

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
ENGENHARIA AMBIENTAL

ESTUDO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO PARA AVALIAÇÃO DA
DEGRADAÇÃO DA DINÂMICA DE ÁGUAS NA BACIA DO
RIBEIRÃO DO PINHEIRINHO, SÃO PAULO, BRASIL.

Aluno: Diego Ruiz Soares

Orientador: Prof. Dr. Lázaro Valentin Zuquette

Monografia apresentada ao curso de
graduação em Engenharia Ambiental
da Escola de Engenharia de São
Carlos da Universidade de São Paulo.

SÃO CARLOS, SP

2015

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTA TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

S676e Soares, Diego Ruiz
Estudo geológico-geotécnico para avaliação da
degradação da dinâmica de águas na bacia do Ribeirão do
Pinheirinho, São Paulo, Brasil. / Diego Ruiz Soares;
orientador Lázaro Valentin Zuquette. São Carlos, 2015.

Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, 2015.

1. Degradação ambiental. 2. Compactação. 3.
Escoamento superficial. 4. Infiltração. 5. Bacia do
Ribeirão do Pinheirinho. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): **Diego Ruiz Soares**

Data da Defesa: 18/10/2015

Comissão Julgadora:

Lazaro Valentim Zuquette (Orientador(a))

Cláudia Marisse dos Santos Rotta

Reinaldo Lorandi

Resultado:

Aprovado
Aprovado

Aprovado



Prof. Dr. Marcelo Zaiat

Coordenador da Disciplina 1800091- Trabalho de Graduação

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, em especial aos meus pais (Luiz Felipe e Silvana), que sempre me apoiaram e animaram para seguir em frente nesta jornada.

Ao Professor Lázaro, pela orientação e ensinamentos.

A todos do Departamento de Geotecnia, pela ajuda, esclarecimentos e descontração em diversos momentos. Em especial à Cláudia, pela amizade nestes 3 anos, disposição e paciência para ajudar nas diversas dúvidas ao longo da pesquisa.

Aos amigos e colegas da graduação, pelo companheirismo e auxílio em diversos momentos do trabalho.

Ao CNPq, pela bolsa concedida.

Enfim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para conclusão desta etapa.

RESUMO

SOARES, D. R. (2015). **Estudo geológico-geotécnico para avaliação da degradação da dinâmica de águas na Bacia do Ribeirão do Pinheirinho, São Paulo, Brasil.** 106p. Monografia – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2015.

Este trabalho consiste no estudo das alterações na dinâmica de águas, sobretudo na razão infiltração/escoamento superficial na Bacia do Ribeirão do Pinheirinho, São Paulo, Brasil, onde a ocupação agrícola está associada a diferentes processos de degradação. Utilizou-se mapa topográfico (1:10.000), fotos aéreas, imagens de satélite e software ArcGIS. Foi realizada uma análise da base de dados, além de trabalhos de campo e de laboratório, com o objetivo de caracterizar os materiais geológicos e detalhar os processos de degradação ambiental. Verificou-se a ocorrência de processos erosivos, em diferentes estágios evolutivos, sobretudo nas cabeceiras de drenagem, compactação do solo, aterramento de cabeceiras e rebaixamento do nível d'água em todo o sistema de drenagem, levando à alteração da dinâmica da água e aceleração da erosão. De modo geral, as características geológicas-geotécnicas da região associadas ao tipo de uso e manejo, condicionam os processos de degradação.

Palavras-chave: Degradação ambiental, Compactação, Escoamento superficial, Infiltração, Bacia do Ribeirão do Pinheirinho.

ABSTRACT

SOARES, D. R. (2015). **Geological and geotechnical study for assessment of water dynamics degradation in the Ribeirão do Pinheirinho Basin, São Paulo, Brazil.** 106p. Monografia – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2015.

This work is the study of changes in the water dynamics, especially in the infiltration / runoff ratio at the Ribeirão do Pinheirinho Basin, Sao Paulo, Brazil, where the agricultural occupation is associated with different degradation processes. Were used topographic map (1: 10,000), aerial photos, satellite images and ArcGIS software during the study. We conducted an analysis of the database, as well field works and laboratory, with the purpose of characterize geological materials and detailing the environmental degradation processes. It was observed the occurrence of erosion at different evolutionary stages, especially upstream of the first order drainage channels, soil compaction, earth-filling drainage headwaters and lowering of the water level around the drainage system, leading to change the water dynamics and accelerated erosion process. Altogether, the geological-geotechnical characteristics associated with the land uses, caused the degradation processes.

Key-words: Environmental degradation, Compaction, Surface runoff, Infiltration, Ribeirão do Pinheirinho Basin.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ciclo hidrológico (modificado de http://ga.water.usgs.gov/edu/watercycle.html).....	24
Figura 2 - Componentes básicos do balanço hidrológico na superfície (CARSON; KIRKBY, 1975).....	25
Figura 3 - Classificação dos elementos de encosta e os processos operantes (TROEH, 1965).	33
Figura 4 - Tipos geométricos de encostas. (RUHE, 1975).....	34
Figura 5 – Curva de Hjulstrom, 1935 (modificado de GUERRA, 1998).	36
Figura 6 - Fluxograma básico das principais etapas do trabalho.....	39
Figura 7 - Identificação de diferentes materiais inconsolidados em talude.	40
Figura 8 - Diferentes materiais inconsolidados observados ao longo da encosta.	40
Figura 9 - Extração de amostras em trincheira.	41
Figura 10 - Ensaio de infiltração com infiltrômetro de duplo anel.....	41
Figura 11 – Esquema simplificado do processo de infiltração de água durante o ensaio.	42
Figura 12 - Ensaio de resistência mecânica à penetração 43	43
Figura 13 - Esquema simplificado do penetrômetro dinâmico utilizado.	43
Figura 14 - Etapa de sedimentação da análise granulométrica conjunta.	44
Figura 15 - Ensaio de massa específica dos sólidos.	44
Figura 16 - Ensaio de condutividade hidráulica saturada em laboratório.....	45
Figura 17 - Esquema simplificado do ensaio de absorção de água (modificado de Pejon 1992).	46
Figura 18 - Equipamento utilizado no ensaio de absorção de água.....	46
Figura 19 – Equipamento utilizado no ensaio de perda de massa por imersão.	47
Figura 20 - Localização da Bacia do Ribeirão do Pinheirinho.....	49
Figura 21 - Perfis estratigráficos de materiais inconsolidados.	50
Figura 22 - Perfis estratigráficos de materiais inconsolidados.	51
Figura 23 - Perfis estratigráficos de materiais inconsolidados.	52
Figura 24 - Distribuição dos valores de erodibilidade das amostras para o ponto PEN 4.	56
Figura 25 - Curva de infiltração para o ponto PEN 4.	56

Figura 26 - Resistência mecânica à penetração para o ponto PEN 2.....	57
Figura 27 - Resistência mecânica à penetração para o ponto PEN 3.....	57
Figura 28 - Resistência mecânica à penetração para o ponto PEN 4, antes e após ensaio de infiltração.	57
Figura 29 - Resistência mecânica à penetração para o ponto PEN 15.....	58
Figura 30 - Resistência mecânica à penetração para o ponto PEN 16.....	58
Figura 31 - Distribuição dos valores de erodibilidade das amostras para o ponto DC 14.	62
Figura 32 - Distribuição dos valores de erodibilidade das amostras para o ponto DC 15.	62
Figura 33 - Distribuição dos valores de erodibilidade das amostras para o ponto DC 17.	63
Figura 34 - Distribuição dos valores de erodibilidade das amostras para o ponto DC 19.	64
Figura 35 - Distribuição dos valores de erodibilidade das amostras para o ponto DC 20 / PEN 9A	65
Figura 36 – Distribuição dos valores de erodibilidade das amostras para o ponto PEN 21	66
Figura 37 - Curva de infiltração para o ponto DC 20 / PEN 9.	67
Figura 38 - Curva de infiltração para o ponto DC 20 / PEN 9.	67
Figura 39 - Resistência mecânica à penetração para o ponto PEN 5.....	68
Figura 40 - Resistência mecânica à penetração para o ponto PEN 5.....	68
Figura 41 - Resistência mecânica à penetração para o ponto DC 20 / PEN 9, antes e após ensaio de infiltração.	68
Figura 42 - Resistência mecânica à penetração para o ponto PEN 21, antes e após ensaio de infiltração.	69
Figura 43 - Distribuição dos valores de erodibilidade das amostras para o ponto PEN 10.	71
Figura 44 - Curva de infiltração para o ponto PEN 10.	72
Figura 45 - Resistência mecânica à penetração para o ponto PEN 6.....	73
Figura 46 - Resistência mecânica à penetração para o ponto PEN 10, antes e após ensaio de infiltração.	73
Figura 47 – Distribuição dos valores de erodibilidade das amostras para o ponto P37..	76
Figura 48 - Distribuição dos valores de erodibilidade das amostras para o ponto P38. .	77

