

CARTA DE PREDISPOSIÇÃO A EROSÃO ACELERADA - ÁREA DE PIRACICABA, ESTADO DE SÃO PAULO, BRASIL : METODOLOGIA E AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

Accelerated erosion predisposition chart - Piracicaba region, São Paulo state, Brazil: Methodology and results assessment

Osni José Pejon*

Lázaro Valentin Zuquette**

RESUMO - Apresenta-se neste trabalho a carta de predisposição à erosão acelerada elaborada para a região de Piracicaba-SP, em escala 1:100 000, e a avaliação de sua porção noroeste durante os anos de 1992 a 1998. A região foi dividida em 10 classes quanto a predisposição à erosão acelerada, em função dos principais atributos do meio físico que interferem na formação de feições de pequeno e grande porte. Não se considerou a ação antrópica nem a cobertura vegetal, mas somente os fatores naturais do meio físico relacionados ao fenômeno erosivo, visando determinar as áreas mais favoráveis ao desenvolvimento de processos erosivos. No presente estudo foram realizados trabalhos de campo e análises em fotografias aéreas em uma parte da área mapeada (Folha de São Pedro - escala 1:50 000), para verificar os problemas erosivos existentes e compará-los com as previsões estabelecidas na Carta de Predisposição à Erosão Acelerada. Os resultados obtidos mostraram concordância entre as previsões feitas na carta e os problemas de erosão encontrados durante o inventário e o período de acompanhamento dos problemas.

SYNOPSIS - This work presents the accelerated erosion predisposition chart elaborated for Piracicaba region, at the 1:100,000 scale, in São Paulo state, Brazil. The region was divided into 10 classes based on a group of attributes that were treated according to their importances for the erosive processes (rills and gullies). The attributes were analyzed by ranking of the levels of values or types found in the region. The vegetation and anthropogenic activities were not considered in this analysis. The northwest part of the Piracicaba region (São Pedro Sheet) was selected to developed a detailed study, at a scale 1:50,000, for assessment of the accelerated erosion predisposition chart. The assessment was based on information collected by photointerpretation and field works. The results permitted to conclude that accelerated erosion predisposition chart had good agreement with the data collected for the São Pedro area. The methodology used to elaborate the chart are being applied in others regions of Brazil.

1 – INTRODUÇÃO

O fenômeno da erosão consiste na ação combinada de um conjunto de fatores que provocam o destacamento e o transporte de materiais na porção mais superficial da Terra. Dentre os agentes deflagradores, as águas de chuva têm grande importância, principalmente em regiões de clima tropical, por propiciarem uma taxa elevada de escoamento superficial, responsável por grande parte do destacamento e transporte de materiais inconsolidados.

A ação dos agentes não é uniforme nas diversas regiões da Terra, assim, os processos erosivos dependem de uma série de fatores naturais, tais como: o clima, a geomorfologia, a

* Doutor em Geotecnia - Professor Associado EESC-USP - email: pejon@sc.usp.br

** Doutor em Geotecnia - Professor Associado EESC-USP - email: lazarus1@sc.usp.br

natureza do terreno (substrato rochoso e materiais inconsolidados) e a cobertura vegetal. Estes fatores naturais podem ainda ser alterados pela ação do Homem, ocasionando mudanças nos processos erosivos, quase sempre intensificando-os. As alterações provocadas pelo Homem recebem o nome de fatores antrópicos, podendo ser citados, os desmatamentos e cultivo de terras, criação e expansão de cidades, implantação de estradas, entre outros.

Neste trabalho apresentam-se os procedimentos metodológicos adotados para elaboração da carta de predisposição para a região de Piracicaba (SP, Brasil), assim como o levantamento das feições erosivas para avaliar a validade da carta de predisposição à erosão acelerada por escoamento superficial concentrado na porção noroeste da região, denominada de Folha de São Pedro.

2 - CONSIDERAÇÕES SOBRE O FENÔMENO DE EROSÃO CAUSADO PELA ÁGUA DAS CHUVAS

2.1 - Considerações gerais

Os processos erosivos, causados pelo escoamento superficial das águas da chuva, podem ser enquadrados como naturais ou acelerados e ser devidos ao escoamento difuso ou concentrado. A erosão por fluxo difuso ocorre na superfície do solo como um todo, quando há escoamento da água de chuva sem concentrar-se em canais definidos, denominado-se de erosão laminar. Quando ocorre a formação de filetes ou canais de água arrastando material, tem-se a erosão concentrada, dando origem à feições erosivas lineares e de portes variados.

O processo erosivo é classificado como natural quando a atuação ocorre num ambiente onde é controlado somente pelo equilíbrio dos fatores naturais. Quando se processa de forma contínua e lentamente ao longo do tempo geológico, recebe a designação de erosão normal (Oliveira *et al.*, 1987; Stein *et al.* 1987; DAEE-IPT, 1990). A erosão natural pode sofrer modificações devido a mudanças climáticas ou geológicas, alterando a velocidade e a intensidade do processo, podendo a remoção do material inconsolidado tornar-se mais rápida do que sua reposição pelos processos de intemperismo das rochas, consistindo, portanto, em uma erosão acelerada. Os efeitos deste tipo de erosão acelerada, apesar de consistirem em um desequilíbrio, normalmente se fazem sentir em milhares de anos, sendo, portanto, um processo muito lento quando comparado com os processos erosivos acelerados pela ação antrópica.

Este tipo de erosão acelerada constitui-se em um processo muito mais rápido do que a erosão acelerada natural, podendo evoluir em poucos anos, atingindo áreas extensas.

Os fenômenos de erosão concentrada podem apresentar proporções diferentes, desde pequenos sulcos ou ravinas, que apresentam dimensões relativamente pequenas, até processos que atingem grandes áreas, com aprofundamento dos canais até dezenas de metros, interceptando, muitas vezes, o nível d'água. Estas erosões, totalmente descontroladas, recebem, no Brasil, a denominação de boçorocas e causam grandes danos, tanto em áreas rurais quanto urbanas.

Os componentes naturais associados ao meio físico, considerados mais importantes para o desencadeamento dos processos de erosão acelerada, são: a pluviosidade, as características dos materiais inconsolidados e as geomorfológicas. O conjunto de atributos considerados deve ser tratado e analisado de maneira a permitir a avaliação da erosividade do escoamento superficial e da erodibilidade dos materiais, para, em decorrência, elaborar a carta de predisposição a erosão acelerada por escoamento superficial.

2.2 - Escoamento superficial

De acordo com conceituação de Chow (1964), escoamento ("runoff") é a parte da precipitação, bem como de qualquer outra contribuição, que é conduzida em canais superficiais de drenagem sob a forma perene ou intermitente. Dependendo da fonte da qual o fluxo é derivado, o escoamento pode ser caracterizado como superficial ("superficial runoff"), subsuperficial ("subsuperficial runoff") e de água subterrânea ("groundwater runoff"). O escoamento superficial é aquela parte do "runoff" que se movimenta sobre a superfície do terreno e por canais, atingindo a saída da bacia. A parte do escoamento superficial que se movimenta sobre a superfície do solo em direção aos canais de drenagem é chamada de "Overland flow".

Horton (1933) define "Overland flow" da seguinte maneira: "omitindo a interceptação pela vegetação, o escoamento superficial é aquela parte da precipitação que não é absorvida pelo solo".

A água de escoamento superficial é o mais importante agente de transporte quando a erosão é causada pela chuva. Este escoamento pode se mover sobre o terreno, de diversas maneiras: sobre amplas superfícies, sem apresentar canais perceptíveis, como uma lâmina delgada de água, denominado de escoamento laminar ou escoamento pré-canal; ou então, a água se movimenta confinada em micro-canais temporários, canais definitivos ou canais profundos, denominando-se escoamento concentrado.

Diferentes tipos de escoamentos superficiais podem ser identificados em uma bacia de drenagem, como apresentados no Quadro 1 de acordo com Derbyshire *et al.* (1979).

A compreensão dos processos de escoamento superficial depende do estabelecimento do real significado de cada um dos sub-processos envolvidos, sendo que o escoamento superficial não confinado em canais pode ser originado por 4 condições básicas, e que são responsáveis pela deflagração dos processos erosivos acelerados, a saber:

- a - Escoamento superficial Hortoniano - ocorre quando a intensidade de precipitação excede a taxa de infiltração.
- b - Escoamento superficial Hortoniano retardado - quando a intensidade de precipitação excede a capacidade de infiltração do solo após a influência de um fator de retardo, como umedecimento ou impacto de gotas de chuva.
- c - Escoamento superficial por saturação da camada de topo - ocorre em regiões onde os solos permeáveis no topo do perfil encontram-se sobrejacentes a uma camada menos permeável e, portanto, atingem a saturação em tempo inferior ao da duração da chuva
- d - Escoamento superficial por saturação - ocorre quando a capacidade de armazenamento do solo está completamente esgotada, de tal forma que toda a adição de água, independente da sua taxa de aplicação, é forçada a escoar pela superfície.

