dra. Kátia Canil - UFABC**  
**Profa. Dra. Malva Andrea Mancuso - UFSM**





- 9** HEAVY METAL DIFFUSION AND RETENTION IN A MINERAL BARRIER OF COMPACTED LATERITIC SOIL  
*Sandra Garcia Gabas*  
*Jorge Eduardo Souza Sarkis*  
*Maria Eugenia Gimenez Boscov*
- 23** O EMPREGO DA GEOMORFOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DE SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS DE MASSA E INUNDAÇÃO – MIMOSO DO SUL/ES  
*Marcelo Eduardo Dantas*  
*Edgar Shinzato*  
*Jennifer Fortes Cavalcante Renk*  
*Juliana Maceira Moraes*  
*Marcely Ferreira Machado*  
*Aline Costa Nogueira*
- 43** ABORDAGEM AMBIENTAL NO PLANEJAMENTO MUNICIPAL  
*Carlos Geraldo Luz de Freitas*  
*Vilma Alves Campanha (in memorian)*
- 51** DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS FÍSICOS DO SOLO EM ENCOSTA SOB INFLUÊNCIA DE ESCORREGAMENTO TRANSLACIONAL RASO – NOVA FRIBURGO, RJ  
*Roberta Pereira da Silva*  
*Karina Menezes Machado*  
*Gerson Cardoso da Silva Júnior*  
*Ana Luiza Coelho Netto*  
*Leonardo de Bona Becker*  
*Anderson Mululo Sato*
- 65** UTILIZAÇÃO DE MÉTODO GRÁFICO PARA CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA PELO SISTEMA SLOPE MASS RATING (SMR) - APLICAÇÃO NA MINA DE SANTA LUZ (BA)  
*Gabriel Barbosa Soares*  
*Edilson Pissato*  
*Leandro Ribes de Lima*
- 95** INCIDÊNCIA DE ÁREAS SUSCETÍVEIS A MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA E INUNDAÇÕES EM MUNICÍPIOS ABRANGIDOS PELO PLANO NACIONAL DE GESTÃO DE RISCOS E RESPOSTA A DESASTRES NATURAIS  
*Sandra Fernandes da Silva*  
*Omar Yazbek Bitar*





# HEAVY METAL DIFFUSION AND RETENTION IN A MINERAL BARRIER OF COMPACTED LATERITIC SOIL

DIFUSÃO E RETENÇÃO DE METAIS PESADOS EM BARREIRA MINERAL DE SOLO LATERÍTICO COMPACTADO

SANDRA GARCIA GABAS

Federal University of Mato Grosso do Sul, Campo Grande, MS, Brazil

E-MAIL: sandra.gabas@ufms.br

JORGE EDUARDO SOUZA SARKIS

Energy and Nuclear Research Institute, São Paulo, SP, Brazil

E-MAIL: jesarkis@ipen.br

MARIA EUGENIA GIMENEZ BOSCOV

Polytechnic School, University of Sao Paulo, São Paulo, SP, Brazil

E-MAIL: meboscov@usp.br

## ABSTRACT RESUMO

In tropical countries, lateritic soils are natural candidates for the construction of compacted clay liners (CCL) in waste disposal sites because of their availability and good engineering properties when compacted. Furthermore, a significant pollutant retention capacity has been observed in these soils, what may be reported to the expressive amount of constituent iron and aluminum oxides and hydroxides. This investigation aimed to assess diffusion and retention of toxic metals in a lateritic clay. Compacted specimens were submitted to diffusion tests carried out with solutions of Cd and Pb at pH values of 3.0, 5.5 and 8.0. Diffusion tests indicated diffusion coefficient of about  $1 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  for both metals and showed relevant retention of both metals, lead more significantly (99% for pH 3.0, 5.5 and 8.0) than cadmium (96% for pH 3.0, 91% for pH 5.5 and 90% for pH 8.0), expressed by distribution coefficients  $K_d$  ranging from 100-300 mL/g for Cd and 500-2000 mL/g for Pb. A simplified mathematical simulation carried out with code POLLUTE indicates that, even in the case of accumulation of leachate in the bottom drainage system, a CCL constructed with this soil would perform adequately, reducing the concentration of diffused metals through the liner to less than 0.2% of the concentration in the leachate.

**Keywords:** diffusion, adsorption, toxic metals, tropical soils, liners

Os solos lateríticos são normalmente utilizados para a construção de camadas de impermeabilização de aterros (*liners*) em países tropicais devido à sua disponibilidade e às suas propriedades geotécnicas quando compactados. Além disso, há estudos que observaram sua significativa capacidade de retenção de poluentes, a qual deve estar relacionada à presença de óxidos e hidróxidos e de ferro e de alumínio. Este estudo teve como objetivo avaliar a difusão e a retenção de metais tóxicos em solo laterítico argiloso compactado. Amostras de solo compactado foram submetidas a ensaio de difusão com soluções de Cd e Pb em valores de pH de 3,0, 5,0 e 8,0. Os ensaios de difusão indicaram valores de coeficiente de difusão em torno de  $10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  para os dois metais e revelaram retenção elevada de cádmio e chumbo, com maior retenção de chumbo (99% para pH 3,0, 5,5 e 8,0) do que cádmio (96% para pH 3,0, 91% para pH 5,5 e 90% para pH 8,0), expressa por coeficientes de distribuição  $K_d$  variando entre 100-300 mL/g para Cd e 500-2000 mL/g para Pb. Uma simulação matemática simplificada, realizada com o programa POLLUTE, mostrou que *liners* construídos com esse solo apresentariam bom desempenho: mesmo no caso de acúmulo de lixiviado no sistema de drenagem de fundo, a concentração dos metais após difusão através da camada seriam significativamente reduzidas, a até menos do que 0,2% da concentração no lixiviado.

**Palavras-chave:** difusão, adsorção, metais tóxicos, solos tropicais, "liners"

## 1 INTRODUCTION

In the last decades, geotechnical researches directed to environmental problems have been carried out all over the world, most of them related to pollutant transport and retention, either to understand transport mechanisms in soils (Rowe 1988; Rowe et al. 1988, Shackelford 1989 e 1993, Shackelford & Daniel 1991) or to apply this knowledge in order to prevent or remediate contamination (Bosco 1997; Kersten et al. 1997; Roehl & Czurda 1998; Kugler et al. 2002; Varank et al., 2011; Syafalni et al. 2012).

The most frequent contaminants in the environment are pathogenic microorganisms, inorganic chemicals, organic chemicals and radioactive nuclides; amongst the inorganic chemicals, some toxic metals (Hg, Cd, Pb, Cr, Ni) have been continually accumulated in the environment for centuries (Aswathanarayana 1995; Lollar 2005).

Mobility of inert dissolved contaminants in porous media can be described by the advective/dispersive transport equation, which in one-dimensional form may be represented as:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_l \frac{\partial^2 C}{\partial l^2} - u_l \frac{\partial C}{\partial l} \quad (1)$$

where  $l$  is the curve directional coordinate in the flow direction,  $u_l$  is the solute interstitial velocity ( $u = v/n$ ,  $n$  is the soil porosity and  $v$  is the Darcy velocity),  $D_l$  is the hydrodynamic dispersion coefficient in the flow direction and  $C$  is the solute concentration. When interactions between contaminants and soil grains take place during the migration process, equation (1) may be expressed as:

$$R_d \frac{\partial C}{\partial t} = D_l \frac{\partial^2 C}{\partial l^2} - u_l \frac{\partial C}{\partial l} \quad (2)$$

where  $R_d$  is the retardation factor, which represents all sorption processes that lead to metal ions immobilization.

Most studies of soil contamination by metals focus on the evaluation of transport equation parameters such as diffusion coefficient and retardation factor. Metal sorption by soil particles

is controlled by interactions between solid and liquid phases and involves different processes, i.e. adsorption (non-specific and specific), ion exchange reactions, complexation reactions and precipitation (Sposito 1989; McBride 1994). These differ by the type of chemical bonding and the strength of fixation of the metal to the soil particle, both important regarding long-term immobilization and remobilization.

Non-specific adsorption is considered a reversible reaction and normally takes place in permanent-charge minerals, i.e. some clay minerals, such as smectites and vermiculite. Specific adsorption is considered stronger than non-specific adsorption and occurs at variable-charge mineral surfaces, like the borders of kaolinite platelets, iron and manganese oxides and aluminum hydroxide, and organic matter. These minerals have electric charges which are pH dependent, resultant from the dissociation of hydroxyl ions (OH<sup>-</sup>) and water molecules (H<sub>2</sub>O<sup>+</sup>) attached to their surfaces.

According to present environmental regulations in most countries, design of waste disposal sites include bottom liner and cover systems to prevent emissions of pollutants to the atmosphere, subsoil, surface water and groundwater. Since composite bottom liners have been recommended as the best technical solution (ISSMGE 2006), compacted clay liners (CCL) play an important role providing a smooth and resistant base for the installation of the geomembrane and a second defence line in the case of geomembrane failure; furthermore, CCLs may be the only impermeable layer in the bottom liner for specific climatic and hydro-geological conditions.

Fine-grained materials are used for CCLs to insure a sufficiently low hydraulic conductivity. In this situation the migration of contaminants occurs mainly by diffusion (Freeze & Cherry 1979; Rowe 1988; Shackelford 1989) and the transport equation can be simplified to a pure diffusion equation (no advective transport) with the form of Fick's second law:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{D^*}{R_d} \frac{\partial^2 C}{\partial l^2} \quad (3)$$

where  $D^*$  is the diffusion coefficient. In this situation, the retardation factor and the retention mechanisms it encloses are cardinal to preview pollutant migration and to assess related risks.

The goals of this study were to evaluate lead and cadmium adsorption capacity of a compacted tropical residual clay, and to assess long-time behaviour of this soil as a bottom liner for waste disposal sites relative to metal adsorption.

## 2 MATERIAL AND EXPERIMENTAL METHODS

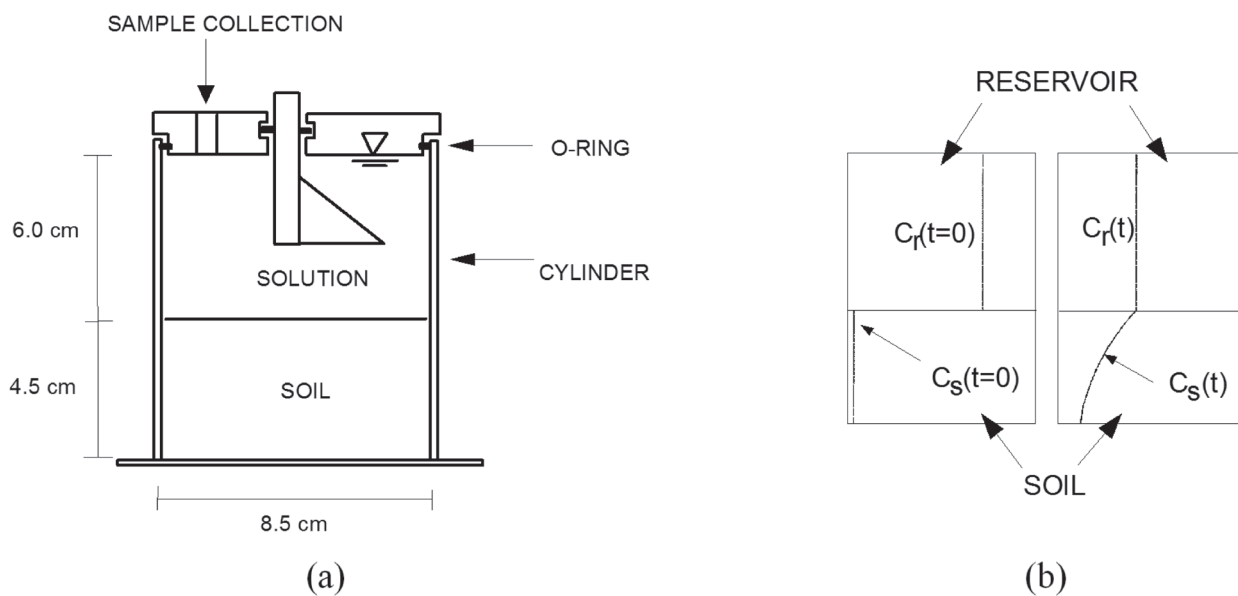
### 2.1 Soil

A residual lateritic clay of diabase from the State of Sao Paulo (southeast of Brazil) was investigated. Lateritic clays cover large extensions of the country and are often used as clay liners for landfill sites as well as in dam and pavement construction due to their good geotechnical properties when compacted, such as high shear strength, low compressibility, low expansibility in the presence of water, and low hydraulic conductivity. Samples were collected in the top 50 cm of a homogeneous, deep and extensive layer in the outskirts of the densely populated and highly industrialized city of Campinas.

The physicochemical characterization of the soil was determined by the following standard methods: ASTM D4972 for pH determination, Walkley-Black Method (Walkley and Black, 1934) for organic matter, Ion exchange resin (Rodella & Alcarde, 1994) for cation exchange capacity, point of zero charge from zero charge from titulometric method as exposed by Hemsí (2001), ASTM D422 for grain-size distribution, ASTM D4318 for liquid limit, plasticity limit and plasticity index, ASTM D698 for optimum water content and maximum dry unit weight.

### 2.2 Diffusion tests

Diffusion tests were carried out with compacted soil specimens in order to evaluate metal migration through a CCL and to provide controlled contamination for the posterior investigation of metal speciation in soil minerals. Samples collected in the field were homogenized, compacted at optimum water content with Proctor energy inside the diffusion cells, saturated with distilled water by capillarity, and finally topped with metal solutions. A schematic representation of the diffusion test is presented in Figure 1.



**Figure 1** - Diffusion test: (a) assemblage; (b) initial and final concentrations in the reservoir and in the soil pore water.

Tests were carried out in a temperature controlled ( $22\pm 2$ )°C room. During diffusion (90 days), samples of the reservoir solution were collected for element determination. In the end of the tests, cells were disassembled, and soil specimens were extruded and cut into five slices of equal thickness. The soil slices were squeezed under a pressure of 25MPa in order to obtain the interstitial solution for chemical analysis. Metal adsorption in the top slice of the soil specimens was also evaluated using a sequential extraction procedure.

Cadmium (Cd) and lead (Pb) were chosen for the investigation because of their different mobility in soils. Concentration of test solutions was 3 mg.L<sup>-1</sup> for Cd and 100 mg.L<sup>-1</sup> for Pb, values based on the limits prescribed by the environmental protection agency of the State of Sao Paulo. For each metal, three solutions were prepared at pH values of 3.0, 5.5 and 8.0, which were adjusted by the addition of nitric acid and ammonia hydroxide.

Diffusion blank tests were also carried out with solutions at the same pH values without metal concentration in order to evaluate metal migration from the soil to the reservoir solution. Additional blank tests were executed to monitor pH along diffusion time.

Natural soil samples spiked with pollutants were used in this investigation to guarantee higher control of boundary conditions and mass balance; furthermore, the process of contaminating the soil by means of diffusion tests also provides the evaluation of transport parameters in structured specimens similar to in-situ conditions of compacted clay liners.

### 2.3 Evaluation of techniques for the study of adsorption in soil particles

Mineral separation and analytic techniques that allow punctual chemical microanalysis of soil particles were investigated in order to assess the possibility of a direct verification of metal retention.

The feasibility of X-ray spectrometry by energy dispersion (EDX) associated to scanning electron microscopy was evaluated to study metal fixation in soil particles. Both techniques consist, generically, of the incidence of an electron beam in a point of the material to be analyzed, exciting

its electrons which then emit characteristic X-rays. These X-rays can be measured by a detector by means of energy dispersion or wave length; therefore, it is possible to identify the elements present in the material and under some circumstances even carry out punctual quantitative analyses. Electron microscopes allow visualization at micrometric to nanometric scales (McLaren 1991, Goldstein et al. 2003).

Application of at least 20kV-voltage is necessary for the chemical microanalyses. The incidence of the electron beam generates in the material an excitation energy bulb of approximately 2 μm (Goldstein et al. 2003). The large range of soil particles sizes, from more than 4.8 mm to less than 0.002 mm, may limit the utilization of these techniques. On one hand, electron microscopy allows the individualized visualization of soil particles; on the other hand, the size of the excitation energy bulb may exceed the dimension of a soil particle. The reply to the incidence of the electron beam in the microanalysis spectrum may not necessarily correspond to the surface of a clay mineral, but to the whole grain or even to more than one particle. As adsorption involves superficial electrical charges and ions, the observation scale ranges from a few nanometres to angstroms (e.g. ionic radii of Cd<sup>2+</sup> and Pb<sup>2+</sup> are, respectively, 0.075 and 0,119 nm), therefore not compatible to the investigated techniques. This was confirmed by Gonçalves et al. (2004), which identified Cu, Zn and Pb in contaminated sediments by means of chemical analysis and sequential extraction, but detected only Cu and Zn by EDX spectrometry without recognizing the location of these metals, whether adsorbed by clay or metallic particles.

Separation techniques based on the physical-chemical properties of the mineral constituents were investigated as well. According to the soil composition (Tables 1 and 2), densimetric and electromagnetic separations were selected. For the densimetric separation, an aliquot of the soil clay fraction was suspended in water in order to separate particles of equal size and different densities (2.6 for kaolinite and from 4.4 to 5.2 for iron oxides, according to Parfenoff et al. (1970). Mineralogical analysis of the separated phases showed quantities of clay minerals in the "oxide" phase and of oxides in the "clay" phase.

For the electromagnetic separation, two aliquots, bulk sample and clay fraction, were submitted to an electromagnetic separator Frantz at 0.5 A, in order to separate the magnetic fraction (oxides) from the non-magnetic fraction (clay minerals). X-ray diffractometry of both fractions showed the presence of oxides in the clay fraction.

These preliminary tests and the literature indicated that the sequential extraction procedure is the best technique, however indirect, to evaluate metal retention in the different mineralogical fractions of the soil.

## 2.4 Chemical analyses

Chemical analyses of cadmium, lead, iron and aluminum were carried out by induced coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP-AES) (Atom Comp Series 800, Jarrel-Ash Division, USA) and induced coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) (Element, Finnigan MAT, Bremen, Germany).

Reservoir samples collected in the first fifteen days of diffusion were analyzed by ICP-AES due to the initial high concentrations, and henceforth by ICP-MS.

## 2.5 X-ray diffractometry and microscopy

Mineralogical analysis of specimens of diffusion tests were carried out by means of X-ray diffractometry and scanning electron microscopy with punctual spectrometry by energy dispersion in order to identify possible alterations in the soil structure and metal precipitation as crystals not present in the original mineralogy of the soil. The equipments utilized for these analyses were a Philips diffractometer model MPD 1880 with copper tube, operated at 2.5 to 70°, and a Leo Microscope model Stereoscan 440, operating at 20kV and 5nA, silicon detector with coupled EDX X-ray spectrometer.

## 2.6 Simulation of pollutant transport through a landfill bottom liner

Simulations of metal migration through a CCL were carried out by means of program POLLUTE v.6.3.3 (Rowe et al. 1994) in order to assess the maximum concentration at the base of the CCL and the time necessary to achieve it, as presented by Rowe & Booker (1985). Two values of CCL thickness (0.6 m and 1.0 m) and permeability coefficient ( $1 \times 10^{-9}$  m/s and  $1 \times 10^{-8}$  m/s) were investigated. CCL thickness values correspond to those requested by the environmental protection agency of the State of Sao Paulo for bottom liners of, respectively, municipal solid wastes (MSW) and hazardous wastes landfills. Hydraulic conductivity equal or lower than  $1 \times 10^{-9}$  m/s is mandatory in most environmental prescriptions and regulations; however, a value tenfold higher was also investigated to account for field variability in the compaction process and for the characteristic high sensibility of dry unit weight and permeability of compacted lateritic soils to small deviations in the moulding water content (Nogami & Villibor 1995, Boscov 1997).

Diffusion and distribution coefficients were determined by means of the diffusion tests. Additional input parameters for the numerical analyses e.g. porosity and dry unit weight were obtained from geotechnical laboratory tests.

## 3 RESULTS

### 3.1 Soil characterization

Physicochemical characterization (i.e. Atterberg limits, grain size distribution and mineralogy) and chemical properties and of the studied soil are summarized in Tables 1 and 2, respectively.

**Table 1** - Physicochemical characterization of the soil.

Property	Result	Method	
pH (Distilled water)	5.3	ASTM D4972	
Organic matter content (%)	2.5	Walkley-Black Method (CAES, 2006)	
Cation exchange capacity (mmol <sub>c</sub> /kg)	56.6	Ion exchange resin (Rodella and Alcarde, 1994)	
Point of zero charge (Hemsi 2001)	4.3	Titulometric method	
Grain-size distribution (%)	Coarse sand	0	
	Medium sand	6	
	Fine sand	27	ASTM D422
	Silt (%)	14	
	Clay (%)	59	
Liquid limit, w <sub>L</sub> (%)	45	ASTM D4318	
Plasticity limit, w <sub>p</sub> (%)	30	ASTM D4318	
Plasticity index, PI (%)	15	ASTM D4318	
Skempton activity, A	0.25	A = PI/C (C = clay content)	
Optimum water content (%)	26.3	ASTM D698	
Maximum dry unit weight (kN/m <sup>3</sup> )	15.7	ASTM D698	
Compacted hydraulic conductivity (m/s) (optimum water content, Proctor energy)	1x10 <sup>-9</sup>	Permanent-head flexible-wall permeability test	
Mineralogical composition	Quartz, ilmenite, hematite, magnetite, gibbsite and traces of vermiculite	X-ray diffractometry Magnetic treatment 0.5A Glycol+heating at 490oC+ FeO treatment	

**Table 2** - Chemical characterization of the soil by X-ray fluorescence.

Element	(%)	DL	Element	(µg.g <sup>-1</sup> )	DL
SiO <sub>2</sub>	31.1	0.01	Ba	74	17
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23.9	0.01	Ce	71	18
MnO	0.141	0.002	Cl	<15	15
MgO	0.17	0.01	Co	98	3
CaO	0.09	0.01	Cr	285	2
Na <sub>2</sub> O	< 0.02	0.02	Cu	187	2
K <sub>2</sub> O	0.03	0.01	F	< 223	223
TiO <sub>2</sub>	5.21	0.007	Ga	35	1
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.14	0.003	La	18	14
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24.4	0.01	Nb	33	1
		0.01	Nd	32	22
			Ni	104	2
			Pb	25	5
			Rb	3	2
			S	267	32
			Sc	50	4
			Sr	10	1
			Th	13	3
			U	4	3
			V	900	3
			Y	16	1
Loss of ignition	14.2		Zn	88	1
Total	99.5		Zr	383	3

L - detection limit

### 3.2 Diffusion tests

Blank diffusion tests showed that pH solution does not remain constant during the experiment (Figure 2), tending to the natural soil pH with time, and that there is metal diffusion from the soil to the reservoir solution. Maximum concentrations of cadmium and lead in the reservoir after 90 days of reverse diffusion are shown in Table 3. Cadmium was not detected in the natural soil by X-ray fluorescence, i.e. its concentration in the soil grains was below the detection limit of the analytical technique; however, the quantity of cadmium that migrated from the soil by diffusion was enough to significantly increase the concentration in the reservoir, tenfold at pH 5.5 and 8.0, and ~100 times at pH 3.0. On the other

hand, lead was detected in the soil, however reverse diffusion resulted in a slight increase in the reservoir concentration.

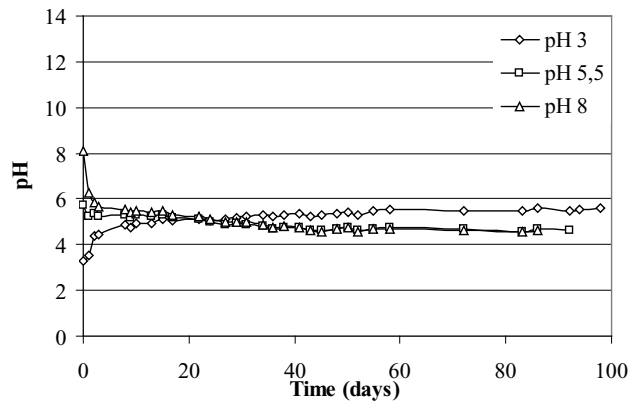


Figure 2 - pH of reservoir solutions along diffusion tests.

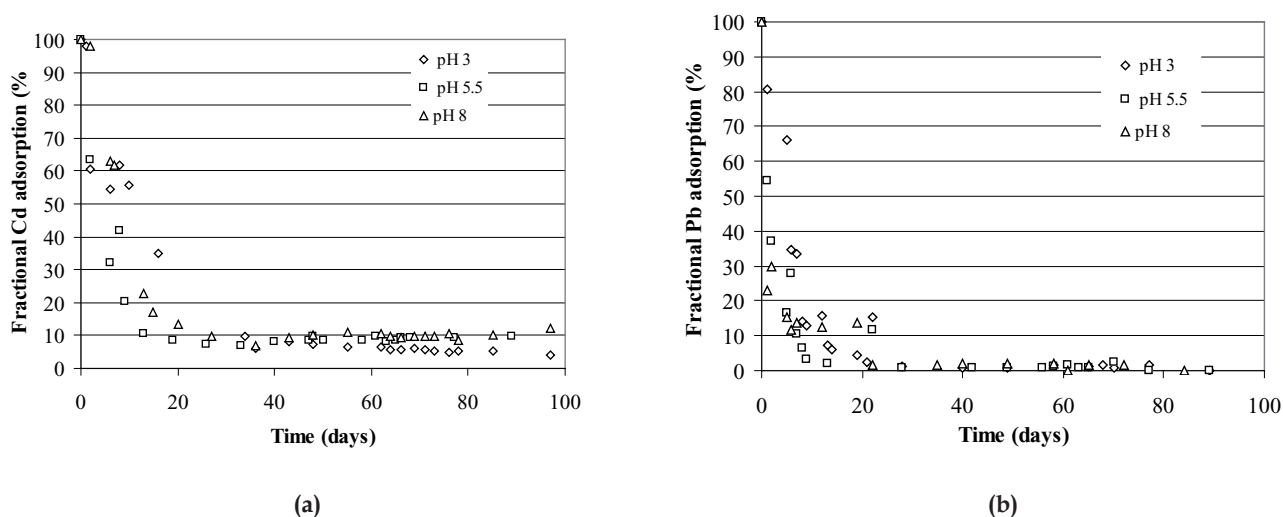
Table 3 - Metal concentrations in the reverse diffusion tests ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ ): reservoir solution and soil pore water.

Metal	Cadmium			Lead		
	Reservoir - Initial	Reservoir - Final	Layer 1 (Top)	Reservoir - Initial	Reservoir - Final	Layer 1 (Top)
pH	3.26	5.75	8.09	3.26	5.75	8.09
Reservoir - Initial	0.002	0.001	0.001	0.024	0.002	0.003
Reservoir - Final	0.22	0.013	0.010	0.77	0.024	0.004
Layer 1 (Top)	0.01	0.00	-	0.03	0.17	0.11
Layer 2	0.03	0.01	0.19	0.06	0.27	0.04
Layer 3	0.02	0.03	0.06	0.09	0.19	0.17
Layer 4	0.03	0.04	0.09	0.03	0.04	0.13
Layer 5 (Bottom)	0.06	0.03	0.07	0.07	0.20	0.08

In the diffusion tests with metallic solutions, final reservoir concentrations were very low, indicating an expressive diffusion process occurring during the 90 days of the tests (Figure 3). This mass transfer mechanism is clearly pH dependent for cadmium: the more acidic the solution, the more significant was the diffusion (Figure 3a). This trend is not so clear for lead diffusion (Figure 3b).

Metal concentrations in the reservoir along time and in the soil pore water in the end of the tests are indicated in Table 4. Initial cadmium concentrations in the reservoir were approximately  $3 \mu\text{g.L}^{-1}$ , whereas after 90 days of diffusion values of 0.12, 0.29 and  $0.37 \mu\text{g.L}^{-1}$  were measured,

respectively, for pH 3.0, 5.5 and 8.0. Cadmium that migrated from the reservoir to the soil specimen was partly retained by the soil grains and partly diffused downwards through the specimen. Concentrations in the soil pore water indicate the pollutant front entering the soil, with higher values in the top layer and a background value of approximately  $0.10 \mu\text{g.L}^{-1}$  at the bottom layer. Initial lead concentrations in the reservoir were about  $100 \mu\text{g.L}^{-1}$ , decreasing to near  $0.14 \mu\text{g.L}^{-1}$  in the end of the test. The pollutant migration front in the soil specimens is also evident by the observation of the concentrations in the soil pore water of each layer.



**Figure 3** - Diffusion from the reservoir to the soil at different pH values: a) cadmium; b) lead.

**Table 4** - Metal concentrations in the direct diffusion tests ( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ): reservoir solution and soil pore water.

Metal	Cadmium			Lead		
pH	2.83	5.65	8.02	2.98	5.73	7.90
Reservoir - Initial	3.12	2.95	3.37	112	101	98.2
Reservoir - Final	0.12	0.29	0.37	0.14	0.14	0.13
Layer 1 (Top)	23.1	33.2	134	0.61	9.30	5.60
Layer 2	1.29	1.46	4.44	0.27	1.00	1.22
Layer 3	0.26	0.22	0.95	0.23	0.60	0.78
Layer 4	0.04	0.11	0.50	0.16	0.68	0.60
Layer 5 (Bottom)	0.10	0.15	0.09	0.10	0.24	0.27

Data were analyzed by means of software POLLUTE v.6 (Rowe et al. 1994). Adopted boundary conditions were: (i) finite solute mass over the top surface of the soil, corresponding to a volume of solution applied to the reservoir in the beginning of the test without posterior refilling; and (ii) zero solute flux at the bottom, representing the impermeable base of the diffusion cell.

Several values of the parameters  $D$  and  $K_d$  were tested to fit simultaneously the two curves generated by the experimental data in each test (i.e. concentration in the reservoir along time and concentration in the soil pore water along depth in the end of the test). The free solution diffusion coefficient at  $25^\circ\text{C}$  was adopted as the superior limit value for  $D$ , which corresponds to  $7.17 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  and  $9.45 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  for cadmium and lead, respectively. In all tests, a good fitting of both curves with the same parameters was not

achievable; therefore, suitable ranges of values were adopted for each test and are presented in Table 5. A possible explanation could be that kinetics of metal adsorption is not negligible in tropical soils, since specific adsorption may be time dependent, whereas the model considers instantaneous non-specific adsorption. This possibility has already been mentioned by Stuermer et al. (2008). Another cause may be the occurrence of membrane behavior, which has already been observed in lateritic clays (Musso 2008). Nevertheless, some experimental data from adsorption batch tests by iron hydroxides were well fitted by a double-layer surface complexation model (Meng et al. 2014); the hydroxides in this case were not collected from a natural environment, but prepared in the laboratory under controlled conditions.



**Table 5** - Parameters obtained from diffusion tests.

pH	Element	$D^*$ ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )	$K_d$ ( $mg \cdot L^{-1}$ )	$R_d$
3.0	Cd	$1 \times 10^{-10}$	200-300	684-1025
5.5	Cd	$1 \times 10^{-10}$	250	854
8.0	Cd	$1 \times 10^{-10}$	100-200	342-684
3.0	Pb	$1 \times 10^{-10}$	2000	6827
5.5	Pb	$1 \times 10^{-10}$	700	2390
8.0	Pb	$1 \times 10^{-10}$	500	1708

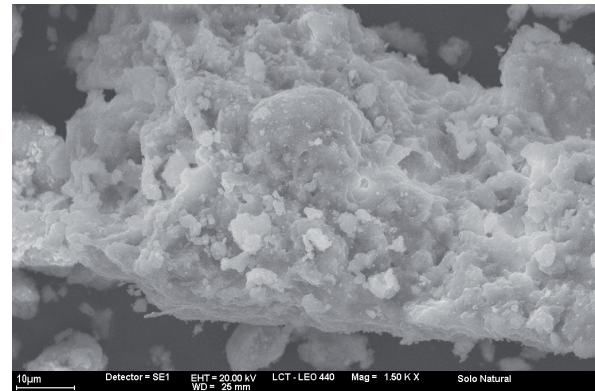
Diffusion coefficients resulted in approximately  $1 \times 10^{-10} m^2/s$  for both metals. These values are comparable with values in literature of  $3 \times 10^{-10} m^2/s$  to  $9 \times 10^{-10} m^2/s$  presented by Shackelford and Daniel (1991) for the diffusion of Cd in a kaolinitic clayey soil. Tsugawa (2004) obtained a diffusion coefficient for Cd of  $0.7 \times 10^{-10} m^2/s$  for a lateritic clay. Stuermer et al. (2008) determined values between  $0.5 \times 10^{-10} m^2/s$  and  $4 \times 10^{-10} m^2/s$  for Cd and Pb in a saprolitic silty soil.

Distribution coefficient ( $K_d$ ) and retardation factor ( $R_d$ ) values for both metals (Table 5) indicate that cadmium was less adsorbed than lead. Lower values of  $K_d$  and  $R_d$  for both metals at pH 8.0 could be explained by the fact that a significant amount of the metals may be hydrolyzed, therefore were not available for diffusion and adsorption.

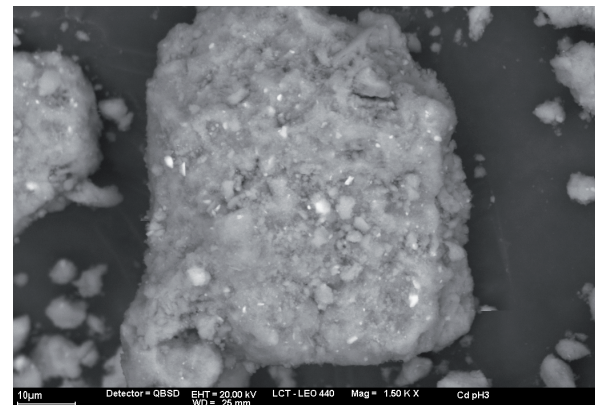
The ratio of retardation factors for cadmium and lead at 3.0 pH in this research resulted in 1:10, whereas a ratio of 1:5 was obtained by Charlemyanont et al. (2009) for a lateritic soil through batch tests.

### 3.3 X-ray diffraction and microscopy tests

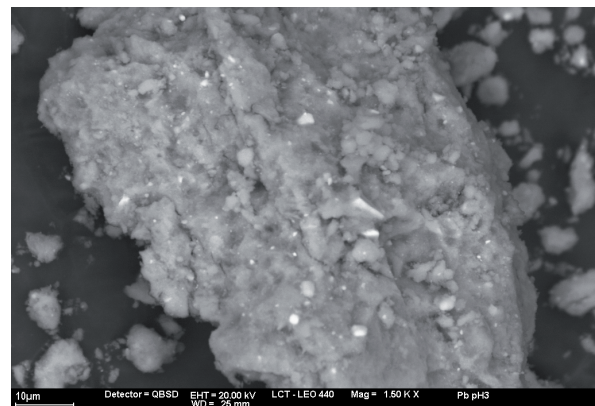
SEM techniques were applied to the natural soil and samples contaminated by lead and cadmium in the diffusion tests. Backscattering electron images from these samples do not show any evidence of cadmium and lead adsorbed to the surface particle (Figure 4); furthermore, EDX spectra do not reveal the presence of these metals (Figure 5). Cadmium and lead were not detected possibly due to the low concentrations of metal adsorption (Table 3) and detection limits of this technique.



(a)

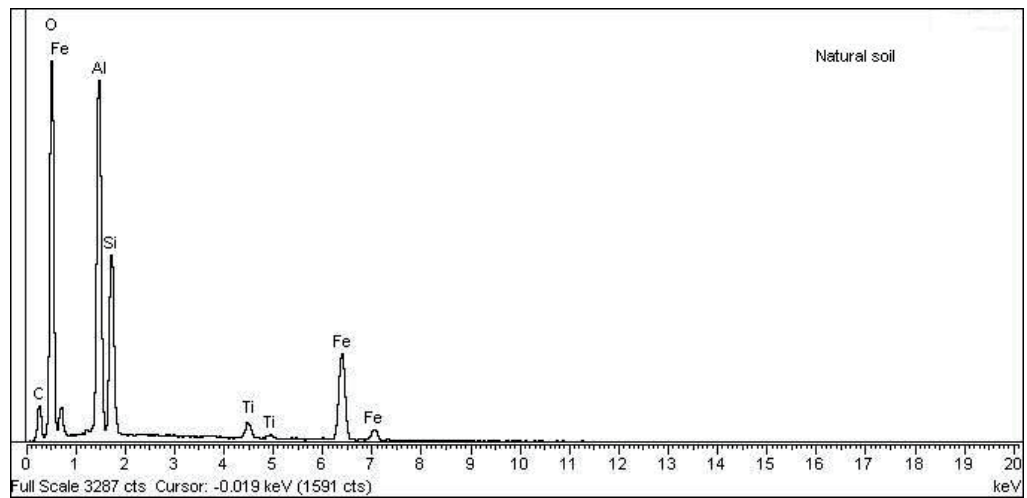


(b)

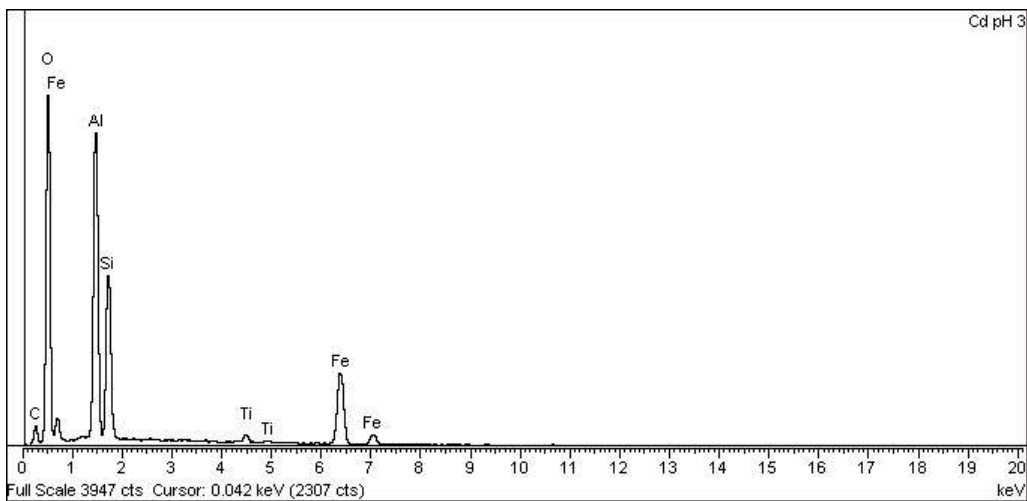


(c)

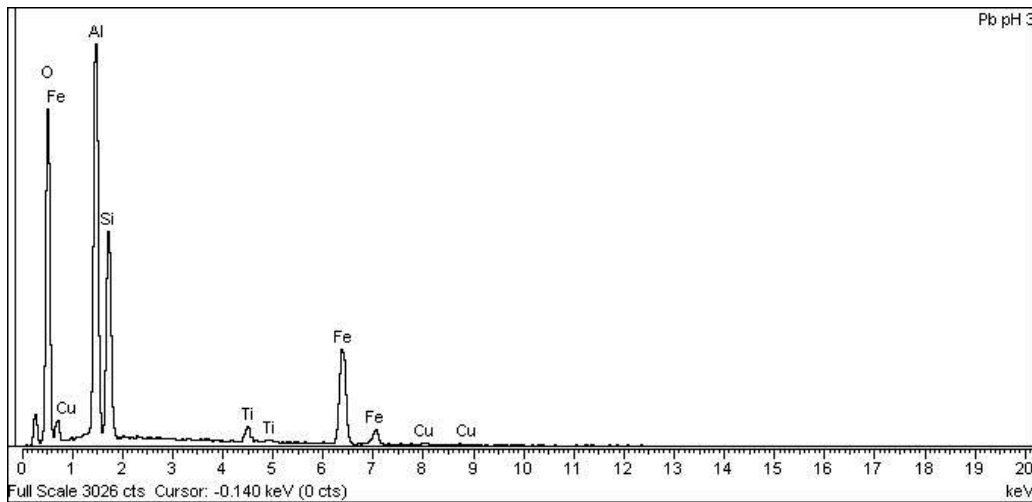
**Figure 4** - Scanning electron images (SEM) from samples: a) natural soil (secondary electron image); b) cadmium diffusion test and c) lead diffusion test (backscattering electron images).



(a)



(b)



(c)

**Figure 5** - Electron X-ray diffraction (EDX) spectrum from samples: a) natural soil; b) cadmium diffusion test and c) lead diffusion test.

### 3.4 Simulation of pollutant transport through a landfill bottom liner

Simulation results indicate that the permeability coefficient is the most significant parameter in the maximum pollutant concentration at the bottom of the CCL (Figure 6) when compared to diffusion ( $D^*$ ) and distribution ( $K_d$ ) coefficients for the adopted range of parameter values. The maximum base concentration, considering zero adsorption and liner thickness of 0.6-1.0 m, varied from 2-2,5%

and 6.4-6.8% of the initial concentration applied at the top of the liner, respectively, for permeability coefficients of  $1.10^{-9}$  and  $1.10^{-8}$  m/s. For  $K_d$  and  $D^*$  equal to, respectively, 10 mL/g and  $1.10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s, metal concentration at the bottom of CCL is 0.2% of the applied top concentration for a permeability coefficient of  $1.10^{-9}$  m/s and 1.8% for  $1.10^{-8}$  m/s. For the range of  $K_d$  values determined by the experiments, the maximum base concentration would be lower than 0.2% of the top concentration even for a 0.6m-thick CCL with a permeability coefficient of  $1.10^{-8}$  m/s (Figure 7).

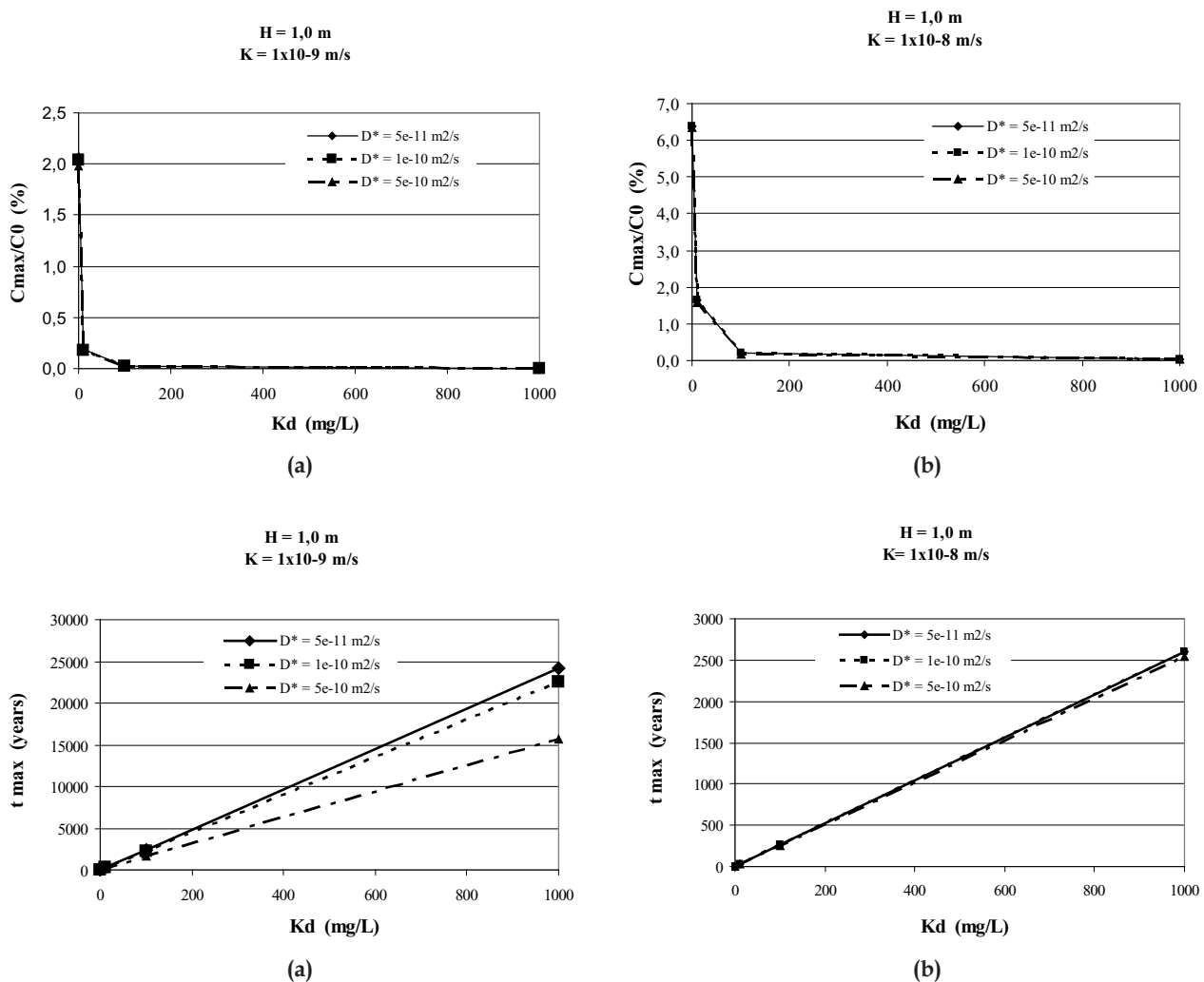


Figure 6 - Simulation of pollutant transport through a landfill bottom liner with 1.0 m thickness.

The distribution coefficient ( $K_d$ ) is the main parameter involved in the time necessary to achieve the maximum pollutant concentration at the bottom of the CCL (Figure 15). Long periods are necessary to achieve the maximum concentration

at the bottom of a CCL; for instance, for a 0.6 m thickness almost 10,000 years would be necessary, indicating the effective heavy metal retention by a liner constructed with the lateritic soil.

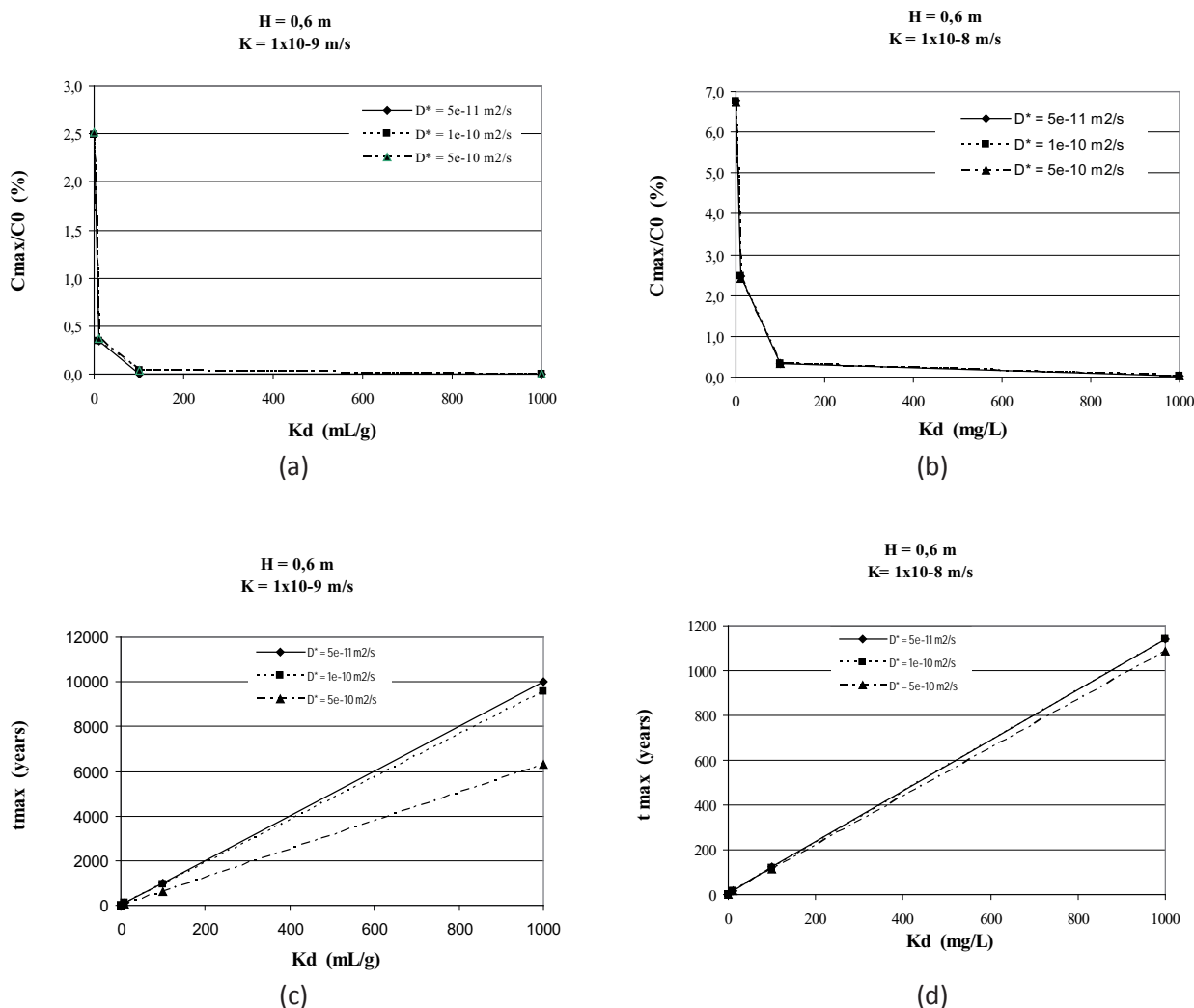


Figure 7 - Simulation of pollutant transport through a landfill bottom liner with 0.6 m thickness.

Syafalni et al. (2012) performed the treatment of landfill leachate via a coagulation-flocculation purification methodology using lateritic soil and noted its efficiency to remove 65.7% of the chemical oxygen demand (COD) and 81.8% of the turbidity. On the other hand, Varank et al. (2011), comparing the performance of four alternative liner systems in the migration of various organic and inorganic contaminants (heavy metals), including a non lateritic clay liner, concluded that leachate contaminants may reach the groundwater in trace concentrations.

#### 4 CONCLUSIONS

Metal migration and retention through the soil is pH dependent and pH does not remain constant along the diffusion test. For pH 8.0,

the effect of hydrolysis limited the possibility of diffusion and adsorption, probably resulting in the formation and precipitation of metal salts and bases which however could not be detected by the EDX spectrometer.

Diffusion coefficients were estimated as  $1 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  for cadmium and lead at the tested pH values.

Cadmium and lead were intensively adsorbed in the lateritic soil, resulting in high retardation factors ( $R_d > 100$ ).

Simulations of metal transport through 0.6-m clay liners constructed with this soil indicate that both metals would be practically immobile inside the soil layer, as maximum concentrations lower than 0.2% of the concentration applied at the top of the soil layer will reach the bottom of the layer after 2,000 years. However, the pollutant migration

model did not consider different bonding strengths and the effect of time on adsorption, so simulations must still be regarded as qualitative for lateritic soils, which are constituted by a high content of variable-charge minerals.

According to the results, we consider that compacted lateritic clay liners could, therefore, act as satisfactory mineral barriers for this type of contaminants, presenting different efficiency for different pollutants.

## ACKNOWLEDGMENTS

*The authors would like to thank FAPESP for the financial support, to Fernanda Parmigiani Antunes, and to Maurício H. Kakazu and Alder Sebastião A. Pereira for their help in the chemical analyses.*

## REFERENCES

- ASTM - American Society for Testing and Materials. 2001. ASTM D4972-01- Standard Test Method for pH of Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- \_\_\_\_ASTM. 2007. D422-63 - Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- \_\_\_\_ASTM. 2010. D4318-10 - Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- \_\_\_\_ASTM. 2012. D698-12-Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (600 kN-m/m<sup>3</sup>)), ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Aswathanarayana U. 1995. Geoenvironment - an introduction. A.A. Balkema, Rotterdam/Brookfield, 292 pp.
- Boscov M.E.G. 1997. Contribuição ao projeto de sistemas de contenção de resíduos perigosos utilizando solos lateríticos. São Paulo. 2 v. Tese de doutoramento, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 350 p.
- Freeze R.A & Cherry J.A. 1979. Groundwater. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 604 pp.
- Goldstein J.I., Newbury D.E., Joy D., Lyman C., Echlin P., Lifshin E., Sawyer L., Michael J. 2003. Scanning electron microscopy and X ray microanalysis. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 689pp.
- Gonçalves M.A., Nogueira J.M.F., Figueiras J., Putnis C.V., Almeida C. 2004. Base metals and organic content in stream sediments in the vicinity of a landfill. Applied Geochemistry, 19:137-151.
- Hemsi P.S. 2001. Um estudo da adsorção de poluentes em um latossolo paulista considerando a carga variável e o ponto de carga nula. São Paulo. Dissertação Mestrado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 120p.
- ISSMGE - International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. 2006. Report of the ISSMFE Technical Committee TC-5 on Environmental Geotechnics. CD-ROM.
- Kersten M., Moor H.C., Johnson C.A. 1997. Speciation of trace metals in leachate from a MSWI bottom ash landfill. Applied Geochemistry, 12: 675-683.
- Kugler H., Ottner F., Froeschl H., Adamcova R., Schwaighofer B. 2002. Retention of inorganic pollutants in clayey base sealings of municipal landfills. Applied Clay Science, 21: 45-58.
- Lollar B. S. 2005. Environmental Geochemistry. Elsevier, Itália, 630 pp.
- McBride M.B. 1994. Environmental Chemistry of Soils. Oxford University Press, New York, 405pp.
- McLaren A.C. 1991. Transmission electron microscopy of minerals and rocks. Cambridge University Press, Cambridge, 387pp.
- Meng S., Wang H., Liu H., Ynag C., Wei Y., Hou D. 2014. Evaluation of the ability of ferrihydrite to bind heavy metal ions: Based on formation environment, adsorption reversibility and ageing. Applied Geochemistry, 45: 114-119.