Figura 49 - Distribuição dos valores de erodibilidade das amostras para o ponto P39. .	77
Figura 50 - Distribuição dos valores de erodibilidade das amostras para o ponto DC13.	78
Figura 51 - Distribuição dos valores de erodibilidade das amostras para o ponto DC16.	79
Figura 52 - Distribuição dos valores de erodibilidade das amostras para o ponto DC18.	80
Figura 53 - Distribuição dos valores de erodibilidade das amostras para o ponto PEN11.	80
Figura 54 - Distribuição dos valores de erodibilidade das amostras para o ponto PEN13.	81
Figura 55 - Curva de infiltração para o ponto DC 7.	82
Figura 56 - Curva de infiltração para o ponto DC 8.	83
Figura 57 – Curva de infiltração para o ponto PEN 11.	83
Figura 58 - Curva de infiltração para o ponto PEN 13.	84
Figura 59 - Resistência mecânica à penetração para o ponto PEN 11, antes e após ensaio de infiltração.	84
Figura 60 - Resistência mecânica à penetração para o ponto PEN 13, antes e após ensaio de infiltração.	85
Figura 61 - Resistência mecânica à penetração para o ponto PEN 14.	85
Figura 62 - Resistência mecânica à penetração para o ponto PEN 20.	85
Figura 63 - Resistência mecânica à penetração para o ponto PEN 5.	86
Figura 64 - Resistência mecânica à penetração para o ponto PEN 5.	87
Figura 65 - Distribuição dos valores de erodibilidade das amostras para o ponto PEN18.	89
Figura 66 - Curva de infiltração para o ponto PEN 18.	89
Figura 67 - Resistência mecânica à penetração para o ponto PEN 18, antes e após ensaio de infiltração.	90
Figura 68 - Resistência mecânica à penetração para o ponto PEN 19.	90
Figura 69 - Distribuição dos valores de erodibilidade das amostras para o ponto DC21 / PEN23.	92
Figura 70 - Curva de infiltração para o ponto DC21 / PEN23.	93
Figura 71 - Resistência mecânica à penetração para o ponto PEN 1.	94

Figura 72 - Resistência mecânica à penetração para o ponto DC 21 / PEN 23, antes e após ensaio de infiltração.	94
Figura 73 - Resistência mecânica à penetração para o ponto PEN 17.....	95
Figura 74 - Perfis estratigráficos de materiais inconsolidados com alteração em suas distribuições.....	96
Figura 75 - Terraços e cordões de nível.	97
Figura 76 - Exemplos de feições erosivas encontradas na área em estudo (Tabela 27): A- Voçoroca ativa; B e C - Diversos sulcos de encosta; D- Ravina contínua ao canal drenagem, sendo: L: largura, C: comprimento e A: altura.....	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Denominação e detalhamento dos trabalhos realizados nos locais selecionados.....	52
Tabela 2 - Caracterização geral dos materiais inconsolidados referentes a Unidade 1. .	54
Tabela 3 - Índices de absorção, perda de massa por imersão e de erodibilidade para o ponto PEN 4.	55
Tabela 4 - Caracterização geral dos materiais inconsolidados referentes à Unidade 2. .	60
Tabela 5 - Índices de absorção, perda de massa por imersão e de erodibilidade para o ponto DC 14.	61
Tabela 6 - Índices de absorção, perda de massa por imersão e de erodibilidade para o ponto DC 15.	62
Tabela 7 - Índices de absorção, perda de massa por imersão e de erodibilidade para o ponto DC 17.	63
Tabela 8 - Índices de absorção, perda de massa por imersão e de erodibilidade para o ponto DC 19.	63
Tabela 9 - Índices de absorção, perda de massa por imersão e de erodibilidade para o ponto DC 20 / PEN 9.	65
Tabela 10 - Índices de absorção, perda de massa por imersão e de erodibilidade para o ponto PEN 21.....	65
Tabela 11 - Caracterização geral dos materiais inconsolidados referentes à Unidade 3.	70
Tabela 12 - Índices de absorção, perda de massa por imersão e de erodibilidade para o ponto PEN 10.....	71
Tabela 13 - Caracterização geral dos materiais inconsolidados referentes à Unidade 4.	74
Tabela 14 - Caracterização geral dos materiais inconsolidados referentes à Unidade 4.	75
Tabela 15 – Índices de absorção, perda de massa por imersão e de erodibilidade para o ponto P37.....	76
Tabela 16 – Índices de absorção, perda de massa por imersão e de erodibilidade para o ponto P38.....	76
Tabela 17 - Índices de absorção, perda de massa por imersão e de erodibilidade para o ponto P39.....	77
Tabela 18 - Índices de absorção, perda de massa por imersão e de erodibilidade para o ponto DC13.	78

Tabela 19 - Índices de absorção, perda de massa por imersão e de erodibilidade para o ponto DC16.	78
Tabela 20 – Índices de absorção, perda de massa por imersão e de erodibilidade para o ponto DC18.	79
Tabela 21 – Índices de absorção, perda de massa por imersão e de erodibilidade para o ponto PEN11.....	80
Tabela 22 - Índices de absorção, perda de massa por imersão e de erodibilidade para o ponto PEN13.....	81
Tabela 23 - Caracterização geral dos materiais inconsolidados referentes à Unidade 7.	88
Tabela 24 - Índices de absorção, perda de massa por imersão e de erodibilidade para o ponto PEN18.....	88
Tabela 25 - Caracterização geral dos materiais inconsolidados referentes à Unidade 8.	91
Tabela 26 - Índices de absorção, perda de massa por imersão e de erodibilidade para o ponto DC21 / PEN 23.	92
Tabela 27 - Caracterização geral dos processos de degradação ambiental, com destaque para os processos erosivos.....	100

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	21
2. OBJETIVOS	22
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
3.1. Degradação Ambiental.....	23
3.2. Ciclo Hidrológico.....	24
3.3. Solos	25
3.4. Compactação dos solos	28
3.5. Erosão.....	29
3.5.1. Fatores controladores dos processos erosivos	30
3.5.2. Tipos de erosão hídrica.....	35
3.6. Estudos associados à modificação das condições de infiltração e escoamento superficial	37
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	39
4.1. Levantamento de dados prévios e materiais disponíveis	39
4.2. Trabalhos de campo	40
4.2.1. Ensaio de infiltração com infiltrômetro duplo anel.....	41
4.2.2. Ensaio de resistência mecânica à penetração.....	42
4.3. Trabalhos de laboratório.....	44
4.3.1. Caracterização geral	44
4.3.2. Condutividade hidráulica saturada	44
4.3.3. Erodibilidade	45
4.4. Lista de materiais	47
5. CARACTERIZAÇÃO BÁSICA DA ÁREA DE ESTUDO	49
6. RESULTADOS	50
6.1. Distribuição dos materiais inconsolidados originais.....	50
6.2. Caracterização dos materiais inconsolidados	52
6.2.1. Unidade 1	54
6.2.1.1. Caracterização geral	54
6.2.1.2. Erodibilidade.....	55
6.2.1.3. Infiltração com infiltrômetro de duplo anel.....	56
6.2.1.4. Resistência mecânica à penetração	57

6.2.2. Unidade 1a	58
6.2.2.1. Resistência mecânica à penetração	58
6.2.3. Unidade 2	59
6.2.3.1. Caracterização geral	59
6.2.3.2. Erodibilidade.....	61
6.2.3.3. Infiltração com infiltrômetro de duplo anel.....	66
6.2.3.4. Resistência mecânica à penetração	68
6.2.4. Unidade 3	70
6.2.4.1. Caracterização geral	70
6.2.4.2. Erodibilidade.....	70
6.2.4.3. Infiltração com infiltrômetro de duplo anel.....	71
6.2.4.4. Resistência mecânica à penetração	72
6.2.5. Unidade 4.....	73
6.2.5.1. Caracterização geral	73
6.2.5.2. Erodibilidade.....	76
6.2.5.3. Infiltração com infiltrômetro de duplo anel.....	82
6.2.5.4. Resistência mecânica à penetração	84
6.2.6. Unidade 5.....	86
6.2.6.1. Resistência mecânica à penetração	86
6.2.7. Unidade 6.....	87
6.2.7.1. Resistência mecânica à penetração	87
6.2.8. Unidade 7.....	87
6.2.8.1. Caracterização geral	87
6.2.8.2. Erodibilidade.....	88
6.2.8.3. Infiltração com infiltrômetro de duplo anel.....	89
6.2.8.4. Resistência mecânica à penetração	90
6.2.9. Unidade 8.....	91
6.2.9.1. Caracterização geral	91
6.2.9.2. Erodibilidade.....	92
6.2.9.3. Infiltração com infiltrômetro de duplo anel.....	93
6.2.9.4. Resistência mecânica à penetração	93
6.2.10.Unidade10.....	95
6.2.10.1. Resistência mecânica à penetração	95
6.3. Distribuição atual dos materiais inconsolidados.....	95

6.4. Alteração da rede de drenagem.....	98
6.5. Processos erosivos.....	98
7. ANÁLISE DOS RESULTADOS	103
8. CONCLUSÕES	105
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	106
APÊNDICES	110

APÊNDICE A – Mapa de substrato rochoso da Bacia do Ribeirão do Pinheirinho.

APÊNDICE B – Mapa de materiais inconsolidados da Bacia do Ribeirão do Pinheirinho.

APÊNDICE C – Seção geológica com a distribuição de algumas unidades de materiais em relação ao relevo.

APÊNDICE D – Locais de amostragem materiais.

APÊNDICE E – Locais de realização dos ensaios de resistência mecânica à penetração e de infiltração com infiltrômetro de duplo anel.

APÊNDICE F – Mapa de materiais inconsolidados com destaque para as unidades com maiores alterações.