Hogg (1982) apresenta uma sistematização dos diferentes tipos de escoamento, como mostra a Fig. 1.

2.3 - Considerações quanto às características de erodibilidade dos materiais geológicos

Os materiais geológicos apresentam diversos comportamentos quanto à erodibilidade, em função dos constituintes sólidos (minerais, matéria orgânica e outros), do cimento entre as partículas, da dimensão das partículas e do estado de evolução genética. No Quadro 2 encontram-se os fatores que estão associados à erodibilidade dos materiais.

Quadro 1 - Tipos de escoamentos superficiais em áreas de cabeceiras de bacias hidrográficas (Derbyshire *et al.*, 1979) .

TIPO DE ESCOAMENTO	CARACTERÍSTICAS	OCORRÊNCIA
Escoamento rápido		
escoamento superficial	quando a intensidade da chuva excede a capacidade de infiltração	– regiões semi-áridas – regiões úmidas - adjacentes a canais fluviais ou em encostas convergentes
escoamento superficial saturado	quando o solo está saturado e a capacidade de infiltração não foi excedida	– canais fluviais – locais onde o nível d'água aumenta rapidamente durante a chuva
Escoamento de restituição		
escoamento subsuperficial	movimento de água no perfil de solo no sentido da parte baixa da vertente sob condições não saturadas	vertentes com solos bem drenados guiado por discontinuidades no perfil
escoamento subsuperficial saturado	escoamento lateral em solos sob condições saturadas	quando uma cunha saturada estende-se no sentido da parte alta da vertente do perfil de solo; o escoamento subsuperficial saturado ocorre imediatamente acima
escoamento lateral	escoamento lateral que ocorre por deslocamento da água armazenada devido a adição de "nova" água	vertente de solo com zona saturada
escoamento interno	pode ser empregado como sinônimo de escoamento subsuperficial	vertente com nível d'água permanente e presença de discontinuidade para guiar o escoamento lateral
escoamento interno saturado	ocorre sob condições saturadas	em locais com presença de uma cunha saturada abaixo da superfície e que se estende para parte alta da vertente
escoamento em tubos	fluxo através da rede subsuperficial de canais ou tubos ("pipes") maiores do que vazios do solo, podendo ultrapassar 1 metro em diâmetro	áreas variadas incluindo encostas íngremes, onde há camadas erodíveis sobrejacentes a camadas menos permeáveis
Escoamento retardado		
escoamento de água subterrânea	a água subterrânea movimenta-se em direção às partes baixas das vertentes e em direção à superfície em taxas determinadas pela pressão hidráulica	áreas onde a água subterrânea é armazenada.

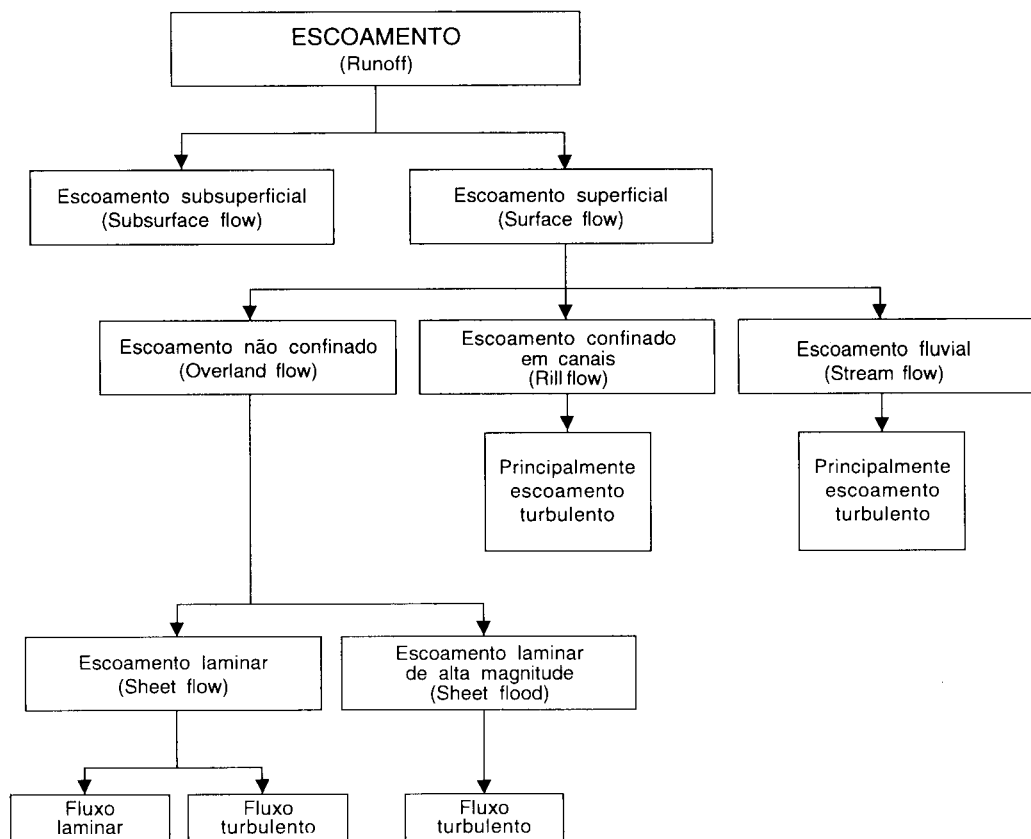


Fig. 1 - Classificação hidrológica do processo de escoamento superficial (modificado de Hogg, 1982).

3 - CARACTERÍSTICAS GERAIS DA ÁREA

3.1 - Localização

A área estudada localiza-se na região centro-leste do Estado de São Paulo, entre os paralelos 22° 30 e 23° S e os meridianos 47° 30 e 48° 00' W, perfazendo aproximadamente 3 000 km² (Fig. 2).

O clima da área estudada, em sua maior parte, pode ser enquadrado com CWa, segundo a classificação de Köppen. A precipitação média anual situa-se em 1 200 mm em quase toda a região, com exceção de uma pequena porção no norte da área (Serra de São Pedro), onde as precipitações médias situam-se em torno de 1 400 a 1 500 mm (DAEE-1981).

Quadro 2 - Fatores que influenciam a erodibilidade dos materiais geológicos.**FATORES QUE INFLUEM NA ERODIBILIDADE**

PROPRIEDADES	FATORES	CARACTERÍSTICAS
Mecânicas e antrópicas	textura	- influi no destacamento e carregamento de partículas do solo. - determina a facilidade com que o solo é dispersado. - determina a força limite necessária para o destacamento.
	estrutura	- formação de agregados que resistem à dispersão, aos efeitos abrasivos da água de escoamento e ao destacamento. - grau de agregação e distribuição de agregados estáveis. - tamanho dos agregados.
	tamanho dos torrões e cultivos do solo	- superfícies rugosa e cheia de torrões possuem elevada capacidade de retenção. - resistência à desagregação pela chuva e erosão pelo vento.
	formação de crosta	- responsável pela alta taxa de escoamento superficial. . - desenvolve-se em solos com baixa porcentagem de matéria orgânica..
Resistência	resistência ao cisalhamento	- importante no destacamento de partículas de solo (impacto e escoamento superficial). - rolamento e deslizamento de grãos .
Hidrológicas	retenção de água	- o estado de energia da água do solo ou pressão neutra influencia a resistência ao cisalhamento do solo. - resistência do solo ao arrastamento pela água é influenciada pela umidade inicial ou antecedente. - solos secos são mais susceptíveis à erosão pelo vento e pela água do que solos úmidos.
	transmissão de água no solo - infiltração	- taxa de infiltração determina o maior ou menor volume de escoamento superficial.
	permeabilidade	- solos com permeabilidade extremamente baixa a moderada geram mais escoamento superficial.
Reológicas	sistema solo/água	- a umidade do solo influi na susceptibilidade à erosão por afetar a coesão, a resistência ao cisalhamento, a consistência e a plasticidade.

Quadro 2 - Fatores que influenciam a erodibilidade dos materiais geológicos. (Cont.)

FATORES QUE INFLUEM NA ERODIBILIDADE		
PROPRIEDADES	FATORES	CARACTERÍSTICAS
Químicas e mineralógicas	matéria orgânica	- influencia a distribuição granulométrica, propriedades de retenção e transmissão de água. - fortalece as ligações que estabilizam as unidades estruturais e mantém um balanço favorável entre retenção e transmissão nos poros. - diminui o efeito compactação. - concentração de matéria orgânica nos micro-agregados aumenta a sua resistência à desagregação ("Slaking") e à dispersão. - elevadas concentrações de matéria orgânica em alguns solos são responsáveis pelas características hidrofóbicas.
	argilo-minerais	- a estrutura do solo e a sua resistência são influenciadas pela quantidade e natureza dos argilo-minerais. - a fração fina do solo interage com a matéria orgânica para formar agregados estáveis que resistem ao impacto das gotas da chuva.
Características do perfil	diretos e indiretos	- influencia a erosão direta e indiretamente. - influência sobre o escoamento subsuperficial de água em decorrência de mudanças nas propriedades hidrológicas de diferentes horizontes. - influência sobre o crescimento vegetal.

