

# DINÂMICA EROSIVA LINEAR: ESTUDO DE CASO EM ÁREA RURAL NO OESTE PAULISTA

Felipe Augusto Scudeller ZANATTA<sup>1</sup>  
Cenira Maria LUPINACCI<sup>2</sup>  
Marcos Noberto BOIN<sup>3</sup>

## RESUMO

O presente estudo objetiva avaliar as características físicas que, quando submetidas ao uso agrícola, podem gerar condições para a formação e desenvolvimento dos processos erosivos lineares. Para tanto, selecionou-se uma sub-bacia com intensa atividade erosiva, localizada na região do Oeste Paulista. Nessa área, mapearam-se as feições erosivas lineares em sulco, ravina e voçoroca nos anos de 1963, 1997 e 2016, e as variáveis litologias, formas de relevo, declividade e o uso da terra. Posteriormente, foi analisada a distribuição das formas erosivas nos três anos sobre as variáveis. Como resultado, com o uso extensivo e contínuo do pasto há pelo menos cinco décadas, a erosão se mostrou mais ativa sobre as litologias silto-argilosas, declives de 15-47% e  $\geq 47\%$  e nas vertentes côncavas, atingindo terrenos com outras características pela erosão remontante e o efeito de borda. As concavidades ainda tendem a concentrar ravinas e voçorocas e conectar os processos erosivos das áreas mais elevadas com os que se estabelecem nos setores de menor altitude.

**Palavras-chave:** Variáveis físicas. Pasto. Formas erosivas lineares. Efeito de borda.

## LINEAR EROSION DYNAMICS: CASE STUDY IN A RURAL AREA OF WESTERN SÃO PAULO

### ABSTRACT

We aim to evaluate physical characteristics that, when submitted to agricultural use, can promote the formation and development of linear erosion processes. To do so, we selected a subbasin with intense erosion activity located at the western region of the state of São Paulo, Brazil. In this area, we mapped linear erosion features, such as furrows, ravines, and badlands, in the years 1963, 1997, and 2016 and also the variables lithology, landforms, slope, and land use. Subsequently, we analyzed the distribution of erosion forms in the variables in

---

<sup>1</sup> Doutor em Geografia pela Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho (UNESP), Campus Rio Claro. Professor da rede municipal de ensino da cidade de São Paulo. E-mail: felipeasz@hotmail.com

<sup>2</sup> Professora Doutora do Departamento de Geografia e Planejamento Ambiental e do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Campus Rio Claro. E-mail: cenira.lupinacci@unesp.br

<sup>3</sup> Professor Doutor pesquisador do Laboratório de Solos - Labsolos e Grupo de Pesquisa Interações na superfície, água e atmosfera - GAIA, da UNESP de Presidente Prudente. E-mail: marnorboin@gmail.com

the three years. As a result, with the extensive and continuous use of pasture for at least five decades, we verified that erosion has been more active on silty-clay lithologies, slopes of 15-47% and  $\geq 47\%$ , and on concave slopes, reaching lands with other characteristics through regressive erosion and the edge effect. Slope concaves comprised ravines and mostly badlands, and served as connectors between erosion processes that occur in higher areas and those occurring in sectors of lower altitude.

**Keywords:** Physical variables. Pasture. Linear erosion forms. Edge effect.

## DINÂMICA EROSIVA LINEAL: ESTUDIO DE CASO EN ÁREA RURAL EN OESTE PAULISTA

### RESUMEN

Este estudio tiene como objetivo evaluar las características físicas que, cuando se someten al uso agrícola, pueden generar condiciones para la formación y el desarrollo de procesos erosivos lineales. Para esto, se seleccionó una subcuenca con intensa actividad erosiva, ubicada en la región del Oeste Paulista. En esta área, se cartografiaron características erosivas lineales en surcos erosivos, barrancos y quebradas en los años 1963, 1997 y 2016, y las variables litologías, formas de relieve, declividad y uso de la tierra. Posteriormente, se analizó la distribución de formas erosivas en los tres años sobre las variables. Como resultado, con el uso extenso y continuo del pasto durante al menos cinco décadas, se ha demostrado que la erosión es más activa en litologías limo-arcillosas, pendientes de 15-47% y  $\geq 47\%$  y en vertientes cóncavas, llegando al terreno con otras características, por la erosión superpuesta y el efecto de borde. Las concavidades concentraron las quebradas y, principalmente, barrancos y sirvieron como conectores de los procesos erosivos de las áreas más altas con los establecidos en los sectores de menor altitud.

**Palabras clave:** Variables físicas. Pastos. Formas erosivas lineales. Efecto de borde.

### INTRODUÇÃO

De acordo com o relatório da *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO, 2015), 1/3 das terras destinadas à agricultura no mundo encontram-se degradadas, principalmente aquelas utilizadas para pecuária.

Essa preocupação com a degradação das terras se deve a perda de solos, de fertilidade e da quantidade de terras agricultáveis, de modo a proporcionar ônus para toda sociedade, uma vez que promove a redução dos recursos naturais disponíveis e encarece a produção de alimentos, mas, pontualmente,

prejudica os lavradores e afeta a economia (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1990).

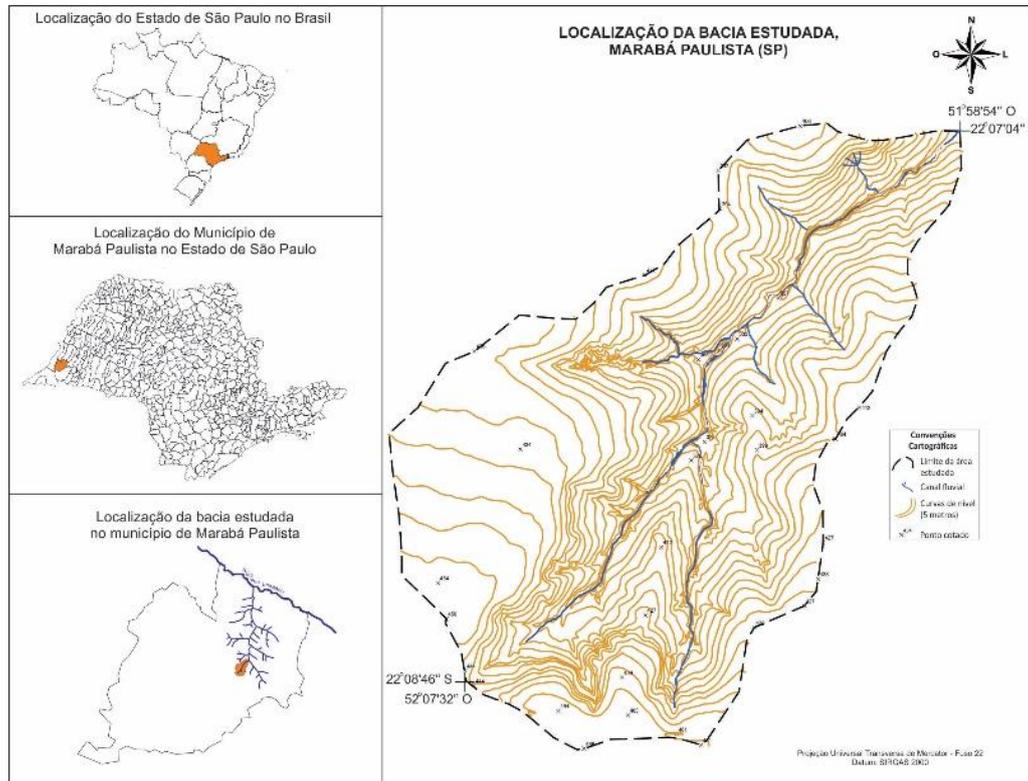
A erosão do solo constitui em um fenômeno natural, resultante da “realização de um conjunto de ações que modela uma paisagem” (GUERRA; GUERRA, 2010, p.229). Bertoni e Lombardi Neto (1990) definem como “processo de desprendimento e arraste acelerado das partículas do solo, causado pela água e pelo vento” (p.68). No entanto, embora natural, diversas pesquisas apontam que a ação humana, ao modificar o ambiente, pode proporcionar no aumento da frequência e da magnitude com que este processo ocorre, resultando na degradação do ambiente.