- Musso M. 2008. Transporte de solutos em barreiras de material argiloso compactado (CCL) e geocomposto bentonítico (GCL): fluxos diretos, acoplados e comportamento membrana. Tese de doutorado, EESC, Universidade de São Paulo, 227p.
- Nogami J.S. & Villibor D.J. 1995. Pavimentos de baixo custo com solos lateríticos. Editora Villibor, 213pp.
- Parfenoff A., Pomerol C., Tourenq J. 1970. Les minéraux en grains: méthodes d'étude et détermination. Masson, Paris, 578 pp.
- Rodella A. A. & Alcarde J. C. 1994. Avaliação de materiais orgânicos empregados como fertilizantes. *Scientia Agricola*, 51(3):556-562.
- Roehl K.E. & Czurda K. Diffusion and solid speciation of Cd and Pb in clay liners. 1988. *Applied Clay Science*, 12: 387-402.
- Rowe R.K. & Booker J.R. 1985. 1-D pollutant migration in soils of finite depth. *ASCE, Journal of Geotechnical Engineering*, 111 (4):479-499.
- Rowe R.K., Booker J.R., Fraser M.J. 1994. *Pollute v.6 - User's Guide*. Canada.
- Rowe R.K. 1988. Contaminant migration through groundwater- the role of modeling in the design of barriers. Eleventh Canadian Geotechnical Colloquium. *Canadian Geotechnical Journal*, 25:778-798.
- Rowe R.K., Caers C.J., Barone F. 1988. Laboratory determination of diffusion and distribution coefficients of contaminants using undisturbed clayey soil. *Canadian Geotechnical Journal*, 25: 108-118.
- Shackelford C.D. 1989. Diffusion of contaminants through waste containment barriers. *Transport Research Record*, 1219: 169-182.
- Shackelford C.D. 1993. Contaminant transport. In: DANIEL, D.E. (Ed.). *Geotechnical practice for waste disposal*. Chapman & Hall Londres, p.: 33-65.
- Shackelford C.D. & Daniel D.E. 1991. Diffusion in saturated soils: II- results for compacted clay. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 117 (3): 467-484.
- Sposito G. 1989. *The Chemistry of Soils*. Oxford University Press, New York, 277pp.
- Stuermer M. M., Boscov M. E. G., Oliveira, E. 2008. Metal transport parameters of a gneiss saprolitic silty soil for liner design. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(1): 417-554.
- Syafalni, Lim H.K., Ismail N., Abustan I., Murshed M.F., Ahmad A. Treatment of landfill leachate by using lateritic soil as a natural coagulant. *Journal of Environmental Management*, 112: 353-359.
- Tsugawa J.K. 2004. Solubilização e difusão reversa de cátions metálicos de uma argila laterítica em meio ácido. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 160p.
- Varank G., Demir A., Top S., Sekman E., Akkaya E., Yetilmezsoy K., Bilgili M.S. 2011. Migration behavior of landfill leachate contaminants through alternative composite liners. *Science of the Total Environment*, 409: 3183-3196.
- Walkey A. & Black I. A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 34: 29 - 38.

# O EMPREGO DA GEOMORFOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DE SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS DE MASSA E INUNDAÇÃO – MIMOSO DO SUL/ES

*THE USE OF THE GEOMORPHOLOGY TO LANDSLIDE AND FLOODING SUSCEPTIBILITY EVALUATION – MIMOSO DO SUL/ES*

MARCELO EDUARDO DANTAS

*CPRM – Serviço Geológico do Brasil, Rio de Janeiro, RJ, Brasil  
E-mail: marcelo.dantas@cprm.gov.br*

EDGAR SHINZATO

*CPRM – Serviço Geológico do Brasil, Rio de Janeiro, RJ, Brasil  
E-mail: edgar.shinzato@cprm.gov.br*

JENNIFER FORTES CAVALCANTE RENK

*Geoambiente - SR, São José dos Campos, SP, Brasil  
E-mail: jennifer.renk@geoambiente.com.br*

JULIANA MACEIRA MORAES

*CPRM – Serviço Geológico do Brasil, Rio de Janeiro, RJ, Brasil  
E-mail: juliana.moraes@cprm.gov.br*

MARCELY FERREIRA MACHADO

*CPRM – Serviço Geológico do Brasil, Salvador, BA, Brasil  
E-mail: marceley.machado@cprm.gov.br*

ALINE COSTA NOGUEIRA

*CPRM – Serviço Geológico do Brasil, Salvador, BA, Brasil  
E-mail: aline.nogueira@cprm.gov.br*

## RESUMO ABSTRACT

A Geomorfologia consiste num dos campos de conhecimento mais utilizados no auxílio à elaboração de mapas de suscetibilidade a movimentos de massa e inundações. Seu emprego pode estar associado a uma abordagem descritiva e morfológica, baseada em identificação de padrões de relevo homólogos por meio de fotoanálise de fotografias aéreas e imagens de satélite. Este instrumental conferido pelos mapas geomorfológicos acoplado com um arsenal de parâmetros morfométricos deve ser considerado apenas como um tema básico para elaboração de mapas de suscetibilidade. É primordial sua análise combinada com o estudo do substrato rochoso; os mantos de intemperismo e as formações superficiais; e os solos, do ponto de vista pedológico, incluindo suas características morfológicas,

Geomorphology is one of the most useful areas of Geosciences to support the elaboration of susceptibility maps of mass movements and floods. Your use could be associated on a descriptive and morphological analysis, based on identification of relief patterns by photointerpretation and remote sensing. The whole information available by geomorphological maps linked with the toolset provided by morphometric parameters and analysis must be considered only a basic layer to build susceptibility maps. So, the combined analysis and studies of bedrock, relief, weathering profiles and soils (including physical, chemical, morphological and mineralogical properties) have great importance for susceptibility maps elaboration. Based on these concepts, was produced the relief pattern map of

físicas, químicas e mineralógicas. Com base nesse conjunto de premissas, foi elaborado o mapa de padrões de relevo do município de Mimoso do Sul, situado no baixo-médio vale do rio Itabapoana, no estado do Espírito Santo. Esta região abrange desde as planícies inundáveis, exibindo solos profundos, mal drenados, apresentando diferentes graus de hidromorfismo como os Gleissolos associados aos Neossolos Flúvicos e os terrenos tabulares a colinosos de declividades suaves, espessos mantos de alteração e solos bastante estruturados, muito profundos e bem drenados (Latosolos) a áreas serranas com encostas íngremes, paredões rochosos e um amplo domínio de solos rasos e pouco evoluídos, normalmente pedregosos ou rochosos (Cambissolos e Neossolos Litólicos). Com base nos resultados obtidos, conclui-se que o mapeamento de padrões de relevo e a análise integrada do meio físico, constituem-se num valioso instrumento para subsidiar os estudos de avaliação e determinação de graus de suscetibilidade a movimentos de massa e inundação.

**Palavras-chave:** Geomorfologia; Movimentos de Massa; Vale do rio Itabapoana; Espírito Santo.

## 1 INTRODUÇÃO

O estudo da distribuição das formas de relevo e os processos geomorfológicos associados em determinada região representa uma valiosa ferramenta para subsidiar a elaboração de projetos correlatos à Geologia de Engenharia em distintas escalas de análise.

Uma das considerações mais relevantes que devem ser destacadas a partir da análise da literatura é o encadeamento espacial entre os distintos processos em análise (deslizamentos – corridas de detritos – enxurradas – inundações). Os processos geomorfológicos dominantes em zonas serranas e, secundariamente, no domínio de marres-de-morros, são os movimentos de massa que promovem uma expressiva remoção de blocos de rochas e massa de solo (incluindo biomassa) das altas vertentes e deposição desse material erodido nas baixas vertentes, sopés das escarpas ou patamares litoestruturais em forma de depósitos de encosta em ambiente de alta energia (colúvios e depósitos de tálus). Associados aos movimentos de massa ocorrem processos de enxurradas sobre os canais principais que drenam das “terras altas” para as “terras baixas”. Por fim, no domínio das baixadas, observa-se uma

Mimoso do Sul municipality along the middle-lower Itabapoana river valley, in Espírito Santo state. This region covers since large floodplains with deep soils presenting different degrees of hydromorfism, such as the gleys associated with the alluvial soils and tablelands and hilly terrains with gentle slopes and very thick and well-drained and structured weathering profiles and soils, until mountainous areas with steep slopes, rock walls and the dominance of shallow and stoned weathering profiles and young soils. These results obtained show that relief pattern mapping and the combined analysis of geoenvironmental variables represent a valuable tool to aid and support studies of assessment and determination of degrees to susceptibility maps of mass movements and floods.

**Keywords:** Geomorphology; Landslides; Itabapoana river valley; Espírito Santo State.

expressiva redução de energia e concomitante espraçamento das águas que desceram vertiginosamente das serras para promover inundações nos baixos cursos fluviais.

Segundo Mousinho & Xavier da Silva (1968), em seu pioneiro e visionário artigo, a análise integrada do meio físico e biótico, associada com a avaliação da evolução da ocupação humana sobre determinada região, constitui uma das principais contribuições da Geomorfologia para determinação de áreas de maior suscetibilidade à ocorrência de movimentos de massa.

Decerto, a evolução do conhecimento e das metodologias de análise em cartografia geotécnica desenvolvida por distintas escolas de Geologia de Engenharia vêm utilizando a geomorfologia como um relevante instrumento de análise. Neste cenário, destaca-se o desenvolvimento de metodologias de mapeamento geotécnico, tanto na Europa Oriental (Matula, 1979, dentre outros), quanto na Austrália, através do programa PUCE (Grant & Finlayson, 1978 e Finlayson, 1984). Este conjunto de metodologias desenvolvido nas últimas décadas, via de regra, utilizam uma compartimentação do meio físico baseada numa classificação hierárquica de padrões de relevo, a partir



dos quais são inseridas variáveis como litologias, estruturas, coberturas inconsolidadas e o comportamento das águas superficiais e subterrâneas para elaboração das cartas geotécnicas.

No Brasil foram desenvolvidas, a partir dos anos 80 e 90, metodologias similares às descritas anteriormente. A partir da caracterização fisiográfica de uma determinada área de estudo, procede-se a uma compartimentação do território em unidades de terreno para avaliação do comportamento geológico-geotécnico dos materiais e sua variabilidade espacial. Um grande número de trabalhos foi desenvolvido abordando tais diretrizes metodológicas. Destacam-se, neste contexto: Lollo & Zuquette, 1996; Ferreira, 1999; Sobreira, 2001; Vedovello et al., 2002; Paula et al., 2008, Silva & Dantas, 2011; Diniz, 2012; Santos, 2014; dentre outros.

Por outro lado, o estudo da evolução das vertentes em zonas montanhosas em áreas tropicais úmidas no Sudeste Brasileiro também tem sido objeto de análise de um grande número de pesquisadores que se utilizam de uma abordagem geomorfológica clássica, buscando compreender os processos que catalisam os movimentos de massa (Mousinho & Xavier da Silva, 1968; Jones, 1973; De Ploey & Cruz, 1979; Fernandes & Amaral, 1996; Guimarães et al., 1998; Vieira et al., 1998; Coelho Netto, 1999; Fernandes et al., 2001; Vieira & Fernandes, 2004; Avelar et al., 2011; Coelho Netto et al., 2011, dentre outros).

O presente estudo pretende apresentar uma metodologia de análise integrada do meio físico em base geomorfológica e pedológica, aliado com a análise das coberturas inconsolidadas, com o intuito de subsidiar a elaboração de cartas geotécnicas, com enfoque especial para geração de mapas de suscetibilidade a movimentos de massa e inundações.

Cabe ressaltar ainda que os movimentos de massa não ocorrem uniformemente ao longo do espaço e do tempo (Wolman & Miller, 1960). Estes são desencadeados, episodicamente, em eventos pluviais de grande magnitude (chuvas intensas), em meio a um período úmido, com alta umidade antecedente, conforme já ressaltado por Coelho Netto et al. (2011). Deste modo, pode-se afirmar que estes “eventos críticos” de curta duração e rara recorrência tendem a ser mais importantes

na evolução geomorfológica das serras e escarpas íngremes recobertas por mata atlântica do que o intervalo de longos períodos de moderada precipitação. Advoga-se aqui, portanto, uma tese Neocatastrofista para a evolução geomorfológica das zonas montanhosas tropicais úmidas no Sul e Sudeste Brasileiro.

Entretanto, sabemos que a ocorrência de “chuvas intensas” por si só, não é um parâmetro suficiente para mapearmos as áreas mais suscetíveis, pois há muitos casos em que houve eventos críticos sem a ocorrência de deslizamentos. O estudo dos condicionantes do meio físico e a análise do padrão de uso e ocupação do solo (com destaque para a expansão urbana desordenada na periferia das cidades) são, em aliança com a análise das chuvas de grande magnitude, cruciais para a elucidação dos processos que catalisam os trágicos eventos que, periodicamente, assolam as cidades serranas na fachada atlântica brasileira.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Com o intuito de fornecer subsídios à elaboração de mapas de suscetibilidade a movimentos de massa e inundações, foi elencada uma série de premissas e opções metodológicas, que serão descritas a seguir:

1) A compartimentação morfológica dos terrenos e a elaboração de mapas de padrões de relevo por meio de fotoanálise de sensores remotos e conforme biblioteca pré-estabelecida.

2) O estudo da Geodiversidade e a análise integrada do meio físico, com enfoque especial na interrelação Geologia – Regolitos (solos *in situ* e depósitos de encosta/ aluviais) - Relevo - Solos - Clima e Hidrologia de Encostas para determinação de unidades de terreno, numa aproximação com a metodologia desenvolvida por Lollo & Zuquette, 1996.

3) Análise dos condicionantes litoestruturais e a influência ativa ou passiva do substrato geológico na configuração dos terrenos e dos solos

4) Análise morfoestratigráfica e a associação entre formas de relevo, processos geomorfológicos e depósitos correlativos (figura 1).

Para definição e mapeamento de padrões de relevo, adotou-se os 3º e 4º táxons da metodologia de Ross (1992), com base em interpretação de

mosaico de ortofotos digitais acopladas com modelo digital de terreno em escala 1:25.000. Em adendo, foram identificados dois primeiros táxons, individualizando as unidades morfoestruturais e morfoesculturais em cada município.

Com base nesse conjunto de premissas e seguindo metodologia proposta por Dantas (2013), foi elaborado o mapa de padrões de relevo do município de Mimoso do Sul, situado no extremo sul do Estado do Espírito Santo, no baixo-médio vale do rio Itabapoana (figura 2).

Juntamente com o mapeamento dos padrões de relevo, foram avaliados, para cada padrão, as litologias, os solos e as coberturas inconsolidadas e os seguintes parâmetros morfométricos: amplitude altimétrica; gradiente; geometria de topos e vertentes; padrão e densidade de drenagem. Essa abordagem proposta por Ponçano et al. (1979), consiste na separação, por fotoanálise, de conjuntos de formas de relevo com textura e padrão semelhantes, ou zonas homólogas.

A análise da suscetibilidade natural a movimentos de massa e inundações, por fim, segue as diretrizes formuladas por Bitar (2014) no programa de elaboração de cartas municipais de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações em convênio entre CPRM e IPT.

Santo/ Geobases em associação com o MDE com 5 x 5m de pixel. Com o intuito de melhorar a visualização dos terrenos, procurou-se realçar as áreas de baixada, bem como as áreas de topo das elevações. Através das ferramentas do GlobalMapper 7.0 aplicou-se uma sobreposição do MDE, pseudo iluminado (*slope shader*), com as ortofotos gerando maiores contrastes nessas duas posições do relevo, resultando em maior facilidade na separação dessas unidades (figura 3). As unidades foram digitalizadas em tela, utilizando-se o software ArcGis 10.2 no formato vetorial em linha, sendo posteriormente convertido para o formato de polígono. Uma das vantagens da digitalização em tela foi a utilização do zoom para melhorar a precisão da demarcação das unidades em escala maiores que a de publicação. Além disso, utilizou-se também a ferramenta *smooth* para aumentar o número de pontos por linha e, conseqüentemente, melhorar o contorno das unidades. O módulo 3D do Globalmapper foi consultado simultaneamente em uma tela paralela para facilitar as interpretações das feições. Posteriormente, cada polígono foi classificado através da tabela de atributos com as referidas descrições de cada unidade mapeada (Shinzato et al., 2012).

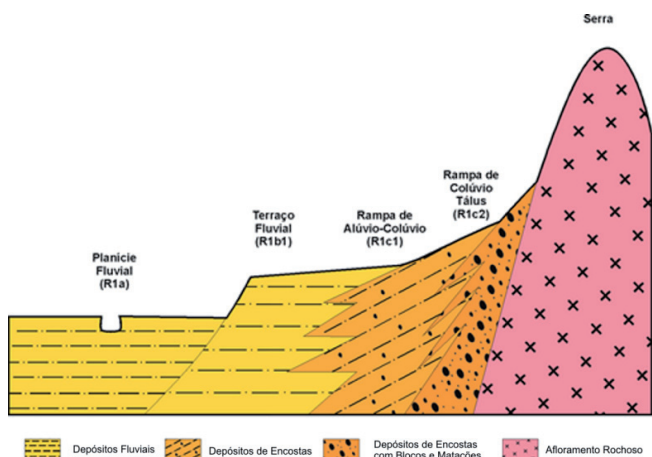


Figura 1 - Distribuição esquemática dos distintos ambientes deposicionais quaternários numa catena.

Diversas técnicas de sensoriamento remoto foram empregadas para uma melhor interpretação e delimitação dos padrões de relevo. Foram utilizadas ortofotos digitais em escala 1:25.000, produzidas pelo Instituto Capixaba de Pesquisa e Assistência Técnica e Extensão Rural do Estado do Espírito

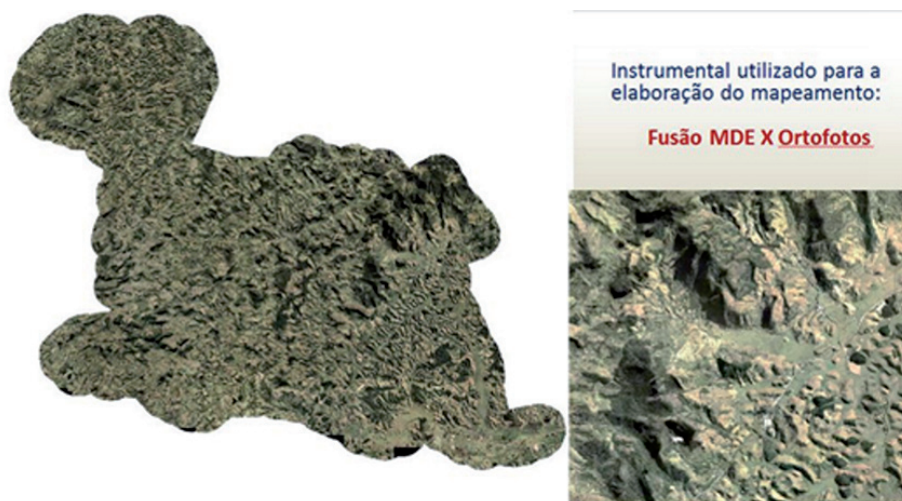


Figura 2 - Localização do município de Mimoso do Sul no Estado do Espírito Santo.

Os produtos gerados a partir do tratamento digital das imagens e do MDE foram: declividade; hidrografia; curvas de nível com equidistância de 5 metros (figura 04); relevo sombreado com duas direções de visada – NE e NW (figura 05); e hipsometria (figura 06).

Foram realizadas campanhas de campo com registro de pontos de interesse utilizando aparelhos de GPS de navegação (Global Positioning System) GARMIN GPSmap62S com posterior inclusão dos pontos no mapa, já com o banco de dados completados.

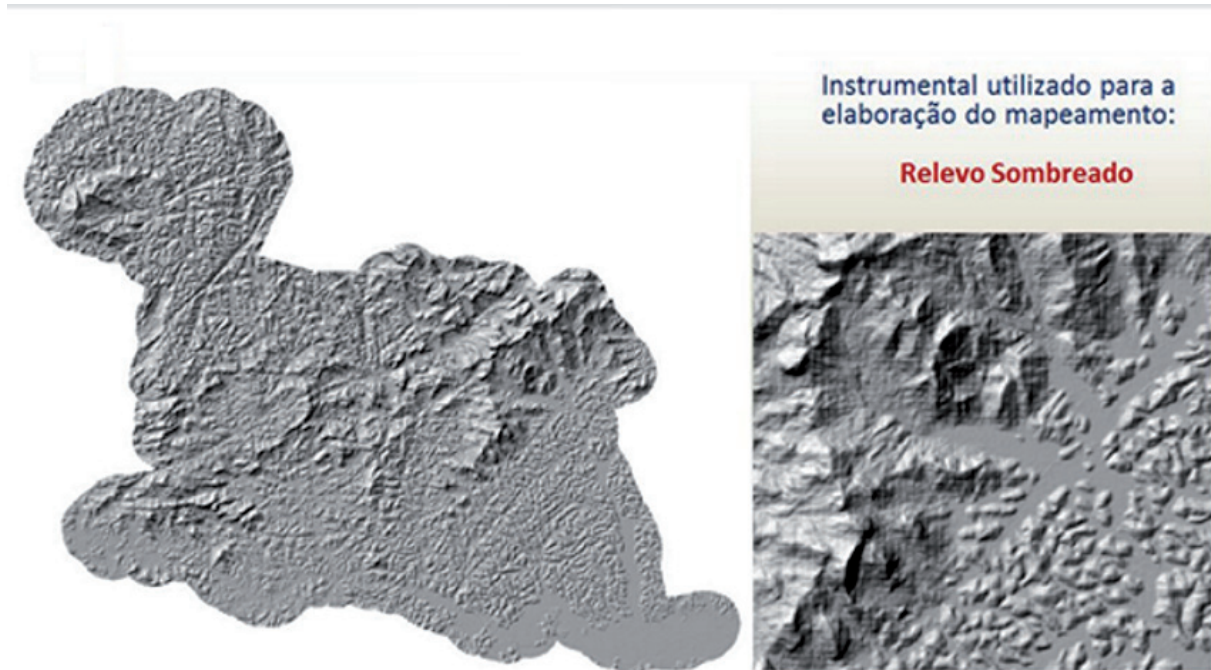
A partir das informações obtidas através da etapa de aferição de modelos em campo, a interpretação preliminar das ortofotos digitais com MDT foi refinada através da correção dos modelos de padrões de relevo propostos, quando estes não conferiam com as observações de campo. Todo mapeamento geomorfológico foi executado em forma de SIG com o uso do Programa ArcGis 10.2. A projeção cartográfica utilizada foi Universal Transversa de Mercator (UTM), zona 24 sul com parâmetros de datum adotado referente ao Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS2000).



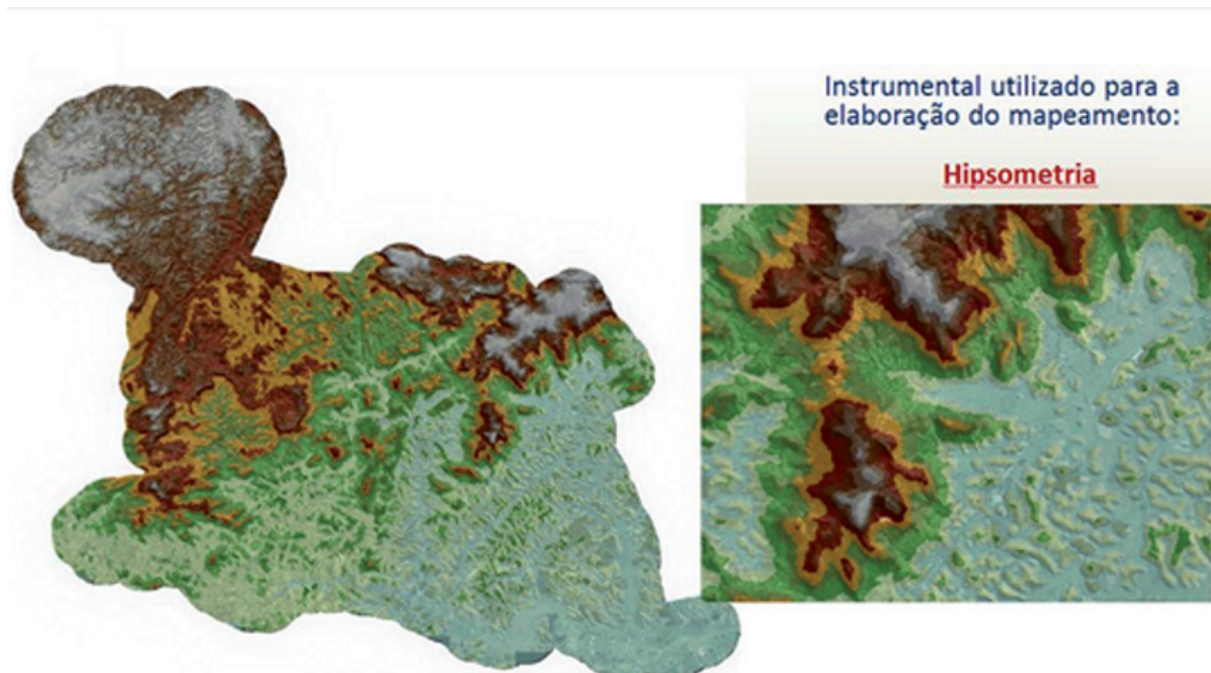
**Figura 3** - Arquivo raster resultante da fusão entre as ortofotos digital e o MDE do município de Mimoso do Sul, com limite acrescido de 2 km de buffer. Destaca-se a acurácia da imagem em distintas escalas de apresentação.



**Figura 4** - Arquivo vetorial de curvas de nível com equidistância de 5 metros. No plano acima, associado com o raster da imagem. No plano abaixo, associado com a interpretação de padrões de relevo.



**Figura 5** - Arquivo raster de relevô sombreado com visada NW do município de Mimoso do Sul, com limite acrescido de 2 km de buffer. Destaca-se o nítido e contrastante contato morfológico entre o relevô serrano das “terras altas” e o relevô colinoso com extenso aluvionamento das “terras baixas”.



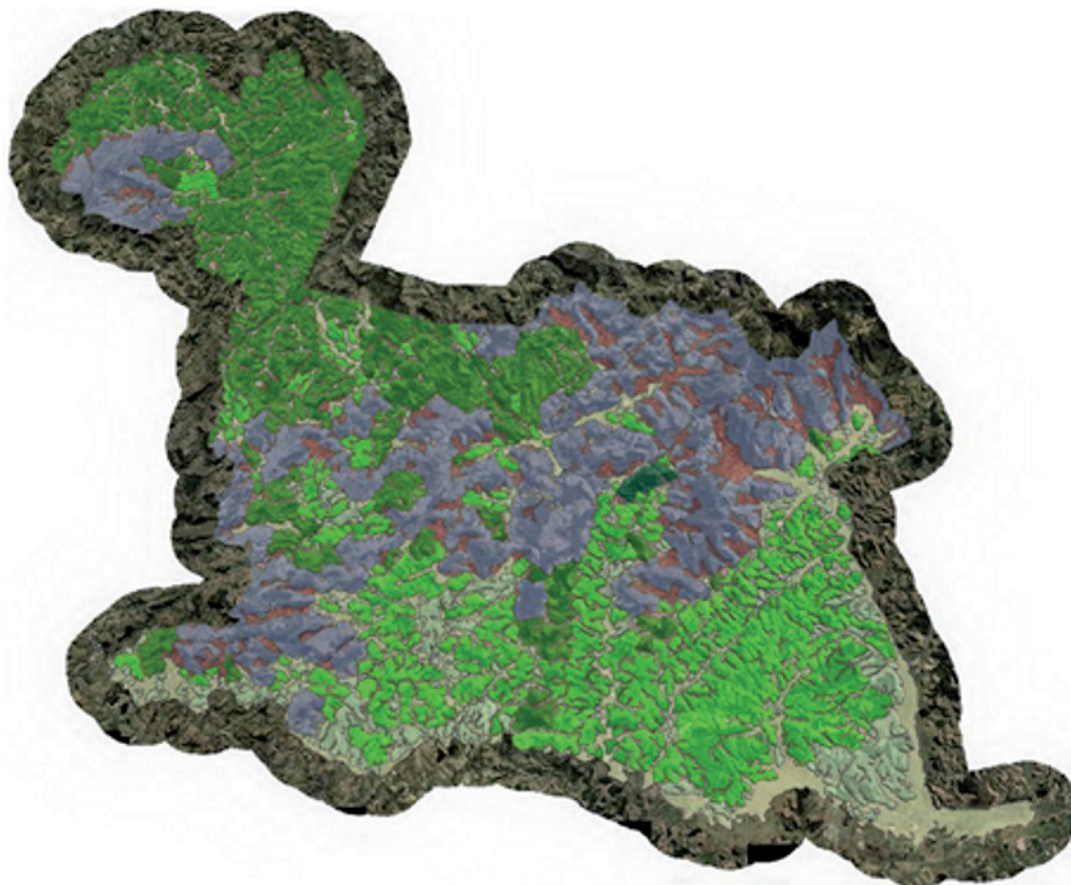
**Figura 6** - Arquivo raster de hipsometria resultante da reclassificação do MDE do município de Mimoso do Sul. Ressalta-se, nas “terras baixas”, predomínio de cores esverdeadas em cotas inferiores a 300 metros, enquanto que as “terras altas” apresentam cores que variam entre amarelo, marrom e cinza em cotas que atingem mais de 1.200 metros de altitude.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

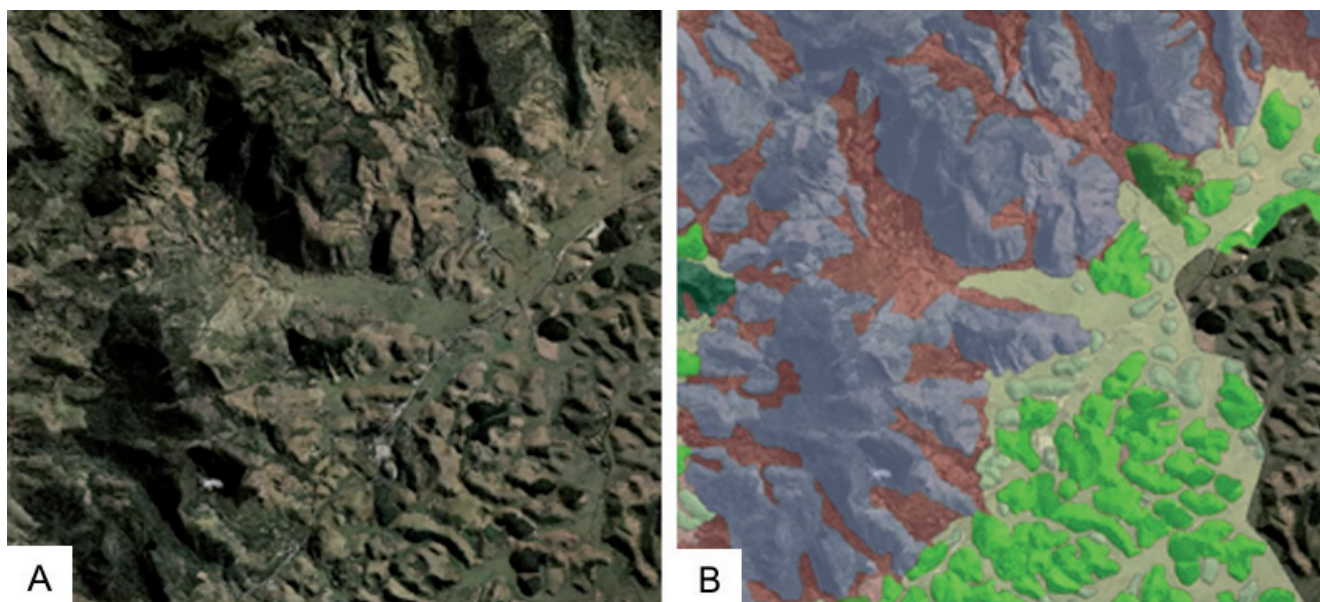
O município de Mimoso do Sul situa-se no extremo sul do Estado do Espírito Santo, inserido no médio-baixo do rio Itabapoana, junto à divisa com o Estado do Rio de Janeiro. Este município apresenta um diversificado conjunto de padrões geomorfológicos que podem ser sumariamente separados em dois domínios: os compartimentos das “terras baixas” e das “terras altas”. As terras baixas, típicas dos ambientes litorâneos ou preli-torâneos capixabas, são representadas por extensas várzeas, tabuleiros, colinas e morros de baixa amplitude de relevo, embutidas numa região geomorfológica denominada de Depressão do rio Itabapoana. Por outro lado, as terras altas, típicas do acidentado interior capixaba, são representadas

por morros altos e serras de alta amplitude de relevo, frequentemente recobertas por depósitos de encosta. Estes terrenos inserem-se, genericamente, no contexto dos contrafortes da Mantiqueira/Caparaó (figura 7). O contraste morfológico entre esses dois macro-compartimentos geomorfológicos é marcante (figura 8) e determinam distintos comportamentos frente aos processos erosivo-deposicionais (erosão, movimentos de massa, enxurradas e inundações).

Tal compartimentação geomorfológica conjugada com o mapeamento dos padrões de relevo produziu oito classes distintas e revelou-se uma valiosa ferramenta de análise para elaboração de mapeamentos de suscetibilidade a movimentos de massa e inundação.



**Figura 7** - Mapa de padrões de relevo do município de Mimoso do Sul elaborado a partir da Fusão Ortofotos X MDE. As “terras baixas” situam-se na porção sudeste do município com predomínio de planícies (em cor amarela) e colinas e morros baixos (em cores verde-clara e verde). As “terras altas”, por sua vez, situam-se na porção centro-noroeste do município, com predomínio de morros altos (em cor verde-escuro) e serras (em cor azul). Destaca-se a ocorrência de rampas de colúvio/tálus (em cor vermelha) sobre os terrenos acidentados do relevo serrano.



**Figura 8** - Detalhe de zona limítrofe entre as “terras altas” e as “terras baixas” em Mimoso do Sul. fusão Ortofotos X MDE (a). Mapa de Padrões de relevo (b). No mapa observa-se, a noroeste, o relevo acidentado da zona serrana (em azul) repleta de depósitos de encosta (em vermelho); a sudeste, observa-se o relevo ondulado das colinas e morros baixos (em cores verde-claro e verde) entremeadas com as espriçadas planícies aluvionares (em amarelo).

A seguir, será realizada uma descrição sistemática de todas as oito unidades de terreno identificadas no município: Planície fluvial do médio-baixo vale do rio Itabapoana; Planície fluviomarinha do baixo vale do rio Itabapoana; Tabuleiros prelitorâneos do baixo vale do rio Itabapoana; Colinas amplas da Depressão do rio Itabapoana; Colinas dissecadas e morros baixos da Depressão do rio Itabapoana; Morrotes em zonas de cisalhamento; Morros altos dos contrafortes Mantiqueira/ Caparaó; e Serras dos contrafortes Mantiqueira/ Caparaó.

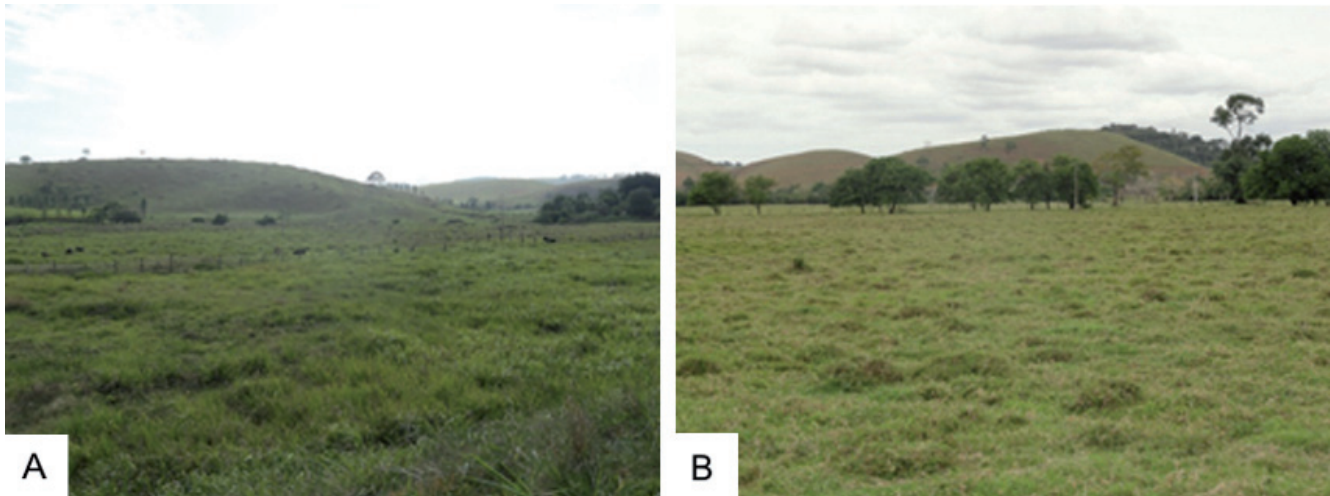
Todas as unidades de terreno foram delimitadas com ênfase numa compartimentação geomorfológica, acrescida de parâmetros morfométricos e informações de cunho pedológico e de coberturas inconsolidadas e uma correspondente avaliação qualitativa da suscetibilidade natural a movimentos de massa e inundações.

A primeira unidade de terreno relevante corresponde ao compartimento geomorfológico da **planície fluvial do médio-baixo vale do rio Itabapoana** (em cor amarela - vide figura 7). Esta unidade estende-se pelas extensas várzeas do rio Itabapoana e de seus principais afluentes: os rios Preto e Muqui do Sul e os córregos Santa Rosa, da Penha, São Pedro e do Sossego, embutidas em cotas muito baixas, entre 5 e 70 metros de altitude.

O cenário geomorfológico dominante é representado por vastas planícies de inundação e baixos terraços fluviais de relevo plano, constituídos por sedimentos holocênicos ou neopleistocênicos inconsolidados de origem aluvionar (figura 9). A rede de drenagem principal apresenta um padrão de drenagem original meândrico de alta sinuosidade estando, por diversos trechos, retificado.

Ocorrem solos profundos e muito profundos (>1.5m), normalmente contendo camadas estratificadas, com distribuição irregular da granulometria, tanto mais pronunciada quanto menos espessa for a camada de sedimentação e também de carbono, compreendendo os Neossolos Flúvicos e Gleissolos Háplicos, (EMBRAPA, 2013). O nível freático situa-se, normalmente, próximo à superfície, ou é aflorante, no período úmido, tornando essas áreas desfavoráveis à escavação ou obras subterrâneas, havendo uma necessidade de rebaiamento do nível freático para execução de obras construtivas. Podem ocorrer também camadas de sedimentos de baixa capacidade de suporte e muito compressíveis (solos moles), que quando submetidas a cargas elevadas podem comprometer a estabilidade das edificações.

Nestes tipos de terrenos prevalece a uma avaliação de uma suscetibilidade à inundação Alta (nas planícies) a Média (nos baixos terraços fluviais).



**Figura 9** - Amplas planícies aluviais do rio Itabapoana e córrego Santa Rosa Rosa, respectivamente em meio a um domínio colinoso de baixa amplitude de relevo. Mimoso do Sul/ES.

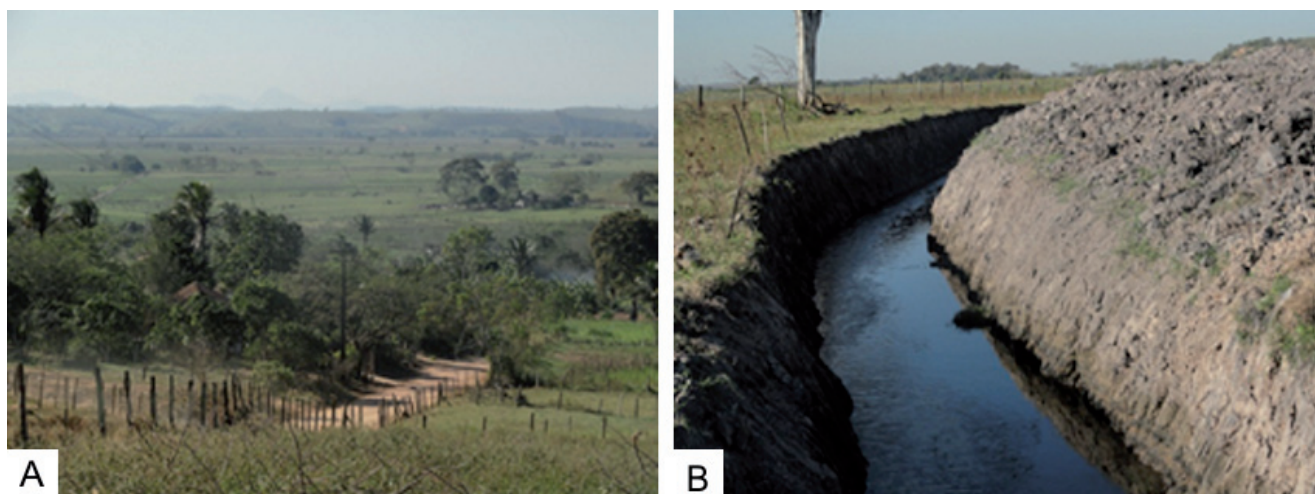
No baixo vale do rio Itabapoana, mais próximo à linha de costa, destacam-se duas unidades de terrenos de grande relevância para compreensão da Zona Litorânea: a Planície fluvio-marinha do baixo vale do rio Itabapoana e os Tabuleiros prelitorâneos do baixo vale do rio Itabapoana. A ocorrência destas unidades de terrenos é pouco expressiva em Mimoso do Sul, mas são representativas em municípios situados imediatamente a leste: Presidente Kennedy (ES) e São Francisco do Itabapoana (RJ).

A **planície fluvio-marinha do baixo vale do rio Itabapoana** ocupa uma vasta zona de várzeas do rio Itabapoana, podendo atingir mais de 5 quilômetros de largura e embutidas em cotas muito baixas, entre 1 e 5 metros de altitude, denunciando, assim, a interface entre os ambientes deposicionais fluviais e marinhos. O cenário geomorfológico dominante é representado por baixadas inundáveis de relevo plano, constituídos por sedimentos holocênicos inconsolidados de origem mista (figura 10). A rede de drenagem principal apresenta um padrão de drenagem meândrico de alta sinuosidade a divagante, condicionado, até certo ponto, pelo refluxo de maré. Ocorre solos com características de alta salinidade, detectada pela elevada condutividade elétrica e solos com elevado conteúdo de materiais sulfídricos -

Gleissolos Sálícos que, quando drenados ou oxidados, podem gerar materiais sulfúricos, muito ácidos, com pH inferior a 3,5 - Gleissolos Tiomórficos. (EMBRAPA, 2013). Por outro lado, podem apresentar reação alcalina pelo excesso de sódio ( $\text{Na}^+$ ) trocável, que causa a expansão e a dispersão das argilas, deteriorando as estruturas do solo, que devido à permeabilidade e condutividade muito lenta geram cores de redução, acinzentadas e escuras no perfil - Planossolos Nátricos. Neste caso, observam-se duas importantes limitações de cunho geotécnico: a presenças de solos com baixa capacidade de carga e com alta corrosividade.

Nestes tipos de terrenos prevalece a avaliação de uma suscetibilidade à inundação Alta. Entretanto, há de se ressaltar que os eventos de inundação nas planícies fluvio-marinhas são mais expressivos e prolongados em relação às planícies aluviais situadas a montante.

As duas unidades de terreno anteriormente descritas correspondem a compartimentos geomorfológicos com predomínio de ambientes deposicionais com suscetibilidade à inundação. As próximas unidades de terreno correspondem a compartimentos geomorfológicos característicos de unidades denudacionais, nas quais são avaliadas a suscetibilidade a movimentos de massa.

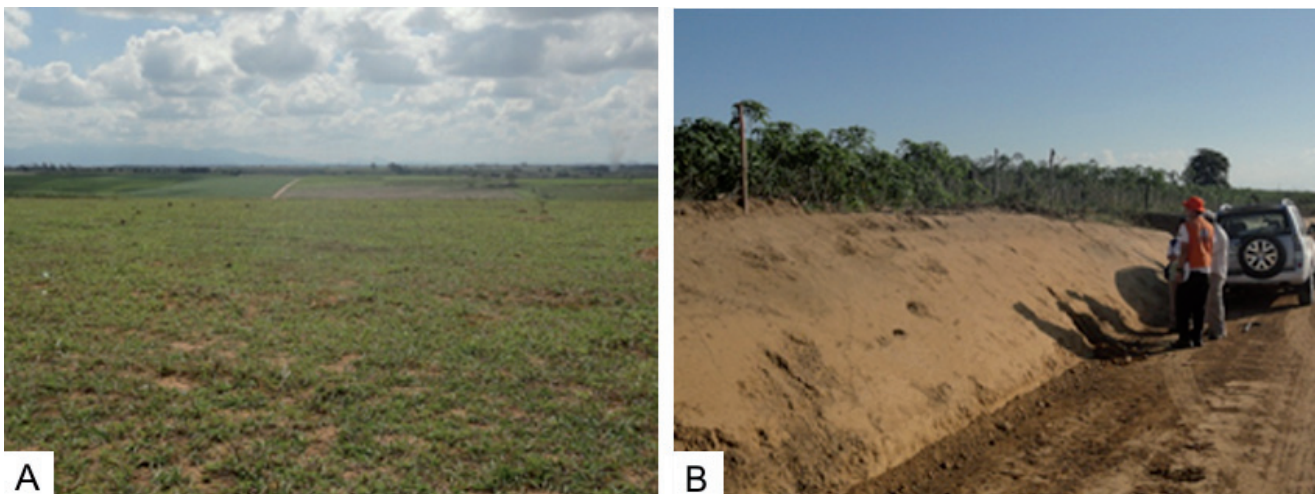


**Figura 10** - Extensa baixada fluvio-marinha do baixo curso do rio Itabapoana (a), com ocorrência de solos hidromórficos, ricos em sais e enxofre (Gleissolos Tiomórficos) (b). Divisa entre os Estados do Rio de Janeiro (São Francisco do Itabapoana/RJ) e do Espírito Santo (Presidente Kennedy/ES).

Os **tabuleiros preitorâneos do baixo vale do rio Itabapoana** apresentam um cenário geomorfológico constituído por vastas superfícies tabulares de relevo praticamente plano, sulcadas por uma rede de baixa densidade de drenagem originando episódicos vales em “U”, situadas em cotas baixas, entre 20 e 60 metros de altitude (figura 11). Tais feições são esculpidas em rochas sedimentares pouco litificadas de idade Neógena do Grupo Barreiras, com desenvolvimento de espessos regolitos e solos muito bem drenados, apresentando nível freático muito profundo. Registra-se

um amplo predomínio de solos profundos e lixiviados (Latosolos Amarelos) de textura argilosa, com estrutura granular e forte estabilidade frente a processos erosivos. Tais terrenos apresentam um ótimo comportamento geotécnico com ocorrência de solos com alta capacidade de carga e excelente escavabilidade.

Sobre os tabuleiros prevalece a uma avaliação de uma suscetibilidade a movimentos de massa Baixa. Estes terrenos destacam-se por sua estabilidade morfodinâmica e excelente potencial para múltiplas formas de uso e ocupação.



**Figura 11** - Extensas superfícies tabulares dos topos de tabuleiros (a), embasados por rochas sedimentares do Grupo Barreiras (b). Desenvolvimento de solos espessos e bem drenados (Latosolos Amarelos). Município de São Francisco do Itabapoana/RJ.



As **colinas amplas da Depressão do rio Itabapoana** (em cor verde-clara – vide figura 7) apresentam um cenário geomorfológico constituído por um relevo colinoso de declividades suaves e baixas amplitudes de relevo, em geral, inferiores a 50 metros de desnivelamento. Os topos apresentam formato alongado ou arredondado com padrão similar a “dorso de baleia” com vertentes convexas de baixas declividades, invariavelmente, inferiores a 10°. Esta unidade de terreno reflete, de forma mais contundente, a atuação do intenso processo de intemperismo químico sobre substrato rochoso, gerando espessos regolitos e solos bem drenados, com nível freático profundo. Deste modo, o relevo suave colinoso está situado em cotas baixas, restrito à porção sudeste do município ou próximo à calha dos rios Itabapoana e Preto e o baixo curso do rio Muqui do Sul, em cotas que variam entre 50 e 130 metros de altitude (figura 12).

Esta unidade encontra-se sustentada por rochas metassedimentares de idade Neoproterozoica da Faixa Ribeira. Predominam os paragneisses bandados do Grupo São Fidélis (Vieira et al., 2014). Dominam solos derivados de solos residuais, com pouca ou quase nenhuma variação textural, muito desenvolvidos, muito profundos,

permeáveis, bastante friáveis e com baixa fertilidade natural, localizados nas áreas mais planas de topo - Latossolos Vermelho-Amarelos. São muito resistentes à erosão, bem estruturados, de textura argilo-arenosa com alta capacidade de carga e boa escavabilidade. Subordinadamente ocorrem nas vertentes - Argissolos Vermelho-Amarelos que são solos profundos e com boa estruturação, normalmente, em blocos angulares e subangulares. São bem drenados, com incremento de argila em subsuperfície, caracterizando um gradiente textural, que interfere diretamente no fluxo diferencial de água no solo, favorecendo ao desenvolvimento dos processos erosivos, intensificado à medida que se eleva a declividade desses solos. Entretanto, por serem bem drenados e com boa estruturação, da mesma forma que os Latossolos, possuem bom comportamento geotécnico.

Sobre as colinas prevalece a uma avaliação de uma suscetibilidade a movimentos de massa predominantemente Baixa. Excetuando-se as porções das vertentes, um pouco mais declivosas, estes terrenos também se destacam por sua estabilidade morfodinâmica e apresentam bom potencial para múltiplas formas de uso e ocupação.



**Figura 12** - Domínio colinoso de baixa amplitude de relevo, suaves vertentes (a) e topos levemente arredondados (b). Vale do rio Preto, Mimoso do Sul/ES.

As **colinas dissecadas e morros baixos da Depressão do rio Itabapoana** (em cor verde – vide figura 7), por sua vez, apresentam um cenário geomorfológico constituído por um relevo um pouco mais movimentado do que o descrito para a unidade de

terreno anterior. Destaca-se um padrão de colinas e morros dissecados de declividades moderadas (entre 5° e 20°) e baixas a médias amplitudes de relevo (entre 50 e 120 metros), apresentando vertentes convexo-côncavas e topos arredondados (figura 13).

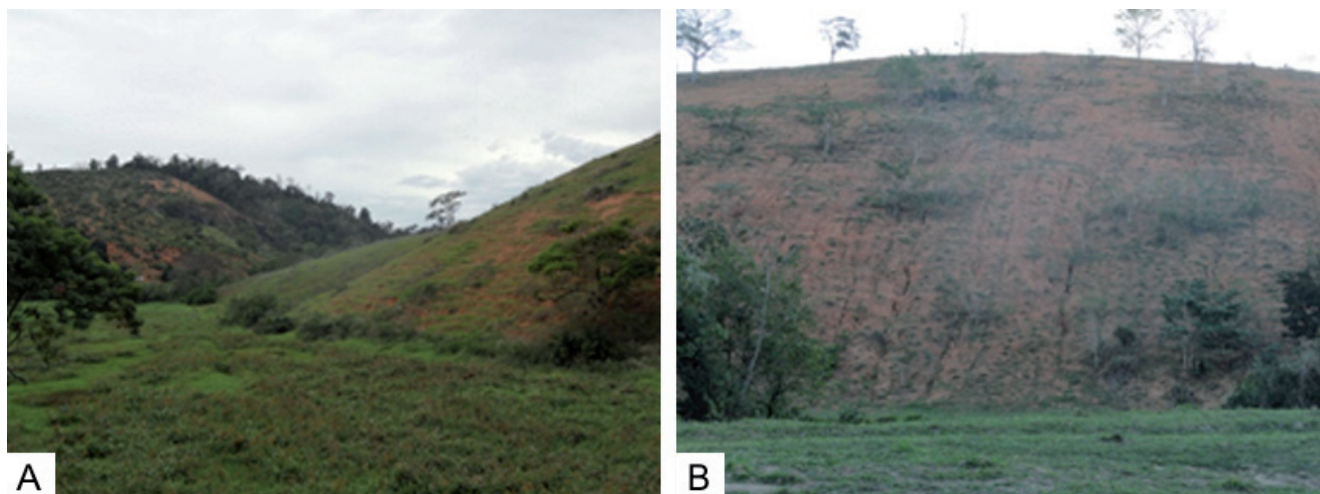
Esta unidade de terreno abrange grande parte das “terras baixas” de Mimoso do Sul, notadamente, as porções sul e sudeste do município. Devido à ocorrência de vertentes com declividades mais acentuadas e uma maior atuação de processos erosivo-deposicionais, observam-se regolitos com espessuras variáveis e não apenas espessos. A rede de drenagem apresenta uma média densidade, o que denota uma maior dissecação do relevo, em comparação com o relevo suave colinoso.

Este relevo ondulado está situado ainda em cotas baixas, que variam entre 80 e 200 metros de altitude e encontra-se sustentado por rochas metassedimentares e ortoderivadas de idade Neoproterozoica da Faixa Ribeira. Predominam os paragnaisses bandados do Grupo São Fidélis; os mármorees do Grupo Italva e os ortognaisses da unidade Cachoeiro (Vieira et al., 2014). Neste tipo de relevo predominam solos muito profundos, com estruturas em blocos, bem drenados e com gradiente textural caracterizando os Argissolos Vermelho-Amarelos, derivados de solos residuais e colúvios. Quando estes solos têm caráter abrupto, isto é, apresentam marcante descontinuidade hidráulica entre os horizontes A e Bt (figura 13) registra-se processos de erosão laminar severa, e

erosão em sulcos expondo, muitas vezes, o saprolito, tornando toda a vertente exposta a eventos de deslizamentos planares ou translacionais rasos no contato solo/solo. Nos casos onde os solos estão em condições avançadas de erosão (figura 13) com elevada densidade de sulcos verticalizados, a suscetibilidade é muito alta, considerando que em alguns casos, antes do deslizamento ocorre justamente a fase de sulcamento na encosta.

Nesta unidade de terreno, registra-se ainda a ocorrência disseminada de rampas de alúvio-colúvio que entulham as cabeceiras de drenagem em anfiteatro e os fundos de vales de pequenos vales tributários (Bigarella & Mousinho, 1965; Moura & Silva, 1998). Esta unidade morfoestratigráfica representa um ambiente deposicional transicional entre os domínios fluvial e de encostas (figura 1) e apresenta comportamento geotécnico específico, tanto com relação aos materiais, que apresentam um incipiente selecionamento de areias fluviais, intercalados com depósitos de encosta, como também quanto a uma média suscetibilidade à inundação nas porções mais distais das rampas.

Sobre as colinas dissecadas e morros baixos prevalece a uma avaliação de uma suscetibilidade a movimentos de massa predominantemente Média.



**Figura 13** - Relevo ondulado de colinas e morros baixos (a) sujeito à instalação de processos erosivos devido a condicionantes dos solos e dos regolitos (b). Vale do córrego Santa Rosa, Mimoso do Sul/ES.