Em termos pedológicos, os tipos de solos predominantes são os Podzólicos Vermelho-Amarelos, seguidos pelos Latossolos Vermelho-Escuros, Vermelho-Amarelos, ocorrendo ainda áreas de Solos Litólicos, Areias Quartzosas e mais restritamente de Solos Aluviais e Hidromórficos (Oliveira *et al.*, 1989).

Os tipos de relevos predominantes na área são as colinas, variando de amplas a médias, os morrotes alongados e os espigões, ocorrendo ainda subordinadamente mesas basálticas, escarpas festonadas e planícies aluviais (IPT, 1981).

3.2 - Geologia

Geologicamente, a região está inserida na Bacia Sedimentar do Paraná, apresentando litologias pertencentes às diversas formações geológicas de acordo com o Quadro 3.

O mapa de substrato rochoso elaborado (Fig. 3), foi baseado em trabalhos pré-existentes e em trabalhos de campo visando o controle e obtenção de informações. Ocorrem na área estudada litologias pertencentes à Formação Itaqueri, às Formações Serra Geral, Botucatu e Pirambóia do Grupo São Bento, às Formação Corumbataí e Irati do Grupo Passa Dois, à Formações Tatui e ao Subgrupo Itararé do Grupo Tubarão.

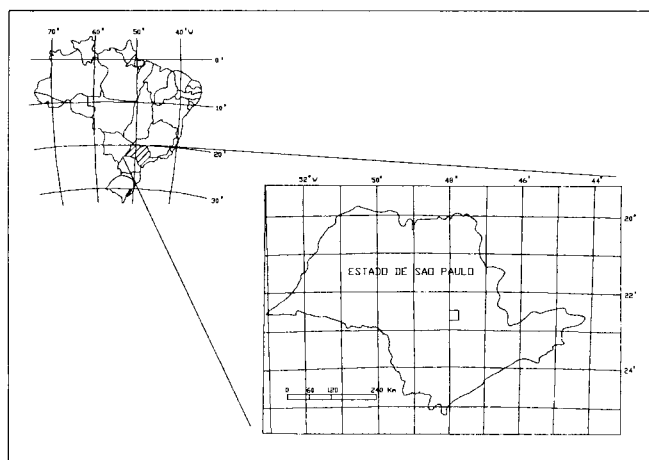


Fig. 2 - Localização da área estudada

Quadro 3 - Coluna estratigráfica simplificada e características básicas das formações geológicas.

Formação	Idade	Litologias	Características
Itaqueri	Cretácea-Terciária	Siltitos, Arenitos, Argilitos	Predominam os siltitos e arenitos, que podem apresentar minerais expansivos e média cimentação.
Serra Geral	Juro-Cretácea	Basaltos	Muito fraturados.
Suites Básicas	Juro-Cretácea	Diabásios	Muito fraturados
Botucatu	Juro-Cretácea	Arenitos	Ocorrem sob 2 condições: forte e fracamente cimentados.
Pirambóia	Triássica -Jurássica	Arenitos	Podem conter até 25% de finos.
Corumbataí	Permiana	Siltitos, Argilitos	Apresentam uma variabilidade de cimentos e desagregabilidade.
Irati	Permiana	Siltitos, Calcários, Folhelhos	Apresenta um banco maciço de calcário de aproximadamente 2 m, associado a intercalações de siltito e folhelho.
Tatuí	Permiana	Siltitos, Arenitos	Intercalações de siltitos com bancos de arenito maciço.
Itararé	Permo-Carbonífera	Siltitos, Arenitos, Argilitos, Lamitos	Não há domínio litológico, mas sim de associação de 2 ou 3 litologias.

3.3 - Materiais Inconsolidados

Consideram-se como materiais inconsolidados, neste trabalho, os materiais residuais ou transportados que ocorrem sobre as rochas das diversas formações (substrato rochoso). Para o estabelecimento dos limites entre as várias unidades utilizaram-se informações obtidas em fotografias aéreas, em trabalhos de campo e nos mapas pedológico e geológico. Desta maneira obteve-se o mapa de materiais inconsolidados (Fig. 4). Na divisão das unidades consideraram-se os aspectos texturais, genéticos e de espessura dos diferentes pacotes.

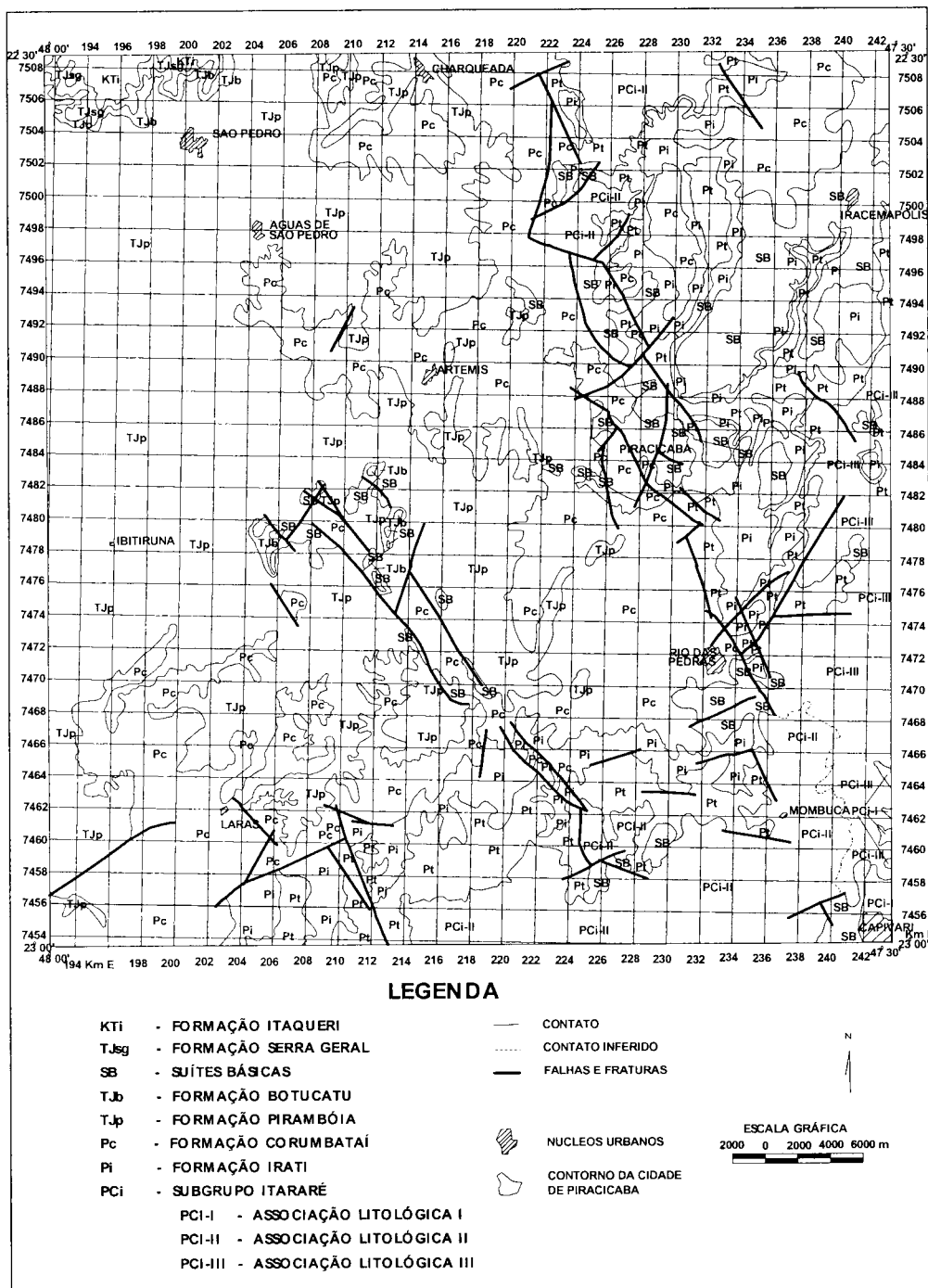


Fig. 3 - Mapa do substrato rochoso da região de Piracicaba.

As características granulométricas e os índices físicos obtidos nos ensaios realizados com estes materiais, bem como sua classificação estão apresentados no Quadro 4.

