

## CIÊNCIAS GEODÉSICAS NA REPRESENTAÇÃO DA SUPERFÍCIE DE UMA ENCOSTA EM RISCO

ALESSANDRO RHADAMEK ALVES PEREIRA<sup>1</sup>  
TARCÍSIO FERREIRA SILVA<sup>2</sup>  
ADMILSON PACHÊCO<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Departamento de Engenharia Cartográfica - DECart

Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação

Avenida Acadêmico Hélio Ramos, s/n, sala 315, Cidade Universitária, Recife – PE, 50740-530.

Fone/Fax: (081) 2126-8981.

alessandro\_rhadamek@hotmail.com

tarcisifs@yahoo.de

admilpp@ufpe.br

**RESUMO** – Este artigo caracteriza o potencial das Ciências Geodésicas no estudo de uma área em risco natural, a partir de uma abordagem metodológica relacionada com a identificação e representação, exata e em épocas pré-determinadas, da superfície de uma encosta em processo de deslizamento, no município de Camaragibe - PE, Brasil. Transformações de sistemas de coordenadas realizadas através de modelos funcionais de transformação, apoiadas por métodos de identificação de feições, geraram a homogeneidade dos sistemas de referência de medição. Para este procedimento utilizaram-se as expressões gráficas decorrentes de levantamentos geodésicos, elaborados em diferentes épocas e contextos tecnológicos, além de imagem de satélite de alta resolução e fotografias aéreas panorâmicas para interpretação semântica. A análise geodésica espaço-temporal dos levantamentos demonstraram a evolução geométrica das acentuadas mudanças na superfície da encosta estudada, ocasionadas provavelmente pelos fenômenos físicos, naturais e as ações humanas presentes no decorrer de 30 anos, além de avaliar a quantidade de solo deslocado por deslizamentos de terra observados a partir do ano 2000.

**ABSTRACT** - This article characterizes the potential of the Geodesic Sciences in the study of an area in natural risk, starting from a methodological approach related with the identification and representation, exact and in pre-determined times, of the surface of a hillside in sliding process, in the municipal district of Camaragibe - PE, Brazil. Transformations of systems of coordinates accomplished through functional models of transformation, leaning for methods of identification of features, they generated the homogeneity of the systems of measurement reference. For this procedure the current graphic expressions of geodesic products were used, elaborated in different times and technological contexts, besides image of satellite of high resolution and panoramic aerial pictures for semantic interpretation. The analysis geodesic spatial-temporal of the risings demonstrated the geometric evolution of the accentuated changes in the surface of the studied hillside, probably caused by the phenomena physical, natural and the present human actions in elapsing of 30 years, besides evaluating the amount of soil moved by landslides happened starting from the year 2000.

### 1. INTRODUÇÃO

O processo de crescimento acelerado e desordenado das cidades, principalmente nas zonas periféricas, associado à falta de política habitacional adequada tem causado graves problemas sociais como a ocupação humana em encostas avaliadas como áreas de riscos, expondo à população a diversos perigos destacando-se os riscos de deslizamentos ou

escorregamentos. Deslizamentos são fenômenos provocados pelo escorregamento de materiais sólidos, como solos, rochas, vegetação e/ou material de construção ao longo de terrenos inclinados denominados de encostas, pendentes ou escarpas.

Mesmo com o acompanhamento, geralmente inadequado, das ocupações das encostas pelo Poder Público, é freqüente à ocorrência de deslizamentos decorrentes da ação de diversos fatores como o clima

(intensidade e duração das chuvas, etc.), a geologia (tipo, textura e estrutura dos solos, comportamento das águas subterrâneas, etc.), a morfologia (amplitude e declividade do talude, forma da encosta, etc.), a cobertura vegetal (tipo e extensão da cobertura, remoção descontrolada, etc.) e as ações antrópicas (cortes, aterros, criação e expansão de bairros, lançamento de águas servidas, vazamento nas redes d'água, lixo, etc.).

Os deslizamentos estão enquadrados de acordo com Castro et al. (2005) na categoria risco natural, na qual está objetivamente relacionada a processos e eventos de origem natural ou induzida por ações antrópicas. A natureza destes processos é bastante diversa nas escalas temporal e espacial, por isso o risco natural pode apresentar-se com diferentes graus de perdas, em função da intensidade, da abrangência espacial e do tempo de atividade dos processos considerados. Santos (2006) descreve que o risco de deslizamento deve ser analisado a partir de condicionantes de suscetibilidade e de vulnerabilidade, que associados determinam à magnitude, a duração, a recorrência e o valor das perdas decorrentes de um possível acidente.

Para a convivência adequada em áreas sujeitas aos riscos de acidentes é importante à identificação dos processos geradores de riscos e as caracterizações da sua dinâmica de evolução. No estudo deste contexto destacam-se Ciências tais como a Geologia, Geotecnia, Hidrologia, Geografia e Geodésia, que elaboram inúmeros trabalhos no intuito de identificar e entender os mecanismos e fatores condicionantes e desencadeadores dos deslizamentos de terra. Vale ressaltar que geralmente os resultados são representados cartograficamente por meio dos mapas das áreas de riscos (Bandeira, 2005), mapa de susceptibilidade aos movimentos de massa e mapas de declividade (Araújo, 2004), mapa de condicionantes geomorfológicos (Fernandes et al., 2001), entre outros.

Estes trabalhos analisam a ocorrência de deslizamentos de terra confrontando os aspectos naturais como geologia, geomorfologia, clima e vegetação com fatores antrópicos provenientes do crescimento das cidades. Entretanto, outros destacam a importância do uso de modelos distribuídos, sobretudo dos modelos digitais de terreno, como ferramentas complementares ao mapeamento temático na previsão das áreas mais susceptíveis aos diferentes processos erosivos que ocorrem na paisagem. Esses modelos estão cada vez mais sendo utilizados em estudos ambientais, pois, além de possibilitar a compreensão das mudanças ambientais decorrentes do manejo inadequado do solo, podem ser usados para prever alterações futuras da paisagem (Ramos et al., 2003).

