

Análise do risco potencial à erosão em aterro de resíduos sólidos através de aerolevantamentos com veículo aéreo não tripulado e técnicas de álgebra de mapas

Analysis of the potential risk to erosion in solid waste landfill through aerial surveys with unmanned aerial vehicle and map algebra techniques

Alexandre Felipe Bruch¹

Angélica Cirolini²

Marciano Carneiro³

Marcos Phillipe Guimarães Faria⁴

Resumo: Na perspectiva da análise ambiental, uma das temáticas mais relevantes na atualidade está relacionada com a deposição de resíduos sólidos. Mesmo que a deposição seja feita de maneira correta, problemas geotécnicos podem ocorrer em projetos de aterros sanitários. Dessa forma, este trabalho tem como objetivo a análise do potencial risco à erosão no aterro sanitário desativado do município de Rosário do Sul/RS. Para tanto, primeiramente, foi realizado um reconhecimento de campo com o intuito de avaliar a existência de processos erosivos instalados e as possíveis áreas a serem atingidas. Consequente, foi realizado um levantamento de pontos de controle com receptor GNSS de dupla frequência, um aerolevantamento com VANT para o reconhecimento da área e a Modelagem Numérica da Superfície. Os dados fotogramétricos foram mosaicados no programa PhotoScan e exportados para o programa Spring onde foram gerados os mapas intermediários de orientação de vertentes, declividade, curvatura horizontal e vertical do relevo. Por fim, foi gerado o mapa de potencial risco à erosão através da ferramenta de álgebra de mapas. Os resultados demonstram que a declividade dos taludes é o fator que mais impacta no potencial à erosão do aterro sanitário, sendo que foram encontradas declividades maiores que 45% nos taludes com maior amplitude topográfica, podendo ocasionar processos erosivos e até rupturas de talude em locais, principalmente onde a curvatura horizontal é convergente e a vertical é côncava. Conclui-se nesta pesquisa que os taludes do aterro sanitário devem ser constantemente monitorados e os que apresentam processos erosivos instalados sejam revegetados na busca da estabilização das células. Deve-se também elaborar um plano de alerta para a área circunvizinha, visto a significativa área residencial a ser impactada pelo possível rompimento dos taludes, principalmente nas vertentes Nordeste, Leste e Sudeste.

Palavras-chave: Aterro Sanitário; Taludes; Risco à Erosão.

Abstract: From the perspective of the environmental analysis, one of the most relevant topics at the present time is related to the deposition of solid waste. Even if the deposition is done correctly, geotechnical problems can occur in landfill projects. In this way, this

-
- 1 Prof. Dr. da Universidade Federal de Pelotas (UFPel) no Centro das Engenharias - CENG e Coordenador Adjunto do Núcleo de Estudos de Tecnologias em Geociências da UFPel; E-mail: afbruch@gmail.com
 - 2 Profa. Dra. da Universidade Federal de Pelotas, RS, no Centro de Engenharias (CEng); E-mail: acirolini@gmail.com
 - 3 Doutorando no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Atualmente é professor adjunto do curso de Engenharia Civil e Arquitetura da Faculdade de Tecnologia (FTEC) em Porto Alegre; E-mail: marciano.carneiro@hotmail.com
 - 4 E-mail: marcosguimaraes@gmail.com

Recebido para publicação em 23/06/2019 e aceito em 15/12/2021

work has the objective of analyzing the potential risk to erosion in the disused sanitary landfill of the municipality of Rosário do Sul / RS. For that, a field survey was first carried out in order to evaluate the existence of erosive processes installed and the possible areas to be reached. Consequently, a survey of control points with GNSS receiver of double frequency, an aerolevantamento with VANT for the recognition of the area and the Numerical Modeling of the Surface was realized. The photogrammetric data were mosaicated in the PhotoScan program and exported to the Spring program where the intermediate maps of slope orientation, slope, horizontal and vertical slope of the relief were generated. Finally, a map of potential erosion risk was generated through the map algebra tool. The results show that the slope slope is the factor that most impacts the potential for erosion of the landfill, and slopes greater than 45% have been found in the slopes with greater topographic amplitude, being able to cause erosive processes and even slope ruptures at sites, mainly where the horizontal curvature is convergent and the vertical is concave. It is concluded in this research that the embankments of the landfill must be constantly monitored and those that have erosive processes installed are revegetated in the search of the stabilization of the cells. It is also necessary to elaborate an alert plan for the surrounding area, considering the significant residential area to be impacted by the possible breakdown of the slopes, mainly in the Northeast, East and Southeast slopes.

Keywords: Landfill; Slopes; Erosion Risk.

1 - INTRODUÇÃO

No mundo é crescente a geração de resíduos sólidos, mesmo com as constantes campanhas de redução do uso de embalagens ou da reciclagem. De acordo com o IBGE (2010), a geração de resíduos sólidos domiciliares cresceu mais de 20% nos últimos 17 anos, sendo que uma parte dos resíduos é depositada em terrenos sem controle geológico, geotécnico e sanitário, sendo considerados lixões. Na contramão desse cenário, em 2010, foi criada a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (BRASIL, 2010), a qual regulamenta a disposição de resíduos sólidos pelas administrações municipais (SCHULER, 2010).

EO PNRS de 2010 promoveu a implementação de aterros sanitários pelas prefeituras, sendo que em 2016 mais de 58% dos resíduos sólidos foram depositados corretamente (RODRIGUES e SILVA, 2018). Segundo Elk (2007), o melhor método de disposição de resíduos sólidos é através de um aterro sanitário. É uma obra de engenharia baseada em critérios técnicos, os quais buscam garantir a deposição de resíduos urbanos sem impacto ao ambiente ou à saúde pública.

O projeto de um aterro sanitário deve ser eficiente e seguro no controle físico-químico dos resíduos depositados e com estabilidade geotécnica, visando ao mínimo nível de manutenção após o encerramento das atividades. Para a construção de aterros sanitários, a NBR 8419 descreve as diretrizes técnicas dos elementos essenciais aos projetos de aterros, onde podemos citar a impermeabilização da base e superior, monitoramento ambiental e geotécnico, sistemas de drenagem de lixiviados e gases, manual de operação, descrição do uso futuro da área após o encerramento das atividades, entre outros (ELK, 2007). O monitoramento geotécnico contínuo é importante, porque a decomposição dos resíduos sólidos provoca a movimentação e acomodação das células do aterro sanitário e, conseqüentemente, podem ocorrer movimentos de massa.

Sendo assim, este trabalho busca avaliar o risco à erosão do aterro sanitário do Município de Rosário do Sul, corroborando o monitoramento geotécnico e avaliando o grau de risco ao escorregamento de taludes. Até a alguns anos atrás, o monitoramento dos taludes dos aterros sanitários era realizado com levantamentos topográficos convencionais.

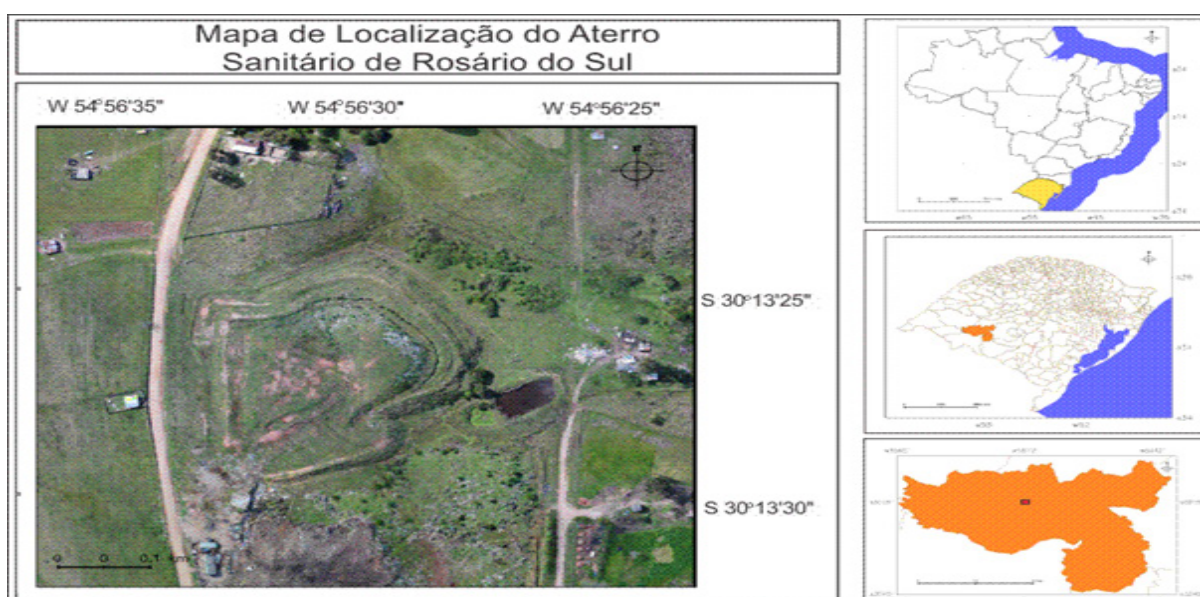
Com o desenvolvimento de sensores remotos de alta resolução espacial, houve um rápido incremento nos levantamentos das áreas potenciais à erosão em aterros sanitários, principalmente quando o principal problema está relacionado com a falta de cobertura vegetal de controle erosivo. Quando os problemas geotécnicos em aterros sanitários estão vinculados à estabilidade de taludes os aerolevantamentos com VANTS e os processamentos fotogramétricos podem fornecer produtos de altíssima resolução espacial horizontal e vertical, gerando Modelos Digitais de Elevação com precisão centimétrica e consequentes análises morfométricas acuradas.