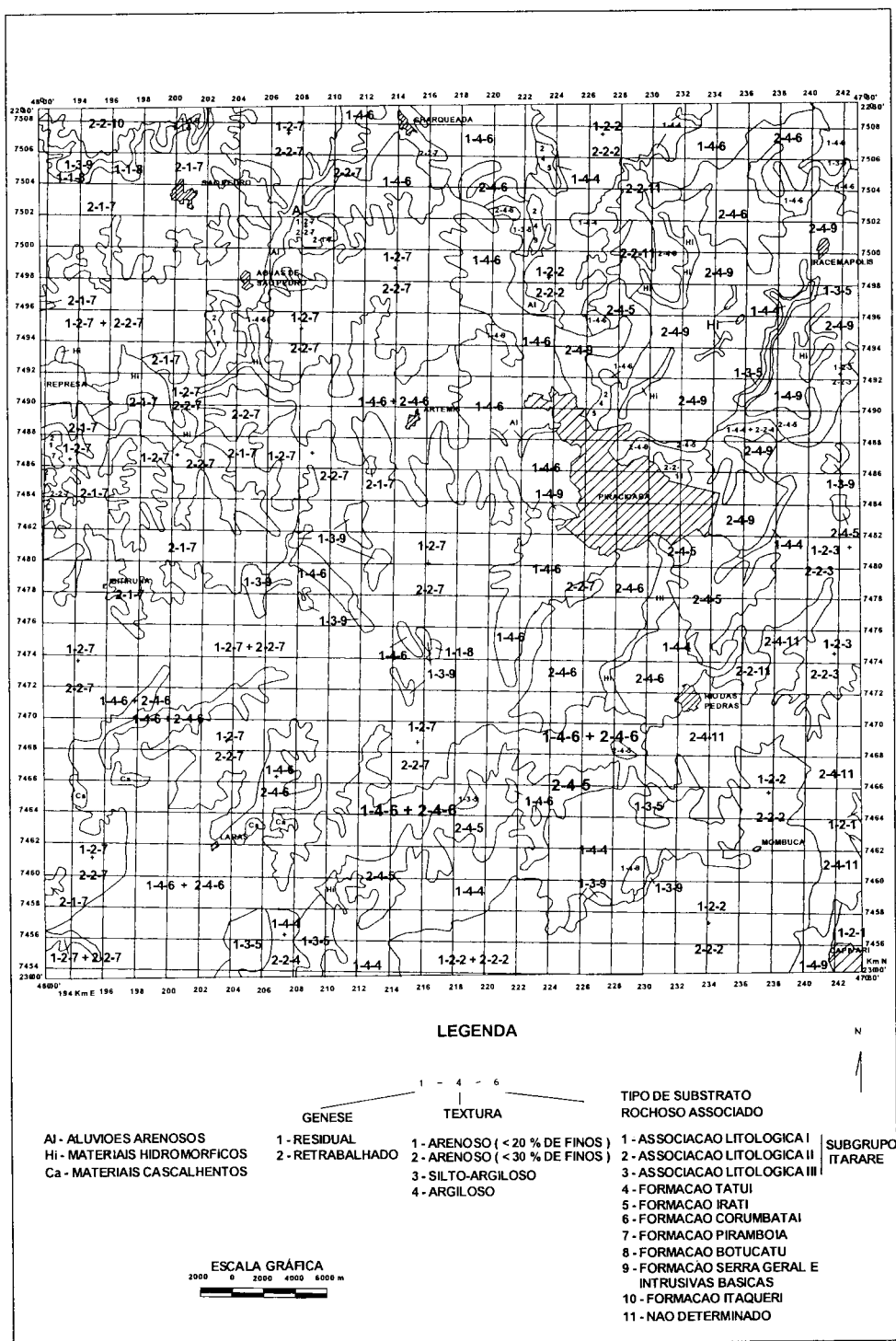


Fig. 4 - Mapa de materiais consolidados da região de Piracicaba.

Quadro 4 - Resultados dos ensaios de caracterização geotécnica básica dos materiais inconsolidados

UNIDADE	GRANULOMETRIA (%)									COMPACTAÇÃO						ÍNDICES FÍSICOS								
	ARGILA			SILTE			AREIA			pdmax g/cm ³			wot. %			ps g/cm ³			pdc g/cm ³			e ₀		
	Mi	Me	Ma	Mi	Me	Ma	Mi	Me	Ma	Mi	Me	Ma	Mi	Me	Ma	Mi	Me	Ma	Mi	Me	Ma	Mi	Me	Ma
1-2-1	15				15			70			1,80			14,0			2,65			1,40			0,85	
1-2-2	58	60	62	10	15	20	22	26	28	1,50	1,55	1,61	22,1	20,3	16,1		2,70		1,19	1,40	1,74	0,97	1,00	1,32
2-2-2	5	17	32	4	9	14	56	74	84	1,68	1,80	1,93	12,5	16,9	19,3		2,61		1,32	1,45	1,66	0,55	0,80	0,99
2-2-3	10	18	30	5	10	15	60	72	85	1,80	1,85	1,91	10,0	11,4	12,8		2,65		1,32	1,50	1,62	0,62	0,84	1,01
1-4-4	30	35	47	14	18	25	28	46	56	1,35	1,50	1,70	15,7	17,9	20,2		2,70		1,30	1,45	1,75	0,50	0,80	1,20
1-3-5	23	30	33	35	37	40	30	33	37	1,60	1,65	1,70	15,5	16,8	19,0		2,93		1,05	1,13	1,28	1,27	1,63	1,85
2-4-5	40	54	68	6	14	22	24	31	45	1,49	1,59	1,71	15,9	20,0	26,7		2,75		0,97	1,00	1,04	1,45	1,68	1,95
1-4-6	40	50	60	7	15	32	15	25	40	1,40	1,50	1,60	16,7	18,9	21,7		2,80		1,25	1,30	1,40	0,70	0,90	1,30
2-4-6	30	55	60	7	15	30	21	30	60	1,30	1,60	1,70	16,5	20,0	29,6		2,70		1,10	1,30	1,50	0,65	1,30	2,00
1-2-7	10	10	15	10	10	15	75	80	89	1,70	1,80	1,90	8,5	13,1	19,5		2,70		1,40	1,50	1,60	0,65	0,70	0,90
2-1-7	0	10	15	0	2	7	77	80	94	1,80	1,85	1,90	8,3	12,6	19,4		2,65		1,30	1,55	1,70	0,50	0,70	1,00
2-2-7	2	14	24	1	4	10	75	82	89	1,70	1,80	1,90	12,1	14,0	15,8		2,60		1,40	1,50	1,55	0,61	0,73	0,90
2-4-9	35	52	64	5	14	26	24	34	56	1,31	1,52	1,67	14,2	21,5	27,4		2,90		1,04	1,20	1,43	0,82	1,41	1,99
1-3-9	10	38	56	8	17	35	24	44	64	1,40	1,50	1,65	15,0	17,9	22,1		2,90		1,03	1,34	1,57	0,68	1,20	1,62
2-2-10	17	29	35	1	6	12	53	68	76	1,55	1,70	1,84	14,0	17,1	20,1		2,68		1,07	1,38	1,57	0,74	0,97	1,42
2-2-11	12	20	33	1	4	8	60	70	87	1,70	1,80	1,90	10,8	12,7	14,5		2,80		1,40	1,47	1,50	0,60	0,89	1,20
2-4-11	32	51	77	4	14	23	17	35	56	1,34	1,51	1,69	12,7	18,4	21,7		2,73		0,93	1,20	1,46	0,84	1,38	2,14

pdmax - massa específica seca máxima do proctor normal

wot. - umidade ótima

ps - massa específica dos sólidos

pdc - massa específica seca de campo

e₀ - índice de vazios natural

Mi, Me, Ma - valores mínimos, médios e máximos respectivamente

Quadro 4 - Resultados dos ensaios de caracterização geotécnica básica dos materiais inconsolidados (Cont.)

UNIDADE	DADOS DO ENSAIO DE AZUL DE METILENO														Class. M.C.T.	
	VB			Acb			CTC			SUP.ESPE C.			pH			
	g/100g de solo			g/100g de argila			meq/100g de solo			m ² /g de argila						
	Mi	Me	Ma	Mi	Me	Ma	Mi	Me	Ma	Mi	Me	Ma	Mi	Me		Ma
1-2-1		1,58													-	
1-2-2	1,51	2,10	2,47	3,4	5,0	7,5	4,7	6,3	7,7	83	124	184	4,7	5,1	5,4	
2-2-2	0,26	0,65	1,13	3,0	3,8	5,1	0,8	2,0	3,5	74	93	124	4,2	4,6	5,4	
2-2-3	0,33	0,60	1,16	1,3	4,2	11,6	1,1	1,9	3,6	32	103	283	4,3	4,8	5,3	
1-4-4	1,12	2,50	4,36	3,9	5,9	7,0	3,5	7,7	13,7	87	144	172	4,0	5,2	6,4	
1-3-5	1,17	1,18	1,99	3,6	4,1	8,6	3,7	4,6	6,2	87	126	212	5,2	6,0	7,4	
2-4-5	0,98	2,08	3,57	1,4	4,0	6,6	3,1	6,5	11,2	35	97	162	4,4	5,4	6,4	
1-4-6	0,83	2,63	6,25	1,9	5,8	13,0	2,6	8,2	19,6	48	142	318	4,4	4,9	5,7	
2-4-6	0,56	1,49	3,36	1,6	3,5	5,2	1,8	4,4	10,5	39	82	150	4,4	5,3	5,6	
1-2-7	1,43	1,86	2,67	7,4	11,9	18,6	4,5	5,8	8,4	94	283	455	4,0	4,6	5,3	
2-1-7	0,15	0,29	0,68	1,7	2,8	6,5	0,5	0,9	2,1	40	67	159	4,2	5,4	5,5	
2-2-7	0,15	0,60	1,15	1,5	3,1	8,1	0,5	1,5	3,6	37	75	199	4,2	5,0	6,0	
2-4-9	0,81	1,15	2,17	1,5	2,2	4,3	2,5	3,6	6,8	34	54	106	4,7	5,5	7,6	
1-3-9	1,02	2,26	4,65	2,1	4,5	46,5	3,4	7,1	14,6	50	109	1137	4,5	6,0	6,9	
2-2-10	0,21	0,32	0,45	0,7	1,1	1,3	0,6	1,0	1,4	18	27	33	4,8	5,0	5,2	
2-2-11	0,31	0,45	0,69	1,3	1,9	2,9	1,0	1,4	2,2	32	45	72	4,5	4,9	5,1	
2-4-11	0,42	0,93	1,65	1,0	1,9	3,7	1,3	2,9	5,2	26	46	89	4,4	5,0	5,8	

