

O Levantamento Aéreo Expedito (LAE) aplicado à detecção e classificação de processos erosivos: passos metodológicos e estudo de caso



*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Florestas
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

Documentos 260

O Levantamento Aéreo Exedito (LAE) aplicado à detecção e classificação de processos erosivos: passos metodológicos e estudo de caso

Maria Augusta Doetzer Rosot
Yeda Maria Malheiros de Oliveira
Marilice Cordeiro Garrastazu
Estefano Matyak
Nelson Carlos Rosot
Lutécia Beatriz dos Santos Canalli
Priscilla Koch

Embrapa Florestas
Colombo, PR
2014

Embrapa Florestas

Estrada da Ribeira, Km 111, Guaraituba,
83411-000, Colombo, PR - Brasil

Caixa Postal: 319

Fone/Fax: (41) 3675-5600

www.embrapa.br/florestas

www.embrapa.br/fale-conosco/sac/

Comitê de Publicações da Unidade

Presidente: Patrícia Póvoa de Mattos

Secretária-Executiva: Elisabete Marques Oaida

Membros: Alvaro Figueredo dos Santos, Claudia Maria Branco de Freitas Maia, Elenice Fritzsons, Guilherme Schnell e Schuhli, Jorge Ribaski, Luis Claudio Maranhão Froufe, Maria Izabel Radomski, Susete do Rocio Chiarello Penteado

Supervisão editorial: Patrícia Póvoa de Mattos

Revisão de texto: Patrícia Póvoa de Mattos

Normalização bibliográfica: Francisca Rasche

Editoração eletrônica: Rafeale Crisostomo Pereira

Fotos da capa: Laboratório de Monitoramento Ambiental da Embrapa Florestas.

1ª edição

Versão eletrônica (2014)

Todos os direitos reservados

A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei no 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) Embrapa Florestas

O Levantamento Aéreo Expedito (LAE) aplicado à detecção e classificação de processos erosivos: passos metodológicos e estudo de caso [recurso eletrônico] / Maria Augusta Doetzer Rosot... [et al.]. Dados eletrônicos - Colombo : Embrapa Florestas, 2014.

(Documentos / Embrapa Florestas, ISSN 1980-3958 ; 260)

Sistema requerido: Adobe Acrobat Reader.

Modo de acesso: World Wide Web.

<<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/item/221>>

Título da página da web (acesso em 27 fev. 2015).

1. Agricultura de precisão. 2. Levantamento Aéreo Expedito. 3. Erosão do solo. 4. Paraná. I. Rosot, Maria Augusta Doetzer. II. Oliveira, Yeda Maria Malheiros de. III Garrastazu, Marilice Cordeiro. IV. Matyak, Estefano. V. Rosot, Nelson Carlos. VI. Canalli, Lúcia Beatriz dos Santos. VII. Koch, Priscilla. VIII. Série.

CDD 526.982 (21. ed.)

Autores

Maria Augusta Doetzer Rosot

Engenheira Florestal, Doutora,
Pesquisadora da Embrapa Florestas,
augusta.rosot@embrapa.br

Yeda Maria Malheiros de Oliveira

Engenheira Florestal, Doutora,
Pesquisadora da Embrapa Florestas,
yeda.oliveira@embrapa.br

Marilice Cordeiro Garrastazu

Engenheira Florestal, Mestre,
Pesquisadora da Embrapa Florestas, marilice.
garrastazu@embrapa.br

Estefano Matyak

Engenheiro-agrônomo, Fiscal de Defesa
Agropecuária da Agência de Defesa
Agropecuária do Paraná - Adapar,
estefanomatyak@gmail.com

Nelson Carlos Rosot

Engenheiro Florestal, Doutor,
Professor do Departamento de Engenharia
Florestal da Universidade Federal do Paraná,
ncrosot@ufpr.br

Lutécia Beatriz dos Santos Canalli

Engenheira-agrônoma, Doutora,
Pesquisadora do Instituto Agronômico do
Paraná - IAPAR,
lutecia@febrapdp.org.br

Priscilla Koch

Engenheira Florestal,
prickoch@gmail.com

Apresentação

Nesta publicação são apresentadas inovações para o uso e aplicação da tecnologia de Levantamento Aéreo Expedido (LAE), que vem sendo adaptada pela Embrapa Florestas desde o início da década de 2000.

A técnica LAE é tradicionalmente empregada nos Estados Unidos para detecção e monitoramento de danos bióticos e abióticos em áreas florestais, sendo seu emprego ampliado no Brasil para detecção de alterações no uso e cobertura da terra, para a verificação da acuracidade temática de mapeamentos efetuados com o uso de outras tecnologias e para a classificação da vegetação em diferentes estágios sucessionais.

A evolução da tecnologia permitiu que fosse iniciado o processo de migração da técnica para o meio digital, denominada Levantamento Aéreo Expedido Digital (LAED), não somente pelo uso de equipamento apropriado, mas também pela substituição de etapas analógicas no processamento das informações.

A mais recente aplicação do LAE testada por uma equipe multi-institucional, formada por técnicos da Embrapa Florestas, Agência de Defesa Agropecuária do Paraná (Adapar), Instituto

Emater, Universidade Federal do Paraná (UFPR) e do Instituto Agrônômico do Paraná (IAPAR) é a detecção e classificação dos processos erosivos presentes nas propriedades rurais. Atividades recentes, até mesmo relacionadas ao uso inadequado da técnica de plantio direto, a remoção dos terraços ou curvas de nível, entre outras causas, levaram as autoridades a considerar este um problema que precisa ser quantificado, urgentemente.

Acredita-se que a técnica LAE possa ser adaptada para o monitoramento de mais este processo, já que a erosão pode ser mais facilmente detectada no intervalo entre a colheita e o novo plantio de culturas.

Sergio Gaiad
Chefe Adjunto de Pesquisa e Desenvolvimento
Embrapa Florestas

Sumário

1. Introdução	9
2. Os processos erosivos no Estado do Paraná.....	12
2.1. Formas de erosão consideradas nas campanhas de voo.....	13
2.1.1. Erosão em entressulcos.....	13
2.1.2. Erosão em sulcos	13
2.1.3. Erosão em canal.....	14
2.1.4. Erosão em voçoroca	14
2.2. Erosividade e erodibilidade.....	17
3. Sequência de procedimentos para execução do LAE ..	17
3.1. Área de estudo e época de sobrevoo	17
3.1.1. Tipos de solo da área de estudo	18
a) Latossolos.....	18
b) Cambissolos	19
c) Gleissolos.....	19
d) Argissolos.....	20
3.2. Preparação de materiais e equipamentos para o voo	21
3.2.1. Carta-imagem para o LAE.....	21
3.2.2. GPS para o LAE	24
3.2.3. Materiais adicionais para o LAE.....	25
3.3. Execução do voo propriamente dito	25
3.4. Operações pós-voo.....	27
3.4.1. Conversão analógico-digital e georreferenciamento	27
3.4.2. Vetorização e preenchimento da tabela de atributos.....	29
3.4.3. Geração de centroides	31
3.4.4. Interseção entre camadas.....	32
3.4.5. Cálculo do número de pontos e de superfícies afetadas por erosão	33
3.4.6. Mapeamento por atributos.....	38
4. Avaliação da acuracidade do LAE para mapeamento da erosão	41
5. Considerações finais	48
Referências	49

O Levantamento Aéreo Expedito (LAE) aplicado à detecção e classificação de processos erosivos: passos metodológicos e estudo de caso

Maria Augusta Doetzer Rosot

Yeda Maria Malheiros de Oliveira

Marilice Cordeiro Garrastazu

Estefano Matyak

Nelson Carlos Rosot

Lutécia Beatriz dos Santos Canalli

Priscilla Koch

1. Introdução

O levantamento aéreo expedito (LAE) – denominação adaptada do termo em inglês, *aerial sketchmapping* - é uma técnica que tem sido usada nos Estados Unidos e Canadá para a detecção e mapeamento de danos florestais causados por agentes bióticos (insetos, patógenos e outras pragas) e abióticos (ventos, incêndios, tempestades, furacões e granizo) (CIESLA et al., 2002; CIESLA, 2008). É uma atividade rotineira, adotada há mais de 60 anos em períodos de vulnerabilidade aos diferentes agentes. Pode-se afirmar que, nos EUA, tal forma de monitoramento tem se mostrado facilitada pelo uso de levantamentos aéreos, em função das grandes extensões territoriais envolvidas. Atualmente, o LAE está estabelecido como operação de rotina para detecção de pestes florestais nos EUA e Canadá. Os procedimentos são definidos por região geográfica e as campanhas e detecção são anuais. Anualmente, uma média de 9 milhões de hectares são percorridos via LAE, em aproximadamente 300 horas de voo e em torno de 32.000 hectares sobrevoados por hora. Adicionalmente, campanhas direcionadas a estudos especiais, como o monitoramento de consequências de incêndios, também são frequentemente programadas.

O método é relativamente simples e de baixo custo, envolvendo observadores treinados que, voando em aviões a baixa altitude entre 300 m e 800 m acima do nível do solo, são capazes de discriminar áreas com árvores mortas ou com injúria foliar e “desenhar” esses pontos ou polígonos sobre um mapa-base, identificando-os de acordo com um código pré-estabelecido (OLIVEIRA et al., 2003). Este método foi introduzido e adaptado para as condições brasileiras em 2001/2002, através de um programa de intercâmbio técnico entre a Embrapa Florestas e o Serviço Florestal Norte-Americano (USDA *Forest Service*) (OLIVEIRA et al., 2004). Essa primeira fase da introdução da tecnologia no Brasil incluiu voos de demonstração, estudos de viabilidade, workshops, produção de cartas-imagem utilizadas como base nos voos, treinamento de observadores e voos operacionais para a avaliação de danos causados pela vespa-da-madeira (*Sirex noctilio*), macaco-prego (*Sapajus nigritus*), armilariose (*Armillaria* spp) (OLIVEIRA et al., 2005; ROSOT et al., 2005) e outros agentes causadores de danos em reflorestamentos de *Pinus* spp. e *Eucalyptus* spp. no Sul do Brasil. Como consequência, a técnica LAE foi lançada como tecnologia adaptada pela Embrapa Florestas em 2005, na Exposição Feira Expointer, em Esteio, RS, com a divulgação de vídeo sobre a técnica.

Nas campanhas realizadas de 2003 a 2008 foram investigadas novas aplicações da técnica referentes à detecção de alterações no uso da terra, já que durante os levantamentos com o objetivo de detecção de pragas e doenças foi concluído que é possível estabelecer padrões e indicadores de desmatamentos recentes. As coordenadas geográficas de tais evidências de remoção ilegal de vegetação natural são repassadas às equipes competentes para averiguação, podendo-se criar, desta forma, um processo de monitoramento da vegetação natural (OLIVEIRA et al., 2008). Em 2009, um voo com o objetivo de detecção de irregularidades (campos de pouso, desmatamentos e garimpos

ilegais foi efetuado na Floresta Nacional de Amaná, com área de 540.417,17 ha. O levantamento foi realizado em três dias de trabalho.

A mais recente aplicação do LAE sendo testada pela equipe da Embrapa Florestas e parceiros da Agência de Defesa Agropecuária do Paraná (Adapar), do Instituto Emater, da Universidade Federal do Paraná (UFPR) e do Instituto Agrônômico do Paraná (IAPAR) é a detecção e classificação dos processos erosivos presentes nas propriedades rurais. A erosão é um problema que está se intensificando no estado do Paraná, após ter sido considerado superado. Atividades recentes, até mesmo relacionadas ao uso inadequado da técnica de plantio direto, a remoção dos terraços ou curvas de nível, entre outras causas, levaram as autoridades a considerar este um problema que precisa ser quantificado, urgentemente. Acredita-se que a técnica LAE possa ser adaptada para o monitoramento de mais este processo, já que a erosão pode ser mais facilmente detectada no intervalo entre a colheita e o novo plantio de culturas. Por se tratar de um período relativamente curto, está sendo chamado de “janela de oportunidade” para o LAE atuar, percorrendo-se grandes áreas em pouco tempo.