2 - ÁREA DE ESTUDO

A região do aterro sanitário objeto deste estudo está localizada no município de Rosário do Sul/RS, delimitada pelas coordenadas geográficas de 54°56'22"O à 54°56'36"O e 30°13'20"S à 30°13'32"S (Figura 01). O aterro está situado a noroeste da zona urbana, próximo ao Distrito Industrial e da escola municipal da Divisa. O acesso é realizado a partir da BR290, sentido Rosário do Sul – Uruguaiiana, entrando à direita na estrada da divisa. Percorre-se, aproximadamente, 2,5km pela estrada da divisa até a estrada do matadouro, onde percorre-se mais 1,5km até o aterro sanitário.

A área está inserida na Província Geológica/Geomorfológica da Depressão Central. São terrenos de baixa altitude, suavemente ondulados, com o substrato compreendido por rochas sedimentares (SPGG, 2018). Os solos predominantes são os argissolos e neossolos, com profundidades de até 2m. Conforme o IBGE (2010), a população do município é de 39.707 habitantes, sendo que 67% possuem esgotamento sanitário e mais de 90% recolhimento de lixo domiciliar.

Figura 1. Localização da área de estudo e pontos amostrais das classes Cerrado, Pastagem e Babaçual.



3 - METODOLOGIA

Para a realização da pesquisa, foram realizadas 5 etapas de campo e laboratório: Reconhecimento de campo, Levantamento de Pontos de Controle com GNSS, Aerolevantamento Fotogramétrico com VANT, Processamento Fotogramétrico, Processamento em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG).

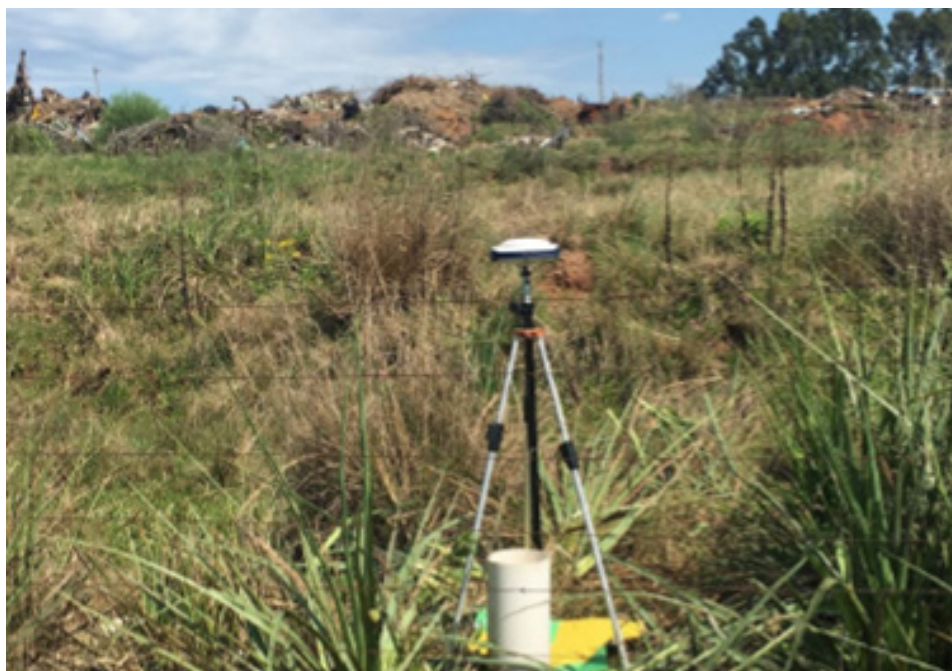
3.1 - Reconhecimento de Campo

Foi realizado um trabalho de campo em 18 de setembro de 2018, quando foram reconhecidas as feições erosivas presentes no aterro sanitário, as áreas com solo exposto, as drenagens e residências circunvizinhas. Também foi analisado o método construtivo, o sistema de drenagem e a integridade do aterro sanitário, buscando inferir os riscos à ruptura de talude e as possíveis áreas a serem atingidas.

3.2 - Levantamento de Pontos de Controle

Foram rastreados em campo 10 pontos de controle, para tanto utilizou-se dois receptores ProMark 500 GNSS L1/L2 (Figura 02). O rastreamento foi realizado no modo estático em período superior a uma hora, com intervalo de registro de 2 segundos. O pós processamento para a correção dos erros foi realizado através do sistema de Posicionamento por Ponto Preciso (PPP) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). O sistema de referência geodésico utilizado foi o SIRGAS 2000.

Figura 02 - Rastreamento de ponto de controle com receptor GNSS



Fonte: Levantamento de Campo dos autores (2018).

No PPP foram utilizadas as órbitas finais, com o emprego das constelações GPS e Glonass. O rastreamento com receptores de dupla frequência L1/L2 com as referidas órbitas gera precisões planialtimétricas superiores a 4cm (IBGE, 2017). Na tabela 01, constam os pontos rastreados em campo.

Tabela 01 - Pontos de Controle rastreados em campo

<i>Ponto</i>	<i>Latitude (S)</i>	<i>Longitude (W)</i>	<i>Z (m)</i>
1	30° 13' 38.208"	54° 56' 27.770"	141,982
2	30° 13' 27.232"	54° 56' 24.834"	122,877
3	30° 13' 28.118"	54° 56' 24.426"	123,065
4	30° 13' 32.669"	54° 56' 32.229"	136,481
5	30° 13' 33.270"	54° 56' 25.508"	129,608
6	30° 13' 37.030"	54° 56' 34.844"	134,013
7	30° 13' 24.899"	54° 56' 30.959"	130,639
8	30° 13' 24.902"	54° 56' 30.976"	130,721
9	30° 13' 24.500"	54° 56' 37.735"	125,288
10	30° 13' 26.159"	54° 56' 28.850"	141,190

Fonte: Elaborado pelos autores (2019).

3.3 - Aerolevanteamento Fotogramétrico com VANT

Nesta pesquisa, utilizou-se um Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) de asa rotativa. O modelo utilizado em campo foi o Phantom 4 Advanced, fabricado pela empresa chinesa DJI. O VANT é um equipamento de pequeno porte remotamente controlado que possui uma câmera fotográfica acoplada que gera imagens de alta resolução. As características do VANT são as seguintes:

- Peso em ordem de voo: 1368 gramas
- Autonomia de voo: 28 minutos
- Distância máxima de alcance de rádio transmissor: 5 km
- Bateria: LiPo4s de 5870 mAH
- Câmera: Sensor CMOS de 20 Mega pixels
- Dimensão máxima de cada foto: 5472 x 3648 pixels
- Posicionamento Espacial: GPS+GLONASS

Para aumentar a precisão do levantamento, principalmente manter a taxa de sobreposição das imagens, altura e velocidade de voo, foi criado um plano de voo (Figura 03) através do programa gratuito DroneDeploy, com as seguintes características:

- Altitude de voo: 100 metros
- Sobreposição lateral das faixas: 60%
- Sobreposição frontal das fotos: 70%
- Azimute de voo: 85°
- Velocidade máxima: 15 m/s
- Visada da câmera: Nadir

- Resolução espacial: 2,5 cm/pixel
- Tempo de voo: 9 minutos e 24 segundos

Figura 03 - Plano de voo criado no programa *DroneDeploy*



Fonte: Elaborado pelos autores (2019).

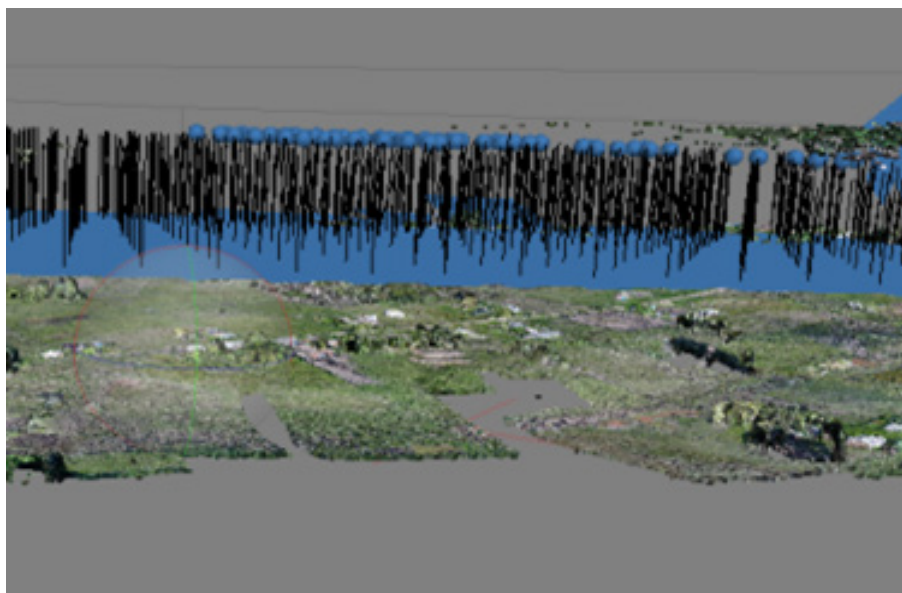
3.4 - Processamento Fotogramétrico

Para os processamentos das imagens aéreas, foi utilizado o programa PhotoScan Profissional desenvolvido pela empresa Agisoft, conforme a proposta de Jaud et al. (2016). O PhotoScan permite a criação de ortomosaicos com alta resolução espacial através da técnica de mosaicagem, com base nas semelhanças entre as imagens (BRUCH et al., 2019).