Os **morrotes em zonas de cisalhamento** apresentam uma ocorrência muito restrita em Mimoso do Sul devido à raridade de importantes estruturas tectônicas regionais de idade Brasileira (falhas de empurrão e zona de cisalhamento) estando, portanto, dispersos em feições isoladas

em meio ao domínio de **colinas dissecadas e morros baixos**. Entretanto, a despeito do fato de não ser possível mapear o relevo de morrotes como uma zona expressiva no município, esta unidade merece ser destacada devido ao diferenciado compartimento geotécnico verificado neste tipo de

relevo. Os morrotes consistem, em muitos casos, de feições do relevo fortemente influenciadas por condicionantes litoestruturais do substrato rochoso e exibem, via de regra uma maior suscetibilidade a processos de erosão e movimentos de massa (Dantas et al., 2015). Os morrotes apresentam vertentes retilíneas e dissecadas com declividades moderada a alta (entre 10° e 30°) e baixas a médias amplitudes de relevo (entre 40 e 100 metros), sendo observáveis em larga escala ao longo de importantes faixas de cisalhamento (figuras 14 e 15). Os topos são, em geral, aguçados ou em cristas, o que denota uma maior efetividade de processos erosivos.

Devido à ocorrência de curtas vertentes íngremes e retilíneas, predominam regolitos com espessuras variáveis e solos jovens, pouco profundos, com incipiente desenvolvimento estrutural, relação silte/argila elevada, derivando solos residuais que compreendem a classe dos Cambissolos Háplicos. A elevada relação silte/argila, além de indicar o baixo grau de intemperismo, também se refere ao pequeno desenvolvimento estrutural encontrado nesses solos. Sendo a estrutura do solo um dos elementos mais importantes nas relações de fluxo de água do solo, essa deficiência torna-os mais suscetíveis tanto aos processos de erosão quanto aos de movimentos de massa.

Sobre o relevo de morrotes prevalece a uma avaliação de uma suscetibilidade a movimentos de massa predominantemente Alta, o que demonstra que nem sempre formas de baixa amplitude de relevo representam terrenos estáveis.



**Figura 14** - Relevo dissecado de morrotes alinhados em cristas com vertentes retilíneas e declivosas junto à represa de ribeirão da Lages, no sopé da serra das Araras. A esculturação desses terrenos está condicionada pela zona de cisalhamento Jacuecanga – Conrado (municípios de Pirai e Barra do Pirai/RJ).



**Figura 15** - Manto de intemperismo de rochas miloníticas com foliação subvertical e alta suscetibilidade à erosão e a movimentos de massa, junto à zona de cisalhamento do rio Paraíba do Sul (município de Pirai/RJ).

Os morros altos dos contrafortes Mantiqueira/Caparaó (em cor verde-escura – vide figura 7) apresentam um cenário geomorfológico constituído por um planalto dissecado em morros amplos de declividades moderadas a altas (entre 10° e 35°) e médias a altas amplitudes de relevo (entre 80 e 250 metros), apresentando vertentes convexo-côncavas a retilíneas e topos arredondados a aguçados (figuras 16 e 17).



**Figura 16** - Paisagem regional do relevo de morros altos, convertidos em extensas áreas de monocultura de café arábica, muito comum nas “terras altas” do Espírito Santo. Cercanias da vila de Conceição do Muqui, Mimoso do Sul/ES.

Esta unidade de terreno abrange grande parte das “terras altas” de Mimoso do Sul, notadamente, a porção noroeste do município, englobando o alto vale do rio Muqui do Sul. Devido à ocorrência de vertentes com declividades mais acentuadas e

uma maior atuação de processos erosivo-depositivos, observam-se regolitos com espessuras variáveis e não apenas espessos. A rede de drenagem apresenta uma média a alta densidade, com ocorrência de regolitos com espessuras variáveis, predominantemente capeados por coberturas coluvionares. Subordinadamente, também são registrados depósitos de tálus.



**Figura 17** - Escorregamento em corte de estrada, expondo espesso regolito. Esta unidade de terreno apresenta alta suscetibilidade a deslizamentos planares ou escorregamentos rotacionais na massa de solo (entre os horizontes B e C ou em descontinuidades do saprolito). Rodovia ES-014, entre as localidades de Mimoso do Sul e Conceição do Muqui.

Este relevo fortemente ondulado está alçado ainda em cotas altas, que variam entre 600 e 900 metros de altitude e encontra-se sustentado, predominantemente, por rochas metassedimentares de idade Neoproterozoica da Faixa Ribeira. Aflorem, principalmente, os biotita gnaises do Grupo São Fidélis e os mármores do Grupo Italva (Vieira et al., 2014). Neste tipo de relevo predominam ainda solos muito profundos, bem desenvolvidos, em estágio avançado de intemperismo, consequentemente com material coloidal com baixa capacidade de troca de cátions. São permeáveis, porosos e muito friáveis, sendo pouco suscetíveis aos processos erosivos - Latossolos Vermelho-Amarelos. Estão associados aos Argissolos Vermelho-Amarelos onde ocorre um incremento de argila no horizonte subsuperficial, muitas vezes, caracterizado pela diferença textural do horizonte subsuperficial com o horizonte suprajacente. Este fato provoca um diferencial de infiltração de água no solo, que quando abrupto os torna muito suscetíveis à erosão.

Assim como os Latossolos, são os solos profundos, bem drenados, permeáveis, em geral, de coloração vermelho-amarelada ou vermelha, com textura mais grosseira em superfície e mais fina em profundidade. A argila é de atividade baixa e a suscetibilidade a erosão é moderada tendendo a alta quando o declive é acentuado.

Sobre os morros altos prevalece a uma avaliação de uma suscetibilidade a movimentos de massa predominantemente Alta. Observam-se, episodicamente, cicatrizes de deslizamentos sobre esta unidade de terreno.

As **serras dos contrafortes Mantiqueira/Caparaó** (em cor azul - vide figura 7) apresentam um cenário geomorfológico constituído por um relevo de aspecto montanhoso de vertentes muito íngremes a escarpadas (entre 20° e 45°, com ocorrência de paredões rochosos subverticais) e altas amplitudes de relevo (acima de 300 metros). Ressaltam-se na paisagem encostas retilíneas com paredões rochosos e topos em cristas, aguçados ou em pontões graníticos arredondados (figuras 18 e 19).

Esta unidade de terreno ocupa os terrenos mais acidentados e os cimos mais elevados das “terras altas” de Mimoso do Sul (figura 18), abrangendo, as porções central e noroeste do município. Os processos erosivo-depositivos e movimentos gravitacionais de grande magnitude são dominantes neste tipo de relevo apresentando, por conseguinte, uma notória instabilidade morfodinâmica. Tais terrenos são, deste modo, sulcados por uma rede de drenagem de alta densidade, denotando uma forte atuação da erosão e da incisão vertical da rede de canais. Predominam, nas altas encostas, mantos de alteração rasos e afloramentos de rocha. As baixas vertentes e zonas de piemonte, por sua vez, são entulhados por possantes depósitos de tálus que se espraiam e entulham os fundos de vales incisos e encaixados dessa região serrana (figura 19).

Este relevo montanhoso está alçado ainda em cotas muito elevadas, cujos picos atingem cotas entre 700 e 1.430 metros de altitude, sendo que alguns contrafortes montanhosos que emergem do piso das “terras baixas” atingem cotas mais modestas (entre 400 e 600 metros de altitude). Os terrenos serranos encontram-se sustentados, predominantemente, por plútons ígneos de idade Cambriana e rochas ortoderivadas e

metassedimentares de idade Neoproterozoica e da Faixa Ribeira. Afloram, principalmente, granitos pós-orogênicos; ortognaisses da unidade Cachoeiro e mármore do Grupo Italva (Vieira et al., 2014). Esta unidade reúne solos jovens, predominantemente rasos, com pequena expressão dos processos pedogenéticos e sem grandes modificações do material parental. Apresenta severas restrições ao desenvolvimento radicular face ao contato lítico ocorrer próximo de 50 cm de profundidade. Essa característica determina um volume reduzido de “ancoragem” para as plantas, facilitando o tombamento e restringindo a sua utilização apenas para plantas de sistema radicular não muito desenvolvido, sendo comum a ocorrência de pastagem compreendendo a classe dos Neossolos Litólicos. Subordinadamente, ocorrem solos pouco profundos, com desenvolvimento estrutural incipiente e drenagem moderada. É comum observar nesses solos minerais facilmente intemperizáveis e relação silte/argila elevado, além de variegado de cores devido ao pequeno grau de intemperismo. São solos muito suscetíveis aos processos erosivos, principalmente devido à baixa coesão/adeseção das estruturas do solo e também suscetíveis aos movimentos e massa, principalmente no contato solo/rocha onde ocorre uma mudança abrupta de materiais e de fluxo de infiltração de água. Observa-se também a ocorrência de pedregosidade e rochosidade, além de afloramentos de rocha.



**Figura 18** - Maciço montanhoso de Muqui do Sul, esculpido em um plúton granítico de conformação ovalada com aproximadamente sete quilômetros de extensão em seu eixo maior. Noroeste do município de Mimoso do Sul/ES.



**Figura 19** - Cenário típico do relevo serrano: altas vertentes muito íngremes com ocorrência de paredões rochosos; baixas vertentes com vertentes suavizadas e fundos de vales entulhados por rampas de colúvio com depósitos de tálus. Vale do córrego Santa Maria, nos arredores da sede municipal de Mimoso do Sul.

Sobre o domínio serrano prevalece a uma avaliação de suscetibilidade a movimentos de massa indubitavelmente Alta. Ressalta-se uma ocorrência generalizada de distintos processos de movimentos de massa, dentre o quais, destacam-se: escorregamentos translacionais rasos no contato solo – rocha; quedas de lascas de juntas de alívio de tensão (figura 20); queda de blocos, especialmente em maciços graníticos (figura 21).



**Figura 20** - Paredão rochoso com evidências de juntas de alívio de tensão, demonstrando alta suscetibilidade a queda de lascas e deslizamentos de solos rasos (Neossolos Litólicos) no contato solo-rocha. Serra Santa Rosa, Mimoso do Sul/ES.



**Figura 21** - Pico dos Pontões (1.438 metros). Ponto culminante de Mimoso do Sul, situado no maciço granítico de Muqui do Sul. Ressalta-se o papel do padrão ortogonal das diáclases verticais promovendo o profundo entalhamento do maciço rochoso e posterior geração de blocos arredondados. Alta suscetibilidade à queda de blocos.



**Figura 22** - Alto curso do vale do rio Paraíso, apresentando mais de 700 metros de desnivelamento, sendo entalhado por possante depósito de tálus que recobre todo o fundo de vale e as baixas vertentes. No primeiro plano, planície aluvionar. Mimoso do Sul/ES.

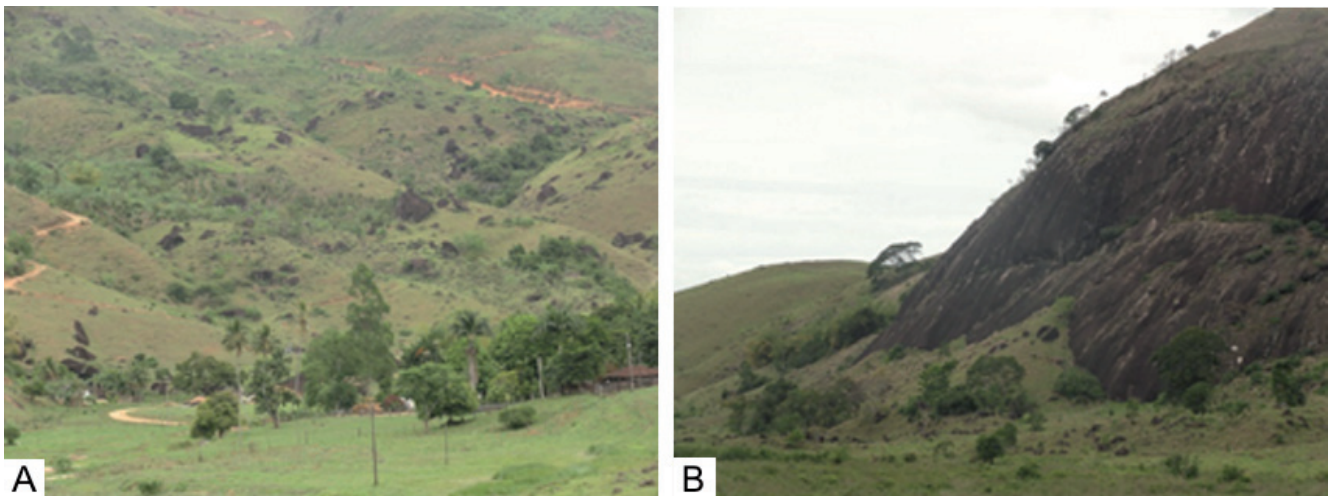
Sobre estes terrenos acidentados das **serras dos contrafortes Mantiqueira/ Caparaó**, um destaque especial deve ser conferido às rampas de colúvio com depósitos de tálus (em cor vermelha – vide figura 7). As rampas de colúvio com depósitos de tálus compreendem depósitos de encosta com matriz repleta de blocos de distintos tamanhos (decimétricos a decamétricos) e apresentam grandes dimensões preservadas nos fundos de vales de vales de primeira e segunda ordem e nas baixas a médias encostas das serras e maciços montanhosos (figuras 22 e 23). Esta unidade morfoestratigráfica consiste, por excelência, numa unidade geotécnica onde se ressalta a instabilidade das encostas e norteiam o alcance das áreas de atingimento de movimentos gravitacionais de massa de grande magnitude. Os diferentes materiais transportados gravitacionalmente, todos misturados, desde blocos até materiais bastantes intemperizados, alguns com alto teor de matéria orgânica provindos do horizonte superficial (A) e outros com alta relação silte/argila provindo do horizonte C ao se depositarem, constituem camadas heterogêneas onde o fluxo de água tende a constituir caminhos aleatórios diante das grandes diferenças de solo facilitando dessa forma a desestruturação e à movimentação do depósito vertente abaixo.

Estes terrenos estão sujeitos a processos de rastejo devido a sua intrínseca instabilidade geotécnica e retrabalhamento da superfície do depósito por subseqüentes movimentos de massa.



**Figura 23** - Depósito coluvionar, rico em blocos decimétricos e solo residual sotoposto em corte de estrada vicinal no vale do rio Paraíso, Mimoso do Sul/ES.

Entretanto, observa-se na paisagem que distintos processos gravitacionais originam as rampas de colúvio e depósitos de tálus. Trata-se, na realidade, de verdadeiros **Complexos de Rampas de Colúvio e Tálus**, parafraseando o conceito original de Meis & Monteiro (1979). Tais eventos ocorrem episodicamente, ao longo do tempo, interdigitando-se ou sobrepondo-se entre si, gerando uma superfície deposicional fortemente inclinada e irregular, coalhada de blocos na superfície (figura 1). Destacam-se, para sua gênese, as grandes corridas de detritos (*debris-flows*) e, subordinadamente, os deslizamentos planares rasos e as quedas de blocos (figura 24).



**Figura 24** - Registros de depósitos de tálus recobrimdo, respectivamente: o talvegue do alto curso do rio Paraíso por sucessivas corridas de detritos (a); e vertentes laterais do vale por deslizamentos e quedas de blocos e de lascas em sopés de paredões rochosos (b). Alto vale do rio Paraíso, Mimoso do Sul/ES.

Por fim, o sítio urbano de Mimoso do Sul está situado justamente na unidade de terreno mais desfavorável para a implantação e o desenvolvimento de um núcleo urbano: a cidade está encravada no fundo de vale do rio Muqui e encontra-se imprensado por diversos contrafortes serranos alinhados (serras da Lajinha, da Pratinha e da Invernada). Estes alinhamentos serranos apresentam amplitudes de relevo superiores a 400 metros, vertentes íngremes e paredões rochosos subverticais. Neste cenário adverso, Mimoso do Sul encontra-se “entre a cruz e a espada”. A porção da malha urbana (mais antiga) que ocupa a planície de inundação do rio Muqui do Sul está sujeita a eventos de

inundação de alta energia e, até mesmo, fluxos de enxurrada (figura 25), enquanto as áreas de expansão urbana recente que galgam as baixas vertentes dos relevos serranos ocupam áreas de atingimento a movimento de massa e estão sujeitas, principalmente, a quedas de blocos e a deslizamentos planares (figura 25).

Em suma, a escolha equivocada da implantação de um sítio urbano, a ocupação inadequada dos terrenos e a expansão desordenada da malha urbana em terrenos com alta suscetibilidade produzem, inexoravelmente, **áreas de riscos de movimentos de massa, enxurradas e inundações**.



**Figura 25** - Sítio urbano de Mimoso do Sul situado em fundo de vale encaixado do rio Muqui do Sul (a). Ocorrência de áreas de risco a quedas de blocos, deslizamentos rasos, inundações e enxurradas (b).

## 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O mapeamento de padrões de relevo e a análise integrada do meio físico constituem-se num valioso instrumento para subsidiar os estudos de avaliação e determinação de distintas unidades de terreno com diferenciados graus de suscetibilidade a movimentos de massa e inundação nos diversos terrenos do Sudeste Brasileiro.

O baixo curso do rio Itabapoana se notabiliza por vastas baixadas fluviomarinhas com domínio de solos hidromórficos (Gleissolos Salinos e Organossolos) e nível freático subaflorante. Tais condicionantes pressupõem uma muito alta suscetibilidade a inundações. Tais terrenos encontram-se ladeados por terrenos planos com solos espessos e bem drenados (Latosolos) dos tabuleiros do Grupo Barreiras. Tais condicionantes pressupõem uma muito baixa suscetibilidade a movimentos de massa.

As “terras baixas” do município do Mimoso do Sul abrangem terrenos colinosos de baixas amplitudes de relevo e declividades suaves, apresentando espessos mantos de alteração e solos profundos e bem drenados (Latosolos e Argissolos). Tais condicionantes pressupõem uma baixa a média suscetibilidade a movimentos de massa. Estes terrenos estão situados na depressão do médio vale do rio Itabapoana. Destaca-se, ainda, uma extensa zona de várzea com relevo plano e solos hidromórficos (Neossolos Flúvicos a Gleissolos Háplicos), o que pressupõe uma média a alta suscetibilidade a inundações.

Por outro lado, nas “terras altas” do município, caracterizadas por maciços montanhosos esculpidos em plútons graníticos e por planaltos dissecados em morros altos, observam-se elevadas amplitudes de relevo e encostas íngremes, apresentando esparsos paredões rochosos e um amplo domínio de solos rasos e pouco evoluídos (Cambissolos e Neossolos Litólicos) com franca ocorrência de deslizamentos planares no contato solo-rocha e deslocamentos proporcionados por juntas de alívio de tensão e quedas de blocos (em especial, sobre os maciços graníticos). Tais condicionantes pressupõem uma alta suscetibilidade a movimentos de massa. Destacam-se, por fim, a deposição de monumentais complexos de rampas de tálus/colúvio que se espriam, interdigitam e

recobrem, por vários quilômetros, os fundos de vales de rios que dissecam as vertentes muito declivosas dos maciços montanhosos do sul do Espírito Santo. Tais possantes depósitos de encostas documentam antigos e sucessivos eventos gravitacionais de grande magnitude e registram as zonas de atingimento potencial a futuros movimentos de massa.

## REFERÊNCIAS

- Avelar A.S., Coelho Netto A.L., Lacerda W.A., Becker L.B., Mendonça M.B. 2011. Mechanisms of the recent catastrophic landslides in the mountainous range of Rio de Janeiro, Brazil. In: Proceedings of the Second World Landslide Forum - Abstract Book, Roma - Italy - CdRom: 5pp.
- Bigarella J.J., Mousinho M.R. 1965. Considerações a respeito dos terraços fluviais, rampas de colúvios e várzeas. *Bol. Paran. Geografia*, Curitiba, 16/17: 153-197.
- Bitar O.Y. (Coord.) 2014. *Cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações 1:25.000: nota técnica explicativa*. São Paulo: IPT/CPRM: 50p. (IPT Publicação 3016) (publicação on-line).
- Coelho Netto A.L. 1999. Catastrophic landscape evolution in a humid region (SE Brazil): inheritances from tectonic, climatic and land use induced changes. In: IAG, International Conference on Geomorphology, IV, Suplemento di Geografia Física e Dinâmica Quaternária III, Plenary Lecture, Bologna - Itália, p.: 21-48.
- Coelho Netto A.L., Sato A.M., Avelar A.S., Viana L.G.G., Araújo I.S., Ferreira D.L.C., Lima P.H.; Silva A.P.A., Silva R.P. 2011. January 2011: The extreme landslide disaster in Brazil. In: Proceedings of the Second World Landslide Forum - Abstract Book, Roma - Italy - CdRom: 6pp.
- Dantas M.E. 2013. Análise de padrões de relevo: um instrumento aplicado ao mapeamento da Geodiversidade. In: Bandeira I.C.N. (ed.) Geodiversidade do Estado do Maranhão, CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 10, Teresina/PI, p.133-140.
- Dantas M.E., Brandão R.L., Ambrósio M., Santana M.S. 2015. Condicionantes litoestruturais e



morfopedológicos na determinação de suscetibilidades a movimentos de massa, transecto Barra do Pirai – Ipiabas, médio vale do rio Paraíba do Sul/RJ. In: ABGE, Congr. Bras. Geol. Eng. e Ambiental, 15, Bento Gonçalves/RS. Anais, (CdRom): 10p.

De Ploey J. & Cruz O. 1979. Landslides in the Serra do Mar, Brazil. *Catena*, 6: 111-122.

Diniz, N.C. 2012. Cartografia geotécnica por classificação de unidades de terreno e avaliação de suscetibilidade e aptidão. *Rev. Bras. Geol. Eng. e Ambiental*, 2:29-77.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 2013. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 3.ed. EMBRAPA, Brasília, 353p.

Fernandes N.F. & Amaral C.P. 1996. Movimentos de massa: uma abordagem geológico-geomorfológica. In: Guerra A.J.T. & Cunha S.B. (orgs.). *Geomorfologia e Meio Ambiente*, 3, Ed. Bertrand Brasil. Rio de Janeiro, p 123-194.

Fernandes N.F., Guimarães R.F., Gomes R.A.T., Vieira B.C., Montgomery D.R., Greenberg H. 2001. Condicionantes geomorfológicos dos deslizamentos nas encostas: avaliação de metodologias e aplicação de modelo de previsão de áreas susceptíveis. *Rev. Bras. Geomorfologia*, 2(1):51-71.

Ferreira C.E.O. 1999. Mapeamento e qualificação das coberturas inconsolidadas aplicados ao planejamento territorial na escala 1:250.000 - Folha Macaé, Estado do Rio de Janeiro. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 61p.

Finlayson A.A. 1984. Land surface evaluation for engineering practice; applications of the Australian PUCE system for terrain analysis. *The Quart. Journ. Eng. Geology*, 17(2): 149-158.

Guimarães R.F., Gomes R.A.T., Fernandes N.F. 1998. Avaliação de parâmetros morfológicos das cicatrizes dos escorregamentos da bacia do Rio Quitite (RJ). In: UGB, *Simp. Nac. Geomorfologia*, 2, Revista GEO-SUL, 14:316- 320.

Grant K., Finlayson A.A. 1978. The application of terrain analysis to urban and regional planning.

In: IAEG, International Congress of the International Association for Engineering Geology, III, *Proceedings*, 4-8 September 1978, Paris, p. 79-91.

Jones F.O. 1973. Landslides in Rio de Janeiro and Serra das Araras escarpment, Brazil. *U.S. Geological Survey Professional Paper*, 697, 42p.

Lollo J. A., Zuquette L.V. 1996. Utilização da técnica de avaliação do terreno em cartografia geotécnica: sistemática proposta e resultados obtidos para a quadrícula de Campinas. In: ABGE, *Simp. Bras. Cart. Geotécnica*, 2, Anais, São Carlos, p. 3-12.

Matula M. 1979. Regional engineering geological evaluation for planning purposes. *Bull. Intern. Assoc. Eng. Geol. and Environment*, 18: 18-24.

Meis M.R.M., Monteiro A.M.F. 1979. Upper Quaternary "Rampas": Doce River Valley, SE Brazilian Plateau. *Zeitsch. Geomorphologie*, 23(2): 132-151.

Moura J.R.S. & Silva T. M. 1998. Complexo de rampa de colúvio. In: *Geomorfologia do Brasil*. Cunha S.B. & Guerra A.J.T (orgs). Rio de Janeiro, Ed. Bertrand Brasil. p. 143-180.

Mousinho M. R., Xavier da Silva J. 1968. Considerações geomorfológicas a propósito dos movimentos de massa ocorridos no Rio de Janeiro. *Rev. Bras. Geografia*, 30(1): 55-72.

Paula J.P.L., Zaine J.E., Lima M.S., Oliveira E.M. 2008. Análise fisiográfica aplicada à elaboração de mapa geológico-geotécnico de região da Serra do Mar e Baixada Santista. *Rev. Geociências, UNESP*, 27(2): 249-264.

Ponçano W.L., Bistrichi, C.A., Carneiro C.D.R., Almeida M.A.; Pires Neto A.G., Almeida F.F.M. 1979. O conceito de sistemas de relevo aplicado ao mapeamento geomorfológico do Estado de São Paulo. In: SBG, *Simp. Reg. Geologia*, 2(v.2), Rio Claro, Atas, p. 253-262.

Ross J.L.S. 1992. O registro cartográfico dos fatos geomórficos e a questão da taxonomia do relevo. *Rev. Depto. Geografia, FFLCH-USP, São Paulo*, 6:17-29.

Santos A.R. 2014. Manual básico para elaboração e uso da Carta Geotécnica. Ed. Rudder, São Paulo, 109p.

- Shinzato E., Renk J.F.C., Dantas M.E., Teixeira W.G., Vargas L. 2012. Geotecnologia 3D na compartimentação geomorfológica das bacias hidrográficas dos rios Macacu e Caceribu - Recôncavo da Baixada da Guanabara /RJ. In: UGB, Simp. Nac. Geomorfologia, 9, Rio de Janeiro, CdRom: 5p.
- Silva C.R., Dantas M.E. 2011. Mapas Geoambientais. CPRM - Serviço Geológico do Brasil - DE-GET, Departamento de Gestão Territorial Rio de Janeiro/ RJ. Disponível em: [http://www.cprm.gov.br/publique/media/mapas\\_geoambientais\\_SCGG.pdf](http://www.cprm.gov.br/publique/media/mapas_geoambientais_SCGG.pdf)
- Sobreira F.S. 2001. Suscetibilidade a processos geológicos e suas consequências na área urbana de Mariana, MG. Geo.Br. Disponível em <http://www.dageo.ufop.br/geobr>.
- Vedovello R., Brollo M.J., Tominaga L.K., Riedel P.S., Cardoso D., Terrell D. 2002. Compartimentação fisiográfica do litoral norte do estado de São Paulo voltada para a avaliação de terrenos. In: ABGE, Congr. Bras. Geol. Eng. e Ambiental, 10, Ouro Preto. Anais, CdRom: 10p.
- Vieira B. C., Castro Jr. E., Fernandes N. F. 1998. Controles fito-morfológicos dos escorregamentos da bacia do Quitite (RJ). In: UGB, Simp. Nac. Geomorfologia, 2, Revista GEO-SUL, 14: 324-328.
- Vieira B. C., Fernandes N. F. 2004. Landslides in Rio de Janeiro: The role played by variations in soil hydraulic conductivity. Hydrol. Processes, 18: 791-805.
- Vieira V.S., Silva M.A., Correa T.R. , Lopes N.H.B. 2014. Mapa Geológico do Estado do Espírito Santo - 1:400.000. Belo Horizonte/MG, CPRM - Serviço Geológico do Brasil.
- Wolman M.G., Miller J.P. 1960. Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes. Journ. Geology, 68: 54-74.

# O EMPREGO DA GEOMORFOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DE SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS DE MASSA E INUNDAÇÃO – MIMOSO DO SUL/ES

*THE USE OF THE GEOMORPHOLOGY TO LANDSLIDE AND FLOODING SUSCEPTIBILITY EVALUATION – MIMOSO DO SUL/ES*

MARCELO EDUARDO DANTAS

*CPRM – Serviço Geológico do Brasil, Rio de Janeiro, RJ, Brasil  
E-mail: marcelo.dantas@cprm.gov.br*

EDGAR SHINZATO

*CPRM – Serviço Geológico do Brasil, Rio de Janeiro, RJ, Brasil  
E-mail: edgar.shinzato@cprm.gov.br*

JENNIFER FORTES CAVALCANTE RENK

*Geoambiente - SR, São José dos Campos, SP, Brasil  
E-mail: jennifer.renk@geoambiente.com.br*

JULIANA MACEIRA MORAES

*CPRM – Serviço Geológico do Brasil, Rio de Janeiro, RJ, Brasil  
E-mail: juliana.moraes@cprm.gov.br*

MARCELY FERREIRA MACHADO

*CPRM – Serviço Geológico do Brasil, Salvador, BA, Brasil  
E-mail: marceley.machado@cprm.gov.br*

ALINE COSTA NOGUEIRA

*CPRM – Serviço Geológico do Brasil, Salvador, BA, Brasil  
E-mail: aline.nogueira@cprm.gov.br*

## RESUMO ABSTRACT

A Geomorfologia consiste num dos campos de conhecimento mais utilizados no auxílio à elaboração de mapas de suscetibilidade a movimentos de massa e inundações. Seu emprego pode estar associado a uma abordagem descritiva e morfológica, baseada em identificação de padrões de relevo homólogos por meio de fotoanálise de fotografias aéreas e imagens de satélite. Este instrumental conferido pelos mapas geomorfológicos acoplado com um arsenal de parâmetros morfométricos deve ser considerado apenas como um tema básico para elaboração de mapas de suscetibilidade. É primordial sua análise combinada com o estudo do substrato rochoso; os mantos de intemperismo e as formações superficiais; e os solos, do ponto de visto pedológico, incluindo suas características morfológicas,

Geomorphology is one of the most useful areas of Geosciences to support the elaboration of susceptibility maps of mass movements and floods. Your use could be associated on a descriptive and morphological analysis, based on identification of relief patterns by photointerpretation and remote sensing. The whole information available by geomorphological maps linked with the toolset provided by morphometric parameters and analysis must be considered only a basic layer to build susceptibility maps. So, the combined analysis and studies of bedrock, relief, weathering profiles and soils (including physical, chemical, morphological and mineralogical properties) have great importance for susceptibility maps elaboration. Based on these concepts, was produced the relief pattern map of

físicas, químicas e mineralógicas. Com base nesse conjunto de premissas, foi elaborado o mapa de padrões de relevo do município de Mimoso do Sul, situado no baixo-médio vale do rio Itabapoana, no estado do Espírito Santo. Esta região abrange desde as planícies inundáveis, exibindo solos profundos, mal drenados, apresentando diferentes graus de hidromorfismo como os Gleissolos associados aos Neossolos Flúvicos e os terrenos tabulares a colinosos de declividades suaves, espessos mantos de alteração e solos bastante estruturados, muito profundos e bem drenados (Latosolos) a áreas serranas com encostas íngremes, paredões rochosos e um amplo domínio de solos rasos e pouco evoluídos, normalmente pedregosos ou rochosos (Cambissolos e Neossolos Litólicos). Com base nos resultados obtidos, conclui-se que o mapeamento de padrões de relevo e a análise integrada do meio físico, constituem-se num valioso instrumento para subsidiar os estudos de avaliação e determinação de graus de suscetibilidade a movimentos de massa e inundação.

**Palavras-chave:** Geomorfologia; Movimentos de Massa; Vale do rio Itabapoana; Espírito Santo.

## 1 INTRODUÇÃO

O estudo da distribuição das formas de relevo e os processos geomorfológicos associados em determinada região representa uma valiosa ferramenta para subsidiar a elaboração de projetos correlatos à Geologia de Engenharia em distintas escalas de análise.

Uma das considerações mais relevantes que devem ser destacadas a partir da análise da literatura é o encadeamento espacial entre os distintos processos em análise (deslizamentos – corridas de detritos – enxurradas – inundações). Os processos geomorfológicos dominantes em zonas serranas e, secundariamente, no domínio de marres-de-morros, são os movimentos de massa que promovem uma expressiva remoção de blocos de rochas e massa de solo (incluindo biomassa) das altas vertentes e deposição desse material erodido nas baixas vertentes, sopés das escarpas ou patamares litoestruturais em forma de depósitos de encosta em ambiente de alta energia (colúvios e depósitos de tálus). Associados aos movimentos de massa ocorrem processos de enxurradas sobre os canais principais que drenam das “terras altas” para as “terras baixas”. Por fim, no domínio das baixadas, observa-se uma

Mimoso do Sul municipality along the middle-lower Itabapoana river valley, in Espírito Santo state. This region covers since large floodplains with deep soils presenting different degrees of hydromorfism, such as the gleys associated with the alluvial soils and tablelands and hilly terrains with gentle slopes and very thick and well-drained and structured weathering profiles and soils, until mountainous areas with steep slopes, rock walls and the dominance of shallow and stoned weathering profiles and young soils. These results obtained show that relief pattern mapping and the combined analysis of geoenvironmental variables represent a valuable tool to aid and support studies of assessment and determination of degrees to susceptibility maps of mass movements and floods.

**Keywords:** Geomorphology; Landslides; Itabapoana river valley; Espírito Santo State.

expressiva redução de energia e concomitante espraçamento das águas que desceram vertiginosamente das serras para promover inundações nos baixos cursos fluviais.

Segundo Mousinho & Xavier da Silva (1968), em seu pioneiro e visionário artigo, a análise integrada do meio físico e biótico, associada com a avaliação da evolução da ocupação humana sobre determinada região, constitui uma das principais contribuições da Geomorfologia para determinação de áreas de maior suscetibilidade à ocorrência de movimentos de massa.

Decerto, a evolução do conhecimento e das metodologias de análise em cartografia geotécnica desenvolvida por distintas escolas de Geologia de Engenharia vêm utilizando a geomorfologia como um relevante instrumento de análise. Neste cenário, destaca-se o desenvolvimento de metodologias de mapeamento geotécnico, tanto na Europa Oriental (Matula, 1979, dentre outros), quanto na Austrália, através do programa PUCE (Grant & Finlayson, 1978 e Finlayson, 1984). Este conjunto de metodologias desenvolvido nas últimas décadas, via de regra, utilizam uma compartimentação do meio físico baseada numa classificação hierárquica de padrões de relevo, a partir

dos quais são inseridas variáveis como litologias, estruturas, coberturas inconsolidadas e o comportamento das águas superficiais e subterrâneas para elaboração das cartas geotécnicas.

No Brasil foram desenvolvidas, a partir dos anos 80 e 90, metodologias similares às descritas anteriormente. A partir da caracterização fisiográfica de uma determinada área de estudo, procede-se a uma compartimentação do território em unidades de terreno para avaliação do comportamento geológico-geotécnico dos materiais e sua variabilidade espacial. Um grande número de trabalhos foi desenvolvido abordando tais diretrizes metodológicas. Destacam-se, neste contexto: Lollo & Zuquette, 1996; Ferreira, 1999; Sobreira, 2001; Vedovello et al., 2002; Paula et al., 2008, Silva & Dantas, 2011; Diniz, 2012; Santos, 2014; dentre outros.

Por outro lado, o estudo da evolução das vertentes em zonas montanhosas em áreas tropicais úmidas no Sudeste Brasileiro também tem sido objeto de análise de um grande número de pesquisadores que se utilizam de uma abordagem geomorfológica clássica, buscando compreender os processos que catalisam os movimentos de massa (Mousinho & Xavier da Silva, 1968; Jones, 1973; De Ploey & Cruz, 1979; Fernandes & Amaral, 1996; Guimarães et al., 1998; Vieira et al., 1998; Coelho Netto, 1999; Fernandes et al., 2001; Vieira & Fernandes, 2004; Avelar et al., 2011; Coelho Netto et al., 2011, dentre outros).

O presente estudo pretende apresentar uma metodologia de análise integrada do meio físico em base geomorfológica e pedológica, aliado com a análise das coberturas inconsolidadas, com o intuito de subsidiar a elaboração de cartas geotécnicas, com enfoque especial para geração de mapas de suscetibilidade a movimentos de massa e inundações.

Cabe ressaltar ainda que os movimentos de massa não ocorrem uniformemente ao longo do espaço e do tempo (Wolman & Miller, 1960). Estes são desencadeados, episodicamente, em eventos pluviais de grande magnitude (chuvas intensas), em meio a um período úmido, com alta umidade antecedente, conforme já ressaltado por Coelho Netto et al. (2011). Deste modo, pode-se afirmar que estes “eventos críticos” de curta duração e rara recorrência tendem a ser mais importantes

na evolução geomorfológica das serras e escarpas íngremes recobertas por mata atlântica do que o intervalo de longos períodos de moderada precipitação. Advoga-se aqui, portanto, uma tese Neocatastrofista para a evolução geomorfológica das zonas montanhosas tropicais úmidas no Sul e Sudeste Brasileiro.

Entretanto, sabemos que a ocorrência de “chuvas intensas” por si só, não é um parâmetro suficiente para mapearmos as áreas mais suscetíveis, pois há muitos casos em que houve eventos críticos sem a ocorrência de deslizamentos. O estudo dos condicionantes do meio físico e a análise do padrão de uso e ocupação do solo (com destaque para a expansão urbana desordenada na periferia das cidades) são, em aliança com a análise das chuvas de grande magnitude, cruciais para a elucidação dos processos que catalisam os trágicos eventos que, periodicamente, assolam as cidades serranas na fachada atlântica brasileira.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Com o intuito de fornecer subsídios à elaboração de mapas de suscetibilidade a movimentos de massa e inundações, foi elencada uma série de premissas e opções metodológicas, que serão descritas a seguir:

1) A compartimentação morfológica dos terrenos e a elaboração de mapas de padrões de relevo por meio de fotoanálise de sensores remotos e conforme biblioteca pré-estabelecida.

2) O estudo da Geodiversidade e a análise integrada do meio físico, com enfoque especial na interrelação Geologia – Regolitos (solos *in situ* e depósitos de encosta/ aluviais) - Relevo - Solos - Clima e Hidrologia de Encostas para determinação de unidades de terreno, numa aproximação com a metodologia desenvolvida por Lollo & Zuquette, 1996.

3) Análise dos condicionantes litoestruturais e a influência ativa ou passiva do substrato geológico na configuração dos terrenos e dos solos

4) Análise morfoestratigráfica e a associação entre formas de relevo, processos geomorfológicos e depósitos correlativos (figura 1).

Para definição e mapeamento de padrões de relevo, adotou-se os 3º e 4º táxons da metodologia de Ross (1992), com base em interpretação de

mosaico de ortofotos digitais acopladas com modelo digital de terreno em escala 1:25.000. Em adendo, foram identificados dois primeiros táxons, individualizando as unidades morfoestruturais e morfoesculturais em cada município.

Com base nesse conjunto de premissas e seguindo metodologia proposta por Dantas (2013), foi elaborado o mapa de padrões de relevo do município de Mimoso do Sul, situado no extremo sul do Estado do Espírito Santo, no baixo-médio vale do rio Itabapoana (figura 2).

Juntamente com o mapeamento dos padrões de relevo, foram avaliados, para cada padrão, as litologias, os solos e as coberturas inconsolidadas e os seguintes parâmetros morfométricos: amplitude altimétrica; gradiente; geometria de topos e vertentes; padrão e densidade de drenagem. Essa abordagem proposta por Ponçano et al. (1979), consiste na separação, por fotoanálise, de conjuntos de formas de relevo com textura e padrão semelhantes, ou zonas homólogas.

A análise da suscetibilidade natural a movimentos de massa e inundações, por fim, segue as diretrizes formuladas por Bitar (2014) no programa de elaboração de cartas municipais de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações em convênio entre CPRM e IPT.

Santo/ Geobases em associação com o MDE com 5 x 5m de pixel. Com o intuito de melhorar a visualização dos terrenos, procurou-se realçar as áreas de baixada, bem como as áreas de topo das elevações. Através das ferramentas do GlobalMapper 7.0 aplicou-se uma sobreposição do MDE, pseudo iluminado (*slope shader*), com as ortofotos gerando maiores contrastes nessas duas posições do relevo, resultando em maior facilidade na separação dessas unidades (figura 3). As unidades foram digitalizadas em tela, utilizando-se o software ArcGis 10.2 no formato vetorial em linha, sendo posteriormente convertido para o formato de polígono. Uma das vantagens da digitalização em tela foi a utilização do zoom para melhorar a precisão da demarcação das unidades em escala maiores que a de publicação. Além disso, utilizou-se também a ferramenta *smooth* para aumentar o número de pontos por linha e, conseqüentemente, melhorar o contorno das unidades. O módulo 3D do Globalmapper foi consultado simultaneamente em uma tela paralela para facilitar as interpretações das feições. Posteriormente, cada polígono foi classificado através da tabela de atributos com as referidas descrições de cada unidade mapeada (Shinzato et al., 2012).

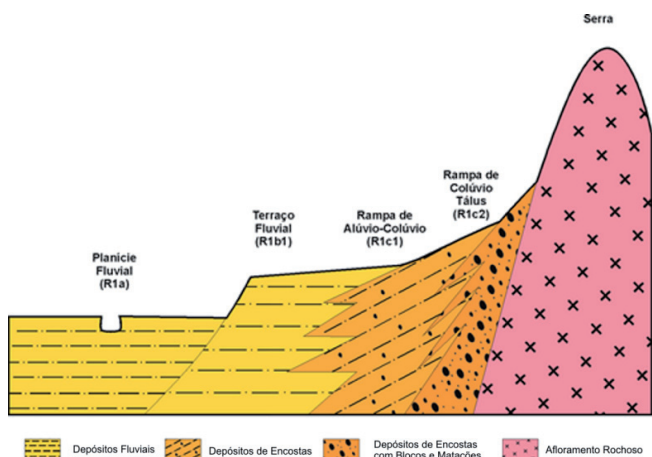


Figura 1 - Distribuição esquemática dos distintos ambientes deposicionais quaternários numa catena.

Diversas técnicas de sensoriamento remoto foram empregadas para uma melhor interpretação e delimitação dos padrões de relevo. Foram utilizadas ortofotos digitais em escala 1:25.000, produzidas pelo Instituto Capixaba de Pesquisa e Assistência Técnica e Extensão Rural do Estado do Espírito

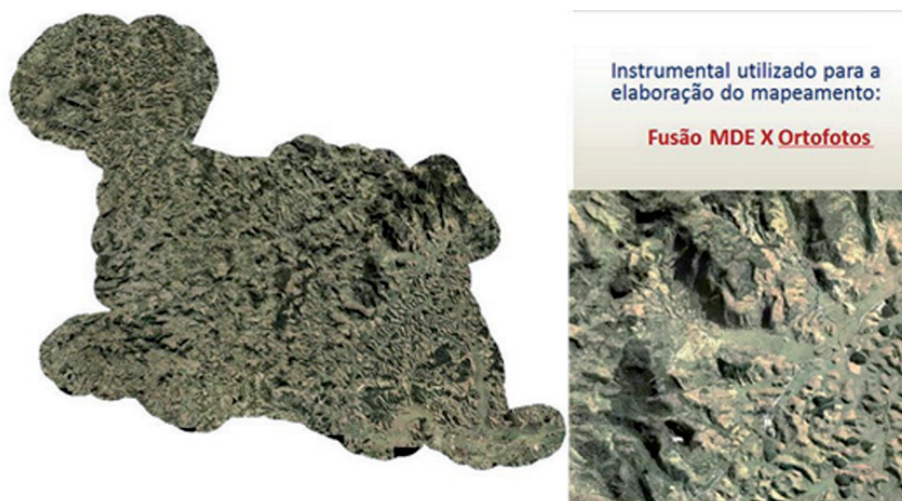


Figura 2 - Localização do município de Mimoso do Sul no Estado do Espírito Santo.

Os produtos gerados a partir do tratamento digital das imagens e do MDE foram: declividade; hidrografia; curvas de nível com equidistância de 5 metros (figura 04); relevo sombreado com duas direções de visada – NE e NW (figura 05); e hipsometria (figura 06).

Foram realizadas campanhas de campo com registro de pontos de interesse utilizando aparelhos de GPS de navegação (Global Positioning System) GARMIN GPSmap62S com posterior inclusão dos pontos no mapa, já com o banco de dados completados.

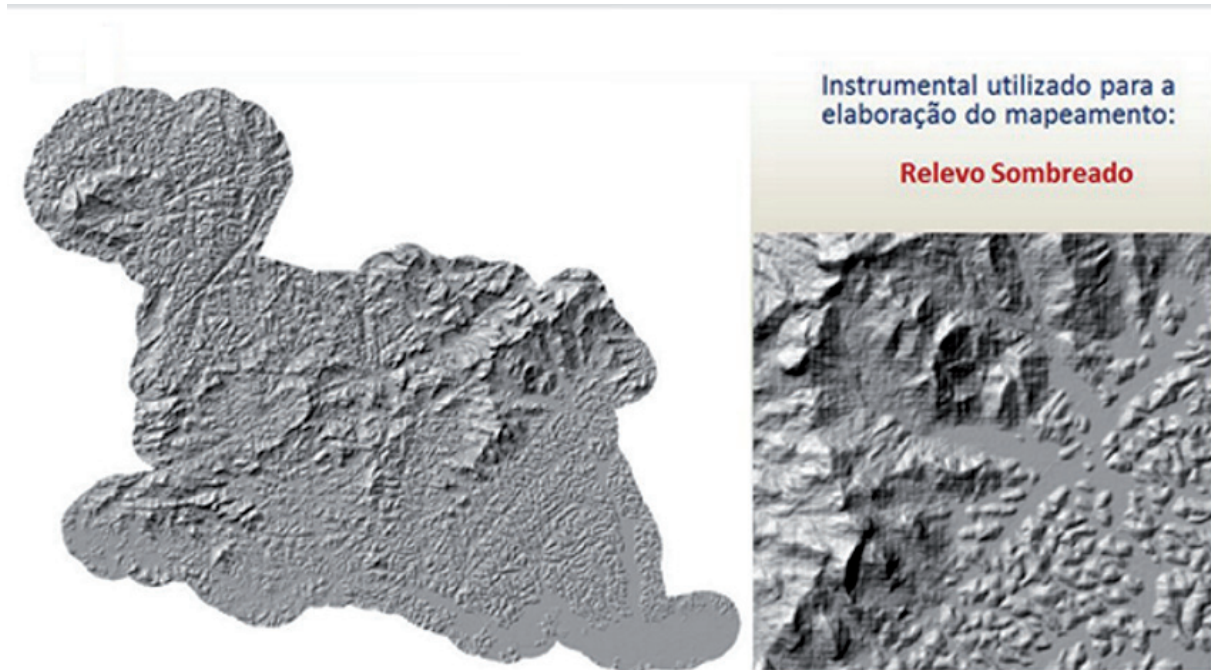
A partir das informações obtidas através da etapa de aferição de modelos em campo, a interpretação preliminar das ortofotos digitais com MDT foi refinada através da correção dos modelos de padrões de relevo propostos, quando estes não conferiam com as observações de campo. Todo mapeamento geomorfológico foi executado em forma de SIG com o uso do Programa ArcGis 10.2. A projeção cartográfica utilizada foi Universal Transversa de Mercator (UTM), zona 24 sul com parâmetros de datum adotado referente ao Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS2000).



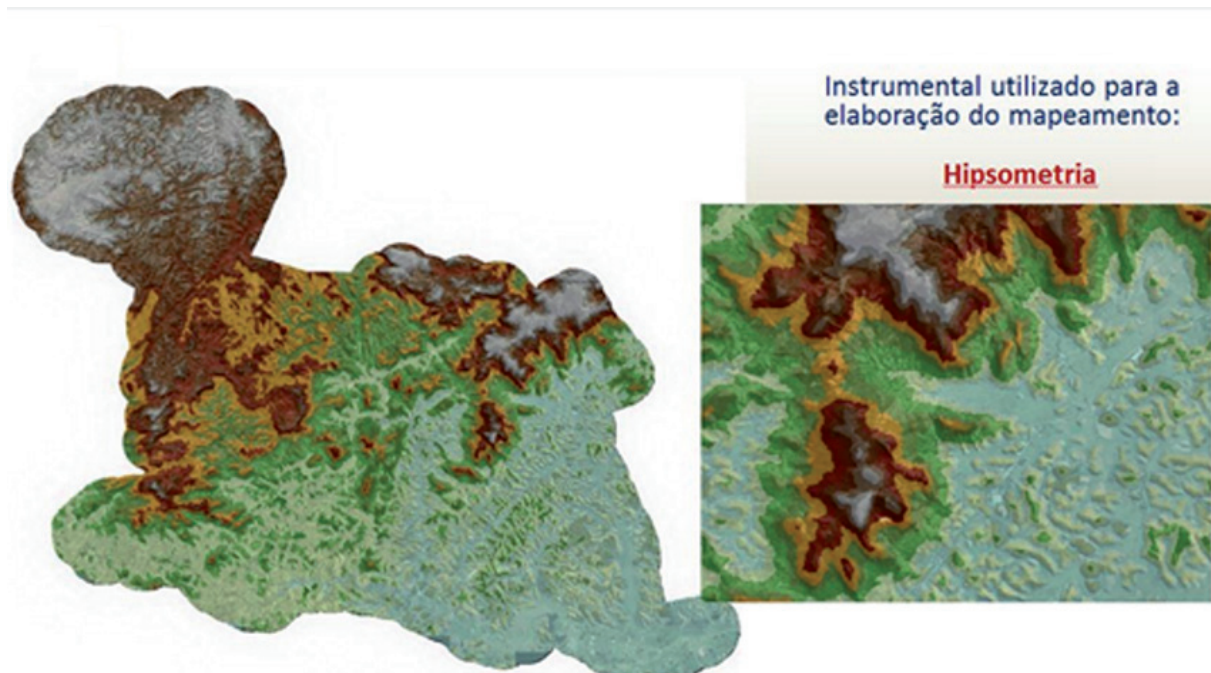
**Figura 3** - Arquivo raster resultante da fusão entre as ortofotos digital e o MDE do município de Mimoso do Sul, com limite acrescido de 2 km de buffer. Destaca-se a acurácia da imagem em distintas escalas de apresentação.



**Figura 4** - Arquivo vetorial de curvas de nível com equidistância de 5 metros. No plano acima, associado com o raster da imagem. No plano abaixo, associado com a interpretação de padrões de relevo.



**Figura 5** - Arquivo raster de relevô sombreado com visada NW do município de Mimoso do Sul, com limite acrescido de 2 km de buffer. Destaca-se o nítido e contrastante contato morfológico entre o relevô serrano das “terras altas” e o relevô colinoso com extenso aluvionamento das “terras baixas”.



**Figura 6** - Arquivo raster de hipsometria resultante da reclassificação do MDE do município de Mimoso do Sul. Ressalta-se, nas “terras baixas”, predomínio de cores esverdeadas em cotas inferiores a 300 metros, enquanto que as “terras altas” apresentam cores que variam entre amarelo, marrom e cinza em cotas que atingem mais de 1.200 metros de altitude.

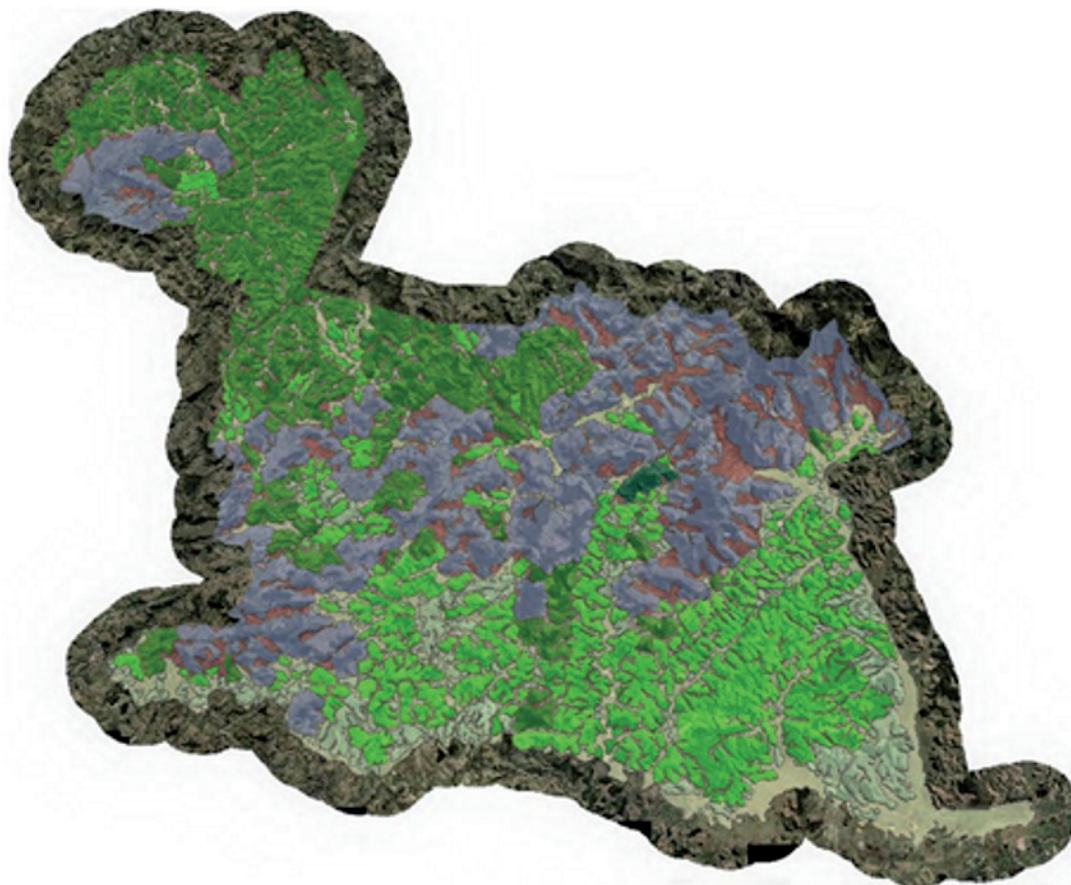


### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

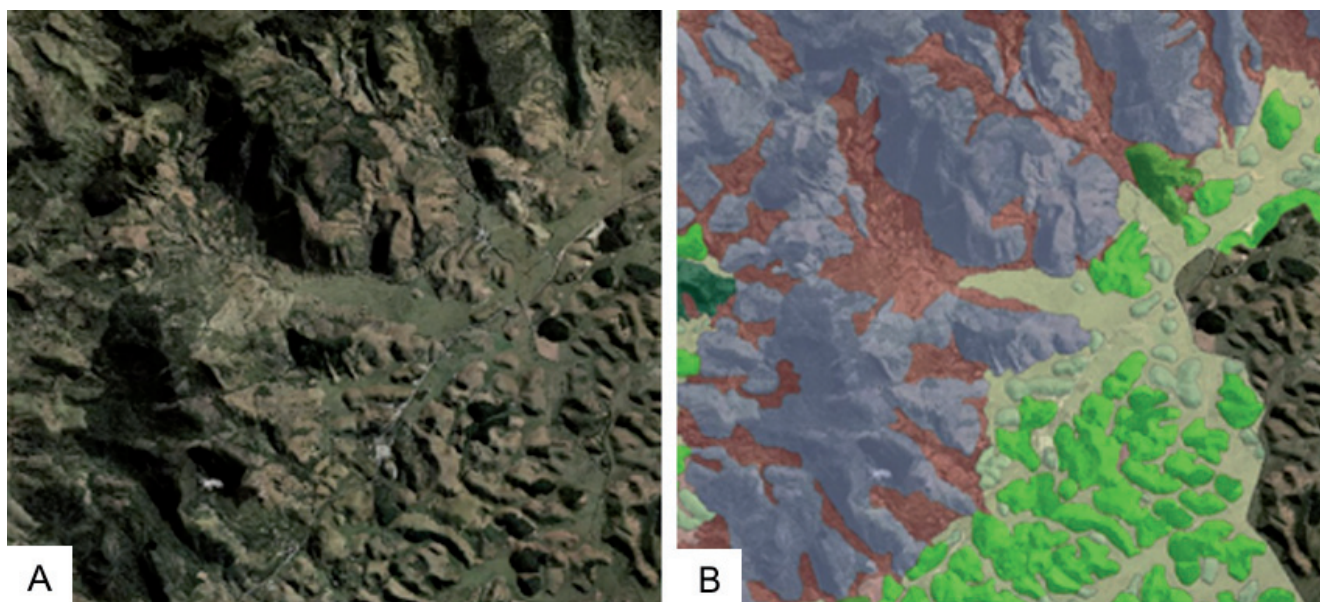
O município de Mimoso do Sul situa-se no extremo sul do Estado do Espírito Santo, inserido no médio-baixo do rio Itabapoana, junto à divisa com o Estado do Rio de Janeiro. Este município apresenta um diversificado conjunto de padrões geomorfológicos que podem ser sumariamente separados em dois domínios: os compartimentos das “terras baixas” e das “terras altas”. As terras baixas, típicas dos ambientes litorâneos ou preli-torâneos capixabas, são representadas por extensas várzeas, tabuleiros, colinas e morros de baixa amplitude de relevo, embutidas numa região geomorfológica denominada de Depressão do rio Itabapoana. Por outro lado, as terras altas, típicas do acidentado interior capixaba, são representadas

por morros altos e serras de alta amplitude de relevo, frequentemente recobertas por depósitos de encosta. Estes terrenos inserem-se, genericamente, no contexto dos contrafortes da Mantiqueira/Caparaó (figura 7). O contraste morfológico entre esses dois macro-compartimentos geomorfológicos é marcante (figura 8) e determinam distintos comportamentos frente aos processos erosivo-deposicionais (erosão, movimentos de massa, enxurradas e inundações).