Na experiência com áreas de risco tratada por Santos (2006), a utilização do MDT na análise espacial possibilita o conhecimento de um determinado fenômeno sem necessariamente ter-se que formular a visita em campo, sendo que o modelo permite a percepção da topografia da região e gera as informações necessárias para uma análise da forma do relevo em áreas de risco de deslizamentos de terra. Para a geração do modelo digital

de terreno, é necessário obter informações altimétricas do terreno que garantam a geomorfologia do mesmo. Usualmente, são utilizadas curvas de nível e pontos altimétricos como fonte de informação altimétrica (Gonçalves, 2001).

No âmbito das Ciências Geodésicas, áreas como a Geodésia, Topografia, Cartografia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto, disponibilizam técnicas de alta precisão para a identificação e representação da superfície de uma área de risco natural. A análise espaço-temporal dos levantamentos geodésicos e de sensoriamento remoto é útil para demonstrar a evolução das mudanças ocorridas na topografia da encosta por meio do uso da homogeneização dos levantamentos e da representação através da modelagem digital de terreno. Assim, torna-se possível a identificação de trechos alterados ou mais passíveis de mudanças, pelo entendimento da dinâmica geomorfológica da área.

Geralmente às informações posicionais cartografadas, oriundas das diversas fontes e contextos tecnológicos como, por exemplo, levantamentos cartográficos, topográficos e de sensoriamento remoto, empregam diferentes sistemas de coordenadas, devendo-se realizar a preparação dos dados disponíveis por meio de um controle geodésico para a devida homogeneização dos mesmos. Nesse processo, de acordo com De Freitas et al. (2004), torna-se necessário converter as coordenadas de um sistema em outro para que se tenha ao final um único sistema, utilizado um modelo de transformação de coordenadas que é uma relação funcional entre pontos de dois espaços. Diferentes sistemas geodésicos de referência só podem ser integrados com a realização de pontos comuns entre eles em quantidade e distribuição adequadas de modo a permitir a modelagem das transformações e distorções.

Diversos modelos matemáticos são requeridos para modelar geometricamente, conforme as diferentes circunstâncias, onde sua complexidade depende da realidade física e do rigor de precisão. A escolha do modelo tem implicações fundamentais em aspectos de precisão, problemas de mau condicionamento de sistemas, eficiência numérica e exatidão dos resultados obtidos (Lugnani, 1987).

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo caracterizar o potencial das Ciências Geodésicas no estudo de uma área em risco natural, a partir de uma abordagem metodológica relacionada com a identificação e representação, exata e em épocas pré-determinadas, da superfície de uma encosta em processo de deslizamento, no município de Camaragibe - PE.

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.1 Localização e caracterização da área de estudo**

A área de estudo, apresentada na Figura 1, está localizada no bairro de Jardim Primavera, Rua Augusto dos Anjos, subida do Vale das Pedreiras no Município de Camaragibe, pertencente à Região Metropolitana do Recife (RMR), estado de Pernambuco. As coordenadas do

centro da área de estudo no Sistema de Projeção UTM (Datum: SAD-69 e Elipsóide: UGGI 1967) são: N=9.114.280,547 m; E=283.502,925 m; Fuso: 25 Sul. As mesmas coordenadas no Sistema Geodésico Brasileiro (Datum: SAD-69 e Elipsóide: UGGI 1967) são: latitude 08°00'29,45" S; longitude 34°57'51,35" W.

A área encontra-se dentro da faixa de clima do tipo As', pela classificação de *W. Köppen*, caracterizado como clima tropical chuvoso com verão seco estação chuvosa que se adianta para o outono, antes do inverno. No tocante a cobertura vegetal, destaque para a vegetação a hidrófila e a presença de culturas de subsistência como a mandioca, milho, hortaliças e pasto.

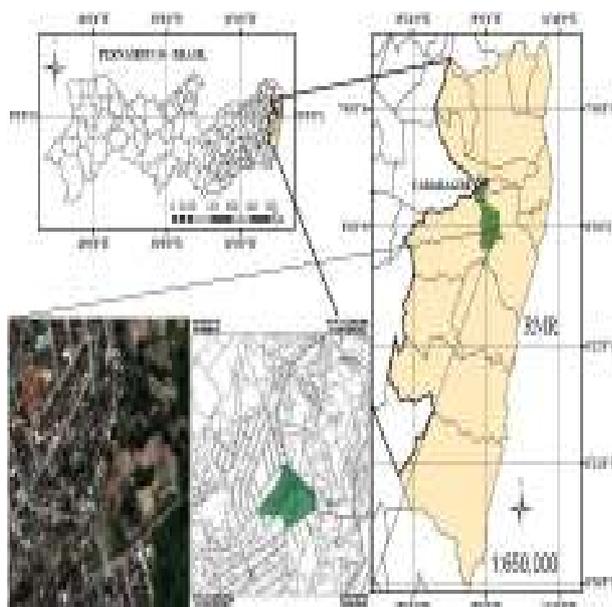


Fig. 1 – Localização da área de estudo.

No tocante aos deslizamentos de terras ocorridos na área existe certa dificuldade em descrever o histórico dos deslizamentos na área. Devido à falta de registros dos escorregamentos nos locais competentes esta descrição se limita a alguns relatos de pesquisadores que atuaram na área de estudo.