O processo começa com uma avaliação visual da qualidade das imagens e dos registros do intervalômetro. A próxima etapa foi à importação das imagens e o seu (Figura 04), onde o programa define os parâmetros da câmera utilizada, o Ponto Principal (pp) e a rotação das fotos. Também foi verificado se toda área havia sido imageada durante o levantamento. Apesar das imagens já possuírem um registro com as coordenadas geográficas de localização, elas foram corrigidas através de georreferenciamento com os 10 pontos materializados em campo. Esse processo foi realizado para aumentar a precisão do ortomosaico.

Por conseguinte, é gerada a nuvem de pontos homólogos e construído o Modelo Digital de Elevação (MDE). Também foi gerado um ortomosaico para o conhecimento da área. Para a geração desses produtos, o PhotoScan utiliza a tecnologia multiview, a qual permite processar imagens arbitrárias, com variação de sobreposição, desde que existam pontos homólogos em imagens distintas (BRUCH et al., 2019). Por fim, o ortomosaico e o MDE foram exportados no formato Tagget Imagem File Format (TIFF), com resolução espacial de 2,5 cm.

Figura 04 - Processamento das imagens no PhotoScan com alinhamento de faixas



Fonte: Elaborado pelos autores (2019).

3.5 - Processamento em ambiente SIG

Para a geração dos mapas de orientação de vertente, curvatura horizontal do relevo, curvatura vertical das vertentes, a declividade do terreno, a ponderação dos fatores e, conseqüentemente, o mapa de risco à erosão, foram utilizados os SIGs Quantum GIS (Qgis 3.4.3) e o Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas (SPRING 5.5.1).

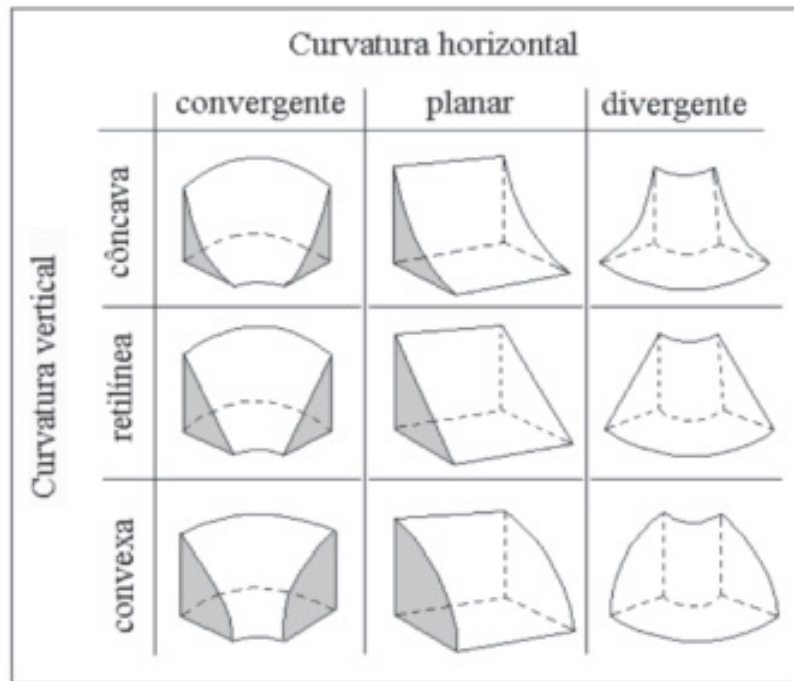
3.5.1 – Curvatura Horizontal e Vertical

A curvatura horizontal do relevo é entendida como a convergência ou divergência de fluxos em uma determinada superfície do terreno. Conforme Valeriano (2008), a curvatura horizontal é a derivada de segunda ordem das curvas de nível, podendo ser descrita como a variação da orientação das vertentes ao longo de uma determinada distância. Em testes realizados por Valeriano (2008) utilizando imagens SRTM, valores negativos ($-0,1$) são adotados para convergências, próximos a zero ($-0,1$ a $0,1$) como planares e positivos ($>0,1$) como divergências.

A curvatura vertical expressa o caráter convexo, plano ou côncavo do terreno analisado a partir de um perfil, extraída da segunda derivada da altitude. Machado (2014) também relaciona a curvatura vertical com a taxa de variação de declividade, onde é influenciada por fatores como o clima, substrato rochoso, tipo de solo, entre outros. O resultado da matriz da curvatura vertical varia de valores negativos ($<-0,1$ são vertentes convexas), próximos a zero (entre $-0,1$ e $0,1$ são

vertentes retilíneas) e positivos ($>0,1$ são vertentes côncavas) (VALERIANO, 2008). A figura 05 apresenta os perfis esquemáticos das curvaturas horizontal e vertical do relevo.

Figura 05 - Curvatura horizontal e vertical do relevo



Fonte: Valeriano (2008, p. 43).

No QGis foram geradas as curvaturas horizontais e verticais do relevo. Primeiramente, foi importado o MDS no formato TIFF e no terminal de comando GRASS incorporado ao QGis, aplicada a ferramenta `r.slope.aspect`. De posse das matrizes da curvatura horizontal e vertical, elas foram exportadas no formato TIFF importadas no programa SPRING 5.5.1. No SPRING as matrizes foram fatiadas em classes, conforme a proposta de Valeriano (2008) e ponderadas, conforme a proposta de Rodrigues e Silva (2018).

3.5.2 – Orientação de Vertentes

A orientação das vertentes é expressa pelo ângulo azimutal correspondente à maior inclinação do terreno no sentido descendente (VALERIANO, 2008). Em campo é observada pela linha de escoamento do fluxo em uma vertente a ser determinada com uma bússola. Em representação tridimensional, a orientação de vertentes é vista sob um esquema de relevo sombreado. Em geral é expressa em graus, variando de 0° à 360° e, posteriormente, classificados em oito quadrantes, conforme tabela 02.

Cada quadrante expressa o potencial deslocamento de movimentos gravitacionais em diferentes orientações. Posteriormente, são atribuídos pesos a cada orientação de vertentes, para os quais, contabilizadas as possíveis áreas a serem atingidas, tipo de uso e ocupação da terra e proximidade com o local do evento.

Tabela 02 - Orientação de vertentes conforme o ângulo azimutal

<i>Quadrante</i>	<i>Azimute</i>
Norte	338° - 023°
Nordeste	023° - 068°
Leste	068° - 113°
Sudeste	113° - 158°
Sul	158° - 203°
Sudoeste	203° - 248°
Oeste	248° - 293°
Noroeste	293° - 338°

Fonte: Elaborado pelos autores (2019).

Cada quadrante expressa o potencial deslocamento de movimentos gravitacionais em diferentes orientações. Posteriormente, são atribuídos pesos a cada orientação de vertentes, para os quais, contabilizadas as possíveis áreas a serem atingidas, tipo de uso e ocupação da terra e proximidade com o local do evento.

3.5.3 - Declividade

A declividade é definida como o ângulo de inclinação do relevo, tendo como referência um plano horizontal. O resultado é expresso em ângulos de 0 a 90°, ou em porcentagem de zero ao infinito. Segundo Valeriano (2008), o cálculo da declividade é o resultado da primeira derivada da elevação em relação à distância horizontal e o resultado depende do intervalo de derivação ou a distância entre os pontos altimétricos. O cálculo da declividade em porcentagem é realizado com base na equação 01, que corresponde à razão da distância vertical (dV) e a distância horizontal (dh), multiplicado por 100.

$$D = (dV/dH)*100 \quad (01)$$

Cabe destacar a importância que a declividade apresenta no cálculo da erosão, pois, conforme Carmo (2014), quanto maior a declividade maior o escoamento e transporte. Portanto, para a elaboração do mapa de declividades, foi utilizado o programa SPRING onde, primeiramente, converte-se o MDS em uma grade de declividade em porcentagem. As declividades do terreno são reclassificadas em 8 classes, conforme a proposta de Rodrigues e Silva (2018).

3.5.4 – Álgebra de Mapas

A técnica da álgebra de mapas foi utilizada primeiramente para atribuir peso a cada uma das classes dos 4 fatores integrantes (declividade, orientação de vertentes, curvatura horizontal

e vertical do relevo) da carta de risco à erosão. Foram atribuídos valores as classes, variando de 0 a 10 conforme, a proposta de Bispo et al. (2011), Alvarenga et al. (2013), Carmo (2014), Effgen (2015), Rodrigues e Silva (2018). Por fim, as 4 matrizes dos fatores integrantes foram multiplicadas com os pesos ponderados por Rodrigues e Silva (2018). A figura 06 apresenta a álgebra de mapas utilizada para a multiplicação das matrizes.