APÊNDICE G – Alterações da configuração da rede de drenagem da Bacia do Ribeirão do Pinheirinho.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento das diversas atividades antrópicas envolvendo componentes do meio físico e o processo de ocupação do solo, em conjunto com a falta de planejamento de seu uso e conservação, pode desencadear, na maioria dos casos, processos de degradação ambiental, como erosões, assoreamento de corpos hídricos, inundações, entre outros, comprometendo a qualidade do meio ambiente, especialmente dos recursos hídricos (YANG et al. 2009) e aumentando a vulnerabilidade do ecossistema local.

O desenvolvimento econômico e a expansão das fronteiras agrícolas produziram alterações significativas na superfície e no uso do solo rural em países em desenvolvimento, como o Brasil. A degradação dos solos é um dos principais problemas ambientais em diversas regiões do mundo, em função da redução de áreas férteis pela perda de camada superior do solo, perda de nutrientes, salinização, desertificação, compactação e erosão. O impacto dessas alterações tem sido discutido de maneira mais qualitativa do que quantitativa, uma vez que combinações entre as diferentes condições de clima, cobertura, solo, geologia e outros fatores não permitem uma real estimativa dos impactos sobre o escoamento, produção de sedimentos e qualidade da água (TUCCI; CLARKE, 1997).

Para Bertoni e Lombardi Neto (2005), o problema da conservação da água, decorrente das atividades antrópicas, não pode ser resolvido independentemente da conservação de outros recursos naturais. As alterações provocadas pelos diversos usos modificam a forma como o ciclo hidrológico natural se comporta no meio, em especial na razão infiltração/escoamento superficial. Em decorrência, surgem diversos problemas ambientais em cadeia. Com a alteração da infiltração ocorre a diminuição das recargas e o fluxo nos canais de drenagem permanentes e, por outro lado, há o aumento do escoamento superficial que leva aos processos erosivos, a geração de sedimentos e assoreamentos de canais, lagos e reservatórios de água. Os usos relativos à agricultura são apontados com as principais fontes de degradação da dinâmica das águas, afetando os materiais geológicos em termos da distribuição espacial e propriedades físicas e químicas.

A região da Serra de Itaqueri, centro do estado de São Paulo, apresenta materiais inconsolidados arenosos, originários da Formação Itaqueri (PEJON, 1992), sendo, portanto, bastante porosos e permeáveis, responsáveis pela recarga e abastecimento dos corpos hídricos. Contudo, a utilização agrícola da área, que envolve técnicas que modificam a distribuição espacial e as propriedades destes materiais geológicos levam à intensificação dos processos erosivos e à alterações na dinâmica de infiltração de água no solo, que por sua vez, alteram a disponibilidade hídrica da região e provoca o aparecimento de problemas erosivos.

Nesse sentido, o estudo das alterações da dinâmica de águas permite uma avaliação das intensidades destas alterações que levam a degradação ambiental.

2. OBJETIVOS

O objetivo central deste trabalho é o estudo qualitativo da dinâmica de águas, sobretudo das condições de infiltração e escoamento superficial, na Bacia do Ribeirão do Pinheirinho, centro-oeste do Estado de São Paulo. Para tanto, avaliou-se as características ambientais que controlam o processo de infiltração e as alterações provocadas pelos usos antropogênicos na bacia.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Degradação Ambiental

A degradação ambiental é um dos fatores que mais causa perdas sociais e econômicas para as zonas afetadas, sejam em países desenvolvidos, em desenvolvimento ou subdesenvolvidos. Os conceitos de áreas degradadas são amplos e normalmente refletem considerações específicas. Dentre os clássicos, podem ser destacados os de Blaike e Brookfield (1987), Lindskog e Tengberg (1994) e Johnson e Lewis (1995).

Segundo Blaike e Brookfield (1987), um solo degradado é caracterizado pela redução de suas qualidades e capacidades, sendo as alterações identificadas nos processos geológicos, biológicos e sócio-econômicos e avaliadas por sua magnitude, gravidade e extensão e efeitos. Os fatores que desencadeiam tais condições podem ser a exploração intensa e uso inadequado do solo, processos naturais acelerados, como erosões, movimentação gravitacional de massa, inundações, entre outros.

Para Lindskog e Tengberg (1994), a degradação do solo é uma diminuição dos estados físico, químico e biológico do solo, restringindo sua capacidade produtiva. Johnson e Lewis (1995) consideram a degradação do solo como uma significativa redução de sua produtividade biológica ou de sua utilidade devido à interferência humana.

As fontes de degradação são muito diversas e normalmente ocorrem de maneira combinada e sequencial. As principais fontes de degradação ambiental no Brasil estão associadas, segundo Zuquette et al (2004), as atividades antropogênicas (agropecuária, indústria, urbanização, mineração) e aos processos naturais (geomorfologia, vegetação, dinâmica das águas, tipologia de solos e rochas, entre outros).

Os estudos de áreas com fins de avaliar o grau e aspectos de degradação ambiental são fundamentais no sentido de propiciar um planejamento territorial associado a um nível de sustentabilidade aceitável. Segundo Foley et al (2005) as áreas degradadas tendem a aumentar em função do crescimento e densificação populacional.

Dentre os aspectos do meio ambiente que apresentam maiores níveis de degradação tem-se a dinâmica das águas, na razão infiltração/escoamento superficial. Em decorrência, surgem diversos problemas ambientais em cadeia. Com a alteração da infiltração ocorre a diminuição das recargas e o fluxo nos canais de drenagem permanentes e, por outro lado, há o aumento do escoamento superficial que leva aos processos erosivos, a geração de sedimentos e assoreamentos de canais, lagos e reservatórios de água. Os usos relativos à agricultura tem sido um das maiores fontes de degradação da dinâmica das águas, visto que afetam os materiais geológicos em termos da distribuição espacial e propriedades físicas e químicas, devido a escavações

(movimentos), aterros, compactação, destruição de estruturas, crusting, destruição da matéria orgânica, salinização, launching, erodibilidade, cimentação, entre outras.

3.2. Ciclo Hidrológico

Denomina-se ciclo hidrológico o percurso que a água realiza na natureza, ocorrendo na atmosfera e na superfície e subsuperfície terrestre, nos estados sólido, líquido e gasoso. A água na fase líquida é a mais importante deste ciclo para o homem, uma vez em que ela está disponível para pronta utilização (TUNDISI, 2003). Também é de importância direta nos estudos hidrológicos, que têm a finalidade de monitorar e avaliar a quantidade de água na superfície terrestre (KARMANN, 2000).

A Figura 1 ilustra, esquematicamente, os compartimentos e a movimentação da água durante o ciclo hidrológico.

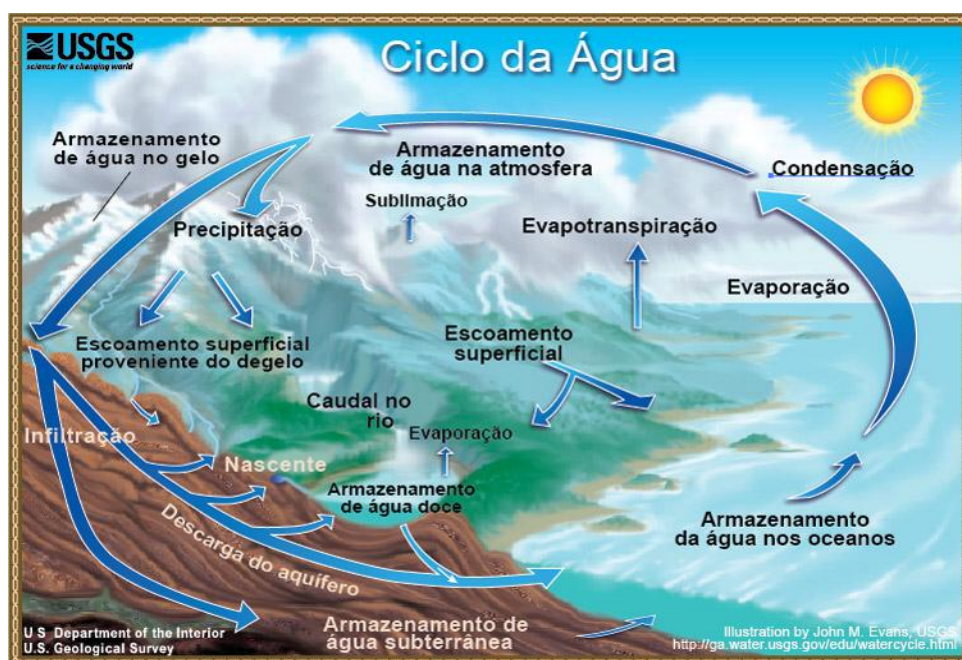


Figura 1 - Ciclo hidrológico (modificado de <http://ga.water.usgs.gov/edu/watercycle.html>).

Uma parcela da água estocada na superfície terrestre sofre evaporação ou evapotranspiração (evaporação pela transpiração das plantas) e atinge a baixa atmosfera. Em função da redução de temperatura em função da altitude e também pela presença de micropartículas em suspensão na atmosfera, que atuam como núcleos de condensação, o vapor d'água é condensado e, quando atinge uma massa crítica e as microgotículas não se mantêm mais em suspensão, ocorre a precipitação (COELHO NETTO, 1998).