A encosta é constituída por solo residual de granito, com um aparente comportamento de ruptura progressiva, formando degraus na superfície e um grande número de fendas. Esse movimento está ativo a alguns anos, agravando-se nos invernos de 2000 e 2002, quando uma linha de ruptura mais elevada atingiu diretamente três moradias, causando um abatimento de cerca de 3 m (Bandeira, 2003, p.28).

A área apresenta a caracterização inicial de um deslizamento ocorrido no ano de 2000 e reativado em 2002, a ruptura ocorrida propiciou a formação de diversos patamares e fendas no solo, distribuídas ao longo da encosta, apresentando assim zonas preferenciais de infiltração, podendo-se caracterizar o movimento como um deslizamento rotacional múltiplo por apresentar a ocorrência de uma série de rupturas combinadas e sucessivas (Silva et al., 2005, p.02).

No topo do trecho em que ocorreu o

deslizamento observa-se que as invasões foram realizadas pela população de baixa renda, de forma desordenada, desconhecendo os critérios técnicos de construção. A área de deslizamento possui dimensões de 117,0 m x 130,0 m com cotas variando entre 51,50 m e 27,75 m. Com relação à topografia após a ruptura sua declividade é da ordem de 11°, com uma rampa bastante comprida, apresentando também cobertura vegetal, constituída por cultivo de macaxeira, milho, feijão (Silva et al., 2006, p.01).

Ainda conforme os mesmos autores, um dos principais fatores que possivelmente contribuíram para a ruptura teve como fator acionante as águas de chuva, tendo como fatores predisponentes à geologia da área e a ação antrópica, com a realização de cortes e aterros, descarga de grande volume de águas servidas de forma periódica e constante, aumentando assim a infiltração e a sobrecarga que contribuem para a instabilidade da encosta. Em geral o risco pode ser eliminado por intervenções adequadas, de acordo com os fatores mais importantes. A Figura 2 mostra uma vista aérea da área.

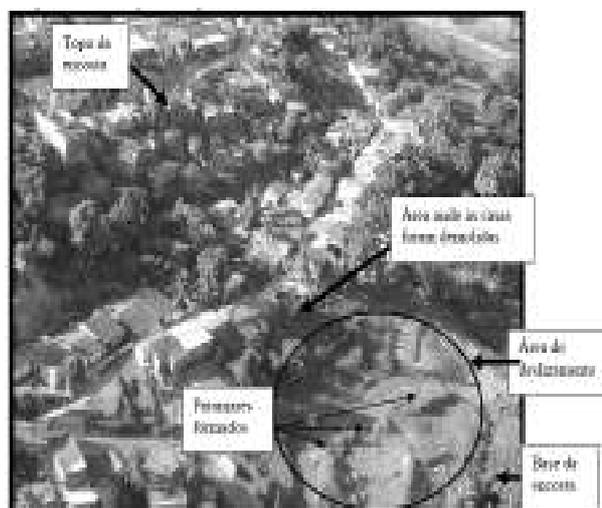


Fig. 2 – Vista da encosta. Fonte: Silva et al., 2006.

## 2.2 Características dos levantamentos utilizados

Os levantamentos cartográficos elaborados em diferentes contextos tecnológicos e científicos possuem diversas características, algumas mostradas na Tabela 1, cada um gerado com distintas metodologias de levantamento e representação, entre eles destacam-se:

1) Levantamento pictórico ortogonal planimétrico na forma de Ortofotocarta: folha nº. 81/34 da Fundação de Desenvolvimento da Região Metropolitana do Recife (FIDEM), Projeto SACS de 1975, arquivo em meio analógico, com poucas ruas e caminhos e muita vegetação, considerada bastante desatualizada em relação ao número de residências quando comparada com as residências identificadas na imagem do satélite *Quickbird* (2006). Observam-se limitações na identificação da área de estudo, no entanto, com boa qualidade altimétrica definida pelas curvas de nível com equidistância de 2 m.

2) Levantamento planimétrico de traço na forma de planta, denominada Planta Topográfica Cadastral: folha nº. 81/34:00 da Fundação de Desenvolvimento da Região Metropolitana do Recife (FIDEM), Projeto UNIBASE de 1998, arquivo em meio digital, sem informações altimétricas. A área de estudo está desatualizada 5 % quando comparada com o número de residências identificadas na imagem do satélite *Quickbird* (2006).

3) Levantamento planimétrico de traço na forma de planta, denominada Planta Topográfica: arquivo em meio digital, resultante de um levantamento planialtimétrico (taqueométrico) realizado em 2003, área de 23.501,3 m<sup>2</sup>, curvas de nível com equidistância de 1 m, fornecido pelo Departamento de Engenharia Civil da UFPE.

4) Imagem do Satélite *Quickbird*, fornecida pelo Laboratório de Sensoriamento Remoto da UFPE em formato digital, com as seguintes especificações técnicas: Tipo de imagem: RGB; Tipo de produto: Padrão; Projeção: UTM; Datum: WGS-84; Fuso: 25 Sul; Azimute nominal: 114,00°; Elevação nominal: 68,50°; Direção do sensor: Contrário; Direção de varredura: Adiante; GSD Transversal e Longitudinal: 0,60 metros; Data de aquisição: 01 de Abril de 2005 às 12:46:48 (tempo médio de *Greenwich*); Porcentagem de nuvem: 0,3%; Tamanho da imagem: 8413 x 8628 pixels (linha x coluna).



Fig. 3 – Fluxograma com as principais atividades desenvolvidas na metodologia.

### 1) Identificação e localização

Na fase de identificação e localização foram estabelecidas metodologias geodésicas, topográficas e de sensoriamento remoto capazes de identificar as feições, elementos semelhantes e localizar de forma precisa a superfície da encosta.