VB - índice de adsorção de azul de metileno

Acb - índice de atividades da fração argila

CTC - capacidade de troca de cátions

Sup.Espec. - superfície específica

Class. M.C.T. - classificação para solos tropicais (Nogami e Villibor, 1979)

Mi, Me, Ma - valores mínimos, médios e máximos respectivamente

4 - CARTA DE PREDISPOSIÇÃO A EROSÃO ACELERADA

4.1 - Considerações básicas

Para a elaboração de uma carta de predisposição à erosão é imprescindível o conhecimento adequado das características do meio físico. Atributos como a granulometria, a espessura e a permeabilidade dos materiais inconsolidados, bem como tipo rochoso, forma das encostas, declividade devem ser considerados (Pejon, 1992). Outros fatores também importantes são as relações entre a infiltração e o escoamento superficial, que em última análise condicionam a disponibilidade de água que irá escoar superficialmente.

Analizando-se os atributos acima, verifica-se que grande parte deles são obtidos e estudados em mapeamentos geotécnicos. Assim sendo, Zuquette *et al.* (1991) propuseram uma metodologia para a elaboração de cartas de potencial ao escoamento superficial e infiltração e Pejon e Zuquette (1992 e 1993) mostraram a grande aplicação que estes documentos podem ter na obtenção das cartas de predisposição à erosão.

Nos trabalhos citados, estão expostos os fundamentos da metodologia para a elaboração das cartas de predisposição à erosão, como por exemplo, a da Folha de Piracicaba na escala 1:100 000 (Fig. 5). Com a análise e hierarquização dos atributos do meio físico de maior importância no processo de erosão, a área representada na Fig. 5 foi dividida em 10 classes de predisposição à erosão. Não se considerou nesta análise nem a cobertura vegetal, nem a ocupação antrópica. Portanto, esta é uma carta que busca refletir o comportamento da área quanto à erosão, com base nos atributos do meio físico, e que permita associar posteriormente as informações antrópicas e de vegetação.

Com o objetivo de verificar se a carta elaborada reflete realmente os diferentes graus de predisposição à erosão, desenvolveu-se um levantamento, por meio de fotografias aéreas e trabalhos de campo, das feições erosivas existentes em uma parte da área inicialmente mapeada. A porção escolhida foi a de São Pedro (Folha do IBGE - escala 1:50.000 - área de 710 km²) por apresentar a maior concentração de zonas com alta predisposição à erosão acelerada.

4.2 - Metodologia

Para a elaboração da carta procedeu-se, previamente, à elaboração de uma carta de potencial ao escoamento superficial das águas de chuva e à determinação de um índice de erodibilidade dos materiais inconsolidados, associado a outras características geotécnicas (Pejon e Zuquette, 1993).

4.2.1 - Determinação do potencial de escoamento superficial

A elaboração da carta do potencial de escoamento superficial está baseada na atribuição de pesos aos atributos do meio físico diretamente relacionados aos processos de escoamento superficial, conforme procedimentos adotados pelo Serviço de Conservação dos Solos dos Estados Unidos da América. Os atributos considerados para a elaboração desta carta são: declividade, litologia, densidade de drenagem, feições de armazenamento superficial e textura, gênese e espessura dos materiais inconsolidados (Quadro 5).

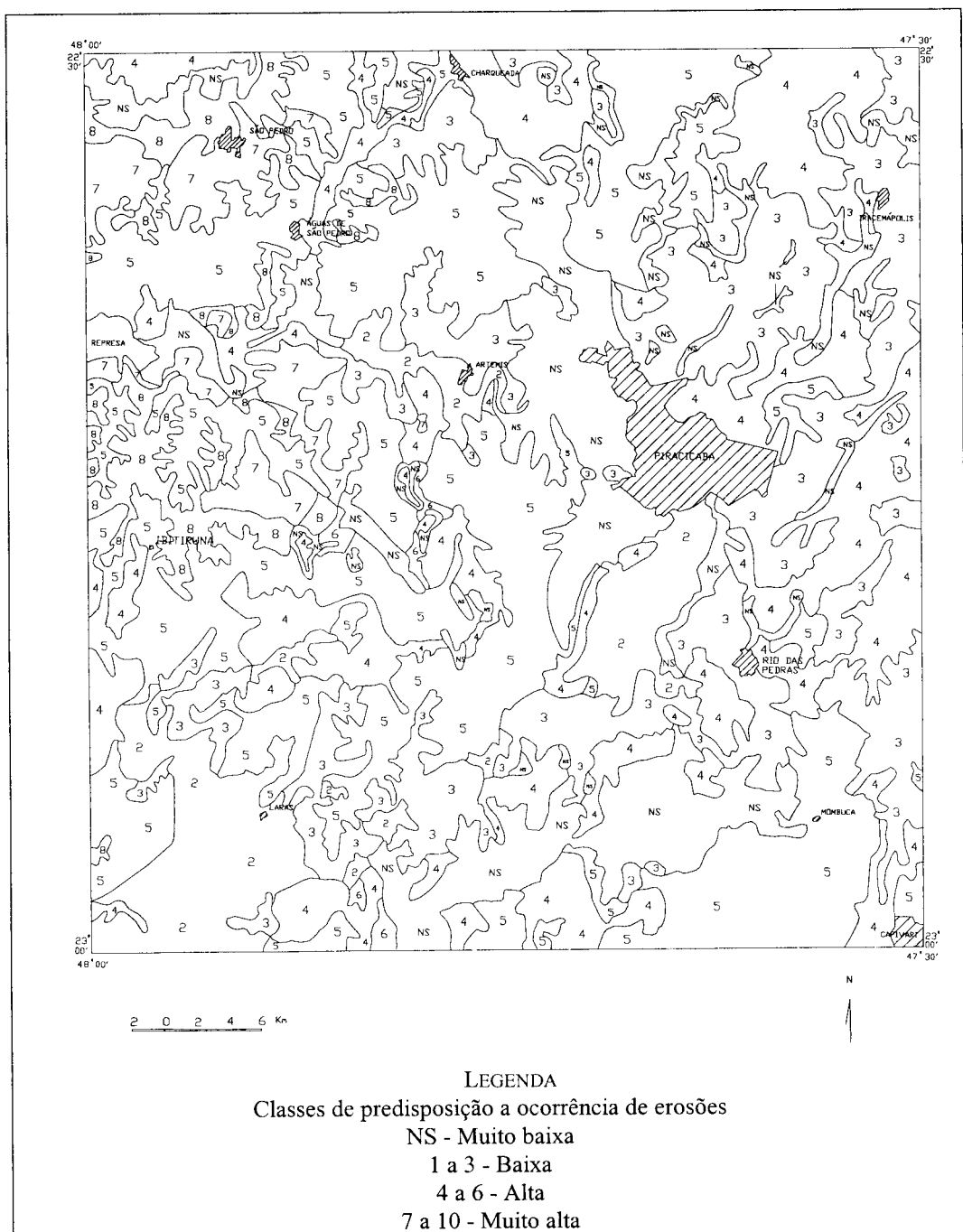


Fig. 5 - Carta de predisposição à ocorrência de erosões aceleradas lineares (Folha de Piracicaba
(Escala original 1:100 000)

Quadro 5 - Pontuação dos atributos do meio físico utilizados na elaboração da carta de potencial ao escoamento superficial.