Figura 06 - Álgebra de Mapas no SPRING com a multiplicação ponderada de matrizes.

```
{
Numerico HORIZONTALPONDERA ("HORIZONTALPONDERA"), VERTICALPONDERA ("VERTICALPONDERA"),
OVPONDERA ("OVPONDERA"), CLINOPONDERA ("CLINOPONDERA"), EROSAO2 ("EROSAO2");
HORIZONTALPONDERA = Recuperar (Nome = "HORIZONTALPONDERA");
VERTICALPONDERA = Recuperar (Nome = "VERTICALPONDERA");
OVPONDERA = Recuperar (Nome = "OVPONDERA");
CLINOPONDERA = Recuperar (Nome = "CLINOPONDERA");
EROSAO2 = Novo (Nome = "EROSAO2", ResX=0.50, ResY=0.50);
EROSAO2 =
((HORIZONTALPONDERA*0.2)+(VERTICALPONDERA*0.15)+(OVPONDERA*0.25)+(CLINOPONDERA*0.4));
}
```

Fonte: Elaborado pelos autores (2019).

4 - Resultados

No aerolevanteamento com VANT, o primeiro produto gerado a partir das fotos aéreas é o mosaico ortorretificado (Figura 07). Esse produto demonstra as posições ortográficas verdadeiras, ou seja, as feições são projetadas ortogonalmente, com escala constante, sem deslocamentos causados pela inclinação da câmera ou do relevo, permitindo assim a extração de informações métricas (WOLF, 1983).

Figura 07 - Mosaico Fotogramétrico da área de estudo



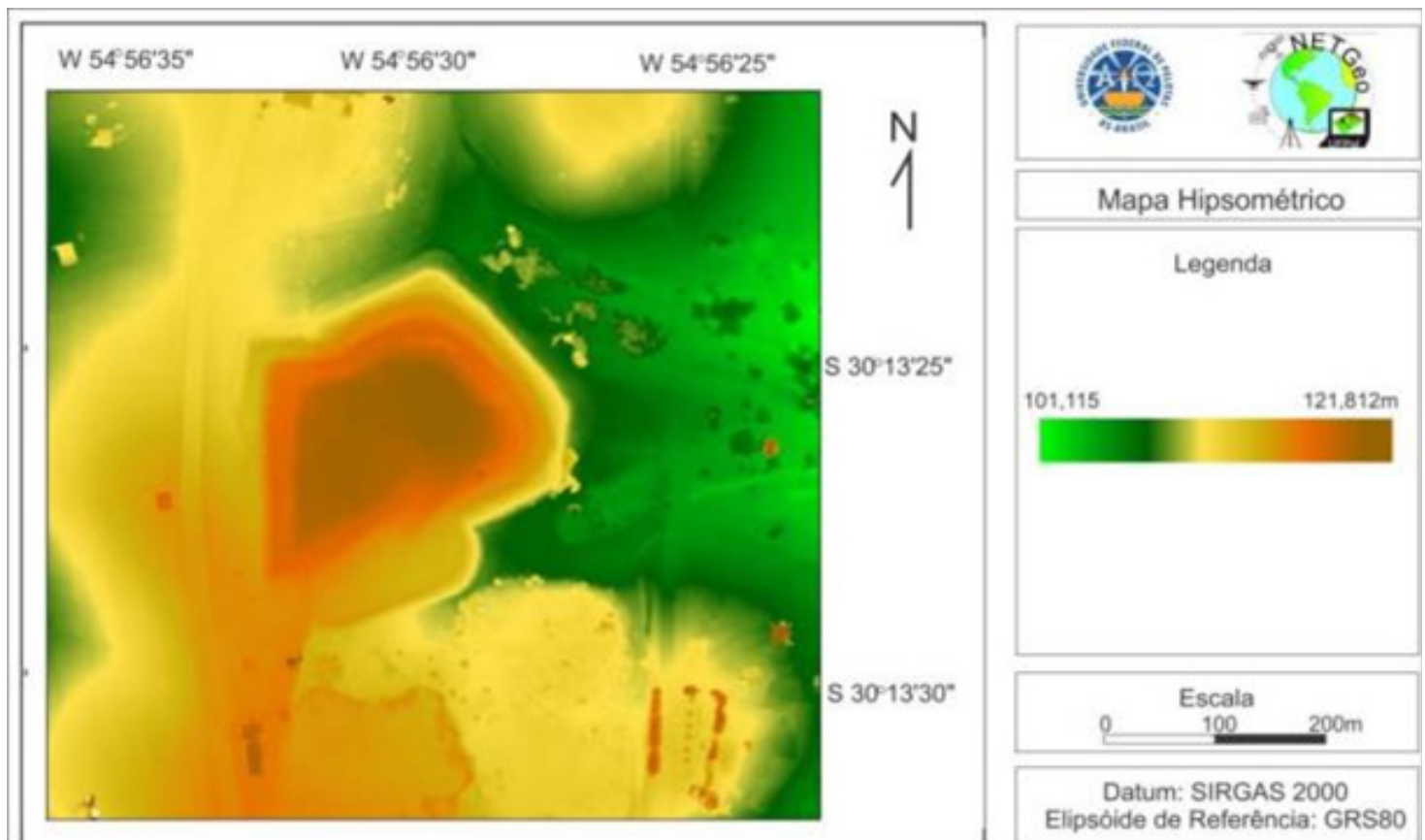
Fonte: Elaborado pelos autores (2019).

Na área de estudo, o aerolevanteamento com VANT resultou em 888 fotos aéreas, as quais foram processadas e geraram um ortomosaico com resolução espacial de 2,5 cm. A altíssima resolução do ortomosaico permitiu neste trabalho, identificar feições erosivas diminutas (maiores que 10 cm), as quais não poderiam ser identificadas e mapeadas com os produtos orbitais atuais. O aerolevanteamento também resultou no MDE da área, onde a resolução espacial é de 2,5 cm e a precisão altimétrica é centimétrica.

4.1 - Hipsometria

O mapa hipsométrico (Figura 08) confeccionado a partir do MDE demonstra a amplitude altimétrica da área de estudo, com altitudes variando entre 101,115 e 121,812 metros. As menores altitudes estão localizadas na parte leste da área, nos vales das drenagens de primeira ordem da margem esquerda do rio Santa Maria. Já as maiores altitudes estão localizadas no topo do aterro sanitário. Em termos de amplitude topográfica da célula do aterro, a menor altitude (106,547m) está localizada na base do flanco leste e a maior no topo do aterro com 121,812 metros, com amplitude 15,265 metros.

Figura 08 - Mapa hipsométrico da área de estudo



Fonte: Elaborado pelos autores (2019).

4.2 - Clinografia

As declividades foram enquadradas em 6 classes, conforme a proposta por EMBRAPA (1979), a qual é fundamentada em parâmetros morfométricos (Tabela 03).

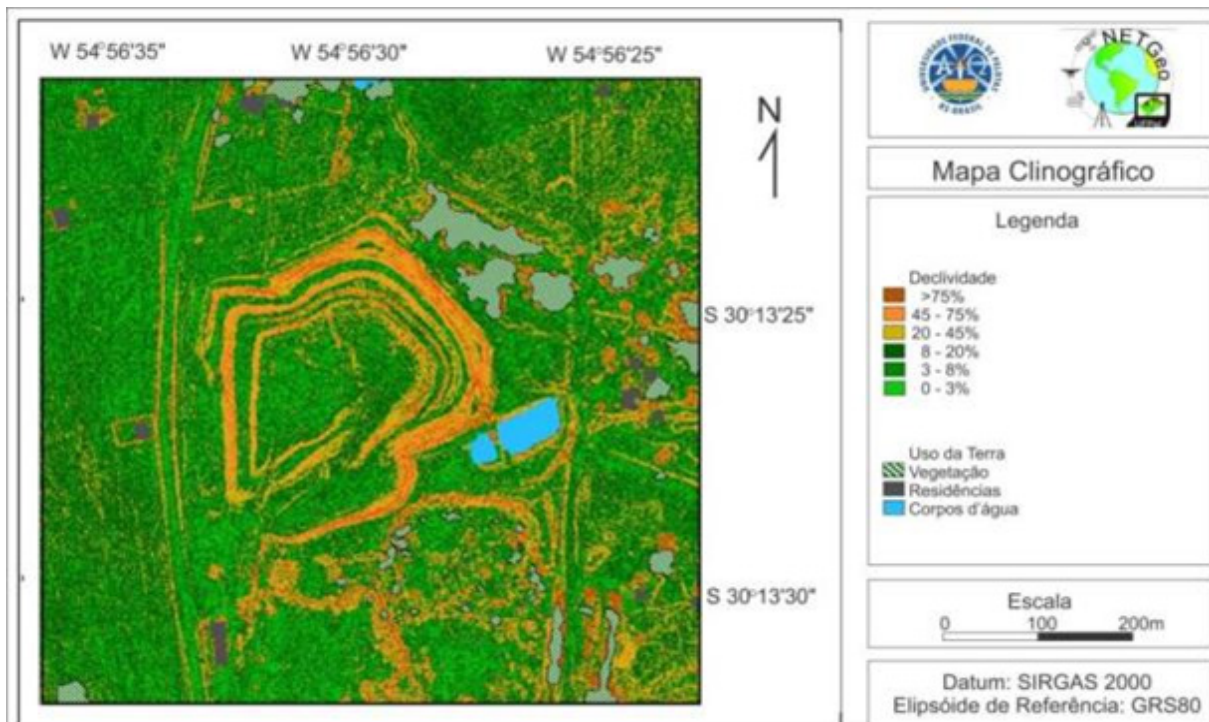
Tabela 03 - Parâmetros morfométricos para classificação das classes de relevo