Guerra e Marçal (2006) indicam que para elaboração de diagnósticos de áreas degradadas, um dos elementos a serem identificados consiste na tendência evolutiva, relacionado às características físicas, “[...] e das interferências que podem sofrer dos demais componentes ambientais ou da ação humana” (p.72).

Murray *et al.*(2009) exemplifica que os sistemas naturais se encontram em constante estado de autorregulação dinâmica, sofrendo, por vezes, com forçamentos provocados por fenômenos naturais extremos ou pressão excessiva que a ação antrópica estabelece nos sistemas naturais, de modo que o comportamento dos fenômenos no ambiente se tornam irregulares e de complexo entendimento.

No intuito de compreender a dinâmica da erosão em ambientes rurais e degradados, objetiva-se neste estudo avaliar as características das variáveis físicas que, quando submetidas ao uso da terra, podem gerar condições para a formação e desenvolvimento dos processos erosivos lineares. Para tanto, selecionou-se uma sub-bacia do ribeirão Areia Dourada, localizada no município de Marabá Paulista (SP), no extremo oeste do estado de São Paulo (Figura 1).

**Figura 1** - Localização da sub-bacia do ribeirão Areia Dourada, Marabá Paulista (SP).



A área estudada encontra-se no contexto litológico do Grupo Bauru, sobretudo da Formação Adamantina, que intercala fácies arenosa, argilosa e siltsosa. Estas fácies determinam a relação de infiltração e escoamento dos terrenos (CETESB, 1994).

Sobre essas características litológicas, atua uma condição climática tipicamente tropical, alternando estações chuvosas e de reduzida precipitação. Boin (2000) destaca que em anos secos ocorre um período aproximado de três meses de chuvas muito reduzidas de junho a setembro, seguido de meses com alta precipitação de setembro a março. O autor alerta que na transição do longo período seco, para outro chuvoso há um aumento significativo da erosividade das chuvas, uma vez que ocorrem de forma intensa e encontram os solos ressecados.

Nessa região mais continental do estado, o processo de ocupação foi tardio quando comparado à porção mais litorânea à L. De acordo com Monbeig (1984) esse processo ocorreu com maior rapidez no início do século XX, pela

expansão dos latifúndios para produção de café. O autor, ao descrever a rápida remoção da floresta nativa, sem qualquer critério para o desmatamento, o considerou uma devastação sem freios.

Essa característica de ocupação estabeleceu para a área uma prática de uso dos recursos naturais estritamente econômica, desconsiderando a importância da mata nativa na proteção dos solos e regulação da água, em litologias areníticas sob atuação de um clima tropical.

O uso contínuo e desmedido resultou em um quadro erosivo preocupante, de modo que levantamentos realizados por órgãos técnicos (IPT, 2012; IPT, 2015) e pesquisas científicas (STEIN, 1999; BOIN, 2000; ZANATTA, 2018), ressaltaram a problemática erosiva das áreas rurais nessa região, principalmente do município de Marabá Paulista.

Ao considerar a sub-bacia do ribeirão Areia Dourada como um recorte dessa problemática de contexto regional, foram identificadas e mapeadas as formas erosivas lineares em sulco, ravina e voçoroca, nos anos de 1963, 1997 e 2016, de modo a verificar as condições litológicas, de formas de relevo e de declividades dos terrenos onde tais feições ocorreram.

Como a ação humana torna complexa a resposta do ambiente, neste estudo avaliaram-se os atributos dos elementos físicos e o tipo de uso e cobertura superficial da terra, junto do histórico evolutivo das feições erosivas lineares. Desse modo, através da espacialização destas em uma perspectiva histórica, busca-se compreender a dinâmica erosiva sobre as características físicas e as coberturas superficiais, identificando a maior ou menor presença de formas erosivas ao longo do tempo, sua localização e os caminhos por onde evoluíram.

## **MATERIAIS E PROCEDIMENTO METODOLÓGICOS**

Como base para os mapeamentos das formas erosivas em sulco, ravina e voçoroca e do uso e cobertura superficial da terra foram utilizadas diferentes fontes e tipos de mapeamentos (Quadro 1).

**Quadro 1** - Produtos de sensoriamento remoto e tipos de mapeamentos utilizados para levantamento das formas erosivas lineares e do uso e cobertura superficial da terra nos anos de 1963, 1997 e 2016.

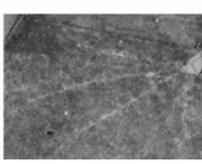
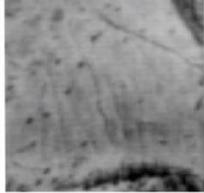
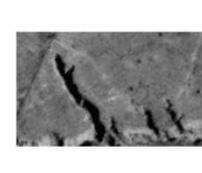
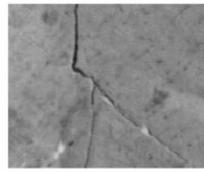
Fonte	Ano	Escala/ Resolução	Fotografias no catálogo	Tipo de mapeamento realizado
Estado de São Paulo	1963	1: 25.000	FX91A-2857 e 2858; FX92-2871 e 2873; e FX93-2921 e 2922.	Fotointerpretação em estereoscopia digital.
Aerolevantamento Presidente Venceslau e áreas correlatas	1997	1:35.000	07/5884; 07/5885 e 07/8856.	Fotointerpretação em estereoscopia digital.
Google Earth – satélite Quickbird	2013	Resolução 0,6m	Sem informação.	Interpretação e reambulação dos dados em campo em 2016.

