

PROCESSOS EROSIVOS ACELERADOS: COMPORTAMENTO TEMPORAL E ESPACIAL DE VOÇOROCA

Accelerated erosion processes: temporal and spatial behaviour of gully

Marcilene Dantas Ferreira*

Osni José Pejon**

RESUMO – Este trabalho apresenta os resultados obtidos por meio de uma análise dos processos erosivos acelerados, em termos da variabilidade temporal e espacial, existentes e da evolução das feições erosivas da bacia do córrego do Tucum, subdividida em sub-bacias, e tendo como substrato rochoso os arenitos da Formação Pirambóia, na cidade de São Pedro, estado de São Paulo, Brasil. O estudo considerou os fatores que influenciaram na origem e evolução destas feições por meio de: fotointerpretação, ensaios laboratoriais e de campo; e trabalhos de campo para mapeamento dos materiais geológicos (inconsolidados e rochosos), cadastro das feições e uso e ocupação. As feições foram enquadradas em diferentes estágios evolutivos e para as sub-bacias foram obtidos os valores de vazão de pico (Q_p), tempo de concentração (t_c) e tempo de pico (T_p). Os resultados de estudos de campo e laboratoriais permitiram classificar os materiais inconsolidados como arenosos, e foram individualizadas 14 unidades em função do arranjo espacial de 15 diferentes tipos. Os resultados permitem concluir que o conhecimento dos aspectos relativos aos componentes do meio ambiente, como os materiais inconsolidados, a declividade, landform, uso e ocupação e índices pluviométricos são fundamentais, pois permitem compreender a variabilidade temporal e espacial dos processos erosivos. Quando estes conhecimentos são combinados com as características das técnicas de manejo ambiental, controle, recuperação e preventivas, proporcionam a formulação de medidas mais adequadas e eficazes, evitando assim gastos repetitivos e perdas econômicas e ambientais.

SYNOPSIS – This work presents an analysis of the accelerated erosion processes and their evolution in terms of temporal and spatial variability in the Tucum stream basin, subdivided into sub basins, supported by sandstones of the Pirambóia Formation, in the state of São Paulo, Brazil. This study considered natural and human factors which were responsible for erosion processes and their evolution. This study was based on several kinds of works, such as: photointerpretation, laboratorial and field tests and field works for geological materials (unconsolidated and lithological) mapping, erosion features inventory, assessment of uses and occupation types and infiltration tests. The erosion features were classified into different evolution degrees and for each sub basins were obtained peak discharge (Q_p), concentration time (t_c) and peak time (T_p). The results obtained from both laboratorial and field works permitted to classify the unconsolidated materials as sandy, and 14 spatial units were mapped considering the 15 unconsolidated materials types arranged into different spatial combinations. This work permitted to conclude that information about unconsolidated material, slopes, landforms, rainfall and uses and occupation types are the main point to design adequate erosion control procedures. They are basic for understanding of the temporal and spatial variability of the erosion processes, which combined with the intrinsic characteristics of the control techniques provide adequate information to elaborate the environmental management of the area to get better economical and social results.

PALAVRAS CHAVE – Voçoroca, evolução e técnica de controle.

* Mestre em Geotecnia, aluna de doutorado da Escola de Engenharia de São Carlos/USP.

E-mail: mdantas@sc.usp.br

** Professor Livre Docente, Escola de Engenharia de São Carlos/USP, São Carlos, Brasil.

E-mail: pejon@sc.usp.br

1 – INTRODUÇÃO

As feições decorrentes de processos erosivos acelerados no Brasil e no mundo ocorrem em grande número, provocando graves problemas econômicos e ambientais. Por essa razão, os estudos de evolução dessas feições são de grande importância, pois permitem o aporte de informações para a escolha de técnicas que poderão ser aplicadas para seu controle de forma mais eficaz, fornecendo subsídios para gestão ambiental.

A instalação e propagação dessas feições dependem das características do meio físico associado ao uso e ocupação do solo. Normalmente, os estudos de evolução dos processos erosivos são desenvolvidos a partir da análise dos registros temporais, com uso de sensores remotos e de trabalhos prévios, associados a trabalho de campo e estudos laboratoriais.

Existem milhares de trabalhos envolvendo estudos de voçorocas, inclusive congressos internacionais específicos e um brasileiro a cada quatro anos. Nestes trabalhos predominam os estudos considerados inventários ou específicos que contemplam um conjunto de procedimentos técnicos, mas poucos são aqueles que utilizam uma combinação de todos os aspectos ambientais envolvidos na instalação do processo. Atualmente, os estudos visam às características e ao entendimento da progressão ou dos aspectos de degradação ambiental.

Dentre os estudos mais significativos, podem ser destacados, Bennett (1939), Ayres (1936), Brice (1966), Zachar (1982), Nordstrom (1988), Lal (1990), Morgan (1996), Oostwoud Wijdenes *et al.*, (2000), Martinez-Casanovas (2003), Poesen *et al.*, (2003), Øygarden (2003), Ries e Marzloff (2003) e Valentin *et al.*, (2005).

Neste estudo buscou-se uma visão integrada dos componentes do meio físico relacionados aos processos erosivos atuantes em uma seção delimitada de uma bacia hidrográfica. A área selecionada localiza-se na região das nascentes da bacia do córrego do Tucum, no município de São Pedro - SP, onde encontram-se diversas áreas afetadas por processos erosivos, desde os anos 1960. Apesar de diversos estudos científicos e várias tentativas de controle, o processo continua com diferentes características e intensidades até aos dias atuais.

O presente estudo visa entender a interação dos fatores condicionantes (ocupação/usos, materiais inconsolidados, landforms e obras corretivas) versus deflagrador (chuvas) no contexto da evolução espacial e temporal.

2 – EMBASAMENTO TEÓRICO

A erosão do solo pode ser dividida em normal e acelerada (Ayres, 1936). A primeira pode ser definida como a erosão que ocorre na superfície terrestre, refletindo uma condição natural de equilíbrio ou como parte do ciclo geológico (denudação). Já a segunda representa o resultado da quebra desse estado de equilíbrio, causado pelo aumento significativo da remoção dos materiais geológicos, podendo ser natural ou antrópica (Bennett, 1939 *apud* Zachar, 1982).

Nas regiões tropicais ou subtropicais úmidas, os processos erosivos são provocados principalmente pela ação das chuvas (erosão hídrica) combinada com a ocupação territorial, quase sempre iniciada pelo desmatamento e seguida pelo cultivo agrícola e de pastagens, construção de estradas e caminhos. A formação e expansão de núcleos urbanos, principalmente quando esse é feito de forma desordenada e inadequada, configura-se como um desencadeador fundamental e decisivo da formação de processos erosivos acelerados.

A erosão acelerada, segundo diversos autores (Bennett, 1939 *apud* Zachar, 1982; Morgan, 1996; Vandaele *et al.*, 1996), pode ser de dois tipos, dependendo da forma como o escoamento superficial acontece: laminar, quando causada por escoamento difuso das águas das chuvas, resultando na remoção progressiva dos horizontes superficiais do solo, e linear, quando causada por concentração das linhas de fluxo das águas de escoamento superficial, resultando em incisões na superfície do terreno (na forma de sulcos, ravinas e voçorocas). Dentre estes, as voçorocas são as mais preocupantes e o estágio mais avançado.