Geralmente a identificação de uma área em um levantamento geodésico ou cartográfico acontece empregando-se apenas o método visual (identificação de feições) ou o método numérico (homogeneização dos levantamentos). No caso em foco, foram encontrados três problemas relevantes que impossibilitaram a identificação direta da área de estudo, como segue:

A região coberta, pela folha da Ortofotocarta de 1973, Figura 4, era quase desabitada na época da execução do vôo que possibilitou a confecção da mesma em 1975, com a presença de residências no lado inferior esquerdo e uma linha férrea hoje transformada em estreito arruamento;



Fig. 4 – Região coberta pela Ortofotocarta.

A área em estudo originada na Planta Topográfica 2003, demarcada pelas linhas azuis, aparentemente localiza-se em uma parte da folha da Ortofotocarta, Figura 4, que contém apenas vegetação e com total ausência de edificações e arruamentos.

A Planta Topográfica 2003 (linhas azuis) apresenta, além das curvas de nível (linhas amarelas), apenas três inícios de ruas (círculos verdes) impossibilitando a identificação direta dos pontos homólogos correspondentes ao levantamento Ortofotocarta de 1975. Entretanto, ela apresenta total compatibilidade em relação à Planta Topográfica Cadastral de 1998, como ilustra a Figura 5.

Tabela 1 – Detalhes do material cartográfico.

Discriminação	Escala	Datum	Elipsóide	Ano
Ortofotocarta	1/2000	Córrego Alegre	Hayford	1975
Planta Top. Cadastral	1/1000	SAD 69	UGGI 1967	1998
Planta Topográfica	1/500	Local	----	2003

### 2.3 Contextualização do problema e metodologia

Como identificar a área de estudo em diferentes levantamentos cartográficos planialtimétricos de grande escala, gerados em diferentes contextos tecnológicos, para depois se representar, de forma exata e em épocas pré-determinadas, o comportamento geomorfológico da superfície da encosta?

Os pressupostos da metodologia, demonstrados na Figura 3, são a identificação e representação da superfície de uma encosta de uma forma qualitativa abordando apenas a encosta, baseados nas formas do relevo, no nível de detalhe para permitir o resgate da morfologia da superfície antes das intervenções antrópicas e dos deslizamentos de solo de modo a definir as áreas onde ocorreram mudanças e as áreas mais vulneráveis a novas ocorrências de deslizamentos.



Fig. 5 – Área de estudo oriunda da Planta Topográfica vinculada a Planta Topográfica Cadastral.

Tendo em vista o exposto, a identificação da área de estudo não pode ser obtida nem pelo método visual da identificação de feições e nem pelo método numérico da homogeneização dos levantamentos. Como contorno, realizou-se o emprego de um método híbrido dos itens identificação (visual) e homogeneização (numérico), naturalmente complementados por algumas visitas a campo para o reconhecimento de pontos da área e validação dos resultados obtidos nas transformações de coordenadas.

#### a) Aquisição dos levantamentos cartográficos

Após a seleção da área de estudo, procedeu-se à coleta dos dados cartográficos, imagens do sensoriamento remoto e de câmeras digitais comuns disponíveis nas fontes da administração metropolitana do Recife e de Camaragibe e demais instituições, como segue:

Fundação de Desenvolvimento da Região Metropolitana do Recife (FIDEM): Ortofotocarta (1975) e Planta Topográfica Cadastral (1998);

Departamento de Engenharia Civil (UFPE): Planta Topográfica (2003);

Departamento de Engenharia Cartográfica (UFPE), através do Laboratório de Sensoriamento Remoto (LASENSO): Imagem do Satélite Quickbird (2005), comprada a Empresa Intersat;

Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação (UFPE): Dissertação com dados de transformações geodésicas.

#### b) Identificação de feições na orientação de campo

Esta atividade consistiu em identificar a área de estudo nos levantamentos cartográficos disponíveis através do reconhecimento de linhas notáveis da superfície topográfica, como as definições geográficas do terreno como bacias, quebradas, divisores de águas, vales, vertentes, talvegues, identificação de ruas, etc.

Observou-se que foi construído um conjunto habitacional no entorno noroeste da área, modificando-se completamente o local, onde diversos cortes e aterros foram realizados, dificultando bastante a identificação e comparação das linhas notáveis da topografia, mesmo com o apoio da imagem de satélite, das fotografias aéreas panorâmicas e das inúmeras visitas de reconhecimento.

#### c) Homogeneização dos levantamentos cartográficos

A homogeneização é de fundamental importância para representação numérica dos levantamentos 1975 e 2003 e posterior comparação dos modelos digitais do terreno - MDTs. O processo caracteriza-se pela uniformização dos levantamentos, indicados a seguir, através do modelo numérico de transformação conforme bidimensional entre os sistemas de coordenadas:

- Ortofotocarta 1975 (Datum Córrego Alegre);
- Planta Topográfica 2003 (Datum Local).

Conforme Wolf e Ghilani (1997) esta transformação tem a característica de manter a forma, necessitando de no mínimo dois pontos, denominados pontos de controle, os quais são comuns em ambos os sistemas. Caso existam mais de dois pontos de controle disponíveis, um ajuste por mínimos quadrados torna-se possível, o que é descrito por Kahmen e Faig (1988), como uma Transformação de Helmert, a qual é realizada com coordenadas relativas ao centróide do sistema. Idealmente, os pontos idênticos devem ficar situados nas bordas das áreas a serem transformadas. Segundo os mesmos autores isto melhora o cálculo da transformação.

De acordo com Kahmen e Faig (1988) a disposição dos pontos que é processada com uma transformação de similaridade submete-se à seguinte mudança de coordenadas:

a) Deslocamentos em ambos os sentidos das coordenadas ( $x_o, y_o$ );

b) Rotação pelo ângulo ( $\varphi$ );

c) Multiplicação por fator de escala ( $q$ ) para homogeneizar a métrica nos sistemas.