Para o levantamento das formas erosivas lineares, em um primeiro momento, buscou-se a conceituação das mesmas, de modo a compreender o fenômeno erosivo enquanto processo e as formas como indicativo de cada estágio.

Assim, de acordo com revisão bibliográfica sobre a temática, considerou-se sulco erosivo como primeiro estágio, caracterizado como pequena incisão vertical, ainda passível de correção com procedimentos simples no preparo do solo (LAL, 1990; SALOMÃO, 2012; SOIL CONSERVATION SERVICE, 2006), ravinhas como incisões mais profundas, com formação de fundo e paredes laterais (FOOKES, 2007; KARMAN, 2008); e voçorocas quando a erosão linear atinge e expõe o lençol freático (DAEE; IPT, 1989; FOOKES, 2007; SALOMÃO, 2012).

A partir dessas definições, buscou-se identificar as formas lineares em cada uma das fontes e em trabalhos de campo, no ano de 2016 (Figura 2).

**Figura 2** - Identificação das formas erosivas lineares em campo e nos produtos de sensoriamento remoto.

Formas erosivas lineares	Fotografia em campo	Fonte		
		Quickbird, 2013	IGC, 1997	São Paulo, 1963
		Resolução 0,6m	Escala de voo 1: 25.000	Escala de voo 1: 35.000
Sulco				
Ravina				
Voçoroca				Forma inexistente

O uso e cobertura superficial da terra foi mapeado para os anos de 1963, 1997 e 2013, sendo, no caso do último, os dados foram reambulados em campo no ano de 2016 (Tabela 1). Na identificação das classes temáticas, seguiram-se as orientações do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2006; 2012), de modo a mapear: Floresta Estacional Semidecídua; vegetação de área úmida; reflorestamento; silvicultura; lavoura temporária; pasto e pasto sujo.

Os dados espaciais das litologias foram obtidos a partir do mapeamento realizado pelo Instituto de Pesquisa Tecnológica (1994) na escala 1:250.000 e detalhado após revisão de Stein (1999) para escala 1:100.000. A partir desta base de dados, as informações foram adaptadas à escala 1:10.000, através da reambulação em campo, onde foram levantados os setores com afloramentos rochosos. As rochas foram identificadas de acordo com as descrições das fácies das Formações Adamantina e Santo Anastácio em diversos trabalhos na região (ALMEIDA, 1964; IPT, 1994; FERNANDES, 1998; STEIN, 1999; BOIN, 2000; AGOSTINHO, 2009). Através dessas informações de campo, ajustaram-se os limites de cada Formação na sub-bacia do ribeirão Areia Dourada.

Para identificar as formas de relevo e a declividade utilizaram-se como base as cartas topográficas desenvolvidas pelo Instituto Geográfico e Cartográfico (IGC, 2000), folhas SF-22-Y-B-I-2-NE-F 057/019; SF-22-Y-B-II-1-NO-E 057/020; SF-22-Y-B-I-2-SE-B 058/19; e SF-22-Y-B-II-1-SO-A 058/20, em escala 1:10.000, com equidistância das curvas de nível de 5 metros.

As formas de relevo foram mapeadas mediante a interpretação do significado morfológico do contorno das curvas de nível. Nos setores de maior elevação, em que se fecha a mesma curva de nível, identificou-se como topo. Os setores inclinados foram diferenciados em: vertente convexa; vertente retilínea; vertente côncava; e vertente irregular (onde a sequência das curvas de nível, não permitiu identificar um contorno típico de uma determinada forma, sendo uma situação que se deve também a escala da pesquisa). As áreas de terraço e planície fluvial foram mapeadas a partir das imagens orbitais do satélite *Quickbird* (2013), com reambulação em campo no ano de 2016.

Para a elaboração da carta de declividade, os dados de curva de nível e ponto cotado, com as respectivas altitudes, foram trabalhados no *software* ArcMap, através da ferramenta “*create tin from feature*”, com 5 m de resolução. Após estes procedimentos automáticos, realizou-se a verificação dos erros, ajustando manualmente os setores onde estes foram identificados.

O intervalo das classes de declividade foi estabelecido a partir de critérios que se basearam nas limitações físicas, características litológicas da área, no uso agrícola e em regulamentações legais:

- $\leq 2\%$ : significativa possibilidade de alagamento (LEPSCH et al., 1983);
- 2 + 5%: tendência ao alagamento (LEPSCH et al., 1983);
- 5 + 10%: adaptação às características litológicas da área, de modo que este intervalo de declive se encontra preferencialmente sobre fácies siltosa da Formação Adamantina;
- 10 + 15%: adaptação às características litológicas da área, de modo que este intervalo declive se encontra preferencialmente sobre fácies argilosas da Formação Adamantina. Ainda, 15% refere-se ao limite máximo para utilizar o maquinário agrícola no preparo do solo ou colheita (DE BIASI, 1992);

- 15 - 47%: terrenos não aptos ao uso de maquinário agrícola e com severas limitações devido ao declive acentuado (LEPSCH *et al.*, 1983);
- $\geq 47\%$ : de acordo com a Lei 12.651/12, Art.11

Em áreas de inclinação entre  $25^{\circ}$  e  $45^{\circ}$  serão permitidos o manejo florestal sustentável e o exercício de atividade agrossilvipastoris, bem como a manutenção da infraestrutura física associada ao desenvolvimento das atividades, observadas boas práticas agronômicas, sendo vedada a conversão de novas áreas, executadas as hipóteses de utilidade pública e interesse social.

A partir dos mapeamentos supramencionados, foram utilizadas as informações das formas erosivas de todos os anos para identificar as características do terreno sobre as quais incidiram. Para tanto, essas feições erosivas foram trabalhadas enquanto polígono, no intuito de selecionar, a partir do recorte, as características dos terrenos afetados. As ravinas e voçorocas, por sua natureza espacial, são feições já mapeadas como polígono, enquanto que para os sulcos, mapeados como linha, se fez necessário criar um *buffer* de 5cm de terreno no entorno dessas formas.

Com as três formas erosivas em polígono, nos três anos mapeados, a partir da ferramenta *clip*, recortaram-se os *shapefiles* de litologias, forma de relevo e declividade. No caso do uso e cobertura da terra, o recorte das formas erosivas se fez sobre as classes temáticas do respectivo ano. Com os resultados desses recortes, quantificaram-se as áreas atingidas pelas formas erosivas, buscando identificar o comportamento da dinâmica erosiva sobre as variáveis analisadas.