A precipitação apresenta-se principalmente na forma de chuva, mas também ocorre como granizo (FAGUNDES, 2010). O evento chuvoso pode ter variações de quantidade (volume de chuva), duração (tempo de chuva) e intensidade (taxa representada em função de uma quantidade por um tempo). Antes de atingir a superfície, uma parcela da precipitação pode ser evaporada diretamente da atmosfera

e/ou interceptada pela vegetação; o restante atinge o solo e diretamente os corpos hídricos.

A interceptação vegetal é o processo de retenção de parte da precipitação pelas copas arbóreas e/ou arbustivas, sendo esse volume perdido para a atmosfera, posteriormente, pela evapotranspiração. Quando a quantidade de água precipitada supera a capacidade de interceptação, a água atinge o solo por meio do escoamento pelos troncos, sendo este processo denominado de superação da capacidade de interceptação. Uma parcela da chuva ainda pode ser armazenada na serrapilheira, composta por detritos orgânicos vegetais (folhas, ramos, flores, galhos, etc) acumulados na superfície do solo.

Do volume total de água que atinge o solo, proveniente, ou da precipitação, ou da superação da capacidade de interceptação, uma parte evapora. O volume que permanece no solo pode infiltrar no material geológico ou formar o escoamento superficial (FAGUNDES, 2010), como observado na Figura 2.

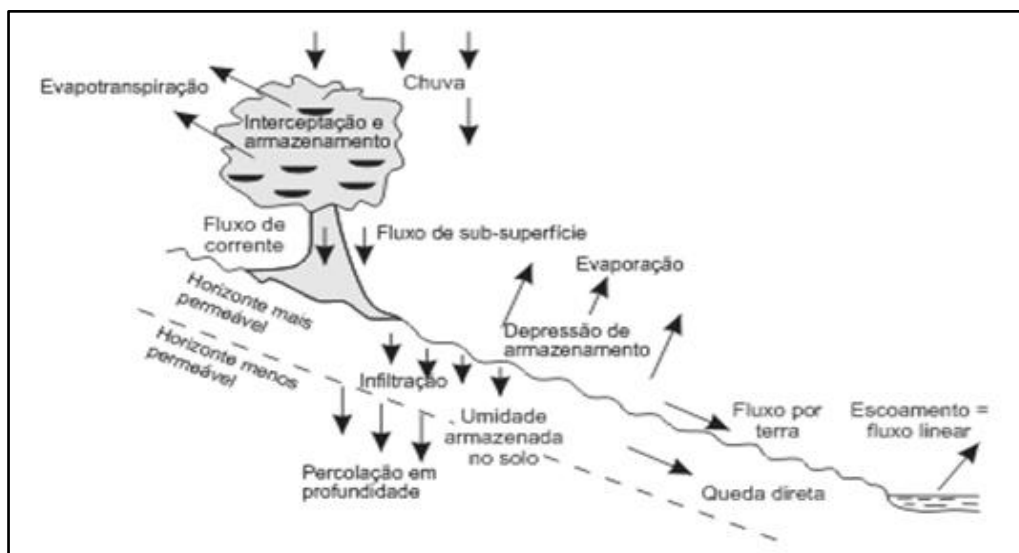


Figura 2 - Componentes básicos do balanço hídrico na superfície (CARSON; KIRKBY, 1975).

3.3. Solos

Moniz (1972) define o solo como a coleção de corpos naturais que ocorrem na superfície terrestre, composto por partículas de rochas em diferentes estágios de desagregação, água e diferentes substâncias químicas em dissolução, ar, organismos vivos e matéria orgânica e diferentes estágios de decomposição.

Segundo Birkeland (1974), o solo é um material natural constituído de camadas e horizontes de compostos minerais e/ou orgânicos, com variadas espessuras, diferindo do material original de formação por propriedades morfológicas, químicas, físicas e biológicas.

Os fatores de formação do solo incluem processos físicos que resultam na desagregação das rochas (intemperismo físico), processos químicos que alteram a composição das rochas e dos minerais que a compõe (intemperismo químico) e processos biológicos, intensificando e condicionando os outros dois fatores (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1990). Os principais fatores de formação são o material original (rocha matriz), o relevo, o clima, as atividades biológicas dos organismos e o tempo.

A natureza da rocha-matriz, sua composição mineralógica e química, e seu estado natural de fraturamento exerce grande influência sobre as características do solo que origina. Assim, muitas propriedades físicas e químicas do solo em formação são determinados por esse conteúdo mineral original.

O clima atua diretamente na formação do solo, por meio das alterações impostas aos minerais do substrato, e indiretamente, pela atividade biológica desenvolvida na superfície terrestre. Representado principalmente pela chuva e variações de temperatura, o clima determina a distribuição dos elementos solúveis, a velocidade das reações químicas e processo de fraturamento do material rochoso, atuando na constituição e natureza dos horizontes do solo.

O relevo, configuração superficial da crosta terrestre, atua principalmente em função de sua influência na dinâmica da água, principalmente em relação ao escoamento superficial, infiltração e percolação, e nos processos de erosão e sedimentação. Terrenos com relevo suave e material permeável (solo ou rocha) facilitam a infiltração da água, possibilitando a atividade desta em maiores profundidades, alterando as rochas e removendo elementos químicos solúveis, contribuindo para o desenvolvimento de solos mais profundos e lixiviados. Por outro lado, em terrenos de relevo deprimido ou com materiais pouco permeáveis, a infiltração é reduzida, proporcionando o encharcamento do solo, criando condições para o processo químico de redução de cátions metálicos, resultando em solo denominados hidromórficos, de cor característica acinzentada/azulada. Terrenos mais íngremes também reduzem a infiltração e contribuem para o escoamento superficial, facilitando os processos erosivos naturais, resultando em solos menos profundos e evoluídos (PALMIERI; LARACH, 1996; OLIVEIRA et al, 1992).

Os organismos presentes tanto na superfície quanto no interior do solo atuam de maneiras diferentes na sua formação, com grande destaque para o papel da vegetação nesse processo. A vegetação pode atuar de maneira passiva, como um atenuante do clima sobre o solo (sombreamento, interceptação da precipitação, manutenção da umidade no solo), e de maneira ativa, como na deposição de resíduos vegetais na superfície do solo (folhas, flores, etc) e em seu interior (raízes), principais fontes de matéria orgânica. A fauna, por sua vez, também possuem grande importância, em particular as minhocas, cupins, formigas e tatus, entre outros, responsáveis pela abertura de buracos, tuneis e galerias, melhorando a aeração dos solos e carregando resíduos vegetais para seu interior. Além destes, os microrganismos tem papel fundamental, atuando na decomposição dos resíduos orgânicos, na fixação do nitrogênio atmosférico,

em diversos processos de oxidação/redução (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1990; OLIVEIRA et al, 1992).

O homem também desempenha papel modificador do solo, através de suas diversas atividades, desmatamento, implantação de obras de engenharia (estradas, prédios, escavações, mineração, aterros sanitários), entre outros, com destaque para os diversos usos agrícolas, que afetam a estrutura do solo (arações, gradagens, construções de cordões de nível) e seus atributos químicos, pela adição de corretivos, fertilizantes, implantação de sistemas de irrigação e de drenagem (OLIVEIRA et al, 1992).

Por fim, para que todos esses fatores atuem de maneira conjunta na formação e desenvolvimento dos solos, é necessário certo intervalo de tempo. A idade de um solo pode ser levantada por meio de seu grau de desenvolvimento, aprofundamento e diferenciação dos horizontes.

Conforme os processos físicos e químicos de formação do solo vão se desenvolvendo, ocorre uma diferenciação de camadas e subcamadas paralelas a superfície, sendo ocasionada principalmente pela incorporação de matéria orgânica ao solo e movimentação de materiais minerais e orgânicos para o interior do solo. Essas diferentes camadas são denominadas de horizontes do solo. Uma seção vertical que expõe seus diferentes horizontes é denominada perfil, e exprime a ação dos diferentes fatores e a sequência de formação dos horizontes, bem como sua distinção em função de características químicas, físicas, morfológicas e biológicas.

Dentre as características do solo, destaque a cor, a textura e a estrutura. A cor do solo normalmente está ligada ao material de origem, mas também pode ser influenciada pela presença de matéria orgânica, água e óxidos de ferro.

A textura é definida como a distribuição das frações granulométrica de partículas que compõe o solo, classificadas, de maneira geral, em (em ordem decrescente de diâmetro) pedregulhos, areia (fina, média e grossa), silte e argila, estando relacionada ao material de origem e aos processos de fragmentação dos minerais. As partículas de tamanho inferior a 2 mm de diâmetro (areia, silte e argila) são as de maior importância na composição da textura do solo, uma vez que grande parte das propriedades físicas e químicas do solo dependem dessas três frações. As variadas proporções dessas três frações resultam em diferentes condições do solo em relação a infiltração e armazenamento de água, compactação, resistência a penetração de raízes e fertilidade.

A estrutura, forma como as partículas do solo se arranjam, também determina diferentes condições de permeabilidade, resistência à erosão e desenvolvimento de raízes. A forma com que as partículas se agregam resulta na sua coesão e estabilidade dentro do perfil, sofrendo grande influência da matéria orgânica e de processos físico-químicos e biológicos.