As voçorocas consistem no desenvolvimento de canais devido ao fluxo superficial concentrado, associados a variações de resistência ao cisalhamento dos materiais geológicos, correspondendo, portanto, à evolução gradual do processo de ravinamento, até atingir o lençol freático. Segundo Lal (1990), as voçorocas são feições erosivas que não podem ser controladas através de manejo por máquinas agrícolas comuns. Alguns autores definem largura e profundidades a partir das quais as voçorocas podem ser classificadas, mas estas variam muito. Por exemplo, Kronen (1990) considera voçorocas feições com largura maior que 3 m, e Frenndrich (1997) considera com profundidade superior a 1m. Com relação ao mecanismo, define-se que é o processo pelo qual a água do escoamento superficial acumulado flui repetidas vezes no mesmo canal removendo o solo até profundidades consideráveis, variando da ordem de metro a dezenas de metros (SSSA, 2001).

Assim, com base nos inúmeros estudos já realizados, pode-se concluir que os fatores mais importantes para desencadeamento desses processos são: o índice pluviométrico, erodibilidade dos materiais geológicos presentes (litologia e materiais inconsolidados), forma do relevo (landforms) e uso e ocupação do solo. A ação do Homem geralmente é um dos fatores modificadores que provocam o desequilíbrio e, conseqüentemente, o início do processo erosivo.

Autores como Pouquet (1951), Pichler (1953), Higgins *et al.*, (1990), Fiore e Soares (1976) Morgan (1996), Vandaele *et al.*, (1996) e Poesen *et al.*, (2003) consideram que as voçorocas apresentam os seguintes estágios de evolução:

1º Estágio - Inicial: formam-se pequenos sulcos ou reentrâncias nas encostas, devido a diversos fatores associados, tais como: forma da encosta, características dos materiais geológicos, escoamento superficial, índice pluviométrico e uso e ocupação. O resultado é a formação de um canal principal definido e de uma escarpa de cabeceira, onde se desenvolvem fluxos críticos acelerando o processo erosivo. Nesta fase, os vales predominantes são em forma de V e o talvegue do canal normalmente apresenta diversos degraus.

2º Estágio - Intermediário: nesta fase, ocorre progressão acelerada da cabeceira da feição através do aprofundamento do canal e progressão para montante e lateral, ocasionada por processos de erosão gerada por escoamento sub-superficial (piping) e instabilidade das paredes. Nesta fase, os canais passam a ter uma base larga e o talvegue do canal apresenta-se mais contínuo (menor número de degraus).

3º Estágio - Maduro: nesta fase, não ocorre mais aprofundamento. A feição erosiva apresenta normalmente a forma em U, não há um número significativo de degraus e a progressão predominante é lateral. Devido a estes fatos, continuam ocorrendo deslizamento das paredes e fenômenos do tipo “piping”. Em muitos casos, as voçorocas apresentam largura maior que a altura nesta fase.

4º Estágio - Senil: a partir do ponto onde a feição erosiva torna-se uma feição estável de relevo. De acordo com Pichler (1953), podem ser consideradas inativas.

Brice (1966) e outros autores como Morgan (1996) classificaram as voçorocas em três tipos quanto à distribuição espacial: de cabeceira, de encosta e de fundo de vale, sendo as duas primeiras as formas predominantes.

As voçorocas, ao contrário das erosões laminares e lineares do tipo sulco e ravina, apresentam maior grau de dificuldade para utilização de procedimentos padronizados com vistas à definição de suas dimensões e estudos dos fatores controladores, por constituírem formas erosivas sem controle e de rápida evolução.

Poesen *et al.*, (2003) sugerem um grupo de técnicas laboratoriais e de campo para estudo de voçorocas em diferentes escalas de tempo, a saber:

Para voçorocas com menos de 10 anos: devem ser adotados procedimentos de campo (levantamento topográfico, medidas de dimensão das feições, uso de fotografias terrestres, medidas das taxas de sedimentação, colocação de pinos e monitoramento da morfologia das feições) e de sobrevoos regulares de baixa altitude.

Para voçorocas de 10 a 70 anos: utilizar fotografias aéreas de diferentes períodos, métodos dendrocronológicos, estudo da seqüência de desenvolvimento da vegetação, ensaios de erodibilidade e caracterização geotécnica.

Para voçorocas com idade superior a 70 anos: para estes casos devem ser utilizados dados históricos, documentos pré-existentes e várias técnicas de datação dos depósitos decorrentes do processo erosivo.

Especialmente, as áreas com feições erosivas devem ser estudadas a partir de registros de fotos aéreas convencionais e de baixa altitude associados a trabalhos de campo, visando o mapeamento da variabilidade dos materiais geológicos, usos e ocupação, assim como das feições.

3 – MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido de tal maneira que informações de uma grande quantidade de aspectos do meio ambiente fossem obtidas e que as análises fossem tanto temporal quanto espacial, semelhante a trabalhos desenvolvidos na China por Deyi (2005) e segundo as premissas da FAO (1996).

Com o objetivo de estabelecer uma caracterização preliminar da área, foi realizado um levantamento de estudos prévios desenvolvidos, assim como de mapas, fotografias aéreas e de dados pluviométricos que, associados a trabalhos de fotointerpretação, possibilitaram identificar preliminarmente suas características geológicas, geomorfológicas, climáticas, de cobertura vegetal e de tipos de uso e ocupação do solo. Aspectos da evolução temporal e espacial das feições foram obtidos a partir das fotografias áreas existentes: 1962 (1:25.000), 1972 (1:25.000), 1978 (1:30.000), 1995 (1:25.000) e 2000 (1:30.000).

Os dados pluviométricos foram tratados e avaliados para identificar e confirmar sua relação com as chuvas orográficas que ocorreram na região e são um fator importante para compreender a dinâmica do processo erosivo.

Foram definidas microbacias a partir da fotointerpretação das fotos aéreas do ano 2000 (escala 1:30.000) por serem o registro fotográfico mais recente da área. Tais microbacias, depois de digitalizadas no mapa-base, foram associadas com a área urbana, drenagem e obras na área, o que possibilitou a análise das vazões e as obras associadas a cada microbacia.

Para complementar estas informações, foram realizados trabalhos de campo principalmente para definição dos perfis dos materiais inconsolidados e delimitação das unidades. Associados a esta atividade, foram avaliados as formas de ocupação instaladas, características das feições e registros das técnicas de controle aplicadas, a partir de fotografias terrestres e medidas de campo.

Foi realizada uma fase específica de amostragem retirando-se amostras deformadas e indeformadas representativas das unidades de materiais geológicos e de ensaios em campo de condutividade hidráulica com permeâmetro do tipo Guelphi. Com base nesses resultados, foi possível caracterizar os materiais geológicos através dos seguintes ensaios de laboratório: massa específica dos sólidos, granulometria conjunta, massa específica aparente seca, compactação Proctor Normal, ensaio de cisalhamento direto e o ensaio de adsorção de azul de metileno e de erodibilidade, conforme descritos e modificados por Pejon (1992).

Desenvolveu-se, então, uma análise de todas as informações obtidas nas etapas anteriores e, em seguida, foram elaborados os mapas de materiais inconsolidados, de landfoms, de documentação e de feições erosivas (1962, 1978, 1972, 1988, 1995 e 2000), carta de declividade e, finalizando, elaborou-se uma análise combinada da evolução dos processos erosivos.

4 – CARACTERÍSTICAS GERAIS DA ÁREA

A área de estudo está localizada no Município de São Pedro, a leste da área urbana e à margem esquerda da rodovia SP-191 (São Pedro - Charqueada). Está compreendida entre as coordenadas UTM 201716/203735E e 7502072/7504000N da zona 23S, perfazendo uma área aproximada de 2 Km², que corresponde à porção das cabeceiras do Córrego do Tucum (Figura 1).