Classe de Relevo	Declividade em %
<i>Plano</i>	0 – 3
<i>Suave Ondulado</i>	3 – 8
<i>Ondulado</i>	8 – 20
<i>Forte Ondulado</i>	20 – 45
<i>Montanhoso</i>	45 – 75
<i>Escarpado</i>	>75

Fonte: adaptado de EMBRAPA (1979)

A área está inserida na Depressão Central do Rio Grande do Sul, a qual expõe uma sequência de terrenos suavemente ondulados, com baixa altitude, com média a 100m (GAZOLA, 2018). Com base nas declividades (Figura 09), podemos classificar a área de estudo em quatro regiões distintas. A primeira são os terrenos Planos (0-3%) e Suave Ondulados (3-8%) nas regiões adjacentes ao aterro sanitário, consideradas formas clássicas encontradas na Depressão Central.

Figura 09 - Mapa clinográfico da área de estudo



Fonte: Elaborado pelos autores (2019).

A segunda área são terrenos predominantemente Planos (0-3%) localizados no topo do aterro sanitário e na área fonte de saibro para estabilização do depósito. A terceira área é composta por duas colinas Onduladas localizadas na região leste da área de estudo, com declividades variando entre 8 e 20%.

Por fim, a quarta área é composta pelos taludes do aterro sanitário e da área fonte de saibro, onde no primeiro, as declividades variam de 20 a 75% predominantemente, e em porções menores, com declividades maiores que 75%. Os taludes mais representativos dessas declividades estão localizados nas vertentes Nordeste, Leste e Sudeste do aterro sanitário.

Segundo Batista (2014), declividades elevadas superiores a 20%, favorecem os movimentos de massa, principalmente os relacionados à ação gravitacional, do que sobre a erosão propagada pela componente hidráulica. Já nos taludes da área fonte de saibro, as declividades predominantes são superiores a 75% com morfologia Escarpada.

Visto a altíssima resolução espacial do MDE extraído do aerolevante com VANT, em alguns locais, principalmente na região leste e central da área de estudo, ocorrem continuidades longitudinais com alta declividade, relacionadas aos taludes das estradas circundantes ao aterro sanitário. Essas áreas foram desconsideradas da análise de risco, porque apresentam pequena amplitude topográfica (menor que 1m).

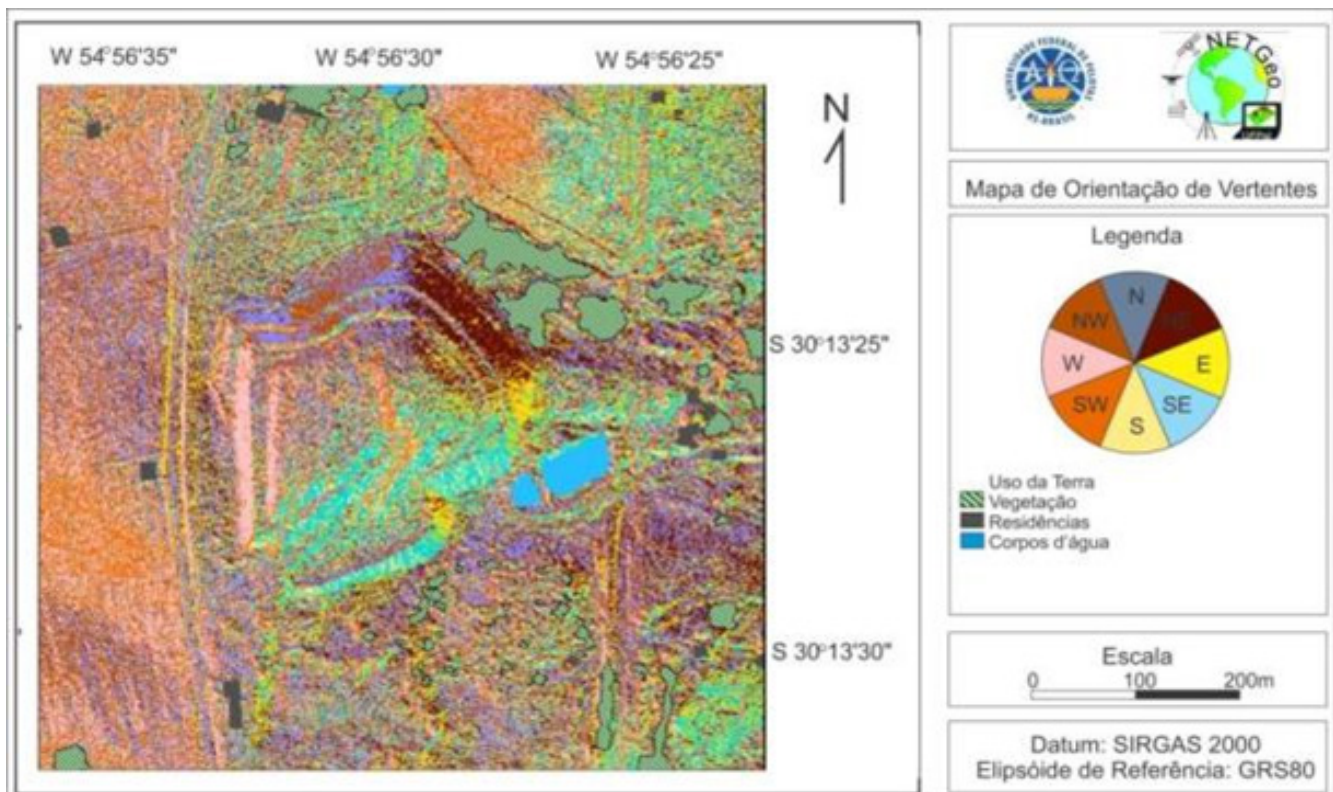
4.3 - Orientação de Vertentes

A orientação das vertentes de um aterro sanitário depende da geometria construtiva das células e da topografia do terreno original. Geralmente, em terrenos Suavemente Ondulados até Fortemente Ondulados, sugere-se o uso do método de depósito em rampa (BENVENUTO, 2012). Nesse método, a deposição dos resíduos é realizada na encosta, dando origem a uma célula prismática.

Na área de estudo, a célula do aterro foi construído pelo método do depósito em rampa, até o nível de deposição da cota máxima do terreno. A partir dessa cota, o método utilizado passou a ser o de depósito em área, com geometria piramidal.

A mudança de métodos geométricos de deposição condicionaram as diferentes direções de Orientação e Vertentes (Figura 10). Na metade inferior da célula do aterro, ocorrem as orientações Noroeste, Leste, Nordeste e Sudeste, predominando as duas últimas direções, tanto em amplitude topográfica quanto continuidade espacial. Já na metade superior do aterro, a geometria piramidal conduz a múltiplas Orientações de Vertentes, sendo que predomina a direção Oeste pela limitação que a estrada municipal impõe a expansão do aterro.

Figura 10 - Mapa de Orientação de Vertentes



Fonte: Elaborado pelos autores (2019).