Seguem-se as expressões matemáticas utilizadas na transformação (Kahmen e Faig, 1988):

Coordenadas do centro de gravidade:

$$x_s = \frac{\sum x}{n}; y_s = \frac{\sum y}{n}; \varepsilon_s = \frac{\sum \varepsilon}{n}; \eta_s = \frac{\sum \eta}{n}$$

(1)

Desvios:

$$\Delta x = x_i - x_s; \Delta y = y_i - y_s; \Delta \varepsilon = \varepsilon_i - \varepsilon_s; \Delta \eta = \eta_i - \eta_s \quad (2)$$

Parâmetros auxiliares de transformação:

$$a = q \cdot \cos \varphi = \frac{(\sum \Delta \eta \Delta y + \sum \Delta \varepsilon \Delta x)}{\sum (\Delta \varepsilon^2 + \Delta \eta^2)}$$

$$o = q \cdot \sin \varphi = \frac{(\sum \Delta \eta \Delta x - \sum \Delta \varepsilon \Delta y)}{\sum (\Delta \varepsilon^2 + \Delta \eta^2)} \quad (3)$$

Fator de escala:

$$q = \sqrt{a^2 + o^2} \quad (4)$$

Ângulo de rotação:

$$\varphi = \arctan \frac{o}{a} = \arccos \frac{a}{q} = \arcsen \frac{o}{q} \quad (5)$$

Centro de rotação: ( $P_o$ , origem do sistema  $\eta, \varepsilon$ )

$$x_o = x_s - o \eta_s - a \varepsilon_s$$

$$y_o = y_s - a \eta_s + o \varepsilon_s \quad (6)$$

Resíduos lineares:

$$dx_i = (x_s + a \Delta \varepsilon_i + o \Delta \eta_i) - x_i$$

$$dy_i = (y_s - o \Delta \varepsilon_i + a \Delta \eta_i) - y_i \quad (7)$$

A Figura 6 exibe a representação gráfica da transformação entre os sistemas  $(\epsilon, \eta)$  e  $(x, y)$ , onde os elementos  $(\epsilon_s, \eta_s)$  representam as coordenadas de entrada e  $(x_s, y_s)$  representam as coordenadas de saída.

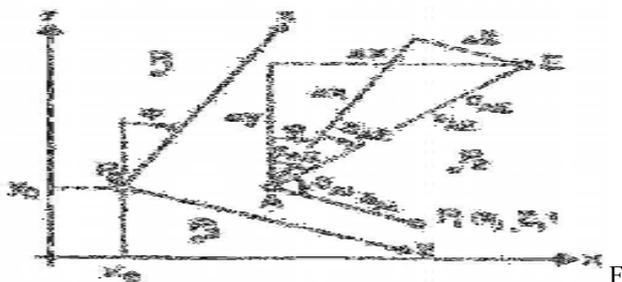


fig. 6 – Transformação de similaridade. Fonte: Kahmen e Faig, 1988.

O número de pontos homólogos necessários para a transformação, lastimavelmente, não foi suficiente, o que exigiu um contorno só possível, com a disponibilização de outro meio cartográfico, em escala grande. Este meio cartográfico, felizmente existente e representado pela Planta Topográfica Cadastral 1998 (Datum SAD-69), apresenta feições, edificações e arruamentos comuns entre os dois levantamentos citados, o que possibilitou o emprego das equações de Helmert e suas soluções com conseqüências positivas para a homogeneização.

Na realização deste procedimento, a escolha e obtenção dos pontos homólogos seguiram o critério da distribuição espacial, onde foram utilizados aproximadamente 10 pontos no entorno da área envolvida em cada levantamento. Foram empregados os programas *Microstation (Bentley)* na digitalização das curvas de nível e *Autocad (Autodesk)* na retirada das coordenadas dos pontos de cada curva de nível digitalizada.

Num segundo momento, também foi empregado um recorte da imagem do satélite *Quickbird* georreferenciada à Planta Topográfica Cadastral. Esta imagem, com respeito ao aspecto visual, adicionou informações pictoriais planimétricas, com comprovação cartográfica, que serviram como recurso de grande importância no processo de identificação dos pontos homólogos necessários nas transformações de sistemas entre os dois levantamentos (Ortofotocarta 1975 e Planta Topográfica 2003), além de demonstrar o grau de atualização das cartas em relação ao número de edificações presentes na Ortofotocarta 1975 e Planta Topográfica Cadastral 1998.

No processo de georreferenciamento da imagem *Quickbird* utilizou-se o modelo numérico definido pela Transformação Afim. Para Wolf e Ghilani (1997) são necessários seis parâmetros para realizar esta transformação, é uma variação da transformação de coordenadas conforme bidimensional, onde há a permissão adicional para dois fatores de escala diferentes, um na direção x e outro na direção y.

De acordo com Wolf e Dewitt (2000) uma transformação afim bidimensional consiste em quatro

passos fundamentais:

- a) Mudança de escala no eixo “x” e “y”, multiplicação por fator (S);
- b) Correção da não-ortogonalidade;
- c) Rotação pelo ângulo ( $\theta$ );
- d) Translação da origem por  $T_x$  e  $T_y$ .