Fig. 1 – Localização da cabeceira da bacia do córrego Tucum em modelo digital de terreno sobreposto à fotografia aérea de 2000.

A área insere-se na divisão geomorfológica da depressão periférica, nas proximidades das cuestas basálticas (Pejon, 1992), com um relevo suave sob a forma de colinas com encostas convexas e côncavo-convexas. Seu substrato rochoso é constituído de arenitos de granulação média a fina, de diversas colorações, com estratificação plano-paralela e cruzada, com diferentes tipos de cimento, pertencentes à Formação Pirambóia (Tr-J).

Os materiais inconsolidados encontrados são, predominantemente, de origem retrabalhada e, em segundo, lugar residual. A vegetação natural encontra-se praticamente destruída, permanecendo apenas na proximidade ao córrego Tucum. As pastagens e reflorestamento (eucalipto) predominam na área.

O clima da região enquadra-se, segundo a classificação de Koppen, como CWa, com média anual variando de 1.400 a 2.227mm. Analisando-se a distribuição mensal no período de 47 anos (novembro 1942 a julho 2000), pode-se observar grandes taxas pluviométricas, com médias mensais acima de 300mm e diárias acima de 80mm. Tal fato ocorre principalmente nos meses mais chuvosos, de novembro a fevereiro. Devido à proximidade da Serra de São Pedro, podem ocorrer eventos de chuvas intensas com o caráter orográfico de até 124mm por dia, ou mesmo de 1mm/min em 2horas, como ocorrido em 2005.

4.1 – Trabalhos prévios na área

O primeiro de vários trabalhos desenvolvidos na área foi de Fiori-Oka (1980), que fez uma descrição geral dos materiais geológicos e da presença de fenômenos de erosão acelerada no município de São Pedro. Pejon (1992) realizou trabalho de mapeamento geotécnico, que produziu a carta de risco potencial de erosão acelerada por ravinas e voçorocas na escala 1:100.000. Francincani (1995) fez uma análise da influência das estruturas e tectônica no desenvolvimento das voçorocas da região de São Pedro. Além destes, podem ser citados trabalhos de caráter específico como: IPT(1991), que fez o cadastro das feições do Município de São Pedro, com o objetivo de orientar o controle a erosão; Santoro (1991), que realizou a caracterização geotécnica dos “sedimentos” das voçorocas presentes na área próxima aos Bairros São Dimas e Recanto das Águas a partir de 10 pontos de amostragem; IPT(1993), que obteve um diagnóstico sobre as voçorocas do córrego do Tucum e avaliou as obras de contenção executadas a partir das recomendações feitas em 1991; e Silva (2003), que realizou mapeamento geotécnico da Bacia do córrego do Tucum e elaborou a carta de susceptibilidade a erosão e de prognóstico ao desenvolvimento de erosões lineares na escala 1:10.000.

5 – RESULTADOS

5.1 – Precipitação

Na Figura 2(a) observam-se os dados da precipitação mensal durante o período de 1942 a 2000. A partir destes dados, observa-se que em 41 meses choveu acima de 280mm, principalmente nos meses de janeiro e fevereiro. Um evento mensal importante com valor superior a 600mm ocorreu em 1995, provocando a reativação descontrolada das feições erosivas presentes na área e, como consequência principal, o rompimento do aterro da estrada SP-191, que recobria a tubulação do córrego do Tucum.

Na Figura 2(b), observa-se a relação das precipitações diárias do período de 1942 a 2000. Constata-se que valores diários acima de 80mm ocorreram 23 vezes nos 58 anos, ou seja, em média

a cada 2 anos ocorre pelo menos uma vez chuva crítica. Eventos de chuvas intensas de até 124mm por dia foram observados em dezembro de 2000, reativando as feições erosivas e tendo como consequência a decretação, pela prefeitura municipal, do estado de alerta e a retirada de moradores das encostas destas feições, devido ao surgimento de grandes ravinas e ao movimento de material geológico das encostas.

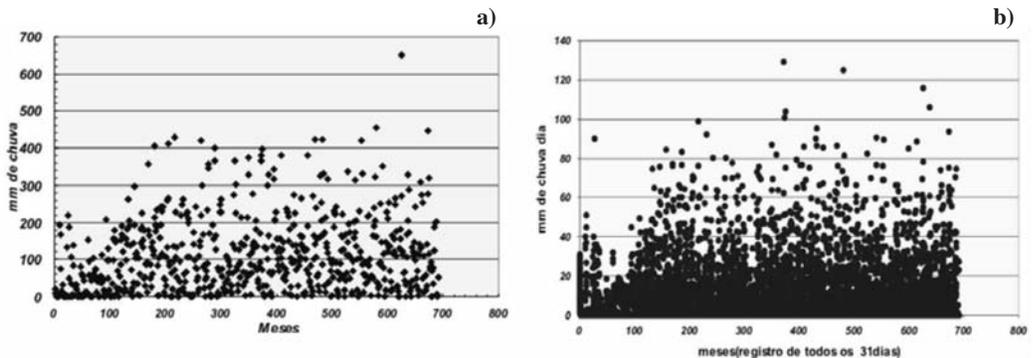


Fig. 2 – (a) Total mensal de chuva em mm e (b) Total diário de chuva em mm, no município de São Pedro de novembro de 1942 a julho de 2000, SIGRH (2004).

5.2 – Relevo e usos

A área é constituída por encostas retilíneas, côncavas e convexas combinadas de diferentes maneiras que sofreram modificações devido ao processo erosivo e movimentos de terra realizados para correção e contenção das feições erosivas. A declividade da área foi dividida em 8 classes que variam de <2% a >75%, com predomínio de 2 a 10%. Já os terrenos inclinados a ligeiramente inclinados com declividades superiores a 10% são áreas que, associadas a outros fatores do meio, estão mais sujeitas à instalação de feições erosivas.

As principais formas de uso e ocupação identificadas nas cabeceiras do córrego do Tucum foram as seguintes: cobertura vegetal natural, reflorestamento, campo antrópico/pastagem, área urbana consolidada, área urbana em consolidação, área urbana parcelada, favelas, disposição de resíduos e sistema viário.

5.3 – Bacias hidrográficas

Na cabeceira da bacia do córrego Tucum, foram separadas 3 drenagens (do Dimas, Raia e Florestal) e individualizadas 19 sub-bacias de primeira ordem (Figura 3), que se juntam formando o canal principal do Tucum.

Para cada subbacia, foram calculados o tempo de concentração, a vazão de pico e o tempo de pico (tempo que leva para que ocorra a vazão de pico) a partir de uma combinação de procedimentos constantes do método proposto pelo U.S. Soil Conservation Service (SCS) e considerando 12 eventos de chuvas representativos para a região (Quadro 1).

Considerando-se as características hidráulicas dos materiais geológicos e os eventos de chuva, as vazões no canal do Dimas (1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7) não ultrapassam 16m³/s, enquanto nas sub-bacias do Raia (1c, 2c, 3c, 4c, 5c e 6c) variam de 5,5 a 9,2 m³/s e na área da fazenda e Florestal (1d, 2d, 3d, 4d e 5d) as vazões de pico variam de 4,5 a 11,2 m³/s. Ressalte-se que as maiores vazões ocorrem nas bacias 7 e 8 no Tucum, que variam de 35 a 40 m³/s nos eventos mais críticos de chuva.

Quando se avalia a intensidade de chuva, as mais críticas para área são aquelas com 40mm/h ou maiores e com duração igual ou superior a 1 hora.

Para todas as sub-bacias há o predomínio de tempo de pico menor que 1 hora. Portanto, ele é muitas vezes menor que a duração das chuvas.