Outras características como porosidade (volume de poros ocupado por líquidos e gases em relação ao volume total do solo) e permeabilidade (capacidade de infiltração de água e ar no perfil do solo) são decorrentes da interação entre a textura e estrutura dos solos. A porosidade total dos solos argilosos é maior que a dos solos arenosos, uma vez que a fração argilosa é mais fina que a arenosa e dispõem de uma maior quantidade de poros pequenos, em comparação às areias que são partículas maiores e, portanto, possuem poros maiores mas menos numerosos. Por outro lado, o movimento da água livre é maior em nos solos arenosos, pois argilas possuem maior capacidade de retenção de água devido a grande concentração de cargas elétricas desbalanceadas em sua superfície, fazendo com que as partículas comportem-se como lâminas absorventes de moléculas de água, molecularmente polar. Assim, a argila possui um maior potencial de atração e retenção de água. Consequentemente, devido à essa força de atração, resulta também a resistência de solos argilosos em sofrer erosão, quando comparados a solos mais arenosos.

3.4. Compactação dos solos

Dentre as principais alterações decorrentes das ações antropogênicas sobre o meio físico está o processo de compactação dos solos, atribuído à redução do volume de macroporos e rearranjo das partículas na matriz do solo. Este processo, por um lado, reduz o tamanho e continuidade dos poros e, por outro, aumenta o peso específico seco do solo e sua resistência mecânica à penetração. A esse conjunto de alterações associam-se processos negativos, como redução da aeração do solo e da taxa de infiltração e condutividade hidráulica saturada (REICHERT et al., 2007).

Além de comprometer o desenvolvimento das plantas pela restrição ao crescimento radicular, redução da disponibilidade hídrica e aeração deficiente, verifica-se ainda o aumento do escoamento superficial que pode levar à aceleração de processos geológicos, tais como a erosão hídrica e o assoreamento de canais, gerando um cenário de degradação.

Segundo Bennie e Krynauw (1985), o processo de compactação depende tanto de fatores internos quanto externos. Dentre os internos estão aqueles intrínsecos ao material geológico, como composição mineralógica, textura, estrutura, teor de umidade e matéria orgânica. Os fatores externos, por outro lado, são atribuídos principalmente à energia aplicada ao solo, ocorrendo de modo natural, pela ação do impacto das gotas de chuva, ou por atividades antropogênicas.

O tráfego de maquinários e implementos agrícolas e o intenso pisoteio de animais geralmente são apontados como principais causas da compactação de solos, uma vez que exercem uma força mecânica externa considerável sobre a superfície, agindo até cerca de 60 cm de profundidade (DUIKER, 2004; REICHERT et al., 2007; DAVIES; LACEY, 2011). O avanço da mecanização embora tenha contribuído para facilitar e agilizar o trabalho de manejo, também compromete a qualidade do solo, uma vez que o

uso de máquinas e implementos maiores e mais pesados resulta na compactação do solo, com destaque para as estradas secundárias e carregadores.

O estudo dos efeitos da compactação dos solos permite uma avaliação das intensidades destas alterações que levam a degradação ambiental, uma vez que apresenta efeitos não só pontuais, mas também em macroescala, proporcionando prejuízos ambientais e econômicos.

3.5. Erosão

O problema da remoção do solo pela água e pelo vento é antiga. Segundo o FDALR (Departamento Federal de Agricultura e Recursos Terrestres da Nigéria, 1999), dificilmente qualquer parte do mundo de hoje não é, até certo ponto, afetado pela erosão do solo. Assim, o conhecimento dos processos que causam a erosão torna-se importante a medida que busca-se reduzir ou mesmo evitar este fenômeno ao nível do que ocorreria naturalmente, possibilitando a adoção de estratégias corretas para a conservação do solo.

De maneira simples, pode-se definir a erosão como um processo que envolve a desagregação e transporte de materiais do solo por agentes erosivos, principalmente a água e o vento. Bertoni e Lombardi Neto (1990) definem erosão como o processo de desprendimento e arraste acelerado das partículas do solo, causado principalmente pela água (erosão hídrica). As enxurradas, originadas pela água da chuva que atinge o solo e não sofre infiltração, carregam partículas do solo e nutrientes dissolvidos, caracterizando a erosão como a principal causa de degradação acelerada dos solos.

A perda do solo em si, proporcionada pelo carreamento de partículas pelo escoamento superficial, e também de nutrientes essenciais aos vegetais, promove uma redução da capacidade agrícola, com a diminuição da produtividade e qualidade das culturas, gerando gastos cada vez maiores com fertilizantes e corretivos.

Bertoni e Lombardi Neto (1990) também apontam a redução da capacidade de infiltração e de retenção de umidade do solo com outro problema sério. A erosão das camadas superiores do solo e conseqüente exposição das camadas inferiores e menos permeáveis, propiciam uma modificação nas taxas de infiltração, armazenamento de água no solo e escoamento superficial. Em conseqüência, torna-se cada vez mais necessário o uso de maquinário que facilite o plantio, arando e revolvendo diferentes camadas do solo, alterando ainda mais sua estrutura original.

O processo erosivo é iniciado pelo impacto das gotas de chuva direto no solo, provocando a desagregação de partículas superficiais, sendo transportadas pelo fluxo superficial e, posteriormente, depositados (BERTONI; NETO, 1990).

3.5.1. Fatores controladores dos processos erosivos

De maneira geral, os fatores que influenciam na determinação da erosão, dentro da superfície terrestre, são os geológicos e os climáticos derivados de outros fatores que podem ser de ordem tectônica, litológica, edafológica e geomorfológica. Em uma escala reduzida, um talude, por exemplo, os fatores que controlam a erosão são a chuva (erosividade), as propriedades do solo (erodibilidade), o relevo e a cobertura vegetal. A intervenção antrópica, pode alterar esses fatores, acelerando ou retardando os processos erosivos.

Chuvas

Pode-se definir a erosividade como a habilidade ou capacidade da chuva em causar erosão (HUDSON, 1961 apud GUERRA, 1998), sendo a chuva, portanto, um dos fatores climáticos de maior importância na erosão dos solos. Segundo Bertoni e Lombardi Neto (1990), a água da chuva atua no processo erosivo de duas maneiras: mediante o impacto das gotas de chuva no solo desprotegido e pela ação do escoamento.

O impacto da gota de chuva causa, inicialmente, a desagregação das partículas do solo. Em seguida, as partículas desprendidas são transportadas pelo efeito do salpicamento (splash), onde o material salpicado tende a ser disperso pela superfície do terreno, e também pelo escoamento superficial. De acordo com Guerra (2010), o fenômeno de salpicamento varia em função da resistência do solo ao choque das gotas de água e também pela energia cinética destas. A ação de compactação das gotas de chuva no solo reduz rapidamente sua capacidade de infiltração, sendo também responsável pelo aumento do escoamento superficial.

O transporte do solo pela ação da água é complexo, sendo determinado principalmente pelos outros fatores causadores da erosão (relevo, cobertura vegetal e propriedades do solo) e pela intensidade da chuva.

INFILTRAÇÃO

A infiltração pode ser definida como o processo pelo qual a água no estado líquido entra na superfície do solo, sendo a sua movimentação no interior deste denominada de percolação. Ressalta-se que estes fenômenos são fortemente relacionados, uma vez que a percolação depende da água infiltrada e, por sua vez, a infiltração depende da capacidade do solo de absorver e conduzir a água a maiores profundidades.

Horton (1933 apud COELHO NETO, 1998) denomina capacidade de infiltração a taxa máxima de absorção de água pelo solo, sendo esta capacidade regulada por diversos fatores, tais como: condições de cobertura dos solos (cobertura vegetal, impermeabilização, etc), textura e profundidade dos solos (drenagem e armazenamento de água), atividade biológica (abertura de poros e caminhos pela fauna do solo e pelo

enraizamento dos vegetais), intensidade das chuvas e condições de umidade do solo antecedentes a precipitação.

A relação entre capacidade de infiltração e a intensidade da chuva determina a quantidade de água infiltrada: em um solo inicialmente seco, a capacidade de infiltração é elevada, proporcionando uma alta taxa de infiltração; conforme a precipitação ocorre, a quantidade de água que entra no solo aumenta, reduzindo a capacidade de infiltração que, em um dado momento, será ultrapassada pela intensidade da chuva e parte da água precipitada, após preencher as microdepressões do terreno, escoar superficialmente em direção aos canais de drenagem.

ESCOAMENTO SUPERFICIAL

O escoamento superficial (runoff) é desencadeado quando, durante um evento chuvoso, a capacidade de infiltração do solo é superada pela intensidade da chuva, isto é, quando o solo apresenta-se saturado e não podendo mais armazenar água. Segundo Guerra (1998), o fluxo de água que escoar sobre a superfície se apresenta como pequenos cursos anastomosados e, menos frequente, na forma de lençol de água.

Morgan (1986) mostra que estudos sobre transporte de partículas em fluxo rasos e não canalizados indicam que parte dos sedimentos, geralmente os mais finos, são transportados em suspensão na massa de água, enquanto os mais grosseiros são arrastados como carga de fundo. A velocidade do escoamento e a turbulência do fluxo definem a perda de solo.

Um fator que está ligado diretamente ao processo de escoamento é a cobertura vegetal. A capacidade de proteção, principalmente contra o choque das gotas de chuva e seu efeito de desagregação das partículas, mostra o efeito controlador da cobertura, sendo que parte das observações sobre efeitos erosivos mostram que o escoamento superficial é mais presente em regiões semiáridas ou com vegetação esparsa (GUERRA, 1998).