O sistema LAE é utilizado para detectar pontos de erosão, classificando-os quanto ao tipo e, em seguida, nas operações pós-voo, para sistematizar as informações coletadas, inserindo-as em um Sistema de Informações Geográficas (SIG). Nos tópicos seguintes são descritas as principais etapas do LAE para este tipo de aplicação, com base nos levantamentos efetuados pela Embrapa Florestas e parceiros durante o ano de 2012 para a região dos Campos Gerais, em Uvaia, PR.

2. Os processos erosivos no Estado do Paraná

Como caracterização do problema focado no presente estudo, pode-se endossar o pensamento de Bertol et al. (2007), segundo o qual a erosão do solo é um fenômeno complexo, que envolve desagregação, transporte e deposição de partículas. Tal fenômeno é originado principalmente pela ação da água das chuvas e dos ventos (STROOSNIJDER, 2005), e impacta diretamente a produtividade na agricultura. Além disso, pela deposição de sedimentos em corpos d'água, causa eutrofização e assoreamento (BERTOL et al., 2004; MARIOTI, 2012).

Nos países de clima temperado, apenas 5% das chuvas anuais são consideradas erosivas, enquanto que em países de clima tropical este valor sobe para 40%. Por esta razão, a erosão hídrica é um problema mais grave em países de clima tropical e subtropical (WALTRICK, 2010).

Estima-se que mais de 80% da área agricultável no Paraná, ou cerca de 5,7 milhões de hectares, seja hoje manejada pelo sistema de plantio direto (CALEGARI; CAVIGLIONE, 2008). A técnica, adotada na década de 1970 e preconizada pela Embrapa, contribui para a redução da erosão, propiciando a expansão da agricultura em áreas até então consideradas marginais e impróprias para uso agrícola (SÁ, 2007). Porém, segundo Denardim et al. (2008) e Barbosa et al. (2011), nos últimos anos começou a ser disseminada a percepção de que o sistema plantio direto constituiria prática conservacionista suficiente para controlar integralmente a erosão hídrica, levando os agricultores à destruição dos terraços, ao abandono da semeadura em contorno e à adoção da semeadura paralela ao maior comprimento da gleba, independentemente do sentido do declive.

Como resultante dessas atitudes, tem sido notado que o sistema plantio direto, isoladamente, não tem propiciado condição suficiente para conter o potencial erosivo de chuvas intensas. Além disso, muitos abusos foram cometidos nos últimos dez anos, ao se atribuir total controle dos processos erosivos à adoção continuada do sistema de plantio direto, adentrando-se em áreas de extrema fragilidade ambiental e negligenciando-se o uso de terraços para o controle das enxurradas (SÁ, 2007).

2.1. Formas de erosão consideradas nas campanhas de voo

As formas de erosão consideradas no trabalho foram: entressulcos, sulcos, canal e voçoroca, detalhadas na sequência. Um resumo das respectivas características de cada tipo, bem como fotos ilustrativas, encontram-se na Tabela 1.

2.1.1. Erosão em entressulcos

A erosão em entressulcos é uma das formas de erosão mais danosas, pois remove a camada mais superficial do solo, onde se encontram a matéria orgânica, os nutrientes e os insumos agrícolas. Além disso, alteram também os processos microbianos, que contribuem para o aumento da fertilidade do solo. O escoamento superficial que acontece na erosão em entressulcos é com frequência chamado de fluxo laminar raso (GERITS et al., 1990, citado por CANTALICE, 2001). Nos entressulcos, o impacto das gotas de chuva é o fator responsável pela desagregação das partículas da massa do solo (ARAGÃO et al., 2011), podendo desagregar grandes quantidades de partículas decorrentes da energia cinética das gotas, que exercem forças de pressão e cisalhamento no ponto de impacto (CASSOL; LIMA, 2003).

2.1.2. Erosão em sulcos

A erosão em sulcos constitui-se na segunda fase evolutiva do processo físico da erosão hídrica do solo, que é marcada pela mudança da forma do escoamento. De difuso sobre a superfície do solo, passa a concentrar-se, na segunda fase,

em pequenas depressões da superfície do solo, chamadas de sulcos de erosão (CANTALICE, 2001). No processo de erosão em sulcos, o agente responsável pela desagregação e transporte dos sedimentos em sulcos é o escoamento concentrado (LIMA, 1997; SCHÄFER et al., 2001).

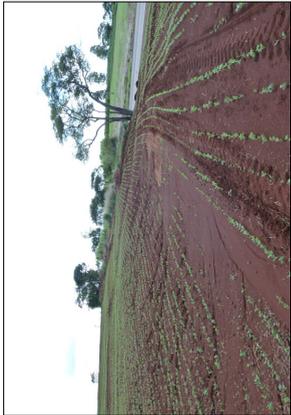
2.1.3. Erosão em canal

Quando o escoamento subsuperficial passa a canalizar o escoamento superficial pluvial em fluxos concentrados, provoca a denominada erosão em dutos ou canais (SANTOS; BACCARO, 2004). Tal processo pode, em muitos casos, ocorrer quando a água encontra um teor maior de argila, reduzindo sua infiltração vertical e, ao mesmo tempo, provocando o escoamento subsuperficial na horizontal, o que origina os dutos (BACCARO; CARRIJO, 2001). Esse tipo de erosão é intermediário entre a erosão em entressulcos e as voçorocas.

2.1.4. Erosão em voçoroca

A voçoroca é a evolução da erosão em canal, onde passam a se concentrar os fluxos superficiais. Formam-se devido à variação da resistência à erosão, que em geral é devida a pequenas mudanças na elevação ou declividade dos terrenos. Baccaro (1994) cita diversos processos presentes na voçoroca, entre eles os de escoamento pluvial (lavagem superficial e formação de sulcos), de erosão interna do solo (*piping*), solapamentos e escorregamentos dos solos. No interior da voçoroca há surgências de água que durante o ano são alimentadas pelo lençol freático.

Tabela 1. Descrição e fotos de formas de erosão detectadas em área-piloto pela técnica de LAE e respectivos códigos de legenda.

Código	Formas	Descrição*	Grau de severidade	Foto ilustrativa
ES	Entressulcos (laminar)	<ul style="list-style-type: none"> ● Também conhecida como erosão laminar; ● Apresenta fluxo difuso, sem concentração da enxurrada; ● Promove o selamento da superfície do solo; ● Fases: impacto das gotas da chuva, obstrução de macroporos, redução da infiltração em mais ou menos 10 vezes, escoamento superficial da água com transporte de partículas dispersas, formação de selo superficial. 	Leve a moderada	
SU	Sulco	<ul style="list-style-type: none"> ● Concentração da enxurrada em canais naturais ou induzidos; ● Escoamento concentrado; ● Fluxo turbulento; ● Maior força de cisalhamento do fluxo, levando ao alargamento e ou aprofundamento do sulco. 	Leve a moderada	

* DIEKOW (2012)

Fotos: Estefano Matyak

Tabela 1. Continuação.

Código	Formas	Descrição*	Grau de severidade	Foto ilustrativa
CA	Canal	<ul style="list-style-type: none"> ● A força de cisalhamento da enxurrada quando provoca o alargamento do sulco, forma o canal; ● Escoamento concentrado na via de drenagem (talvegue); ● Enxurrada proveniente das formas entressulco (laminar) e sulco; ● Geralmente pode ser destruído pelo preparo do solo; ● Permite passagem de máquinas. 	Leve a moderada	
V	Voçoroca	<ul style="list-style-type: none"> ● A força de cisalhamento da enxurrada quando provoca o aprofundamento do sulco, forma a voçoroca; ● Geralmente ocorre em vias de drenagem naturais; ● Não pode ser transposta por máquinas. 	Severa	

Fotos: Estefano Matyak

* DIEKOW (2012)

2.2. Erosividade e erodibilidade

Os principais fatores que determinam a maior ou menor perda de solo por erosão hídrica são a erosividade (chuva), a erodibilidade (características intrínsecas do solo), a topografia, o uso e manejo, e as práticas conservacionistas. Dentre estes, a erosividade das chuvas é um dos mais importantes, pois o impacto das gotas de chuva sobre o solo causa a desagregação de partículas e o selamento superficial, reduzindo a taxa de infiltração de água e aumentando o escoamento superficial (WALTRICK, 2010)

3. Sequência de procedimentos para execução do LAE

Todas as informações básicas relativas à técnica do LAE, incluindo especificações quanto ao tipo de aeronave, segurança no voo, características dos observadores aéreos e tipos de mapas, entre outras, podem ser encontradas na publicação sobre levantamento aéreo expedito (OLIVEIRA et al., 2008).

Observadas todas as recomendações gerais, a aplicação da técnica para o objetivo específico de detecção da erosão requer uma sequência de procedimentos e definições, detalhados nos tópicos subsequentes.

3.1. Área de estudo e época de sobrevoo

A possibilidade de uma boa visualização dos processos erosivos a observar é o que determinará o local e a época dos levantamentos, ou seja, deve ser considerado o binômio composto pelas regiões que serão sobrevoadas e os respectivos estágios das culturas que formam a cobertura do solo nesse período. Para o presente estudo, definiu-se como área-piloto a região abrangida pela carta topográfica de Uvaia, nos Campos Gerais. Os levantamentos ocorreram entre os meses de junho (dias 27 e 28) e agosto (de 20 a 22) de 2012, sendo este último dia reservado à verificação de campo. Nesse período do ano, a

cobertura predominante dos terrenos agrícolas era constituída por lavouras de trigo.

Em Caviglione et al. (2000), a região de estudo é descrita como apresentando classes de relevo suave, suave ondulado e ondulado. A altitude média é de 843 m, variando de 760 a 998 m s.n.m. A precipitação anual está entre 1.600 mm e 1.800 mm e a temperatura média anual varia de 17 °C a 18 °C.

3.1.1. Tipos de solo da área de estudo

As ordens de solos de maior ocorrência na região dos Campos Gerais são os cambissolos (37,12%), latossolos (33,09%), neossolos (16,52%), argissolos (10,41%), gleissolos (1,4%), nitossolos (0,28%) e organossolos (0,02%) (SÁ, 2007).