## **RESULTADOS**

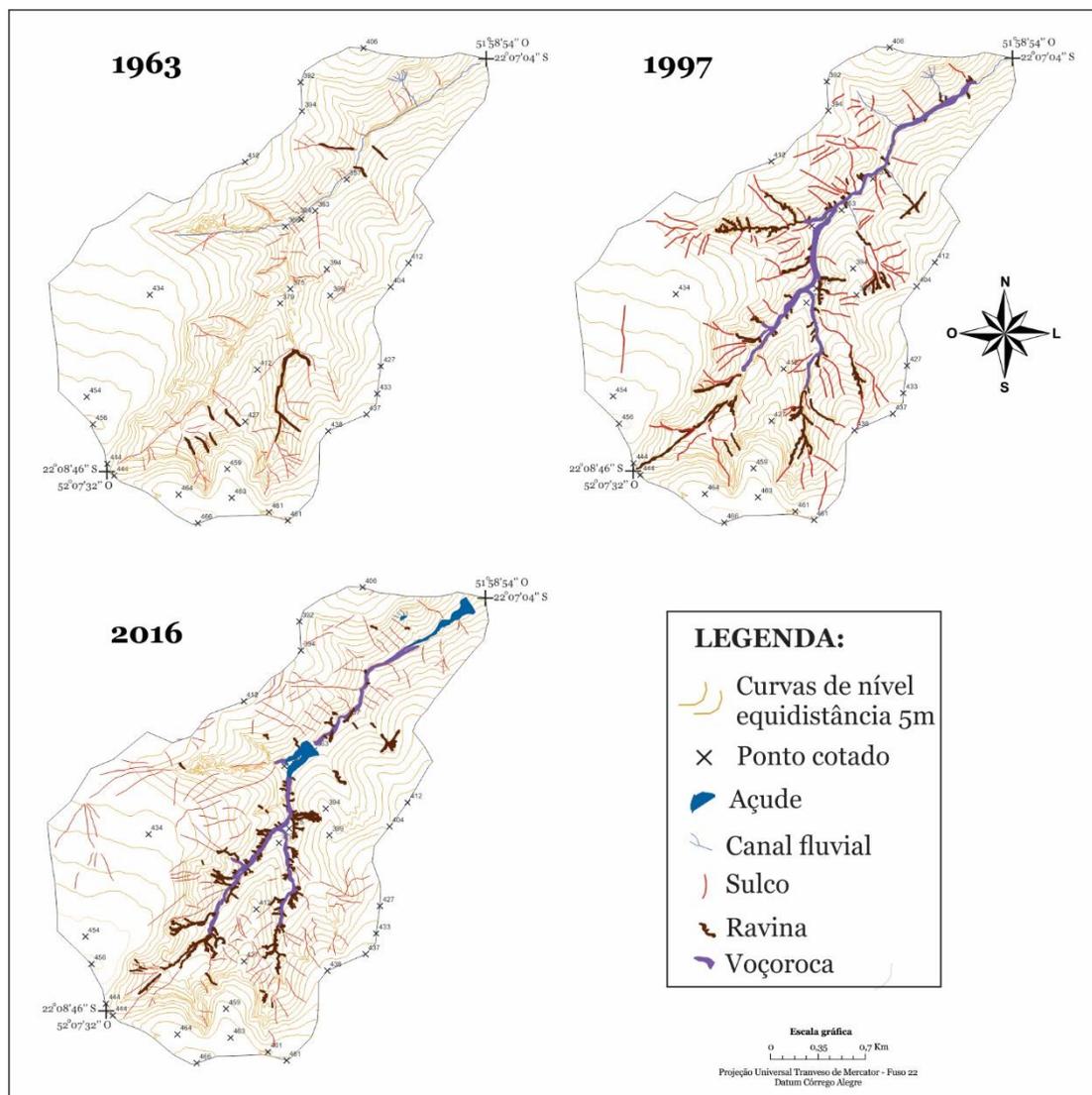
A sub-bacia abrange uma área de 664,62ha, na qual se identificou, desde o primeiro ano analisado, uma intensa atividade erosiva, sendo em 1963 registrados 87 sulcos e 6 ravinas, a qual atingiu uma área de 1,03ha (Tabela 1).

**Tabela 1** - Formas erosivas lineares (sulco, ravina e voçoroca), levantadas nos anos de 1963, 1997 e 2016. Sub-bacias do ribeirão Areia Dourada, Marabá Paulista (SP).

Ano	Sulco		Ravina		Voçoroca	
	Quantidade	Área (ha)	Quantidade	Área (ha)	Quantidade	Área (ha)
1963	81	0,26	6	1,03	0	0
1997	91	0,39	57	8,39	1	7,37
2016	148	0,51	77	17,1	1	6,86

Em 1997 identificou-se, na sub-bacia, um processo de voçorocamento ao longo do canal principal, bifurcando em dois novos canais nos setores mais elevados (Figura 3). Este processo aumentou consideravelmente a rede de drenagem da área estudada, o que demonstra mudanças significativas nos processos de infiltração e escoamento da sub-bacia.

**Figura 3** - Localização das formas erosivas lineares em sulco, ravina e voçoroca na sub-bacia do ribeirão Areia Dourada, Marabá Paulista (SP), em 1963, 1997 e 2016.



Junto ao surgimento da voçoroca em 1997, o número de ravinas aumentou 9,5 vezes (Tabela 1) e a área afetada por essa forma ampliou-se em 8 vezes. Essas ampliações se devem ao grande número de ravinas que surgem no entorno da voçoroca (Figura 3).

Oliveira (2012) aponta que a evolução das voçorocas ocorre a partir de processos que se desenvolvem nas margens, onde a água que chega de montante desemboca na forma de cascata, escavando uma depressão na base da borda, dependendo da altura que o degrau atinge, podendo gerar desbarrancamentos. O autor ainda destaca a ação dos filetes subverticais, formados a partir da

separação do volume principal da cascata, que escorrem ao longo das paredes da incisão esculpindo alcovas de regressão. Estas alcovas, quando aprofundadas na parede, também podem resultar em colapso do material acima, seja na cabeceira ou na lateral da forma erosiva, provocando tanto o alargamento do canal como a erosão remontante.

Frendrich *et al.*, (1997) destaca que as voçorocas também evoluem por processos de subsuperfície, como a erosão interna retrospectiva, ou *pipping*, que podem ocorrer a centenas de metros da base da voçoroca, fragilizando os terrenos por onde passam. Para o autor, diferente dos estágios anteriores do processo, as voçorocas ficam ativas tanto nos períodos chuvosos como nos secos, uma vez que os processos de subsuperfície atuam ao longo das estações secas, estabelecendo na área a ação erosiva contínua, em diferentes intensidades.