O modelo matemático, aplicando o ajuste por mínimos quadrados, é definido por:

$$ax + by + c = X + V_x \quad (8)$$

$$dx + ey + f = Y + V_y \quad (9)$$

$$X = (S \cdot \cos \theta)x - (S \cdot \sin \theta)y + T_x \quad (10)$$

$$Y = (S \cdot \sin \theta)x + (S \cdot \cos \theta)y + T_y \quad (11)$$

Os elementos são descritos como (Wolf e Ghilani, 1997):

- a, b, c, d, e, f: representam os parâmetros de transformação;
- $V_x, V_y$ : representam os resíduos em X e Y;
- $T_x, T_y$ : representam as translações em X e Y;
- $\theta$ : representa o ângulo de rotação:  
 $\theta = \tan^{-1}(b/a)$  (12)
- S: representa o fator de escala:  
 $S = a/(\cos \theta)$  (13)
- (x, y): representam as coordenadas de entrada;  
(X, Y): representam as coordenadas de saída.

## 2) Representação

A fase de representação e visualização da superfície de interesse deu-se através da geração dos modelos digitais de terreno (MDTs) para se obter uma melhor visualização da variação da superfície da encosta. A entrada de dados foram listas de coordenadas tridimensionais de pontos dos levantamentos representados na Ortofotocarta 1975 e Planta Topográfica 2003 oriundas das transformações das curvas de nível digitais em formato vetorial. Para a geração dos MDTs empregou-se o programa *Surfer 8*, sendo realizadas as seguintes etapas:

a) Aquisição dos dados planialtimétricos: consiste em adequar o arquivo vetorial oriundo da digitalização das curvas de nível, em ambiente CAD, para sua futura modelagem em arquivos de texto tipo lista de coordenadas com este (eixo x), norte (eixo y) e cota (eixo z), ou seja, a representação da superfície física através da digitalização manual das isolinhas altimétricas (curvas de nível) obtidas em mapas topográficos e com a atribuição dos respectivos valores altimétricos (cotas), gerando planilhas com coordenadas tridimensionais.

b) Escolha da grade e função interpoladora: o MDT provém de uma grade de dados, com os valores já conhecidos (este, norte e cota), pois será sobre esta que se modelará a superfície do terreno. Para compor os dados *grid* (grade), parte-se do arquivo anterior \*.xls, que será

responsável por todos atributos presentes. Para o cálculo da grade irregular foi utilizado o interpolador *Kriging*, por expressar de maneira mais adequada às tendências sugeridas pelos dados originais, de acordo com as incertezas posicionais dos levantamentos e a realidade comprovada no campo.

c) Representação por meio de modelos tridimensionais: para modelar a superfície do terreno, transforma-se a grade de dados em um componente gráfico de três dimensões, basta efetuar o acesso ao menu *Map* (mapa) e, posteriormente, *Surface* (superfície). Buscando o arquivo \*.grd, anteriormente elaborado, e concluindo a operação, o *Surfer 8* gerará o MDT. O MDT é gerado automaticamente em um formato padrão para depois ser customizado de acordo com os interesses do usuário. Resta apenas salvar a imagem representando cada modelo digital 3D em composição colorida.

Para o cálculo do volume do MDT foi utilizado o método topográfico das superfícies equidistantes, muito empregado para o cálculo de volume d'água em reservatórios de barragens, onde as superfícies paralelas são representadas pelas curvas de nível. Este método trabalha com seções horizontais (área da superfície em torno da curva de nível) e uma distância "e" (equidistância entre as curvas de nível).

A fórmula para cálculo é a seguinte (Wolf e Ghilani, 2006):

$$Volume = e \times \left( \frac{A_1}{2} + A_2 + \dots + A_{n-1} + \frac{A_n}{2} \right) \quad (14)$$

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Homogeneização dos levantamentos cartográficos

Partiu-se do pressuposto que os levantamentos geodésicos e cartográficos realizados atenderam o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC), o qual se adota para as cartas, segundo sua exatidão, classificadas na Classe A os seguintes critérios:

Padrão de Exatidão Cartográfica - Planimétrico: 0,5 mm, na escala da carta, sendo de 0,3 mm na escala da carta o Erro-Padrão correspondente.

Padrão de Exatidão Cartográfica - Altimétrico: metade da equidistância entre as curvas de nível, sendo de um terço desta equidistância o Erro-Padrão correspondente.

As fotografias aéreas panorâmicas foram utilizadas apenas para o reconhecimento da área, pois seus erros eram considerados intoleráveis para fins geodésicos e cartográficos devido ao seu sistema de projeção ser diferente ao da imagem de satélite.

#### a) Transformação de Helmert

As transformações de coordenadas realizadas entre os diferentes sistemas, através do modelo matemático Transformação de Helmert, geraram resultados satisfatórios de acordo com a metodologia

empregada, desempenhando um papel altamente relevante na homogeneização dos levantamentos.

O arquivo Ortofotocarta (Datum: Córrego Alegre, Elipsóide: *Hayford*) com curvas de nível com equidistância de 2 m, foi convertido para o mesmo sistema de referência geodésico da Planta Topográfica Cadastral (Datum: SAD-69, Elipsóide: UGGI 1967), para a devida identificação da área de estudo na carta e atribuição das referências altimétricas, resultando num sistema híbrido (E, N, C) com planimetria (Este, Norte) de 1998 e altimetria (Cota) de 1975.

Para validar a transformação realizada, foram aplicadas as correções sugeridas por Carvalho (2003). O autor recomenda, para a Região Metropolitana do Recife, os seguintes parâmetros de transformação para converter as coordenadas da Ortofotocarta (Córrego Alegre) para a Planta Topográfica Cadastral - Unibase (SAD-69):

E (UNIBASE) = E (ORTOFOTOCARTA) + 67,986 m;

N (UNIBASE) = N (ORTOFOTOCARTA) - 34,177 m.

Os valores das discrepâncias entre os sistemas de coordenadas ( $D_{Ei} = E_{COR} - E_{SAD}$  ou  $D_{Ni} = N_{COR} - N_{SAD}$ ) são compatíveis aos encontrados na pesquisa realizada por Carvalho (2003). Na Tabela 7, as coordenadas indicadas como Córrego Alegre e SAD-69 são respectivamente, oriundas da Ortofotocarta e Planta Topográfica Cadastral.