Em áreas de uso agrícola, principalmente devido a mecanização da lavoura, o fenômeno de escoamento superficial pode ser acentuado, devido ao remanejamento de camadas do subsolo pra cima e vice-versa (GUERRA, 1998), causando uma diminuição da espessura do topo do solo e também perda de nutrientes e matéria orgânica. Uma vez que a matéria orgânica auxilia na estabilidade dos agregados do solo, sua perda reduz a resistência do solo ao impacto direto da chuva e sua capacidade de infiltração, resultando no aumento das taxas de escoamento superficial.

Solo

As propriedades do solo, embora atuem de maneira conjunta a outros fatores, são determinantes nos estudos de erosão, estabelecendo maior ou menor suscetibilidade do solo aos processos erosivos. Nesse sentido, o termo erodibilidade é definido, segundo

Morgan (1995), como a predisponibilidade do solo ao destacamento e transporte de partículas. As propriedades físicas, como textura, estrutura e porosidade, e químicas e biológicas do solo exercem diferentes influências no processo erosivo, atuando de maneira dinâmica ao longo do tempo.

A textura do solo, isto é, o tamanho de suas partículas afeta principalmente a quantidade de solo arrastado pela erosão, uma vez que algumas frações granulométricas possuem maior ou menor facilidade de arrastar do que outras (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1990; GUERRA, 1998).

A comparação entre as frações areia e argila quanto a infiltração e suscetibilidade a erosão evidencia a influência da textura no comportamento do solo: em um evento chuvoso de baixa intensidade, solos mais arenosos, dotados de maior porosidade, permitem total infiltração da água precipitada; porém, devido ao pequeno teor de argila e, portanto, baixa coesão entre as partículas maiores, estas são facilmente transportadas quando uma chuva mais intensa desencadeia o escoamento superficial. Solos argilosos, por outro lado, com espaços porosos menores, possuem uma capacidade de infiltração inferior; porém, a força de coesão entre as partículas é maior, aumentando sua resistência ao destacamento e à erosão (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1990). Solos de textura média, com maiores teores de silte, geram escoamentos mais intensos e permitem maior destacamento e transporte das partículas, sendo, portanto, mais facilmente erodíveis.

Em relação à estrutura do solo, definida como o arranjo das partículas sob a forma de agregados, pode-se destacar aspectos como ligação entre as partículas e resistência dos agregados na presença de água, devido principalmente a fração argila presente no solo, e a quantidade, estabilidade e continuidade de poros. Além disso, a qualidade e quantidade de material cimentante (argila, óxidos e matéria orgânica) também é importante. De Ploey e Posen (1985, apud GUERRA, 1998) apontam a estabilidade dos agregados como um dos fatores mais importantes da dinâmica da água no topo do solo, na erodibilidade e na capacidade de formação de crostas na superfície do solo, dificultando a infiltração e aumentando o escoamento.

A constituição química do solo, com destaque para a matéria orgânica, também determina a resistência dos solos à erosão. Ao promover maior agregação e estabilidade entre as partículas, a matéria orgânica torna o solo mais resistente à erosão hídrica, mais poroso e com maior capacidade de armazenar água. Além disso, a formação do húmus auxilia na fertilidade solo. O processo natural de formação de matéria orgânica no solo depende da flora e fauna presentes na sua superfície e interior. As modificações antrópicas, sobretudo o desenvolvimento das atividades agrícolas, tendem a alterar os teores de matéria orgânica e, em consequência, outras propriedades do solo (GUERRA, 1998).

Relevo

O relevo do terreno, representado pela declividade, comprimento de rampa e perfil das encostas, exerce grande influência sobre a erosão. A quantidade dos sedimentos arrastados pelas enxurradas variam em função da velocidade do escoamento, estando esta, por sua vez, associada a topografia do terreno.

A declividade afeta diretamente o volume e velocidade do escoamento superficial, sendo que em declividades mais acentuadas a água dispõe de menor tempo para que infiltre no solo.

Segundo Bertoni e Lombardi Neto (1990) o comprimento da rampa também é um aspecto importante, uma vez que, a medida que aumenta, o escoamento sofre um aumento de volume, devido ao acúmulo de água no decorrer do caminho, e de velocidade. Assim, quanto maior o comprimento da rampa, maior será a energia resultante do acúmulo da enxurrada, resultando em processos erosivos.

Em relação ao formato das encostas, dois modelos podem ser citados. O primeiro, proposto por Troeh (1965, apud RODRIGUES, 1982) e ilustrada pela Figura 3, define quatro tipos de vertentes associadas pela atuação dos diferentes processos erosivos: coletoras de água, com contornos côncavos (quadrantes I e II); distribuidoras de água, com contornos convexos (quadrantes II e IV). O eixo vertical do diagrama separa as encostas com perfis convexos, que facilitam o desenvolvimento do rastejamento (quadrantes II e III), das encostas com perfis côncavos, que favorecem a lavagem pela água das chuvas (quadrantes I e IV).

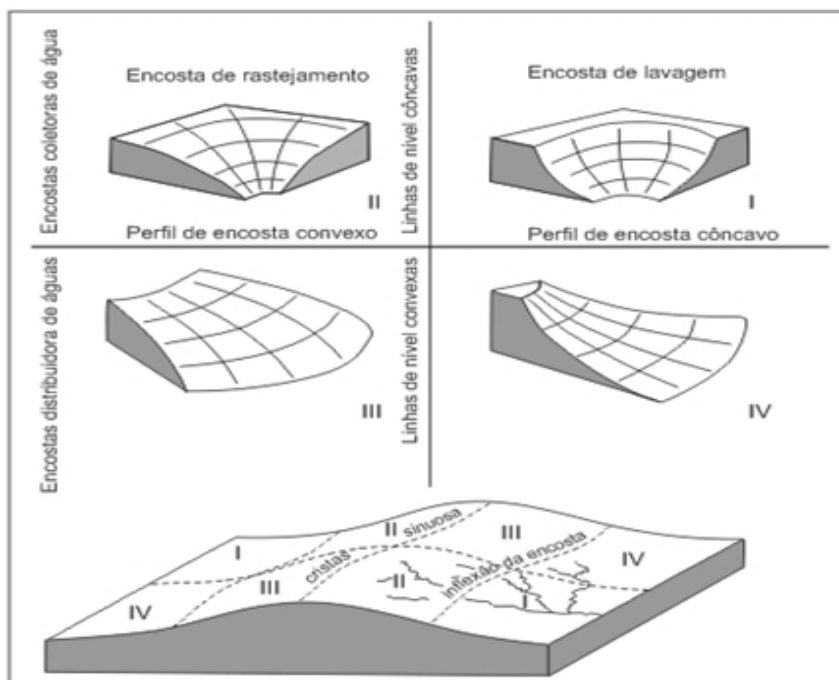


Figura 3 - Classificação dos elementos de encosta e os processos operantes (TROEH, 1965).

O segundo modelo, proposto por Ruhe (1975), representa as formas longitudinal e lateral da encostas (comprimento e largura, respectivamente), classificando os formatos como linear (L), convexo (V) e côncavo (C). A combinação desses três formatos definem seis diferentes tipos geométricos, ilustrados na Figura 4.

Em relação ao modelo de Ruhe, XuJiongxin (1996), aponta que a probabilidade de deposição de sedimento é menor e a intensidade de erosões é maior nas encostas convexas no comprimento; nas encostas côncavas, tanto a infiltração quanto a deposição de sedimentos é maior, devido ao declínio da velocidade de escoamento em função do seu formato geométrico. Por outro lado, a largura das encostas côncavas propicia uma concentração de escoamento, podendo desencadear, principalmente, grandes erosões lineares; as convexas apresentam escoamento mais disperso, desenvolvendo erosões laminares, mas também lineares em menor escala.

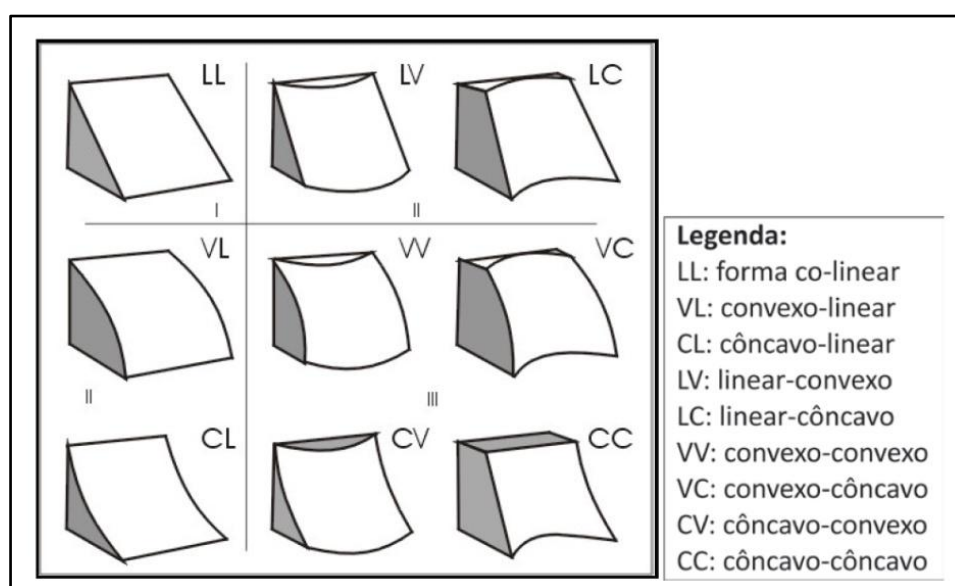


Figura 4 - Tipos geométricos de encostas. (RUHE, 1975).