Na região de estudo, estão presentes as ordens de solos:

a) Latossolos

Em geral são solos muito intemperizados, profundos e de boa drenagem. Caracterizam-se por grande homogeneidade de características ao longo do perfil. Distribuem-se por amplas superfícies no território Nacional, ocorrendo em praticamente todas as regiões. Geralmente encontram-se nas áreas de vertentes suave onduladas e de forma convexa, com declividades entre 0 e 8% (IBGE, 2007; SÁ, 2007; SANTOS et al., 2006). Mesmo em relevo suave ondulado, as vertentes longas, associadas à textura frequentemente média, principalmente no horizonte superficial dos solos originados dos arenitos, pode resultar em processos erosivos bastante expressivos, quando estes solos são submetidos a intervenção humana. Os latossolos representam os solos de maior potencial agrícola e estabilidade ambiental na área dos Campos Gerais, por serem profundos, bem estruturados, de elevada permeabilidade e localizados em relevos mais propícios às explorações agrícolas.

b) Cambissolos

São solos constituídos por material mineral com horizonte B incipiente (baixo desenvolvimento) imediatamente abaixo do horizonte. Apresentam grande variação no tocante a profundidade, ocorrendo desde rasos a profundos, além de apresentarem grande variabilidade também em relação às demais características, devido à heterogeneidade do material de origem, das formas de relevo e das condições climáticas. São frequentes em locais de vertentes curtas e abruptas, assim como nos terços inferiores das vertentes, na proximidade das redes de drenagem e das planícies. Muitas vezes são pedregosos, cascalhentos e mesmo rochosos. Ocorrem disseminados em todas as regiões do Brasil, preferencialmente em regiões serranas ou montanhosas (IBGE, 2007; SÁ, 2007; SANTOS et al., 2006). Devido à sua localização em posições mais declivosas, por serem solos rasos e por possuírem textura predominantemente média, tendendo a arenosa, têm maior fragilidade ambiental do que os latossolos e são muito sujeitos à erosão (SÁ, 2007).

c) Gleissolos

Solos desta ordem são permanentemente ou periodicamente saturados por água, salvo se artificialmente drenados. São característicos de áreas alagadas ou sujeitas a alagamento (margens de rios, ilhas, grandes planícies, etc.). Apresentam gleização, que implica na manifestação de cores acinzentadas, azuladas ou esverdeadas. Podem ser de alta ou baixa fertilidade natural e têm nas condições de má drenagem a sua maior limitação de uso. Ocorrem em praticamente todas as regiões brasileiras, ocupando principalmente as planícies de inundação de rios e córregos. Não são indicados para uso agrícola (IBGE, 2007; SÁ, 2007; SANTOS et al., 2006).

d) Argissolos

Os solos desta ordem têm como característica marcante um aumento de argila do horizonte superficial A para o subsuperficial B, que é do tipo textural (Bt), geralmente acompanhado de boa diferenciação também de cores e outras características. Estão presentes nos relevos mais ondulados e geralmente ocupam o terço médio inferior da vertente ou estão presentes nos relevos mais ondulados, precedidos nas vertentes pelos latossolos (esses em posições mais planas e bem drenadas da paisagem).

A transição entre os horizontes A e Bt é usualmente clara, abrupta ou gradual. Quanto mais argila no horizonte B em relação ao A (maior gradiente textural), maior suscetibilidade à erosão. A profundidade dos solos é variável, mas em geral são pouco profundos. São, juntamente com os latossolos, os solos mais expressivos do Brasil, sendo verificados em praticamente todas as regiões. Geralmente, requerem altas doses de fertilizantes e corretivos. Apresentam alto risco de erosão (IBGE, 2007; SÁ, 2007; SANTOS et al., 2006).

A Figura 1 mostra a localização da região da carta Uvaia no Estado do Paraná e as classes de solo presentes na área de estudo.

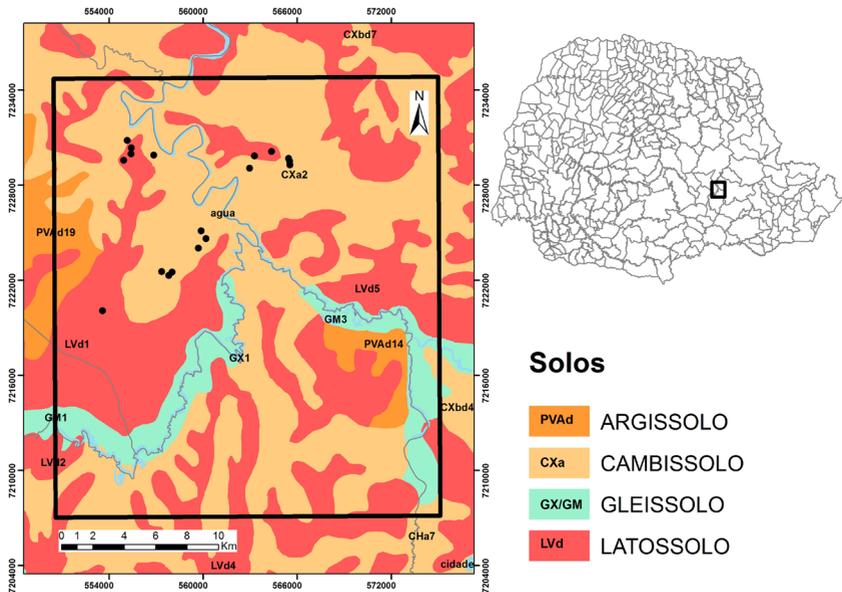


Figura 1. Situação da Carta Uvaia MI-2840-1, no Estado do Paraná e mapa de classes de solo presentes na área sobrevoada. Fonte: Laboratório de Monitoramento Ambiental da Embrapa Florestas.

3.2. Preparação de materiais e equipamentos para o voo

3.2.1. Carta-imagem para o LAE

Foi produzida uma carta-imagem (Figura 2), impressa em papel não plastificado e sem brilho, em escala 1:30.000, sistema de projeção UTM, Datum SIRGAS 2000, fuso 22J, com base nos produtos da atualização do mapeamento sistemático do Estado do Paraná efetuado pelo ITCG. A carta-imagem contém os seguintes elementos:

- vetores da malha rodoviária, hidrografia, linhas de transmissão e corpos de água sobrepostos à imagem de satélite;
- *grid* em coordenadas UTM correspondentes às linhas de voo, com espaçamento de 2 km entre elas, nos dois sentidos, e respectiva numeração ou codificação. Ex. 1 N, 1 S, 1 E, 1

W (linha 1 Norte, linha 1 Sul, linha 1 Leste, linha 1 Oeste) e assim por diante. Essa padronização facilita a comunicação dos procedimentos entre piloto e observador aéreo. Normalmente, é escolhida uma orientação do voo (norte-sul ou leste-oeste) durante a produção de carta-imagem. Nesse projeto a carta conta com 12 linhas de voo no sentido norte-sul.



Figura 2. Carta-imagem produzida para a campanha do LAE com limites correspondentes à carta Uvaia MI-2840-1, em escala 1:30.000, imagem SPOT 5 em composição colorida RGB(123) e vetores (malha rodoviária, hidrografia, linhas de transmissão e corpos de água) oriundos da atualização do mapeamento sistemático do Estado do Paraná. Fonte: Laboratório de Monitoramento Ambiental da Embrapa Florestas.

A definição do espaçamento entre linhas de voo faz parte das decisões relacionadas à altitude média recomendada, principalmente por razões de segurança. A cobertura percentual do levantamento é determinada, assim, pela altitude e o espaçamento entre as linhas de voo. Se dois observadores aéreos estiverem envolvidos no processo, sentados um em cada lado da aeronave voando a 300 m de altitude, a cobertura será de 100%, com o espaçamento de 2 km entre linhas. Se apenas um observador experiente estiver disponível, o procedimento requerido para o atingimento da porcentagem de cobertura requerida é a ida e volta na mesma linha.

Foi também necessário definir uma legenda prévia e códigos de anotação, impressos à margem da carta-imagem. No entanto, após o primeiro sobrevoo, a legenda sofreu modificações, conforme mostrado na Tabela 1. Os diferentes tipos de erosão observáveis em solo sofrem um processo espacial de modificação de classe, ou seja, um processo erosivo incipiente, em função das características do terreno e outros fatores, e frequentemente se torna mais forte ao longo de um gradiente local no terreno, não sendo possível definir o momento exato de cada mudança de classe. Assim, tais tipos de erosão não podem ser passíveis de discriminação via LAE, usando-se os mesmos critérios. Dessa forma, e considerando-se o caráter experimental das campanhas aéreas efetuadas, optou-se pelo agrupamento das classes de erosão em grau 1 (erosão de intensidade leve a moderada) e grau 2 (intensidade severa). Neste último, enquadram-se todos os processos erosivos que já atingiram o estágio de voçoroca.

Outras categorias ou classes podem ser inseridas e mesmo todo o esquema de classificação pode ser alterado, de acordo com os objetivos do voo e características da região. No entanto, deve-se ressaltar que a definição das legendas previamente ao voo é fundamental para o êxito do levantamento.

3.2.2. GPS para o LAE

As coordenadas dos limites sul e norte (ou leste e oeste) das linhas de voo foram inseridas no GPS utilizado no levantamento, criando-se uma rota que serviu como base para o deslocamento da aeronave (Figura 3). Alguns modelos de GPS permitem a inserção de coordenadas por meio da importação de tabelas, o que possibilita um melhor controle e correção de eventuais erros de digitação.



Figura 3. Tela do GPS mostrando uma rota em grid regular inserida para execução do LAE(D).

3.2.3. Materiais adicionais para o LAE

Os seguintes materiais são necessários para operações durante o voo:

- Canetas para anotação nas cartas-imagem;
- Fones de comunicação específicos para aeronaves;
- Baterias extras para GPS;
- Máquina fotográfica para registro das feições a partir da perspectiva aérea.

3.3. Execução do voo propriamente dito

Uma vez definido o plano de voo e obtidas as permissões necessárias junto às autoridades do Departamento de Aviação Civil (DAC), foram executados os sobrevoos em duas etapas. Na primeira, os observadores aéreos fizeram um reconhecimento geral da região sobrevoada; observaram os padrões de uso e cobertura da terra e o tipo e intensidade dos pontos de erosão. Assim, foi possível criar uma “assinatura” visual das feições a observar e decidir, conjuntamente, qual a melhor forma de representá-las (desenhá-las) sobre a carta-imagem. Além disso, a legenda e respectivos códigos sofreram adequações à realidade de campo.

Na segunda etapa o avião sobrevoou cada uma das 12 faixas de voo duas vezes, de modo a permitir a observação de ambos os lados da faixa pelo mesmo observador. Decidiu-se que a melhor forma de representação dos pontos de erosão seria através de polígonos (Figura 4) que corresponderiam à área afetada. Ao lado ou dentro de cada polígono foi anotado o respectivo código de legenda.

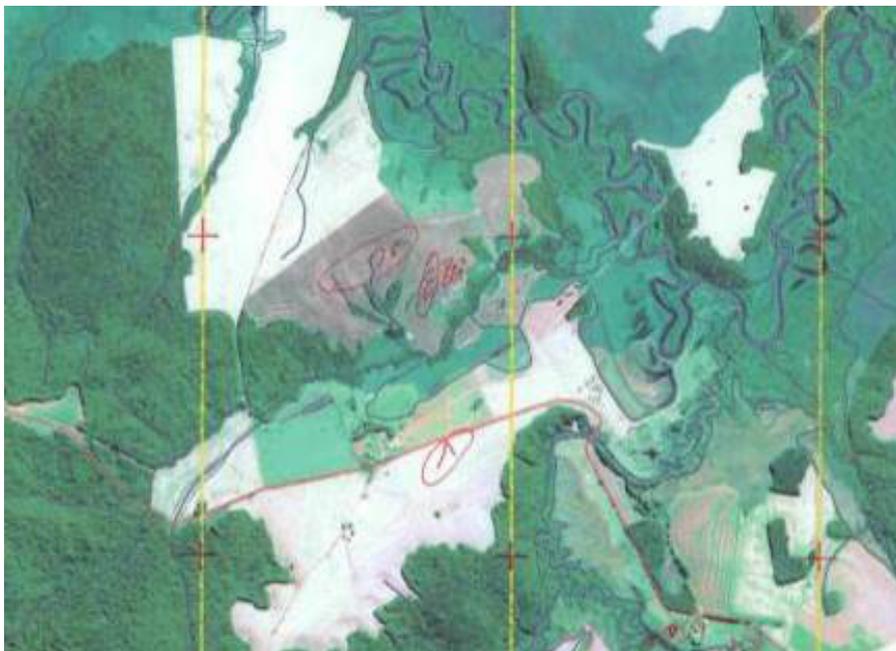


Figura 4. Recorte da carta-imagem usada no LAE, mostrando as anotações do observador aéreo (em vermelho).