Tal compartimentação geomorfológica conjugada com o mapeamento dos padrões de relevo produziu oito classes distintas e revelou-se uma valiosa ferramenta de análise para elaboração de mapeamentos de suscetibilidade a movimentos de massa e inundação.



**Figura 7** - Mapa de padrões de relevo do município de Mimoso do Sul elaborado a partir da Fusão Ortofotos X MDE. As “terras baixas” situam-se na porção sudeste do município com predomínio de planícies (em cor amarela) e colinas e morros baixos (em cores verde-clara e verde). As “terras altas”, por sua vez, situam-se na porção centro-noroeste do município, com predomínio de morros altos (em cor verde-escuro) e serras (em cor azul). Destaca-se a ocorrência de rampas de colúvio/tálus (em cor vermelha) sobre os terrenos acidentados do relevo serrano.



**Figura 8** - Detalhe de zona limítrofe entre as “terras altas” e as “terras baixas” em Mimoso do Sul. fusão Ortofotos X MDE (a). Mapa de Padrões de relevo (b). No mapa observa-se, a noroeste, o relevo acidentado da zona serrana (em azul) repleta de depósitos de encosta (em vermelho); a sudeste, observa-se o relevo ondulado das colinas e morros baixos (em cores verde-claro e verde) entremeadas com as espriaidas planícies aluvionares (em amarelo).

A seguir, será realizada uma descrição sistemática de todas as oito unidades de terreno identificadas no município: Planície fluvial do médio-baixo vale do rio Itabapoana; Planície fluviomarinha do baixo vale do rio Itabapoana; Tabuleiros prelitorâneos do baixo vale do rio Itabapoana; Colinas amplas da Depressão do rio Itabapoana; Colinas dissecadas e morros baixos da Depressão do rio Itabapoana; Morrotes em zonas de cisalhamento; Morros altos dos contrafortes Mantiqueira/ Caparaó; e Serras dos contrafortes Mantiqueira/ Caparaó.

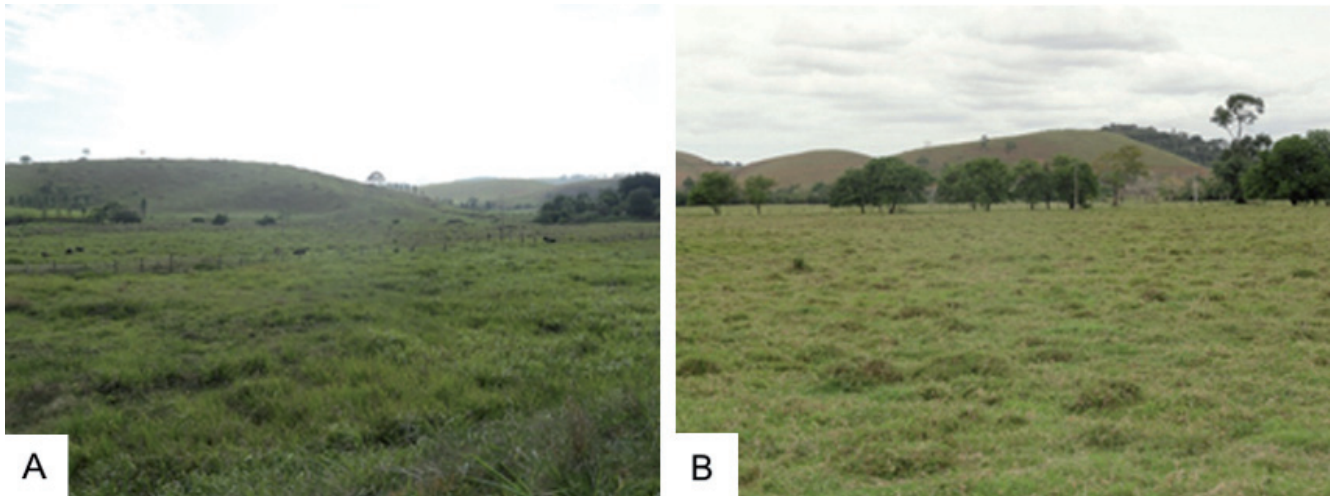
Todas as unidades de terreno foram delimitadas com ênfase numa compartimentação geomorfológica, acrescida de parâmetros morfométricos e informações de cunho pedológico e de coberturas inconsolidadas e uma correspondente avaliação qualitativa da suscetibilidade natural a movimentos de massa e inundações.

A primeira unidade de terreno relevante corresponde ao compartimento geomorfológico da **planície fluvial do médio-baixo vale do rio Itabapoana** (em cor amarela - vide figura 7). Esta unidade estende-se pelas extensas várzeas do rio Itabapoana e de seus principais afluentes: os rios Preto e Muqui do Sul e os córregos Santa Rosa, da Penha, São Pedro e do Sossego, embutidas em cotas muito baixas, entre 5 e 70 metros de altitude.

O cenário geomorfológico dominante é representado por vastas planícies de inundação e baixos terraços fluviais de relevo plano, constituídos por sedimentos holocênicos ou neopleistocênicos inconsolidados de origem aluvionar (figura 9). A rede de drenagem principal apresenta um padrão de drenagem original meândrico de alta sinuosidade estando, por diversos trechos, retificado.

Ocorrem solos profundos e muito profundos (>1.5m), normalmente contendo camadas estratificadas, com distribuição irregular da granulometria, tanto mais pronunciada quanto menos espessa for a camada de sedimentação e também de carbono, compreendendo os Neossolos Flúvicos e Gleissolos Háplicos, (EMBRAPA, 2013). O nível freático situa-se, normalmente, próximo à superfície, ou é aflorante, no período úmido, tornando essas áreas desfavoráveis à escavação ou obras subterrâneas, havendo uma necessidade de rebaiamento do nível freático para execução de obras construtivas. Podem ocorrer também camadas de sedimentos de baixa capacidade de suporte e muito compressíveis (solos moles), que quando submetidas a cargas elevadas podem comprometer a estabilidade das edificações.

Nestes tipos de terrenos prevalece a uma avaliação de uma suscetibilidade à inundação Alta (nas planícies) a Média (nos baixos terraços fluviais).



**Figura 9** - Amplas planícies aluviais do rio Itabapoana e córrego Santa Rosa Rosa, respectivamente em meio a um domínio colinoso de baixa amplitude de relevo. Mimoso do Sul/ES.

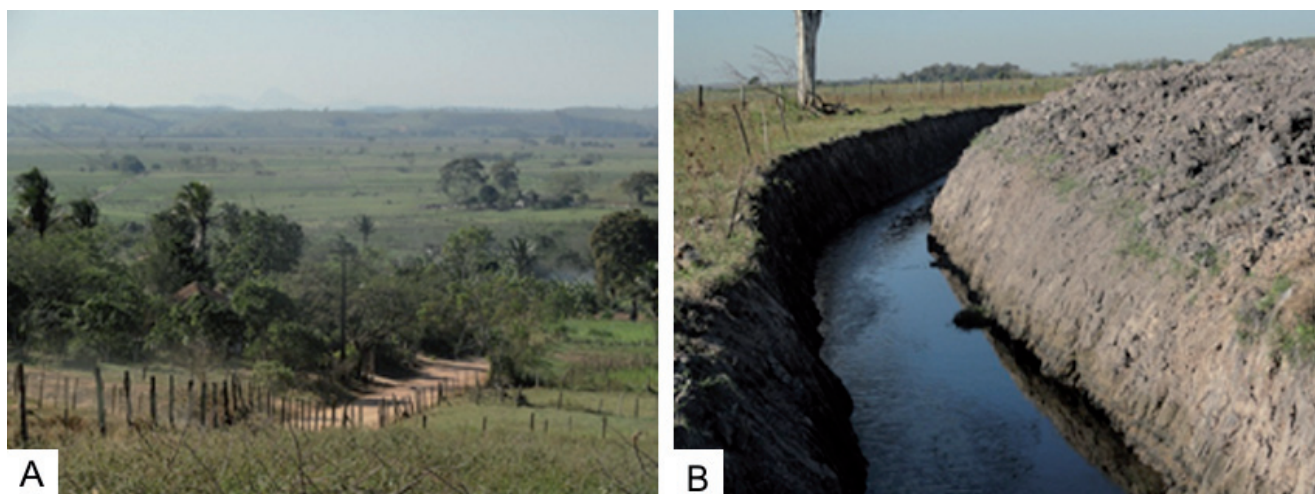
No baixo vale do rio Itabapoana, mais próximo à linha de costa, destacam-se duas unidades de terrenos de grande relevância para compreensão da Zona Litorânea: a Planície fluvio-marinha do baixo vale do rio Itabapoana e os Tabuleiros prelitorâneos do baixo vale do rio Itabapoana. A ocorrência destas unidades de terrenos é pouco expressiva em Mimoso do Sul, mas são representativas em municípios situados imediatamente a leste: Presidente Kennedy (ES) e São Francisco do Itabapoana (RJ).

A **planície fluvio-marinha do baixo vale do rio Itabapoana** ocupa uma vasta zona de várzeas do rio Itabapoana, podendo atingir mais de 5 quilômetros de largura e embutidas em cotas muito baixas, entre 1 e 5 metros de altitude, denunciando, assim, a interface entre os ambientes deposicionais fluviais e marinhos. O cenário geomorfológico dominante é representado por baixadas inundáveis de relevo plano, constituídos por sedimentos holocênicos inconsolidados de origem mista (figura 10). A rede de drenagem principal apresenta um padrão de drenagem meândrico de alta sinuosidade a divagante, condicionado, até certo ponto, pelo refluxo de maré. Ocorre solos com características de alta salinidade, detectada pela elevada condutividade elétrica e solos com elevado conteúdo de materiais sulfídricos -

Gleissolos Sálícos que, quando drenados ou oxidados, podem gerar materiais sulfúricos, muito ácidos, com pH inferior a 3,5 - Gleissolos Tiomórficos. (EMBRAPA, 2013). Por outro lado, podem apresentar reação alcalina pelo excesso de sódio ( $\text{Na}^+$ ) trocável, que causa a expansão e a dispersão das argilas, deteriorando as estruturas do solo, que devido à permeabilidade e condutividade muito lenta geram cores de redução, acinzentadas e escuras no perfil - Planossolos Nátricos. Neste caso, observam-se duas importantes limitações de cunho geotécnico: a presenças de solos com baixa capacidade de carga e com alta corrosividade.

Nestes tipos de terrenos prevalece a avaliação de uma suscetibilidade à inundação Alta. Entretanto, há de se ressaltar que os eventos de inundação nas planícies fluvio-marinhas são mais expressivos e prolongados em relação às planícies aluviais situadas a montante.

As duas unidades de terreno anteriormente descritas correspondem a compartimentos geomorfológicos com predomínio de ambientes deposicionais com suscetibilidade à inundação. As próximas unidades de terreno correspondem a compartimentos geomorfológicos característicos de unidades denudacionais, nas quais são avaliadas a suscetibilidade a movimentos de massa.

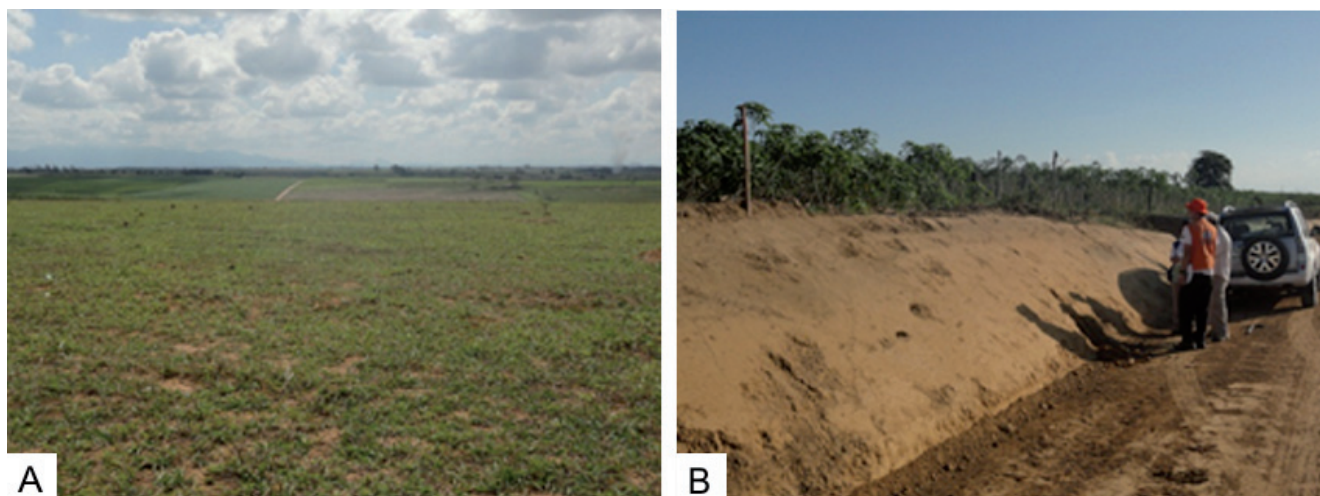


**Figura 10** - Extensa baixada fluvio-marinha do baixo curso do rio Itabapoana (a), com ocorrência de solos hidromórficos, ricos em sais e enxofre (Gleissolos Tiomórficos) (b). Divisa entre os Estados do Rio de Janeiro (São Francisco do Itabapoana/RJ) e do Espírito Santo (Presidente Kennedy/ES).

Os **tabuleiros preitorâneos do baixo vale do rio Itabapoana** apresentam um cenário geomorfológico constituído por vastas superfícies tabulares de relevo praticamente plano, sulcadas por uma rede de baixa densidade de drenagem originando episódicos vales em “U”, situadas em cotas baixas, entre 20 e 60 metros de altitude (figura 11). Tais feições são esculpidas em rochas sedimentares pouco litificadas de idade Neógena do Grupo Barreiras, com desenvolvimento de espessos regolitos e solos muito bem drenados, apresentando nível freático muito profundo. Registra-se

um amplo predomínio de solos profundos e lixiviados (Latosolos Amarelos) de textura argilosa, com estrutura granular e forte estabilidade frente a processos erosivos. Tais terrenos apresentam um ótimo comportamento geotécnico com ocorrência de solos com alta capacidade de carga e excelente escavabilidade.

Sobre os tabuleiros prevalece a uma avaliação de uma suscetibilidade a movimentos de massa Baixa. Estes terrenos destacam-se por sua estabilidade morfodinâmica e excelente potencial para múltiplas formas de uso e ocupação.



**Figura 11** - Extensas superfícies tabulares dos topos de tabuleiros (a), embasados por rochas sedimentares do Grupo Barreiras (b). Desenvolvimento de solos espessos e bem drenados (Latosolos Amarelos). Município de São Francisco do Itabapoana/RJ.

As **colinas amplas da Depressão do rio Itabapoana** (em cor verde-clara – vide figura 7) apresentam um cenário geomorfológico constituído por um relevo colinoso de declividades suaves e baixas amplitudes de relevo, em geral, inferiores a 50 metros de desnivelamento. Os topos apresentam formato alongado ou arredondado com padrão similar a “dorso de baleia” com vertentes convexas de baixas declividades, invariavelmente, inferiores a 10°. Esta unidade de terreno reflete, de forma mais contundente, a atuação do intenso processo de intemperismo químico sobre substrato rochoso, gerando espessos regolitos e solos bem drenados, com nível freático profundo. Deste modo, o relevo suave colinoso está situado em cotas baixas, restrito à porção sudeste do município ou próximo à calha dos rios Itabapoana e Preto e o baixo curso do rio Muqui do Sul, em cotas que variam entre 50 e 130 metros de altitude (figura 12).

Esta unidade encontra-se sustentada por rochas metassedimentares de idade Neoproterozoica da Faixa Ribeira. Predominam os paragneisses bandados do Grupo São Fidélis (Vieira et al., 2014). Dominam solos derivados de solos residuais, com pouca ou quase nenhuma variação textural, muito desenvolvidos, muito profundos,

permeáveis, bastante friáveis e com baixa fertilidade natural, localizados nas áreas mais planas de topo - Latossolos Vermelho-Amarelos. São muito resistentes à erosão, bem estruturados, de textura argilo-arenosa com alta capacidade de carga e boa escavabilidade. Subordinadamente ocorrem nas vertentes - Argissolos Vermelho-Amarelos que são solos profundos e com boa estruturação, normalmente, em blocos angulares e subangulares. São bem drenados, com incremento de argila em subsuperfície, caracterizando um gradiente textural, que interfere diretamente no fluxo diferencial de água no solo, favorecendo ao desenvolvimento dos processos erosivos, intensificado à medida que se eleva a declividade desses solos. Entretanto, por serem bem drenados e com boa estruturação, da mesma forma que os Latossolos, possuem bom comportamento geotécnico.

Sobre as colinas prevalece a uma avaliação de uma suscetibilidade a movimentos de massa predominantemente Baixa. Excetuando-se as porções das vertentes, um pouco mais declivosas, estes terrenos também se destacam por sua estabilidade morfodinâmica e apresentam bom potencial para múltiplas formas de uso e ocupação.



**Figura 12** - Domínio colinoso de baixa amplitude de relevo, suaves vertentes (a) e topos levemente arredondados (b). Vale do rio Preto, Mimoso do Sul/ES.

As **colinas dissecadas e morros baixos da Depressão do rio Itabapoana** (em cor verde – vide figura 7), por sua vez, apresentam um cenário geomorfológico constituído por um relevo um pouco mais movimentado do que o descrito para a unidade de

terreno anterior. Destaca-se um padrão de colinas e morros dissecados de declividades moderadas (entre 5° e 20°) e baixas a médias amplitudes de relevo (entre 50 e 120 metros), apresentando vertentes convexo-côncavas e topos arredondados (figura 13).

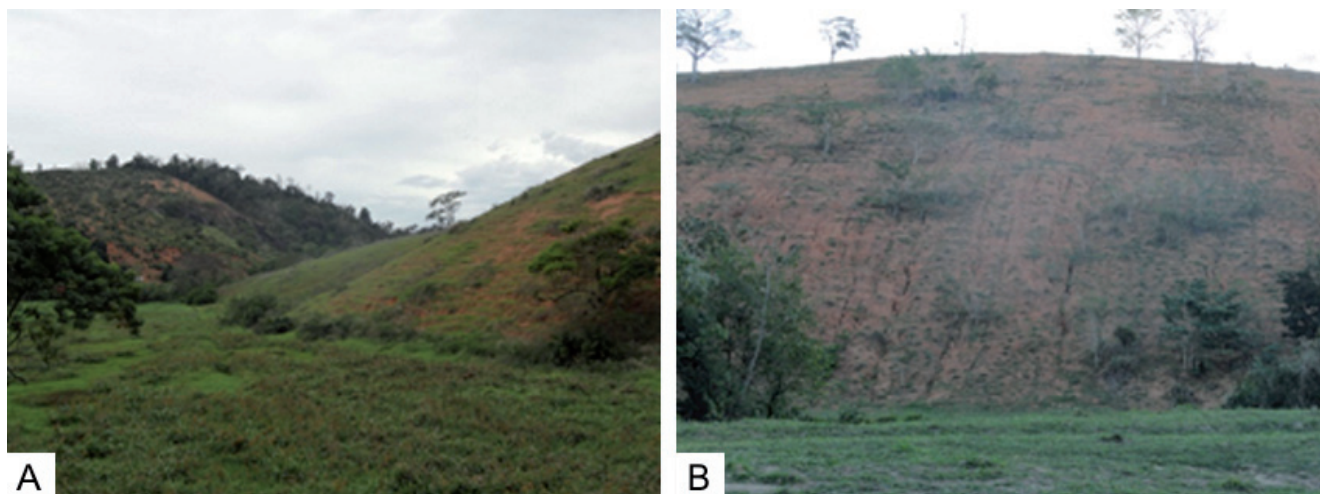
Esta unidade de terreno abrange grande parte das “terras baixas” de Mimoso do Sul, notadamente, as porções sul e sudeste do município. Devido à ocorrência de vertentes com declividades mais acentuadas e uma maior atuação de processos erosivo-deposicionais, observam-se regolitos com espessuras variáveis e não apenas espessos. A rede de drenagem apresenta uma média densidade, o que denota uma maior dissecação do relevo, em comparação com o relevo suave colinoso.

Este relevo ondulado está situado ainda em cotas baixas, que variam entre 80 e 200 metros de altitude e encontra-se sustentado por rochas metassedimentares e ortoderivadas de idade Neoproterozoica da Faixa Ribeira. Predominam os paragnaisses bandados do Grupo São Fidélis; os mármorees do Grupo Italva e os ortognaisses da unidade Cachoeiro (Vieira et al., 2014). Neste tipo de relevo predominam solos muito profundos, com estruturas em blocos, bem drenados e com gradiente textural caracterizando os Argissolos Vermelho-Amarelos, derivados de solos residuais e colúvios. Quando estes solos têm caráter abrupto, isto é, apresentam marcante descontinuidade hidráulica entre os horizontes A e Bt (figura 13) registra-se processos de erosão laminar severa, e

erosão em sulcos expondo, muitas vezes, o saprolito, tornando toda a vertente exposta a eventos de deslizamentos planares ou translacionais rasos no contato solo/solo. Nos casos onde os solos estão em condições avançadas de erosão (figura 13) com elevada densidade de sulcos verticalizados, a suscetibilidade é muito alta, considerando que em alguns casos, antes do deslizamento ocorre justamente a fase de sulcamento na encosta.

Nesta unidade de terreno, registra-se ainda a ocorrência disseminada de rampas de alúvio-colúvio que entulham as cabeceiras de drenagem em anfiteatro e os fundos de vales de pequenos vales tributários (Bigarella & Mousinho, 1965; Moura & Silva, 1998). Esta unidade morfoestratigráfica representa um ambiente deposicional transicional entre os domínios fluvial e de encostas (figura 1) e apresenta comportamento geotécnico específico, tanto com relação aos materiais, que apresentam um incipiente selecionamento de areias fluviais, intercalados com depósitos de encosta, como também quanto a uma média suscetibilidade à inundação nas porções mais distais das rampas.

Sobre as colinas dissecadas e morros baixos prevalece a uma avaliação de uma suscetibilidade a movimentos de massa predominantemente Média.



**Figura 13** - Relevo ondulado de colinas e morros baixos (a) sujeito à instalação de processos erosivos devido a condicionantes dos solos e dos regolitos (b). Vale do córrego Santa Rosa, Mimoso do Sul/ES.

Os **morrotes em zonas de cisalhamento** apresentam uma ocorrência muito restrita em Mimoso do Sul devido à raridade de importantes estruturas tectônicas regionais de idade Brasileira (falhas de empurrão e zona de cisalhamento) estando, portanto, dispersos em feições isoladas

em meio ao domínio de **colinas dissecadas e morros baixos**. Entretanto, a despeito do fato de não ser possível mapear o relevo de morrotes como uma zona expressiva no município, esta unidade merece ser destacada devido ao diferenciado compartimento geotécnico verificado neste tipo de

relevo. Os morrotes consistem, em muitos casos, de feições do relevo fortemente influenciadas por condicionantes litoestruturais do substrato rochoso e exibem, via de regra uma maior suscetibilidade a processos de erosão e movimentos de massa (Dantas et al., 2015). Os morrotes apresentam vertentes retilíneas e dissecadas com declividades moderada a alta (entre 10° e 30°) e baixas a médias amplitudes de relevo (entre 40 e 100 metros), sendo observáveis em larga escala ao longo de importantes faixas de cisalhamento (figuras 14 e 15). Os topos são, em geral, aguçados ou em cristas, o que denota uma maior efetividade de processos erosivos.

Devido à ocorrência de curtas vertentes íngremes e retilíneas, predominam regolitos com espessuras variáveis e solos jovens, pouco profundos, com incipiente desenvolvimento estrutural, relação silte/argila elevada, derivando solos residuais que compreendem a classe dos Cambissolos Háplicos. A elevada relação silte/argila, além de indicar o baixo grau de intemperismo, também se refere ao pequeno desenvolvimento estrutural encontrado nesses solos. Sendo a estrutura do solo um dos elementos mais importantes nas relações de fluxo de água do solo, essa deficiência torna-os mais suscetíveis tanto aos processos de erosão quanto aos de movimentos de massa.

Sobre o relevo de morrotes prevalece a uma avaliação de uma suscetibilidade a movimentos de massa predominantemente Alta, o que demonstra que nem sempre formas de baixa amplitude de relevo representam terrenos estáveis.



**Figura 14** - Relevo dissecado de morrotes alinhados em cristas com vertentes retilíneas e declivosas junto à represa de Ribeirão da Lages, no sopé da serra das Araras. A esculturação desses terrenos está condicionada pela zona de cisalhamento Jacuecanga – Conrado (municípios de Pirai e Barra do Pirai/RJ).



**Figura 15** - Manto de intemperismo de rochas miloníticas com foliação subvertical e alta suscetibilidade à erosão e a movimentos de massa, junto à zona de cisalhamento do rio Paraíba do Sul (município de Pirai/RJ).

Os **morros altos dos contrafortes Mantiqueira/Caparaó** (em cor verde-escuro – vide figura 7) apresentam um cenário geomorfológico constituído por um planalto dissecado em morros amplos de declividades moderadas a altas (entre 10° e 35°) e médias a altas amplitudes de relevo (entre 80 e 250 metros), apresentando vertentes convexo-côncavas a retilíneas e topos arredondados a aguçados (figuras 16 e 17).



**Figura 16** - Paisagem regional do relevo de morros altos, convertidos em extensas áreas de monocultura de café arábica, muito comum nas “terras altas” do Espírito Santo. Cercanias da vila de Conceição do Muqui, Mimoso do Sul/ES.

Esta unidade de terreno abrange grande parte das “terras altas” de Mimoso do Sul, notadamente, a porção noroeste do município, englobando o alto vale do rio Muqui do Sul. Devido à ocorrência de vertentes com declividades mais acentuadas e

uma maior atuação de processos erosivo-depositivos, observam-se regolitos com espessuras variáveis e não apenas espessos. A rede de drenagem apresenta uma média a alta densidade, com ocorrência de regolitos com espessuras variáveis, predominantemente capeados por coberturas coluvionares. Subordinadamente, também são registrados depósitos de tálus.



**Figura 17** - Escorregamento em corte de estrada, expondo espesso regolito. Esta unidade de terreno apresenta alta suscetibilidade a deslizamentos planares ou escorregamentos rotacionais na massa de solo (entre os horizontes B e C ou em descontinuidades do saprolito). Rodovia ES-014, entre as localidades de Mimoso do Sul e Conceição do Muqui.

Este relevo fortemente ondulado está alçado ainda em cotas altas, que variam entre 600 e 900 metros de altitude e encontra-se sustentado, predominantemente, por rochas metassedimentares de idade Neoproterozoica da Faixa Ribeira. Aflorem, principalmente, os biotita gnaises do Grupo São Fidélis e os mármores do Grupo Italva (Vieira et al., 2014). Neste tipo de relevo predominam ainda solos muito profundos, bem desenvolvidos, em estágio avançado de intemperismo, consequentemente com material coloidal com baixa capacidade de troca de cátions. São permeáveis, porosos e muito friáveis, sendo pouco suscetíveis aos processos erosivos - Latossolos Vermelho-Amarelos. Estão associados aos Argissolos Vermelho-Amarelos onde ocorre um incremento de argila no horizonte subsuperficial, muitas vezes, caracterizado pela diferença textural do horizonte subsuperficial com o horizonte suprajacente. Este fato provoca um diferencial de infiltração de água no solo, que quando abrupto os torna muito suscetíveis à erosão.

Assim como os Latossolos, são os solos profundos, bem drenados, permeáveis, em geral, de coloração vermelho-amarelada ou vermelha, com textura mais grosseira em superfície e mais fina em profundidade. A argila é de atividade baixa e a suscetibilidade a erosão é moderada tendendo a alta quando o declive é acentuado.

Sobre os morros altos prevalece a uma avaliação de uma suscetibilidade a movimentos de massa predominantemente Alta. Observam-se, episodicamente, cicatrizes de deslizamentos sobre esta unidade de terreno.

As **serras dos contrafortes Mantiqueira/Caparaó** (em cor azul - vide figura 7) apresentam um cenário geomorfológico constituído por um relevo de aspecto montanhoso de vertentes muito íngremes a escarpadas (entre 20° e 45°, com ocorrência de paredões rochosos subverticais) e altas amplitudes de relevo (acima de 300 metros). Ressaltam-se na paisagem encostas retilíneas com paredões rochosos e topos em cristas, aguçados ou em pontões graníticos arredondados (figuras 18 e 19).

Esta unidade de terreno ocupa os terrenos mais acidentados e os cimos mais elevados das “terras altas” de Mimoso do Sul (figura 18), abrangendo, as porções central e noroeste do município. Os processos erosivo-depositivos e movimentos gravitacionais de grande magnitude são dominantes neste tipo de relevo apresentando, por conseguinte, uma notória instabilidade morfodinâmica. Tais terrenos são, deste modo, sulcados por uma rede de drenagem de alta densidade, denotando uma forte atuação da erosão e da incisão vertical da rede de canais. Predominam, nas altas encostas, mantos de alteração rasos e afloramentos de rocha. As baixas vertentes e zonas de piemonte, por sua vez, são entulhados por possantes depósitos de tálus que se espraiam e entulham os fundos de vales incisos e encaixados dessa região serrana (figura 19).

Este relevo montanhoso está alçado ainda em cotas muito elevadas, cujos picos atingem cotas entre 700 e 1.430 metros de altitude, sendo que alguns contrafortes montanhosos que emergem do piso das “terras baixas” atingem cotas mais modestas (entre 400 e 600 metros de altitude). Os terrenos serranos encontram-se sustentados, predominantemente, por plútons ígneos de idade Cambriana e rochas ortoderivadas e



metassedimentares de idade Neoproterozoica e da Faixa Ribeira. Afloram, principalmente, granitos pós-orogênicos; ortognaisses da unidade Cachoeiro e mármore do Grupo Italva (Vieira et al., 2014). Esta unidade reúne solos jovens, predominantemente rasos, com pequena expressão dos processos pedogenéticos e sem grandes modificações do material parental. Apresenta severas restrições ao desenvolvimento radicular face ao contato lítico ocorrer próximo de 50 cm de profundidade. Essa característica determina um volume reduzido de “ancoragem” para as plantas, facilitando o tombamento e restringindo a sua utilização apenas para plantas de sistema radicular não muito desenvolvido, sendo comum a ocorrência de pastagem compreendendo a classe dos Neossolos Litólicos. Subordinadamente, ocorrem solos pouco profundos, com desenvolvimento estrutural incipiente e drenagem moderada. É comum observar nesses solos minerais facilmente intemperizáveis e relação silte/argila elevado, além de variegado de cores devido ao pequeno grau de intemperismo. São solos muito suscetíveis aos processos erosivos, principalmente devido à baixa coesão/adeseção das estruturas do solo e também suscetíveis aos movimentos e massa, principalmente no contato solo/rocha onde ocorre uma mudança abrupta de materiais e de fluxo de infiltração de água. Observa-se também a ocorrência de pedregosidade e rochosidade, além de afloramentos de rocha.



**Figura 18** - Maciço montanhoso de Muqui do Sul, esculpido em um plúton granítico de conformação ovalada com aproximadamente sete quilômetros de extensão em seu eixo maior. Noroeste do município de Mimoso do Sul/ES.



**Figura 19** - Cenário típico do relevo serrano: altas vertentes muito íngremes com ocorrência de paredões rochosos; baixas vertentes com vertentes suavizadas e fundos de vales entulhados por rampas de colúvio com depósitos de tálus. Vale do córrego Santa Maria, nos arredores da sede municipal de Mimoso do Sul.

Sobre o domínio serrano prevalece a uma avaliação de suscetibilidade a movimentos de massa indubitavelmente Alta. Ressalta-se uma ocorrência generalizada de distintos processos de movimentos de massa, dentre o quais, destacam-se: escorregamentos translacionais rasos no contato solo – rocha; quedas de lascas de juntas de alívio de tensão (figura 20); queda de blocos, especialmente em maciços graníticos (figura 21).



**Figura 20** - Paredão rochoso com evidências de juntas de alívio de tensão, demonstrando alta suscetibilidade a queda de lascas e deslizamentos de solos rasos (Neossolos Litólicos) no contato solo-rocha. Serra Santa Rosa, Mimoso do Sul/ES.



**Figura 21** - Pico dos Pontões (1.438 metros). Ponto culminante de Mimoso do Sul, situado no maciço granítico de Muqui do Sul. Ressalta-se o papel do padrão ortogonal das diáclases verticais promovendo o profundo entalhamento do maciço rochoso e posterior geração de blocos arredondados. Alta suscetibilidade à queda de blocos.



**Figura 22** - Alto curso do vale do rio Paraíso, apresentando mais de 700 metros de desnivelamento, sendo entalhado por possante depósito de tálus que recobre todo o fundo de vale e as baixas vertentes. No primeiro plano, planície aluvionar. Mimoso do Sul/ES.

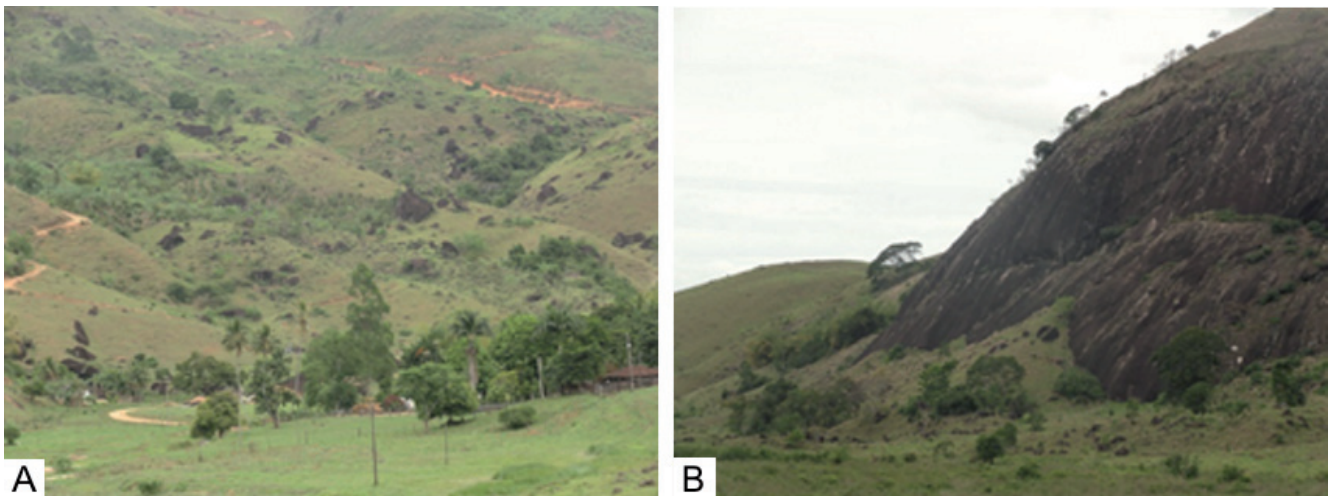
Sobre estes terrenos acidentados das **serras dos contrafortes Mantiqueira/ Caparaó**, um destaque especial deve ser conferido às rampas de colúvio com depósitos de tálus (em cor vermelha – vide figura 7). As rampas de colúvio com depósitos de tálus compreendem depósitos de encosta com matriz repleta de blocos de distintos tamanhos (decimétricos a decamétricos) e apresentam grandes dimensões preservadas nos fundos de vales de vales de primeira e segunda ordem e nas baixas a médias encostas das serras e maciços montanhosos (figuras 22 e 23). Esta unidade morfoestratigráfica consiste, por excelência, numa unidade geotécnica onde se ressalta a instabilidade das encostas e norteiam o alcance das áreas de atingimento de movimentos gravitacionais de massa de grande magnitude. Os diferentes materiais transportados gravitacionalmente, todos misturados, desde blocos até materiais bastantes intemperizados, alguns com alto teor de matéria orgânica provindos do horizonte superficial (A) e outros com alta relação silte/argila provindo do horizonte C ao se depositarem, constituem camadas heterogêneas onde o fluxo de água tende a constituir caminhos aleatórios diante das grandes diferenças de solo facilitando dessa forma a desestruturação e à movimentação do depósito vertente abaixo.

Estes terrenos estão sujeitos a processos de rastejo devido a sua intrínseca instabilidade geotécnica e retrabalhamento da superfície do depósito por subseqüentes movimentos de massa.



**Figura 23** - Depósito coluvionar, rico em blocos decimétricos e solo residual sotoposto em corte de estrada vicinal no vale do rio Paraíso, Mimoso do Sul/ES.

Entretanto, observa-se na paisagem que distintos processos gravitacionais originam as rampas de colúvio e depósitos de tálus. Trata-se, na realidade, de verdadeiros **Complexos de Rampas de Colúvio e Tálus**, parafraseando o conceito original de Meis & Monteiro (1979). Tais eventos ocorrem episodicamente, ao longo do tempo, interdigitando-se ou sobrepondo-se entre si, gerando uma superfície deposicional fortemente inclinada e irregular, coalhada de blocos na superfície (figura 1). Destacam-se, para sua gênese, as grandes corridas de detritos (*debris-flows*) e, subordinadamente, os deslizamentos planares rasos e as quedas de blocos (figura 24).

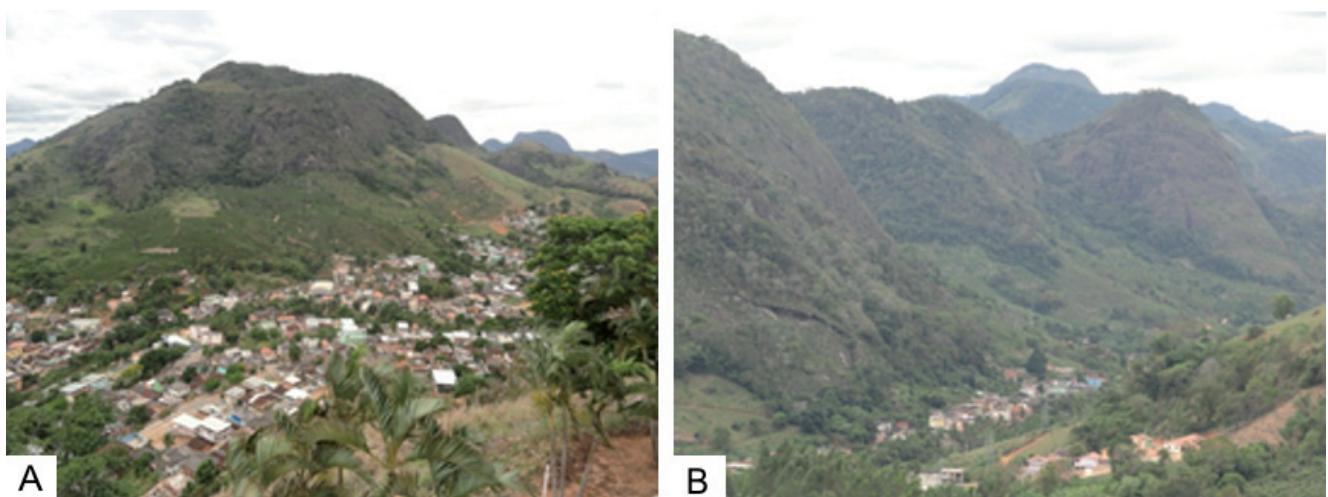


**Figura 24** - Registros de depósitos de tálus recobrimdo, respectivamente: o talvegue do alto curso do rio Paraíso por sucessivas corridas de detritos (a); e vertentes laterais do vale por deslizamentos e quedas de blocos e de lascas em sopés de paredões rochosos (b). Alto vale do rio Paraíso, Mimoso do Sul/ES.

Por fim, o sítio urbano de Mimoso do Sul está situado justamente na unidade de terreno mais desfavorável para a implantação e o desenvolvimento de um núcleo urbano: a cidade está encravada no fundo de vale do rio Muqui e encontra-se imprensado por diversos contrafortes serranos alinhados (serras da Lajinha, da Pratinha e da Invernada). Estes alinhamentos serranos apresentam amplitudes de relevo superiores a 400 metros, vertentes íngremes e paredões rochosos subverticais. Neste cenário adverso, Mimoso do Sul encontra-se *“entre a cruz e a espada”*. A porção da malha urbana (mais antiga) que ocupa a planície de inundação do rio Muqui do Sul está sujeita a eventos de

inundação de alta energia e, até mesmo, fluxos de enxurrada (figura 25), enquanto as áreas de expansão urbana recente que galgam as baixas vertentes dos relevos serranos ocupam áreas de atingimento a movimento de massa e estão sujeitas, principalmente, a quedas de blocos e a deslizamentos planares (figura 25).

Em suma, a escolha equivocada da implantação de um sítio urbano, a ocupação inadequada dos terrenos e a expansão desordenada da malha urbana em terrenos com alta suscetibilidade produzem, inexoravelmente, **áreas de riscos de movimentos de massa, enxurradas e inundações**.



**Figura 25** - Sítio urbano de Mimoso do Sul situado em fundo de vale encaixado do rio Muqui do Sul (a). Ocorrência de áreas de risco a quedas de blocos, deslizamentos rasos, inundações e enxurradas (b).

## 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O mapeamento de padrões de relevo e a análise integrada do meio físico constituem-se num valioso instrumento para subsidiar os estudos de avaliação e determinação de distintas unidades de terreno com diferenciados graus de suscetibilidade a movimentos de massa e inundação nos diversos terrenos do Sudeste Brasileiro.

O baixo curso do rio Itabapoana se notabiliza por vastas baixadas fluviomarinhas com domínio de solos hidromórficos (Gleissolos Salinos e Organossolos) e nível freático subaflorante. Tais condicionantes pressupõem uma muito alta suscetibilidade a inundações. Tais terrenos encontram-se ladeados por terrenos planos com solos espessos e bem drenados (Latosolos) dos tabuleiros do Grupo Barreiras. Tais condicionantes pressupõem uma muito baixa suscetibilidade a movimentos de massa.

As “terras baixas” do município do Mimoso do Sul abrangem terrenos colinosos de baixas amplitudes de relevo e declividades suaves, apresentando espessos mantos de alteração e solos profundos e bem drenados (Latosolos e Argissolos). Tais condicionantes pressupõem uma baixa a média suscetibilidade a movimentos de massa. Estes terrenos estão situados na depressão do médio vale do rio Itabapoana. Destaca-se, ainda, uma extensa zona de várzea com relevo plano e solos hidromórficos (Neossolos Flúvicos a Gleissolos Háplicos), o que pressupõe uma média a alta suscetibilidade a inundações.

Por outro lado, nas “terras altas” do município, caracterizadas por maciços montanhosos esculpidos em plútons graníticos e por planaltos dissecados em morros altos, observam-se elevadas amplitudes de relevo e encostas íngremes, apresentando esparsos paredões rochosos e um amplo domínio de solos rasos e pouco evoluídos (Cambissolos e Neossolos Litólicos) com franca ocorrência de deslizamentos planares no contato solo-rocha e deslocamentos proporcionados por juntas de alívio de tensão e quedas de blocos (em especial, sobre os maciços graníticos). Tais condicionantes pressupõem uma alta suscetibilidade a movimentos de massa. Destacam-se, por fim, a deposição de monumentais complexos de rampas de talus/colúvio que se espraiam, interdigitam e

recobrem, por vários quilômetros, os fundos de vales de rios que dissecam as vertentes muito declivosas dos maciços montanhosos do sul do Espírito Santo. Tais possantes depósitos de encostas documentam antigos e sucessivos eventos gravitacionais de grande magnitude e registram as zonas de atingimento potencial a futuros movimentos de massa.

## REFERÊNCIAS

- Avelar A.S., Coelho Netto A.L., Lacerda W.A., Becker L.B., Mendonça M.B. 2011. Mechanisms of the recent catastrophic landslides in the mountainous range of Rio de Janeiro, Brazil. In: Proceedings of the Second World Landslide Forum - Abstract Book, Roma - Italy - CdRom: 5pp.
- Bigarella J.J., Mousinho M.R. 1965. Considerações a respeito dos terraços fluviais, rampas de colúvios e várzeas. *Bol. Paran. Geografia*, Curitiba, 16/17: 153-197.
- Bitar O.Y. (Coord.) 2014. *Cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações 1:25.000: nota técnica explicativa*. São Paulo: IPT/CPRM: 50p. (IPT Publicação 3016) (publicação on-line).
- Coelho Netto A.L. 1999. Catastrophic landscape evolution in a humid region (SE Brazil): inheritances from tectonic, climatic and land use induced changes. In: IAG, International Conference on Geomorphology, IV, Suplemento di Geografia Física e Dinâmica Quaternária III, Plenary Lecture, Bologna - Itália, p.: 21-48.
- Coelho Netto A.L., Sato A.M., Avelar A.S., Viana L.G.G., Araújo I.S., Ferreira D.L.C., Lima P.H.; Silva A.P.A., Silva R.P. 2011. January 2011: The extreme landslide disaster in Brazil. In: Proceedings of the Second World Landslide Forum - Abstract Book, Roma - Italy - CdRom: 6pp.
- Dantas M.E. 2013. Análise de padrões de relevo: um instrumento aplicado ao mapeamento da Geodiversidade. In: Bandeira I.C.N. (ed.) Geodiversidade do Estado do Maranhão, CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 10, Teresina/PI, p.133-140.
- Dantas M.E., Brandão R.L., Ambrósio M., Santana M.S. 2015. Condicionantes litoestruturais e

morfológicos na determinação de suscetibilidades a movimentos de massa, transecto Barra do Pirai – Ipiabas, médio vale do rio Paraíba do Sul/RJ. In: ABGE, Congr. Bras. Geol. Eng. e Ambiental, 15, Bento Gonçalves/RS. Anais, (CdRom): 10p.

De Ploey J. & Cruz O. 1979. Landslides in the Serra do Mar, Brazil. *Catena*, 6: 111-122.

Diniz, N.C. 2012. Cartografia geotécnica por classificação de unidades de terreno e avaliação de suscetibilidade e aptidão. *Rev. Bras. Geol. Eng. e Ambiental*, 2:29-77.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 2013. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 3.ed. EMBRAPA, Brasília, 353p.

Fernandes N.F. & Amaral C.P. 1996. Movimentos de massa: uma abordagem geológico-geomorfológica. In: Guerra A.J.T. & Cunha S.B. (orgs.). *Geomorfologia e Meio Ambiente*, 3, Ed. Bertrand Brasil. Rio de Janeiro, p 123-194.

Fernandes N.F., Guimarães R.F., Gomes R.A.T., Vieira B.C., Montgomery D.R., Greenberg H. 2001. Condicionantes geomorfológicos dos deslizamentos nas encostas: avaliação de metodologias e aplicação de modelo de previsão de áreas susceptíveis. *Rev. Bras. Geomorfologia*, 2(1):51-71.

Ferreira C.E.O. 1999. Mapeamento e qualificação das coberturas inconsolidadas aplicados ao planejamento territorial na escala 1:250.000 - Folha Macaé, Estado do Rio de Janeiro. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 61p.

Finlayson A.A. 1984. Land surface evaluation for engineering practice; applications of the Australian PUCE system for terrain analysis. *The Quart. Journ. Eng. Geology*, 17(2): 149-158.

Guimarães R.F., Gomes R.A.T., Fernandes N.F. 1998. Avaliação de parâmetros morfológicos das cicatrizes dos escorregamentos da bacia do Rio Quitite (RJ). In: UGB, Simp. Nac. Geomorfologia, 2, Revista GEO-SUL, 14:316- 320.

Grant K., Finlayson A.A. 1978. The application of terrain analysis to urban and regional planning.

In: IAEG, International Congress of the International Association for Engineering Geology, III, Proceedings, 4-8 September 1978, Paris, p. 79-91.

Jones F.O. 1973. Landslides in Rio de Janeiro and Serra das Araras escarpment, Brazil. *U.S. Geological Survey Professional Paper*, 697, 42p.

Lollo J. A., Zuquette L.V. 1996. Utilização da técnica de avaliação do terreno em cartografia geotécnica: sistemática proposta e resultados obtidos para a quadrícula de Campinas. In: ABGE, Simp. Bras. Cart. Geotécnica, 2, Anais, São Carlos, p. 3-12.

Matula M. 1979. Regional engineering geological evaluation for planning purposes. *Bull. Intern. Assoc. Eng. Geol. and Environment*, 18: 18-24.

Meis M.R.M., Monteiro A.M.F. 1979. Upper Quaternary "Rampas": Doce River Valley, SE Brazilian Plateau. *Zeitsch. Geomorphologie*, 23(2): 132-151.

Moura J.R.S. & Silva T. M. 1998. Complexo de rampa de colúvio. In: *Geomorfologia do Brasil*. Cunha S.B. & Guerra A.J.T (orgs). Rio de Janeiro, Ed. Bertrand Brasil. p. 143-180.

Mousinho M. R., Xavier da Silva J. 1968. Considerações geomorfológicas a propósito dos movimentos de massa ocorridos no Rio de Janeiro. *Rev. Bras. Geografia*, 30(1): 55-72.

Paula J.P.L., Zaine J.E., Lima M.S., Oliveira E.M. 2008. Análise fisiográfica aplicada à elaboração de mapa geológico-geotécnico de região da Serra do Mar e Baixada Santista. *Rev. Geociências, UNESP*, 27(2): 249-264.

Ponçano W.L., Bistrichi, C.A., Carneiro C.D.R., Almeida M.A.; Pires Neto A.G., Almeida F.F.M. 1979. O conceito de sistemas de relevo aplicado ao mapeamento geomorfológico do Estado de São Paulo. In: SBG, Simp. Reg. *Geologia*, 2(v.2), Rio Claro, Atas, p. 253-262.

Ross J.L.S. 1992. O registro cartográfico dos fatos geomórficos e a questão da taxonomia do relevo. *Rev. Depto. Geografia, FFLCH-USP, São Paulo*, 6:17-29.

Santos A.R. 2014. Manual básico para elaboração e uso da Carta Geotécnica. Ed. Rudder, São Paulo, 109p.

- Shinzato E., Renk J.F.C., Dantas M.E., Teixeira W.G., Vargas L. 2012. Geotecnologia 3D na compartimentação geomorfológica das bacias hidrográficas dos rios Macacu e Caceribu - Recôncavo da Baixada da Guanabara /RJ. In: UGB, Simp. Nac. Geomorfologia, 9, Rio de Janeiro, CdRom: 5p.
- Silva C.R., Dantas M.E. 2011. Mapas Geoambientais. CPRM - Serviço Geológico do Brasil - DE-GET, Departamento de Gestão Territorial Rio de Janeiro/ RJ. Disponível em: [http://www.cprm.gov.br/publique/media/mapas\\_geoambientais\\_SCGG.pdf](http://www.cprm.gov.br/publique/media/mapas_geoambientais_SCGG.pdf)
- Sobreira F.S. 2001. Suscetibilidade a processos geológicos e suas consequências na área urbana de Mariana, MG. Geo.Br. Disponível em <http://www.dageo.ufop.br/geobr>.
- Vedovello R., Brollo M.J., Tominaga L.K., Riedel P.S., Cardoso D., Terrell D. 2002. Compartimentação fisiográfica do litoral norte do estado de São Paulo voltada para a avaliação de terrenos. In: ABGE, Congr. Bras. Geol. Eng. e Ambiental, 10, Ouro Preto. Anais, CdRom: 10p.
- Vieira B. C., Castro Jr. E., Fernandes N. F. 1998. Controles fito-morfológicos dos escorregamentos da bacia do Quitite (RJ). In: UGB, Simp. Nac. Geomorfologia, 2, Revista GEO-SUL, 14: 324-328.
- Vieira B. C., Fernandes N. F. 2004. Landslides in Rio de Janeiro: The role played by variations in soil hydraulic conductivity. Hydrol. Processes, 18: 791-805.
- Vieira V.S., Silva M.A., Correa T.R. , Lopes N.H.B. 2014. Mapa Geológico do Estado do Espírito Santo - 1:400.000. Belo Horizonte/MG, CPRM - Serviço Geológico do Brasil.
- Wolman M.G., Miller J.P. 1960. Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes. Journ. Geology, 68: 54-74.

# DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS FÍSICOS DO SOLO EM ENCOSTA SOB INFLUÊNCIA DE ESCORREGAMENTO TRANSLACIONAL RASO – NOVA FRIBURGO, RJ

DETERMINATION OF PHYSICAL PARAMETERS OF SOIL IN SLOPE UNDER INFLUENCE OF TRANSLATIONAL SLIDE – NOVA FRIBURGO, RJ

ROBERTA PEREIRA DA SILVA

*Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil*  
E-mail: pereira.roberta00@gmail.com

KARINA MENEZES MACHADO

*Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil*  
E-mail: karina.menezes@gmail.com

GERSON CARDOSO DA SILVA JÚNIOR

*Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil*  
E-mail: gerson@acd.ufrj.br

ANA LUIZA COELHO NETTO

*Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil*  
E-mail: ananetto@acd.ufrj.br

LEONARDO DE BONA BECKER

*Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil*  
E-mail: leonardobecker@poli.ufrj.br

ANDERSON MULULO SATO

*Universidade Federal Fluminense, Angra dos Reis, RJ, Brasil*  
E-mail: andersonsato@id.uff.br

## RESUMO ABSTRACT

No presente trabalho buscou-se determinar a influência de parâmetros físicos do solo e dos fluxos sub-superficiais de água na deflagração de escorregamentos translacionais rasos em encosta sobre substrato granítico. Foram aplicadas metodologias de investigação hidrologico-geotécnica como o método geofísico Ground Penetration Radar (GPR); sondagens a trado; análises qualitativa (caracterização tátil-visual) e quantitativa (análise granulométrica e comportamento *in situ* dos solos envolvidos na ruptura do ponto de vista de estrutura) e ensaios de campo para obtenção da condutividade hidráulica. Duas hipóteses sugerem que os fluxos de água subterrânea são de fundamental importância para o entendimento da deflagração dos movimentos

The objective of this work is to determine the influence of soil physical properties and groundwater flows on triggering mechanisms of shallow translational landslides on slopes with granite bedrock. Different hydrologic-geotechnical investigation methods were applied. Such methods included Ground Penetration Radar (GPR); auger boring; qualitative analysis (tactile and visual observations) and quantitative analysis (grain size analysis and *in situ* behavior of soil structure during the rupture process) and also hydraulic conductivity field tests. Two hypotheses suggest that groundwater flows are of utmost importance in landslides triggering mechanisms during extreme rain events, such an event occurred at Rio de Janeiro's state mountainous

gravitacionais de massa em eventos extremos de chuva, como o ocorrido na Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro, em janeiro de 2011. A primeira hipótese considera, de acordo com os resultados obtidos nos ensaios de condutividade hidráulica, a formação de um lençol suspenso devido à existência de uma camada mais permeável sobreposta a uma camada menos permeável. A outra hipótese adiciona a influência dos blocos rochosos *in situ*, evidenciados no radargrama e observados em campo, que associada à diferença de condutividade hidráulica entre as camadas, poderia ocasionar fluxo horizontal e ascendente, desencadeando os movimentos de massa.

**Palavras-chave:** condutividade hidráulica, fluxos sub-superficiais, movimentos de massa.

## 1 INTRODUÇÃO

O coeficiente de condutividade hidráulica (K) é um parâmetro físico-hidrológico do solo, que caracteriza a capacidade do solo em transmitir água através de seu perfil. Ela está diretamente relacionada às propriedades físicas do solo, como: tamanho das frações granulométricas, arranjo dos grãos e volume das partículas (Hillel 1980). Além disso, os valores de condutividade hidráulica podem ser atribuídos à estruturação (formação de agregados) dos solos *in situ*, especialmente quando se trata de frações granulométricas mais finas, demonstrando que, embora os valores de K sejam comumente classificados conforme as frações granulométricas, a textura por si só não representa na íntegra o comportamento da condutividade hidráulica (Lambe & Whitman 1969, Mesquita & Moraes 2004).

Em eventos extremos de chuva, como o ocorrido em janeiro de 2011 na Região Serrana do Rio de Janeiro, a condutividade hidráulica, aliada às características intrínsecas do perfil de solo, pode proporcionar condições hidrológicas adversas e induzir a rupturas, devido às descontinuidades entre camadas do terreno, que podem causar a formação de zonas saturadas suspensas que geram fluxos paralelos em diferentes posições da encosta (Selby 1993, Brugger et al. 1997, Lacerda et al. 1997, Van Asch et al. 1999). Isso ressalta a importância do estudo da condutividade hidráulica dos solos, haja vista a função que esta

região em janeiro de 2011. A primeira hipótese considera, de acordo com os resultados obtidos nos ensaios de condutividade hidráulica, a formação de um lençol suspenso devido à existência de uma camada mais permeável sobreposta a uma camada menos permeável. A outra hipótese adiciona a influência dos blocos rochosos *in situ*, evidenciados no radargrama e observados em campo, que associada à diferença de condutividade hidráulica entre as camadas, poderia ocasionar fluxo horizontal e ascendente, desencadeando os movimentos de massa.

**Keywords:** hydraulic conductivity, groundwater flows, mass movements.

propriedade exerce nos modelos de rupturas de flagradas durante eventos extremos de chuva.

A ocorrência de eventos de magnitude catastrófica ao longo da Serra do Mar é atestada pelos espessos depósitos coluvionares, muitos deles evidenciando o retrabalhamento de depósitos de escorregamentos pretéritos (Fernandes et al. 2001). Porém, a ocorrência desses eventos pode ser potencializada por uma série de fatores, como: o crescimento demográfico acelerado; a falta de planejamento territorial; e o uso ineficiente das bacias hidrográficas (Kobiyama et al. 2006). Estes fatores criam novas relações entre os agentes controladores de ordem natural, alterando as propriedades físicas do solo por mudanças de uso e cobertura, as quais influenciam na resposta hidrológica do terreno (Sidle et al. 1985, Fernandes & Amaral, 1996 Augusto Filho & Virgili 1998).

As características hidrológicas dos solos são resultantes da complexa interação entre os fatores geomorfológicos, geológicos, geotécnicos, climáticos e da ação antrópica, e podem determinar a frequência, o tipo e o tamanho dos escorregamentos (Van Asch et al. 1999). Na Serra do Mar, compartimento geológico-geomorfológico que se estende do Sudeste ao Sul do Brasil, há um predomínio de escorregamentos do tipo translacional raso (Lacerda 1997), os quais, frequentemente, caracterizam-se por superfícies de ruptura marcadas pelo contato entre solo e rocha ou entre dois tipos de solos, associadas às heterogeneidades dos materiais, que representam descontinuidades mecânicas e/ou hidrológicas (Guidicini & Nieble 1984).



Levando em conta o papel da água como principal agente deflagrador dos escorregamentos, este estudo busca o entendimento das relações existentes entre a dinâmica hidrológica da encosta-alvo da pesquisa, o substrato e as estruturas geológicas nos processos de infiltração e percolação da água. O intuito foi avaliar o comportamento dos fluxos subsuperficiais de água como subsídio ao entendimento das condições de deflagração dos escorregamentos. A hipótese inicial foi a de que a formação de um lençol suspenso, durante o evento extremo de chuva de janeiro de 2011 (levando ao aumento da poro-pressão e redução da tensão efetiva, e conseqüentemente, da resistência ao cisalhamento), teriam propiciado condições para deflagração de muitos dos 3.622 escorregamentos mapeados numa área de aproximadamente 421 km<sup>2</sup>, como registrado por Coelho Netto et al. (2013).

## 2 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada no município de Nova Friburgo (a cerca de 140 km da capital Rio de Janeiro), no distrito de Campo do Coelho, na coordenada 22°16'18" S / 42°35'56" O (SIRGAS 2000), a aproximadamente 1110 m de altitude, em uma área predominantemente rural na bacia do córrego do Roncador, afluente do rio Grande.

A escolha do município está relacionada ao fato de ter sido o mais afetado no evento extremo de chuva ocorrido em janeiro de 2011 na Região Serrana. Este evento é considerado o maior desastre socioambiental registrado no país, segundo o Banco Mundial (2012), devido as onerosas perdas humanas e materiais. Nova Friburgo concentrou 60% da população atingida, 180 mil pessoas afetadas.

Nova Friburgo está situada na Serra do Mar, formada por um grande batólito granítico de rochas magmáticas intrusivas, associadas a migmatitos heterogêneos, biotita gnaisses graníticos, leucogranitos gnáissicos e granitos pós-colisionais (Hartwig & Riccomini 2009). De acordo com Dantas et al. (2001), a característica marcante das escarpas serranas é a presença de solos pouco espessos e bastante lixiviados, devido ao clima úmido, proporcionado pela barreira física imposta ao avanço dos sistemas frontais de precipitação. O município é apontado como o mais chuvoso do Estado,

com precipitação média anual (1977 – 2000) em torno de 2500 mm nas áreas mais altas, decrescendo progressivamente para norte até 1300 mm (Coelho Netto et al. 2013). Estes autores indicam ainda que o clima predominante na Região Serrana é o Tropical de Altitude, e a temperatura média anual é de 16° C, podendo variar entre extremos de 37° C e - 2° C. O bioma característico da Região Serrana é o da Mata Atlântica.

A encosta alvo desta pesquisa foi escolhida devido sua representatividade na paisagem local frente ao evento extremo de chuva de janeiro de 2011 (Avelar et al. 2011), a partir do inventário de cicatrizes, desenvolvido por Coelho Netto et al. (2013). A área-alvo apresenta uma topografia concava resultante de várias gerações de escorregamentos, iniciados a, pelo menos, 10.000 anos atrás, e reativados novamente em janeiro de 2011 (Coelho Netto et al., 2016). Esta reativação da feição erosiva resultou de um escorregamento do tipo translacional raso, com uma espessura de ruptura média de 1,5 m próximo as bordas da cicatriz (Machado 2013). A declividade média do talude é de 32° e suas dimensões projetadas são de 170 m de largura e 300 m de comprimento, com uma área de aproximadamente 4 ha. O substrato rochoso é dominado por rochas do tipo ortognaisses graníticos (Vinagre et al. em preparação), as quais favorecem a produção de blocos *in situ*. Além disso, as coberturas de colúvios acumulados a partir do sua porção média-inferior apresentam-se ricas em blocos transportados em eventos passados e atuais.

## 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A fim de atingir os objetivos propostos pela pesquisa, optou-se por uma caracterização física dos materiais do solo, incluindo a execução de sondagens, a coleta de amostras para análises qualitativa (análise tátil-visual) e quantitativa (análise granulométrica), e a realização de ensaios de condutividade hidráulica *in situ*. Para um melhor conhecimento da área em subsuperfície e subsidiar a alocação das sondagens e instalação dos piezômetros, optou-se por utilizar o método geofísico Ground Penetrating Radar (GPR). As técnicas e ensaios realizados são descritos abaixo.

### 3.1 Ground penetrating radar (GPR)

Foi realizado um perfil longitudinal de, aproximadamente, 110 m de extensão para a obtenção de dados referentes à espessura e profundidade das camadas de solo, características do embasamento rochoso e diferenças entre horizontes (Figura 1). Informações sobre a profundidade do topo rochoso e a localização do nível freático não puderam ser obtidos devido as limitações do terreno, que não permitiram a utilização de uma antena de maior alcance em profundidade. Para a aquisição dos dados empregou-se uma antena de alta frequência de 200 MHz, a qual possibilita, segundo Porsani (1999), um alcance ótimo até 5 metros de profundidade, ou seja, maior que a profundidade do escorregamento observado.

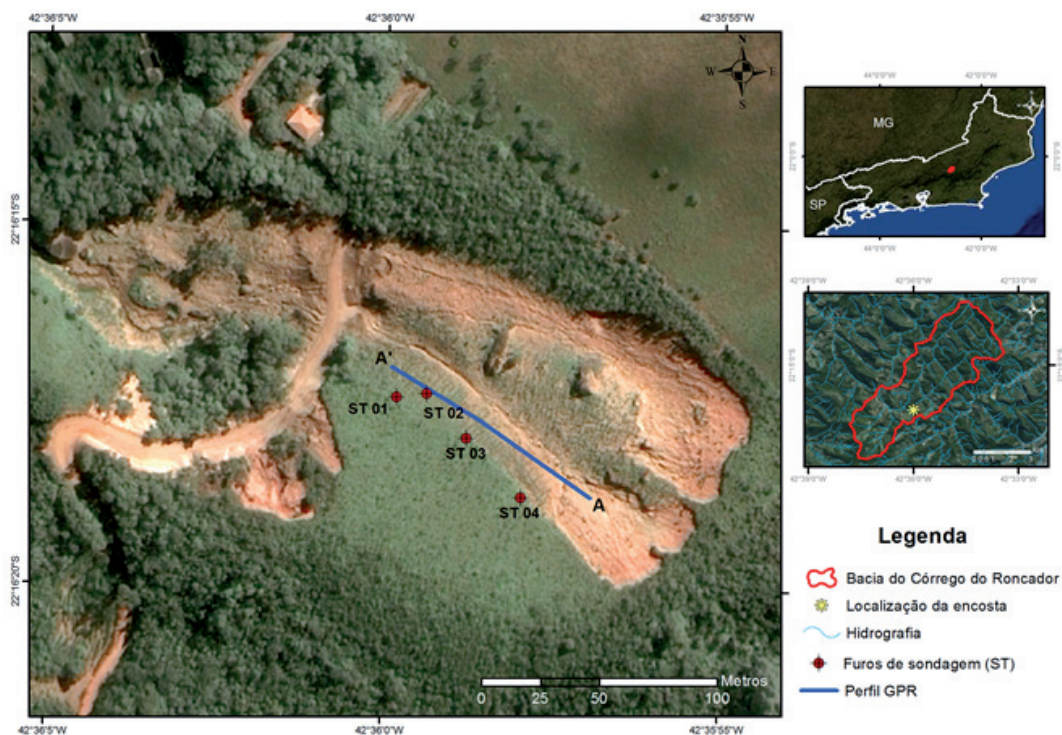
Os dados foram coletados utilizando um aparelho de GPR, modelo TerraSIRch SIR (Sub-surface Interface Radar) System-3000 fabricado pela Geophysical Survey Systems, Inc (GSSI), monoestática com sistema de antena blindada, que tem a vantagem de sofrer menos interferências por ruídos eletromagnéticos externos (torres de alta tensão, celulares, rádio, etc.). O modo de

operação utilizado foi o perfil de reflexão com afastamento constante, mais conhecido como “common offset”.

O tratamento dos dados GPR se deu basicamente nas seguintes etapas: edição dos dados, processamento do sinal e apresentação da imagem processada. Cada um desses passos foi monitorado individualmente no “software”, com o objetivo de proporcionar o melhor ajuste da seção radargrama a ser produzida. Os arquivos de dados receberam processamentos dentro do software REFLEXW, versão 4.2.

### 3.2 Sondagens a trado (ST)

Foram realizados 9 furos de sondagem distribuídos em quatro posições da encosta. Na primeira posição (ST 01) foram executados três furos em diferentes profundidades e nas demais posições (ST 02, ST 03, ST 04) foram realizados apenas dois furos em profundidades de interesse, visando a coleta de amostras de solo e instalação de permeâmetros para a realização de ensaios de condutividade hidráulica *in situ* (Figura 1).



**Figura 1** - Cicatriz do deslizamento de Janeiro de 2011, com as localizações do perfil de GPR e dos pontos de sondagens a trado (ST) na encosta experimental situada na vertente direita do médio vale do Córrego do Roncador, no município de Nova Friburgo - RJ.

### 3.3 Caracterização tátil-visual e análise granulométrica

A caracterização física do solo foi realizada no Laboratório de Geotecnia da COPPE-UFRJ, a partir de amostras coletadas nos diferentes níveis dos perfis das sondagens. O primeiro procedimento executado foi a análise tátil-visual do solo, onde buscou-se observar o tipo dos grãos; a cor, de acordo com a tabela Munsell (1994); os minerais predominantes; a matriz do solo; a coesão; friabilidade; presença de raízes; dentre outras características. Após sua ordenação pela profundidade para um melhor entendimento da estratigrafia do perfil, as amostras foram examinadas individualmente, e as que apresentavam características semelhantes foram agrupadas, e daí foram escolhidas as amostras para a realização das análises granulométricas. As análises foram feitas baseadas no Manual de Métodos de Análise do Solo da EMBRAPA (1997).

Nas amostras selecionadas foram realizadas análises granulométricas dos materiais através de ensaios de granulometria dispersa (peneiramento e sedimentação), segundo os procedimentos da norma técnica da ABNT (1984), e, densidade real dos grãos, segundo método de ensaio do DNER (1994). Os ensaios de sedimentação, além de serem executados com defloculante hexametáfosfato de sódio, com pH igual a 9, também foram realizados sem o uso de defloculante e aparelho dispersor, utilizando uma metodologia modificada, como em Cruz (1996), Rodriguez (2005), Fonseca (2006), Leal (2009), Silva (2014), dentre outros. Na metodologia modificada, as partículas do solo não são dispersas, e, por isso, os resultados refletem as reais condições que os agregados do solo apresentam em campo. Com o intuito de indicar um possível comportamento agregado (ou estruturado) do solo, cada vez mais se tem utilizado a comparação entre as análises granulométricas ABNT (1984) e a metodologia modificada.

### 3.4 Ensaios de condutividade hidráulica in situ na zona não saturada

Para a determinação da condutividade hidráulica na zona não saturada, utilizaram-se 15 furos de sondagem a trado executados na média/

alta encosta (Figura 1). Tais furos permitiram a estimativa da condutividade hidráulica dos solos. Utilizou-se um tubo de PVC de 32 mm de diâmetro no qual foram feitas ranhuras nos 30 cm inferiores do tubo para permitir a passagem de água. Em torno das ranhuras, posicionaram-se telas de nylon, para evitar a passagem de partículas de solo. Esses dispositivos foram denominados “permeômetros” (Pm) no contexto do trabalho diferenciando-se dos piezômetros, que atingem a zona saturada do subsolo (Figura 2).

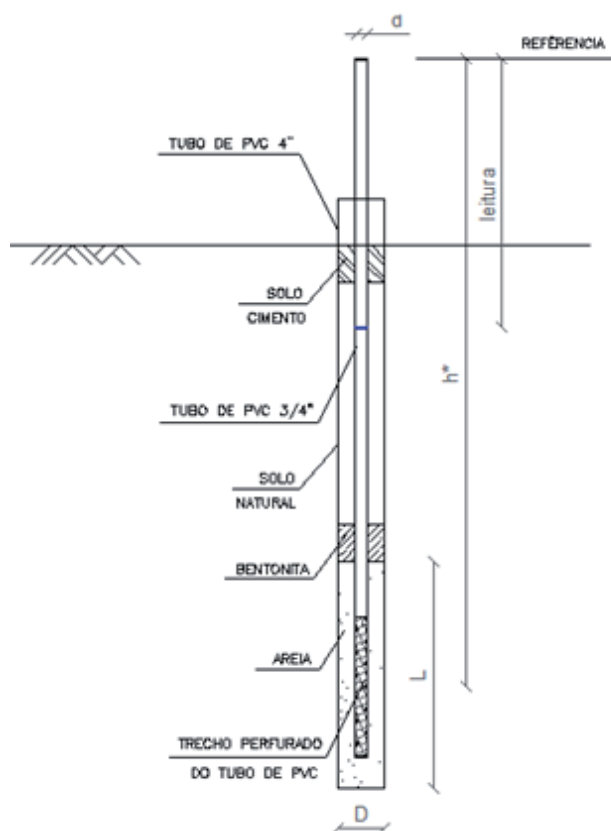


Figura 2 - Representação esquemática do permeômetro *in situ* idealizado para o estudo.

Na Tabela 1 encontram-se a distribuição dos locais de realização de ensaios de permeabilidade *in situ* na encosta e a profundidade de instalação dos permeômetros. Optou-se pela obtenção desse parâmetro por métodos de campo, porque, apesar de laboriosos, são mais representativos, tendo em vista o maior volume de solo ensaiado; a não alteração da estrutura natural do solo, devido aos processos de amostragem; e a determinação da condutividade hidráulica segundo a direção predominante do escoamento (Cedergren 1989). O método de execução dos ensaios foi o de carga

variável, no qual a variação do nível d'água em um intervalo de tempo foi registrada até que o intervalo de descida da coluna d'água se tornasse

constante e se atingisse o estado de equilíbrio a partir do qual se obteve a condutividade hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ).

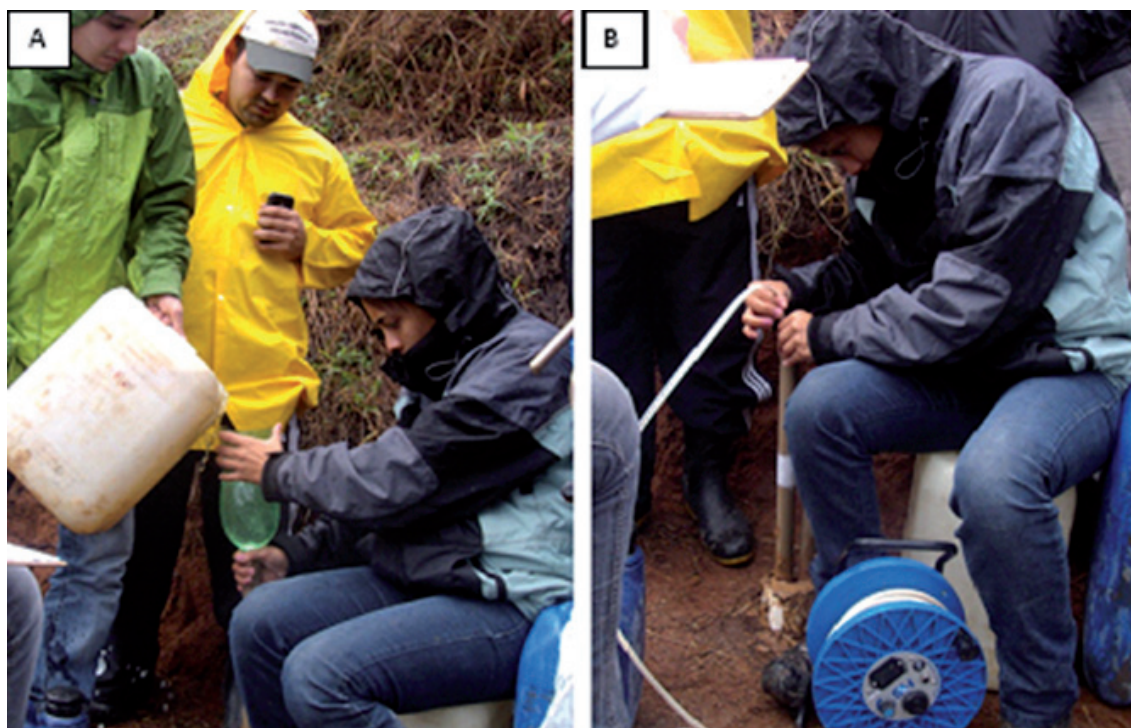
**Tabela 1** - Profundidade de instalação dos permeômetros (Pm), separadas por furos de sondagem.\*

Pm	Prof. (m)	Pm	Prof. (m)	Pm	Prof. (m)	Pm	Prof. (m)
1.1	0,64	2.1	3,26	3.1	2,10	4.1	2,96
1.2	1,10	2.2	6,34	3.2	4,33	4.2	5,36
1.3	2,59			3.3	6,65	4.3	6,38
1.4	5,00			3.4	7,39		
1.5	6,45			3.5	14,35		

\* O primeiro algarismo da nomenclatura dos permeômetros corresponde à localização do equipamento na encosta (ST 01 - 1; ST 02 - 2; ST 03 - 3; ST 04 - 4) e o segundo algarismo é referente à profundidade (crescente) de instalação do Pm.

Quantidades significativas de água foram adicionadas aos permeômetros visando à formação de um bulbo de saturação, para que assim o ensaio pudesse ser executado. Após a adição suficiente de água, o que foi estimado com a relativa estabilização do rebaixamento no furo, o cronômetro foi disparado e leituras de 15 em 15 segundos foram feitas com auxílio de um medidor elétrico de nível hidrostático, como observado na Figura 3. Os ensaios foram repetidos no mínimo 2 vezes,

para dar maior confiabilidade aos dados coletados em campo. Apesar de mais representativos, os ensaios de campo podem apresentar problemas relacionados ao não controle das condições de contorno. Por isso, embora se tenha tentado, com o bombeamento contínuo, obter o estado estacionário em termos de saturação do aquífero para estimativa de  $K_{sat}$ , essa condição não pôde ser assegurada nos ensaios.



**Figura 3** - Etapas de realização dos ensaios de condutividade hidráulica *in situ*. Na Figura A tem-se a adição de água no permeômetro, visando à formação de um bulbo de saturação. Na figura B é mostrado a execução das leituras em campo, com auxílio de um medidor de nível hidrostático elétrico.

Após a realização dos ensaios os dados foram processados de acordo com método Hvorslev (1951), como observado nas equações (1) e (2). Apesar de a solução matemática proposta por Hvorslev (1951) ser comumente utilizada para análises em zona saturada, assumiu-se que

na área perfurada a pressão é próxima à pressão atmosférica e a carga piezométrica é nula, o que permite adotar a carga piezométrica instantânea igual à altura de coluna d'água medida no tubo, em um estado de saturação no bulbo formado ao redor do furo.

$$K_h = \frac{d^2 \cdot \ln\left(\frac{2mL}{D}\right)}{8 \cdot L(t_2 - t_1)} \cdot \ln \frac{h_1}{h_2} \quad \text{se} \quad \frac{mL}{D} > 4, \quad \text{sendo } m = \sqrt{\frac{K_h}{K_v}} \quad (1)$$

ou

$$K_h = \frac{d^2 \cdot \ln\left[\frac{mL}{D} + \sqrt{1 + \left(\frac{mL}{D}\right)^2}\right]}{8 \cdot L(t_2 - t_1)} \cdot \ln \frac{h_1}{h_2} \quad \text{sendo } m = \sqrt{\frac{K_h}{K_v}} \quad (2)$$

onde,

D - diâmetro do furo (cm)

L - altura do filtro de areia (cm)

$h_2$  - carga piezométrica para  $t = t_2$  (cm)

t - tempo (s)

$K_h$  - permeabilidade horizontal (cm/s)

d - diâmetro do tubo (cm)

$h_1$  - carga piezométrica para  $t = t_1$  (cm)

$K_v$  - permeabilidade vertical (cm/s)

m - razão de transformação

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Ground penetrating radar (GPR)

Diferentes respostas espectrais foram observadas entre 2,0 e 2,5 m de profundidade ao longo do perfil (Figura 4). Isso demonstra uma espessura relativamente constante das camadas do solo ao longo da encosta. Foram interpretadas, na seção radargrama, três feições bem definidas, que se apresentam como refletores. Também foram destacadas duas feições geológicas muito bem marcadas.

As feições hiperbólicas identificadas ao longo do perfil foram interpretadas como sendo blocos rochosos em subsuperfície, e as feições geológicas bem marcadas foram interpretadas como sendo estruturas rochosas bem consolidadas. Estas feições se concentraram nos primeiros 5 m do perfil e, a partir daí, percebe-se uma grande influência de ruídos, que podem ser provenientes do alcance limitado da antena ou da influência de outras fontes de campos eletromagnéticos (Figura 4).

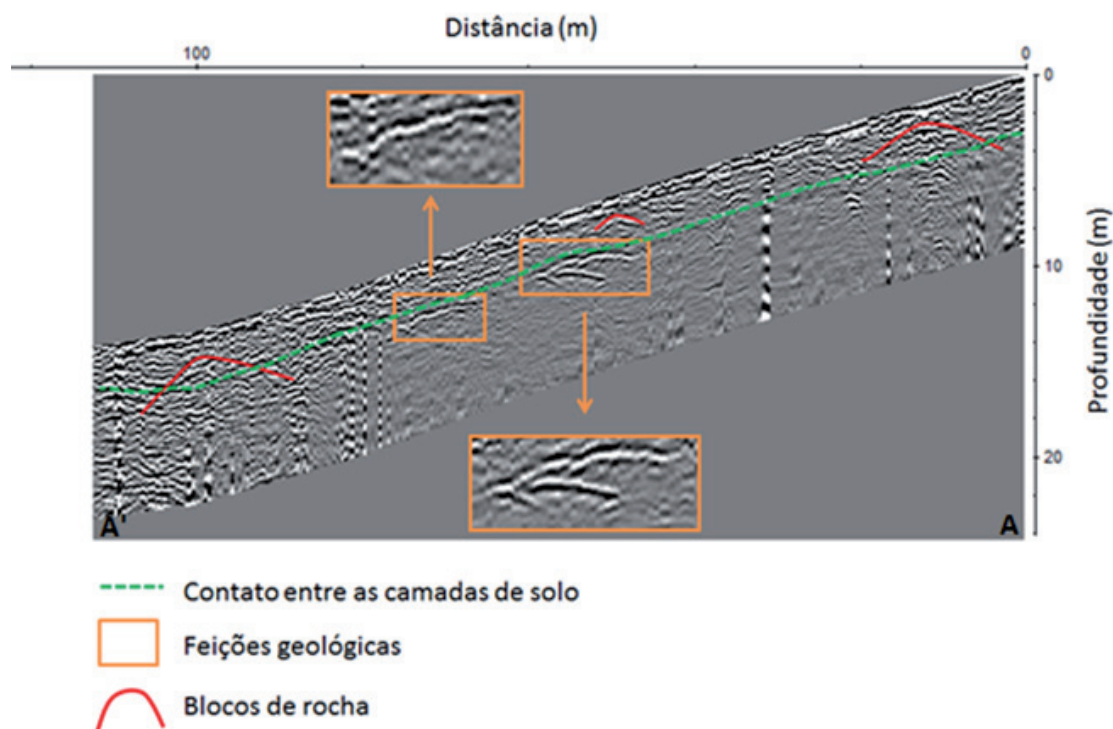


Figura 4 - Seção radargrama referente ao perfil longitudinal realizado na encosta.

## 4.2 Análises granulométricas

Os resultados das análises granulométricas também apontaram a existência de duas camadas de solo com características distintas, assim como observado no radargrama, que foram classificadas como: laterítica, mais superficial (cuja base localiza-se entre 1,5m e 4,0m); e saprolítica, mais profunda. A Tabela 2 lista a espessura de cada camada ao longo das sondagens realizadas. É importante ressaltar que para este trabalho não foi considerada a gênese do solo. Isto significa dizer que um solo classificado como laterítico pode ser um colúvio em processo de laterização ou um solo residual maduro.

Tabela 2 - Espessura das camadas laterítica e saprolítica, de acordo com os boletins de sondagem.

Sondagens	Laterítico (prof. m)	Saprolítico (prof. m)
ST 01	0,00 - 1,65	1,65 - 6,45
ST 02	0,00 - 2,45	2,45 - 6,50
ST 03	0,00 - 4,00	4,00 - 14,45
ST 04	0,00 - 2,50	2,50 - 6,50

Na Figura 5 tem-se a classificação das amostras, segundo triângulo textural proposto por Lemos & Santos (1996). Os solos ensaiados com uso de aparelho dispersor e defloculante (CD) foram classificados de uma maneira geral como franco arenosos. Já os solos ensaiados sem o uso de aparelho dispersor e defloculante (SD) foram classificados, em sua maioria, como areia franca, evidenciado o comportamento agregado dos solos em condições de campo (Figura 6).

Os percentuais de argila e silte são os que sofrem maior alteração, quando comparados o método proposto pela ABNT (CD) e a metodologia modificada (SD). Nos solos classificados como lateríticos são encontrados, nos ensaios CD, altos percentuais de argila (20 - 30%), devido ao avançado grau de intemperismo, que lhe confere a cor avermelhada, tendo a caulinita como argilo-mineral mais comum. Porém, nos ensaios SD os percentuais de argila para estes mesmos solos são nulos. Os solos classificados como saprolíticos, estão diretamente relacionados à rocha matriz, logo apresentaram menores percentuais de argila (cerca de 10%) e maiores percentuais de areia (40 - 60%), devido a menor ação intempérica e tipo de rocha matriz.

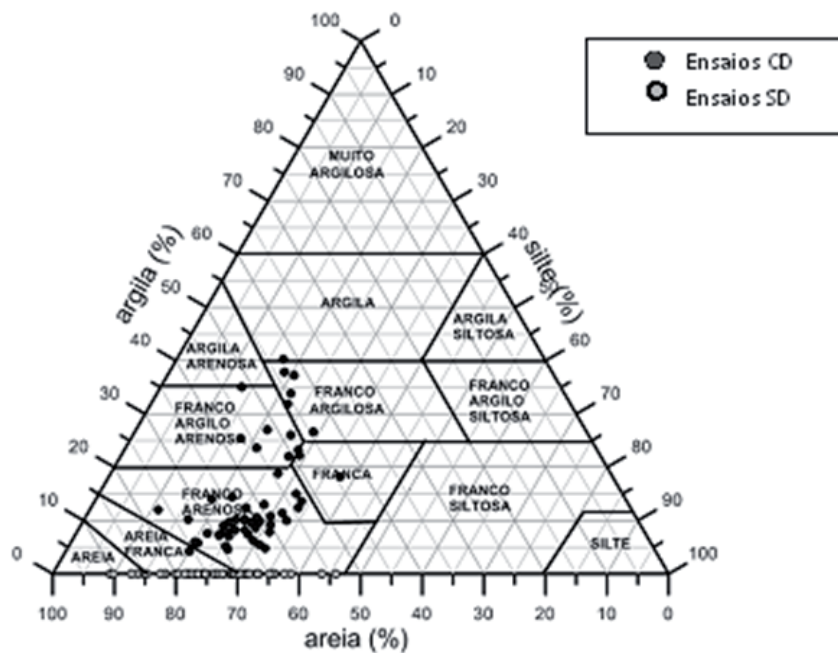


Figura 5 - Triângulo de classificação textural. Modificado de Lemos & Santos (1996).

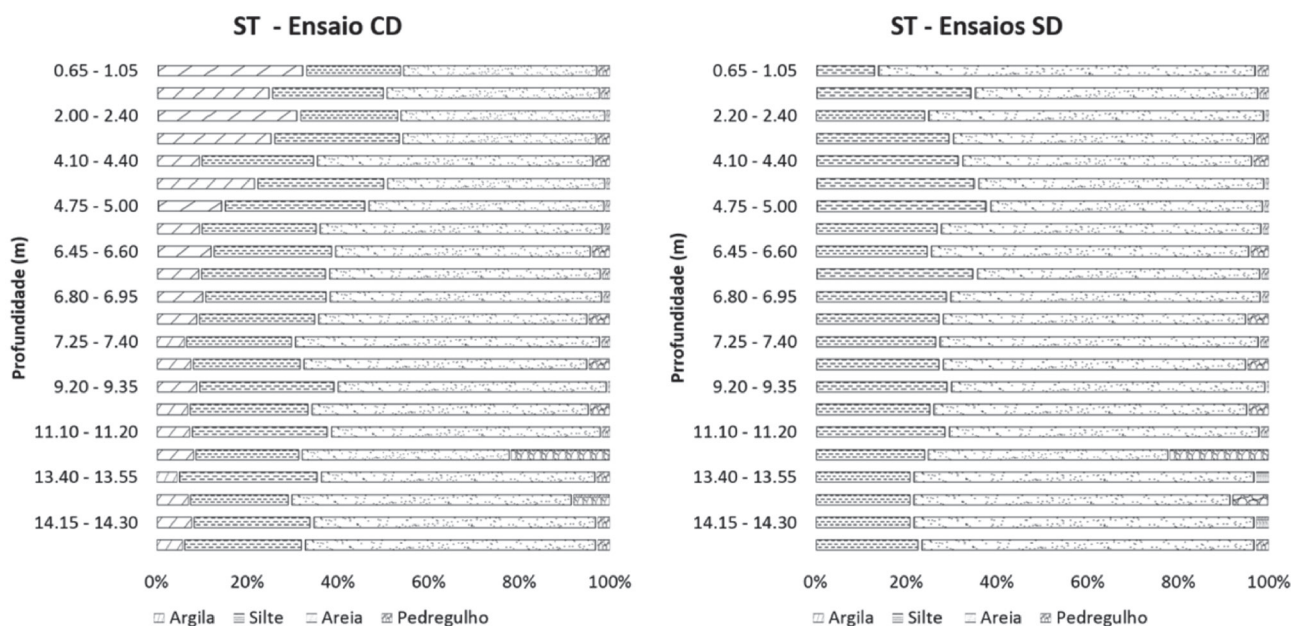
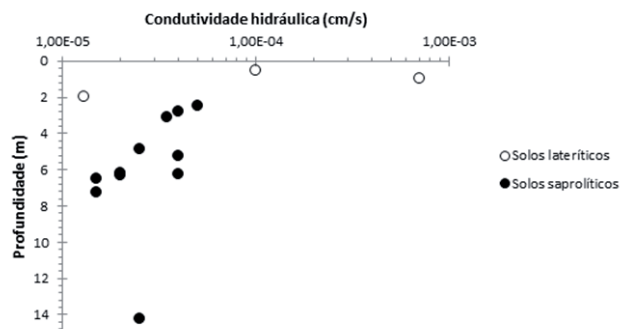


Figura 6 - Comparação entre os ensaios granulométricos com uso de aparelho dispersor e defloculante (CD) e sem uso de dispersor e defloculante (SD) de um perfil de solo representativo.

### 4.3 Condutividade hidráulica

Nos ensaios de condutividade hidráulica realizados na zona não saturada, os permeâmetros instalados em profundidades rasas (< 3m) indicaram um valor médio de  $K_{sat}$  mais elevado do que os permeâmetros instalados em maiores

profundidades (> 3m), ( $2,7 \times 10^{-4}$  cm/s e  $2,8 \times 10^{-5}$  cm/s, respectivamente). Essa diferença de condutividades hidráulicas na zona não saturada coincidiu com a mudança de camadas entre os solos saprolíticos e lateríticos, evidenciada no radargrama e nas sondagens a trado.



**Figura 7** - Valores de condutividade hidráulica dos solos lateríticos e saprolíticos, de acordo com o método proposto por Hvorslev (1951).

## 5 DISCUSSÃO

A constatação da existência de duas camadas de solo, com composição mineralógica e comportamento hidrológico distintos, foi observada tanto no radargrama quanto nas análises tátil-visuais e granulométricas, e também nos ensaios de condutividade hidráulica executados em campo. No radargrama (Figura 4), a diferença entre as camadas é atestada pela resposta espectral de cada material. Percebe-se que os primeiros metros do solo apresentam uma resposta mais rugosa, enquanto abaixo dessa profundidade o solo mostrou uma aparência mais suave. Este fato pode estar diretamente relacionado a diferenças na composição mineralógica, ao percentual de umidade, ao nível de porosidade e ao grau de intemperismo do solo.

A partir das análises granulométricas, as camadas de solo foram classificadas como laterítica (camada superior) e saprolítica (camada inferior). A formação do solo laterítico, se dá pela atuação dos processos pedológicos envolvendo o intemperismo físico e principalmente químico (diminuição do tamanho das partículas, mudança na mineralogia e redução da resistência das cimentações entre as partículas), através da intensa migração de partículas, dando origem a um solo com estrutura estável e porosidade elevada com formação de grumos (Nogami & Villibor 1995, Fookes 1997). A argila em grumos assume o comportamento hidrológico de partículas de silte, podendo chegar até mesmo ao comportamento de uma areia fina (Rodriguez 2005, Fonseca 2006, Leal 2009, Silva 2014), como pode ser observado na comparação dos percentuais de argila, silte e

areia, obtidos em cada uma das metodologias (Figura 6). Já os solos saprolíticos, como evidenciado pelas estruturas reliquias coletadas em campo, apresentam manchas, xistosidades, vazios e outras características inerentes à rocha matriz. Sua composição mineralógica é dependente do tipo de rocha que é derivado, que confere uma coloração acinzentada ao saprolito, e do grau de intemperismo sofrido por esta (Futai 1999).

De uma maneira geral, observa-se que, com o aumento da profundidade, os percentuais de argila diminuem e os de areia e pedregulho aumentam, mostrando um clássico perfil de solos tropicais nos ensaios CD. A composição dos solos nos ensaios SD resume-se basicamente a silte e areia, evidenciando o comportamento agregado das argilas *in situ*. A utilização desses dois métodos para as análises granulométricas possibilitou observar como o comportamento do solo *in situ* não está diretamente relacionado à sua composição granulométrica, ou seja, depende, dentre outros fatores, das condições climáticas, das taxas de intemperismo, da mineralogia da rocha matriz e do processo de formação do solo.

A diferença de condutividade hidráulica encontrada entre as duas camadas de solo estudadas em eventos extremos de chuva pode levar a formação de um lençol suspenso com fluxo paralelo à superfície do terreno. Para estes mesmos solos, Pita (2014) encontraram, através dos métodos empíricos propostos por Hazen, Kozeny-Carman e Breyer, diferenças de até uma ordem de grandeza entre os solos lateríticos e saprolíticos, corroborando assim a ideia de que uma camada mais permeável sobreposta a uma menos permeável.

Essas características de condutividade hidráulica do solo aliadas a presença de blocos, (como evidenciado pelo radargrama e também por observações em campo), podem favorecer o processo de exfiltração, que tende a contribuir para a instabilidade da encosta. Lacerda (1999) demonstrou a influência de diques de diabásio na instabilidade de uma encosta localizada no município de Teresópolis-RJ. Segundo este autor, os diques agem como um obstáculo ao fluxo subsuperficial. A interpretação das anomalias nas linhas de fluxo geradas pela presença dos diques, e o consequente fluxo ascendente, conferem a este



fenômeno a geração de uma superfície potencial de ruptura.

Assume-se, nesta hipótese, que blocos agiram como obstáculo ao fluxo gerando uma pressão de fluxo ascendente e condições hidrogeológicas adversas à estabilidade, à semelhança do modelo dos diques proposto por Lacerda (1999). Wilson (1988) propôs um modelo em que a condutividade hidráulica diminui com o aumento da profundidade, assim como observado na área em questão. A maior condutividade hidráulica nos pontos menos profundos é evidenciada pelos ensaios *in situ*, que sugerem a existência de um fluxo planar entre camadas, que pode vir a exfiltrar quando atinge um obstáculo impenetrável, como os blocos rochosos.

Ao se avaliar a ação dos blocos na instabilização da encosta é importante ter em mente que, nos solos residuais tropicais com substrato granítico, o intemperismo se dá na forma da esfoliação esferoidal, que resulta em formas arredondadas e esferoidais. O grau de alteração tende a diminuir com o aumento da profundidade, porém é possível encontrar blocos de relevância hidrológica em pequenas profundidades.

## 6 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos com a metodologia empregada sugerem que os fluxos de água subterrânea são de fundamental importância para o entendimento dos escorregamentos durante eventos extremos de chuva, como ocorrido em janeiro de 2011. Os altos índices pluviométricos aliados às diferenças geohidromecânicas entre as camadas, permitem concluir que, localmente, a camada laterítica apresenta condutividade hidráulica maior do que a camada subjacente (saprólítica), o que pode justificar a formação de um lençol suspenso durante eventos extremos de chuva. Apesar dos maiores percentuais de frações finas observados nos solos lateríticos, estas partículas apresentam um comportamento agregado, devido à estruturação do solo. Isso demonstra que considerar apenas a composição granulométrica do solo para análises de permeabilidade dos materiais constituintes da encosta pode conduzir a resultados não condizentes com o comportamento do solo *in situ*. A relação entre composição granulométrica

e valores de condutividade hidráulica não deve ser descartada, pois auxilia na elucidação da dinâmica dos fluxos, visto que a condutividade hidráulica é uma propriedade muito complexa, que resulta em grande variabilidade espacial e temporal (Lambe & Whitman 1969, Schoeneberger et al. 1995, Vieira & Fernandes 2004).

A morfometria da encosta e as características intrínsecas ao perfil de solo são outros elementos que contribuem para a explicação da variabilidade espacial da condutividade hidráulica. A concavidade suave, observada na encosta, caracteriza a convergência e o direcionamento dos fluxos d'água em caminhos preferenciais, ditando a concentração dos fluxos (Anderson & Burt 1978). Essa convergência de fluxos aumenta o intemperismo nos solos, principalmente nos solos mais superficiais (lateríticos), que se traduz em maiores índices de vazios no solo, e conseqüentemente maiores valores de K. Outra influência da morfometria relaciona-se a efeito da declividade no condicionamento dos movimentos de massa. A encosta possui declividade média de 32°, o que, segundo estudos conduzidos por Palma (2013), representa uma declividade crítica para a ocorrência de deslizamentos para a mesma região de Nova Friburgo - RJ.

Todos os condicionantes supracitados, aliados à presença de blocos rochosos graníticos em subsuperfície, conforme evidenciado pelo levantamento geofísico, criam condições para que supor que possa haver exfiltração do fluxo subsuperficial na encosta, visto que os blocos agem como superfícies impermeáveis que interferem na percolação do fluxo d'água, formando assim um cenário propício a instabilização da encosta.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a colaboração dos Laboratórios GEOHECO-UFRJ (IGEO - UFRJ), HIDROGEO-UFRJ (IGEO - UFRJ), Mecânica dos Solos Prof. Fernando Emmanuel Barata (Escola Politécnica - UFRJ) e Laboratório de Geotecnia (COPPE - UFRJ), que através da pesquisa científica, buscam aprofundar o conhecimento sobre os diferentes mecanismos que regulam a dinâmica das encostas. E as agências de fomento à pesquisa CAPES, CNPq e FAPERJ que viabilizaram financeiramente a execução desta pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- Anderson M. G. & Burt T. P. 1978. Experimental investigations concerning the topographic control of soil water movement on hillslopes, *Zeitschrift fur Geomorphologie*, 29: 52 – 63.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1984. NBR 7181: Solo – Análise Granulométrica. 13 p.
- Augusto Filho O. & Virgili J. C. 1998. Estabilidade de Taludes. In: Oliveira A.M.S. & Brito S.N.A. (eds) *Geologia de Engenharia*, São Paulo, ABGE. p.: 243-269.
- Avelar A. S., Coelho Netto A. L., Lacerda W. A., Becker L. B., Mendonça M. B. 2011. Mechanisms of the recent catastrophic landslides in the mountainous range of Rio de Janeiro, Brazil. In: C. Margottini, P. Canuti, K. Sassa. (Org.) *Landslide Science and Practice*, Berlin, Springer Berlin Heidelberg, p.:265-270.
- Banco Mundial. 2012. Pesquisas sobre desastres naturais. Disponível em: <http://www.worldbank.org/pt/country/brazil>. Acessado em 20 de maio de 2015.
- Brugger P. J., Ehrlich M., Lacerda W. A. 1997. Movements, piezometric level and rainfall at two natural slopes. In: ABMS, 2ª COBRAE, Conf. Bras. Estab. Enc., 1, Anais, p. 13-20.
- Cedergren H. R. 1989. Seepage, drainage and flow nets. John Wiley and Sons, New York, 496 pp.
- Coelho Netto A. L., Sato A. M., Avelar A. S., Viana L. G. G., Araújo I. S., Ferreira D. L. A., Lima P. H., Silva A. P. A., Silva R. P. 2013. January 2011: The Extreme Landslide Disaster in Brazil. In: Claudio Margottini & Paolo Canuti, Kyoji Sassa. (Org.) *Landslide Science and Practice*, Berlin, Springer Berlin Heidelberg, p.:377 -384.
- Cruz P. T. 1996. 100 barragens brasileiras: casos históricos, material de construção, projeto. Oficina de Textos, São Paulo, 2ª edição, 647 pp.
- Dantas M. E., Shinzato E., Medina A. I. M., Silva C. R., Pimentel J., Lumbreras J. F. Calderano. S. B. 2001. Diagnóstico geoambiental do estado do Rio de Janeiro, Brasília, CPRM. Disponível em: [http://www.cprm.gov.br/publique/media/artigo\\_geoambientalRJ.pdf](http://www.cprm.gov.br/publique/media/artigo_geoambientalRJ.pdf). Acessado em 10 de maio de 2015.
- DNER - Departamento Nacional de Estradas e Rodagens. 1994. ME 093/94: Solos – determinação da densidade real (método de ensaio). 4p.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias. 1997. Manual de métodos de análise de solo. Ministério da Agricultura e do Abastecimento, Rio de Janeiro. 212 pp.
- Fernandes N. F. & Amaral C. P. Movimentos de massa: uma abordagem geológico-geomorfológica. 1996. In: Guerra A. J. T. & Cunha, S. B. (org) *Geomorfologia e Meio Ambiente*, Rio de Janeiro, Bertrand, p.:123-194.
- Fernandes N., Guimarães R. F., Gomes R. A. T., Vieira B. C., Montgomery D. R., Greenberg H. 2001. Condicionantes Geomorfológicos dos Deslizamentos nas Encostas: Avaliação de Metodologias e Aplicação de Modelo de Previsão de Áreas Suscetíveis. *Rev. Bras. Geom.*, 2 : 51-71.
- Fonseca A. P. 2006. Análise de mecanismos de escorregamento associados a voçorocamento em cabeceiras de drenagem na bacia do rio Bananal (SP/RJ). Tese de Doutorado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 348 p.
- Fookes P. G. 1997. Geology for engineers: the geological model, prediction and performance. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 30:293-424.
- Futai M. M. 1999. Propriedades geotécnicas de solos saprolíticos e rochas alteradas de filito. In: ABGE, IX Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, IX, Anais, p. 15-29.
- Guidicini G. & Nieble C. M. 1984. Estabilidade de taludes naturais e de escavação. Edgard Blücher, Ed. da Universidade de São Paulo, São Paulo, 194 pp.

- Hartwig M. E. & Riccomini, C. 2009. Padrão de fraturas da região da Serra dos Órgãos (RJ) e sua relação com a tectônica mesozóico-cenozóica do sudeste do Brasil. *Rev. Bras. Geoc.* São Paulo, 39: 452 – 464.
- Hillel D. 1980. *Fundamentals of soil physics*. Academic Press, San Diego, 494 pp.
- Hvorslev M. J. 1951. Time lag and soil permeability in ground water observations. *Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, U.S. Army*, 36: 1-50.
- Kobiyama M., Mendonça M., Moreno D. A., Marcelino I.P.V.O., Marcelino E.V., Gonçalves E. F., Brazetti L. L. P., Goerl R. F., Moller G., Rudorff F. 2006. *Prevenção de desastres naturais: conceitos básicos*. Curitiba: Organic Trading, 109 pp.
- Lacerda W. A., Ehrlich M., Santos Jr. O.F. 1997. Efeito das variações de poro-pressão sobre a estabilidade de encostas em solos residuais. In: *ABMS, COBRAE, Conf. Bras. Estab. Enc., 2, Anais*, p. 381-388.
- Lacerda W. A. 1997. Stability of natural slopes along the tropical coast of Brazil. In: Almeida, M. (ed.) *Proceeding of the Internacional Symposium on Recent Developments in Soil and Pavement Mechanics*. Balkema, Brookfield, p.: 17-39.
- Lacerda W. A. 1999. Local instability in saturated colluvial slopes in southern Brazil. In: Y. N. Yagi; T. Yamagami; J.C. Jiang (eds), *Slope Stability Engineering*. Balkema, International Symposium on Slope Stability Engineering, Japan. p. 199-204.
- Lambe T. W. & Whitman R. V. 1969. *Soil Mechanics*. John Wiley, New York, 553 pp.
- Leal P. J. V. 2009. Crescimento de redes de canais e pirataria de água subterrânea em vales de cabeceira de drenagem. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 213 p.
- Lemos R. C. & Santos R. D. 1996. *Manual de descrição e coleta de solo no campo*. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 3a Ed. São Paulo, 86 pp.
- Machado K. M. 2013. *Retroanálise de um deslizamento de encosta no Município de Nova Friburgo/RJ. Trabalho de Conclusão de Curso, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro*, 63 p.
- Mesquita M. G. B. F. & Moraes S. O. 2004. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e os atributos físicos do solo. *Ciência Rural*. 34: 963 - 969.
- Munsell R. 1994. *Soil Color Charts*. Macbeth Division of Kollmorgen Instruments Corporation, New Windsor, NY 12553.
- Nogami J.S. & Villibor D.F. 1995. *Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos*. Editora Villibor, São Paulo, 213 pp.
- Palma L. H. 2013. *Inventário e classificação topográfica de cicatrizes de movimentos de massa na bacia do Córrego Dantas - Nova Friburgo/RJ*. In: UFRJ, JICTAC - Jornada Giulio Massarani de Iniciação Científica, Tecnológica, Artística e Cultural, XXXV, Anais, CD-ROM.
- Pita R. C. S. 2014. *Aplicação e avaliação de metodologias de campo e laboratoriais para a determinação da permeabilidade em encosta com deslizamento raso, em Nova Friburgo-RJ*. Trabalho de Conclusão de Curso, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 82 p.
- Porsani J.L. 1999. *Ground penetrating radar (GPR): proposta metodológica de emprego em estudos geológico-geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado-SP*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Estadual Paulista, 150 p.
- Rodriguez T. T. 2005. *Proposta de classificação geotécnica para colúvios brasileiros*. Tese de Doutorado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 370 p.
- Schoeneberger P.J., Amoozegar A., Buol S.W. 1995. Physical property variation of a soil and saptrolite continuum at three geomorphic positions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59:1389 – 1397p.
- Selby M. J. 1993. *Hillslope Materials and Processes*. Oxford University Press, New York, 264 pp.

Sidle R. C., Pearce, A. J., O'Loughlin C. L. 1985. Hillslope stability and land use. Water Resource Monograph Series, American Geophysical Union, Washington, 140 pp.

Silva R. P. 2014. Comportamento hidrológico de uma encosta de substrato rochoso de granito sob influência de deslizamento raso - Nova Friburgo, Rio de Janeiro. Dissertação de Mestrado, Instituto Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 151 p.

Van Asch T. W. J., Buma J., Van Beek L.P.H. 1999. A view on some hydrological triggering systems in landslides. *Geomorphology*, 30: 25-32.

Vieira B. C. & Fernandes N. F. 2004. Landslides in Rio de Janeiro: the role played by variations in soil hydraulic conductivity. *Hydrological Processes*. 18: 791- 805.

Vinagre R., Avelar A. S., Coelho Netto A. L., Burros L., Lacerda W. A. (em preparação). Influências geológicas nos movimentos de massa de Janeiro de 2011 em Nova Friburgo (RJ).

Wilson C. J. 1988. Runoff and pore pressure development in hollows. Ph.D. thesis, University of California, Berkeley, 284 p.