Cobertura vegetal

Segundo Guerra (1998), a cobertura vegetal influencia a dinâmica da erosão de várias formas. A interceptação de parte da precipitação pelas copas arbóreas, arbustos e gramíneas, além de reduzir a quantidade de água que atinge o solo, também promove uma dispersão e diminuição do tamanho das gotas de chuva. Em consequência, a cobertura vegetal atua na redução da violência do impacto das gotas no solo, evitando o fenômeno do splash, a compactação e a formação de crostas, reduzindo, conseqüentemente, a erosão.

Outra função importante é a formação de matéria orgânica (folhas, flores e galhos), que, após sua deposição no solo, degradação e formação do húmus, auxilia na agregação das partículas, oferecendo maior resistência ao desprendimento e transporte. O enraizamento dos vegetais, por sua vez, ajuda na formação dos agregados (GUERRA,

1998), mas também proporciona um aumento na capacidade de infiltração, através da criação de cavidades no interior do solo e descompactação natural de camadas mais inferiores.

Tanto a cobertura vegetal quanto a camada de serrapilheira na superfície do solo, contribuem para um aumento do atrito superficial em relação ao escoamento, reduzindo sua velocidade e volume, além de evitar a concentração de fluxos.

A densidade da cobertura vegetal é fator importante em relação ao escoamento superficial, remoção de sedimentos e, conseqüentemente, perda de solos, sendo a tipologia e percentagem da cobertura fatores atuantes na redução dos processos erosivos naturais. Segundo Guerra (1998), em uma área com alta densidade de cobertura vegetal e com uma presença de cobertura de serrapilheira, tanto o escoamento superficial quanto a erosão ocorrem em baixas taxas; em solos com cobertura vegetal inferior a 70%, geralmente áreas semi-áridas, pastagens e agrícolas, o escoamento e a perda de solo podem aumentar rapidamente.

As práticas agrícolas tradicionais, que promovem a remoção da cobertura vegetal permanente do solo, podem, segundo Guerra (1998), tornar certos solos mais sensíveis à erosão, reduzindo a proteção contra a erosividade das chuvas, o acúmulo de matéria orgânica e estabilização dos agregados.

3.5.2. Tipos de erosão hídrica

Erosão Laminar

A erosão laminar, erosão em lençol ou ainda erosão entre sulcos, ocorre quando, em condições de chuvas mais intensas, a capacidade de infiltração do solo é superada, iniciando-se o escoamento superficial. Esse escoamento pode ocorrer de maneira dispersa nas encostas do terreno, provocando uma contínua remoção de camadas (lâminas) delgadas de solo, arrastando primeiramente as partículas mais leves, matéria orgânica e nutrientes solúveis (BEASLEY, 1972; BERTONI; LOMBARDI NETO, 1990).

Segundo Guerra (1998), a turbulência e a velocidade do fluxo de água são os fatores mais importantes em relação a capacidade erosiva do escoamento. A resistência do solo à erosão determina um limite que a velocidade do fluxo deve ultrapassar para que ocorra a remoção e transporte das partículas (Figura 5).

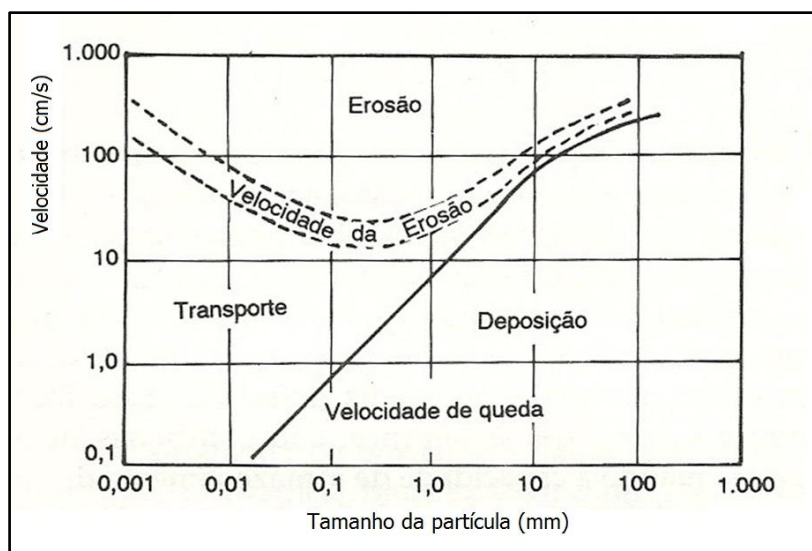


Figura 5 – Curva de Hjulstrom, 1935 (modificado de GUERRA, 1998).

Guerra (1998) também aponta o fenômeno do salpicamento (splash) como fator potencializador da erosão laminar, uma vez que as partículas são dispersas e colocadas em suspensão na massa de água, facilitando seu transporte. Para Bertoni e Lombardi Neto (1990), a erosão laminar é a menos perceptível e, portanto, a mais perigosa. Indícios de sua ocorrência podem ser observados em culturas perenes, pela exposição de raízes de árvores ao longo do tempo, demonstrando uma contínua remoção de camadas superficiais do solo.

Erosão Linear

As pequenas irregularidades presentes no terreno proporcionam caminhos preferenciais para o escoamento superficial, concentrando o fluxo de água em pequenos canais. Conforme avança pela encosta, o fluxo atinge volume e velocidade suficiente para criar pequenas incisões no solo, que podem ser classificados como sulcos ravinas ou voçorocas. A declividade e o comprimento da encosta são fatores decisivos no fenômeno de erosão em sulcos, uma vez que determinam, principalmente, a velocidade do escoamento superficial.

Os sulcos, pequenas incisões na superfície do solo, caracterizam a fase inicial da erosão laminar, funcionando como pequenos canais bem definidos, concentrando o escoamento e podendo potencializar o efeito erosivo. Estas pequenas feições podem ser corrigidas facilmente durante o preparo do solo para plantio (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1990).

As ravinas são feições erosivas de dimensões (comprimento, largura e profundidade) maiores que os sulcos, geralmente iniciadas a uma distância crítica do topo da encosta, onde o fluxo de água torna-se canalizado, podendo, contudo, ser formadas na base da encosta por meio de uma incisão que recuou em direção ao topo. Normalmente de caráter efêmero no terreno (GUERRA, 1998), uma ravina pode,

dependendo dos fatores controladores do processo erosivo atuantes, evoluir para um canal permanente, com escoamento em seu interior, originando as voçorocas.

Segundo Morgan (1995), voçorocas são canais relativamente permanentes que apresentam escoamento em seu interior durante eventos chuvosos, apresentando grandes profundidades e pequenas larguras, quando comparadas com canais regulares, sendo responsáveis por grande carreamento de sedimentos. Guerra (1998) ainda acrescenta que algumas dessas feições podem se aprofundar tanto que chegam a atingir o nível do lençol freático, havendo um escoamento de água permanente.

O uso agrícola da terra, o desmatamento e as pastagens são, quase sempre, responsáveis pelo surgimento de voçorocas, estando associados a intensidade de chuvas, propriedades do solo e características das encostas. Uma dos processos que desencadeiam o voçorocamento é o aprofundamento e alargamento de ravinas pela ação erosiva das águas pluviais (GUERRA, 1998). A remoção e transporte de pedaços de paredes e topos colapsados confere dimensões cada vez maiores para a ravina, não existindo uma exata fronteira que distingue uma ravina em estágio de expansão de uma voçoroca recém formada.

Quando os horizontes do solo apresentam materiais de consistência uniforme, a voçoroca se desenvolve com paredes quase verticais; materiais friáveis apresentam, por sua vez, frequentes desmoronamentos. A presença de materiais mais resistentes em camadas ou horizontes mais profundos confere o formato em “V” das paredes da voçoroca (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1990).

3.6. Estudos associados à modificação das condições de infiltração e escoamento superficial

A alteração de ecossistemas naturais ocorre na medida em que eles vão sendo substituídos por atividades antrópicas, provocando diversos tipos de degradação ambiental, acelerados pelo uso e manejo inadequado dos solos. A retirada da cobertura vegetal original e a implantação de culturas, aliadas a práticas agrícolas inadequadas, promovem o rompimento do equilíbrio entre o solo e o meio, modificando suas propriedades químicas, físicas e biológicas, limitando sua utilização agrícola e tornando-o mais suscetível à erosão.

Segundo Rocha et al. (2000), o aumento da atividade humana também influi na disponibilidade hídrica das bacias, assim, é fator importante a ser analisado, pois tem provocado importantes alterações e consequentes impactos sobre esses ecossistemas, o que demanda planejamento ambiental, que deve contemplar não apenas os ambientes criados e alterados pelos seres humanos, mas também o ambiente natural ao seu redor. Ressalta-se também que a bacia hidrográfica é uma unidade natural de planejamento ambiental, o que permite que seja o local onde esses estudos possam ser mais bem avaliados.