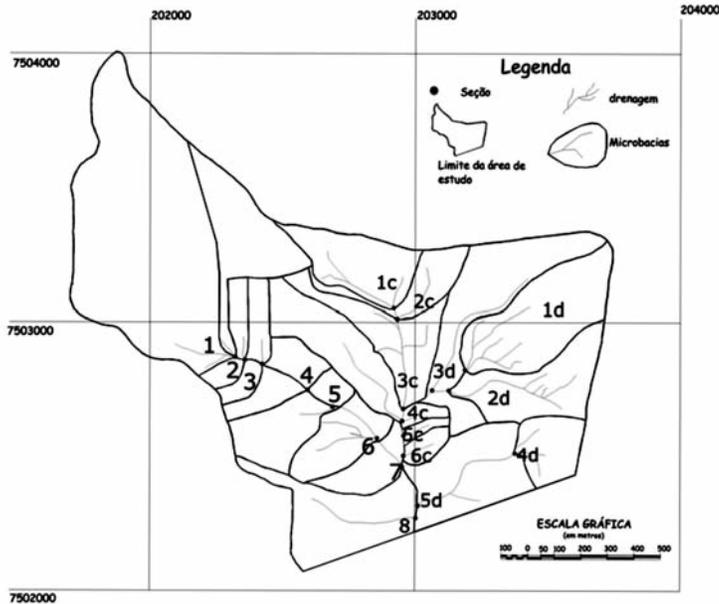


Fig. 3 – Mapa de sub-bacias definidas para a cabeceira do córrego do Tucum. Observar os pontos considerados na estimativa da vazão de pico.

5.4 – Materiais inconsolidados e caracterização geológico-geotécnica

O mapa de materiais inconsolidados (Figura 4) retrata as unidades de materiais inconsolidados que foram classificados a partir da gênese em residuais, retrabalhados e rocha alterada. Na área, os materiais retrabalhados representam 80% e afloram nos topos e nas encostas. Os materiais residuais e rocha alterada ocupam os 20% restantes, geralmente encontrados nas encostas dos vales e locais onde estes materiais foram expostos devido à escavação para construção de cordões de nível. Os materiais inconsolidados superficiais (<1m) mudam, constantemente, suas características devido à intensa movimentação de máquinas para aterro das feições e reconstrução dos cordões, principalmente antes dos períodos mais chuvosos.

No Quadro 2, encontram-se os tipos de materiais inconsolidados, suas características geotécnicas básicas e os resultados dos ensaios laboratoriais.

Os valores da condutividade hidráulica dos materiais variam de $1,93 \times 10^{-5}$ a $2,4 \times 10^{-6}$ m/s; o ângulo de atrito interno, de 23° a 25° , a coesão varia de 11 a 18 kPa; a capacidade de troca catiônica é predominantemente inferior a $2 \text{ cmol}^+/\text{kg}$ e a superfície específica é menor que $20 \text{ m}^2/\text{g}$.

No Quadro 3, apresenta-se a descrição das unidades de materiais inconsolidados. As unidades foram definidas tanto no que diz respeito à associação dos tipos de materiais inconsolidados no perfil (variação vertical) quanto no aspecto de distribuição areal da associação dos tipos de materiais inconsolidados.

Legenda

- Rt - Material Retrabalhado
- Rs- Material Residual
- Ra - Rocha Alterada
- La- lente (argila, arenosa e Conglomerático)
- Al- Material Aluvionar

10/Rt1 — Material Inconsolidado

Rt9
Rs1
Rs2
Ra

Perfil de alteração

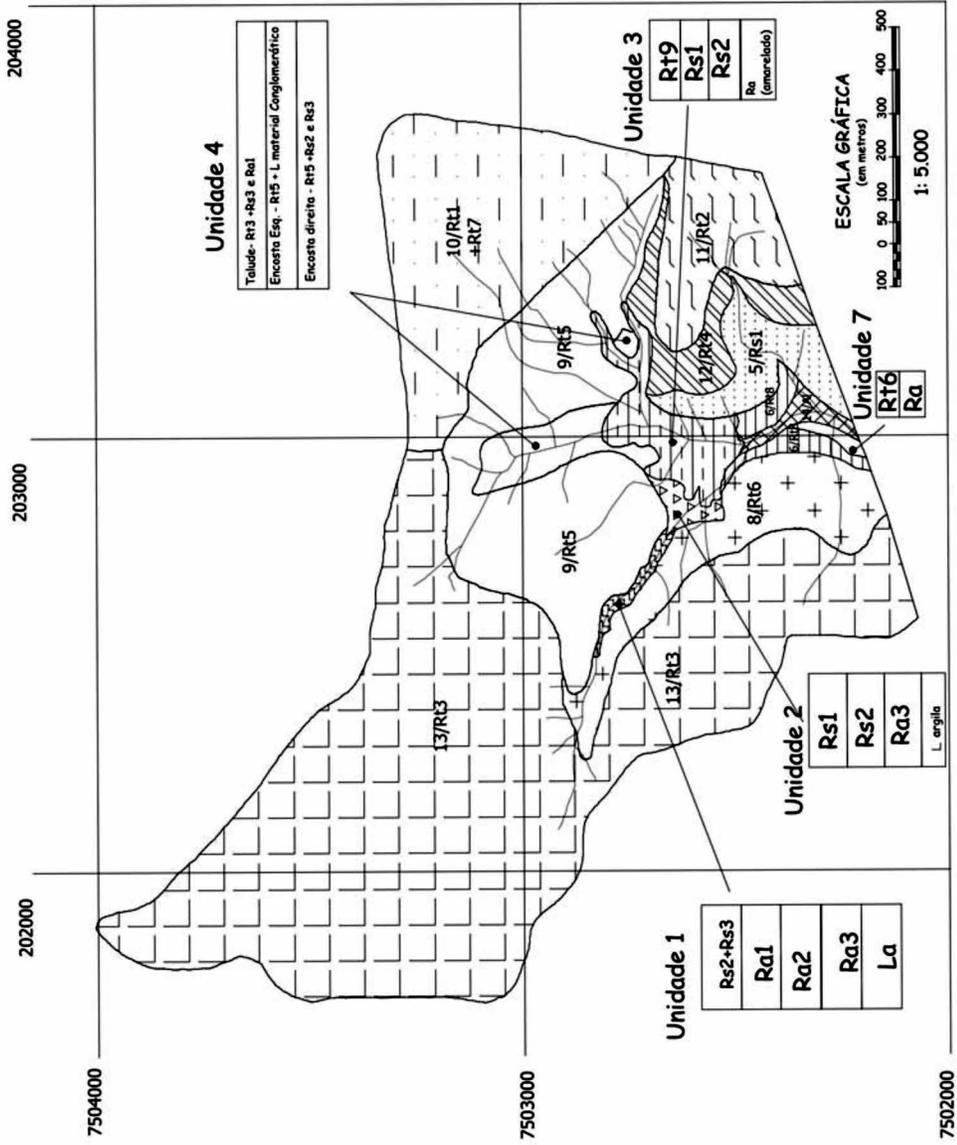
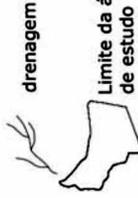


Fig. 4 – Mapa de materiais inconsolidados.

Quadro 2 – Resultados dos ensaios laboratoriais e em campo.