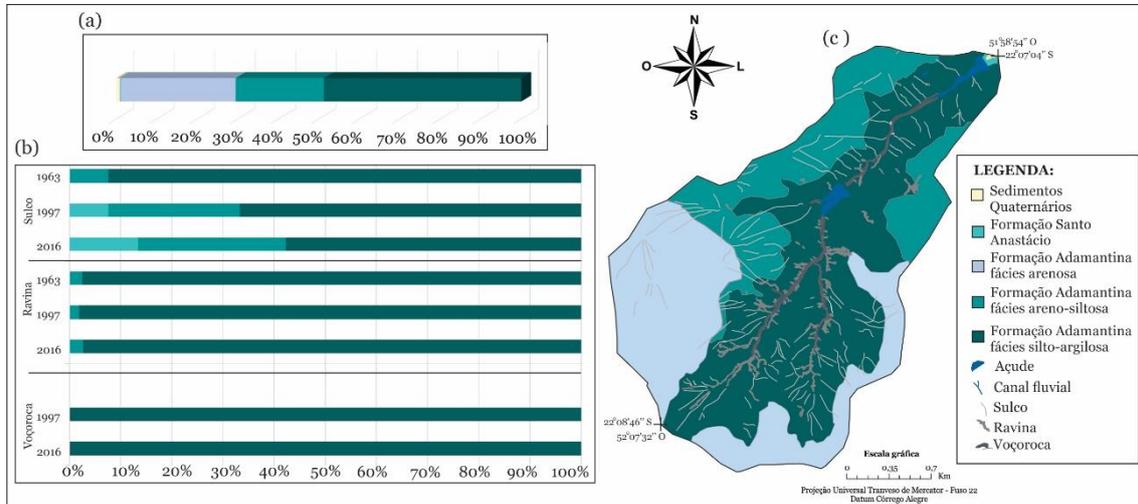
Na área estudada, a partir de 2016 verificou-se a formação de duas barragens no médio e baixo curso do canal com voçorocamento, no intuito de conter o maior fluxo de água que passou a escoar sobre esses canais. Essas barragens reduziram em 0,51ha a área da voçoroca em relação a 1997, devido ao alagamento do talude erosivo. No entanto, os dados demonstram que essa interferência não conteve o avanço da voçoroca, que se desenvolveu por erosão remontante nas cabeceiras (Figura 3).

Nesse período, junto ao desenvolvimento da voçoroca por erosão remontante, aumentaram significativamente a quantidade de ravinas e sulcos (Tabela 1), formas estas que se desenvolveram em terrenos de maior altitude, nas vertentes extensas no setor W (Figura 3).

Quanto ao substrato rochoso, na área estudada predominam litologias da Formação Adamantina, cujas fácies se diferenciam pela matriz rochosa e posição na topografia.

Nos terrenos mais elevados ocorrem fácies areníticas, ocupando 28,4% da sub-bacia. As fácies de matriz areno-siltosa encontram-se na alta vertente, perfazendo 21,7%. Da média vertente aos fundos de vale, em 48,7% da área estudada, ocorrem as fácies de matriz silto-argilosa (Figura 4a, b), enquanto os sedimentos quaternários e a Formação Santo Anastácio localizam-se na foz do canal principal, em 0,9% e 0,3% respectivamente.

**Figura 4** - (a) Área ocupada por cada classe de litologias. (b) Área ocupada pelas feições erosivas em cada classe de litologias. (c) Distribuição espacial das feições erosivas, em 2016, sobre as classes de litologias. Sub-bacias do ribeirão Areia Dourada, Marabá Paulista (SP) (BR).



De acordo com CETESB (1994), as fácies da Formação Adamantina definem as relações hidrodinâmicas dos terrenos. Sobre as fácies de matriz arenosa, nos setores mais elevados, há maior permeabilidade, enquanto na fácies de matriz areno-siltosa, ocorre tendência ao escoamento, no entanto, reduzida quando comparada à fácies matriz silto-argilosa, sobre a qual se desenvolve toda rede de drenagem da área estudada. Nesse contexto, considerando a erosão linear como problemática, os terrenos sobre as fácies silto-argilosa são mais propensos a desenvolver erosão quando do uso agrícola, reduzindo na fácies areno-siltosa e arenosa.

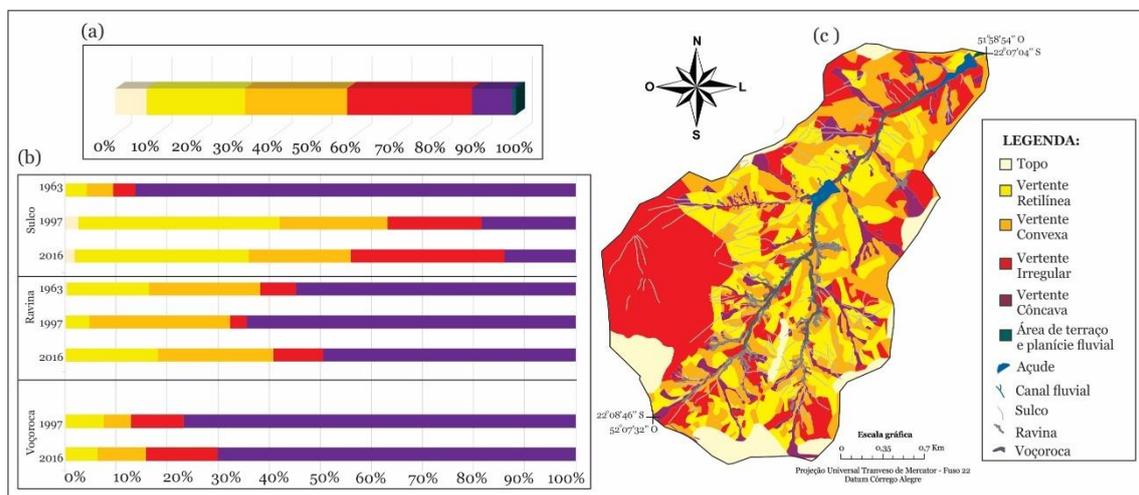
Na distribuição das formas erosivas ao longo dos anos analisados, a fácies de matriz silto-argilosa apresenta maior concentração. Sobre essa fácies encontrou-se 100% da área de voçoroca e 95% da área da ravina em todos os anos analisados. Essa situação sugere que há uma limitação física do desenvolvimento dessas feições sobre fácies areno-siltosa e arenosa. Na Figura 4c, no setor L, a única ravina que se desenvolveu sobre a fácies areno-siltosa, atingiu esta por erosão remontante, sendo consequência de um processo que se estabeleceu na fácies silto-argilosa.