# UTILIZAÇÃO DE MÉTODO GRÁFICO PARA CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA PELO SISTEMA SLOPE MASS RATING (SMR) - APLICAÇÃO NA MINA DE SANTA LUZ (BA)

USE OF GRAPHICAL METHOD FOR GEOMECHANICAL CLASSIFICATION BY SLOPE MASS RATING SYSTEM (SMR) - APPLICATION IN THE SANTA LUZ MINE (BA)

GABRIEL BARBOSA SOARES

*Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil  
E-mail: gabriel.barbosa.soares@usp.br*

EDILSON PISSATO

*Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil  
E-mail: pissato@usp.br*

LEANDRO RIBES DE LIMA

*Yamana Gold Inc., Barrocas, BA, Brasil  
E-mail: leandro.lima@yamana.com*

## RESUMO ABSTRACT

A mineração Santaluz pertence à empresa Mineração Fazenda Brasileiro, subsidiária da Yamana Gold Inc., e está localizada na cidade de Santaluz, BA. Atualmente está em fase de implantação e apresenta uma série de problemas geotécnicos de estabilidade dos taludes relacionados principalmente ao fraturamento do maciço. Para identificação dos mecanismos envolvidos nesses processos, foi realizada uma caracterização geológico-geotécnica para avaliação da estabilidade dos taludes, seguida da classificação geomecânica do maciço. A caracterização consistiu na, coleta de dados através de 12 *scanlines* por meio da quais foram descritas as características das descontinuidades, obtendo-se dados relativos à rugosidade, alteração, número de famílias, persistência e espaçamento, com aplicação direta nos sistemas de classificação geomecânicas Q e RMR (*Rock Mass Rating*). Também foram realizadas medidas das orientações das descontinuidades. O sistema SMR (*Slope Mass Rating*) também foi utilizado por tratar-se de um sistema de classificação geomecânica com aplicação direta na estabilidade de taludes. Para obtenção dos parâmetros utilizados para esse sistema utilizou-se a metodologia gráfica, na qual os ângulos entre os taludes e descontinuidades são obtidos por

The Santaluz mining company owned by Fazenda Brasileiro Mining Company, a subsidiary of Yamana Gold Inc., located in Santaluz, BA. It is currently under implementation and have a series of geotechnical problems of slopes stability, mainly related to the fracturing of the rock mass. To identify the mechanisms involved in these processes, geological and geotechnical characterization to evaluate the stability of slopes was held, followed by the massive geomechanics classification. The characterization, the data collection using 12 m of scanlines for which the characteristics of descontinuides been described, yielding roughness data, alteration, number of families, persistence and spacing, with direct application to the geomechanical classification systems Q and RMR (*Rock Mass Rating*). Also the guidelines of discontinuities measurements were performed. The system SMR (*Slope Mass Rating*) was also used because it is a geomechanics classification system with direct application in slope stability. To obtain the parameters used for this system was used to imaging methods in which the angles between the slopes and discontinuities are obtained by stereograms. Six slopes were chosen for the application of the method. The data collected allowed the

meio de estereogramas. Seis taludes foram escolhidos para a aplicação do método. Com os dados coletados foi possível definir a atitude média de cinco sistemas de descontinuidades: A foliação (250/40), J1 (185/80), J2 (020/80), J3 (140/85) e J3.2 (142/60). O maciço foi considerado seco e em geral apresentou-se pouco alterado. Os maciços em boas condições obtiveram a mesma classificação (bom) pelo sistema *Q* e *RMR*, porém em regiões mais fraturas os sistemas divergiram em até duas classes, sendo obtidas pelo sistema *Q* as piores classificações (muito ruim, ruim). Pela análise cinemática foram comprovadas rupturas em quatro taludes dos seis escolhidos, sendo o sistema *SMR* aplicado somente nos taludes com rupturas em potencial. Nesses quatro taludes os sistemas *SMR* e *RMR* apresentaram resultados praticamente iguais, porém se utilizado apenas o *RMR<sub>b</sub>*, notam-se valores inconsistentes com a realidade, demonstrando a importância da orientação das descontinuidades em relação à classificação geomecânica aplicada à de taludes.

**Palavras-chave:** estabilidade, taludes, classificações geomecânicas, mineração.

## 1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de classificação de maciço podem ser entendidos como um sistema de comunicação mundial para engenheiros, geólogos e projetistas, amplamente utilizado na caracterização, classificação e no conhecimento sobre as propriedades dos maciços rochosos. Eles fornecem dados quantitativos das propriedades do maciço, tanto de suas descontinuidades, como também do maciço como um todo.

Entretanto, as classificações de maciços introduzem incertezas durante a caracterização que podem afetar o valor final obtido.

Existem diversos sistemas de classificação de maciços, sendo os mais difundidos o *Q* (Barton et al. 1974) e o *RMR* (Bieniawski 1989), porém ambos inicialmente foram propostos para túneis. Bieniawski introduziu alguns fatores de correção ao sistema para que essa classificação pudesse ser utilizada em taludes porém sem detalhar a forma de sua obtenção, o que torna, na prática o *RMR* difícil de ser aplicado para taludes e não há um estudo realizado sobre sua efetividade nesse âmbito (Tomás et al. 2011).

definition of the average attitude of 5 discontinuities systems: The foliation (250/40), J1 (185/80), J2 (020/80), J3 (140/85) and J3.2 (142/60). The rock mass was considered dry and generally presented itself little changed. The rock mass in good condition had obtained the same classification (good) by *Q* and *RMR* system, but in regions where the rock was intensively fractured, the systems diverged in up to two classes, and obtained the *Q* system the worst ratings (very bad, bad). Through the kinematic analysis, ruptures were confirmed in four of the six slopes, chosen, and the *SMR* system applied only on the slopes with potential disruptions. In these four slopes the *SMR* and *RMR* systems showed results nearly identical but only used the *RMR<sub>b</sub>* are noted inconsistent values with reality, demonstrating the importance of the orientation of the discontinuities in relation to the classification applied geomechanics to the slopes.

**Keywords:** stability, slopes, geomechanical classifications, mining.

Este trabalho foi realizado na Mina C1, da Yamana Gold Inc. no município de Santaluz, BA, comparando o sistema *Q*, *RMR* e *SMR* afim de averiguar a aplicação dos métodos para estimar a estabilidade de taludes. Para tanto, foram realizadas 12 *scanlines* dentro do *Pit*, coletando-se ao todo 135 medidas para a determinação e caracterização das famílias das descontinuidades principais.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Classificações de maciços

Entende-se por maciço rochoso uma massa de rocha interrompida por descontinuidades, sejam falhas, juntas, acamamentos, etc., sob certas condições hidrogeológicas. Cada um desses elementos é determinante para o comportamento geomecânico geral do maciço.

As características do maciço diferem de local para local, sendo necessário distinguir os atributos que condicionam o seu comportamento frente às solicitações impostas por determinada obra. Este procedimento é denominado caracterização geológico-geotécnica, ou geológico-geomecânica do maciço rochoso.

O ato de hierarquizar estas características, organizando-as individualmente em classes, às quais se possa associar comportamentos diferenciados do meio rochoso para as condições consideradas, denomina-se Classificação Geomecânica do maciço (Junior Serra & Ojima, 1999).

As classificações de maciços vem sendo utilizadas a mais de 60 anos para várias finalidades, existindo hoje várias em uso cujo alguns exemplos estão citados na tabela 1.

**Tabela 1** – Classificações correntemente utilizadas, adaptado de Bieniawski (1993).

Nome da Classificação	Autor e data	País de origem	Aplicação
Rock loads	Terzaghi 1946	EUA	Túneis
Stand-up time	Lauffer 1958	Austria	Túneis
NATM	Rabcewicz. 1964	Austria	Túneis
RQD	Deere & Deere 1988	EUA	Túneis
RSR	Wickham et al. 1972	EUA	Túneis
RMR (Rock Mass Rating)	Bieniawski 1973	África do Sul	Túneis, minas, taludes, fundações
	Laubscher 1977	África do Sul	Túneis, minas, taludes, fundações
Variações do RMR	Serafim & Pereira 1983	Portugal	Fundações
	Gonzales de Vallejo 1983	Espanha	Túneis
	Romana 1985	Espanha	Taludes
	Robertson 1988	Canadá	Taludes
Q System	Barton et. al. 1974	Noruega	Túneis
Descrição geotécnica básica	ISRM 1981	Canadá	Geral

Entre as classificações mais difundidas no Brasil, estão o Q System (Barton 1974) e o Rock Mass Rating - RMR (Bieniawski 1989).

O Sistema RMR consiste na atribuição de pesos para os seguintes parâmetros: resistência da rocha intacta, RQD, espaçamento das descontinuidades, condições das descontinuidades, Influência da água subterrânea, orientação relativa das descontinuidades/escavação, sendo o valor do RMR a soma e todos os pesos atribuídos.

## 2.2 Slope mass rating (SMR)

O Slope Mass Rating (SMR) foi proposto por Romana (1985). Este sistema utiliza o RMR básico ou seja, sem correções, aplicando-se fatores de correção relativos às relações angulares entre a orientação da face dos taludes e a das descontinuidades. Uma de vantagens da aplicação desse sistema consiste no detalhamento de como definir quantitativamente os fatores de correção para

taludes propostos no sistema RMR (Irigaray et al. 2003). O SMR é definido pela seguinte relação:

$$SMR = RMR_b + (F_1 \cdot F_2 \cdot F_3) + F_4 \quad (1)$$

Onde:

RMRb é o resultado obtido, sem nenhuma correção, de acordo com os parâmetros de classificação segundo Bieniawski (1989).  $F_1$  depende do ângulo entre a direção da descontinuidade ( $\alpha_j$ ), e a direção da face do talude ( $\alpha_s$ ), que pode ser expresso da seguinte forma.

$$F_1 = (1 - \sin(\alpha_j - \alpha_s))^2 \quad (2)$$

Sendo que o valor de  $F_1$  varia de 1, quando ambas as direções são paralelas, a 0.15, que é o menor valor possível segundo a tabela 2 de Romana (1985).

**Tabela 2** - Valores dos fatores F1, F2 e F3 (Romana 1985).

Modo de Ruptura	Muito Favorável	Favorável	Moderado	Desfavorável	Muito Desfavorável	
P	$\alpha_j - \alpha_s$					
T	$\alpha_j - \alpha_s - 180$					
C	-					
P/T/C	$F_1$	0,15	0,4	0,70	0,85	1,00
P	< 20°					
C	20° - 30°					
P/C	$F_2$	0,15	0,40	0,70	0,85	1,00
T	$F_2$	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
P	> 10°					
C	10° - 0°					
T	0°					
P/C/T	$F_3$	0	-6	-25	-50	-60
		< 110°				
		110° - 120°				
		> 120°				

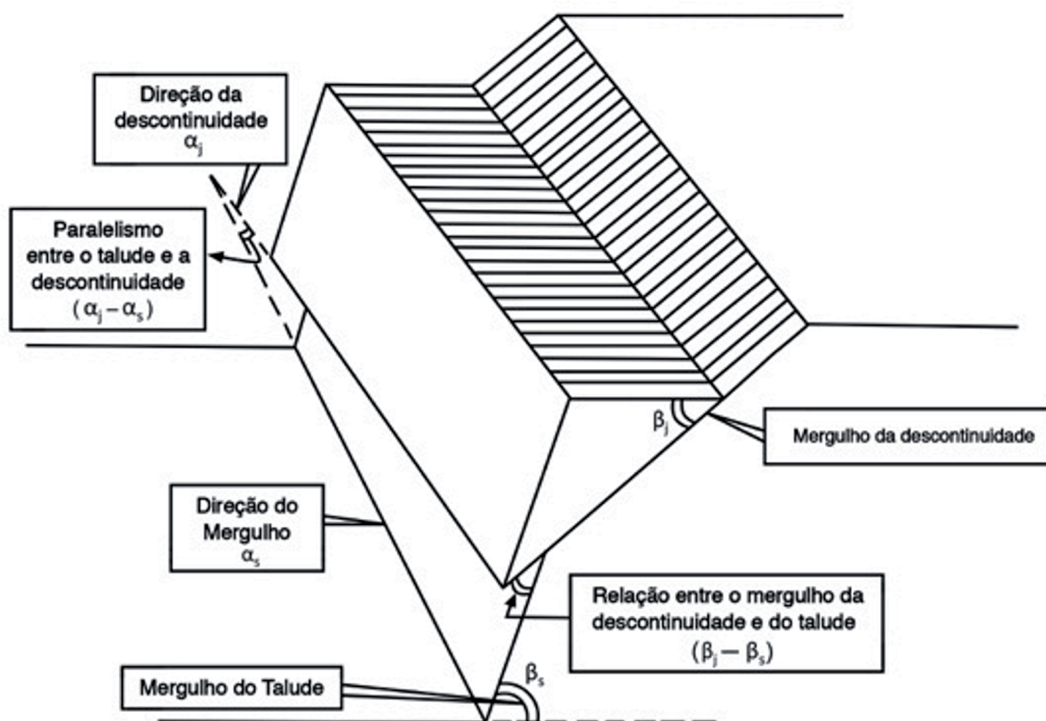
P - Ruptura planar; T - Ruptura por tombamento; C - Ruptura por cunha  
 - Direção do talude;  $\alpha_j$  - Direção da fratura; - Direção de mergulho da linha de intersecção;  
 - Mergulho do talude; - Mergulho da junta; - linha de intersecção

$F_2$ , segundo Romana (1993), pode ser considerado como a resistência ao cisalhamento da descontinuidade, que na ruptura planar, depende do ângulo de mergulho da descontinuidade ( $\beta_j$ ), porém no caso de tombamento, o valor de  $F_2$  será igual a 1. Pode ser determinado como

$$F_2 = \tan^2 \beta_j \tag{3}$$

O valor de  $F_2$  pode variar entre 1,00, para descontinuidades com mergulho maior ou igual a 45°, até 0,15, para mergulhos menores que 20°.

$F_3$  reflete a relação entre a face do talude ( $\beta_s$ ) (figura 1) e o mergulho da descontinuidade ( $\beta_j$ ), também presente em  $RMR_{76}$  (Bieniawski 1976). No modo de ruptura planar,  $F_3$  refere-se à probabilidade da ruptura ocorrer no talude.



**Figura 1** - Modelo de ruptura planar mostrando os ângulos  $\beta''_j$ ,  $\beta''_s$ ,  $\alpha''_j$  e  $\alpha''_s$ . Fonte: Singh & Goel (1999)



$F_4$  é um fator de ajuste que depende do método de escavação utilizado para produção do talude, variando entre +15, para taludes naturais, a -8 para detonações inadequadas (tabela 3)

**Tabela 3** - Valores de  $F_4$  para o método de escavação aplicado.

Método	Talude Natural	Pré-corte	Detonação Suave	Escavação Mecânica	Detonação Deficiente
$F_4$	+ 15	+ 10	+ 8	0	- 8

O valor final resultante da fórmula será o SMR, que indicará qual a classe do maciço estudado. Romana (1985) em sua descrição correlaciona a classe do maciço com o tipo de ruptura, sendo: Classe I - Sem rupturas; Classe II - Alguns blocos;

Classe III - Poucas formações de cunha; Classe IV - Rupturas planares e cunhas grandes; Classe V - Rupturas planares grandes, comporta-se como solo (tabela 4).

**Tabela 4** - Classe do SMR associada com seu respectivo valor, estabilidade do talude, possíveis rupturas e contenção sugerida.

Classe	Valor do SMR	Descrição	Estabilidade	Ruptura	Contenção
I	81 - 100	Excelente	Totalmente estável	Nenhuma	Nenhuma
II	61 - 80	Boa	Estável	Alguns Blocos	Ocasional
III	41 - 60	Razoável	Parcialmente Estável	Poucas formações de cunha	Sistemática
IV	21 - 40	Ruim	Instável	Planar e cunhas grandes	Corretiva
V	0 - 20	Muito Ruim	Totalmente Instável	Planares grandes, comporta-se como solo	Reescavação

### 2.3 Método gráfico

Tomás et al. (2012) sugere uma metodologia que faz uso de projeções estereográficas para determinação dos fatores  $F_1$ ,  $F_2$  e  $F_3$ . Conforme esta metodologia a equação do SMR pode ser reescrita como:

$$SMR = RMR_b + (\psi \cdot F_3) + F_4 \tag{4}$$

Onde  $F_1, F_2$  são agrupados em um mesmo parâmetro, chamado de  $\psi$  que varia de 0 a 1, sendo considerado como a porcentagem do fator  $F_3$  mobilizado. Os diagramas foram gerados considerando-se a combinação dos fatores  $F_1$  e  $F_2$  proposto por Romana (1985), que dependem unicamente do paralelismo entre a direção de mergulho

das discontinuidades (ou a direção da linha de intersecção no caso de ruptura por cunha), e a direção de mergulho do talude.

Os estereogramas para a obtenção dos fatores são separados por tipos de ruptura (planar, tombamento ou cunha) e para serem utilizados, o plano do talude e as polares das discontinuidades devem ser plotadas em um estereograma. Sobrepondo os estereogramas e colocando o plano do talude no local indicado, o polo de cada set de descontinuidade indicará o tipo de ruptura e o valor de  $\psi$ . Portanto tem-se ao final, três *estereogramas para a determinação* de  $\psi$ , sendo um para ruptura planar (figura 2) um para ruptura em cunha (figura 3) e outro para ruptura por tombamento (figura 4).

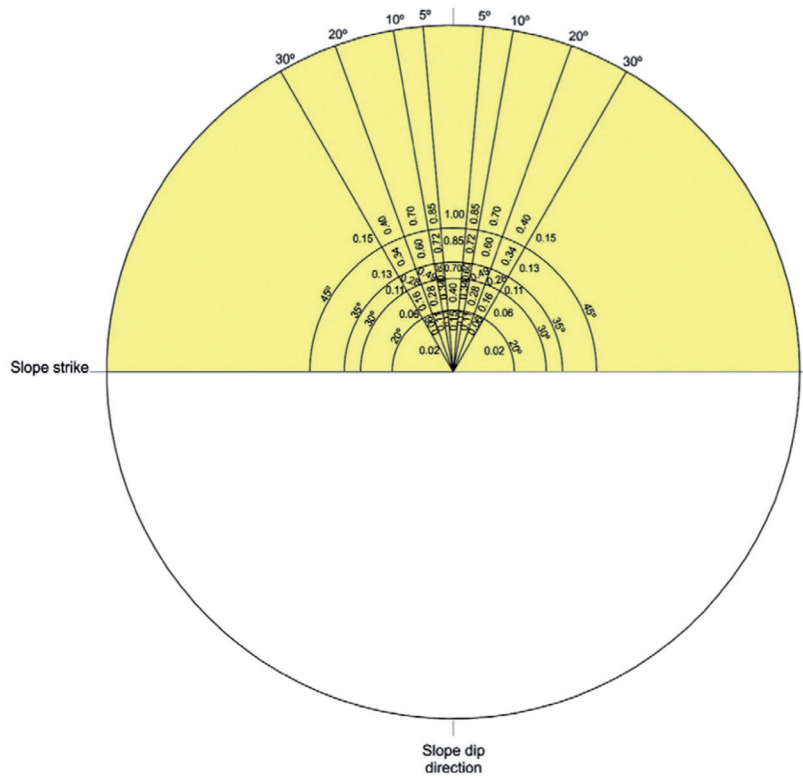


Figura 2 - Estereograma para obtenção do fator  $\psi$  para o caso de ruptura planar. (Tomás et al. 2012)

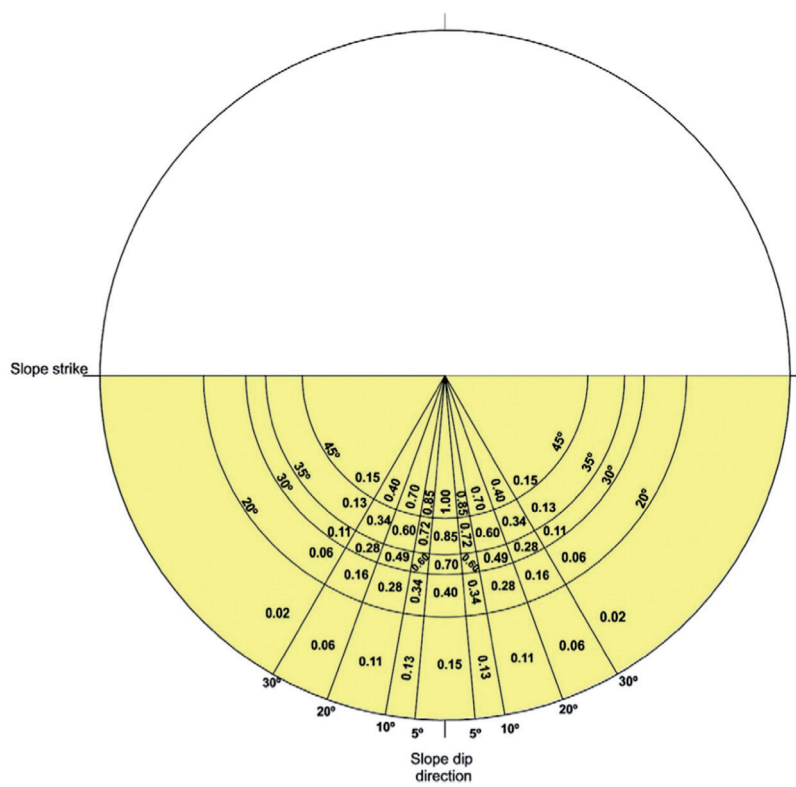
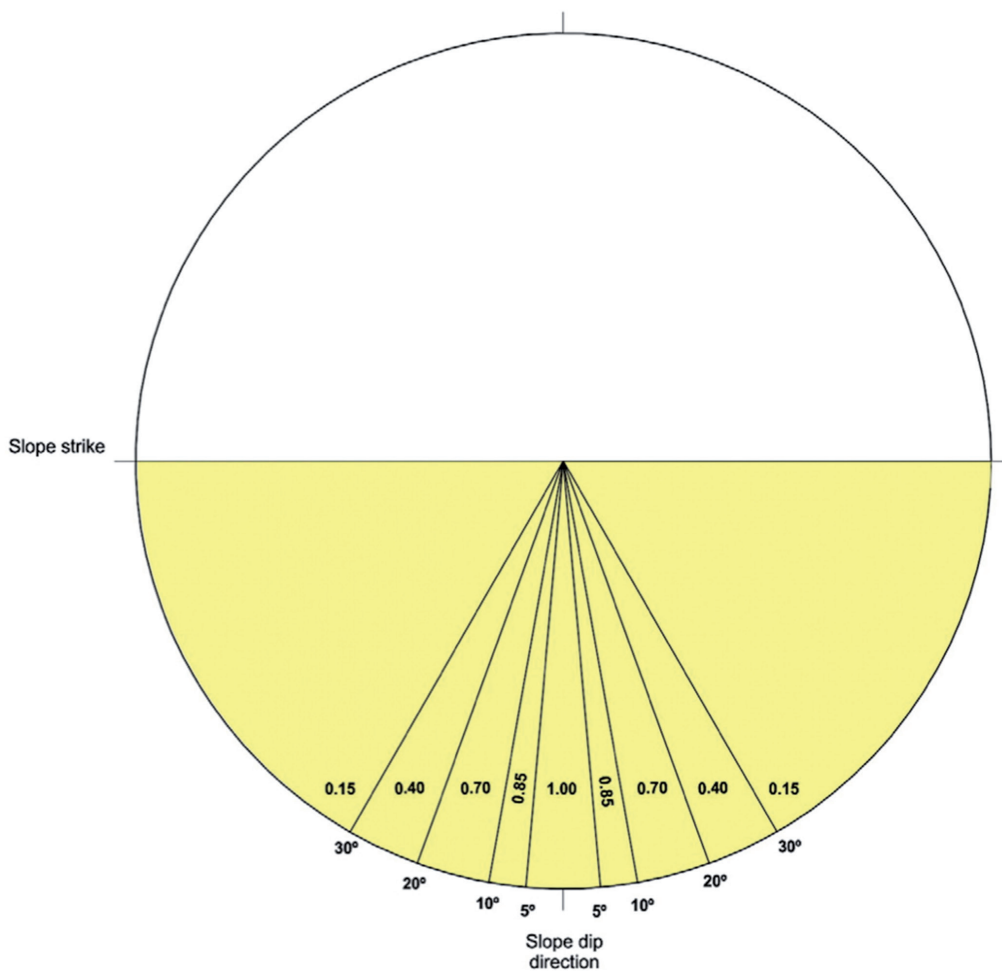


Figura 3 - Estereograma para obtenção do fator  $\psi$  para o caso de ruptura por cunha. (Tomás et al. 2012)

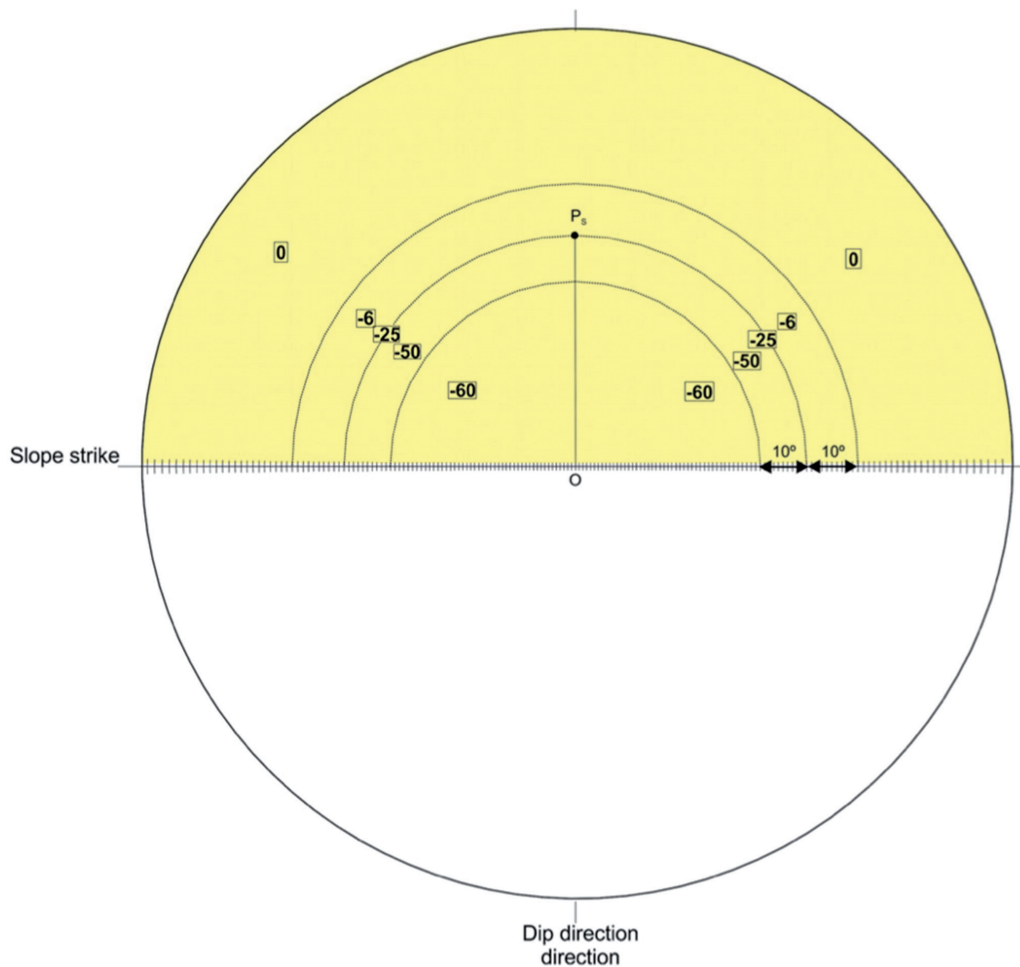


**Figura 4** - Estereograma para obtenção do fator  $\psi$  para o caso de ruptura por tombamento. (Tomás et al. 2012)

Como  $F_3$  depende do ângulo de mergulho do talude, um estereograma específico deve ser usado para cada valor de mergulho do talude e tipo de ruptura.

Para rupturas planares (figura 5) já com o polo do talude plotado ( $P_s$ ) e orientado para sul, deve-se traçar uma reta que o una ao centro do estereograma (O) assim formando uma linha, que será o raio do semicírculo a ser projetado.

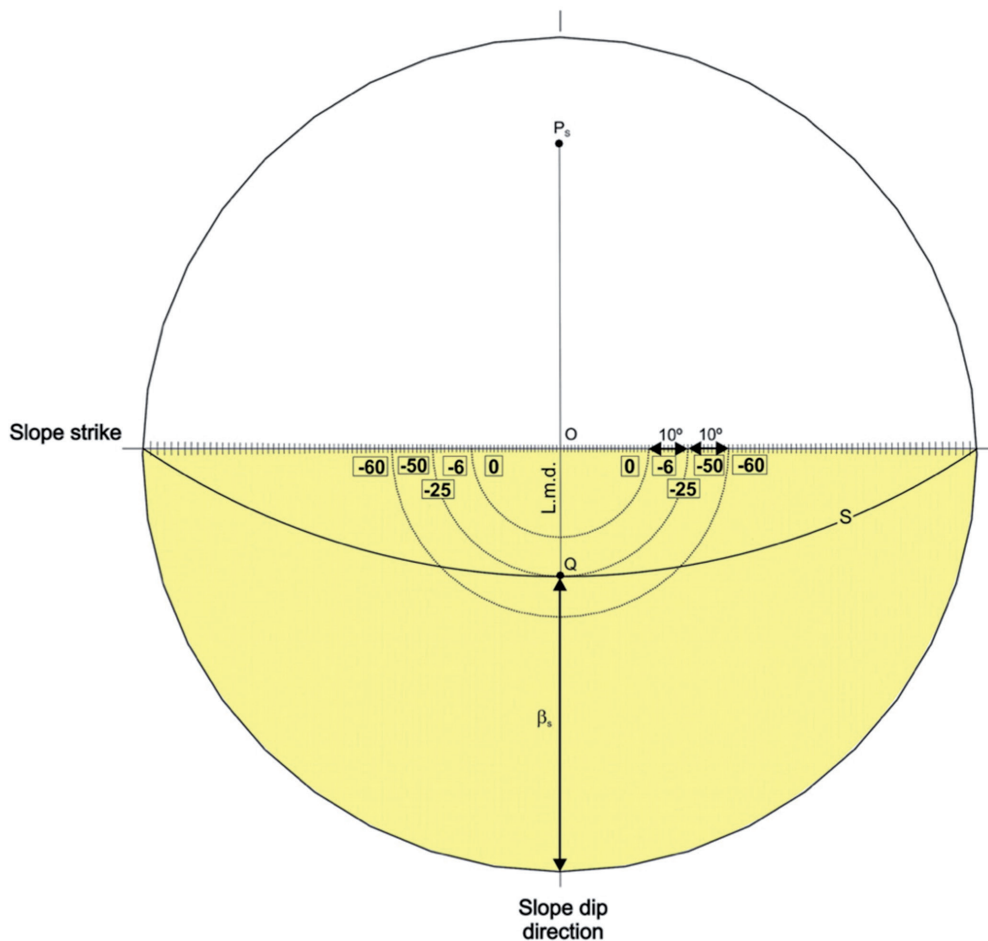
Após o semicírculo ser desenhado, traça-se dois outros semicírculos concêntricos variando  $10^\circ$  para mais e para menos, assim obtém-se três semicírculos no final que dividem a parte superior do estereograma em 4 áreas, as quais variam de 0 a -60.



**Figura 5** - Método de construção do estereograma para determinação do  $F_3$  para rupturas planares.  $P_s$  é o polo do talude. (Tomás et al. 2012)

Para confecção do estereograma para os casos de rupturas em cunha (figura 6), plota-se o polo da projeção da linha de mergulho máximo (Q) do talude. Esse ponto ligado ao centro (O) formará uma linha (OQ) que será o raio do semicírculo que tangencia o plano do talude.

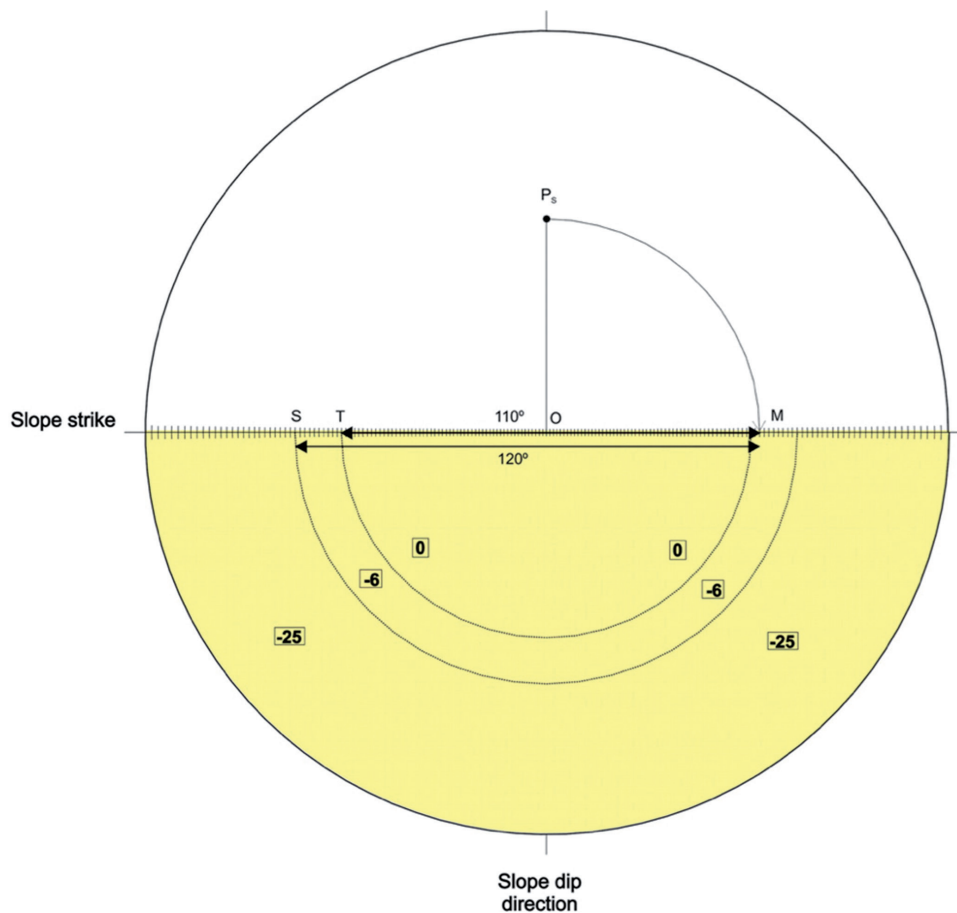
A partir desse semicírculo, dois semicírculos, concêntricos ao primeiro serão desenhados variando em  $10^\circ$  cada. Os valores de  $F_3$  variam entre 0 a -60, diminuindo do centro para as bordas do estereograma.



**Figura 6** - Método de construção do estereograma para determinação do  $F_3$  para rupturas por cunha. (Tomás et al. 2012)

Para rupturas por tombamento (figura 7), onde o raio  $OP_s$  interceptar o eixo EW do estereograma será denominado de ponto  $M$ . A partir desse ponto deve se medir  $110^\circ$  e  $120^\circ$ , em direção ao centro obtendo-se, respectivamente, o ponto  $T$  e o ponto  $S$ .

Com esses três pontos teremos dois novos raios,  $OT$  e  $OS$ , que servirão como raio para dois semicírculos que ocuparam a região sul do estereograma, os valores irão variar, do centro para a borda, entre 0 e -25.



**Figura 7** - Método de construção do estereograma para determinação do  $F_3$  para rupturas por tombamento.  $P_s$  é o polo do talude. (Tomás et al. 2012)

A utilização desta metodologia, embora pareça complexa em um primeiro momento, facilita a obtenção dos parâmetros para a classificação SMR, que podem ser obtidos graficamente, além disso, este estudo apresentou resultados bastante satisfatórios.

#### 2.4 Caracterização geomecânica

O trabalho se concentrou na *cava Antas 1*, da empresa Fazenda Brasileiro (figura 8), a única em

atividade no momento. Para coleta dos dados foi adotado o método de *scanlines* (Priest 1993), que consiste na análise e descrição das estruturas encontradas no maciço rochoso ao longo de uma linha paralela à frente do talude. Para isso, criou-se uma planilha com os parâmetros que atendessem às classificações do método *Q* e *RMR*. O *RQD* foi estipulado combinando a classificação do maciço realizada no campo com a dos bancos de dados da empresa.

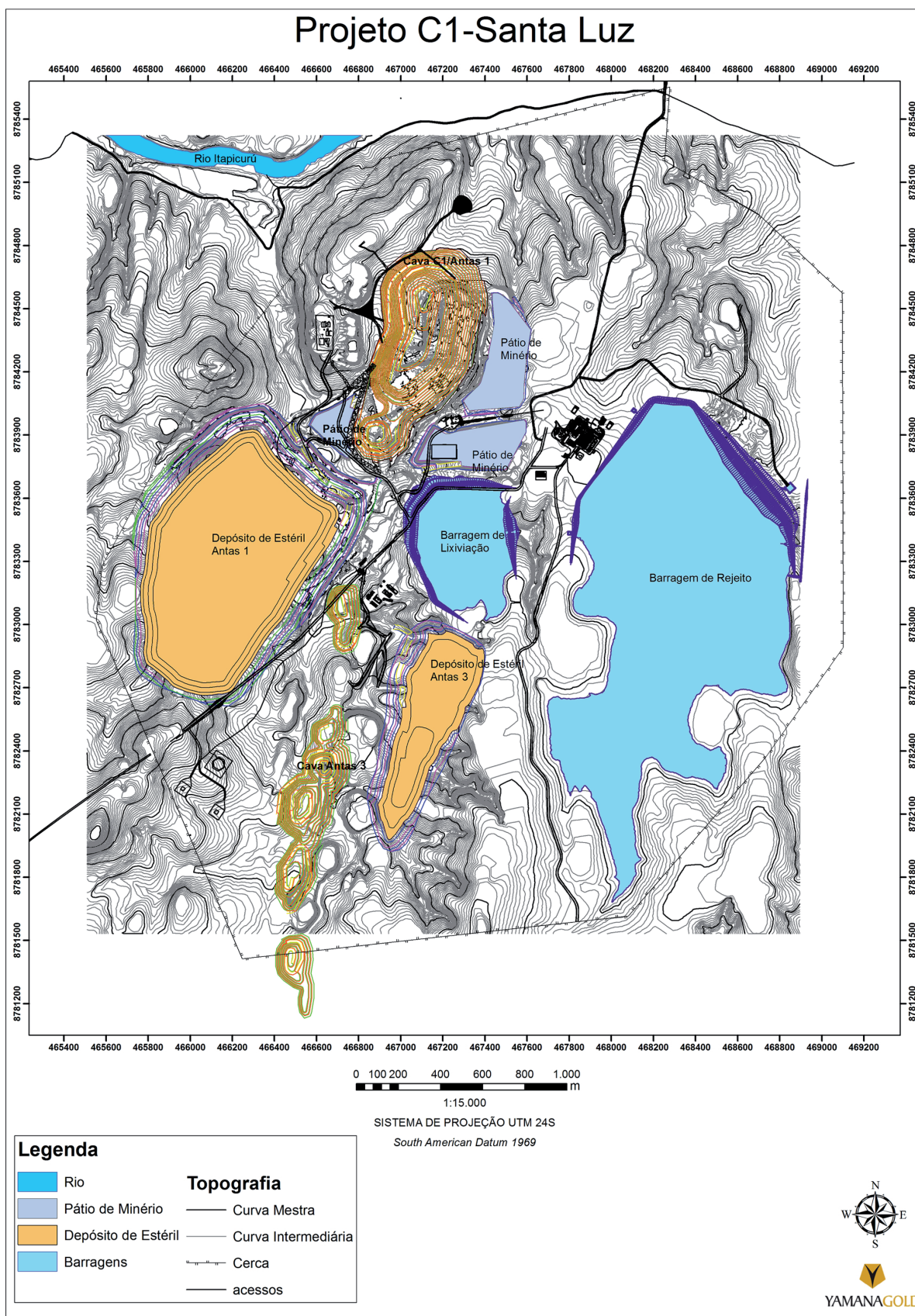


Figura 8 - Mapa do projeto final da mineração. A Cava Antas1/C1 localiza-se na porção norte do mapa.

Fonte: Yamana Gold Inc.

Comparando a classificação feita em campo com o banco de dados de geomecânica da empresa, se estabeleceu os valores do RQD para cada litologia (tabela 5).

Para a classificação de maciço utilizando os sistemas Q e o RMR, foi criada uma tabela no programa *Excel*, onde os dados coletados nas *scanlines*

foram inseridos, e assim comparados com as tabelas de cada método, assim obtendo os valores para os fatores de cada metodologia.

A classificação foi feita por litologia em cada *scanline*, pois em campo é nítido o diferente comportamento do maciço segundo esse aspecto.

**Tabela 5** - Tabela com os valores do RQD por litologia para a classificação do maciço feita visualmente em campo

RQD	Maciço		
	Ruim	Razoável	Bom
<i>Metadacito</i>	35	70	83
<i>Metadiorito</i>	45	75	90
<i>Xisto-Carbonoso</i>	38	55	77
<i>Brecha Dacítica</i>	30	70	80
<i>Brecha Carbonosa</i>	25	50	75

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Análise estrutural

##### 3.1.1 Análise das *scanlines*

Foram realizadas 12 *scanlines* (Figura 9), variando entre 6 a 70 metros de extensão, e as

informações (litologia, tipo de fratura, direção e ângulo do mergulho, persistência, abertura das fraturas, espaçamento entre as fraturas e rugosidade) foram coletadas, no mínimo a cada 2 metros.

Os dados foram tratados nos programas *Openstereo*, *Dips 6.0*, *Excel* e *Photoshop CS6*.



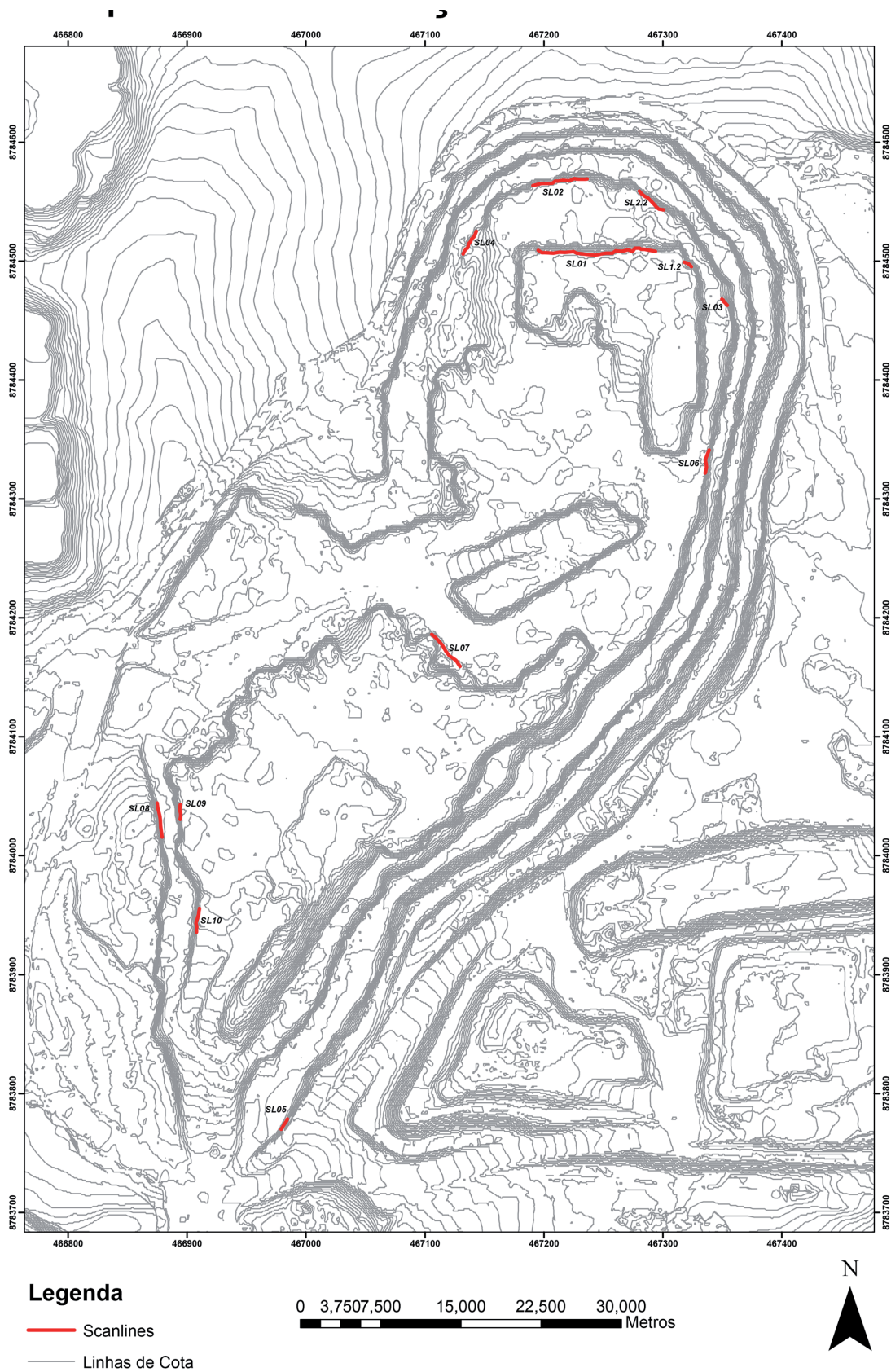
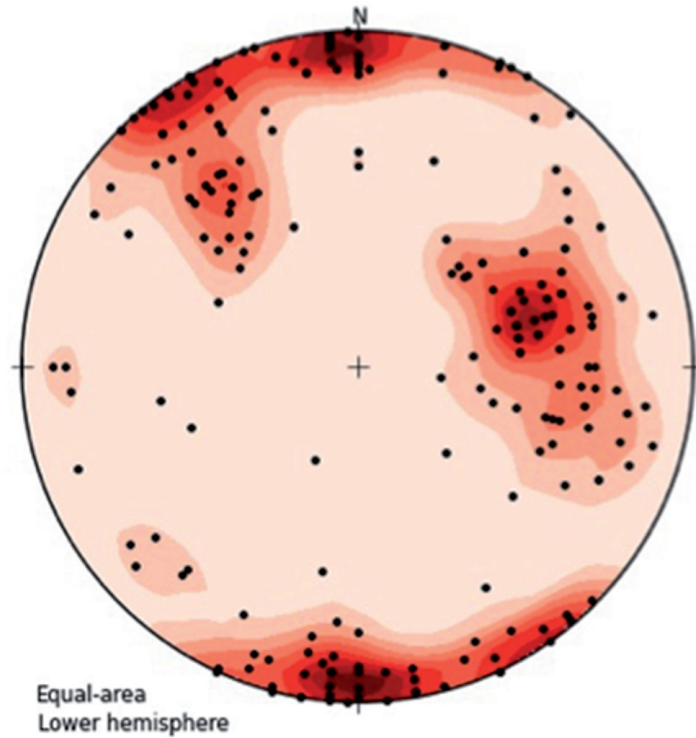


Figura 9 - Mapa de localização das scanlines na cava Antas 1.

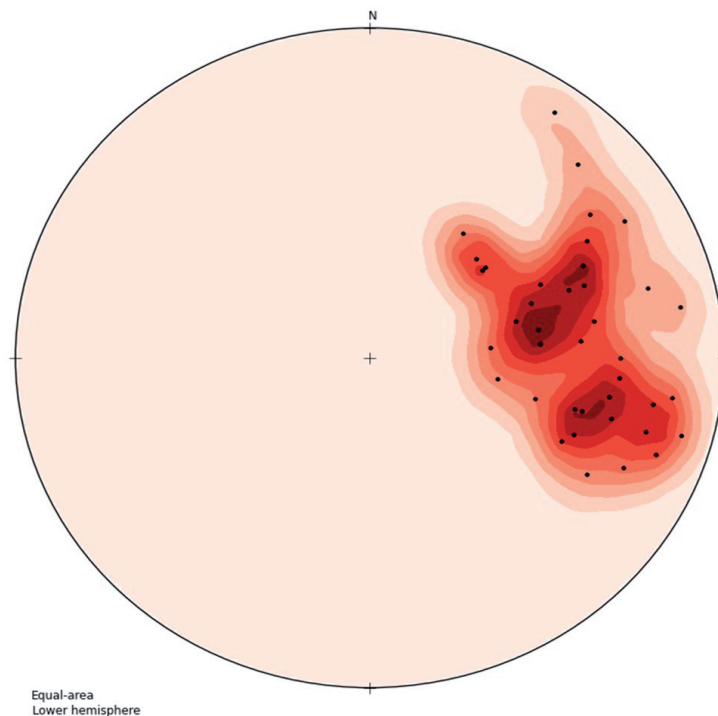
### 3.1.2 Análise estereográfica

A partir das observações feitas em campo e pela análise das projeções estereográficas (figura 10) foi possível a divisão das descontinuidades

em famílias, juntas e falhas. A foliação (figura 11) é bem evidente nos metadioritos, principalmente nos da parte noroeste, nos xistos grafitosos e ausente nas lentes e no corpo de dacito.



**Figura 10** - Estereograma com as polares das descontinuidades analisadas nas 12 scanlines.



**Figura 11** - Estereograma com as polares da foliação. Atitude 250/40.

Pela análise dos estereogramas nota-se que a foliação é dispersa, possivelmente devido ao esforços compressivos que atuaram em toda a região. As famílias de juntas foram chamadas de J1, J2, J3 e J3.2.

J1 (figura 12) tem direção praticamente E-W, mergulhando entre 75° a 85° para N e para S, J2 (figura 13) tem direção N295 com mergulho vertical,

variando entre 80° a 90°, J3 (figura 14) tem direção N057 com mergulho variando entre 90° e 75° com direção de mergulho para SE. J3.2 (figura 15) é provavelmente uma variação de J3 com um menor mergulho, mais evidente nos xistos carbonosos, ela tem direção N052 com mergulho variando entre 60° a 40° para SE.

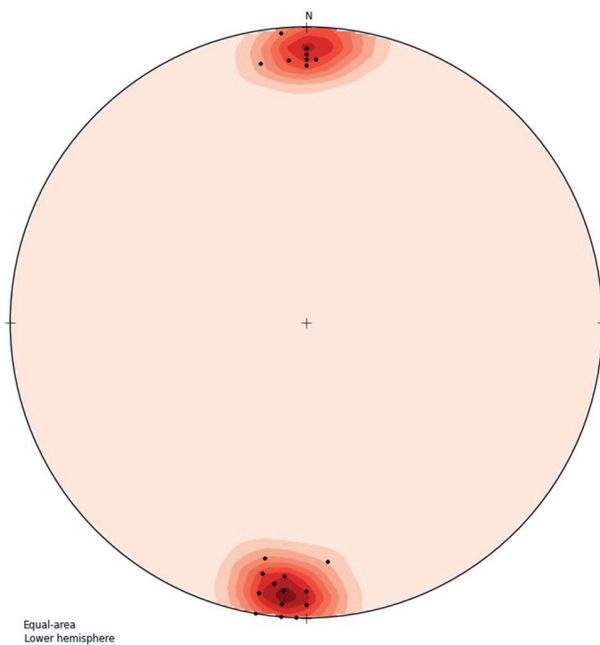


Figura 12 – Estereograma com a família J1. Atitude: 185/80 e 000/78

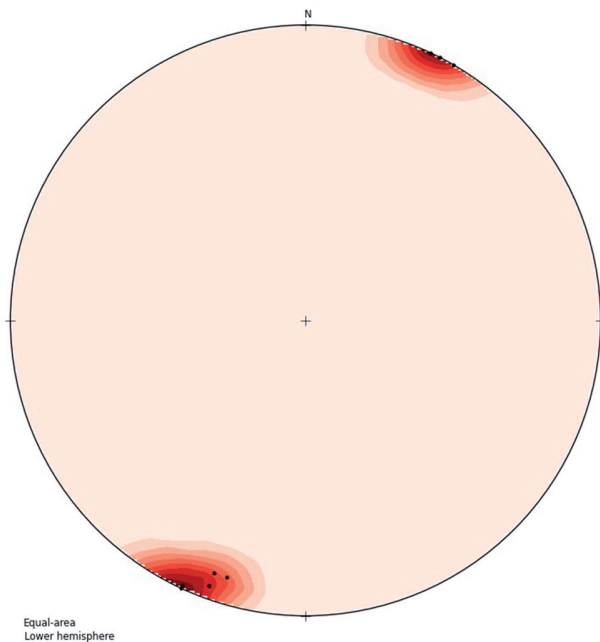


Figura 13 – Estereograma da família J2. Atitude: 020/80

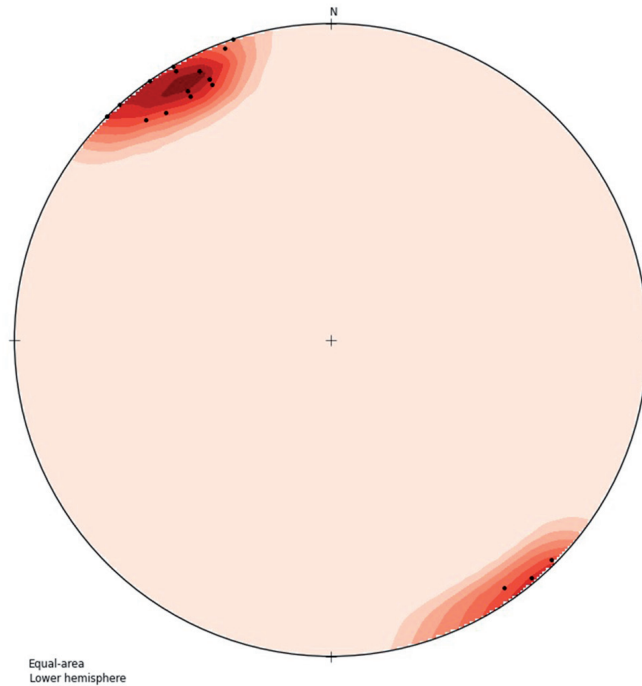


Figura 14 – Estereograma da família J3. Atitude: 140/85

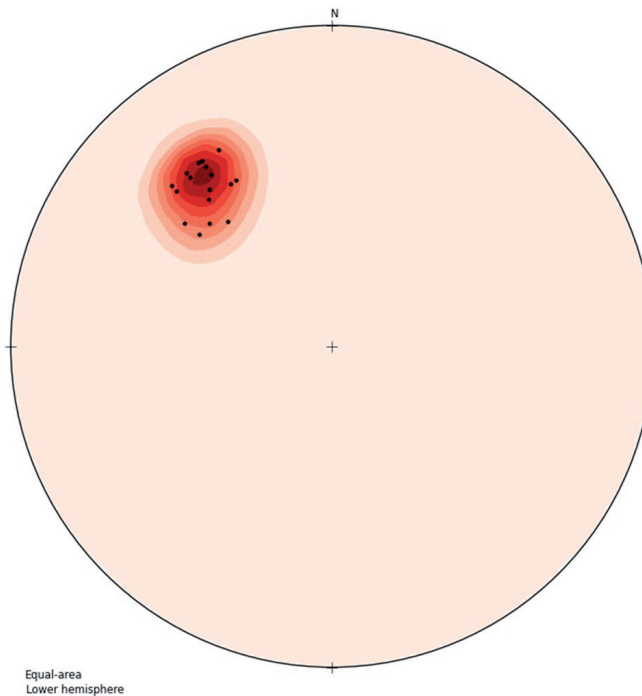


Figura 15 – Estereograma da família J3.2. Atitude: 142/60

Há também dois sistemas de falhas que não puderam ser bem definidos devido à baixa quantidade de medidas, um com atitude 240/50, chamado de falha 1, e outra com atitude 145/60, chamado de falha 2.