Material	Descrição	Granulometria (%)												Erodibilidade				Compactação (Proctor Normal)				Índices Físicos Naturais					
		Argila		Silte		Fina			Areia			Pm (%)		E40		γ _{dmax} (KN/m ³)	W ₆₀ (%)	γ _s (KN/m ³)		γ _{dc} (KN/m ³)		e		n (%)			
		Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Méd	Min	Máx	Méd	Min	Máx	Min	Máx			Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx				
Rt1	Retrabalhado topo Florestal	15,5	15,9	1,0	3,4	23,5	27,7	3,0	6,8	3,0	6,8	69,86	1,42	0,80	19,5	10,1	26,1	26,8	16,9	17,2	0,54	0,56	35,2	36,1			
Rt2	Rt topo Fazenda	7,5	8,5	1,1	2,6	25,2	41,1	48,9	57,2	2,7	7,8	67,54	1,93	1,03	19,1	8,5	26,3	2,67	16,0	17,7	0,49	0,67	32,8	40,1			
Rt3	Rt topo Urbana	8,3	10,1	1,4	2,4	32,4	38,2	48,3	53,7	1,7	3,3	74,10	1,80	0,97	18,9	9,0	25,9	2,67	16,3	17,4	0,52	0,59	34,0	37,0			
Rt4	Rt encosta Fazenda	5,4	---	1,8	---	35,8	---	53,0	---	4,0	---	13,16	2,09	6,36	---	---	27,1	---	17,1	---	0,59	---	37,1	---			
Rt5	Rt encosta entre Dimas/Raia/Lixão	6,7	12,1	1,2	4,1	27,5	36,5	49,3	55,0	3,7	5,0	72,14	1,65	0,93	19,3	9,5	26,1	2,65	16,1	17,5	0,54	0,64	34,9	39,2			
Rt6	Rt encosta lado direito Dimas	4,5	9,4	1,7	3,5	23,6	52,0	39,0	58,5	1,8	6,5	77,35	1,82	0,94	18,4	9,0	26,6	2,79	17,0	17,6	0,52	0,58	34,4	36,6			
Rt7	Rt pedregulho	8,7	---	2,2	---	26,1	---	57,0	---	6,0	---	74,16	2,20	1,19	19,2	9,5	26,9	---	18,3	---	0,47	---	32,1	---			
Rt8	Rt aluvião	4,2	---	3,0	---	32,8	---	55,0	---	5,0	---	24,27	1,72	2,83	---	---	26,1	---	16,8	---	0,56	---	35,7	---			
Rt9	Rt com MO	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---			
Rs1	Residual esbranquiçado	10,2	10,5	1,4	1,8	27,7	46,4	39,4	53,5	2,6	6,5	51,02	1,54	1,44	19,4	8,5	26,7	27,2	17,0	17,9	0,49	0,60	32,7	37,3			
Rs2	Residual amarelado	3,3	3,7	3,9	4,0	29,4	36,7	51,0	55,6	5,0	7,4	69,05	1,76	1,01	18,0	9,0	26,9	27,0	17,6	17,7	0,52	0,53	34,3	34,6			
Rs3	Residual rosado	3,5	---	1,8	---	43,7	---	50,1	---	0,9	---	79,95	0,96	0,48	18,7	6,5	2,69	---	17,5	---	0,55	---	35,5	---			
Ra1	Rocha alterada clara, ainda com acarramento	1,4	3,3	2,3	2,6	49,1	54,9	40,0	50,9	0	0	74,81	1,24	0,66	---	---	26,5	26,8	17,3	17,7	0,51	0,54	33,9	34,9			
Ra2	Rocha alterada com faixas de cimento escuro	2,1	---	5,2	---	47,7	---	45,0	---	0	---	56,25	0,16	0,15	---	---	26,9	---	17,5	---	0,54	---	34,9	---			
Ra3	Rocha alterada com cimento escuro	7,7	---	5,2	---	47,0	---	40,0	---	0	---	79,96	0,91	0,45	18,3	11,2	27,2	---	1,79	---	0,55	---	35,5	---			
La	Lente entre rocha alterada	1,8	---	1,4	---	31,8	---	61,3	---	3,7	---	80,68	1,06	0,52	17,4	9,0	26,2	---	16,5	---	0,58	---	33,8	---			

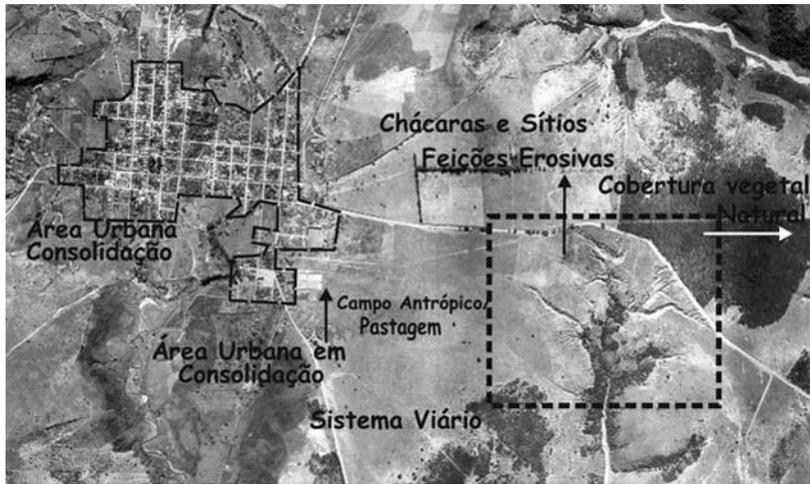
--- apenas uma amostra coletada ou não foi coletada amostra para este ensaio; Rt - retrabalhado; Rs - residual; Ra - lente; Rt9 - material não amostrado, mas descrição de campo; MO - matéria orgânica; Min - mínimo; Max - máximo; Pm - índice de perda por imersão; Sm - índice de absorção médio; E40 - índice de erodibilidade, Pejon (1992); γ_{dmax} - peso específico aparente seco máximo; W₆₀ - umidade ótima; γ_s - peso específico dos sólidos; γ_{dc} - índice de erodibilidade, Pejon (1993); e - índice de vazios; n - porosidade

Quadro 3 – Descrição das unidades de materiais inconsolidados.

Unidade	Associação de tipos de materiais inconsolidados	Características geológicas e geotécnicas básicas
1	Rs2 e Rs3(1 a 3m)/ Ra1(0,5 a 2m)/ Ra2(1 a 2m)/La	Em parte, esta unidade encontra-se recoberta por materiais retrabalhados escorregados das unidades 8 e 9 e apresenta lente arenosa entre rocha alterada.
2	Rs1(0,5 a 2m) / Rs2(± 1m)/ Ra3	O material Rs1 pode estar parcialmente recoberto por material retrabalhado enriquecido com matéria orgânica, e abaixo do Ra3 ocorre uma fina lente de argila.
3	Rt9(±1m)/ Rs1(±0,5m)/Rs2(<0,5 m)	O Rt9 é enriquecido com matéria orgânica recobrimdo materiais inconsolidados Rs1 e Rs2. Abaixo do Rs2 ocorre uma lente argilosa de 0,20m. Na base, há arenito amarelado pouco alterado com estratificação plano paralela e bastante endurecido. Isto se deve ao fato da possível flutuação do nível de água.
4	Rt3/Rs3/Ra1/ Rt5 (espessura total-variável em função da distribuição)	Localmente ocorre uma lente de material conglomerático de matriz arenosa de coloração rosada com seixos de argilito, com espessura de 0,5 a 1m. Na encosta direita do canal do Raia, ocorre alternância lateral entre os materiais retrabalhados Rt5 e os residuais Rs2 e Rs3, devido ao trabalho de tratores na área para construção de cordões.
5	Rs1(3m)	Ocorre camada superficial de 0,2m enriquecida de matéria orgânica.
6	Rt9	Enriquecido de matéria orgânica, bastante vegetada.
7	Rt6(1m)	Apresenta certa laterização (mosqueado), recobrimdo rocha alterada de coloração amarelada.
8	Rt6(3 a 5m)	Apresenta-se bastante vegetada nos cordões superiores, e com o processo erosivo relativamente estável.
9	Rt5(2 a 10m)	Este material ocupa as encostas do Raia.
10	Rt1(6m)/ Rt7	Linha de seixos de 0,3 m de espessura separa o Rt1 dos residuais. Este se mostra como um material importante no contexto da evolução dos processos erosivos na área, por apresentar-se naturalmente mais compacto que os outros materiais.
11	Rt2(5m)	Tendo uma camada de 0,5m enriquecida de matéria orgânica.
12	Rt4(± 5m)	Ocorre na encosta da drenagem na porção esquerda da bacia.
13	Rt3(2 a 12m)	Representa a maior extensão dentre todas as unidades e apresenta poucas porções ainda não ocupadas pelas atividades urbanas.
14	Rt8(1m)	Material aluvionar, de coloração branca, lateral ao talveque do córrego do Tucum