TABELA 2 – RESULTADOS DA TRANSFORMAÇÃO DE COORDENADAS.

Ponto	Córrego Alegre		SAD - 69		Discrepâncias	
	E	N	E	N	$D_{Ei}$	$D_{Ni}$
1	283379.087	9114319.024	283374.959	9114323.308	4.128	-4.284
2	283472.691	9114302.361	283466.944	9114303.084	5.747	-0.723
3	283533.333	9114248.450	283527.347	9114251.792	5.986	-3.342
4	283643.706	9114293.786	283637.615	9114298.412	6.091	-4.626
5	283688.742	9114325.641	283685.679	9114326.936	3.063	-1.295
6	283610.567	9114439.289	283607.391	9114441.975	3.176	-2.688
7	283518.949	9114350.681	283513.518	9114353.435	5.431	-2.686
8	283556.015	9114438.370	283550.339	9114436.719	5.676	1.651
9	283506.484	9114451.775	283502.998	9114449.252	3.486	2.523
10	283429.290	9114363.426	283425.095	9114365.314	4.198	-1.888

O arquivo Planta Topográfica (2003) com curvas de nível, equidistantes de 1 m, gerado no sistema topográfico local, foi convertido para o mesmo sistema de referência geodésico da Planta Topográfica Cadastral (Datum: SAD-69, Elipsóide: UGGI 1967).

#### b) Transformação Afim

A partir do recorte da imagem *Quickbird* original (Formato *Geotif*, Datum: WGS-84, Elipsóide: WGS-84), realizou-se o registro e georreferenciamento da imagem *Quickbird* empregando o programa Spring 4.3.3. A correção geométrica da imagem foi efetuada realizando uma transformação de coordenadas afim bidimensional entre a geometria da imagem e uma geometria de referência definida pelo sistema de referência geodésico da Planta Topográfica Cadastral (Datum: SAD-69, Elipsóide: UGGI 1967).

No processo das transformações foram utilizados 10 pontos homólogos bem distribuídos sobre a área de estudo. O erro médio quadrático no georreferenciamento

foi de 1,2 pixels, equivalente a 0,72 metros.

### 3.2 Representação e cálculo dos volumes de solo

Nas Figuras 7 e 8 mostram-se os resultados obtidos com as modelagens digitais realizadas com os dados da Ortofotocarta de 1975 e Planta Topográfica de 2003, onde a área de estudo aparece delimitada com as linhas azuis.

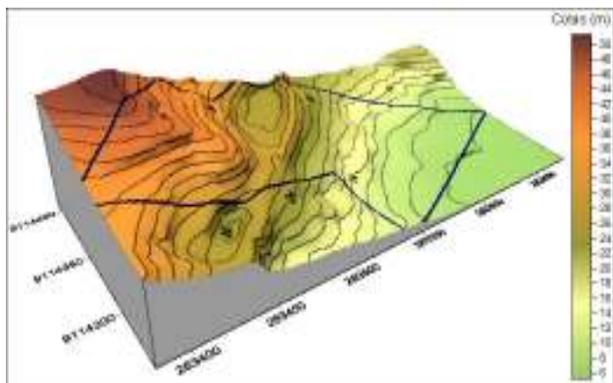


Fig. 7 – MDT oriundo da Ortofotocarta (1975).

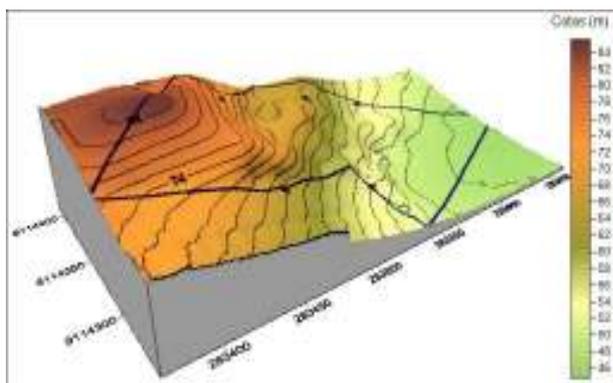


Fig. 8 – MDT oriundo da Planta topográfica (2003).

Os cálculos dos volumes da movimentação de solo resultaram nos seguintes dados:

Volume em 1975 = 40.242,556 m<sup>3</sup>;

Volume em 2003 = 24.055,772 m<sup>3</sup>;

Volume Deslocado (1975/2003) = 16.186,784 m<sup>3</sup>.

Nas Figuras 9 e 10 apresentam-se as curvas de nível envolvidas no processo de cálculo dos volumes encerrados nos MDTs de 1975 e 2003.

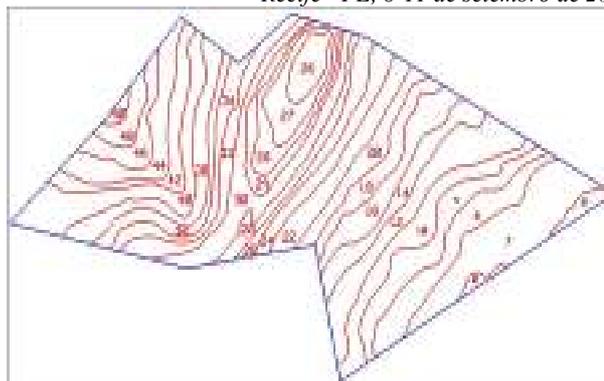


Fig. 9 – Área da Ortofotocarta para o cálculo do volume em 1975.



Fig. 10 – Área da Planta Topográfica para o cálculo do volume em 2003.