Em trabalhos anteriores descritos por Oliveira et al. (2008), concluiu-se que é possível sobrevoar 200 mil hectares por dia, com dois observadores aéreos. Assim, seriam necessários aproximadamente três dias de trabalho para a execução da tarefa pretendida, caso a metodologia já estivesse totalmente definida. Considerando-se que, no caso, parte do trabalho consistia em reconhecimento do tipo de feições e análise das classes de erosão a serem consideradas, para a área total da carta-imagem (697,73 km²), foram sobrevoados aproximadamente 2.232 quilômetros lineares. A altura média em relação ao solo variou entre 300 m e 500 m, já que este parâmetro também estava em teste e a velocidade média foi entre 145 km h⁻¹ e 190 km h⁻¹, também variando em função das solicitações dos observadores aéreos. Desconsiderando-se o tempo de abastecimento da

aeronave e o tempo para chegada ao ponto inicial a ser monitorado, o trabalho foi realizado em aproximadamente 14 h, em períodos de 2,5 h a 3 h por período do dia. À medida que a técnica for sendo consolidada, com o gradativo ganho em experiência na detecção e padronização de assinaturas para a erosão por parte dos observadores, cada faixa passará a ser sobrevoada apenas uma vez. Nesse caso, cada observador se ocupará apenas da faixa correspondente à sua posição no avião (direita ou esquerda), o que deve reduzir significativamente o tempo de voo.

3.4. Operações pós-voo

3.4.1. Conversão analógico-digital e georreferenciamento

As operações pós-voo no LAE tradicional costumam ser trabalhosas, uma vez que compreendem a transferência das anotações do mapa para um acetato transparente, denominado *mylar* (Figura 5A), sua escanerização, georreferenciamento do arquivo TIF correspondente e vetorização de polígonos (Figura 5B), e preenchimento das respectivas tabelas de atributos com os códigos de legenda (Figura 5C). Em média, tais operações demandam cerca de 6 horas contínuas de trabalho de uma pessoa, podendo variar em função das facilidades disponíveis para escanerização.

Com o objetivo de facilitar a conversão das informações registradas em meio analógico (carta-imagem) para meio digital (vetores no SIG), foi aplicado um procedimento inovador relacionado às operações pós-voo. A etapa de transferência de informações para o *mylar* foi eliminada, passando-se à escanerização direta da própria carta-imagem utilizada nos voos, em formato TIFF, a 300 d.p.i. (resolução mínima aceitável).

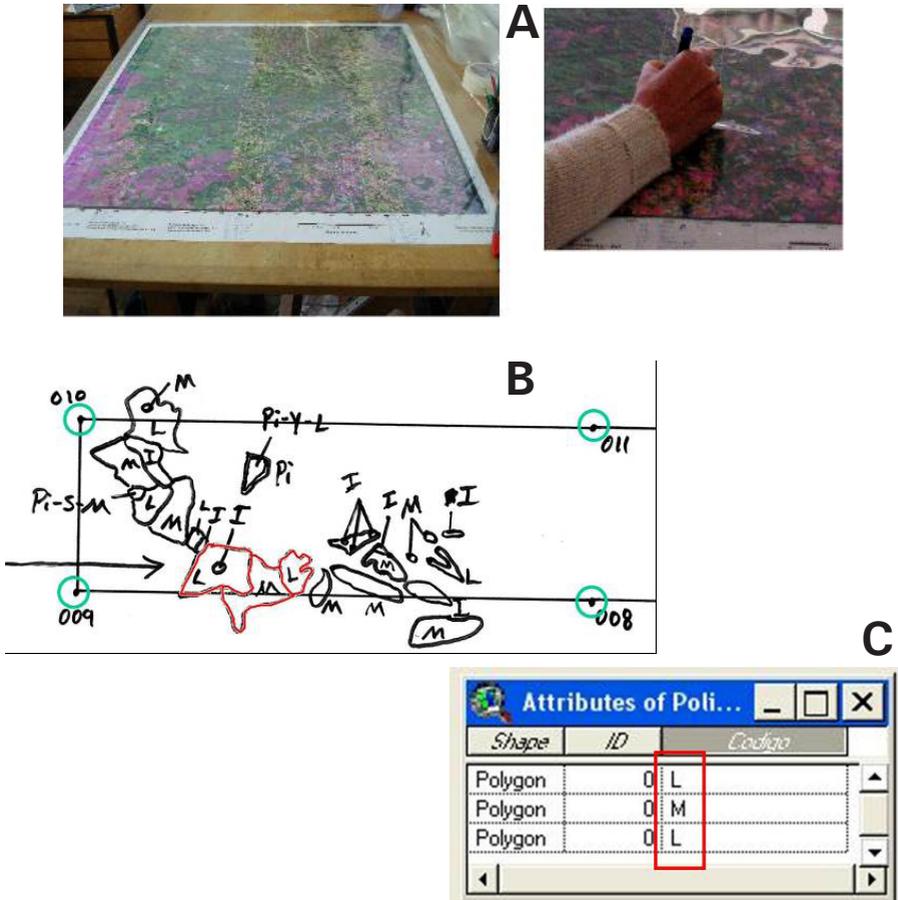


Figura 5. Operações pós-voo para a técnica de LAE convencional: A) Transferência das informações da carta-imagem para o *mylar*; B) Coleta de pontos para georreferenciamento do arquivo TIF contendo as informações do *mylar* e vetorização de feições com a imagem do *mylar* ao fundo; C) Preenchimento da tabela de atributos com os dados do levantamento.

Toda a sequência das operações foi realizada empregando-se o *software* livre gvSIG. Sobre a imagem escaneizada, aplicou-se realce de contraste para melhorar a visualização dos polígonos desenhados pelos observadores aéreos. Os cruzamentos das coordenadas, visualizados na imagem, foram empregados como pontos de controle para o seu georreferenciamento. Em seguida, passou-se à vetorização propriamente dita.

3.4.2. Vetorização e preenchimento da tabela de atributos

Para a vetorização das informações do LAE, foi criada uma nova camada (arquivo *shapefile*), do tipo polígono e, em sua tabela de atributos, foram criados os campos *Tipo_erosao* e *Legenda*, ambos do tipo texto. Em seguida, procedeu-se à vetorização de cada polígono desenhado na carta-imagem (Figura 6) e à inserção de sua respectiva legenda na tabela de atributos.

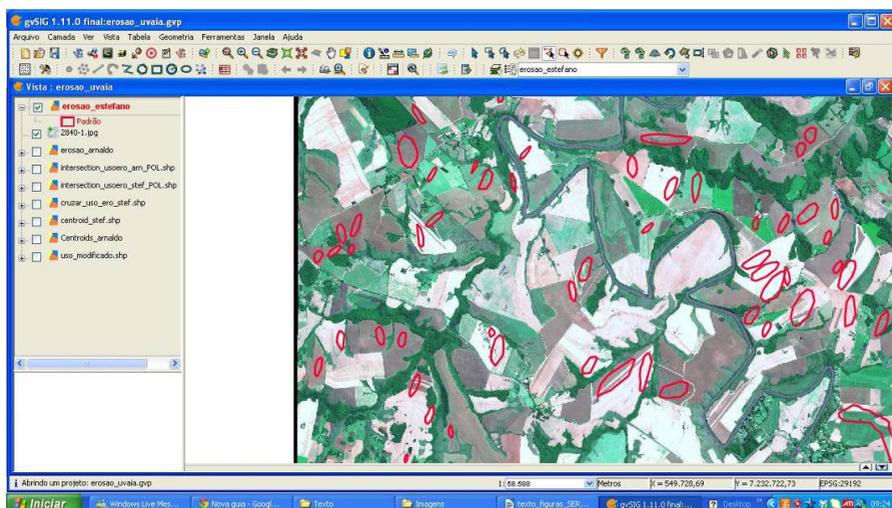


Figura 6. Janela do gvSIG mostrando a vetorização de feições sobre a imagem da carta em papel utilizada no LAE.

Independentemente do *software* utilizado, a qualidade da edição vetorial é um fator determinante para a realização das operações de geoprocessamento que, depois, gerarão os resultados do levantamento. O correto fechamento de polígonos, a sobreposição perfeita de nós compartilhados por diferentes feições, o compartilhamento de arcos em polígonos contíguos e a coincidência de limites entre feições pertencentes a diferentes camadas são alguns dos aspectos a considerar durante o processo de vetorização. Um erro bastante comum na vetorização de polígonos é a inserção de mais um nó, depois do fechamento (Figura 7A e B), sendo necessário corrigi-lo antes da execução das operações de geoprocessamento subsequentes.

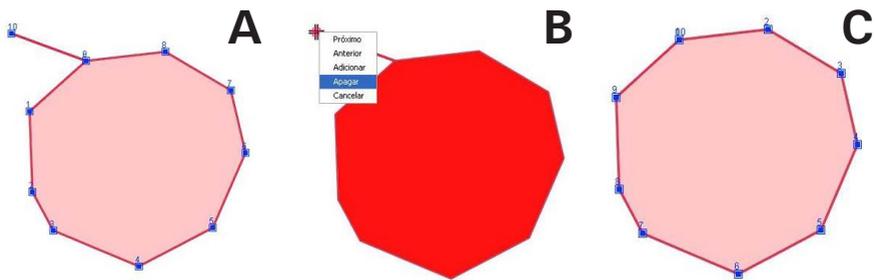


Figura 7. A) Exemplo de erro em vetorização de polígono (acréscimo de mais um nó); B) Procedimento de correção; C) Polígono com vetorização correta.

Após concluída a vetorização de todos os polígonos de erosão observados durante o voo, procedeu-se ao preenchimento do campo *Tipo_erosao* na tabela, com base no campo *Legenda*, já preenchido. Para tanto, foram empregados os recursos de consulta e calculadora de campos, respectivamente, selecionando um código de cada vez e digitando o tipo de erosão por extenso, o que permitiu o preenchimento de todas as células selecionadas (Figura 8).

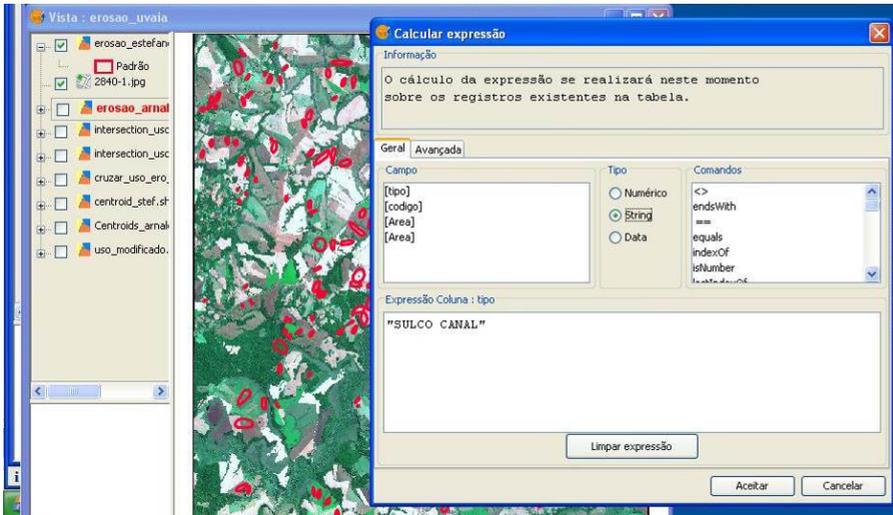


Figura 8. Janela do *software* gvSIG mostrando o preenchimento do campo *Tipo_erosao* na tabela de atributos da camada vetorizada, por meio da ferramenta “Expressão”.