### 3.2 Análise cinemática

Para a análise cinemática foram definidos 6 taludes (figura 16), eles foram delimitados de forma que representasse a maior quantidade de scan-

lines realizadas. As atitudes dos taludes (direção do mergulho/mergulho) foram obtidas em campo e confirmadas no mapa topográfico da mina.

As atitudes utilizadas foram as definidas nas scanlines e não as famílias previamente definidas.

Nos casos em que o maciço era constituído por mais de uma litologia, o ângulo de atrito ( $\phi$ ) adotado foi o mais baixo entre as litologias presentes no talude.

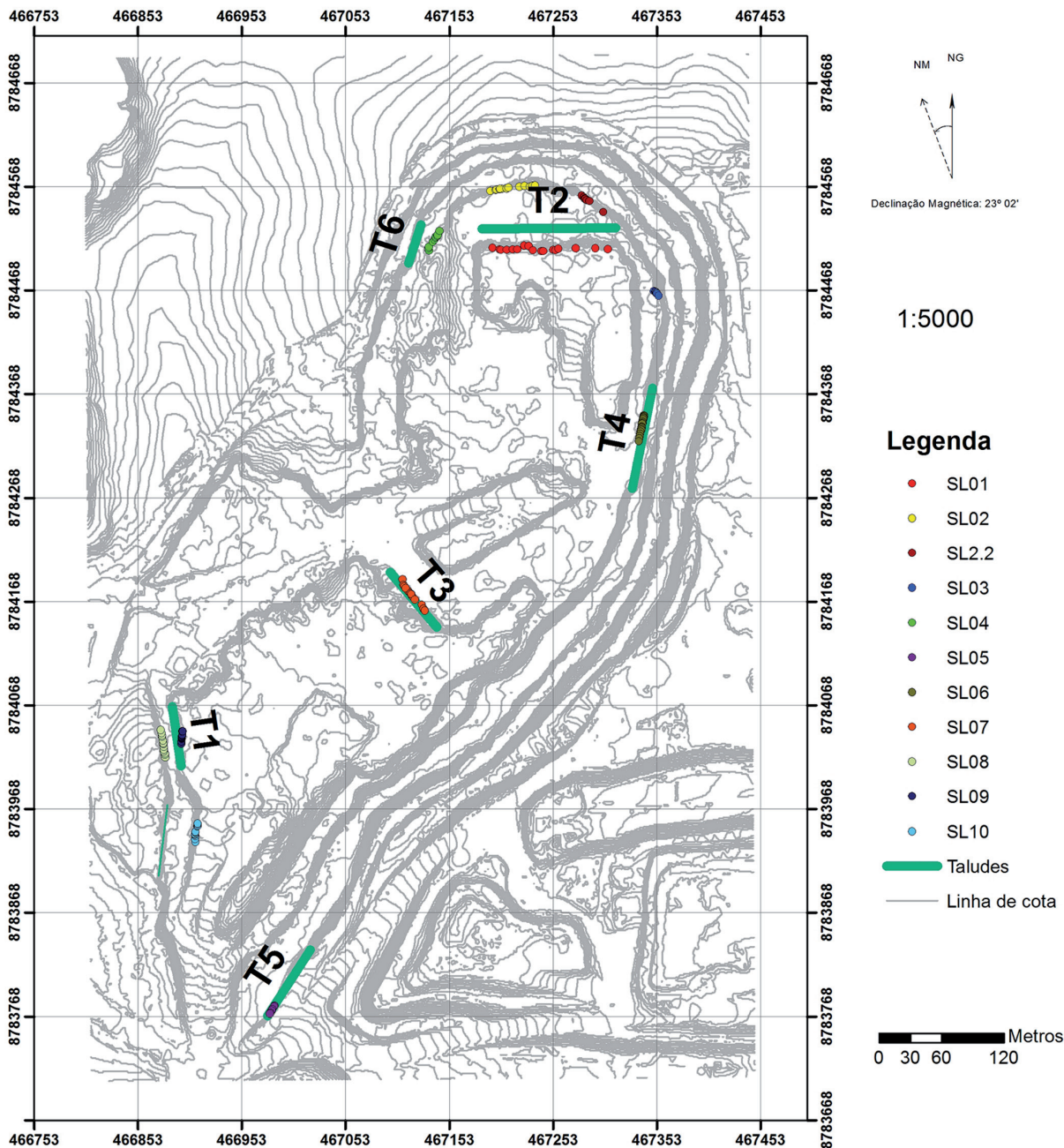


Figura 16 - Mapa de localização dos taludes com as scanlines realizadas.

### 3.2.1 Talude 1 (T1)

O T1 é constituído principalmente por xisto-carbonoso, com metadacitos imbricados na porção NW. O talude possui atitude de 102/60

e engloba as SL08 e SL09. Pela análise dos estereogramas (figura 17) há somente a possibilidade de ruptura por tombamento, ocasionada pela foliação.

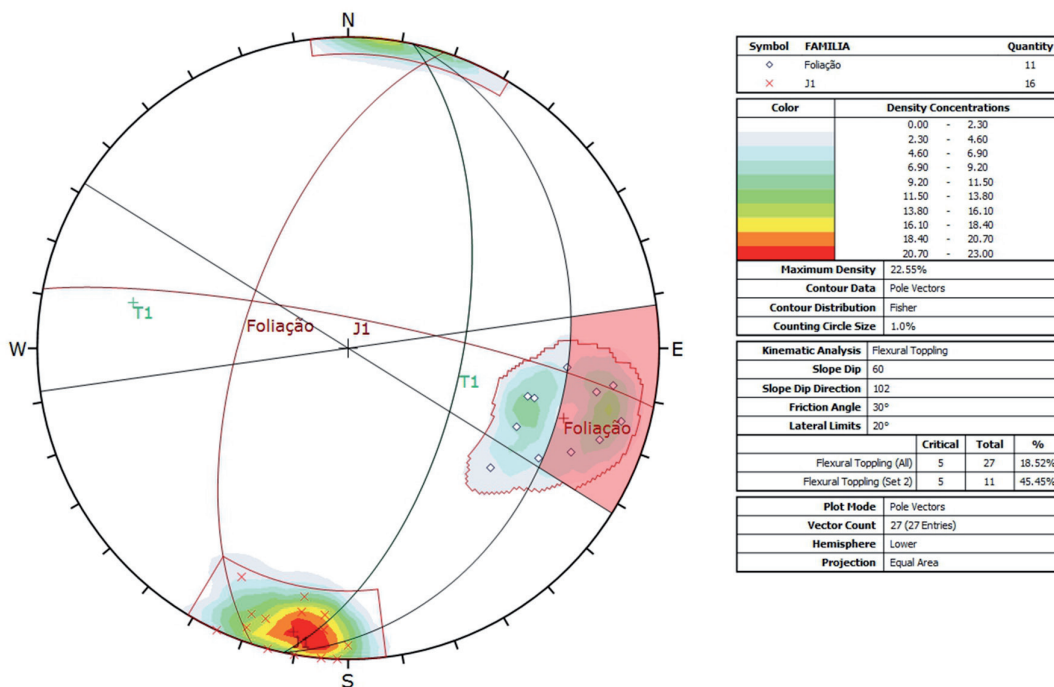


Figura 17 - Análise de ruptura por tombamento para o T1.

### 3.2.2 Talude 2 (T2)

O T2 é constituído por metadioritos, na parte mais W, metacacito, na parte central e xisto-carbonoso na parte E com atitude de 198/50 e engloba

as SL01, SL02 e SL2.2. Pela análise dos estereogramas (figura 18) há a possibilidade de ruptura por cunha, formadas pela intersecção da foliação com J3 e com J3.2.

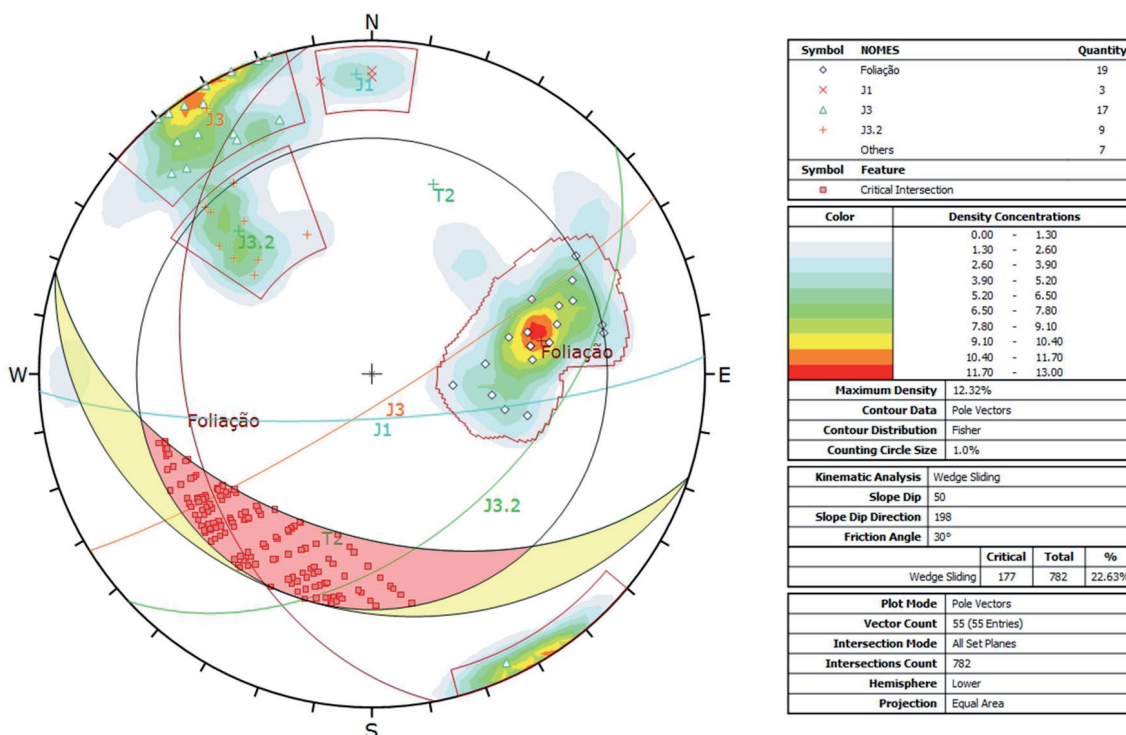


Figura 18 - Análise de ruptura por cunha para o T2.

### 3.2.3 Talude 3 (T3)

O T3 é constituído por xisto carbonoso na sua parte mais a NW e por um dacito na parte SE, a

atitude do talude é 250/50 e engloba somente a SL07. Pela análise dos estereogramas (figura 19) há apenas a possibilidade de ruptura por cunha, gerada pela intersecção da foliação com J3.2

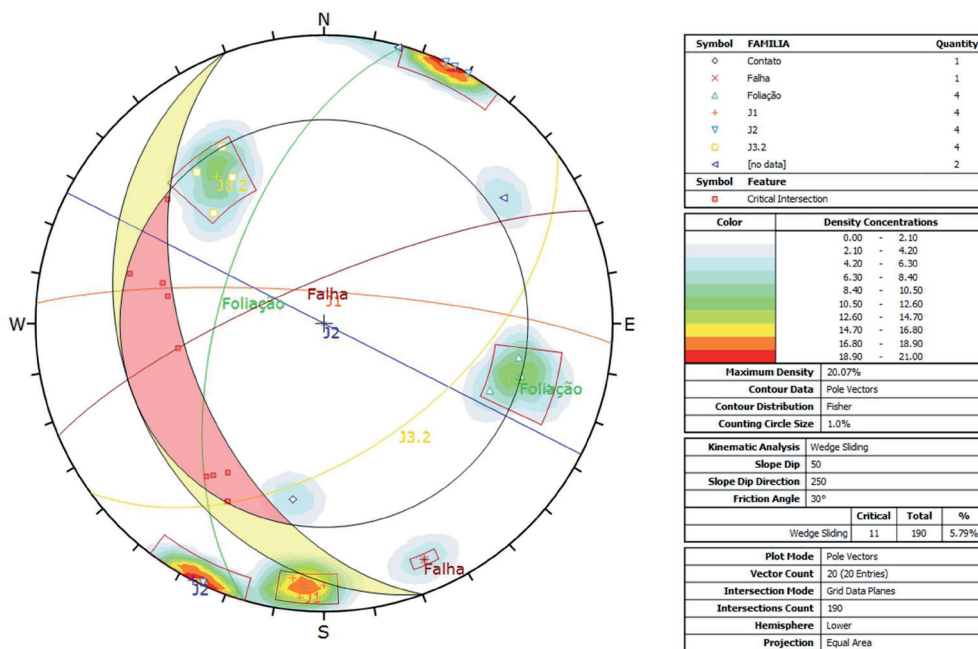


Figura 19 - Análise de ruptura por cunha para o T3.

### 3.2.4 Talude 4 (T4)

O T4 é constituído, em sua grande maioria, por xisto carbonoso, também há metadacito na sua parte mais norte. A atitude do talude é 302/60 e engloba somente a SL06. Pela análise dos

estereogramas (figura 20 e figura 21) há a possibilidade de ruptura por cunha, gerada pela intersecção da foliação com J3 e com a falha 1, e por tombamento, ocasionado pela J3, porém com uma probabilidade pequena ( 6%).

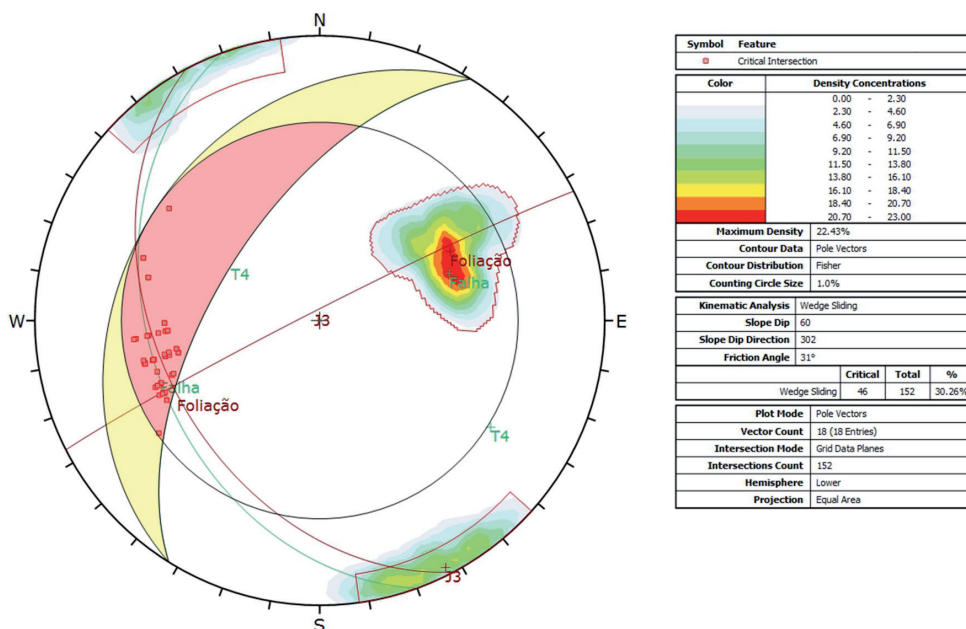


Figura 20 - Análise de ruptura por cunha para o T4.

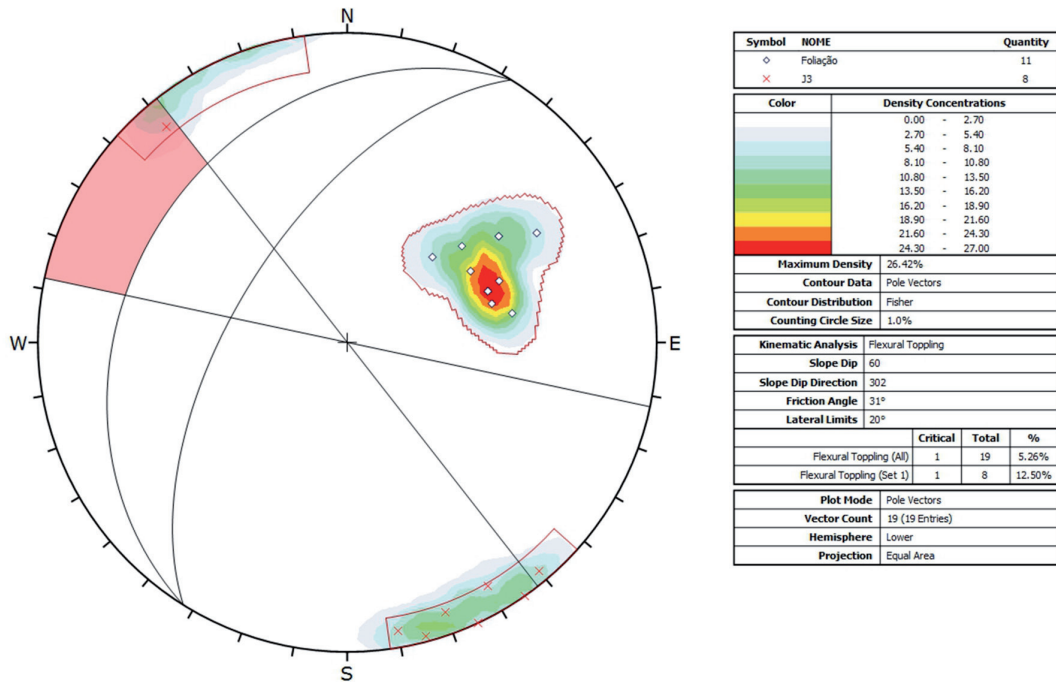


Figura 21 - Análise de ruptura por tombamento para o T4.

### 3.2.5 Talude 5 (T5)

O T5 é constituído unicamente por metadiacito. A atitude do talude é 323/45 e engloba somente a SL05. A análise dos estereogramas não indicou possibilidade de ocorrência de nenhum dos tipos de ruptura analisados.

### 3.2.6 Talude 6 (T6)

O T6 é constituído unicamente por metadiacito. A atitude do talude é 128/60 e contendo somente a SL04. A análise dos estereogramas não indicou possibilidade de ocorrência de nenhum dos tipos de ruptura analisados.

## 3.3 Classificação pelo sistema SMR com obtenção dos fatores por método gráfico

Como já ressaltado anteriormente, o sistema de classificação SMR (Slope Mass Rating) é calculado a partir da determinação de quatro fatores, que posteriormente são somados ao valor do RMR obtido porém desconsiderando o ajuste das direções das descontinuidades. Esses fatores

dependem da relação angular entre as descontinuidades que afetam o maciço rochoso e o talude em análise. Para obtenção desses fatores utilizou-se o método gráfico proposto por Tomás et al. (2012), e seus resultados serão mostrados a seguir.

Como o Talude 5 e 6 não apresentaram potencial de ruptura serão analisados somente os Taludes 1, 2, 3 e 4.

### 3.3.1 Talude 1

Em T1 há a possibilidade de ruptura por tombamento, portanto utilizou-se o diagrama da figura 4 para se obter o fator  $\psi$ . O maior valor possível para esse fator foi onde o pólo da foliação foi plotado, obtendo-se o valor de 0.85 (figura 22).

Para o fator F3 utilizou-se a metodologia de construção do diagrama para tombamentos, citada anteriormente (figura 7), o valor obtido foi -25 (figura 23). O valor do RMR utilizado foi 65.

Sendo assim o valor do SMR obtido para esse talude foi de 41.75, que segundo a classificação SMR é considerado um maciço razoável, porém no limite entre razoável e ruim.



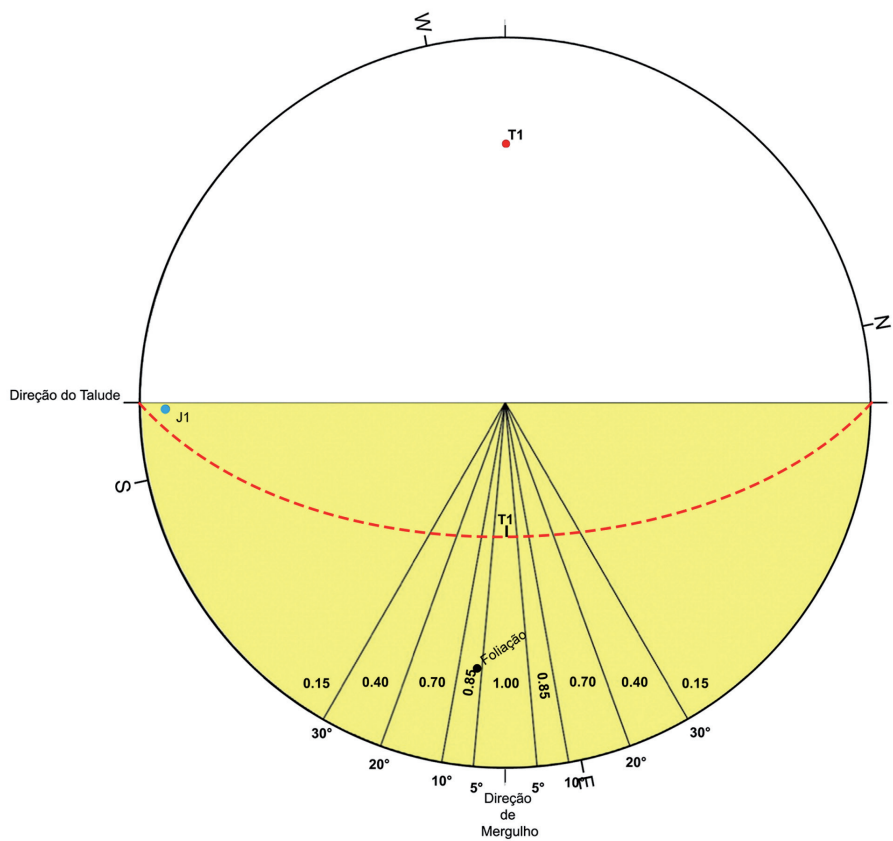


Figura 22 - fator  $\psi = 0.85$  indicado pelo pólo da foliação.

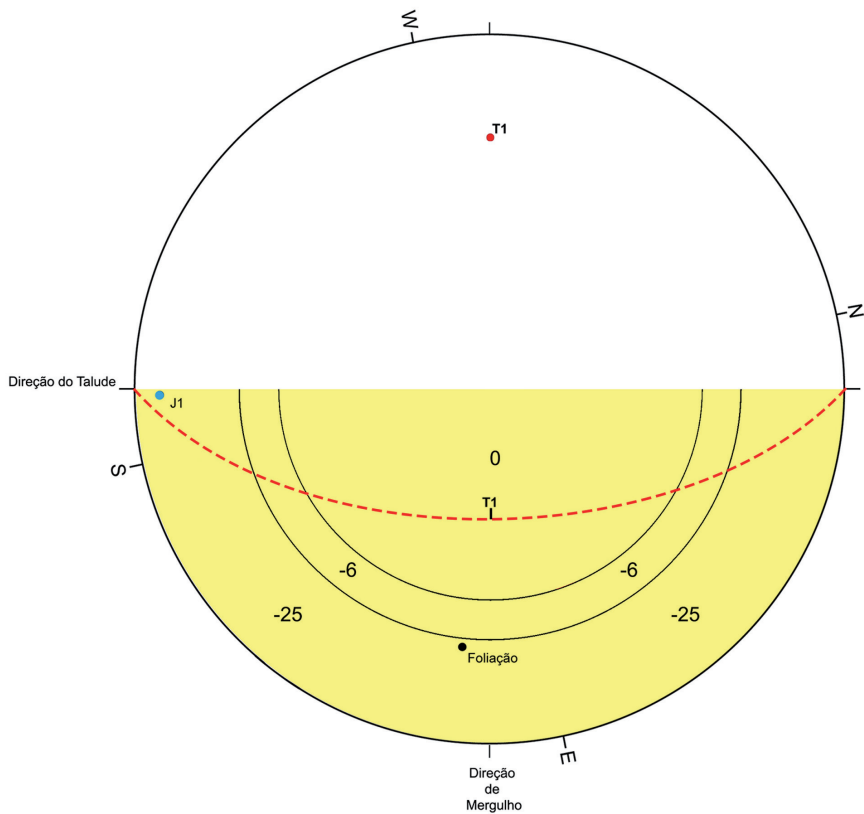


Figura 23 -  $F_3 = -25$  indicado pelo pólo da foliação

### 3.3.2 Talude 2

No talude T2 há a possibilidade de ruptura por cunha, o que levou a utilização do diagrama da figura 3 para se obter o fator  $\psi$ . O maior valor possível para esse fator foi onde J3.2 e a foliação se interceptam, obtendo-se o valor de 0.15 (figura 24).

Para o fator F3 utilizou-se a metodologia de construção do diagrama para cunhas proposta pelo método gráfico (figura 6), obtendo-se o valor de -60 (figura 25). O valor do RMR utilizado foi 63.

O valor do SMR obtido para esse talude foi de 54, que segundo a classificação SMR é considerado um maciço razoável.

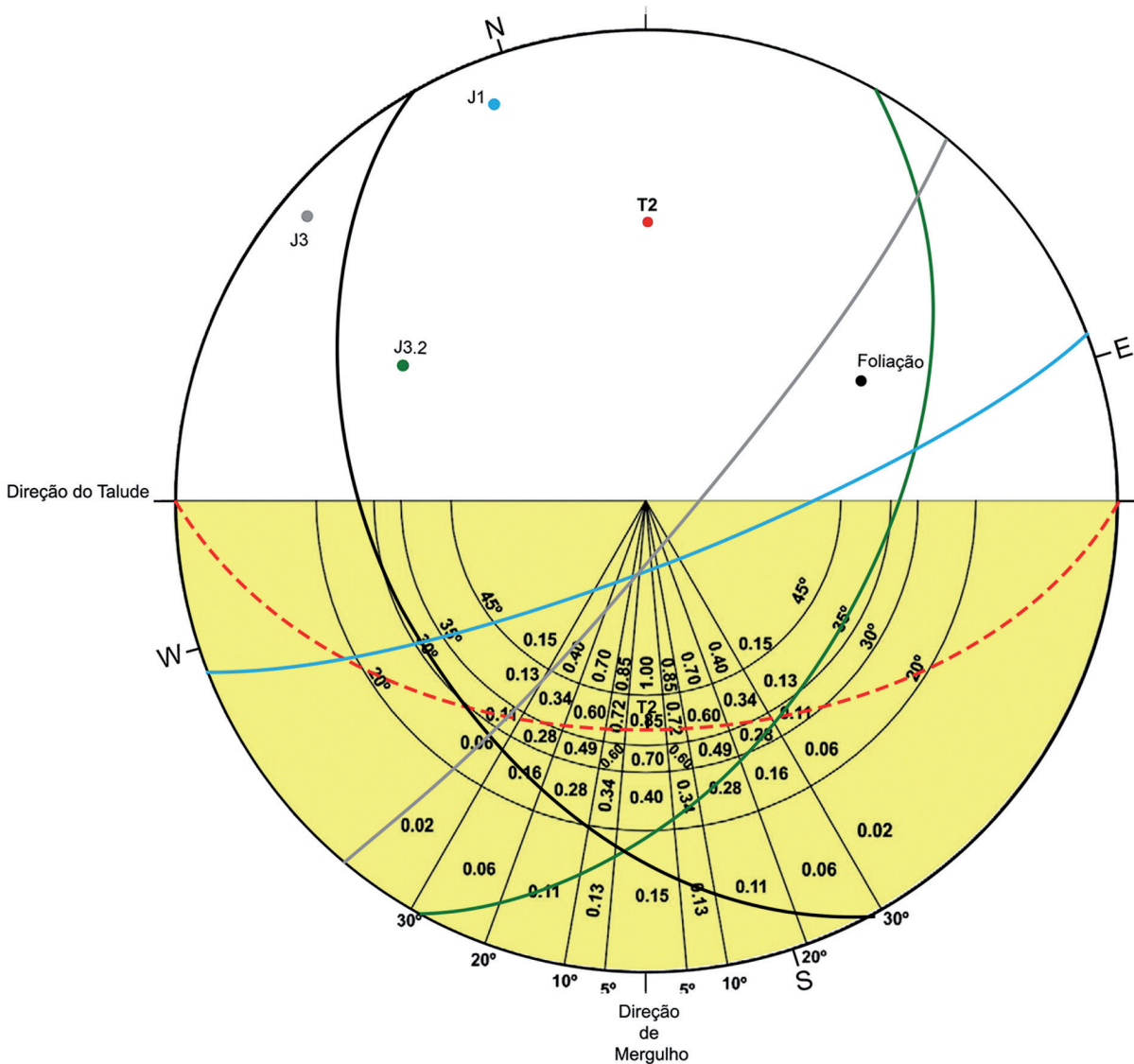


Figura 24 - fator  $\psi = 0.15$  indicado pela intersecção dos planos de J3.2 e a foliação.

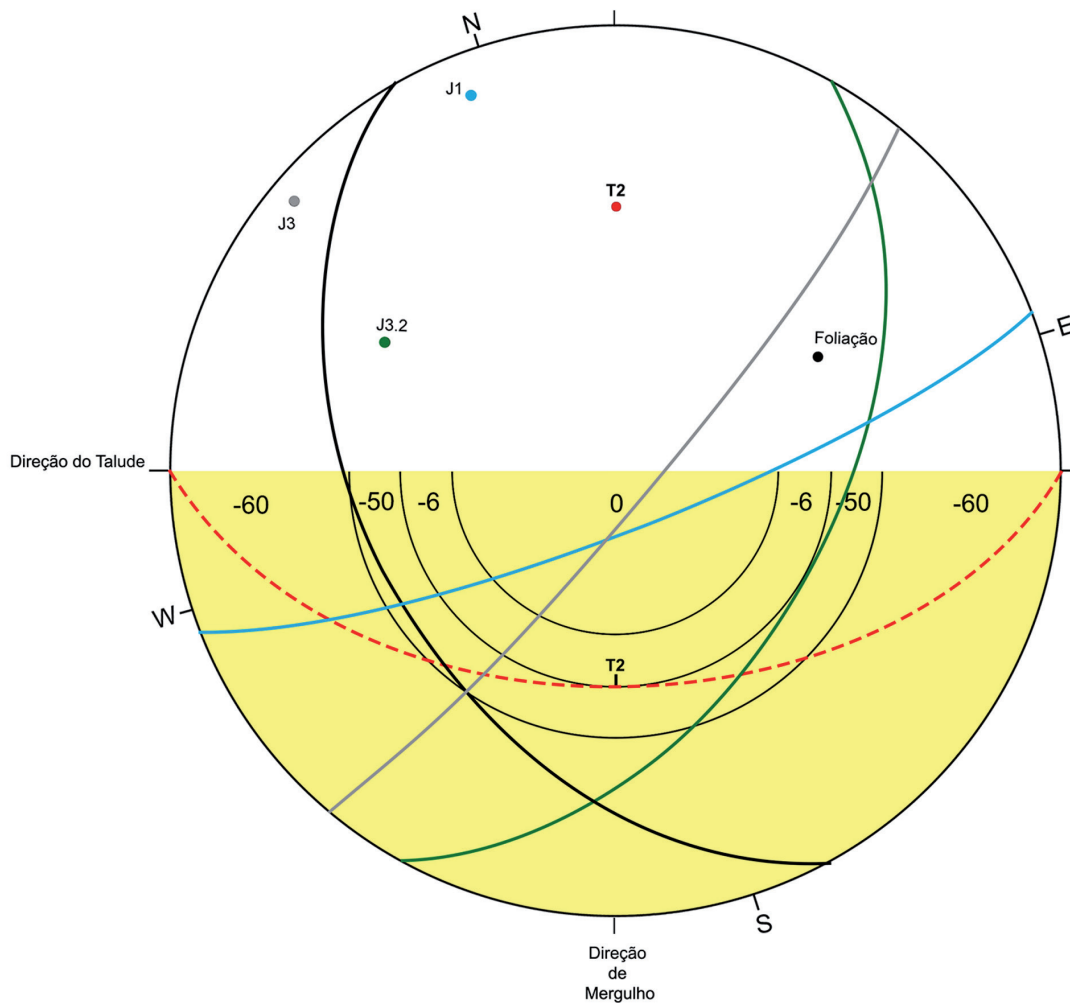


Figura 25 -  $F3 = -60$ , indicado pela intersecção dos planos de J3.2 e a foliação.

### 3.3.3 Talude 3

Em T3 há a possibilidade de ruptura por cunha, para tal utilizou-se o diagrama da figura 7 para se obter o fator  $\psi$ . O maior valor possível para esse fator foi , novamente, onde J3.2 e a foliação se interceptam, obtendo-se o valor de 0.02 (figura 26).

Para a F3 utilizou-se a metodologia de construção do diagrama para cunhas, citada anteriormente (figura 10), o valor obtido foi -60 (figura 27). O valor do RMR utilizado foi 64.8.

O valor do SMR obtido para esse talude foi de 64.8, que segundo a classificação SMR é considerado um maciço bom.

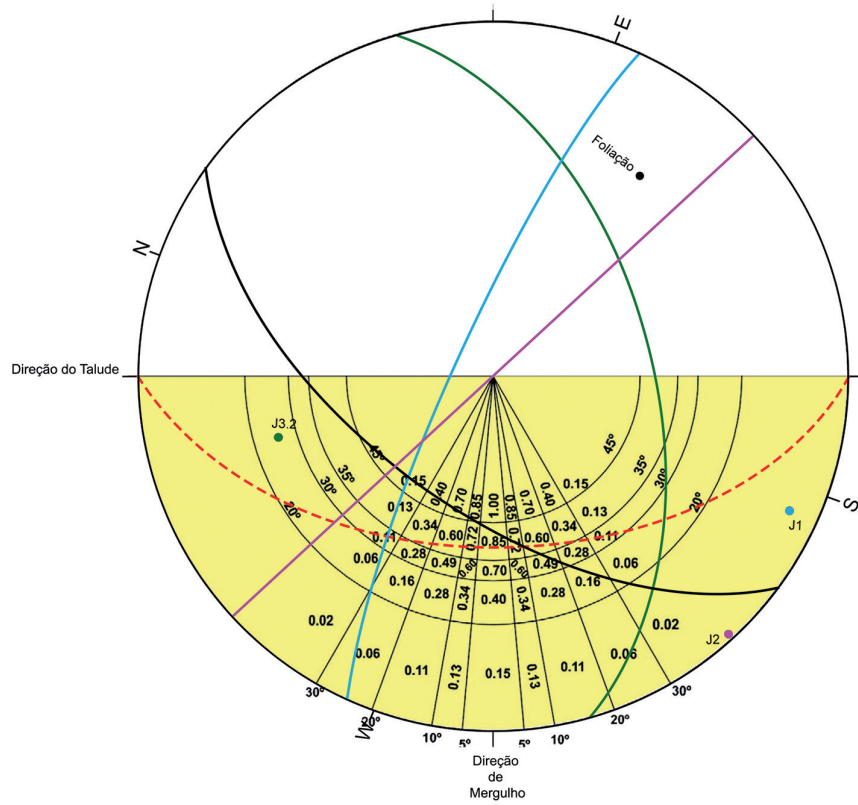


Figura 26 -  $\psi = 0.15$  indicado pela intersecção dos planos de J3.2 e a foliação.

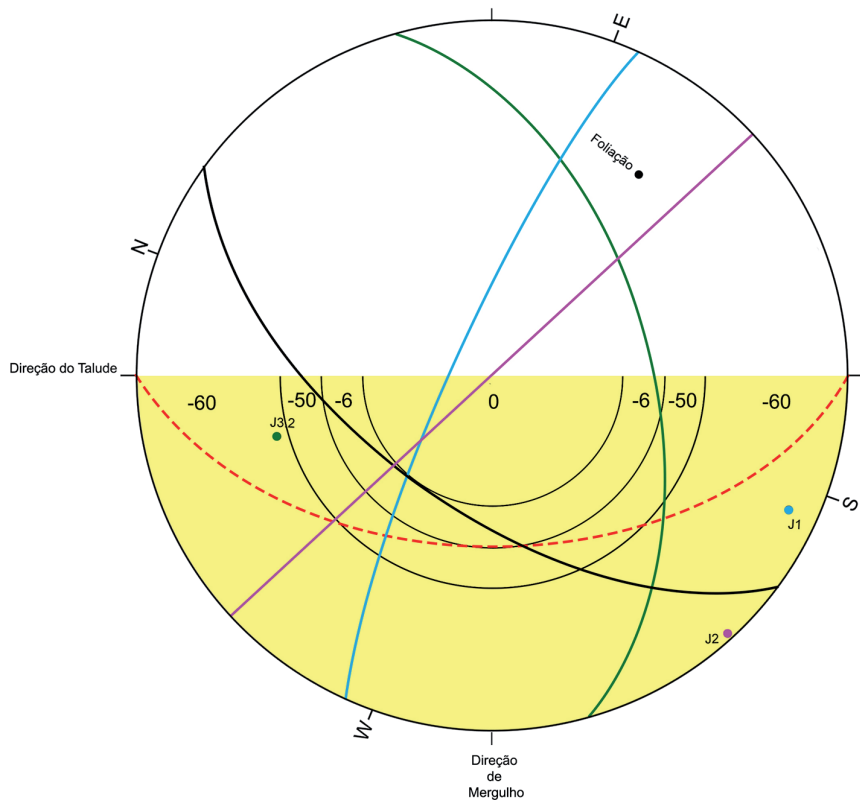


Figura 27 -  $F3 = -60$ , indicado pela intersecção dos planos de J3.2 e a foliação.

### 3.3.4 Talude 4

Em T4 há a possibilidade de ruptura por cunha e por tombamento. Para se obter o fator  $\psi$  utilizou-se os digramas figura 3 e figura 4, respectivamente. Para ruptura em cunha, o maior valor possível para o fator  $\psi$  foi 0.11 (figura 28), gerado pela intersecção do plano da foliação com J3. No caso de ruptura por tombamento, o valor obtido para o fator  $\psi$  foi 0.15 (figura 29), ocasionado por J3.

Para o fator F3 utilizou-se a metodologia de construção do diagrama para cunhas (figura 6) e para tombamento (figura 7), obtendo-se o calor de -60 para cunha (figura 30), e de -25 para tombamento (figura 31). O valor do RMR utilizado foi 63.

O valor do SMR obtido para esse talude foi de 56.4 para cunha e 59.25 para tombamento, que segundo a classificação SMR ambos são considerados maciços razoáveis.

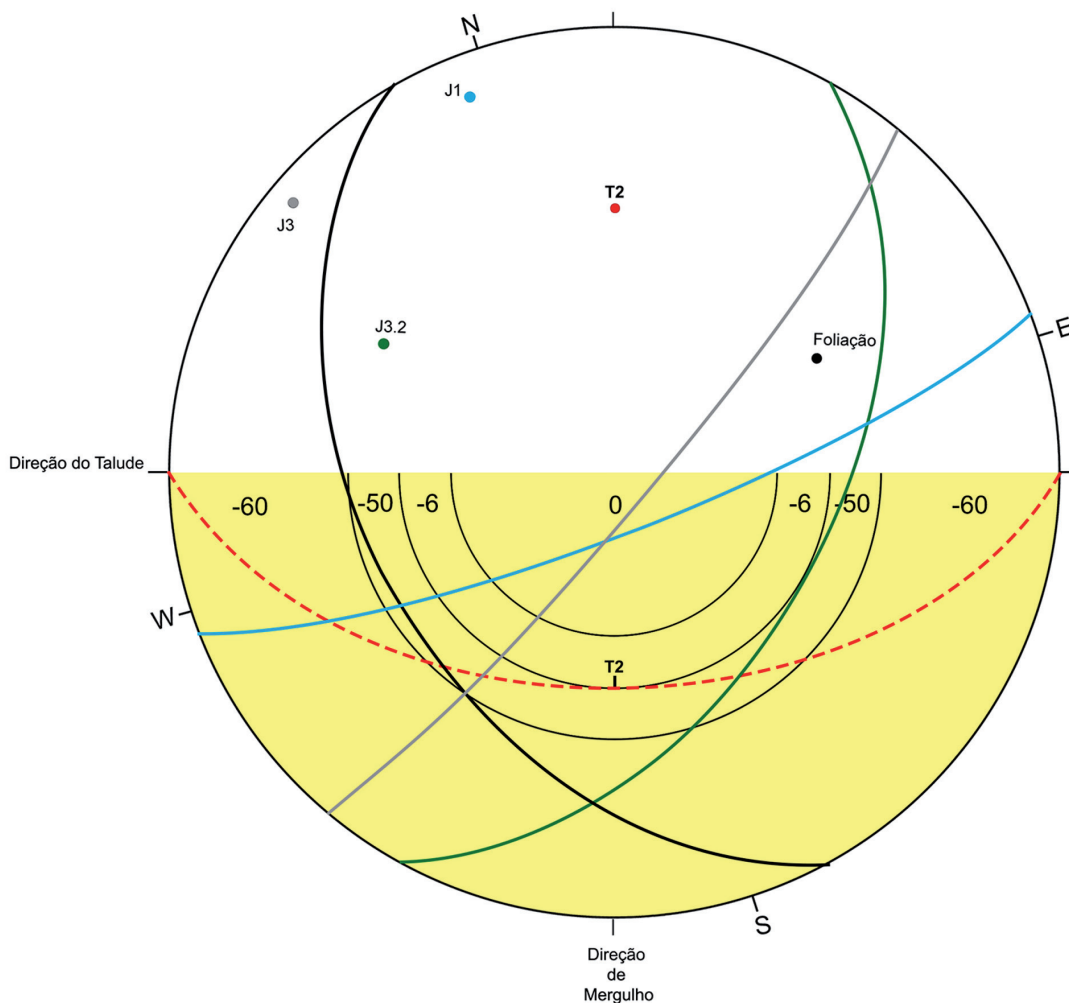


Figura 28 -  $\psi = 0.15$  indicado pela intersecção dos planos de J3 e a foliação.

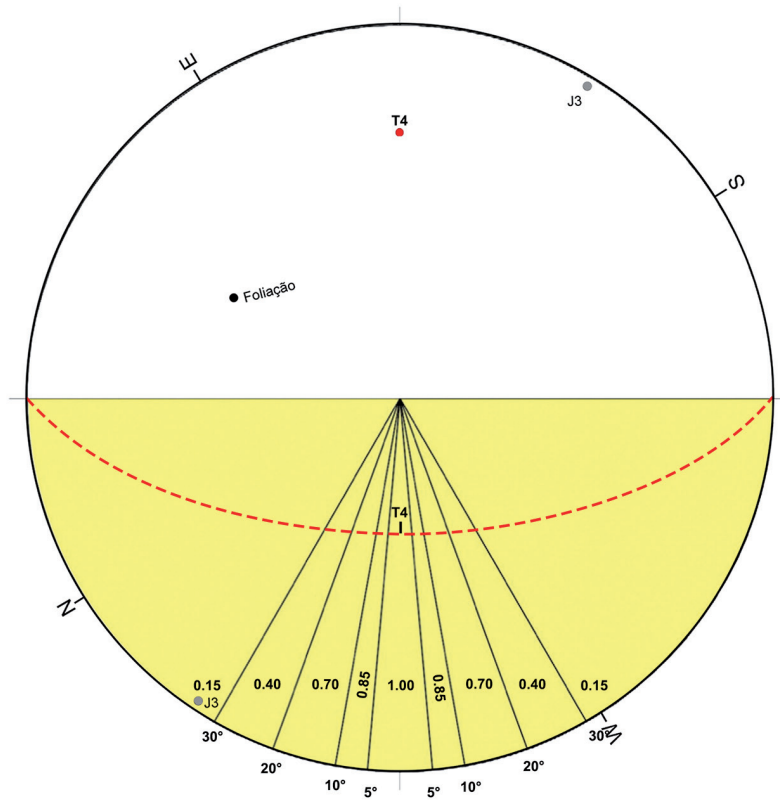


Figura 29 -  $\psi = 0.15$  indicado pelo pólo de J3.

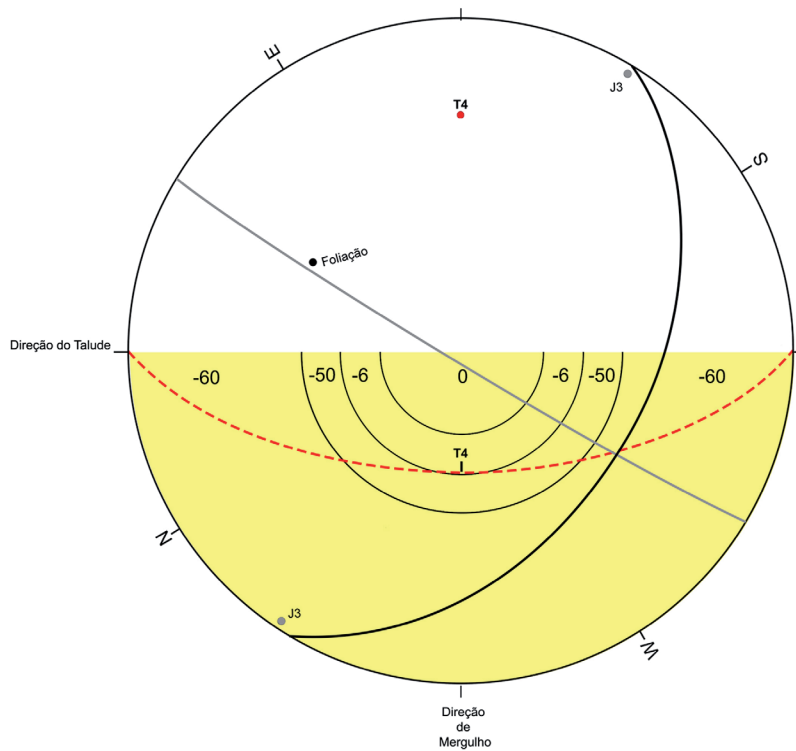


Figura 30 -  $F_3 = -60$ , indicado pela intersecção dos planos de J3 e a foliação.

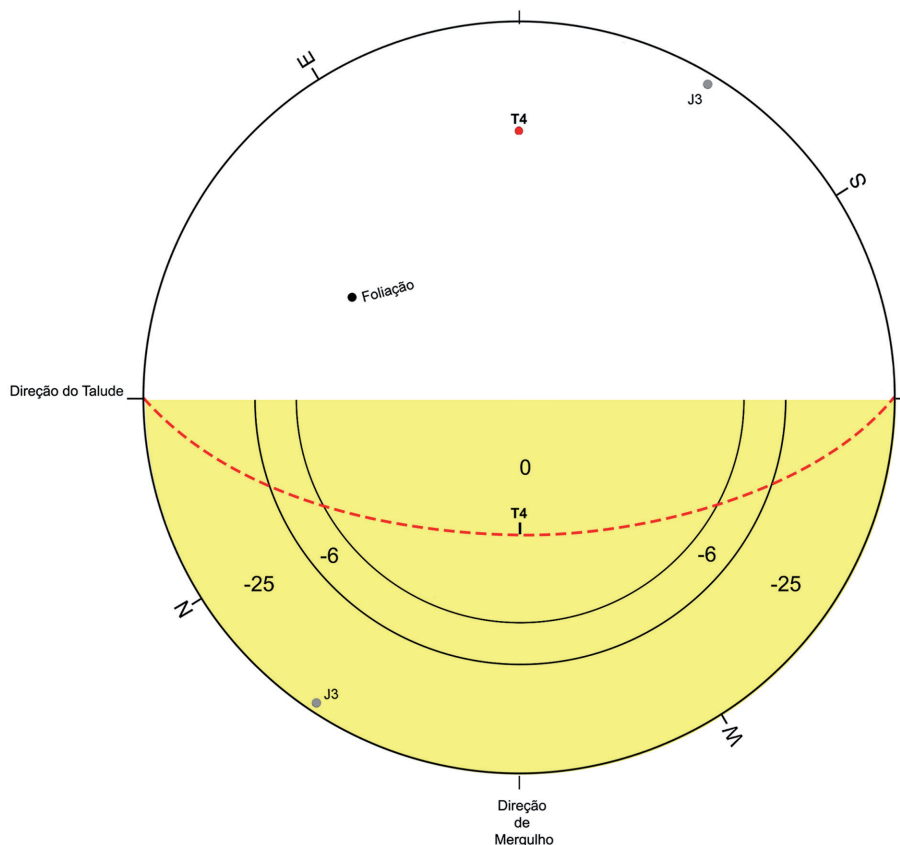


Figura 31 - F3 = -25, indicado pelo pólo de J3.

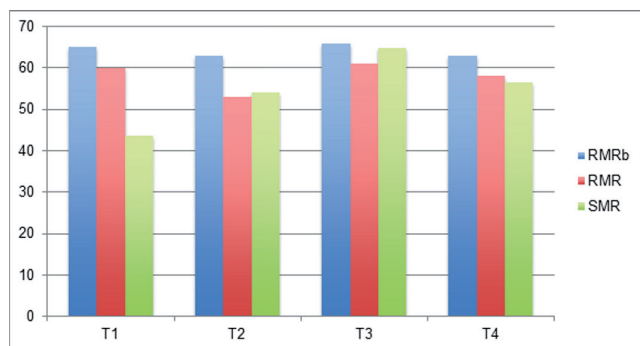
### 3.4 Comparação de resultados entre o SMR e o RMR

Observando o gráfico da figura 32 nota-se que  $RMR_b$ , em todos os taludes analisados, possui um valor maior do que o RMR e o SMR, todos classificados como bom.

Já o RMR e o SMR, na maioria dos taludes analisados, não mostraram grande divergência de valores, sendo todos eles classificados como Razoável,

porém no caso do talude 1 temos uma diferença de quase uma classe de maciço, pois o valor do SMR é próximo do considerado como ruim.

Isso nos mostra que, mesmo o maciço sendo considerado de boa qualidade, a presença de descontinuidades desfavoráveis pode fazer o talude ser classificado abaixo do esperado, mostrando como a orientação das juntas imperam sobre na classificação do talude segundo a metodologia RMR e SMR.



**Figura 32** - Comparação entre os valores do RMRb, RMR e SMR.

#### 4 CONCLUSÕES

Baseando-se nas informações coletadas na mina de Santaluz, Cava C1, foi realizada a classificação do maciço e a análise cinemática para assim realizar a comparação entre o RMR e o SMR.

Na classificação do maciço da mina tentou-se comparar as metodologias adotadas (Q, RMR e SMR), notando-se uma clara diferença entre a classificação segundo a litologia, sendo o xisto-carbonoso a mais problemática.

Obtenção dos fatores do SMR sugerida por Tomás et al. (2012) se mostrou rápida e de fácil execução, facilitando a aquisição dos valores dos fatores.

O sistema SMR e RMR possuem resultados similares classificando a maioria dos taludes como razoáveis, sendo, somente o talude 1, classificado como razoável pela RMR, está no limiar de razoável - ruim na classificação SMR.

Através das análises realizadas nota se que os valores do RMR são mais otimistas que os apresentados pelo sistema Q, entretanto o RMR<sub>b</sub> apresentou resultados divergentes da realidade do maciço, deixando claro que se tratando de taludes, considerar a orientação das discontinuidades é de extrema importância.

Em relação ao sistema Q e RMR, as regiões do maciço mais integras possuem resultados semelhantes, como observado no metadiorito da SL02, porém onde a rocha está mais fraturada o sistema Q apresenta resultados consideravelmente mais baixos, como observado no xisto-carbonoso da SL06.

Isso ocorre um vez que a classificação RMR prioriza à qualidade da rocha, enquanto o sistema

Q considera mais importante o número de famílias de discontinuidades e as suas condições. Dessa forma se um trecho apresentar diversas famílias de discontinuidades mas bem espaçadas, o sistema Q, em relação ao RMR, obterá valores mais baixos.