escoamento superficial aumenta											
CLASSES DE ESCOAMENTO		10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
TOTAL DE PONTOS DAS CLASSES		272-250	249-230	229-210	209-190	189-170	169-150	149-130	129-110	109-90	89-70
ATRIBUTOS											
CLASSES DE DECLIVIDADE		C 4 (90)	C 3 (75)	C 2 (66)	C 1 (60)	B 2 (45)	B 1 (36)	A 2 (24)	A 1 (15)		
LITOLOGIA		Argilitos/Siltitos/ Folhelhos Formacoes Irati e Corumbatai (40)		Argilitos/Siltitos Formação Itararé Magmatitos Básicos Formação Serra Geral (30)		Arenitos/Siltitos arenosos/Diamectitos Formações Itararé e Tatui (20)		Arenitos Formações Itaqueri e Itararé (16)		Arenitos Formações Pirambóia e Botucatu (10)	
M A T . I N C	TEXTURA	Siltito-argiloso		Argilo-siltoso		Argiloso poroso		Arenoso (< 30 % finos) Res. e Retrab.		Arenoso (< 20 % finos) Res. e Retrab.	
	GÊNESE	Residual (40)		Residual (30)		Retrabalhado (20)		(14)		(10)	
	ESPES- SURA (m)	Menor que 0,50 (30)		0,50 a 3,0 (20)		3,0 a 5,0 (16)				Maior que 5,0 (10)	
	PERMEABI- LIDADE (m/s)	Menor que 10 ⁻⁷ (12)		10 ⁻⁷ (8)		10 ⁻⁶ (7)		10 ⁻⁵ (6)		Maior que 10 ⁻⁴ (5)	
DENSIDADE DE DRENAGEM (canais/Km)		Mais que 5 (30)				5 a 2 (20)				Menos que 2 (10)	
FEIÇÕES FAVO- RÁVEIS AO AR- MAZENAMENTO SUPERFICIAL		Não Apresenta (30)				Lagoas, pequenas depressões (peque- na quantidade) (20)				Lagoas, pequenas depressões (grande quantidade) (10)	

(20) - número de pontos das classes de cada atributo.
 Mat. Inc. - Materiais Inconsolidados

Para a atribuição dos pontos a cada atributo do Quadro 5 deve-se obedecer à seguinte sequência:

- a - Analisar a variação de cada atributo na área estudada.
- b - Para cada atributo, de acordo com sua variação, estabelecer classes que tenham comportamento semelhante, quanto ao escoamento superficial.
- c - Considerando ainda cada atributo isoladamente, dispor as classes em ordem crescente quanto ao seu potencial de escoamento superficial.
- d - Analisar o conjunto obtido pela associação das classes de menor potencial ao escoamento de cada atributo. Em seguida atribuir uma pontuação a cada uma dessas classes, tanto maior, quanto maior a importância de cada atributo, em relação aos demais, nesta situação de mínimo potencial ao escoamento superficial da região.
- e - Verificar qual o atributo que apresenta o maior número de classes de escoamento definidas no item b e a partir da pontuação mínima, definida no item d, estabelecer o número de pontos das demais classes deste atributo. Deve-se conceder maior número de pontos de acordo com o aumento da influência no processo de escoamento com a

variação do atributo considerado. Por exemplo, as classes de declividade elevada devem receber pontuação maior do que as de baixa declividade.

f - Analisar o conjunto que define a condição de maior potencial ao escoamento superficial na região, representado pela associação de todas as classes de maior potencial estabelecidas no item c, para cada atributo. A partir do número de pontos da classe de maior potencial ao escoamento superficial do atributo analisado no item e, atribuir os pontos às classes dos demais atributos, de maneira a refletir a importância de cada um, nesta situação de alto potencial ao escoamento superficial.

g - Estabelecida a pontuação máxima e mínima para cada atributo, proceder à atribuição de pontos para as classes intermediárias, considerando novamente a influência que a variação do atributo ocasiona no processo de escoamento superficial.

4.2.2 - Determinação do índice de erodibilidade

A determinação está baseada em dois ensaios simples: absorção de água e perda por imersão. As amostras indeformadas devem ser coletadas em anéis de PVC de 40 mm de diâmetro e 20 mm de altura. Antes da execução dos ensaios, as amostras, ainda nos anéis, devem ser secadas ao ar e à sombra durante uma semana. A seguir descrevem-se os ensaios de acordo com Nogami e Villibor (1979):

a) Ensaio de absorção de água (S)

O procedimento utilizado é semelhante ao de Peltier, 1954 (apud Nogami e Villibor, 1979), sendo que a base da amostra com o anel deve estar apoiada sobre uma placa porosa saturada, na posição horizontal e interligada a um tubo plástico, graduado e cheio de água. Após a colocação da amostra deve-se medir o volume de água absorvido pela amostra, sem gradiente hidráulico, por períodos de tempo. Os valores de volumes de água absorvida e os tempos devem ser plotados em um sistema cartesiano onde na abcissa devem ser colocadas as raízes quadradas do tempo (minutos) e nas ordenadas a razão de absorção (q), ou seja, centímetros cúbicos de água por centímetro quadrado da área da amostra. Em seguida, deve-se obter uma regressão linear calculando $S = q/t^{1/2}$, que consiste em um índice de absorção de água. A Fig. 6 mostra um exemplo de como são realizados os gráficos para obtenção deste índice.

b) Perda por imersão (P)

Após o ensaio de absorção de água, a amostra, ainda no anel, deverá ser retirada cuidadosamente de maneira a não destruir nenhuma parcela, e, em seguida, ser colocada imersa em água mantendo a maior dimensão na posição vertical e com a parte inferior a 30 mm da base da vasilha e no interior de uma cápsula. Após 24 horas deve ser coletado o material que se destacou da superfície livre da amostra, secá-lo e pesá-lo, a fim de se obter a perda de peso (porcentagem).

c) Cálculo do índice de erodibilidade (E)

O índice deve ser calculado de acordo com o proposto por com Nogami e Villibor (1979) com base na seguinte expressão:

$$E = 52 S/P$$

Se o valor de E for maior que 1 o material apresenta baixo índice de erodibilidade.

A observação de condições erosivas permitiram selecionar no campo 56 locais com problemas, de onde foram obtidas amostras. Observando-se os dados da Fig. 7 conclui-se que os limites propostos por Nogami e Villibor (1979) não são adequados para caracterizar os materiais da área estudada. Mesmo desconsiderando 13 amostras que poderiam falsear os resultados, por apresentarem elevado teor de matéria orgânica, ou por características genéticas, a expressão inicial não representa, para a área, um bom indicador de erodibilidade. Verifica-se em análise mais detalhada sobre os dados da Fig. 7, que uma reta com inclinação um pouco menor permite separar 82% dos materiais com alta erodibilidade, sendo a equação reescrita da seguinte forma:

$$E=40S/P$$

Na Fig. 8 observam-se os resultados de perdas por imersão e absorção de água para 209 amostras, sendo possível separar os materiais com diferentes comportamentos em termos de erodibilidade.

4.2.3 - Elaboração da carta de predisposição à erosão acelerada

Para a elaboração deste documento cartográfico (Fig. 4) adotou-se uma sistemática semelhante à utilizada para a carta de potencial ao escoamento superficial, ou seja, os diversos fatores intervenientes no processo erosivo acelerado foram hierarquizados e receberam uma pontuação, como mostrado no Quadro 6. Em primeiro lugar foram estabelecidas as situações do meio físico que determinam as zonas não susceptíveis à instalação de feições erosivas lineares profundas (boçorocas). Desta forma, todas as zonas com espessura do material inconsolidado inferior a 0,5 metros ou com rocha aflorante foram consideradas como não susceptíveis. Elaborou-se então o Quadro 6, seguindo-se procedimento semelhante ao utilizado para a montagem do Quadro 5.

5 - AVALIAÇÃO DA CARTA DE PREDISPOSIÇÃO À EROSÃO NA PORÇÃO NOROESTE DA REGIÃO.

As análises e interpretações das fotografias aéreas na escala 1:60.000 e os trabalhos de campo realizados permitiram indicar no mapa da Fig. 9 os pontos onde foram encontrados feições erosivas. Observando-se esta figura, verifica-se que nas zonas classificadas como de predisposição a erosão muito baixa a baixa (potencial de 1 a 3), não se encontram problemas significativos de erosão concentrada. Mesmo em situações bastante desfavoráveis, do ponto de vista da ausência de vegetação e atividades antrópicas, as erosões são de pequeno porte.

Nas classes consideradas com média predisposição à erosão (4 a 6), observam-se alguns pontos de ocorrência de feições, mas ainda de pequeno porte e em frequência relativamente pequena. Estas áreas apresentam uma suscetibilidade maior e o uso inadequado pode conduzir ao estabelecimento de erosões de grandes dimensões e com alta frequência em área.

Os maiores problemas erosivos estão concentrados nas zonas classificadas como tendo alta predisposição à ocorrência de erosões (classes 7 e 8). Nestas classes foram identificadas cerca de 60 feições erosivas, sendo que algumas são feições de grande dimensão e de difícil controle e/ou manejo. A Foto 1 mostra uma destas áreas, localizada próximo da cidade de São Pedro, onde uma feição de grande porte progride em direção a um dos bairros da cidade.