Também foram agregadas à tabela de atributos outras informações geométricas, área (em hectares) e perímetro (em metros) por meio de um comando, de forma automática, no *software* gvSIG. O campo *Área* é fundamental para os cálculos tabulares subsequentes.

3.4.3. Geração de centroides

Para facilitar a visualização dos resultados do voo com relação ao número de pontos observados, foram gerados pontos correspondentes a cada polígono de erosão. Assim, utilizou-se a operação de geração de centroide, que é um ponto localizado no centro geométrico do polígono. Na Figura 9 são mostrados os polígonos e respectivos centroides.

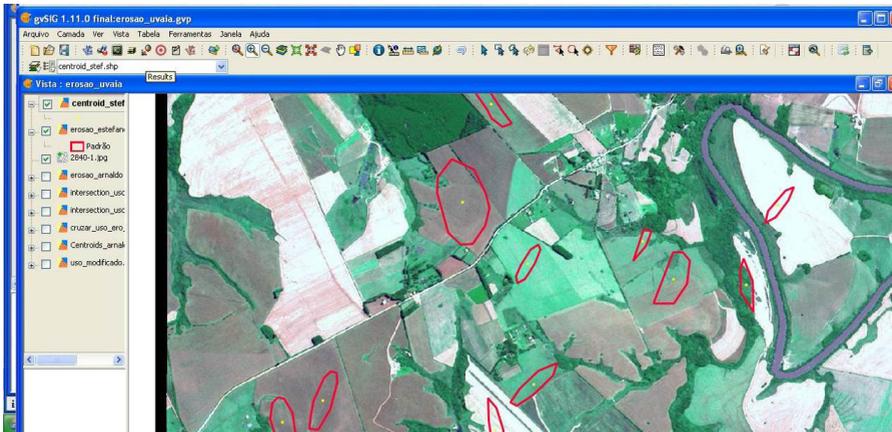


Figura 9. Janela do *software* gvSIG mostrando polígonos de erosão e respectivos centroides gerados no SIG.

3.4.4. Interseção entre camadas

Para poder correlacionar as informações sobre o tipo de erosão e as classes de uso e cobertura da terra na área sobrevoada foi necessário fazer um cruzamento entre as camadas de *Uso da terra* e a de *Erosão*. A operação selecionada foi a de interseção¹, o que permitiu obter um novo *shapefile* contendo apenas as áreas comuns entre as duas camadas, porém mantendo seus respectivos atributos e limites individualizados (Figura 10). Os atributos relativos aos códigos de legenda de uma e outra camada original foram combinados por meio de uma operação de concatenação de texto na tabela da nova camada. Tal operação permitiu obter código único e exclusivo, relativo a cada combinação particular de tipo de erosão e classe de uso.

Considerando que os cálculos de superfícies não são dinâmicos no SIG, isto é, não são atualizados na tabela quando se faz alguma operação de geoprocessamento, foi necessário eliminar na tabela do novo *shapefile* todos os campos referentes à área em hectares. Efetuou-se, então, um novo cálculo de áreas, referente a cada um dos novos polígonos gerados.

¹Nessa operação pode ocorrer a geração de dois ou mais polígonos representando um único registro na tabela de atributos (*multi-part features*). Nesse caso, é necessário separá-los, usando funcionalidades disponíveis na maioria dos *software* de geoprocessamento.

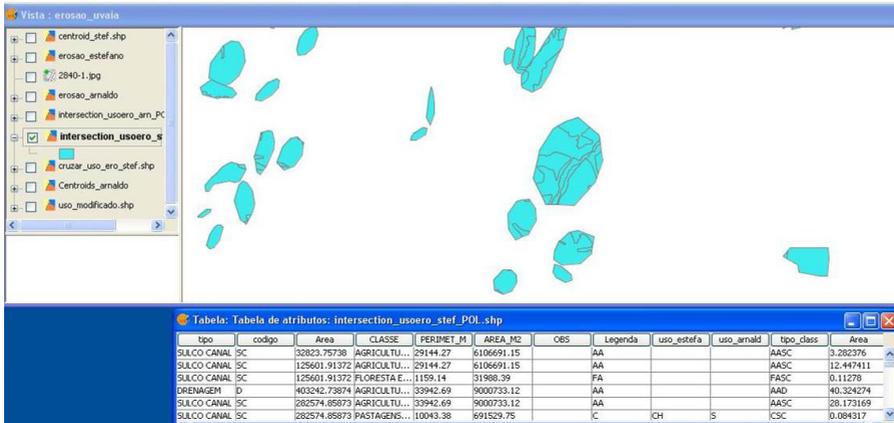


Figura 10. Janela do *software* gvSIG mostrando uma região ampliada do resultado da operação de interseção entre as camadas *Uso da terra* e *Erosão* e respectiva tabela de atributos.

3.4.5. Cálculo do número de pontos e de superfícies afetadas por erosão

Ao se abrir a tabela de atributos do *shapefile* relativo aos centroides dos polígonos de erosão, foi possível quantificar, pelo número de registros, o número total de pontos de erosão observados a partir do avião (192, nesse estudo de caso).

No entanto, para computar o número de polígonos para cada tipo de erosão e para cada classe de uso do solo, individualmente e de forma combinada (tipo de erosão x classe de uso), foi necessário realizar operações conhecidas como "resumo" ou "sumarização" de tabelas, usando o *shapefile* de interseção das referidas camadas. A operação de resumo consiste em selecionar um campo onde estão contidos os atributos pelos quais se deseja classificar as feições, por exemplo, **tipo de erosão**; em seguida deve-se selecionar outro campo, necessariamente numérico, que representará os valores para a classificação, por exemplo, **área**; e, finalmente, escolhe-se a operação, nesse caso, **soma**. Além dos resultados em relação à área, também são computados os números de polígonos para cada feição classificada.

Pelo fato de se estar considerando tanto o tipo de erosão como a classe de uso, é necessário, antes, criar um novo campo que codifique cada combinação “erosão-uso”. Preferencialmente, trabalha-se com códigos em formato texto que podem ser combinados usando as calculadoras de campo disponíveis nos *software* de SIG. Assim, a **classe de uso Agricultura anual**, por exemplo, com código *AA*, pode ser combinada com o **tipo de erosão Leve a moderada**, com código *1*. Na Figura 11 é mostrada a janela de calculadora de campos do gvSIG com a expressão de concatenação de variáveis do tipo *string* (texto) e o respectivo resultado na tabela de atributos do *shapefile* de interseção das referidas camadas.

Os resultados referentes ao número de polígonos e superfície (ha) afetados por tipo erosão, por classe de uso da terra e respectivas combinações encontram-se na Tabela 2.

Assim, considerando as diferentes classes de uso da terra, foram delimitados 323 polígonos de erosão a partir do levantamento aéreo, perfazendo um total de 1779,66 ha. Uma primeira análise permite concluir que, no caso desse estudo-piloto, predominam tipos de erosão leve a moderada. Como era de se esperar, a classe de uso da terra mais afetada pela erosão foi a de agricultura anual, seguida pela de campos e pastagens.

Entretanto, esses valores são absolutos, sendo necessário levar em consideração o padrão da paisagem correspondente à área sobrevoada e a proporção ocupada pelas diferentes classes de uso. Assim, a etapa seguinte das análises consistiu em estimar as porcentagens de superfície de erosão em relação à área total sobrevoada, área de cada classe de uso da terra e área total de erosão (Tabela 3). Também foram calculados esses percentuais em relação ao tipo de erosão (Tabela 4).

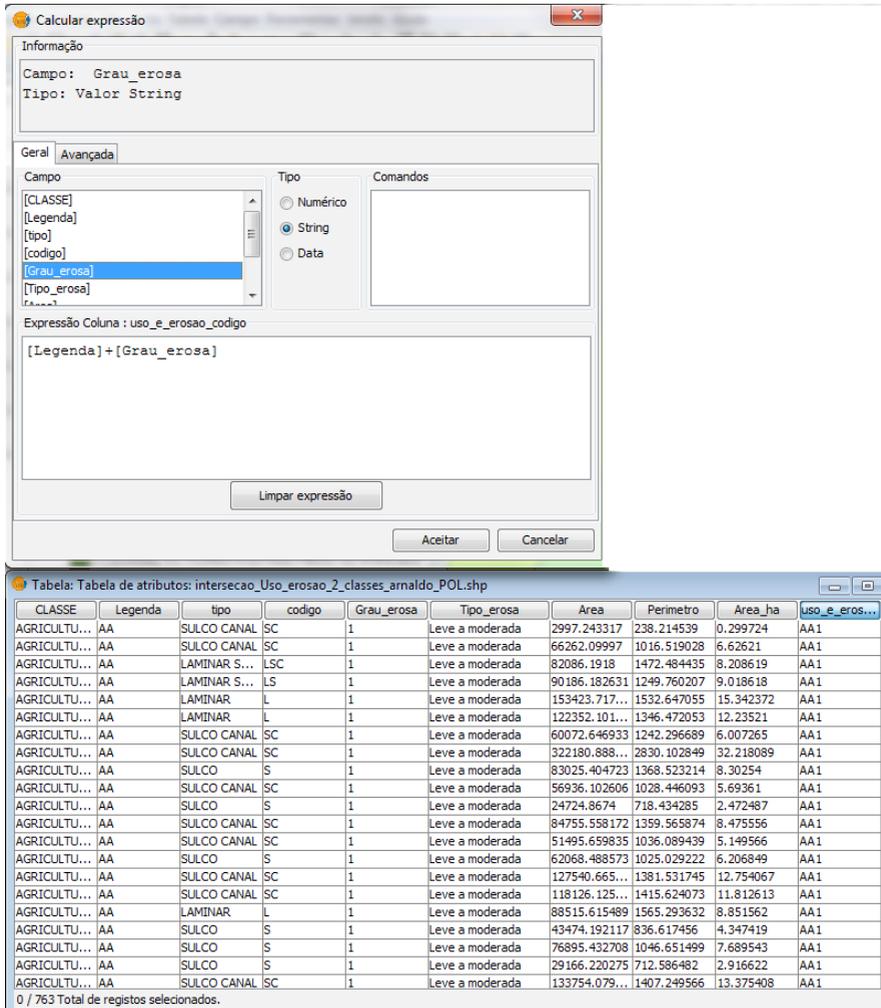


Figura 11. Janela do programa gvSIG, mostrando o uso da calculadora de campo para operações de concatenação de textos.

Tabela 2. Número de polígonos e superfície (ha) observados por tipo de erosão e por classe de uso da terra.

Tipo de erosão/Classe de uso	AA	AP	ED	Água	FI	FA	C	R	SO	VAR	Total
número de polígonos	184	1		18	45	59	3	1	3	314	
Leve a moderada	1.486,83	0,15		10,07	30,06	137,74	40,20	0,63	3,03	1.708,72	
número de polígonos	4			2	3					9	
Severa	68,77			0,66	1,52					70,95	
número de polígonos	188	1	0	0	18	47	62	3	1	3	323
Total	1.555,60	0,15	0,00	10,07	30,73	139,26	40,20	0,63	3,03	1.779,67	

AA = Agricultura anual; FA = Floresta em estágio médio ou avançado; SO = Solo exposto ou mineração; AP = Agricultura perene; C = Pastagens e campos; VAR = Vegetação de várzea; ED = Área urbanizada e construída; R = Reflorestamento; FI = Floresta em estágio inicial; Água = Corpos de água.