## 4. DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

As Ciências Geodésicas são ferramentas úteis na caracterização de uma área em risco natural, como a superfície de uma encosta em processo de deslizamento. Observou-se que se tornou prático à identificação e representação da superfície de uma encosta e posterior acompanhamento ao longo do tempo.

A localização da área de estudo na Ortofotocarta confeccionada em 1975 (oriunda de fotografias aéreas de 1973) somente foi possível com o uso do método híbrido da Transformação de Helmert (método numérico) somada à identificação de feições (método visual).

Não ocorreram problemas influentes de deformações nas superfícies resultantes nos modelos digitais de terreno, pois os componentes planimétricos foram homogeneizadas ao mesmo sistema de coordenadas juntamente com a componente altimétrica, resultante de cada época de levantamento, que migrou através das transformações planimétricas utilizadas.

Analisando a morfologia dos MDTs, mostrados nas Figuras 7 e 8, nota-se que ambos apresentaram perfeita correlação com o observado nos relevos representados pelas curvas de nível dos levantamentos de 1975 e 2003. Os modelos propiciam a análise da evolução do deslizamento de acordo com as mudanças de formas presentes na superfície da encosta, oferecendo ainda, a indicação das áreas que sofreram maior movimentação.

A comparação entre os modelos digitais de terreno gerados indica que ocorreram acentuadas mudanças na superfície em estudo, ocasionadas provavelmente pelos fenômenos físicos, naturais e as ações antrópicas presentes no decorrer desses 30 anos.

Outro dado importante, que pode ser utilizado para corroborar com esta constatação, é a grande quantidade de solo deslocado na área, ocasionados principalmente pelas ações antrópicas e deslizamentos de terra ocorridos a partir do ano 2000. Este volume de solo movimentado corresponde a aproximadamente 2700 carradas de um caminhão tipo caçamba de 6 m<sup>3</sup>.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, P. C. de. (2004). **Análise da suscetibilidade a escorregamentos: uma abordagem probabilística**. Tese de Doutorado, Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista. 187p.

BANDEIRA, A. P. N. (2003). **Mapa de risco de erosão e escorregamento das encostas com ocupações desordenadas no município de Camaragibe – PE**. Dissertação de Mestrado, Recife: Universidade Federal de Pernambuco - Engenharia Civil. 209p.

CARVALHO, P. R. C. de. (2003). **Estudo das distorções do sistema geodésico de referência da região metropolitana do Recife**. Dissertação de Mestrado, Recife: Universidade Federal de Pernambuco - Engenharia Cartográfica. 99p.

CASTRO, C. M. de.; PEIXOTO, M. N. DE O.; Rio, G. A. P. do. (2005). **Riscos ambientais e geografia: conceituações, abordagens e escalas**. Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ, Vol. 28-2 / 2005, Rio de Janeiro: UFRJ.

DE FREITAS, S. R. C; LAZZAROTTO, D. R; SLUTER C. R; Luz, R. T. (2004). **Avaliação da compatibilidade dos sistemas geodésicos de referência no Brasil**. In: Boletim de Ciências Geodésicas. Curitiba, v. 10, n. 2, p.225-239.

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**. Revista Brasileira de Geomorfologia, volume 2, nº 1, 51-71.

GONÇALVES, M. de L. de A. M. (2001). **Geração de modelo digital de terreno a partir de mapas digitais 3D: estudo de caso visando garantir o contexto geomorfológico com redução dos dados amostrais**. Dissertação de Mestrado, Curitiba: Universidade Federal do Paraná – Engenharia Cartográfica. 96p.

KAHMEN, H; FAIG, W. (1988). **Surveying**. Berlin: De Gruyter. 577p.

LUGNANI, J. B. (1987). **Introdução à fototriangulação**. Curitiba: Imprensa Universitária - UFPR. 134p.

RAMOS, V. M.; GUIMARÃES, R. F.; REDIVO, A. L.; JUNIOR, O. A. de C. (2003). **Mapeamento das áreas susceptíveis a escorregamentos rasos no subúrbio ferroviário de Salvador (BA), utilizando os parâmetros físicos diferenciados para cada classe de solo**. X Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, Rio de Janeiro – RJ, Brasil. Disponível em: <http://geografia.igeo.uerj.br/xsbgfa/cdrom/eixo3/3.4/198/198.htm>. Acesso em 20/07/07.

SANTOS, E. C. dos. (2006). **Tecnologias da geoinformação como instrumento na análise de risco de deslizamento**. Dissertação de Mestrado, Recife: Universidade Federal de Pernambuco – Engenharia Cartográfica. 63p.

SILVA, M. M.; COUTINHO, R. Q.; ALHEIROS, M. M. (2005). **Caracterização geológico-geotécnica de um deslizamento numa encosta em Camaragibe, Pernambuco**. IV COBRAE – Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas. Salvador, Bahia, Brasil. Vol.1. pp. 345-360.

SILVA, M. M.; COUTINHO, R. Q.; LACERDA, W. A. (2006). **Caracterização geotécnica de uma encosta em processo de movimento de massa em solo residual de granito e formação barreiras no município de Camaragibe – PE**. XIII COBRAMSEG – Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Curitiba, Paraná. Brasil. Vol. 4. pp. 2267-2272.

WOLF, P. R.; GHILANI, C. D. (1997). **Adjustment computations: statistics and least squares in surveying and GIS**. New York: John Wiley & Sons Inc. 3ª Ed. 564p.

WOLF, P. R.; GHILANI, C. D. (2006). **Elementary surveying: an introduction to geomatics**. Upper Saddle River: Prentice Hall. 11ª Ed. 916p.

WOLF, P. R.; DEWITT, B. A. (2000). **Elements of photogrammetry: with applications in GIS**. 3ª Ed. New York: McGraw-Hill. 608p.