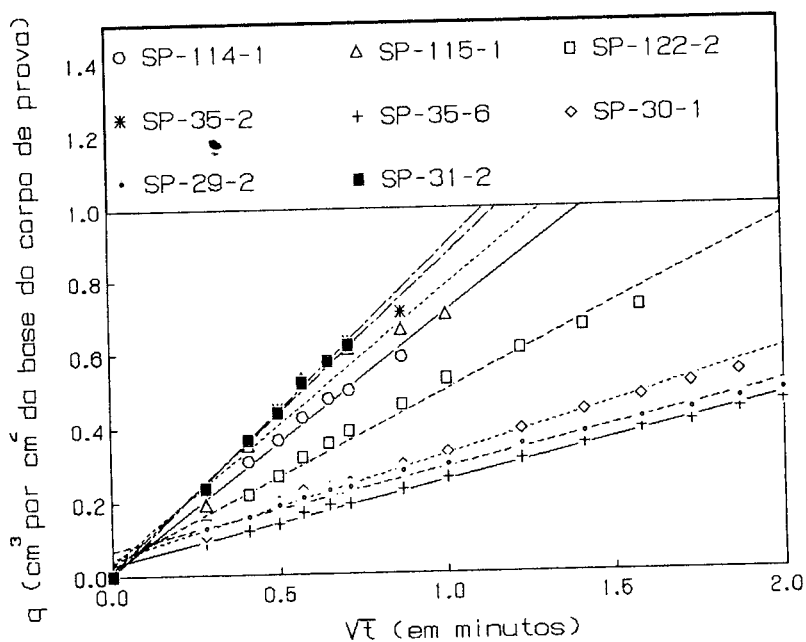
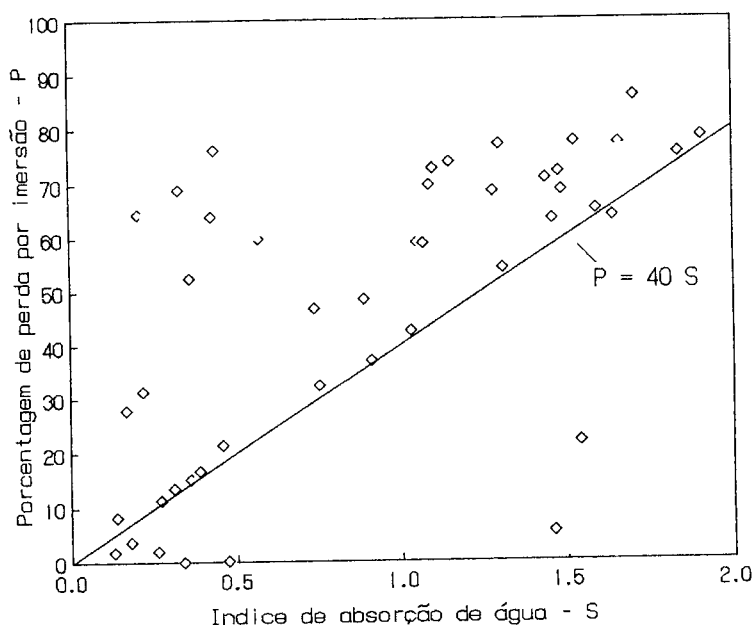
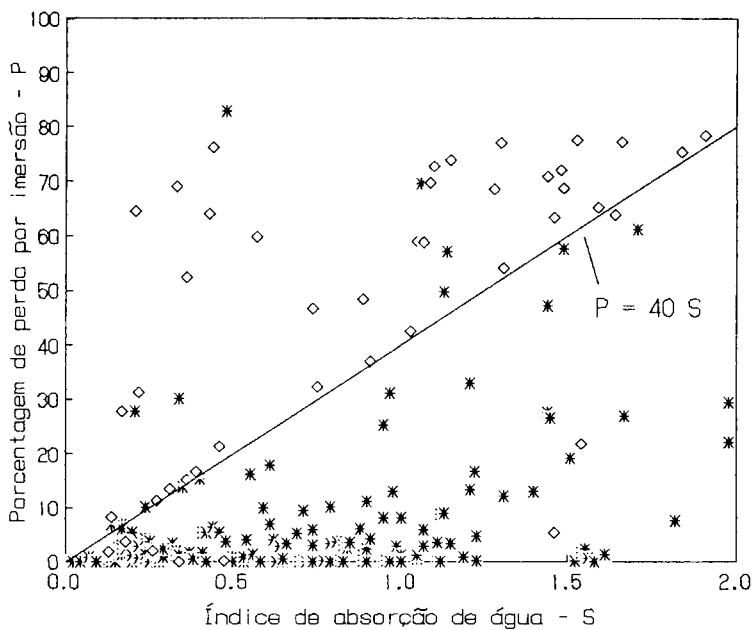


Fig. 6 - Exemplo de gráficos realizados para a obtenção do índice de absorção de água.



◇ materiais inconsolidados com evidência de erosão em campo

Fig. 7 - Índice de absorção de água e perda de peso por imersão para amostras de locais com problemas erosivos.



◇ - materiais inconsolidados com evidência de erosão em campo
 * - materiais inconsolidados sem evidências de erosão em campo

Fig. 8 - Índice de absorção de água e perdas por imersão para 209 amostras.

Quadro 6 - Pontuação dos atributos considerados na elaboração da carta de predisposição a erosão acelerada.

PREDISPOSIÇÃO À EROSÃO AUMENTA

CLASSES DE RISCO POTENCIAL À EROSÃO		10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
TOTAL DE PONTOS DE CADA CLASSE		120-111	110-101	100-91	90-81	80-71	70-61	60-51	50-41	40-31	30-20
POTENCIAL DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL		10 (40)	9 (35)	8 (30)	7 (25)	6 (20)	5 (15)	4 (13)	3 (10)	2 (8)	1 (5)
ÍNDICE DE ERODIBILIDADE		ALTA ERODIBILIDADE (20)						BAIXA ERODIBILIDADE (5)			
MAT. INC.	TEXTURA	ARENOSA (< 20% DE FINOS)		ARENOSA (< 20% DE FINOS)		SILTO-ARGILOSA		ARGILO-SILTOSA			
	PROFUNDIDADE	> 5 (30)		5 A 3 (20)		3 A 0,5 (10)		< 0,5 (5)			

MAT. INC. - Materiais inconsolidados.

(20) - pesos atribuídos aos atributos.

A alta suscetibilidade desta área, indicada pela carta de predisposição à ocorrência de erosões, ficou ainda mais evidente, quando, a partir do ano de 1992, iniciou-se uma tentativa de recuperação da área afetada pela erosão, como mostrado pelas Fotos 2 e 3. Este processo de recuperação mostrou-se ineficaz desde o princípio, como mostra o rompimento das curvas de nível logo após o início dos trabalhos, ou seja 6 meses (Foto 4). Atualmente o processo erosivo foi retomado em quase toda a área, como mostram as Fotos 5 e 6, com o conseqüente aumento da quantidade de sedimento transportado para o canal de drenagem. Este aporte de sedimentos provocou intenso assoreamento a montante do aterro, o que resultou no entupimento dos dutos de drenagem que passavam por baixo na rodovia. Em decorrência deste entupimento, na temporada das chuvas houve um acúmulo de águas, provocando o rompimento do aterro que sustentava a estrada (Fotos 7, 8 e 9), atingindo diversos empreendimentos a jusante.

Este exemplo mostra com clareza a importância da realização das cartas de predisposição à erosão, de maneira a indicar as áreas sujeitas à erosão e a necessária conscientização dos usuários para a utilização destas informações no sentido de evitar que acidentes como esse ocorram e altos custos sejam necessários para restituir o funcionamento sócio econômico da região.

6 - CONCLUSÕES

A sistemática de elaboração das cartas de predisposição à erosão acelerada, proposta neste trabalho, produziu bons resultados. O estabelecimento de uma carta com dez classes de predisposição à erosão, baseada na pontuação dos atributos, permitiu uma classificação relativa entre as diversas zonas, uma vez que todas foram analisadas frente aos mesmos atributos e com pesos idênticos. Assim, o resultado obtido é melhor do que com o estabelecimento de quatro ou cinco classes subjetivamente, como normalmente têm sido elaboradas estas cartas.



Foto 1 - Feição de grandes dimensões - próxima à cidade de São Pedro.