Tabela 3. Percentual da superfície de erosão em relação à área total sobrevoada, à área total de erosão e à área de cada classe de uso da terra

Classe de uso	Área classe de uso (ha)	Área com erosão (ha)	Erosão em relação à área de cada classe de uso (%)	Erosão em relação à área total da carta (%)	Erosão em relação à área total de erosão (%)
Agricultura anual	40.807,18	1.555,60	3,81	2,2295	87,41
Agricultura perene	367,73	0,15	0,04	0,0002	0,01
Floresta estágio inicial	1.480,57	10,07	0,68	0,0144	0,57
Floresta estágio médio ou avançado	12.713,95	30,73	0,24	0,0440	1,73
Pastagens e campos	7.986,28	139,26	1,74	0,1996	7,83
Reflorestamento	1.516,91	40,20	2,65	0,0576	2,26
Solo exposto ou mineração	54,6	0,63	1,15	0,0009	0,04
Vegetação de várzea	3.954,72	3,03	0,08	0,0043	0,17
Área urbanizada e construída	3.55,57	0,00	0,00	0,0000	0,00
Corpos d'água	535,12	0,00	0,00	0,0000	0,00
Total	69.772,63	1.779,67	2,55	2,5507	100,00

Tabela 4. Percentual da área de cada tipo de erosão em relação à área total de erosão e à área total sobrevoada.

Tipo de erosão	Área erosão (ha)	% área de erosão em relação à área total de erosão	% erosão em relação à área total da carta
Leve a moderada	1.708,72	96,0	2,45
Severa	70,95	3,40	0,10
Total	1.779,67	100,0	2,55

Observa-se que quase 3% da área sobrevoada são afetados de alguma maneira pela erosão. A distribuição da superfície de erosão é bastante heterogênea, concentrando-se na classe de agricultura anual (87,41%), em seguida em pastagens e campos (7,83%) e o restante se distribuindo entre as demais classes, com exceção de áreas com edificações e corpos d'água.

A classe de agricultura anual também é a mais afetada pela erosão em relação à sua área (3,81%), seguida pela classe reflorestamento que tem comprometidos 2,65% de sua superfície com processos erosivos. Cerca de 1,7% do total das áreas de pastagens também estão comprometidos pela erosão.

Na Tabela 4 observa-se que 96,01% da superfície atingida por erosão correspondem à do tipo leve a moderado. A erosão do tipo voçoroca constitui cerca de 4% da área comprometida pela erosão. De toda a área sobrevoada, 2,45% são atingidos por erosão leve a moderada e apenas 0,1% por erosão severa.

3.4.6. Mapeamento por atributos

O SIG permitiu efetuar o mapeamento da área sobrevoada, atribuindo-se diferentes cores a diferentes polígonos ou pontos, conforme os valores presentes no campo selecionado na respectiva tabela de atributos. Na Figura 12 é mostrada uma janela do programa gvSIG contendo os pontos observados no sobrevoo, classificando-os segundo o tipo de erosão. Na Figura 13 é apresentado um mapa contendo os polígonos afetados por

erosão, em que as diferentes cores correspondem a diferentes combinações de tipo de erosão e classe de uso da terra.

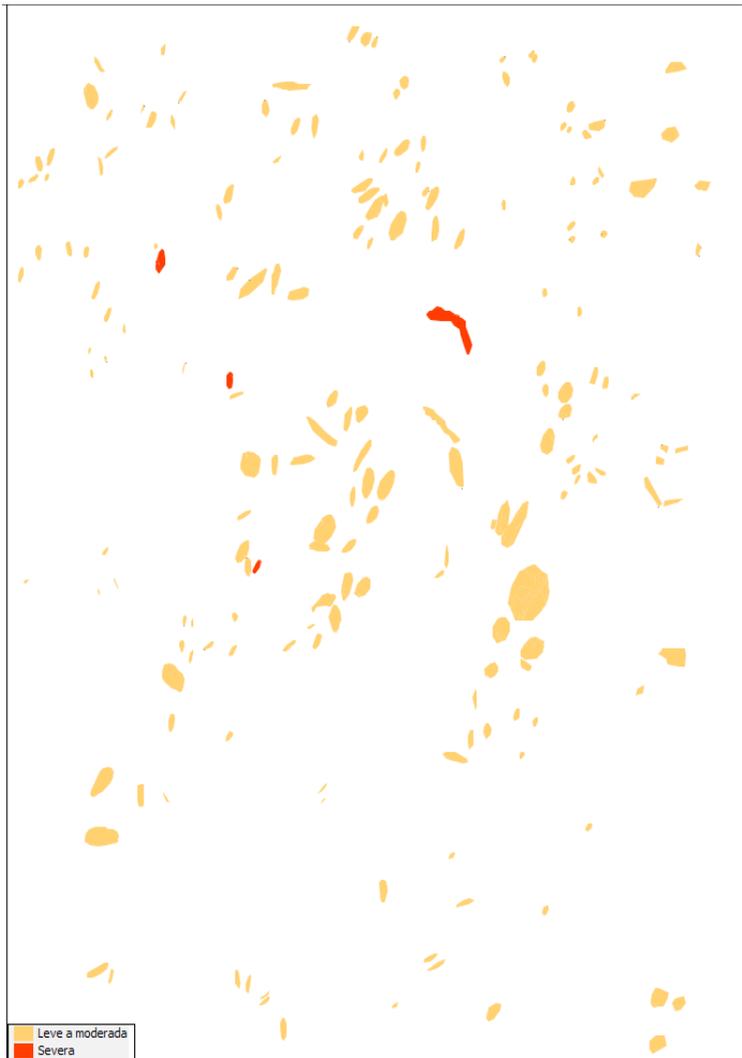


Figura 12. Janela do programa gvSIG com pontos observados no LAE mapeados, em função do tipo de erosão (leve a moderada; severa).

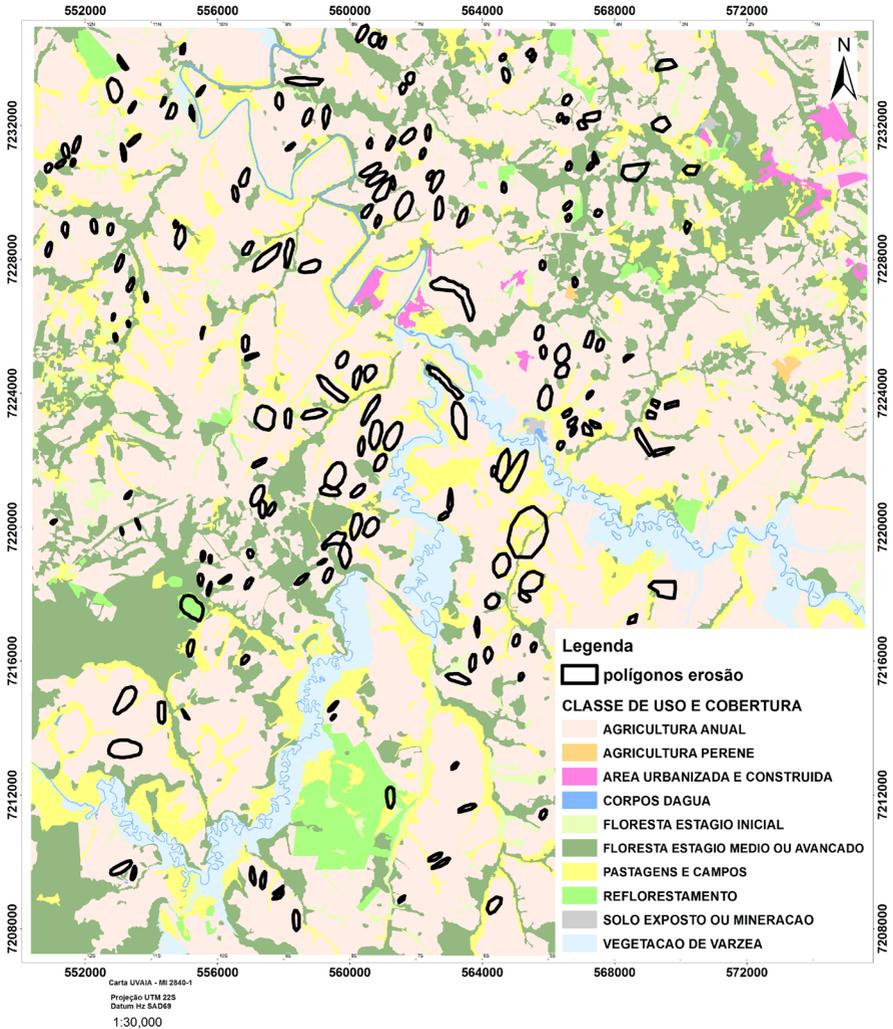


Figura 13. Mapa das diferentes classes de uso da terra afetadas por diferentes tipos de erosão segundo observações do LAE.

4. Avaliação da acuracidade do LAE para mapeamento da erosão

Acuracidade, acurácia ou exatidão temática é o processo de determinação da qualidade da classificação em mapeamentos do uso e/ou cobertura da terra. Sem a informação da qualidade com que as informações foram adquiridas, um mapa pode ser entendido apenas como uma representação hipotética da realidade. A obtenção da acuracidade em qualquer mapeamento consome grande quantidade de tempo e recursos financeiros. Assim, vários métodos foram desenvolvidos para a determinação da acuracidade, sendo todos eles dependentes de dados de campo, denominados dados de referência ou “verdade terrestre”.

Frequentemente, entretanto, esta é uma etapa pouco valorizada no processo, principalmente em levantamentos de grandes áreas, em função dos altos custos do levantamento de campo. É comum que sejam reportadas “visitas ao campo” sem detalhes do número de pontos coletados ou metodologia usada para determinar a exatidão temática, assim como é frequente que os pontos sejam coletados ao longo das estradas e caminhos principais, trazendo tendenciosidades para o processo (ROSOT et al., 2011).

Levantamentos aéreos são reconhecidamente poderosos aliados do monitoramento, em função da rapidez com que é possível sobrevoar grandes áreas. Este é um dos mais fortes argumentos para a adoção do LAE para a verificação da acuracidade temática de mapeamentos, principalmente os que envolvem grandes áreas (DLUGOSZ, 2010).

Além disso, um dos maiores trunfos do uso de levantamentos aéreos para a aferição da acuracidade de um levantamento é a sua independência no acesso às áreas, sem as limitações do traçado de estradas e sem a necessidade de autorização para entrada em propriedades, fatores que dificultam ou até inviabilizam o processo.

A técnica LAE já foi anteriormente utilizada com sucesso no Brasil, para a observação, detecção e registro de classes de uso e cobertura da terra sobre mapa temático em escala 1:50.000, visando a coleta de dados de referência para a avaliação da acuracidade temática de mapa oriundo da classificação digital de imagens SPOT 5 (DLUGOSZ et al., 2010). O autor conclui que a técnica atendeu às expectativas e necessidades na coleta de dados para a avaliação da acuracidade de mapa temático, por propiciar, com baixo custo, um conjunto de dados confiável e de fácil manipulação para a construção da matriz de erros e cálculo dos coeficientes utilizados na aferição da acuracidade temática. Entretanto, observou que a avaliação de um número excessivamente grande de classes de legenda dificulta a coleta de dados para a acuracidade temática.

Nos Estados Unidos e Canadá a acuracidade também já foi verificada no monitoramento do desfolhamento provocado pela lagarta de botões de abeto (*Choristoneura fumiferana* (Clem.)), por MacLean e MacKinnon (1996), iniciando-se em 1996. Os estudos revelaram que a probabilidade da correta classificação do desfolhamento por levantamento aéreo foi altamente afetada pelo número de classes considerado e pelas condições do tempo antes e durante a operação.