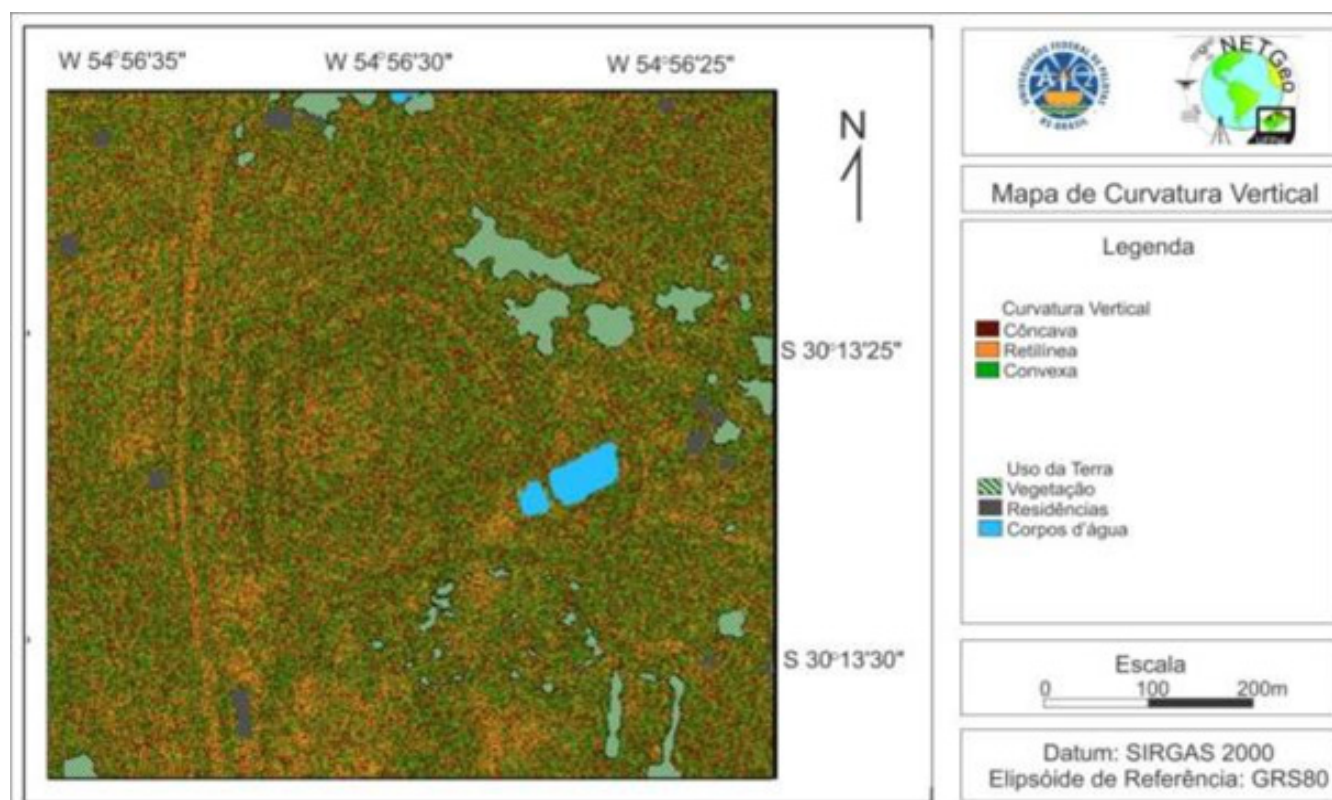
4.4 - Curvatura Vertical das Vertentes

O mapeamento da curvatura vertical das vertentes refere-se à avaliação da geometria do terreno visualizado em perfil sendo classificado em côncavo, retilíneo ou convexo. Segundo Fernandes e Amaral (1996), a análise estatística dos movimentos de massa ocorridos no mundo demonstra que a maioria dos eventos ocorre em áreas com curvatura vertical côncava ou *Hollows*.

Um dos problemas encontrados na geração da curvatura vertical das vertentes foi a elevada precisão gerada pelo MDE, pois a resolução espacial de 2,5 cm da matriz gera uma exagerada quantidade de informações, dificultando a visualização e interpretação dos dados da pesquisa. Sendo assim, qualquer mudança na geometria da vertente superior a 5 cm (2 pixels) gera uma mudança de classe, consequentemente a matriz resultante é altamente dispersa em classes. Mas, apesar da matriz resultante não apresentar fácil identificação de classes, a precisão de mapeamento é elevada, acrescentando confiabilidade MDS e conseguinte, ao mapa de vulnerabilidade à erosão.

Sendo assim, o mapa de curvatura vertical das vertentes (Figura 11), demonstra a alternância de classes da área de estudo. Nas áreas adjacentes ao aterro sanitário, o predomínio da curvatura das vertentes é retilíneo, principalmente nas cotas mais elevadas do terreno. O predomínio retilíneo também ocorre no topo do aterro sanitário. Já nos taludes do aterro sanitário existe uma significativa alternância entre as classes, principalmente entre as curvaturas verticais côncavas e convexas, conforme pode ser observado na figura 11.

Figura 11 - Mapa de Curvatura Vertical das Vertentes



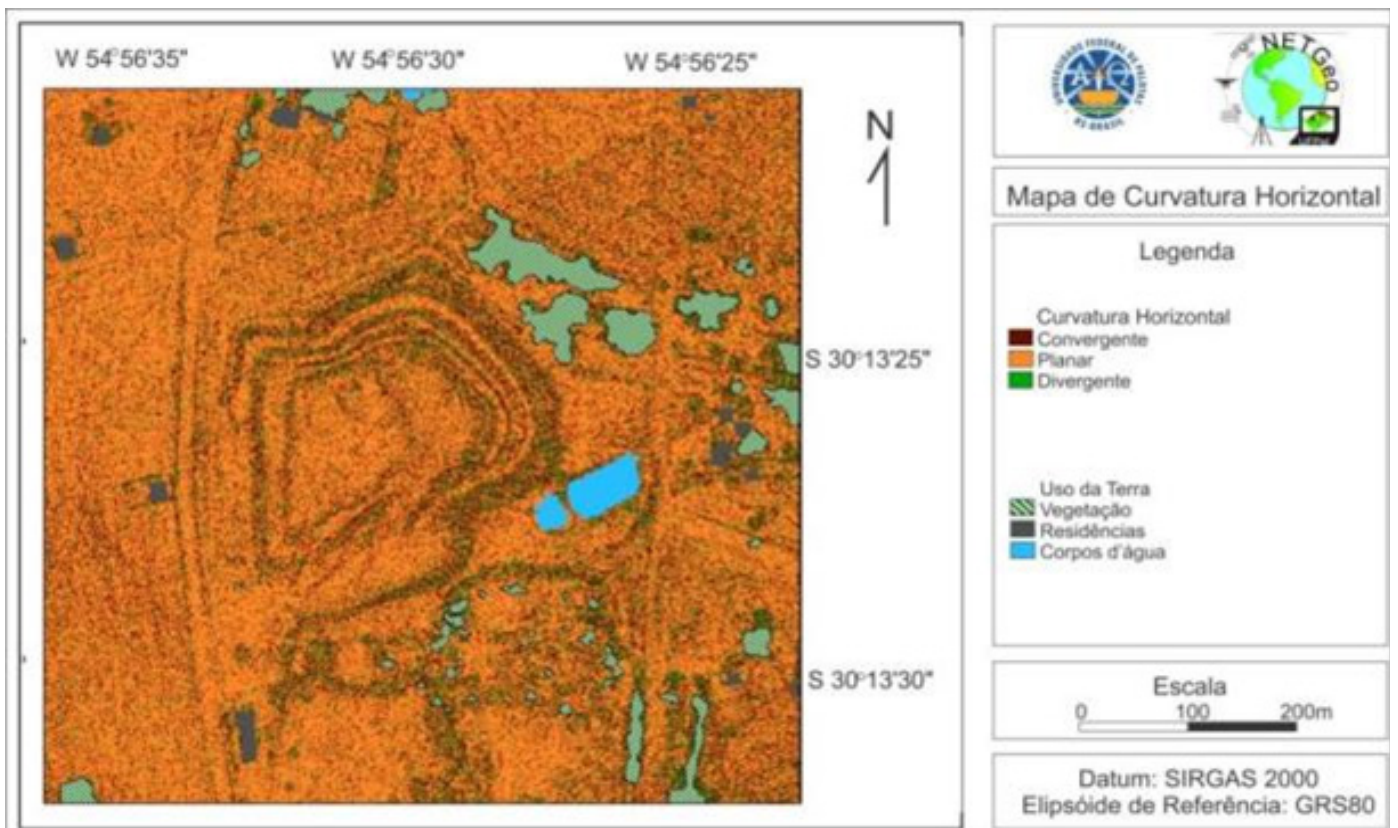
Fonte: Elaborado pelos autores (2019).

4.5 - Curvatura Horizontal do Relevos

A curvatura horizontal do relevo também apresentou elevada dispersão de classes em função da resolução espacial da matriz. Mas, na figura 12, pode-se observar que o padrão da área de estudo é planar com tendências divergentes apenas nos flancos, principalmente no setor da célula do aterro que apresenta formato piramidal.

No restante da célula do aterro (metade inferior), predomina a curvatura horizontal convergente, principalmente por causa das micro ravinas que se desenvolvem nos taludes. Também ocorrem locais com curvatura horizontal convergente em áreas adjacentes ao aterro, principalmente na parte leste e sudoeste, pois são terrenos mais inclinados, favorecendo a instalação de micro ravinas.

Figura 12 - Mapa de Curvatura Horizontal do Relevo



Fonte: Elaborado pelos autores (2019).

4.6 - Carta de Avaliação do Risco Morfológico à Erosão

A carta de avaliação de risco morfológico à erosão reflete a potencial instalação de processos erosivos laminares e lineares. Para a confecção da carta, foi realizada a técnica de álgebra de mapas sobre as quatro variáveis geomorfométricas descritas anteriormente.

Para a ponderação das variáveis integrantes da carta, foram atribuídos pesos, conforme trabalhos desenvolvidos por Bispo et al (2011), Alvarenga et al (2013), Carmo (2014), Effgen (2015) e Rodrigues e Silva (2018). Cabe salientar que podem ser inseridas outras variáveis e pesos na matriz, conforme disponibilidade de dados, como por exemplo, de compactação e coesão do solo. Sendo que este trabalho concentra-se em parâmetros geomorfométricos, com referenciais quantitativos baseados em pesquisas renomadas conforme autores supracitados.

Os mapas de declividade, curvatura vertical, curvatura horizontal e de orientação de vertentes tiveram suas classes ponderadas com pesos que variam de 0 a 10, com a probabilidade à erosão ser classificada de menor a maior. Os pesos atribuídos às classes podem ser observados na tabela 04.