#### REFERÊNCIAS

- Barton N., Lien R., Lunde J. 1974. Engineering Classification of Rock Masses for Design of Tunnel Support. *Rock Mechanics*, 6: 189-236
- Bieniawski Z.T. 1973. Engineering classification of jointed rock masses. *Trans. S. Afric. Inst. Civil Eng.*, 15: 335-344.
- Bieniawski Z.T. 1976. Rock mass classifications in rock engineering. In: *South African Institution of Civil Engineers, Symposium on Exploration for Rock Engineering, Proceedings*, p.: 97-106.
- Bieniawski Z.T. 1989. *Engineering Rock Mass Classifications*. John Wiley & Sons, 251 p.
- Bieniawski Z.T. 1993. Classification of Rock Masses for Engineering: The RMR System and Future Trends. In: *Comprehensive Rock Engineering: Principles, Practice & Projects*, Editor: John A. Hudson. Imperial College of Science, Technology & Medicine, London, UK, vol 3, cap 22, p.: 553-573.
- Deere D.U. & Deere D.W. 1988. The Rock Quality Designation (RQD) Index in Practice. In: *ASTM, Symp. Rock Classification for Engineering Purposes*, ASTM Special Technical Publication 984, p.: 91-101.
- Gonzalez de Vallejo L.I. 1983. A new rock classification system for underground assessment using surface data. In: *LNEC, International Symposium On Engineering Geology And Underground Construction, Proceedings*, LNEC, Lisbon, p.: 85-94.
- ISRM - International Society for Rock Mechanics. 1981. Basic geotechnical description of rock masses. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 18:85-110.
- Irigaray C., Fernández T., Chacón, J. 2003. Preliminary rock-slope-susceptibility assessment



- using GIS and the SMR classification. *Natural Hazards*, 30:309-324.
- Laubscher D.H. 1977. Geomechanics classification of jointed rock masses - minning applications. *Trans. Min. Metall.*, 86: A1-8.
- Lauffer H. 1958. Gebirgsklassifizierung für den stollenbau. *Geol. Bauwesen*, 24:46-51.
- Priest S.D. 1993. *Discontinuity analysis for rock engineering*. Chapman&Hall, London, 467p.
- Robertson A.M. 1988. Estimating weak rock strength. In: AIME - SME, Annual Meeting, Phoenix AZ, p.:1-5.
- Romana M. 1985. New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes. In: ISRM, Int. Symp. on the role of rock mechanics in Excavations for mining and civil works, Proceedings, Mexico City, p.: 49-53.
- Rabcewicz L.V. 1964. The New Austrian Tunneling Method, Part one, *Water Power*, November 1964, 453-457, Part two, *Water Power*, December 1964, 511-515.
- Romana M. 1993. A geomechanical classification for slopes: slope mass rating. In: *Comprehensive Rock Engineering: Principles, Practice & Projects*, John A. Hudson (Ed.). Imperial College of Science, Technology & Medicine, London, UK, vol 3, cap 23, p.: 553-573.
- Serafim J.L., Pereira J.P. 1983. Consideration of the geomechanics classification of Bienieawski. In: *Proc. Int. Symp. International Symposium On Engineering Geology And Underground Construction*. Lisbon, v. 1, pp. II 33- II-42, LNEC, Lisbon.
- Serra Junior, E., Ojima L.M. 1998. Caracterização e classificação de maciços rochosos. In: A.M.S. Oliveira & S.N.A. Brito (eds) *Geologia de Engenharia*. ABGE, p.:211-226.
- Singh B. & Goel. R.K. 1999. *Rock Mass Classification: A Practical Approach in Civil Engineering*. Elsevier Science Ltd. Kidlington, Oxford, UK. ISBN 9780080430133.
- Terzaghi K. 1946. Rock Defects and loads on tunnel supports. In: *Rock tunneling with stell supports* (eds. R.V. Proctor & T. White, Commercial Shearing Co. Youngstown, p.: 17-99.
- Tomás R., Cuenca A., Cano M., García-Barba J. 2012. A graphical approach for slope mass rating (SMR). *Engineering Geology*, 124:67-76.
- Wickham G. E., Tiedermann H. R., Skinner E.W. 1972. Support determination based on geologic predictions. In: AIME, Conf. Rapid Excavation and Tunneling, Proceedings, New York, p.: 43-64.



# INCIDÊNCIA DE ÁREAS SUSCETÍVEIS A MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA E INUNDAÇÕES EM MUNICÍPIOS ABRANGIDOS PELO PLANO NACIONAL DE GESTÃO DE RISCOS E RESPOSTA A DESASTRES NATURAIS

THE INCIDENCE OF SUSCEPTIBLE AREAS TO GRAVITATIONAL MASS MOVEMENTS AND FLOODS IN MUNICIPALITIES COVERED BY THE NATIONAL PLAN FOR RISK MANAGEMENT AND RESPONSE TO NATURAL DISASTERS

SANDRA FERNANDES DA SILVA

*Serviço Geológico do Brasil (CPRM), Belo Horizonte, MG, Brasil*

*E-mail: sandra.silva@cprm.gov.br*

OMAR YAZBEK BITAR

*Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT e*

*Pesquisador DT2 do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq*

*E-mail: omar@ipt.br*

## RESUMO ABSTRACT

Este artigo sintetiza resultados dos trabalhos de mapeamento de áreas suscetíveis executados no âmbito do Plano Nacional de Gestão de Riscos e Resposta a Desastres Naturais, lançado em agosto de 2012, em atendimento a diretrizes da Política Nacional de Proteção e Defesa Civil, editada pela Lei Federal 12.608/2012. O objetivo geral é estabelecer as bases tecnológicas para desenvolvimento contínuo de um modelo de produção de cartas de suscetibilidade a processos que podem gerar desastres naturais, visando subsidiar o planejamento territorial e a prevenção de desastres. Desenvolveram-se métodos apropriados para o mapeamento de suscetibilidades a deslizamento, inundação, corrida de massa e enxurrada. Os métodos se fundamentam na análise de dados disponíveis e verificação de campo. A aplicação dos métodos resultou na composição de cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações. Inicialmente aplicados em municípios das regiões Sul e Sudeste, os métodos desenvolvidos foram posteriormente utilizados também nas regiões Nordeste, Centro-Oeste e Norte, cujos resultados são comparados e discutidos de forma breve. Os resultados gerais obtidos se referem a mapeamentos realizados entre 2012 e abril de 2015 em 279 municípios, distribuídos em vinte estados. Enfatizam-se os

This article summarizes results of susceptible areas mapping under the National Plan for Risk Management and Disaster Response, launched in August 2012, in compliance with the guidelines of the National Policy on Protection and Civil Defense, issued by Federal Law 12,608 / 2012. The overall objective is to establish the technological basis for continued development of a production model of susceptibility maps to processes that can generate natural disasters, in order to support the territorial planning and disaster prevention. Suitable methods have been developed for mapping susceptibility to landslide, flood, debris flow and a sudden flood. The methods are based on analysis of available data and field verification. The application of the methods resulted in the composition of susceptibility maps to gravitational mass movements and floods. Initially applied in municipalities in the South and Southeast, the methods developed were later also used in the Northeast, Midwest and North, whose results are compared and discussed briefly. The overall results obtained refer to mappings carried out between 2012 and April 2015 in 279 municipalities, distributed in twenty states. Emphasis is developed basic procedures and results. In general, the application of the methods developed show good results in different regions.

procedimentos básicos desenvolvidos e os resultados obtidos. De uma maneira geral, a aplicação dos métodos desenvolvidos mostra bons resultados nas distintas regiões. Algumas dificuldades específicas foram encontradas em relação às aplicações em municípios da região Norte, particularmente em razão da ausência de dados básicos compatíveis com a escala de trabalho e dos tipos de modelos digitais de elevação empregados. Salienta-se, no presente artigo, a incidência das distintas classes de suscetibilidade (alta, média e baixa), consideradas em relação a deslizamentos, inundações, corridas de massa e enxurradas. No caso de corridas de massa e enxurradas, a incidência é destacada em relação às bacias de drenagem com alta suscetibilidade a esses dois processos.

**Palavras-chave:** suscetibilidade; carta de suscetibilidade; prevenção de desastres naturais; planejamento territorial.

## 1 INTRODUÇÃO

O mapeamento de áreas suscetíveis a processos geodinâmicos que podem gerar desastres naturais no País atende diretrizes da Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC), conforme estabelecidas pela Lei Federal 12.608/2012 (Brasil 2012). Entre outros aspectos relacionados ao tema, a PNPDEC objetiva a identificação e avaliação das suscetibilidades, para evitar ou reduzir a ocorrência de desastres, incluindo as ações de mapeamento, bem como sua integração às demais políticas setoriais, como as de ordenamento territorial, desenvolvimento urbano e meio ambiente. A Lei determina, ainda, a criação de um cadastro nacional de municípios com áreas suscetíveis a deslizamentos de grande impacto, inundações bruscas ou processos geológicos ou hidrológicos correlatos.

Por sua vez, o Plano Nacional de Gestão de Riscos e Resposta a Desastres Naturais - PNGRRDN (Brasil 2013), divulgado em agosto de 2012 no sentido de atender diretrizes para a implementação da PNPDEC, contemplando 821 municípios do cadastro nacional criado pela PNPDEC, prevê a elaboração de cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações em 286 desses municípios, sob a coordenação do Serviço Geológico do Brasil (CPRM). Os 286 municípios foram selecionados em âmbito

Some specific difficulties were encountered in relation to applications in municipalities in the northern region, particularly due to the lack of basic data compatible with the geographic scale and types of digital elevation models employed. It is noted the incidence of the different susceptibility classes (high, medium and low), considered in relation to landslides, floods, debris flows and sudden floods. In the case of debris flows and sudden floods, the incidence is highlighted in relation to drainage areas with high susceptibility to these two processes.

**Keywords:** susceptibility; susceptibility map; prevention of natural disasters; territorial planning.

governamental, com participação de diferentes órgãos setoriais, em razão do histórico de eventos associados a desastres e de outros fatores relacionados com tendências de expansão urbana e de crescimento populacional. Dessa forma, a CPRM iniciou os trabalhos de mapeamento de áreas suscetíveis e elaboração de cartas de suscetibilidade desses 286 municípios ainda em 2012.

Até abril de 2015, os trabalhos de mapeamento e elaboração de cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações contemplaram 279 municípios, distribuídos em vinte estados. Parte dos resultados obtidos com a execução dos mapeamentos é apresentada e discutida no presente artigo.

Para o desenvolvimento de métodos apropriados à elaboração das cartas de suscetibilidade demandadas, na escala geográfica de referência (1:25.000), a CPRM estabeleceu parceria com o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), visando mapear inicialmente municípios situados nas regiões Sul e Sudeste do País. Os métodos desenvolvidos foram posteriormente utilizados pela CPRM também nas regiões Nordeste, Centro-Oeste e Norte. As premissas básicas adotadas para o desenvolvimento dos métodos e elaboração das cartas compreenderam os seguintes aspectos: aplicabilidade nacional, com as adaptações necessárias a cada região; comparabilidade entre os municípios mapeados, com certa

padronização dos produtos cartográficos gerados; e objetividade no atendimento às diretrizes da PNPDEC e às ações do PNGRRDN, disponibilizando quanto antes os resultados aos municípios, de modo a subsidiar as ações de prevenção de desastres e de planejamento territorial.

## 2 OBJETIVOS

O objetivo geral do mapeamento realizado é o de estabelecer as bases tecnológicas para o desenvolvimento contínuo de um modelo de produção de cartas de suscetibilidade a processos que podem gerar desastres naturais, de modo a subsidiar o planejamento territorial e a prevenção de desastres naturais.

Em termos específicos, busca-se efetuar a análise, classificação e zoneamento das suscetibilidades a movimentos gravitacionais de massa e inundações, especialmente em áreas não ocupadas, gerando dados e produtos em Sistema de Informação Geográfica (SIG) e cartas sínteses em linguagem acessível. Destaca-se, neste artigo, o panorama sobre a incidência de áreas suscetíveis a deslizamentos, inundações, corridas de massa e enxurradas, nos municípios considerados, em relação à área municipal e à área urbanizada.

## 3 MÉTODOS E PROCEDIMENTOS

A acepção do termo *suscetibilidade* adotada para fins de mapeamento relaciona-se à predisposição ou propensão dos terrenos à geração e desenvolvimento de um fenômeno ou processo do meio físico numa dada área (Fell et al. 2008, Julião et al. 2009, Sobreira & Souza 2012, Diniz 2012, Coutinho 2013, Bressani & Costa 2013, Ministério das Cidades 2013).

Para o desenvolvimento dos métodos e execução do mapeamento, utilizaram-se diversos outros trabalhos de referência, como o guia para zoneamento de suscetibilidade, perigo e risco a deslizamentos (Fell et al. 2008), elaborado pelo Comitê Técnico de Deslizamentos e Taludes Construídos (*Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes-JTC-1*). Esse Comitê é formado por profissionais e pesquisadores da *International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE)*, *International Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG)* e *International*

*Society for Rock Mechanics (ISRM)* e o guia foi traduzido para o português pela Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental (ABGE) e Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (ABMS), conforme Macedo & Bressani (2013). De acordo com o guia, o mapeamento de suscetibilidade não deve ser confundido com o de perigo e tampouco com o de risco, os quais são objeto de outros tipos de estudos, estes realizados em escalas geográficas de detalhe.

Os procedimentos gerais desenvolvidos para o mapeamento de áreas suscetíveis estão ilustrados na figura 1. Outros dados e informações sobre os métodos empregados no mapeamento podem ser encontrados em Bitar (2014) e Bitar & Silva (2015). Para análise da suscetibilidade, integram-se, em especial, dados referentes a fatores predisponentes de natureza geológica, geomorfológica, pedológica e hidrológica, resultando em uma classificação relativa dos terrenos em termos de suscetibilidade (alta, média e baixa) e zoneamento territorial segundo domínios homogêneos, representando a maior ou menor propensão ao processo analisado. Os distintos zoneamentos obtidos são integrados para a edição de uma carta síntese de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações de cada município, conforme ilustrado na figura 2. Outros elementos de interesse, como feições associadas a processos do meio físico, são também incluídos na carta síntese.

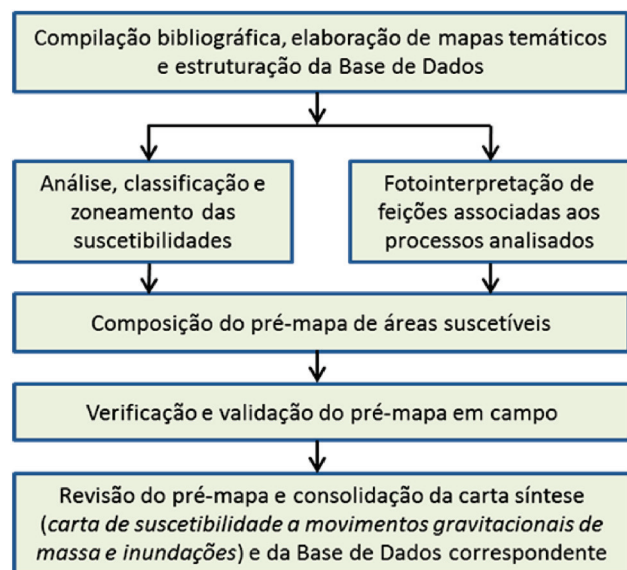
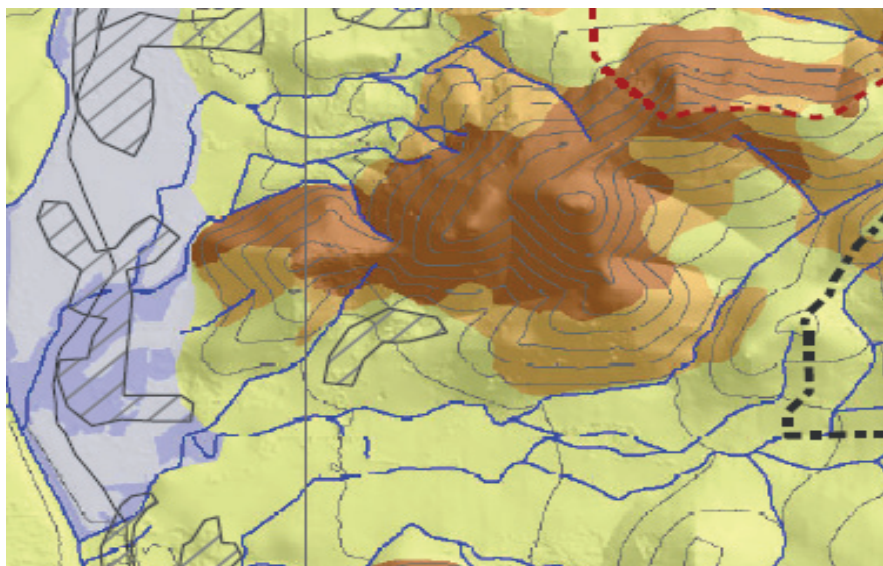


Figura 1 - Procedimentos gerais. Fonte: Bitar (2014).



**Figura 2** - Trecho de uma carta de suscetibilidade, distinguindo-se: áreas suscetíveis a deslizamentos (tons em marrom), inundações (tons em azul), corridas de massa e enxurradas (linha preta tracejada), enxurradas (linha vermelha tracejada) e áreas urbanizadas (polígonos com hachuras). Fonte: IPT.

Para a análise, classificação e zoneamento da suscetibilidade a deslizamentos, os trabalhos se fundamentam em métodos estatísticos, conforme discutido em Stabile et al. (2013), a partir de estudos em áreas piloto representativas das características geológico-geomorfológicas regionais, efetuados por meio da extração e análise de cicatrizes detectadas em imagens de eventos pré-territos relevantes, em áreas preferencialmente não ocupadas e frequentemente com cobertura vegetal. Integraram-se, em especial, dados referentes a fatores predisponentes de natureza geomorfológica (declividade), geológica (densidade de lineamentos estruturais, compreendendo fraturas, juntas, zonas de falhas e outras discontinuidades) e hidrológico-pedológica (curvatura de encosta). O resultado obtido compreende uma classificação relativa em termos de suscetibilidade (classes: baixa, média e alta) e a representação do zoneamento correspondente segundo domínios homogêneos, conforme a maior ou menor propensão à geração e desenvolvimento do processo analisado.

No caso de inundação e alagamento, fenômenos marcados respectivamente pela elevação gradual do nível d'água de rios e córregos e pela acumulação de água em razão de deficiências e/ou insuficiências no sistema de drenagem dos terrenos, os fatores considerados se subdividem

em regionais e locais. Regionalmente, analisam-se parâmetros das bacias de drenagem contribuintes, segundo modelos de análise morfométrica usualmente empregados em estudos de bacias hidrográficas. Localmente, enfatiza-se a delimitação de áreas suscetíveis por meio de modelo específico de análise, denominado HAND (*Height Above Nearest Drainage*, conforme Rennó et al. 2008), que considera a morfologia do terreno e sua posição em relação ao curso d'água. O resultado final para inundação é dado pela análise combinada dos resultados parciais das análises regional e local, cujo zoneamento de suscetibilidade (classes: baixa, média e alta) é recortado em relação ao padrão de relevo definido pelo conjunto de planícies atuais (aluviais e/ou costeiras, conforme o caso) e terraços antigos (aluviais ou marinhos, conforme o caso), no contexto do território municipal mapeado. Tem-se em conta, ainda, no caso de municípios litorâneos, para fins de definição de alturas de inundação associadas a cada classe de suscetibilidade, possíveis influências no nível de oscilação das marés.

No caso de corrida de massa e enxurrada, conforme explicitado em Corsi et al. (2015), adotaram-se, principalmente, com base em literatura técnica específica e retroanálises de casos históricos no País, parâmetros morfométricos da bacia

de drenagem (amplitude topográfica e área), padrão de relevo predominante (serras e/ou morros) e presença de zonas enquadradas na classe de alta suscetibilidade a deslizamento, conforme previamente mapeadas, para fins de delimitação das bacias de drenagem mais suscetíveis à geração desses fenômenos. Para esses dois processos, apontam-se as bacias de drenagem na classe de alta suscetibilidade, separadas em duas situações básicas: bacia de drenagem com alta suscetibilidade a corrida de massa e enxurrada; e bacia de drenagem com alta suscetibilidade a enxurrada, fundamentando-se no pressuposto de que onde tende a ocorrer corrida de massa pode também ocorrer enxurrada, mas o inverso não encontra correspondência nos casos históricos levantados.

Na carta de suscetibilidade elaborada se distinguem a ocorrência e distribuição dos polígonos referentes aos diferentes graus ou classes de suscetibilidade (baixa, média e alta) aos processos de deslizamento e de inundação/alagamento. No caso de corrida de massa e enxurrada, apontam-se apenas as bacias de drenagem consideradas como de alta suscetibilidade à geração e desenvolvimento desses dois tipos de processos. Entre vários insumos utilizados, os modelos digitais de elevação empregados na análise dos processos são geralmente aqueles disponíveis, podendo, em algumas situações específicas, ser construídos em prol de uma maior qualidade nos resultados.

Os zoneamentos contidos na versão preliminar da carta de suscetibilidade gerada (informalmente denominada de pré-mapa) são, enfim, conferidos por meio de trabalhos de verificação e validação de campo. Para os trabalhos de campo, a utilização de mapas temáticos previamente disponíveis (como o de geologia, ainda que simplificado) ou construídos especialmente no âmbito do mapeamento (como os de hipsometria, declividade, padrões de relevo, relevo sombreado e outros), mostra-se essencial no sentido de auxiliar na identificação da presença e da tipologia dos fatores condicionantes relativos aos processos considerados nas análises de suscetibilidade

e sua correspondência com os zoneamentos obtidos. Outros elementos mapeados à parte também são utilizados na verificação de campo, como as feições associadas a processos do meio físico, incluindo cicatriz de deslizamento, depósito de talus em pé de encosta, campo de blocos rochosos, paredão/lajeado/costão rochoso e área alagada, entre outras extraídas previamente por meio de trabalhos de fotointerpretação.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Sintetizam-se, a seguir, os resultados obtidos em relação a municípios mapeados no âmbito do PNGRRDN até abril de 2015. Os trabalhos de mapeamento e elaboração de cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações contemplaram, até essa data, 279 municípios, distribuídos em vinte estados (figura 3). A relação dos municípios mapeados encontra-se na tabela 1, de acordo com a Unidade da Federação (UF). As cartas estão disponíveis para acesso em sua íntegra no site da CPRM ([www.cprm.gov.br](http://www.cprm.gov.br)).

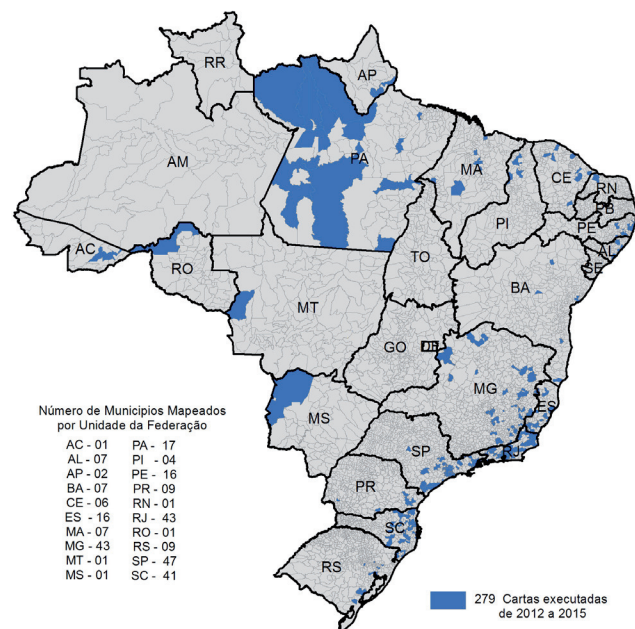


Figura 3 - Municípios mapeados no território nacional, até abril de 2015.

**Tabela 1** - Relação de municípios mapeados até abril de 2015, de acordo com a Unidade da Federação (UF) correspondente.

UF	Município
AC	Rio Branco
AL	Branquinha, Coruripe, Maceió, Marechal Deodoro, Murici, Paripueira e União dos Palmares
AP	Macapá e Santana
BA	Candeias, Camacan, Lajedinho, Lauro de Freitas, Nova Viçosa, Salvador e Senhor do Bonfim
CE	Amontada, Caucaia, Jaguaruana, Lavras da Mangabeira, Morada Nova e Sobral
ES	Água Doce do Norte, Alegre, Aracruz, Bom Jesus do Norte, Cachoeiro de Itapemirim, Cariacica, Guaçuí, Laranja da Terra, Marechal Floriano, Mimoso do Sul, Nova Venécia, Rio Novo do Sul, Santa Leopoldina, Vargem Alta, Vila Velha e Vitória
MA	Bacabal, Grajaú, Imperatriz, Pedreiras, São Luís, Trizidela do Vale e Vitória do Mearim
MG	Além Paraíba, Barbacena, Belo Horizonte, Betim, Caraiá, Carangola, Caratinga, Cataguases, Chalé, Chapada do Norte, Congonhas, Conselheiro Lafaiete, Contagem, Diogo de Vasconcelos, Ervália, Ewbank da Câmara, Frei Inocência, Governador Valadares, Ibirité, Januária, Juiz de Fora, João Monlevade, Lajinha, Lagoa Grande, Manhuaçu, Manhumirim, Mantena, Matias Barbosa, Montes Claros, Muriaé, Mutum, Nova Lima, Novo Cruzeiro, Ouro Preto, Periquito, Pirapora, Sabará, Sabinópolis, Santa Luzia, Teófilo Otoni, Timóteo, Unai e Visconde do Rio Branco
MT	Comodoro
MS	Corumbá
PA	Alenquer, Almeirim, Altamira, Baião, Belém, Gurupá, Itaituba, Marabá, Monte Alegre, Óbidos, Oriximiná, Prainha, Porto de Moz, Rurópolis, Santana do Araguaia, Santarém e São João do Araguaia
PE	Abreu e Lima, Água Preta, Barra de Guabiraba, Cabo de Santo Agostinho, Catende, Camaragibe, Caruaru, Escada, Ipojuca, Jaboatão dos Guararapes, Olinda, Quipapá, Palmares, Paulista, Recife e Vitória de Santo Antão
PI	Barras, Campo Maior, Esperantina e Teresina
PR	Almirante Tamandaré, Capitão Leônidas Marques, Curitiba, Fazenda Rio Grande, Morretes, Pinhais, Rio Branco do Sul, São José dos Pinhais e União da Vitória
RJ	Angra dos Reis, Aperibé, Areal, Barra Mansa, Barra do Piraí, Belford Roxo, Bom Jardim, Bom Jesus do Itabapoana, Cachoeiras de Macacu, Campos dos Goytacazes, Cardoso Moreira, Duque de Caxias, Engenheiro Paulo de Frontin, Guapimirim, Itaboraí, Itaperuna, Laje do Muriaé, Macaé, Mangaratiba, Magé, Mendes, Mesquita, Miracema, Nilópolis, Niterói, Nova Friburgo, Nova Iguaçu, Paracambi, Parati, Petrópolis, Piraí, Porciúncula, Rio Bonito, Santa Maria Madalena, Santo Antônio de Pádua, São Francisco de Itabapoana, São Gonçalo, São João de Meriti, São José do Vale do Rio Preto, Sapucaia, Sumidouro, Teresópolis e Valença
RN	Mossoró
RO	Porto Velho
RS	Alto Feliz, Capão do Leão, Dom Pedrito, Eldorado do Sul, Estrela, Igrejinha, Novo Hamburgo, Porto Alegre e São Lourenço do Sul
SC	Alfredo Wagner, Antonio Carlos, Anitápolis, Araranguá, Balneário Camboriú, Blumenau, Botuverá, Brusque, Camboriú, Corupá, Criciúma, Florianópolis, Gaspar, Garuva, Itajaí, Itapema, Ituporanga, Ilhota, Jacinto Machado, Jaraguá do Sul, Joinville, José Boiteux, Lages, Luiz Alves, Mafra, Navegantes, Nova Trento, Nova Veneza, Palhoça, Ponte Alta, Presidente Getúlio, Rio Fortuna, Rio do Campo, Rio Negrinho, Rodeio, São José, Taió, Timbó, Timbé do Sul, Urubici e Vidal Ramos
SP	Bauru, Cajati, Caieiras, Campinas, Carapicuíba, Campo Limpo Paulista, Campos do Jordão, Cubatão, Cunha, Diadema, Eldorado, Embu-Guaçu, Francisco Morato, Guararema, Guaratinguetá, Guarujá, Guarulhos, Iguape, Ilhabela, Itapeverica da Serra, Itapetininga, Itapevi, Itaquaquecetuba, Itu, Jacupiranga, Jundiá, Mauá, Mairiporã, Osasco, Pariquera-Açu, Peruíbe, Praia Grande, Registro, Ribeirão Pires, Rio Grande da Serra, Santana de Parnaíba, Santo André, Santos, São Bernardo do Campo, São José dos Campos, São Luís do Paraitinga, São Paulo, São Vicente, Sorocaba, Sumaré, Taboão da Serra e Ubatuba

**Obs.:** dados referentes aos 279 municípios mapeados entre 2012 e abril/2015. Fonte: CPRM.



De uma maneira geral, observa-se que os métodos desenvolvidos para o mapeamento de suscetibilidades apresentam boa aplicabilidade nacional, propiciando a obtenção de resultados compatíveis com as realidades verificadas em campo. Para as regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste e Nordeste do País, os zoneamentos de suscetibilidade a deslizamento, inundação/alagamento, corrida de massa e enxurrada apresentam conformidade variável entre 90 e 95% quando comparados às situações constatadas em campo. Dessa forma, pequenos ajustes mostram-se sempre necessários para o aprimoramento dos resultados, sempre com apoio de atividades de campo, sobretudo em áreas nas quais se reconhecem características geológicas e geomorfológicas peculiares e diretamente associadas aos fenômenos estudados.

No que se refere às aplicações efetuadas na região Norte, a principal dificuldade no emprego dos métodos desenvolvidos deve-se à ausência de dados e informações básicas, em escala geográfica compatível com a escala de trabalho, para alimentação dos modelos de análise que fornecem o pré-mapa utilizado nas etapas de verificação e validação de campo. Essas dificuldades acabaram ensejando a realização de algumas adaptações e complementações na aplicação dos métodos, variáveis de acordo com a região e o processo específico analisado.

Para o mapeamento das áreas suscetíveis a deslizamento, verifica-se que o método de análise utilizado encontra algumas limitações em sua aplicação a locais com densa cobertura vegetal, conforme se observa, por exemplo, em vários municípios do Estado do Amazonas. Essa condição, presente também em boa parte da região Norte, tende a mascarar as características morfológicas dos terrenos e os principais fatores condicionantes a obter, como declividade, densidade de lineamentos estruturais e curvatura de encosta, informações estas que sustentam a base da modelagem estatística adotada para o mapeamento da suscetibilidade a deslizamento (e cujo produto é fundamental também para a delimitação de bacias suscetíveis a corrida de massa e enxurrada).

A aplicação do método, com as informações atualmente disponíveis para esta região, como os Modelos Digitais de Elevação (MDEs) de baixa resolução, os quais se configuram, de fato, em

Modelos Digitais de Superfície (MDSs), resulta na obtenção de um produto com muitas incertezas. Esse aspecto não inviabiliza a aplicação do método, porém, devido a essas incertezas, expressas geralmente nos resultados da modelagem em termos do zoneamento apresentado no pré-mapa, o processo de validação torna-se muito mais trabalhoso, assim como as etapas necessárias para a correção do modelo digital gerado. Somam-se a isso as dificuldades de acesso aos terrenos da região que devem ser verificados durante os trabalhos de campo, estes imprescindíveis para complementação de dados e validação do zoneamento obtido em pré-mapa.

No caso de inundação/alagamento, o processo de análise segue o mesmo comportamento observado no mapeamento das áreas suscetíveis a deslizamento. Ocorrem limitações de aplicação especialmente na região Norte, devido à ausência de informações básicas compatíveis com a escala de trabalho, bem como de Modelos Digitais de Terrenos (MDTs) em escala de detalhe e resolução maior. Os produtos elaborados a partir de informações derivadas de sensores óticos apontam, com frequência, incorreções relativas à falsa representação da morfologia dos terrenos em áreas de planícies e terraços fluviais.

Outro aspecto limitante na aplicação do método para obtenção da suscetibilidade a inundação na região Norte é o regime hidrológico, com características muito diferenciadas do restante do País, sobretudo em municípios situados nas áreas mais baixas da bacia hidrográfica do rio Amazonas, próximos à calha principal de drenagem. Para essa condição específica, ante a realização de testes diversos, verificou-se que a obtenção da suscetibilidade com utilização apenas do modelo HAND mostra um resultado mais coerente, validado pelas informações sobre alturas de inundações locais, recuperadas de registros históricos (marcações em réguas linimétricas e/ou informações reportadas por moradores). Cabe salientar que, por vezes, nas distintas regiões do País, em razão dos métodos adotados e uso do modelo HAND, o resultado obtido pode refletir muito mais o fenômeno do alagamento do que a inundação gradual propriamente dita.

Portanto, para obtenção de um produto mais adequado às características da região Norte, tanto

em relação aos métodos para deslizamento quanto para inundação/alagamento, faz-se necessário obter, como informação de base na modelagem estatística, MDEs que possam representar com maior exatidão a variação das condições morfológicas e topográficas dos terrenos. Isso se espera conseguir com a disponibilização de MDTs, elaborados preferencialmente a partir de levantamentos aéreos efetuados com o emprego de Radar/Banda P, os quais propiciam a aquisição de imagens por meio de dispositivos mais eficientes quanto à penetração da massa vegetal e reflexão a partir da superfície real do terreno. Por outro lado, vale salientar os bons resultados obtidos na região Nordeste, mesmo com a utilização de MDSs, favorecidos, nesse aspecto, pela presença de cobertura vegetal frequentemente com baixa densidade ou mesmo ausente em extensas áreas nos municípios mapeados.

Os resultados obtidos acerca da incidência de áreas suscetíveis a movimentos gravitacionais de massa e inundações referem-se às classes de suscetibilidade (alta, média e baixa) existentes na área municipal e na área municipal urbanizada. Salienta-se, que para o caso dos municípios da Região Amazônica, em função de suas grandes extensões territoriais e escassez de vias de acesso, os levantamentos de campo ocorreram nas áreas municipais urbanizadas e em *buffers* com variação entre 15 e 40 km, definidos a partir dos limites municipais. Não se incluem nessa situação os municípios de Belém e São João do Araguaia, os quais tiveram levantamento de informação de suscetibilidades elaborado para suas extensões municipais completas. As variações dos *buffers* foram determinadas em função de informações como: taxa de crescimento baseada em informações do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE – [www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br)), envolvendo população, infraestrutura, importância para o estado, e outros aspectos; ocorrência de áreas restritivas, como unidades de conservação da natureza; e a própria extensão territorial da área urbana.

Em relação a corridas de massa e enxurradas, devido às condições de baixas amplitudes topográficas registradas nos municípios inicialmente selecionados na região Norte, que não atendem as condições básicas necessárias para geração desses processos, não foi possível aferir a aplicabilidade do método para este fim. Deve-se, contudo, para todas as regiões, observar o cuidado necessário em relação a eventuais verificações e validações baseadas apenas em eventos recém-ocorridos, os quais devem ser muito bem caracterizados por meio de vistorias especializadas e detalhadas em campo, pois se pode, muitas vezes, confundir alguns aspectos e indicadores comumente relacionados ao fenômeno da enxurrada com outros mais tipicamente associados a uma verdadeira corrida de massa.

Dentre o conjunto de produtos e resultados obtidos a partir da elaboração das cartas de suscetibilidade municipais, ressalta-se a incidência de áreas suscetíveis a deslizamentos, inundações, corridas de massa e enxurradas, em relação à área municipal (urbanizada e rural) e à área municipal urbanizada. No caso de corridas de massa e enxurradas, a incidência é destacada em relação às bacias de drenagem suscetíveis aos dois processos.

Diversas análises podem ser efetuadas com base nos dados dos primeiros 279 municípios mapeados. Tendo em vista, por exemplo, a incidência territorial de média e alta suscetibilidade a deslizamentos e os valores percentuais correspondentes, nota-se que o estado do RJ apresenta maior média em relação à área municipal (64,31% do território situado em áreas de média e alta suscetibilidade a deslizamentos), ante a média geral em todos os estados (19,28%). Quanto à área urbanizada, MG se destaca (38,33% do território urbanizado situado em áreas de média e alta suscetibilidade a deslizamentos) ante a média geral em todos os estados (10,15%) (tabela 2).

**Tabela 2** - Incidência de classes de suscetibilidade a deslizamentos, segundo a abrangência territorial e a Unidade da Federação (UF) correspondente.

Abrangência	UF	Classe de suscetibilidade a deslizamentos					
		Alta		Média		Baixa	
		km <sup>2</sup> média	% média	km <sup>2</sup> média	% média	km <sup>2</sup> média	% média
<b>Área Municipal</b>	AC	0,00	0,00	205,74	11,99	1.509,53	88,00
	AL	48,30	13,39	4,92	1,04	355,52	85,58
	AP	0,00	0,00	1,57	0,10	743,75	86,34
	BA	37,75	5,88	62,74	12,58	551,00	81,55
	CE	28,27	1,83	30,71	2,04	1.460,98	96,13
	ES	137,40	23,71	130,87	18,95	348,93	57,34
	MA	12,41	0,25	309,10	12,10	1.669,97	87,65
	MG	254,55	29,80	192,04	27,75	613,87	42,45
	MT	14,49	1,03	51,96	3,69	1.340,93	95,27
	MS	75,93	3,03	215,28	8,60	2.210,68	88,36
	PA	16,68	0,84	121,41	4,95	1.870,59	88,52
	PE	44,38	14,44	29,33	10,67	225,51	74,89
	PI	19,65	1,30	10,77	0,79	1.396,15	97,91
	PR	93,70	12,71	29,65	4,80	318,59	82,89
	RJ	135,35	24,81	191,93	39,50	170,65	35,57
	RN	0,00	0,00	2,45	0,12	2.096,99	99,88
	RO	0,00	0,00	3,32	0,10	3.005,44	93,21
	RS	17,08	12,24	16,00	7,19	253,63	80,07
	SC	112,46	31,94	34,66	7,84	272,10	80,57
	SP	76,18	15,39	80,55	18,24	299,96	66,37
Total		56,23	9,63	86,25	9,65	1.035,74	80,43
<b>Área Municipal Urbanizada</b>	AC	0,00	0,00	7,73	13,71	48,64	86,29
	AL	3,59	5,88	1,27	1,93	11,52	92,19
	AP	0,00	0,00	0,00	0,00	44,86	99,94
	BA	1,11	1,21	6,25	9,77	30,31	88,33
	CE	0,00	0,00	0,00	0,00	17,22	100,00
	ES	0,31	3,02	1,23	7,36	17,40	78,64
	MA	0,59	14,25	29,85	19,13	11,27	66,62
	MG	1,83	13,65	3,75	24,68	21,20	61,67
	MT	0,00	0,00	0,00	0,00	5,75	100,00
	MS	0,37	1,23	2,32	7,74	27,28	91,02
	PA	0,04	0,69	0,11	1,41	20,81	86,19
	PE	0,86	2,38	4,43	5,08	30,17	92,53
	PI	0,00	0,00	0,04	0,02	47,56	99,98
	PR	0,54	0,17	11,96	13,38	54,31	75,85
	RJ	0,57	3,43	4,66	26,21	20,85	77,24
	RN	0,00	0,00	0,00	0,00	47,08	100,00
	RO	0,00	0,00	0,00	0,00	90,36	100,00
	RS	0,24	2,10	2,83	2,01	36,50	95,89
	SC	1,59	5,84	1,04	5,11	28,00	88,00
	SP	0,85	2,33	4,06	9,30	61,04	88,37
Total		0,62	2,81	4,08	7,34	33,61	88,44

Obs.: dados referentes aos 279 municípios mapeados entre 2012 e abril/2015.

Fonte: CPRM.

No que diz respeito à incidência de média e alta suscetibilidade a inundações, tendo em conta o relevo de planícies e terraços sujeito a esses processos, MS se destaca em relação à área municipal (60,14% do território situado em áreas de média e

alta suscetibilidade a inundações), ante a média geral (19,88%). Quanto à área urbanizada, RJ se destaca (37,17% do território situado em áreas de média e alta suscetibilidade a inundações) ante a média geral em todos os estados (18,78%) (tabela 3).

**Tabela 3** - Incidência de classes de suscetibilidade a inundações, segundo a abrangência territorial e a Unidade da Federação (UF) correspondente.

Abrangência	UF	Classe de suscetibilidade a inundações							
		Alta		Média		Baixa		Total *	
		km <sup>2</sup> média	% média	km <sup>2</sup> média	% média	km <sup>2</sup> média	% média	km <sup>2</sup> média	% média
Área Municipal	AC	175,24	10,22	69,75	4,07	44,74	2,61	96,58	5,63
	AL	31,56	7,41	13,66	3,53	17,24	4,30	20,82	5,08
	AP	168,00	26,15	51,49	5,57	2,32	0,53	73,94	10,75
	BA	40,46	6,62	22,06	2,76	10,27	1,34	24,26	3,58
	CE	108,85	18,58	55,97	9,23	22,72	4,33	62,51	10,71
	ES	40,23	13,42	16,54	4,00	11,52	3,63	22,77	7,02
	MA	267,40	26,22	26,66	2,13	3,24	0,41	99,10	9,58
	MG	39,15	3,43	20,44	2,09	24,68	2,30	28,09	2,61
	MT	0,00	0,00	153,09	10,88	15,80	1,12	56,30	4,00
	MS	1.484,46	59,33	20,22	0,81	0,58	0,02	501,75	20,05
	PA	783,17	38,86	19,77	1,28	4,36	0,29	269,10	13,48
	PE	34,69	16,24	9,37	4,46	6,69	3,63	16,92	8,11
	PI	207,12	14,21	69,99	4,98	17,35	1,28	98,15	6,82
	PR	16,74	5,29	13,88	4,38	12,23	3,11	14,28	4,26
	RJ	65,39	13,85	16,38	4,96	5,98	2,36	29,25	7,06
	RN	161,01	7,67	67,99	3,24	10,93	0,52	79,98	3,81
	RO	607,43	18,84	126,98	3,94	0,00	0,00	244,80	7,59
	RS	57,24	11,46	18,59	3,74	94,41	25,24	56,75	13,48
	SC	30,17	9,96	18,29	4,68	21,26	4,75	23,24	6,46
	SP	21,26	4,75	22,09	4,36	23,09	4,27	22,15	4,46
Total		216,98	15,63	41,66	4,25	17,47	3,30	92,04	7,73
Área Municipal Urbanizada	AC	15,17	26,91	2,02	3,58	1,86	3,30	6,35	11,26
	AL	0,96	9,26	1,09	18,34	4,89	22,89	2,31	16,83
	AP	2,98	8,11	1,58	4,45	0,04	0,13	1,53	4,23
	BA	3,26	6,83	0,78	2,69	0,22	2,65	1,42	4,06
	CE	0,50	13,07	0,78	10,40	0,21	1,39	0,50	8,29
	ES	2,46	16,80	1,78	9,95	1,78	9,95	2,00	12,23
	MA	7,56	25,19	1,37	5,46	0,11	3,03	3,01	11,23
	MG	1,20	5,90	1,26	7,35	3,93	15,18	2,13	9,48
	MT	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	MS	0,68	2,27	0,15	0,50	0,00	0,00	0,28	0,92
	PA	2,87	17,76	0,52	1,49	1,50	1,17	1,63	6,81
	PE	11,34	19,22	2,80	10,26	1,60	4,76	5,25	11,41
	PI	7,88	15,69	2,65	11,82	1,24	12,62	3,92	13,38
	PR	3,25	5,59	4,24	5,46	4,63	3,94	4,04	5,00
	RJ	5,11	24,38	2,61	12,79	1,20	4,14	2,97	13,77
	RN	0,24	0,51	0,88	1,87	0,48	1,02	0,53	1,13
	RO	2,37	2,62	4,12	4,56	0,00	0,00	2,16	2,39
	RS	10,63	11,97	1,66	5,38	3,26	25,35	5,18	14,23
	SC	6,09	16,99	4,03	10,30	3,54	15,61	4,55	14,30
	SP	4,27	10,90	4,24	8,87	4,87	7,83	4,46	9,20
Total		4,44	12,00	1,93	6,78	1,77	6,75	2,71	8,51

Obs.: dados referentes aos 279 municípios mapeados entre 2012 e abril/2015. \* Soma das áreas correspondentes ao padrão de relevo representado por planícies e terraços.

Fonte: CPRM.

Quanto a corridas de massa e enxurradas, RJ (5,86% do território situado em áreas de alta suscetibilidade a corridas de massa e enxurradas), SC (5,63%) e SP (5,12%) se destacam em relação à área municipal, ante a média geral (1,52%). Quanto

à área urbanizada, MS (1,63% do território urbanizado situado em áreas de alta suscetibilidade a corridas de massa e enxurradas), ES (1,28%) e RJ (0,82) se destacam ante a média geral (0,28%). Em relação a enxurradas, exclusivamente, MG

(18,69%) e ES (18,65%) se destacam em relação à área municipal, ante a média geral (5,50%). Quanto à área urbanizada, MS (1,63%) se destaca ante a média geral (6,57%). Quanto à incidência dos dois tipos de bacias de drenagem (ou seja, com alta suscetibilidade a: corridas e enxurradas; e a enxurradas), MG (13,65%), ES (13,54%), SC (12,85%) e RJ (11,73%) apresentam maior média

em relação à área municipal, ante a média geral (4,27%). Quanto à área urbanizada, MS se destaca (46,35%) ante a média geral (0,34%). Vale observar que, no caso de MS, os dados se referem a um único e extenso município da região do Pantanal Mato-grossense, fato que tende a influenciar a comparação geral (tabela 4).

**Tabela 4** - Incidência de bacias de drenagem com alta suscetibilidade a corridas de massa e a enxurradas, segundo a abrangência territorial e a Unidade da Federação (UF) correspondente.

Abrangência	UF	Bacias de drenagem com alta suscetibilidade a:					
		Corridas e enxurradas (a)		Enxurradas (b)		Total (a + b) *	
		km <sup>2</sup> média	% média	km <sup>2</sup> média	% média	km <sup>2</sup> média	% média
Área municipal	AC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	AL	0,13	0,03	29,39	6,94	14,76	3,50
	AP	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	BA	1,27	0,19	16,98	2,41	9,13	1,39
	CE	0,97	0,08	16,00	1,65	8,49	0,91
	ES	29,01	4,21	132,40	18,65	80,70	13,54
	MA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	MG	43,16	4,30	158,80	18,69	100,98	13,65
	MT	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	MS	94,29	3,98	206,02	8,70	150,16	8,33
	PA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	PE	0,00	0,00	16,48	4,17	8,24	2,09
	PI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	PR	0,97	0,10	26,84	3,18	13,90	1,69
	RJ	31,00	5,86	49,99	11,74	40,50	11,73
	RN	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	RO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	RS	1,25	0,95	16,26	13,83	8,76	7,86
	SC	21,09	5,63	59,13	14,44	40,11	12,85
	SP	21,51	5,12	34,01	5,54	27,76	7,89
Total		12,23	1,52	38,11	5,50	25,17	4,27
Área municipal urbanizada	AC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	AL	0,00	0,00	0,01	0,09	0,00	0,04
	AP	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	BA	0,00	0,00	0,08	0,78	0,04	0,39
	CE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	ES	0,22	1,28	0,94	7,20	0,58	4,24
	MA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	MG	0,08	0,61	0,90	5,87	0,49	3,24
	MT	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	MS	0,49	1,63	27,30	91,06	13,90	46,35
	PA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	PE	0,00	0,00	0,05	0,12	0,02	0,06
	PI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	PR	0,00	0,00	0,22	0,80	0,11	0,40
	RJ	0,14	0,82	0,70	5,77	0,42	3,30
	RN	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	RO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	RS	0,00	0,00	0,74	15,20	0,37	7,60
	SC	0,11	0,57	1,50	3,74	0,81	2,15
	SP	0,17	0,78	0,30	0,84	0,23	0,81
Total		0,06	0,28	1,64	6,57	0,85	0,34

**Obs.:** dados referentes aos 279 municípios mapeados entre 2012 e abril/2015. \* Soma das áreas correspondentes a: a) bacias de drenagem suscetíveis a corridas de massa e enxurradas; e b) bacias de drenagem suscetíveis a enxurradas.

**Fonte:** CPRM.

Cabe frisar que as cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais e inundações produzidas representam um primeiro estágio de conhecimento, mostrando áreas suscetíveis à geração dos processos considerados. Não se indicam o alcance territorial dos materiais mobilizáveis e tampouco a sinergia entre os processos, que devem ser objeto de análises de perigo e risco, em nível de detalhe. O modelo de mapeamento desenvolvido é fundamentado em fatores predisponentes espacializáveis e validação em campo. Fatores não incluídos poderão ser agregados posteriormente. As cartas se destinam ao planejamento territorial e à prevenção de desastres, aplicáveis a planos diretores municipais e zoneamentos ecológico-econômicos, visando orientar a expansão urbana e evitar a edificação em áreas suscetíveis, bem como ao licenciamento ambiental e avaliação de impactos. Alerta-se que as cartas não devem ser utilizadas para tomada de decisão em escala de projeto de engenharia, bem como não são recomendadas para delimitar zonas de uso do solo. As cartas devem ser revistas periodicamente, à medida que surjam novos mapas temáticos e conhecimentos acerca dos processos analisados.

## 5 CONCLUSÕES

O mapeamento de áreas suscetíveis a movimentos gravitacionais de massa e inundações em municípios abrangidos pelo PNGRRDN propiciou o desenvolvimento de métodos que se mostraram aplicáveis à diversidade de situações de terreno e de condições encontradas na maior parte das distintas regiões do território brasileiro. No que se refere aos municípios mapeados nas regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste e Nordeste, os resultados das aplicações efetuadas revelam uma compatibilidade relativamente maior em relação aos dados e informações observados durante a realização dos trabalhos de verificação e validação de campo.

Não obstante, algumas dificuldades específicas foram encontradas em relação às aplicações dos métodos, especialmente em municípios da região Norte, marcadas particularmente pela ausência de dados básicos compatíveis com a escala geográfica de trabalho adotada e pelos tipos de

modelos digitais de elevação disponíveis e empregados no mapeamento. Entre outros aspectos, essas dificuldades se mostram influenciadas pelas características de baixa amplitude topográfica e de alta densidade de cobertura vegetal, constatadas com frequência nessa região do País, mas também em outras regiões do território brasileiro, as quais requerem adaptações e complementações no sentido da geração de produtos mais compatíveis com a realidade observada durante a realização dos trabalhos de campo.

Considerando os dados dos 279 municípios inicialmente mapeados, distribuídos em vinte estados do País, observa-se que a incidência média de áreas com média e alta suscetibilidade em relação à área municipal, que inclui área urbanizada e área rural, analisados para o conjunto de cada UF, corresponde a inundações. O mesmo ocorre em relação à área urbanizada, onde há edificações e populações residentes, dentro do contexto de relevo de planícies e terraços. Quanto a bacias de drenagem suscetíveis a corridas de massa e enxurradas, a incidência é relativamente maior no caso de enxurradas, tanto em relação à área municipal quanto à área urbanizada. Convém, no entanto, atentar para o fato de que a inclusão de novos dados e informações, relativos a municípios ainda em fase de processamento no contexto do PNGRRDN, poderá gerar alterações nesse panorama geral. Deve-se observar, ainda, que, quando analisados em relação a cada município, os dados a respeito da incidência podem retratar situações muito distintas quando comparadas àquelas que se obtém segundo os valores das médias gerais de cada estado.

## AGRADECIMENTOS

Registram-se os agradecimentos à CPRM pela viabilização dos trabalhos, aos colegas da CPRM e do IPT que participaram da execução dos mapeamentos e às equipes de prefeituras, defesa civil, órgãos estaduais e federais, institutos de pesquisas e universidades, pelo fornecimento de dados e informações diversas e pelo apoio de campo.

Agradece-se, ainda, ao CNPq, pelo apoio a pesquisa sobre práticas e inovações em cartografia geotécnica.

## REFERÊNCIAS

- Bitar O. Y. (Coord.). Cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações-1:25.000: Nota Técnica Explicativa. 2014. São Paulo: IPT; Brasília, DF: CPRM, 2014 (Publicação IPT 3016).
- Bitar O. Y. & Silva, S. F. da. Breve panorama sobre a incidência de áreas suscetíveis a movimentos gravitacionais de massa e inundações em municípios das regiões Sul e Sudeste do Brasil. 2015. In: ABGE, Simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica e Geoambiental, 9, Anais, Cuiabá: CD-ROM.
- Brasil. 2013. Governo Federal. Plano Nacional de Gestão de Riscos e Resposta a Desastres Naturais - PNGRRDN. [S.l.]. Disponível em: <<http://www.pac.gov.br/pub/up/relatorio/d0d2a5b6f24df2fea75e7f5401c70e0d.pdf>>. Acesso em: set. 2013.
- Brasil. 2012. Lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012. Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil - PNPDEC; dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil - SINPDEC e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil - CONPDEC; autoriza a criação de sistema de informações e monitoramento de desastres; altera as Leis nos 12.340, de 1º de dezembro de 2010, 10.257, de 10 de julho de 2001, 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.239, de 4 de outubro de 1991, e 9.394, de 20 de dezembro de 1996; e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, 11 abr. 2012.
- Bressani L.A. & Costa E.A da. 2013. Mapeamento geotécnico: suscetibilidade, perigo, vulnerabilidade técnica, risco e risco instalado. In: ABGE, Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, 14, Anais, Rio de Janeiro: CD-ROM.
- Corsi A.C., Gramani M.F., Ogura A.T. Método para delimitação de bacias de drenagem suscetíveis a corridas de massa e enxurradas. In: ABGE, Simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica e Geoambiental, 9, Anais, Cuiabá: CD-ROM.
- Coutinho R. Q. (Coord. e Org.). 2013. Parâmetros para a cartografia geotécnica e diretrizes para medidas de intervenção de áreas sujeitas a desastres naturais. Recife, Ministério das Cidades; Universidade Federal de Pernambuco; Grupo de Engenharia Geotécnica de Encostas e Planícies - GEGEP; DECivil, 376 p.
- Diniz N.C. 2012. Cartografia geotécnica por classificação de unidades de terreno e avaliação de suscetibilidade e aptidão. Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, 2 (1):29-77.
- Fell R., Corominas J., Bonnard C., Cascini L., Leroi E., Savage W. Z. 2008. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning. Engineering Geology, 102: 85-111.
- Julião R. P., Nery F., Ribeiro J. L., Branco M. C., Zêzere, J. L. 2009. Guia metodológico para a produção de cartografia municipal de risco e para a criação de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) de base municipal. Lisboa: Autoridade Nacional de Protecção Civil; Direcção-Geral do Ordenamento do Território e Desenvolvimento Urbano; Instituto Geográfico Português, 2009. Disponível em: <<http://www.dgotdu.pt/detail.aspx?channelID=85E8AD30-00F8-417E-9F12-EBFAFE6A5B4&contentId=3B54E44B-603C-4445-8C8A-ECC879127CEE>>. Acesso em: 17 set. 2013.
- Macedo E.S. & Bressani L.A. (Org.). 2013. Diretrizes para o zoneamento da suscetibilidade, perigo e risco de deslizamentos para planejamento do uso do solo. São Paulo: ABGE; ABMS, 88 p.
- Ministério das Cidades. 2013. Capacitação em mapeamento e gerenciamento de risco. [S.l.]. Disponível em: <<http://www.defesacivil.mg.gov.br/conteudo/arquivos/manuais/Mapeamento/mapeamento-grafica.pdf>>. Acesso em: 9 set. 2013.
- Rennó C.D., Nobre A. D., Cuartas, L. A., Soares, J. V., Hodnett, M. G., Tomasella, J., Waterloo, M. J. 2008. HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM; Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. Remote Sensing of Environment, 112 (9):3469-3481.
- Sobreira F.G. & Souza L.A. de. Cartografia geotécnica aplicada ao planejamento urbano. 2012.

Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, 2(1):79-97.

Stabile R.A., Ferreira A. L., Carvalho A. M. de, Siqueira, A.G., Bitar O. Y. 2013. Análise de fatores

condicionantes de instabilizações em encostas como subsídio para a modelagem estatística da suscetibilidade a deslizamentos. In: In: ABGE, Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, 14, Anais, Rio de Janeiro: CD-ROM.