No caso do presente trabalho, para poder validar a informação obtida por via aérea, foram efetuadas visitas a campo, cobrindo parcialmente a área sobrevoada. Em função de dificuldades logísticas, não foi possível estabelecer um esquema sistemático de amostragem e tampouco assegurar a representatividade de todas as classes de erosão. Assim, os resultados numéricos devem ser analisados com a devida cautela, considerando-se mais os aspectos qualitativos do que quantitativos.

O levantamento aéreo permitiu a detecção de um número total de 192 pontos de erosão observados a partir do avião, em um total de 14 h, descontados os tempos de abastecimento e chegada ao ponto de origem do levantamento. Tal tempo ainda poderá ser substancialmente reduzido com a capacitação do pessoal na classificação das formas de erosão e com a definição de classes inequívocas de observação, já que uma área de aproximadamente 700 km² foi sobrevoada e é possível realizar o levantamento de 2.000 km² por dia. Considerando-se a eficiência baseada no trabalho efetivamente realizado, foram detectados aproximadamente 14 pontos de erosão por hora.

A região não possui muitas estradas pavimentadas e as estradas vicinais são muito frequentemente intransitáveis em parte do tempo. Assim, o acesso aos pontos selecionados por terra foi também dificultado. Portões fechados a cadeado e a inexistência de guarita ou pessoal nas redondezas impediu a entrada em muitas propriedades. Tal situação seria ainda mais crítica se a equipe não fosse composta por engenheiro da Agência de Defesa Agropecuária do Paraná (Adapar), em veículo devidamente identificado, o que permitiu a negociação com funcionários, já no interior das propriedades.

O levantamento em campo teve início às 10:53 h (tomada do primeiro ponto) e terminou às 17:56 h, segundo horário verificado no GPS de navegação. Três pesquisadores, de carro, percorreram um total de 112,73 km para a verificação de 18 pontos no terreno em 6 h efetivas de trabalho, o que permite afirmar que apenas 3 pontos por hora foram passíveis de localização, mas nesse caso a lógica envolvida obrigava a equipe a localizar pontos anteriormente mapeados pelo levantamento aéreo, para constatação do acerto de sua classificação. O trajeto percorrido, obtido por meio do mesmo tablet empregado no voo, bem como os pontos visitados, são mostrados na Figura 14, gerada pelo *software* gvSIG. Foram registradas as coordenadas dos 18 pontos, o tipo de erosão presente e a respectiva classe de uso da terra.

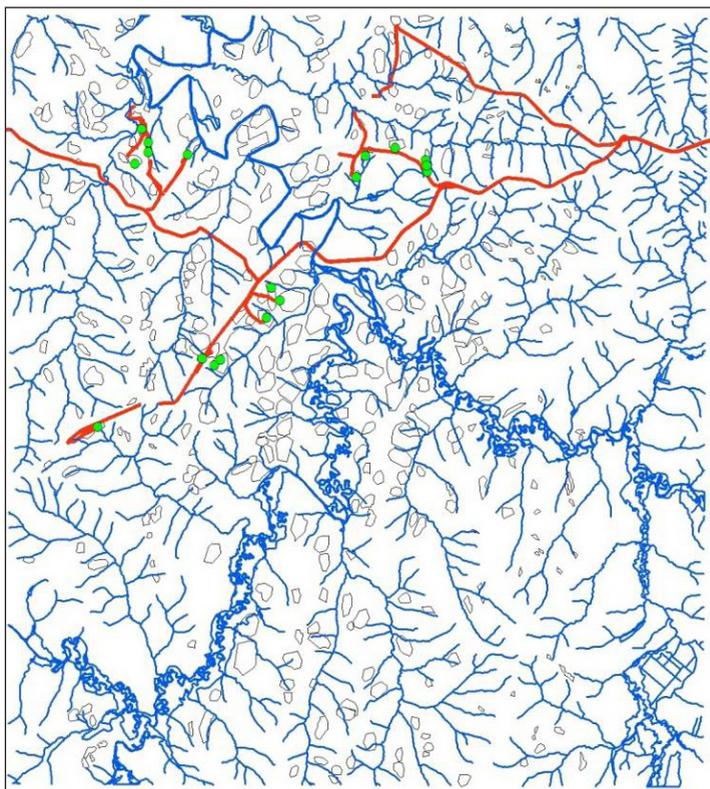


Figura 14. Hidrografia da área de estudo, trajeto percorrido por terra e pontos de controle em campo sobrepostos aos polígonos de erosão mapeados usando o LAE.

A ferramenta de junção espacial, disponível na maioria dos *softwares* de geoprocessamento, permite transferir os atributos de uma camada (polígonos do LAE) para outra (pontos observados no terreno), com base em sua localização espacial. Dessa forma, foi possível reunir, em uma só tabela, os códigos dos tipos de erosão observados pelos levantamentos aéreo e terrestre.

Para verificar o número de polígonos corretamente mapeados, usando a técnica de LAE, foi efetuada uma operação de seleção por atributos no SIG. Assim, foram selecionados todos os pontos cujo código de tipo de erosão coincidissem com o do polígono mapeado pelo LAE (Figura 15).

Conforme se pode observar em maior detalhe na Figura 16, o número de polígonos corretamente classificados pelo LAE foi igual a nove, ou seja, aproximadamente 50% do número de pontos levantado em campo.

Nesse estudo de caso, em particular, a classe sulco-canal concentrou 50% dos pontos amostrados em campo em detrimento das outras classes. No entanto, no mapa gerado pelo LAE (Tabela 5), a somatória das áreas dessa classe corresponde a 46% de toda a superfície para a qual foi detectado o fenômeno na área sobrevoada. Assim, havia uma grande probabilidade de concentração de pontos amostrais nessa classe, sobretudo considerando-se que apenas parte da área foi objeto da verificação em campo.

Também em ambiente de SIG efetuou-se a sobreposição dos pontos amostrados sobre o mapa de declividade, observando-se que a maioria deles se encontrava sobre a classe de relevo ondulado, com declividade de 8% a 20% (Figura 17).

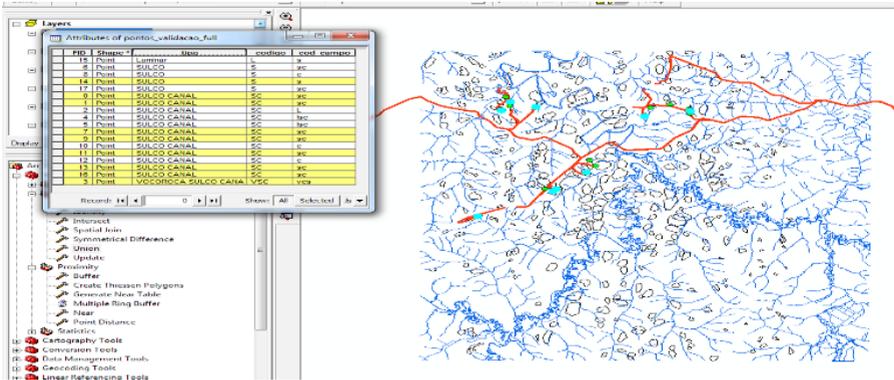


Figura 15. Janela do SIG mostrando os pontos de erosão corretamente classificados pela técnica de LAE (em azul claro) e a respectiva tabela de atributos (seleção em amarelo).

	A	B	C
1	tipo	codigo	cod_campo
2	SULCO CANAL	SC	sc
3	SULCO CANAL	SC	sc
4	SULCO CANAL	SC	L
5	VOCOROCA SULCO CANAL	VSC	vcs
6	SULCO CANAL	SC	lsc
7	SULCO CANAL	SC	lsc
8	SULCO	S	sc
9	SULCO CANAL	SC	sc
10	SULCO	S	c
11	SULCO CANAL	SC	sc
12	SULCO CANAL	SC	c
13	SULCO CANAL	SC	sc
14	SULCO CANAL	SC	c
15	SULCO CANAL	SC	sc
16	SULCO	S	s
17	Laminar	L	s
18	SULCO CANAL	SC	sc
19	SULCO	S	sc

Figura 16. Janela do SIG mostrando sua tabela de atributos, com pontos de erosão corretamente classificados pela técnica de LAE (seleção em amarelo). Na coluna "C" estão os códigos dos tipos de erosão observados em campo e, na coluna "B", aqueles mapeados a partir do sobrevoo.

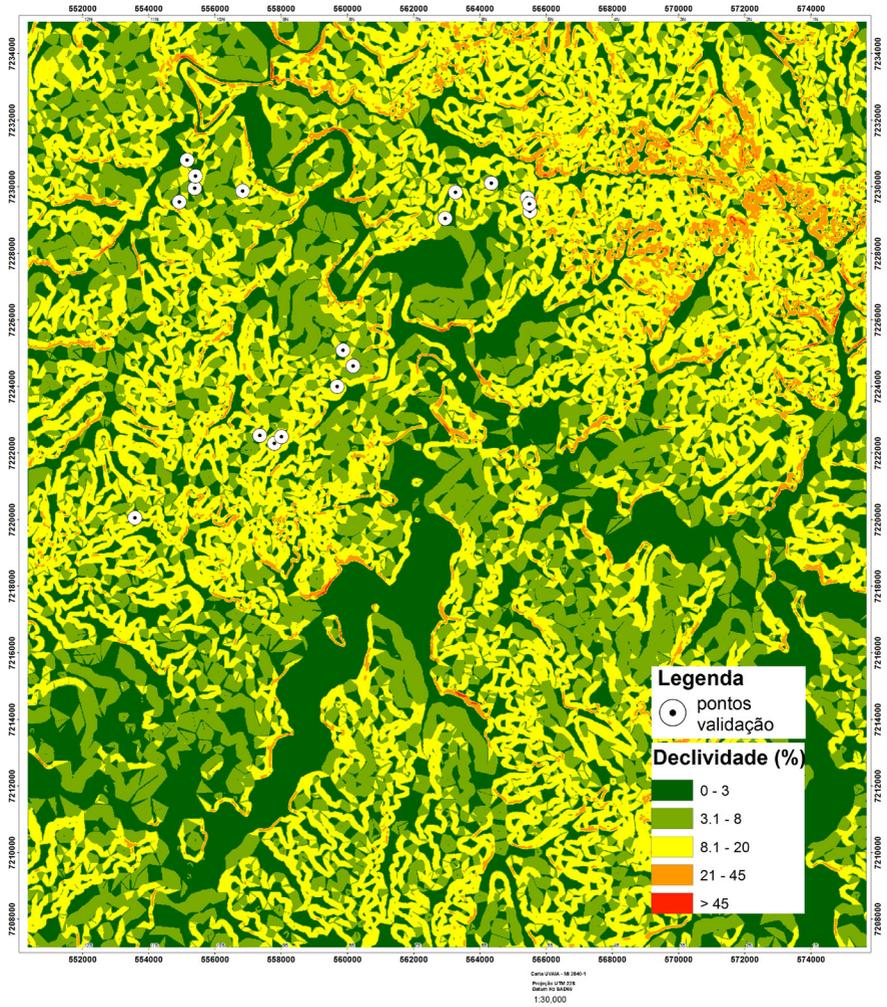


Figura 17. Mapa de classes de declividade da área de estudo onde estão sobrepostos os pontos observados em campo.

Classes como laminar, laminar-sulco-canal e canal não conseguiram ser discriminadas a partir do sobrevoo, resultando em um erro de omissão de 100%. Por outro lado, parece haver uma tendência em classificar como erosão do tipo sulco os polígonos, que, na verdade, pertencem a outras classes, confundindo-se com as classes canal e sulco-canal. É necessário ressaltar, no entanto, que as diferenças entre elas são bastante sutis e que, muitas vezes, essas combinações de classes representam diferentes graus de severidade ou evolução dos processos erosivos, apenas detectáveis *in loco*.