Tabela 04 - Pesos atribuídos para cada atributo das variáveis

<i>Variável</i>	<i>Atributo</i>	<i>Peso</i>
<i>Declividade</i>	0 – 3%	0
	3 – 8%	2
	8 – 20%	4
	20 – 45%	6
	45 – 75%	8
	> 75%	10
<i>Curvatura Vertical</i>	Convexa (-1 até -0,1)	3
	Retilínea (-0,1 até 0,1)	6
	Côncava (0,1 até 1,0)	9
<i>Curvatura Horizontal</i>	Divergente (0,1 até 1,0)	3
	Planar (-0,1 até 0,1)	6
	Convergente (-0,1 até -1,0)	9
<i>Orientações de Vertentes</i>	Oeste	1
	Noroeste	3
	Sudoeste	3
	Sul	5
	Norte	7
	Sudeste	8
	Nordeste	9
	Leste	10

Fonte: adaptado de Rodrigues e Silva (2018).

Através da álgebra de mapas, também foram ponderados os pesos de influência de cada um dos quatro fatores mapeados. Os pesos foram determinados de acordo com o grau de importância que uma determinada variável influencia no processo erosivo, conforme pode ser constatado na tabela 05.

Tabela 05 - Pesos de influência para cada variável

<i>Variável</i>	<i>Peso de Influência (%)</i>
<i>Declividade</i>	40
<i>Orientação de Vertentes</i>	25
<i>Curvatura Horizontal</i>	20
<i>Curvatura Vertical</i>	15

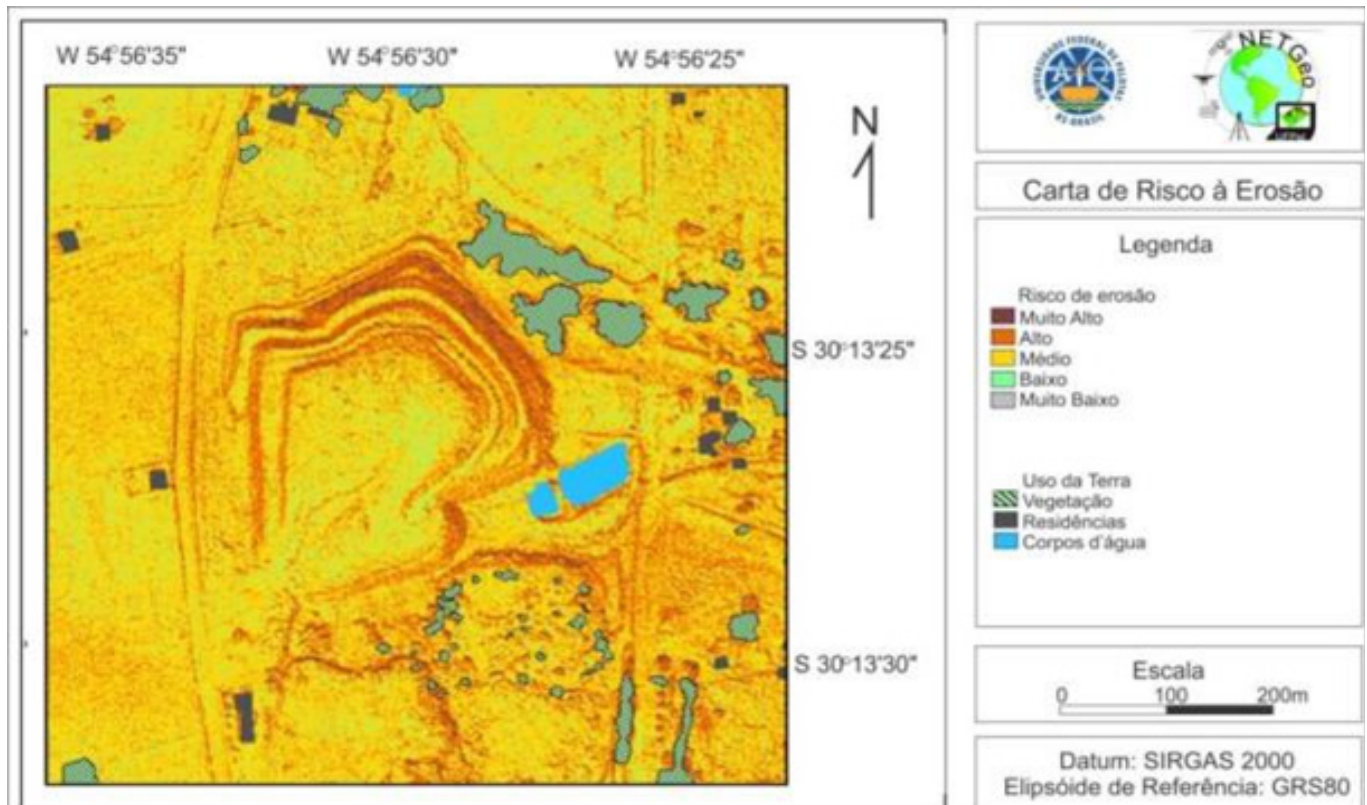
Fonte: adaptado de Rodrigues e Silva (2018).

Com base nos pesos de influência apresentados na tabela 05, pode-se elaborar a equação 2.

$$Risco = \{(Decliv. * 0.40) + (Or. Vert. * 0.25) + (Curv. Horiz. * 0.20) + (Curv. Vert. * 0.15)\} \quad (2)$$

O resultado da soma das matrizes ponderadas com os pesos gerou a carta de risco de avaliação de risco morfológico à erosão, onde foram encontrados os graus de risco muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto (Figura 13). Também foram calculadas as áreas resultantes de cada classe de risco, conforme tabela 06.

Figura 13 - Carta de avaliação de risco morfológico à erosão



Fonte: Elaborado pelos autores (2019)

Tabela 06 – Quantificação de áreas com risco à erosão

<i>Nível de Risco a Erosão</i>	<i>Área (m²)</i>	<i>Área (%)</i>
<i>Muito Baixo</i>	4,75	0,0039
<i>Baixo</i>	9.935,50	8,1005
<i>Médio</i>	77.947,75	63,5517
<i>Alto</i>	31.171,75	25,4147
<i>Muito Alto</i>	3.592,75	2,9292
<i>Total</i>	122.652,50	100

Fonte: Elaborado pelos autores (2019)

Os locais mapeados com o grau de risco muito baixo estão localizados, principalmente, no topo do aterro sanitário, ocupando uma área de apenas 4,75m². Esses locais se assemelham a um tabuleiro, onde a declividade é mínima, assim como a curvatura horizontal e vertical e a orientação de vertentes.

Já o grau de risco baixo está disseminado pela área de estudo, mas principalmente nas regiões planas adjacentes ao aterro sanitário e no topo da célula, ocupando uma área de 9.935,50m². Nas áreas ao entorno do aterro, principalmente na porção oeste, prevalece a ocorrência de colinas com vertentes em rampa alongadas, convexas e curvaturas horizontais divergentes, favorecendo assim a dispersão do escoamento superficial.

O grau de risco médio é o que prevalece na maior parte da área de estudo, com 77.947,75m². Também é uma classe que se apresenta disseminada pela área de estudo, predominando a convergência das classes intermediárias dos quatro fatores ponderados. Predominam declividades de 3 a 8%, com curvaturas verticais retilíneas e horizontais planares e orientação de vertentes com face noroeste, oeste, sudoeste e sul. Em geral, são terrenos representados por formas em colinas, principalmente nos setores de meia vertente ao topo e também nos patamares planos intermediários do aterro sanitário.

O grau de risco alto está relacionado principalmente às áreas com alta declividade, as quais são referentes aos taludes do aterro sanitário e das estradas adjacentes, ocupando 31.171,75 m². Em geral, na área do aterro, apresentam declividade entre 45 e 75%, curvatura vertical retilínea ou côncava, curvatura horizontal convergente e orientações de vertente Norte, Sudeste e Nordeste. Já nas estradas adjacentes a curvatura vertical tende à retilínea, a curvatura horizontal à planar, as orientações das vertentes são preferencialmente noroeste, sudoeste e Norte, mas a declividade é superior a 75%, visto que são cortes de estradas.

Por fim, o grau de risco muito alto está relacionado aos pesos máximos dos atributos utilizados, sendo que nessas áreas predominam declividades superiores a 75%, com curvatura vertical côncava, a curvatura horizontal é convergente e a orientação das vertentes é leste. Essa classe é representada principalmente pelos taludes inferiores do aterro sanitário, onde existe a alternância de patamares de pequena amplitude vertical (<20cm), formando um conjunto de degraus de abatimento. Essa sequência de degraus leva a sucessivas mudanças nas curvaturas verticais e na declividade, gerando linhas de contorno com grau de risco muito grande à erosão.

Também se deve salientar que a carta de risco à erosão apresenta a representação de classes de uso da terra, com as águas superficiais, as residências e a vegetação arbórea. Isso porque elas geram respostas irrealistas para a matriz de interpolação, devendo-se desconsiderá-las na avaliação da suscetibilidade à erosão.