Os sulcos alteraram sua distribuição ao longo dos anos, reduzindo sua presença da fácies silto-argilosa, ao passo que avança sobre as fácies areno-

siltosa e arenosa, indicativo que esta forma erosiva tem maior mobilidade sobre as litologias, de modo a se desenvolver dos setores mais rebaixados em direção aos mais elevados da área estudada (Figura 4).

Quanto a morfologia, 93% da sub-bacia é composta de vertentes, predominando as formas retilíneas, convexas e irregulares (Figura 5a, c). Tais vertentes tendem a dispersar o fluxo de água, sendo este: com direcionamento reconhecido na retilínea; difuso nas convexas; e incerto nas vertentes irregulares.

**Figura 5** - (a) Área ocupada por cada forma de relevo. (b) Área ocupada pelas feições erosivas em cada forma de relevo. (c) Distribuição espacial das feições erosivas do ano de 2016 sobre as formas de relevo. Sub-bacias do ribeirão Areia Dourada, Marabá Paulista (SP).



As vertentes côncavas ocupam 12% da sub-bacia (Figura 5a, c). Esta forma, em ambiente quente e úmido, tende a concentrar o fluxo de água, o que proporciona a saturação dos poros e, conseqüentemente, na menor capacidade de infiltração (BOTELHA; SILVA, 2007).

Esse atributo da vertente côncava, quando submetida ao uso agrícola, proporcionou a maior presença de voçorocas e ravinas em todo período analisado, (Figura 5b). Os sulcos, que se concentravam em maior quantidade em 1963 sobre essa forma, nos anos posteriores aumentaram significativamente sua presença nas demais vertentes, atingindo também áreas de topo.

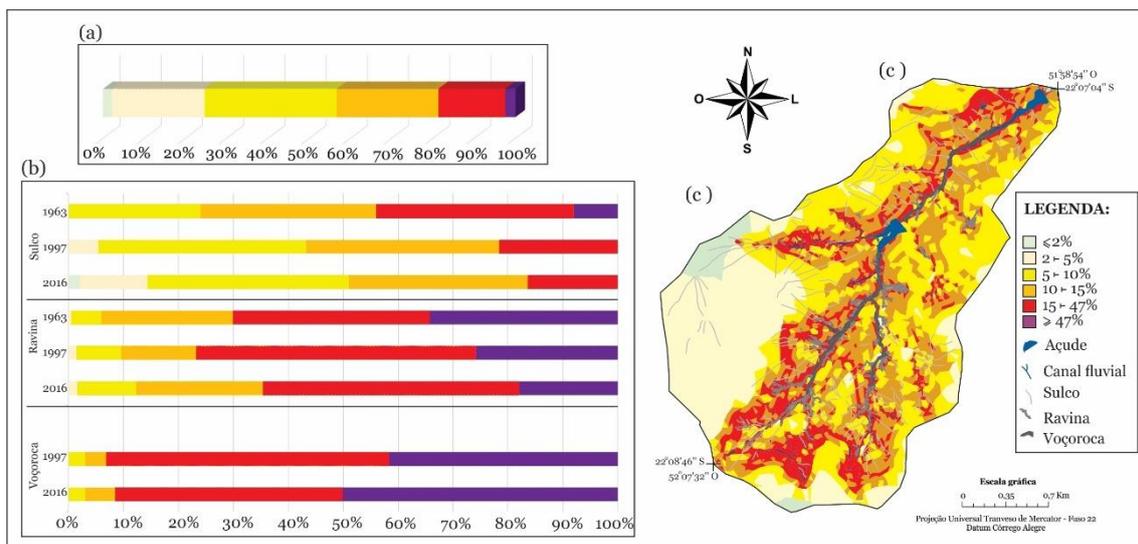
Na Figura 5c, verificou-se que, com o desenvolvimento das voçorocas sobre as vertentes côncavas, por efeito de borda, todo relevo do entorno tornou-se instável, de modo a surgir ravinas e ramificações da voçoroca em vertentes

com característica de dispersão do fluxo (Figura 5b, c). Enquanto os sulcos, independente da forma de relevo, convergem para as vertentes côncavas, o que aumenta o fenômeno erosivo sobre esses terrenos, bem como a instabilidade dos terrenos vizinhos, pelo efeito de borda mencionado.

A mudança de comportamento do sulco, que ao longo do período, passa a se desenvolver com maior frequência sobre terrenos, teoricamente, pouco sujeitos à formação de processos lineares, principalmente em áreas de topo em fácies arenítica, que tendem à infiltração de água (Figura 5b, c), e nas vertentes que tendem a dispersão do fluxo, relaciona-se tanto ao efeito de borda das erosões a jusante, como de perversões dos sistemas naturais, evidenciando que algum elemento presente comportou-se como forçamento do sistema.

Na sub-bacia, os declives apresentam relação estreita com as litologias e as formas de relevo. Sobre fácies de matriz arenosa, nos topos e vertentes extensas, os terrenos apresentam declives de  $\leq 2\%$  e de  $2\text{+}5\%$ . Em fácies de matriz areno-siltosa predominam declives de  $5\text{+}10\%$ . Sobre fácies de matriz silto-argilosa, incidem os declives de  $10\text{+}15\%$ , enquanto que na transição entre as fácies, os declives são acentuados, de  $15\text{+}47\%$  e  $\geq 47\%$ . Independente das fácies, há um aumento da declividade nas vertentes côncavas e diminuição do declive nas convexas (Figura 6c).

**Figura 6** - (a) Área ocupada por cada classe de declividade. (b) Área ocupada pelas feições erosivas em cada classe de declividade. (c) Distribuição espacial das feições erosivas do ano de 2016 sobre as classes de declividade. Sub-bacias do ribeirão Areia Dourada, Marabá Paulista (SP).



Na formação de processos erosivos, os declives acentuados, de 15-47% e  $\geq 47\%$ , que ocorrem em 12% de toda área, concentram a formação e desenvolvimento das voçorocas em 95% de sua área, atingindo poucos terrenos vizinhos com declives de 5-10% e 10-15%, que concentram menos de 10% da área dessa forma erosiva (Figura 6c). Esta situação indica que há mais erosão nos declives acentuados, onde se formam e desenvolvem os processos em ravina e voçoroca.