5.5 – Evolução das feições

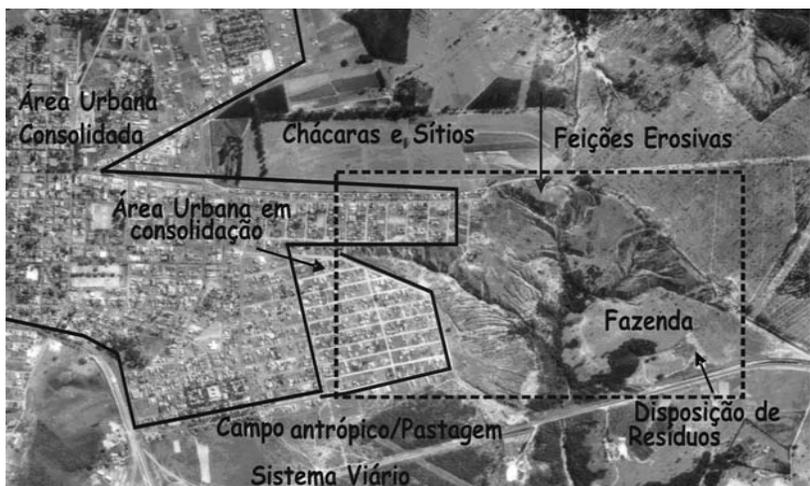
Com base nas fotografias aéreas (Figura 5) e nos registros de campo, foi elaborado um inventário das feições erosivas (Quadro 4) divididas em 6 etapas em termos de evolução: 1º Etapa (feições pré 1962), 2º Etapa (1962-1978), 3º Etapa (1978-1988) - efeitos da expansão urbana, 4º Etapa (1988-1995), 5º Etapa (1995-2000) e 6º Etapa (2000- 2006) - efeitos das obras na área.



(A)

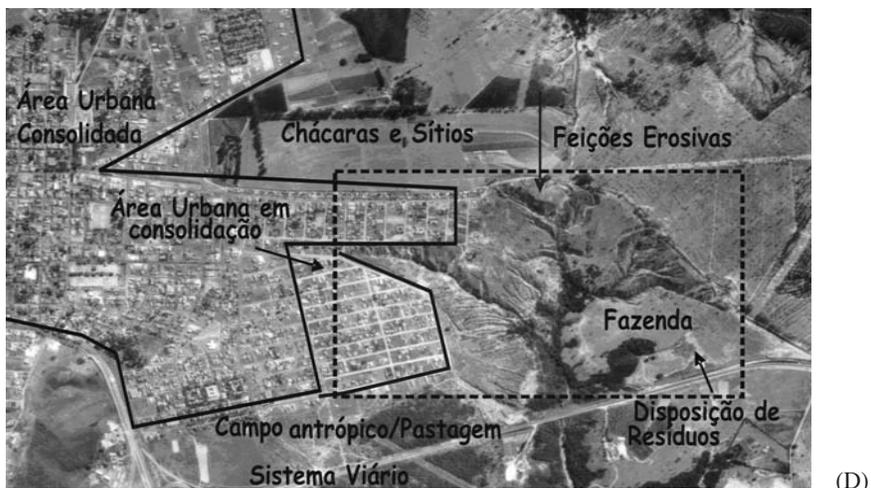


(B)

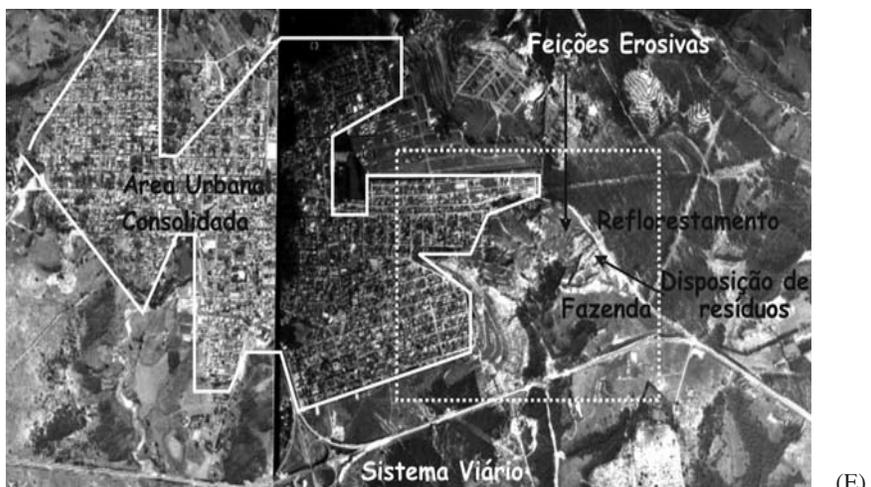


(C)

Fig. 5 – Fotografias aéreas da área de estudo em 1962 (A), 1972 (B), 1978(C), 1988 (D), 1995 (E) e 2000 (F) mostrando os principais uso e ocupação do solo e a evolução das feições erosivas.



(D)



(E)



(F)

Fig. 5 (continuação) – Fotografias aéreas da área de estudo em 1962 (A), 1972 (B), 1978(C), 1988 (D), 1995 (E) e 2000 (F) mostrando os principais uso e ocupação do solo e a evolução das feições erosivas.

Quadro 4 – Resultado geral do cadastro das feições erosivas.

Anos Feições erosivas	1962 (5a)	1972 (5b)	1978 (5c)	1988 (5d)	1995 (5e)	2000 (5f)	2005
Concentração de sulcos	07	09	06	02	02	03	02
Ravinas	03	03	04	11	09	04	01
Voçorocas	03	03	03	05	05	03	04
Voçorocas c/ Ravinas	03	03	03	03	03	01	----
TOTAL	16	15	16	21	19	11	07

As três maiores e principais feições foram identificadas desde 1962, o que significa que os problemas causados pela erosão já perduram por mais de 40 anos. Pode-se notar ainda um aumento progressivo do número de feições, diminuição do número de concentrações de sulcos e aumento do número de feições do tipo ravina e voçoroca a partir de feições de menor porte ao longo dos anos até 1988.

A partir de 1992, com início da implantação de técnicas de controle e recuperação, percebe-se que houve uma diminuição progressiva do número de todos os tipos de feições e no número total, mostrando, que estas técnicas mostram certo grau de eficiência em alguns locais.