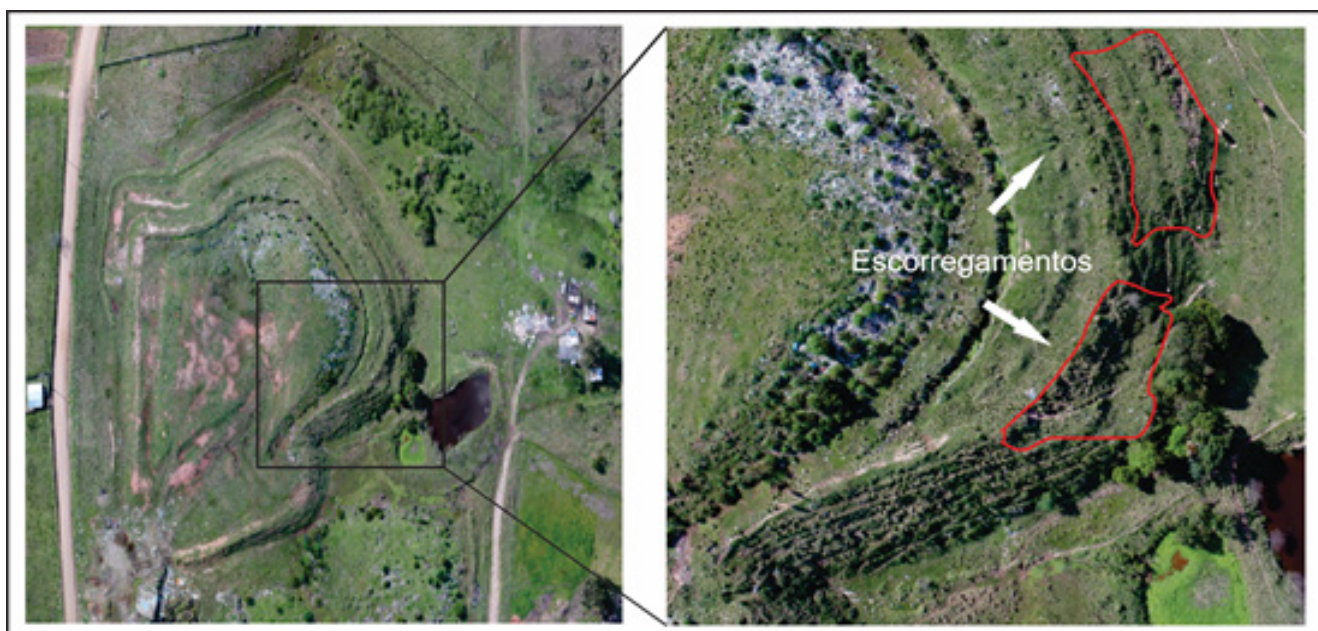
Contudo, no projeto do aterro sanitário, foram implementados patamares entre os níveis de deposição, os quais auxiliam na redução da velocidade do fluxo da água dos taludes. Na base de cada talude foram construídas canaletas que conduzem água para as caixas de drenagem, reduzindo assim a possibilidade de erosão hídrica, principalmente a linear.

Em termos de risco a movimentos de massa, autores como Carmo (2014) e Rodrigues e Silva (2018) relacionam a carta de riscos à erosão com a carta de risco a movimentos de massa, principalmente quando a gênese dos eventos pode ser enquadrada nos dois conceitos. Sendo assim, observando o perfil traçado na figura 14, onde os taludes nordeste, leste e sudeste apresentam uma elevada declividade (>45%), podemos inferir que são áreas de risco a escorregamentos ou rupturas do talude.

No mosaico e no MDE, foram identificados alguns escorregamentos de talude, onde os mais significativos em dimensões espaciais ocorrem na vertente leste do aterro (Figura 14). Apesar do deslocamento horizontal e vertical ter sido de poucos metros, são áreas potenciais a ocorrerem outros eventos. Schuler (2010) salienta que em aterros sanitários com declividades superiores a 50% seja realizado monitoramento contínuo, principalmente quando já existem registros de escorregamentos/ruptura de taludes. O que agrava a situação é a existência de 7 residências próximas às áreas com grau de risco alto ou muito alto, as quais podem ser atingidas por detritos de uma eventual ruptura dos taludes.

Por fim, devem-se observar as significativas áreas com solo exposto, pois elas favorecem a infiltração da água das chuvas nas células do aterro, podendo provocar o fenômeno conhecido por erosão interna, a qual também fomenta a ocorrência de escorregamentos.

Figura 14 - Evidências de eventos de escorregamentos nos taludes do aterro.



Fonte: Elaborado pelos autores (2019)

5 - CONCLUSÕES

Primeiramente, é importante salientar que esta pesquisa só foi possível pela alta resolução espacial das imagens obtidas com o VANT e do processamento fotogramétrico realizado, pois resultou em um mosaico acurado e um MDE com alta precisão vertical. Em contra partida, essa técnica gera uma densa nuvem de dados, que dificulta a visualização e interpretação visual, sendo apenas possível a extração de informações através de programas especializados em ambiente SIG. Portanto, somando-se à técnica de levantamento de dados com VANT e GNSS, o processamento fotogramétrico e a álgebra de mapas em ambiente SIG, pode-se afirmar que os dados gerados são acurados para o objetivo proposto.

Os resultados deste trabalho demonstram que os quatro fatores analisados (orientação de vertentes, curvatura horizontal e vertical e declividade) influenciam nos processos de erosão

do aterro sanitário de Rosário do Sul. Em ambos os fatores, os maiores risco identificados estão concentrados nas vertentes Nordeste, Leste e Sudeste. Nesses locais, apresentam uma alta declividade geral (>45%), a curvatura vertical tendendo de retilínea à côncava, a curvatura horizontal variando de planar à convergente.

Por fim, recomenda-se o monitoramento contínuo das áreas classificadas com grau de risco alto a muito alto, pois foram identificados escorregamentos em pelo menos dois locais do aterro sanitário. Também se recomenda a revegetação em alguns setores, pois as áreas com solo exposto favorecem a infiltração de água e a consequente instalação de processos erosivos.

6 - REFERÊNCIAS

ABATISTA, C. T. Geoprocessamento aplicado ao mapeamento geotécnico em escala regional – o caso da serra de Baturité, CE. 2014. 218 f. Tese Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

BENVENUTO, C. Estabilidade geotécnica de aterros sanitários. I Seminário sobre Geomecânica dos Resíduos Sólidos Urbanos, 2012.

BISPO, P. C.; ALMEIDA, C. M.; VALERIANO, M. M. Análise de suscetibilidade aos movimentos de massa em São Sebastião (SP) com o uso de métodos de inferência espacial. Revista Geociências, UNESP, v. 30, n.3, p. 467 – 478, 2011.

BRUCH, A. F.; CIROLINI, A.; THUM, A. B.; CARNEIRO, M. Avaliação da Acurácia das Cubagens de Volumes de Mineração através de Levantamentos Convencionais e Fotogramétricos. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 12, n. 1. p. 283-298, 2019.

CARMO, A. M. Utilização do geoprocessamento como subsidio para análise morfológica e de risco geológico das serras da porção sul do Maciço Central do Ceará. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Geologia, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014. 126f.

DJI. PHANTOM 4 SPECS. Disponível em: <<https://www.dji.com/phantom-4/info#specs>>. Acesso em: 10 maio 2019.

EFFGEN, J. F. Análise da Distribuição de Áreas Suscetíveis a Movimentos de Massa na Região Administrativa 1 de Vila Velha-ES. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Graduação em Geografia. UFES. Vitória/ES. 2015. 103p.

ELK, A. G. H. V. Redução de emissões na disposição final. Rio de Janeiro: BAM, 2007.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Súmula da X Reunião Técnica de Levantamento de Solos. Rio de Janeiro, 1979. 83p.

FERNANDES, N.F.; AMARAL, C.P. Movimentos de massa: uma abordagem geológico-

geomorfológica. In: GUERRA, A.J.T. & CUNHA, S.B. (Coords.), Geomorfologia e Meio Ambiente. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, p. 123-194, 1996.

AGAZOLA, V. Modelagem do Fluxo Subterrâneo na Região do Aterro Sanitário do Município de Rosário do Sul, RS. Trabalho de Conclusão Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Geológica. UFPel, Pelotas, 2018. 47p.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia Estatística. Dados estatísticos do Censo Demográfico 2010. Governo Federal. 2010. Disponível em: <http://seriesestatisticas.ibge.gov.br/>

_____. Manual do Usuário: Aplicativo Online IBGE-PPP. Brasília. 2017.

JAUD, M., PASSOT, S., LE BIVIC, R., DELACOURT, C., GRANDJEAN, P., LE DANTEC, N. Assessing the Accuracy of High Resolution Digital Surface Models Computed by PhotoScan and MicMac in Sub-Optimal Survey Conditions. Remote Sensing [online] 8/6. 2016.

RODRIGUES, L. I. de C.; SILVA, R. M. N. da. Uso do Vant no Aterro de Resíduos Sólidos do Jangurussu – Fortaleza, Ce – para Fins de Análise de Risco Potencial À Erosão. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Geologia. UFC. Fortaleza, 2018. 61p.

SCHULER, A. R. Análise do comportamento de um aterro municipal de resíduos sólidos urbanos instrumentado. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010, 173f.

VALERIANO, M. M. TOPODATA: Guia para utilização de dados geomorfológicos locais. São José dos Campos: Inpe, 2008. 75 p.

WOLF, P.; DEWIT, B. Elements of Photogrammetry with Applications in GIS. New York: McGraw-Hill Education, 2004. 696 p.