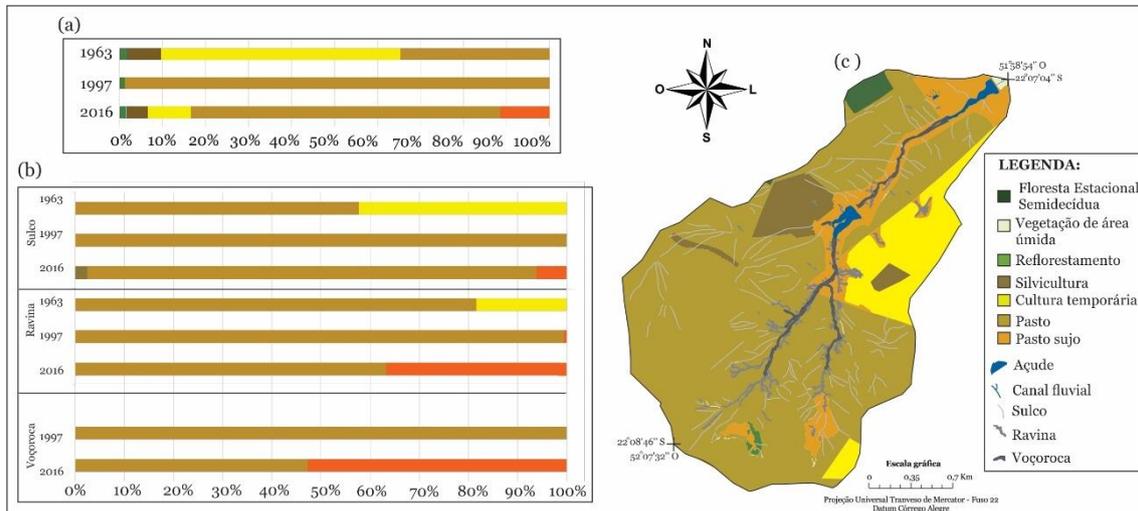
As ravinas, em todo período analisado também atingiram declives de 5-10% e 10-15% e, a partir de 1997, de 2-5%, em uma vertente convexa extensa no setor SE, em terreno próximo ao canal principal com voçoroca, como consequência da erosão remontante. Desse modo, um empecilho para o desenvolvimento das ravinas são os declives de 2-5% em altitudes mais elevadas, e de  $\leq 2\%$ , onde não se registrou essa forma.

Os sulcos também ocorreram sobre diversas classes de declividade, reduzindo sua presença nos declives acentuados e avançando sobre os declives menores, até atingir, em 2016, os terrenos com  $\leq 2\%$  no setor W, em extensas vertentes irregulares. A essa classe de declive, que se confere a tendência ao alagamento, as águas passaram a escoar de maneira concentrada superficialmente, indicativo da alteração dos atributos destes terrenos.

Em ambiente de intensa atividade erosiva, com aumento progressivo de todas as formas ao longo dos anos analisados, as feições passaram a apresentar um comportamento não linear, pervertendo a função das variáveis do meio físico, de modo a se desenvolverem com frequência em terrenos teoricamente pouco suscetíveis a tais processos por efeito de borda e erosão remontante. Destaca-se, que essa dinâmica afeta o conjunto de terrenos da bacia, de modo que as formas erosivas nos setores mais rebaixados se conectam através das vertentes côncavas às formas nos setores mais elevados, criando um mecanismo de retro-alimentação que possibilitou atingir os topos planos.

Quando avaliado o uso e cobertura superficial da terra, nota-se que desde o primeiro ano mapeado, 1963, a vegetação nativa, do tipo Floresta Estacional Semidecídua recobria menos de 2% da sub-bacia, situação que segue por todo período analisado (Figura 7a, c).

**Figura 7** - (a) Área ocupada por cada classe de uso e cobertura superficial da terra. (b) Área ocupada pelas feições erosivas em cada classe de uso e cobertura superficial da terra. (c) Distribuição espacial das feições erosivas sobre as classes de uso e cobertura superficial da terra do ano de 2016. Sub-bacias do ribeirão Areia Dourada, Marabá Paulista (SP).



Desse modo, há pelo menos 53 anos ocorreu um uso contínuo de 98% das terras da sub-bacia. Essa mudança, quase total, da cobertura superficial e o uso contínuo, definem um atributo novo em relação aos solos e as vertentes da área estudada. De recobertas por uma vegetação florestal com rica biodiversidade, em que se tem maior proteção dos solos e regulação dos processos de escoamento e infiltração, foram introduzidas espécies exóticas, como a cana-de-açúcar em 2016, e, principalmente, gramíneas do tipo braquiária para o pastoreio extensivo.

Bertoni e Lombardi Neto (1990) constataram que, quando do uso extensivo do pasto, o pisoteio excessivo do gado proporciona a degradação da vegetação e a selagem do solo, de modo tanto a reduzir os efeitos de infiltração do sistema radicular e de proteção do solo, proporcionado pelas forrageiras, como de formar caminhos preferenciais para o escoamento das águas pluviais, através dos quais desencadeiam processos erosivos de superfície.

Na sub-bacia, registrou-se essa interferência do pasto na concentração das formas erosivas. Em 1963, em que as pastagens ocupavam menor área (Figura 7a), todas as formas erosivas predominavam sobre este uso. Nos anos seguintes, 1997 e 2016, essas formas ocorreram exclusivamente sobre as áreas

de pasto (Figura 7b); os sulcos identificados nas áreas de silvicultura, com *Eucalyptus*, correspondem a uma extensão de formas geradas em área de pasto a montante (Figura 7c).

Os dados demonstram que o pastoreio extensivo constitui em um elemento de forçamento do sistema, de maneira que o pisoteio excessivo do gado perverteu os atributos físicos dos terrenos na dispersão ou infiltração de água, criando caminhos preferenciais por onde as águas escorrem e esculpem o relevo, generalizando a ocorrência das erosões em sulcos e contribuindo para o desenvolvimento de ravinas ou voçorocas em áreas, teoricamente, pouco sujeitas a tais processos.

Sobre as áreas cultivadas com cana-de-açúcar, como no ano de 2016, embora não se registre erosão linear, Zanatta (2018) constatou, em trabalhos de campo, que as feições que surgem em períodos chuvosos, logo são corrigidas na manutenção dos terraços agrícolas, indicativo que esse uso e cobertura superficial também aumentam a ação erosiva nos terrenos.

## **CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Os dados permitiram compreender a dinâmica da erosão linear em áreas rurais intensamente alteradas, analisando os atributos de cada elemento pelos quais os processos se estabeleceram. Também foi possível levantar que a erosão evoluiu de maneira remontante, através do efeito de borda, que estabeleceu um mecanismo de retro-alimentação entre todas as formas erosivas nos distintos níveis topográficos da sub-bacia.

Sobre as formas de relevo identificou-se o efeito conector das vertentes côncavas, por onde as feições lineares se desenvolveram com mais intensidade e para qual convergem as formas erosivas a montante, sendo esta classe mais atingida pelo processo erosivo.