Além da baixa intensidade amostral empregada para a avaliação da acuracidade da metodologia, acredita-se que outros fatores ainda estejam influenciando os resultados obtidos. O aprimoramento e padronização de legenda, por exemplo, são essenciais para a geração de resultados consistentes e para o sucesso do treinamento de observadores aéreos. Também é necessária uma análise crítica das possibilidades e limitações da técnica, inclusive quanto à real capacidade de discriminação e delimitação dos diferentes tipos de erosão a partir da perspectiva aérea.

5. Considerações finais

A maior vantagem da técnica de LAE para a detecção, classificação e quantificação dos processos erosivos e respectivas superfícies reside em sua ótima relação custo-benefício quando comparada a métodos convencionais de observação e mapeamento em campo.

A eficácia da técnica depende, basicamente, de um bom treinamento da equipe de LAE, da disponibilidade de aeronaves e material de voo adequados e da escolha correta das “janelas de oportunidade” para a detecção dos fenômenos que se deseja mapear.

As etapas pós-voo consistem em operações básicas de geoprocessamento, passíveis de serem executadas em qualquer *software* de SIG, inclusive os de uso livre.

Avanços na utilização e aperfeiçoamento da técnica para o levantamento de processos erosivos dependem da realização de mais campanhas de voo, em diferentes épocas do ano e em diferentes regiões.

Uma avaliação definitiva quanto à acuracidade das informações obtidas a partir da técnica de LAE requer o estabelecimento de um esquema rigoroso de amostragem a campo nas campanhas de treinamento de observadores aéreos.

Referências

ARAGÃO, R.; ALMEIDA, J. A. P.; FIGUEIREDO, E. E.; SRINIVASAN, V. S. Mapeamento do potencial de erosão laminar na Bacia do Rio Japarutuba, SE, via SIG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 7, p. 731-740, 2011.

BACCARO, C. A. D. As unidades geomorfológicas e a erosão no chapadão do Município de Uberlândia. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, v. 6, n. 11/12, p. 55-62, 1994.

BACCARO, C. A. D.; CARRIJO, B. R. Dinâmica e evolução dos processos erosivos no oeste do Triângulo Mineiro: a bacia do Ribeirão Boa Vista - Prata-MG. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROSAO; 7., 2001, Goiânia. **Anais...** Goiânia: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, 2001. Disponível em <http://www.labogef.iesa.ufg.br/links/simpósio_erosao/articles/T082.pdf>. Acesso em: 02 nov. 2013.

BARBOSA, F. T.; BERTOL, I.; WERNER, R. S.; RAMOS, J. C.; RAMOS, R. R. Comprimento crítico de declive relacionado à erosão hídrica, em diferentes tipos e doses de resíduo em duas direções de semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 36, p.1279-1290, 2011.

BERTOL, I.; LEITE, D.; GUADAGNIN, J. C.; RITTER, S. R. Erosão hídrica em um Nitossolo Háplico submetido a diferentes sistemas de manejo sob chuva simulada. II. Perdas de nutrientes e carbono e orgânico. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Campinas, v. 28, p. 1045-1054, 2004.

BERTOL, I.; COGO, N. P.; SCHICK, J.; GUDAGNIN, J. C.; AMARAL, A. J. Aspectos financeiros relacionados às perdas de nutrientes por erosão hídrica em diferentes sistemas de manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 31, n. 1, p. 133-142, 2007.

CALEGARI, A.; CAVIGLIONE, J. H. Identifying the No Till area expansion in Parana State (southern Brazil) using satellite images. In: AN INTERNATIONAL TECHNICAL WORKSHOP INVESTING IN SUSTAINABLE CROP INTENSIFICATION: the case for improving soil health, 2008, Rome. [**Proceedings...**]. Rome: FAO, 2008.

CANTALICE, J. R. B. **Escoamento e erosão em sulcos e em entressulcos em distintas condições de superfície do solo**. 2001. 141 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

CASSOL, E. A.; LIMA, V. S. Erosão em entressulcos sob diferentes tipos de preparo e manejo do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 38, n. 1, p. 117-124, jan. 2003.

CAVIGLIONE, J. H.; KIIHL, L. R. B.; CARAMORI, P. H.; OLIVEIRA, D. **Cartas climáticas do Paraná**. Londrina: IAPAR, 2000. Disponível em: <<http://www.iapar.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=677>>. Acesso em: 6 dez. 2013.

CIESLA, W. M.; JOHNSON, E. W.; OLIVEIRA, Y. M. M. de; ROSOT, M. A. D.; ELLENWOOD, J.; PENTEADO JUNIOR., J. F. Development of an aerial sketchmap program for detection and mapping of forest damage in Brazil. In: SEMINÁRIO DE ATUALIZAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO E SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS APLICADOS À ENGENHARIA FLORESTAL, 5, 2002, Curitiba. **Anais...** Curitiba: FUPEF, 2002. p. 31-38.

CIESLA, W. M. Technologies and observer training for improved aerial forest health surveys in the United States. In: SEMINÁRIO DE ATUALIZAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO E SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS APLICADOS À ENGENHARIA FLORESTAL, 8, 2008, Curitiba. **Anais...** Curitiba: FUPEF, 2008. p. 628-633.

DENARDIM, J. E.; KOCHHANN, R. A.; FAGANELLO, A.; SATTler, A.; MANHAGO, D. D. "Vertical mulching" como prática conservacionista para manejo de enxurrada em Sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 32, nesp. p. 2847-2852, 2008.

DIEKOW, J. **Erosão hídrica: mecanismo e formas**. Curitiba, 20nov. 2012. Notas de aula (UFPR). Não publicado.

DLUGOSZ, F. L. **Uso da técnica de levantamento aéreo exedito convencional e digital para o monitoramento do uso e cobertura da terra**. 2010. 150 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Paraná, Curitiba.

DLUGOSZ, F. L.; ROSOT, N. C.; ROSOT, M. A. D.; OLIVEIRA, Y. M. M. de; GARRASTAZU, M. C. Uso do levantamento aéreo expedito convencional e digital para o monitoramento da cobertura florestal no Paraná: estado da arte e potencialidades. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 30, n. 63, p. 245-252, ago./out. 2010. DOI: 10.4336/2010.pfb.30.63.245.

IBGE. **Manual técnico de pedologia**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2007. 316 p. (Manuais técnicos de geociências, n. 4).

LIMA, V. S. **Erosão em entressulcos e em sulcos sob diferentes tipos de preparo do solo e manejo de resíduos culturais**. 1997. 124 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MacLEAN, D. A.; MacKINNON, W. E. Accuracy of aerial sketch-mapping estimates of spruce budworm defoliation in New Brunswick. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 26, n. 12, p. 2099-2108, 1996. DOI: 10.1139/x26-238.

MARIOTI, J. **Erosão hídrica em cambissolo húmico cultivado com milho e soja sem preparo do solo, nas direções da pendente e em contorno ao declive, comparada ao solo sem cultivo**. 2012. 74 f. Dissertação (Mestrado em Manejo do Solo) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages.

OLIVEIRA, Y. M. M. de; ROSOT, M. A. D.; AUER, C. G.; PENTEADO JUNIOR, J. F. CIESLA, W. M.; JOHNSON, E. W.; GEBLER, C. K. O uso do levantamento aéreo expedito para detecção da armilariose em *Pinus* spp. In: SEMINÁRIO SOBRE A ARMILARIOSE EM PÍNUS NO BRASIL, 1., 2005, Colombo. **Memórias**. Colombo: Embrapa Florestas, 2005. p. 51-64. (Embrapa Florestas. Documentos, 108).

OLIVEIRA, Y. M. M. de; ROSOT, M. A. D.; CIESLA, W. M.; JOHNSON, E. W.; RHEA, R.; PENTEADO JUNIOR, J. F.; LUZ, N. B. da. O mapeamento aéreo expedito para o monitoramento florestal no sul do Brasil. In: DISPERATI, A. A.; SANTOS, J. R. dos (Ed.). **Aplicações de geotecnologias na Engenharia Florestal**. Curitiba: Copiadora Gabardo, 2004. p. 12-24.

OLIVEIRA, Y. M. M. de; ROSOT, M. A. D.; FAGUNDES, M. C. M.; VIANA, F. de M.; PENTEADO JÚNIOR, J. F. O levantamento aéreo expedito como ferramenta para o monitoramento florestal. In: GIS BRASIL: 9º Show de Tecnologias, 2003, São Paulo. [Anais]. São Paulo: Fator Gis, 2003.

OLIVEIRA, Y. M. M. de; GARRASTAZU, M. C.; ROSOT, N. C.; ROSOT, M. A. D.; SOARES, A. de O.; PENTEADO JÚNIOR, J. F.; CIESLA, W. M.; JOHNSON, E. **Levantamento Aéreo Expedito (LAE)**. 2. ed. rev. Colombo: Embrapa Florestas, 2008. 53 p. (Embrapa Florestas. Documentos, 157).

ROSOT, M. A. D.; OLIVEIRA, Y. M. M. de; AUER, C. G. Mapeamento de focos de armilariose em plantações florestais na região Sul do Brasil. In: SEMINÁRIO SOBRE A ARMILARIOSE EM PÍNUS NO BRASIL, 1., 2005, Colombo. **Memórias**. Colombo: Embrapa Florestas, 2005. p. 37-50. (Embrapa Florestas. Documentos, 108).

ROSOT, M. A. D.; GARRASTAZU, M. C.; DLUGOSZ, F. L.; ROSOT, N. C.; OLIVEIRA, Y. M. M. de. O gvSIG aplicado à avaliação da acuracidade de mapas temáticos com base no método de Levantamento Aéreo Expedito (LAE). In: JORNADA LATINOAMERICANA E DO CARIBE DO GVSIG. 3., 2011, Foz do Iguaçu. **Compartilhando um projeto comum**: [anais eletrônicos]. Valencia: Asociación gvSIG , 2011. 16 p.

SÁ, M. F. M. Os solos dos Campos Gerais. In: MELO, M. S.; MORO, R. S.; GUIMARÃES, G. B. **Patrimônio natural dos Campos Gerais do Paraná**. Ponta Grossa: Ed da UEPG, 2007. p. 73-83. Disponível em <http://ri.uepg.br:8080/riuepg/bitstream/handle/123456789/450/CAP%C3%8DTULO6_SolosCamposGerais.pdf?sequence=1>. Acesso em: 6 dez. 2013.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; OLIVEIRA, J. B. de; COELHO, M. R.; LUMBRERAS, J. F.; CUNHA, T. J. F. (Ed.). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.

SANTOS, L.; BACCARO, C. A. D. Caracterização geomorfológica da bacia do rio Tijucu. **Caminhos de geografia**, Uberlândia, v. 1, n. 11, p. 1-21, fev. 2004. Disponível em <<http://www.seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/15321>>. Acesso em: 6 dez. 2013.

SCHÄFER, M. J.; REICHNERT, J. M.; CASSOL, E. A.; ELTZ, F. L. F.; REINERT, D. J. Erosão em sulcos em diferentes preparos e estados de consolidação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 25, p. 419-430, 2001.

STROOSNIJDER, L. Measurement of erosion: is it possible? **Catena**, Amsterdam, v. 64, n. 2-3, p. 162-173, 2005.

WALTRICK, P. C. **Erosividade de chuvas no Paraná**: atualização, influência do “*el niño*” e “*la niña*” e estimativa para cenários climáticos futuros. 2010. 107 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

Embrapa

Florestas