Em 1995 e 2000, ocorreram dois intensos eventos pluviográficos que proporcionaram intensa propagação e deflagração de novas feições com a destruição parcial das obras executadas.

Atualmente as feições erosivas encontravam-se em atividade, com processos de escorregamento das paredes, condução e concentração de águas pluviais, presença de “piping”, sulcos nas encostas cortando os “bolders” e presença do lençol freático aflorante.

A voçoroca do Raia até então estabilizada, apresentou em janeiro de 2003 os primeiros vestígios de reativação e a voçoroca do Recanto das Águas encontra-se parcialmente controlada devido ao desvio das águas pluviais e da rede de esgoto.

6 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

Mesmo considerando-se as características de infiltração elevada ($K \approx 10^{-5}$ m/s), a maioria das chuvas que ocorrem na região e que são representadas pelos 12 eventos (Quadro 1) podem produzir escoamento superficial, agindo, portanto, como deflagrador e/ou intensificador dos processos erosivos.

Analisando o tempo de pico nas 19 seções estudadas, observa-se que somente os eventos 8 e 9 de chuva apresentam duração menor que tempo de pico máximo obtido para a seção número 8. Isto significa que tempo de pico é muito próximo ou menor que a duração das chuvas, mantendo a vazão de pico, pelo menos, até alguns minutos depois da chuva.

Os materiais geológicos da área apresentam, predominantemente, alta susceptibilidade à erosão, visto que os resultados dos ensaios de erodibilidade apresentaram índice E40 (Pejon, 1992) menor que 1, refletindo também a textura arenosa (areia média e areia fina totalizando até 90%) e a pouca expressividade de material fino da ordem de até 15%, assim como o ângulo de atrito e coesão baixas. Para alguns materiais, o índice de erodibilidade foi maior do que 1 (baixa erodibilidade), devido à presença de matéria orgânica, raízes e seixos, não refletindo seu real comportamento

de alta erodibilidade em campo. Quando da instalação dos processos erosivos, grande parte dos materiais residuais estava recoberta pelos retrabalhados. Portanto, a deflagração inicial das feições foi instalada a partir dos materiais retrabalhados. Durante parte da “evolução” destas feições, elas encontravam-se inteiramente associadas a estes materiais.

Dentre os materiais retrabalhados, ocorre uma camada de espessura da ordem de 1m, com pedrisco (material Rt7) e com compactação maior do que os outros (peso específico seco de 1,8g/cm e grau de compactação de 96%). Esta camada está posicionada acima dos materiais residuais e deve ter sido um condicionamento importante na propagação das feições erosivas, devido à menor facilidade de infiltração das águas.

Em relação aos landforms, observa-se que apesar da pequena extensão existem diversos elementos que representam as diferentes condições de geometria vertical e lateral. Porém, as medidas de controle não foram implantadas respeitando a geometria do terreno.

A área é constituída por encostas com perfil misto com combinação entre côncava, convexa e retilínea, e em todas as encostas o terço médio e inferior côncavos–retilíneos foram afetados pelo processo erosivo.

Destaca-se que as principais feições erosivas são de cabeceira e fundo de vale, enquanto o predomínio das ramificações são de encostas de acordo com a classificação de Brice (1966). Tais condições foram desenvolvidas em função da concentração de águas superficiais em pontos específicos, como nas porções mais elevadas dos talwegues dos canais de drenagem. Tais concentrações foram provocadas pela combinação de elementos de terreno coletores e a implantação de obras e outros tipos de uso e ocupação, como a construção da antiga estrada de terra São Pedro-Charqueada e da urbanização.

Pode-se verificar que a feição do Dimas apresenta propagação lateral, mas tem seu nível de base próximo do nível de base mínimo da área, assim como a do Raia, representado pelo canal do córrego do Tucum, enquanto a feição e as ramificações da Fazenda ainda apresentam potencial para propagação em profundidade.

O cadastramento das feições foi fundamental para o melhor conhecimento da distribuição espacial e temporal das erosões. Assim, pôde-se delimitar as áreas de maior concentração na cabeceira e como elas evoluíram. O levantamento das áreas de controle e recuperadas foi importante para a melhor compreensão do processo, tornando possível a análise da eficiência das medidas adotadas. Dentre os principais condicionantes do processo erosivo, estão as formas de uso a montante da bacia.

Verifica-se que a ocupação urbana avançou predominantemente na porção montante, desde o divisor de águas. Atualmente, cerca de 50% da área da bacia está urbanizada. Ela apresenta, portanto, uma geração de escoamento superficial muito elevado, condicionando um grande volume de água que aumenta a vazão de pico e diminui os tempos de concentração e de pico.

A análise da evolução histórica realizada nas fotografias aéreas demonstrou que as feições erosivas não foram formadas pela expansão urbana, mas foram intensificadas consideravelmente por esta, e também, pela execução de obras de controle que não levaram em consideração as características geológico-geotécnicas particulares de cada feição e a dinâmica natural da bacia.

Estes fatores evidenciam a importância do entendimento da evolução dos processos erosivos em áreas urbanas como uma ferramenta útil no planejamento territorial, pelo fato de direcionar as novas obras a serem executadas, sua forma de execução e manutenção. Desta forma, auxiliam no desenvolvimento de uma gestão ambiental mais equilibrada.

Áreas até então estabilizadas tornam-se alvo de manejo inapropriado, como a retirada da vegetação já desenvolvida e a falta de um critério de acompanhamento técnico das obras de contenção destas feições. As máquinas agrícolas utilizadas nestas obras ficam pelo período de um mês em posse do município, que direciona o fechamento das feições que podem sofrer manejo por este tipo de máquina. No entanto, quem decide como e de que forma vão ser reconstruídos os cordões e aterradadas as feições é o próprio operador.

Analisando-se as técnicas de controle utilizadas na área percebe-se que, em sua maioria, são adequadas ao fim que se destinam, ou seja, o controle de erosão. No entanto, verifica-se que sua implantação sem um projeto técnico adequado e sua execução por empresas sem experiência no controle de erosão tem levado a uma ineficiência grande em algumas partes da área estudada.

Portanto, em função do dimensionamento, posicionamento e implantação das obras de drenagem de águas pluviais, cordão de nível, aterramento entre as outras técnicas descritas, pode-se considerá-las inadequadas. Já em relação aos tipos, pode-se considerar que em parte se enquadram como adequados.

7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

A sistemática de estudo adotada mostrou-se compatível com as metodologias internacionais de estudo de feições erosivas e eficiente na concepção de um entendimento global da evolução das feições erosivas na área, auxiliando, desta forma, no entendimento claro das causas da ocorrência destas feições e sua relação com o meio.

As alterações provocadas pela expansão urbana e ampliação da malha viária na bacia desde 1962 até os dias atuais vêm acelerando consideravelmente a ampliação das áreas afetadas pelos processos erosivos.

As feições da Florestal, Raia e Recantos das águas apresentam-se hoje bem mais controladas do que antes da execução destas obras no ano de 1991. Desta forma, as perspectivas futuras são de que as feições cheguem ao estágio inativo e recebam obras de contenção mais efetivas, baseadas num rigor técnico, desde sua concepção até a sua manutenção.

Tendo em vista os resultados do presente estudo, pode-se concluir que há necessidade de uma avaliação das formas de controle adotadas, de uma proposição de novas técnicas de controle destas feições e de um plano de ação eficaz como parte da gestão da área. Uma avaliação destas obras ao longo dos anos e os custos associados podem mostrar claramente a importância de estudos geológico-geotécnico como base para implantação de tal tipo de obra.