O desenvolvimento da voçoroca nas vertentes côncavas tem maior eficiência em declives de 15-47% e  $\geq 47\%$ . Enquanto as ravinas, embora se desenvolvam mais sobre as características mencionadas, tem maior mobilidade nessas variáveis, passando a atingir outras classes ao longo do período, não ocorrendo nos declives de  $\leq 2\%$  e 2-5% e nos topos.

Quanto ao uso da terra, faz-se necessário repensar a importância da recomposição da Floresta Estacional Semidecídua, sobretudo no entorno das voçorocas, nas vertentes côncavas e nos declives 15-47% e  $\geq 47\%$ .

Embora se reconheça a importância da pecuária para economia local, uma vez que se mantém ativa há cinco décadas, mesmo nessa situação de degradação, sua prática extensiva e contínua funciona como um elemento de forçamento, acelerando e generalizando os processos erosivos ao perverter os atributos das variáveis físicas. Portanto, essa forma de uso, contínua e extensiva, deve ser alterada, sobretudo nos terrenos sobre a fácies silto-argilosa da Formação Adamantina, de menor permeabilidade e mais suscetíveis à erosão linear, onde se abrigaram todas as erosões em ravina e voçoroca.

Cabe destacar a relevância da consideração da Formação Adamantina em estudos sobre erosão, devido ao seu caráter regional, de modo que o uso que se faz sobre essas litologias merece maior atenção pelas especificidades hidrodinâmicas de suas fácies, sobretudo a argilosa.

## **AGRADECIMENTOS**

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento do primeiro mês de pesquisa: de abril a maio de 2015 e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo financiamento do projeto de doutorado, processo n.º 2015/00875-2, de maio de 2015 a abril de 2018.

## **REFERÊNCIAS**

AGOSTINHO, M.B. **Reconhecimento geológico (Formação Santo Anastácio e Adamantina) e apelobiológico (*mesoeucrocodyliabaurusuchidae* e *sphgesbauridade*) na região Noroeste do estado de São Paulo**. Dissertação (Mestrado em Geologia Regional). Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro (SP), 2009. 155f.

ALMEIDA, F. F. M. Os fundamentos geológicos do relevo paulista. **Boletim IGC**, São Paulo, v.31, p.169-263, 1964.

BOTELHO, R.G.M.; SILVA, A.S. Bacia Hidrográfica e Qualidade Ambiental. *In: Reflexões sobre a Geografia Física no Brasil*. 2ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2007. p.153-192.

BOIN, M. N. **Chuvas e erosão no Oeste Paulista: uma análise climatológica aplicada.** Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente), Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2000. 264p.

BRASIL, **Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012.** Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nºs 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. [2012]. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm). Acesso em: 8 nov. 2016.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL-CETESB. Manual para operação de resíduos sólidos: disposição de lixo em vala. São Paulo, 1994.

DE BIASI, M. A carta clinográfica: os métodos de representação e sua confecção. **Revista do Departamento de Geografia**, Universidade de São Paulo (USP), v.6, 1992, p.45-60.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA (DAEE); INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Controle de erosão:** bases conceituais e técnicas; diretrizes para o planejamento urbano e regional; orientações para o controle de boçorocas urbanas. São Paulo: DAEE/IPT, 1989.

FENDRICH, R.; OBLADEN, N. L.; AISSE, M. M.; GARCÍAS, C. M. **Drenagem e controle da erosão urbana.** 4ª edição. Curitiba: Champagnat, 1997.

FERNANDES, L.A. **Estratigrafia e evolução geológica da parte oriental da Bacia Bauru(Ks, Brasil).** 1998. Tese (Doutorado em Geologia Sedimentar) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998. 216p.

FERRARI LEITE, J. **A ocupação do Pontal do Paranapanema.** São Paulo: 1999.

FERREIRA, R. R. M.; FILHO, J. T; FERREIRA, V. M. Efeitos de sistemas de manejos de pastagens nas propriedades físicas do solo. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v.31, n.4, 2010. p. 913-932.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **Status of the World's Soil Resources.** Roma: Food and Agriculture Organization Nations, 2015.

FOOKES, P. G.; LEE, E. M.; GRIFFITHS, J. S. **Engineering geomorphology: theory and practice.** Dunbeath: WhittlesPublishing, 2007.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Manual Técnico de Uso da Terra.** 3ª edição. Rio de Janeiro: IBGE, 2006.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Manual técnico de vegetação brasileira**. 2ª edição. Rio de Janeiro, IBGE: 2012.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (IPT, 1994). **Orientações para controle de erosão na bacia do Rio Santo Anastácio** – 3ª fase, IPT. Relatório, N°32.257, 1994, [s.n.].

KARMAN, I. Ciclo da água: água subterrânea e sua ação geológica. In: TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C. M.; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F (org.). **Decifrando a Terra**. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2008. 557p.

LAL, R. **Soilerosion in the tropics: principles and management**. New York: McGraw-Hill, 1990.

LEPSCH, I. F.; BELINAZZI Jr., D.; ESPINDOLA, C. R. **Manual para levantamento utilitário do meio físico e classificação das terras no sistema de capacidade de uso**. 4ª aproximação. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, 1983.

MURRAY, A. B.; ASHTON, A.; BASS, A.; COCO, G.; COULTHARD, T.; FONSTAD, M.; HAFF, P.; MCNAMARA, D.; PAOLA, C. PELLEITIER, J.; REINHARDT, L. Geomorphology, complexity, and the emerging science of the Earth's surface. **Geomorphology**. n. 103, 2009, p. 496-505. DOI: doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.08.013

MONBEIG, P. **Pioneiros e Fazendeiros de São Paulo**. São Paulo: HUCITEC, 1984.

OLIVEIRA, M. A. T. Processos erosivos e preservação de áreas de risco de erosão por voçoroca. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. (Org.). **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações**. 8ª edição. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2012.

SANTOS, R. F. **Planejamento ambiental: teoria e prática**. São Paulo: Oficina de Textos, 2004.

SALOMÃO, F. X. T. Controle e prevenção dos processos erosivos. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. (Org.). **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações**. 8ª edição. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2012.

SOIL SURVEY STAFF. **Soil Survey Manual**. USDA: Soil Conservation Service, Agricultural Handbook. N° 18, U. S. Gov. Print: Office, Wahsington, D. C. 1993.

STEIN, D. P. **Avaliação da degradação do meio físico. Bacia do rio Santo Anastácio. Oeste Paulista**. 197p; Tese (Doutoramento em Geociências e Meio Ambiente), Universidade Estadual Paulista. São Paulo, 1999.

STEIN, D. P.; PONÇANO, W. L.; SAAD, A. R. Erosão na bacia do Rio Santo Anastácio, Oeste do estado de São Paulo, Brasil. **Revista Geociências**. v.22, n.2, p.143-161, 2003.