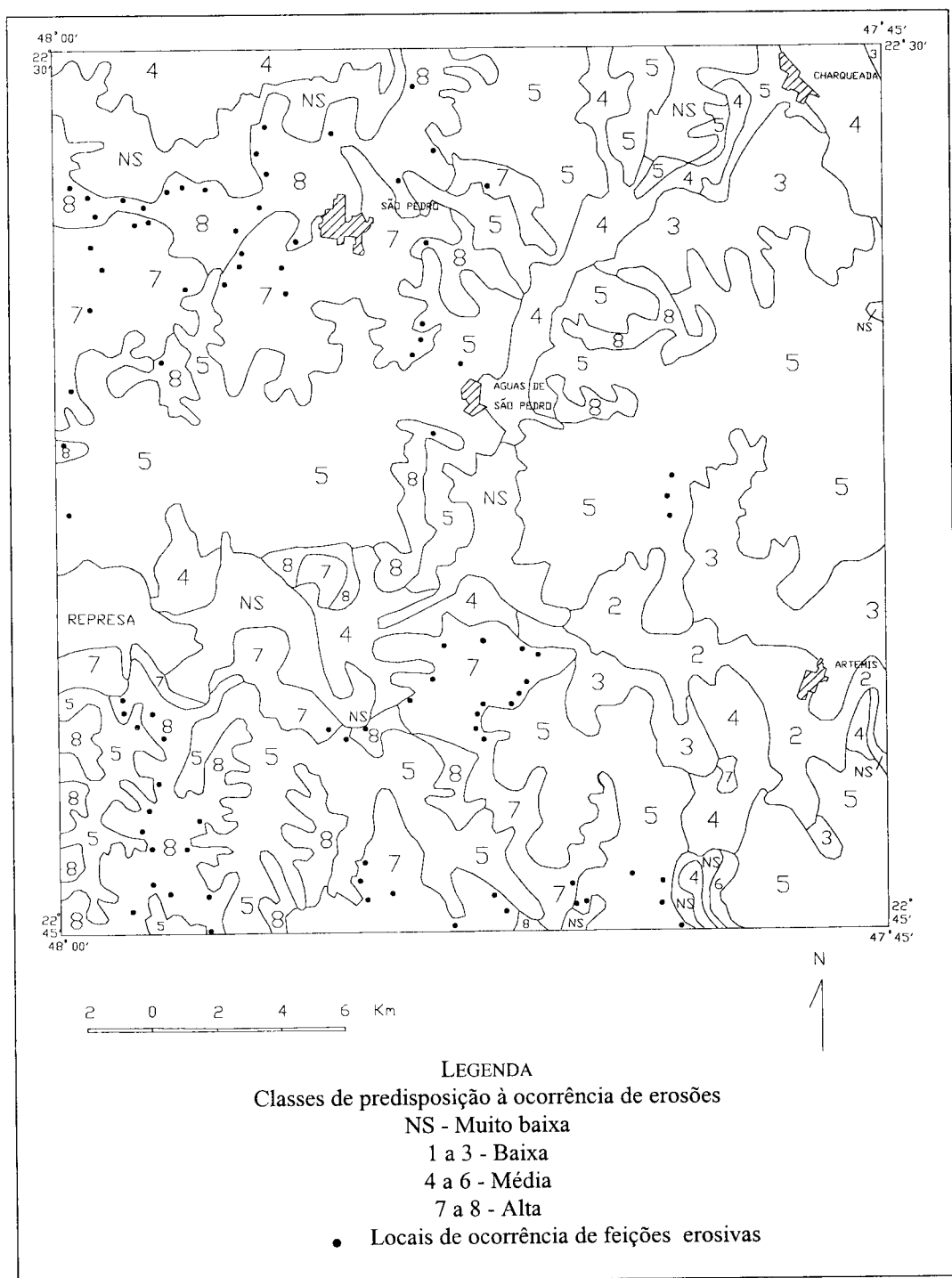


Fig. 9 - Carta de predisposição à ocorrência de erosões concentradas lineares - Folha de São Pedro (Escala original 1:50 000).



Foto 2 - Processo de recuperação da área da feição mostrada na Foto 1, iniciado em Dezembro de 1991.



Foto 3 - Aspecto de uma parte da área recuperada. Notar as curvas de nível baixas e sem nenhuma proteção vegetal.



Foto 4 - Curva de nível com rompimento parcial nas primeiras chuvas mais intensas do verão de 1992.



Foto 5 - Aspecto da região em Agosto de 1995 após ter passado por um período de chuvas intensas. Observar que o processo erosivo foi totalmente retomado.



Foto 6 - Área totalmente degradada, com o transporte de sedimentos para o canal de drenagem (região com mata). Notar, na Foto 7, a posição do aterro da estrada que foi rompido devido ao assoreamento da drenagem.



Foto 7 - Vista do aterro rompido devido ao acúmulo de água decorrente do assoreamento do canal de drenagem.



Foto 8 - Degradação da área e da vegetação devido ao acúmulo de água, que atingiu alturas superiores a 3 m.



Foto 9 - Vista da estrada totalmente destruída, devido ao rompimento do aterro.

A metodologia de análise empregada permite que se acrescentem outros atributos relacionados aos fenômenos erosivos, tais como a cobertura vegetal e os fatores antrópicos em termos temporais. A consideração conjunta destes fatores pode permitir o estabelecimento das

zonas críticas frente aos tipos de ocupação, propiciando condições para se prever e planejar os cuidados mitigadores adequados.

As observações obtidas via inventário das feições e análises de campo mostram a concordância entre as previsões de comportamento das áreas quanto às erosões e às situações realmente observadas e em desenvolvimento. Desta maneira, fica comprovada a validade da metodologia proposta para a elaboração deste tipo de carta. Ressalta-se que este tipo de carta deve ser consultada quando da implantação de processos corretivos e de recuperação para considerar a zona de influência que deve ser respeitada em termos de suas limitações na escolha do método e da sua implementação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CHOW, V. T. (ed.) *Handbook of applied hydrology*. McGraw-Hill, New York. 1964.
- DAEE-IPT - DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA E 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*. Governo do Estado de São Paulo. Secretaria de Energia e Saneamento - DAEE. 91 p, 1990.
- DAEE - DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. *Estudo de Águas Subterrâneas - Região Administrativa 5-Campinas*, 2 v., 607 p., 1981.
- DERBYSHIRE, E; GREGORY, K. J. and HAILS, J. R. *Geomorphological Process*. Butterworths, London, 1979.
- HOGG, S. E. *Sheetflow*. Earth Sci. Rev., v. 18, p.59-76, 1982.
- HORTON, R. E. *The role of infiltration in the hydrologic cycle*. EOS, Am. Geophys. Union Trans., v.14, p. 446-460, 1933.
- IPT- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. *Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo - escala 1:1.000.000*. Série Monografias (5), 2 volumes, 1981.
- NOGAMI, J. S. e VILLIBOR, D. F. *Soil characterization of mapping units for highway purposes in a tropical area*. Bulletin of the International Association of Engineering Geology. 19. pp. 196-199, 1979.
- OLIVEIRA, A. M. S.; PONÇANO, W. L.; SALOMÃO, F. X. T.; DONZELI, P. L.; ROCHA, G. A. e VALÉRIO FILHO, M. - *Questões metodológicas em diagnósticos regionais de erosão: a experiência pioneira da Bacia do Peixe Paranapanema - SP*. Anais do 4º. Simpósio Nacional de Controle de Erosão. Marília - SP. pp. 51-71, 1987.
- OLIVEIRA, J. B.; PRADO, H.; BEJAR, O. I. G.; OLIVEIRA, E. R.; LONGOBARDI, R. C. e ASSIS, E. A. *Carta pedológica semi-detalhada do Estado de São Paulo - folha - SF-23-Y-A-IV - Piracicaba*. Secretaria de Agricultura e Abastecimento - Instituto Agrônômico, 1989.
- PEJON, O. J. e ZUQUETTE, L. V. *Importância do Estabelecimento de Cartas de Potencial ao Escoamento Superficial para Definição do Potencial de Risco à Erosão Acelerada*. 37º Congresso Brasileiro de Geologia. São Paulo-SP, Vol. I, pp. 105-106, 1992.
- PEJON, O. J. *Mapeamento Geotécnico da Folha de Piracicaba-SP (escala 1:100.000): Estudo de aspectos metodológicos de caracterização e de apresentação dos atributos*. Tese de Doutorado EESC-USP. São Carlos. 234 p., 2 vol, 1992.
- PEJON, O. J. e ZUQUETTE, L. V. *Carta do Potencial de Risco à Erosão Acelerada por escoamento concentrado da Folha de Piracicaba-SP*. 7º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia. Poços de Caldas-MG, V. 2, pp. 245-254, 1993.

- STEIN, D. P.; DONZELI, P. L.; GIMENEZ, A. F.; PONÇANO, W. L. e LOMBARDI NETO, F. *Potencial de erosão laminar, natural e antrópico, na Bacia do Peixe Paranapanema*. Anais do 4o. Simpósio Nacional de Controle de Erosão. Marília - SP. pp. 105-135, 1987.
- ZUQUETTE, L. V.; SINELLI, O. e PEJON, O. J. *Carta das Taxas de Escoamento Superficial e de Infiltração da Região de Ribeirão Preto-SP*. Anais do V Simpósio Luso-Brasileiro de Hidráulica e Recursos Hídricos e IX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Rio de Janeiro, vol. I, pp. 277-283, 1991.