Um dos principais condicionantes da evolução do processo erosivo foram as formas de uso da parte montante da bacia, sendo o principal deflagrador o escoamento superficial gerado pelas chuvas principalmente na parte urbanizada da bacia. A taxa do escoamento superficial tem aumentado com o avanço da ocupação e do posicionamento das ruas no sentido da maior declividade de cada encosta, normalmente ortogonal às feições existentes.

Outro condicionante importante foi a diversidade de materiais nos perfis de alteração, apesar do mesmo substrato rochoso. Em diferentes localizações, a rocha se expõe (arenitos da Formação Pirambóia) em diferentes condições de alteração.

Estes materiais, apesar de apresentarem-se, em princípio, semelhantes em termos dos resultados dos ensaios, mostraram-se com diferentes comportamentos frente aos processos erosivos, evi-

denciando a importância de sua detalhada identificação e divisão em unidades baseadas nas características genéticas.

Ressalte-se que, se houvesse um aproveitamento de todos os estudos realizados na área pelos diferentes profissionais que auxiliaram o município no controle do problema, tais perdas poderiam não ter ocorrido ou ter sido minoradas. Mas o fato é que as obras executadas não têm o devido critério técnico e foram executadas por pessoas não especializadas, ocasionando dimensionamento inadequado, por exemplo, dos cordões e a retirada da vegetação já implantada.

Estes fatores evidenciam a importância do entendimento da evolução dos processos erosivos em áreas urbanas como uma ferramenta útil no planejamento territorial, pelo fato de direcionar as novas obras a serem executadas, sua forma de execução e manutenção, auxiliando, portanto, no desenvolvimento de uma gestão territorial mais equilibrada.

8 – AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a instituição CAPES pelo apoio financeiro fornecido na forma de bolsa de mestrado, o qual possibilitou a elaboração deste trabalho.

9 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ayres, Q. C. (1936) – Soil erosion and its control. Mcgraw-hill Book Company, New York and London. 365p.
- Bennett, M. (1939) – Soil Conservation. New York, McGraw-Hill. 993 p.
- Brice, J. C. (1966) – Erosion and depositon in the loess-mantled Great Plains, Medicine Creek drainage basin, NebrasK. U.S. Geological Survey Professional Paper 352-H, p.255-339.
- Deyi, W. (2005) – A case study of successful watershed management in Wuhua County, Guangdong Province, China. Página consultada em 2005.
<<http://www.fao.org/docrep/X5669E/x5669e05.htm#types%20of%20soil%20erosion>>
- Fiori, O. C.; Soares, P. C. (1976) – Aspectos Evolutivos das Voçorocas. Notícias Geomorfológicas. Campinas. V16. Nº 32. p 114-124.
- Frendrich, R. (1997) – Erosão Urbana. In: Frendrich, R., Obladen, N. L., Aisse, M. M. & Garcias, C. M. – Drenagem e Controle da Erosão Urbana. Editora Ibrasa, Cap.1, p.17-49.
- Fiore-Oka, C. (1980) – Contribuição ao estudo das formações superficiais das quadrículas de Piracicaba e São Pedro – Dissertação de Mestrado- UNESP - Rio Claro. 121p.
- Franciniani, E. M. (1995) – Influência da estrutura e tectônica no desenvolvimento de boçorocas na Região de São Pedro-SP- Dissertação de Mestrado - UNESP - Rio Claro. 124p.
- FAO (1996) – Land husbandry – Components and strategy. Soil Bulletin nº 70, 114p.
- Higgins, C. G.; Hill, B. R.; Lehhe, A. K. (1990) – Gully Development, Colorado, U.S. Geological Society of America Special Paper 252, Chapter 6 p.139-155.
- IPT, Instituto de Tecnologias do Estado de São Paulo (1991) – Orientações para o combate à erosão no Estado de São Paulo - Bacia do Médio Tietê. Convênio DAEE/IPT. São Paulo. 3v.(Relat., 29004).

- IPT, Instituto de Tecnologias do Estado de São Paulo (1993) – Diagnóstico e recomendações sobre a boçoroca do Córrego Tuncum, município de São Pedro, SP. São Paulo. (IPT Relatório, 31675).
- Kronen, M. A. (1990) – A erosão do solo de 1952 a 1985 e seu controle no Paraná. *Boletim Paranaense de Geografia*, V. 6/7, p3-16.
- Lal, R. (1990) – *Soil Erosion in the Tropics*. McGraw-Hill. Estados Unidos da América. 580p
- Morgan, R. P. C. (1996) – *Erosión y conservación del suelo*. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. 343p.
- Martinez-Casanovas, J. A. (2003) – A spatial information technology approach for the mapping and quantification of gully erosion- *Catena* 50. 293-308p.
- Nordstrom, K. F. (1988) – The effect of erosion rate on vegetation patterns of an east coast barrier island, *Estuarine, Coastal, and Shelf Science*, 26:233-242.
- Øygarden, L. (2003) – Rill and gully development during an extreme winter runoff event in Norway. *Catena* 50, 217-242.
- Oostwoud Wijdenes, D.; Poesen, J.; Vandekerckhove, L.; Ghesquiere, M. (2000) – Spatial distribution of gully-head activity and sediment supply along an ephemeral channel in a Mediterranean environment. *Catena* n° 39, p 147-167.
- Pichler, E. (1953) – Boçorocas. *Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia - SBG*, 2 (1): p.3-16.
- Pejon, O. J. (1992) – Mapeamento Geotécnico Regional da Folha de Piracicaba–SP (Escala 1: 100.000): Estudo de Aspectos Metodológicos, de Caracterização e de Apresentação de tributos. Tese de Doutorado: EESC/USP. São Carlos – SP.224p.
- Poesen, J.; Nachtergaele, J.; Verstraeten, G.; Valentin, C. (2003) – Gully erosion and environmental change: importance and research needs- *Catena* 50. p91-133.
- Pouquet, J. (1951) – *L'Érosion*. Presses Universitaires de France. Paris, 126p.
- Ries, J. B.; Marzloff, I. (2003) – Monitoring of gully erosion in the Central Ebro Basin By large-scale aerial photography taken from a remotely controlled blimp. *Catena* 50. 309-328p.
- Santoro, J. (1991) – Fenômenos Erosivos acelerados região de São Pedro-SP. Estudo da fenomenologia com ênfase geotécnica. Dissertação de Mestrado. IGCE – UNESP. Rio Claro. 139p
- SIGRH (2004) – Banco de dados pluviométricos do estado de São Paulo. Página consultada em 2004: <<http://www.sigrh.sp.gov.br>>
- Soil Science Society of América (2001) – Glossary of soil science terms. Soil Science Society of America, Madison, WI, <http://www.soil.org/sssagloss>
- Silva, A. F. (2003) – Mapeamento Geotécnico e análise dos Processos Erosivos na Bacia do Córrego Tucum, São Pedro-SP, Escala 1:10.000- Dissertação de Mestrado. USP- São Carlos – SP. 133p.
- Vandaele, K.; Poesen, J.; Govers, G.; Wesemael, B. V. (1996) – Geomorphic threshold conditions for ephemeral gully incision. *Geomorphology* n° 16, p 161-173.
- Valentin, C.; Poesen, J.; Yong LI (2005) – Gully erosion: Impacts, factors and control. *Catena* n° 63, p 132-153.
- Zachar, D. (1982) – *Soil Erosion*; Elsevier Scientific Publishing Company. 548p.
- Zuquette, L. V. (1993) – Importância do mapeamento geotécnico no uso e ocupação do meio físico: fundamentos e guia de elaboração. São Carlos, 2v. Tese (Livre Docência) - EESC/USP (SP).