A dinâmica de uso e ocupação do solo em bacias hidrográficas exige estudos para a compreensão dos diversos impactos provocados pela ação antrópica e estratégias adequadas para a conservação dos recursos naturais nessas áreas. Os principais impactos ocasionados por modificações no uso e cobertura do solo em bacias hidrográficas são: a redução da capacidade de infiltração, o aumento do escoamento superficial e erosão, a sedimentação dos cursos d'água, a diminuição da profundidade do leito dos cursos d'água e, conseqüentemente, o aumento de cheias e inundações (AGUIAR; DOS SANTOS TARGA; BATISTA, 2007).

De acordo com Tripathi et al (2003), o estudo das bacias individuais e diversificadas torna-se necessário para possibilitar o desenvolvimento de planos de administração a serem desenvolvidos e também para aplicar os resultados de uma bacia para outra com características similares.

Dentre os estudos relacionados às modificações antrópicas impostas às bacias hidrográficas, destaca-se os que buscam avaliar condições de infiltração e escoamento superficial, principalmente por meio de modelagem matemática e ensaios em campo. Essas avaliações podem ser diretas, a partir do estudo de parâmetros como a condutividade hidráulica, ou indiretas, por meio de parâmetros que condicionam alterações nas taxas de infiltração e escoamento superficial, como compactação do solo e redução de sua porosidade, crusting e modificações no microrelevo (rugosidade superficial do terreno). Todos esses parâmetros são intensamente influenciados pelo preparo do solo para usos agrícolas, sobretudo em culturas de ciclo curto ou semi-perenes, as quais requerem preparos como aragem e gradagem, além da construção de cordões de nível para controle do escoamento superficial.

A compactação e o crusting, isto é, a formação de uma camada ou crosta lisa e endurecida, são facilmente observados em áreas sob intensa passagem de maquinários, sobretudo em estradas secundárias e carreadores. A ruptura das estruturas do solo e o rearranjo das partículas, sobretudo as mais finas, promovem uma diminuição da quantidade e continuidade dos poros, reduzindo ou mesmo impossibilitando a infiltração.

O estudo das condições ambientais do meio físico tem como finalidade o auxílio na tomada de decisões, tanto nos agrossistemas como na expansão urbana, possibilitando a compreensão das características do meio e seu comportamento dinâmico frente a intensificação da atividade humana.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Os procedimentos propostos ao desenvolvimento do estudo basearam-se na premissa de que o resultado principal seria a avaliação do grau de alteração imposta a distribuição e as propriedades dos materiais geológicos e que, em consequência, provoca alterações na razão infiltração/escoamento superficial. As etapas básicas do desenvolvimento desse trabalho estão sumarizadas no fluxograma da Figura 6.

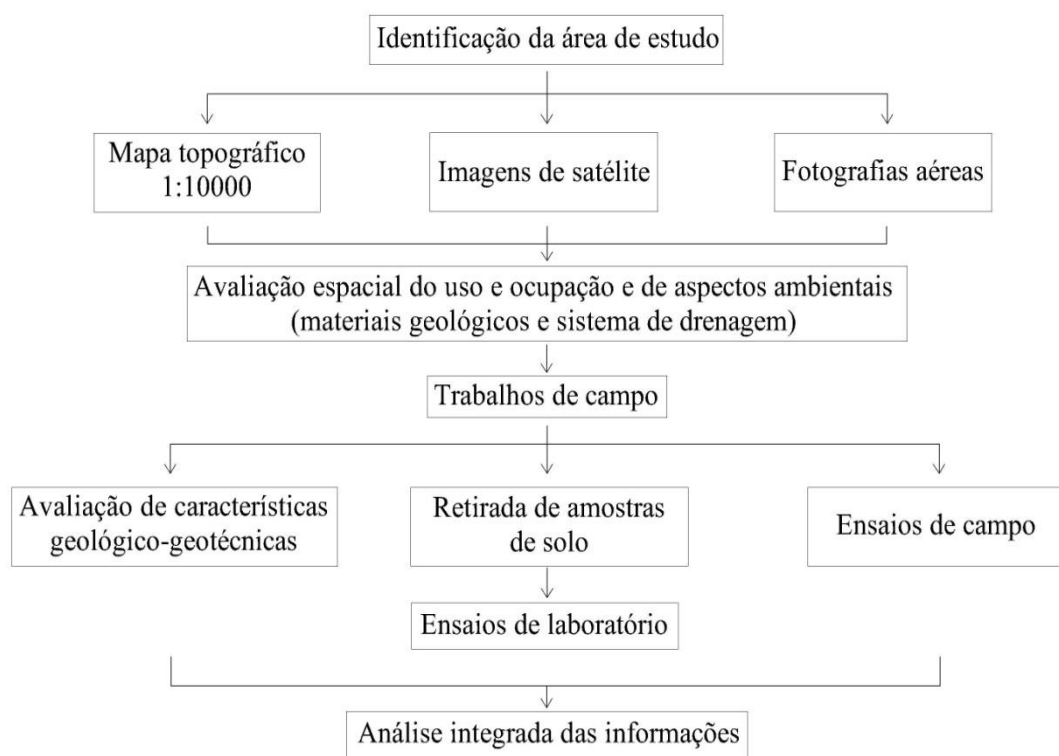


Figura 6 - Fluxograma básico das principais etapas do trabalho.

4.1. Levantamento de dados prévios e materiais disponíveis

Inicialmente, desenvolveram-se trabalhos de escritório, onde foram reunidas as cartas topográficas e mapa de materiais geológicos da região em estudo, em escala de 1:10000, além de imagens de satélite e fotografias aéreas dos anos de 1972, 1988, 2000 e 2006, em diferentes escalas.

Em seguida, os mapas topográficos foram georreferenciados e digitalizados com auxílio do software *ArcMap 10.1*, e a área de estudo foi delimitada. A partir desse material, em associação às imagens de satélite e estudos prévios sobre a área, buscou-se avaliar a dinâmica de uso e ocupação da bacia estudada, aspectos associados aos materiais geológicos e aos corpos hídricos. A identificação e análise prévia desses elementos orientaram, por sua vez, o planejamento da etapa de trabalhos de campo.

4.2. Trabalhos de campo

Na etapa de campo, houve, inicialmente, um mapeamento dos materiais geológicos na escala do trabalho, utilizando-se como base a topografia, observação dos contatos entre diferentes unidades geológicas, análise visual de materiais de diferentes texturas e utilização de mapa de materiais inconsolidados em outra escala, como apresentado nas Figuras 7 e 8. A partir das observações de campo, elaborou-se o mapa de materiais inconsolidados com a distribuição dos materiais anterior ao processo de uso intensivo da bacia, buscando-se descrever as diferentes unidades por meio da elaboração de perfis estratigráficos.



Figura 7 - Identificação de diferentes materiais inconsolidados em talude.

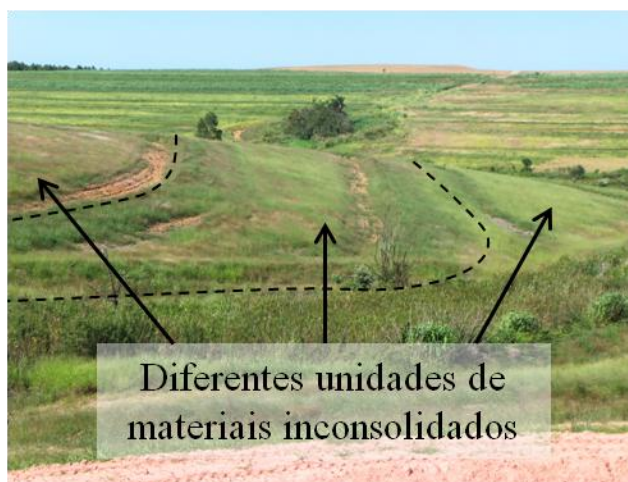


Figura 8 - Diferentes materiais inconsolidados observados ao longo da encosta.

Também realizou-se uma avaliação das condições do sistema de drenagem relacionadas à aspectos como extensão, nível de água, presença de vegetação marginal e condições gerais dos canais. Além disso, foram avaliados aspectos como a presença de processos erosivos, compactação do solo, condições de cobertura do solo e outros indicadores de degradação ambiental.

Os trabalhos de campo envolveram ainda a amostragem de solo, realizada com base nas informações prévias sobre os tipos de materiais presentes na área, assim como no uso e ocupação. Retiraram-se amostras indeformadas, com auxílio de tubo de PVC de parede rígida, e deformadas, sendo que em alguns pontos foram feitas trincheiras de cerca de 1 metro de profundidade para retirada de amostras de diferentes horizontes (Figura 9).



Figura 9 - Extração de amostras em trincheira.

Realizaram-se também ensaios de campo, sendo eles o ensaio de infiltração com infiltrômetro de duplo anel e o de resistência mecânica do solo à penetração por meio do penetrômetro dinâmico, em diferentes cultivos agrícolas, em estradas secundárias e carreadores.

4.2.1. Ensaio de infiltração com infiltrômetro duplo anel

O ensaio com infiltrômetro de duplo anel consiste na infiltração de água no solo a uma carga constante por meio de dois anéis concêntricos, cravados de 5 cm a 10 cm de profundidade (Figura 10). O anel externo tem como função garantir que o fluxo de água no solo decorrente do anel central seja efetivamente vertical, evitando linhas de fluxo em outras direções, como é mostrado na Figura 11. A lâmina d'água no anel externo deve estar sempre abaixo da lamina do anel central.



Figura 10 - Ensaio de infiltração com infiltrômetro de duplo anel.

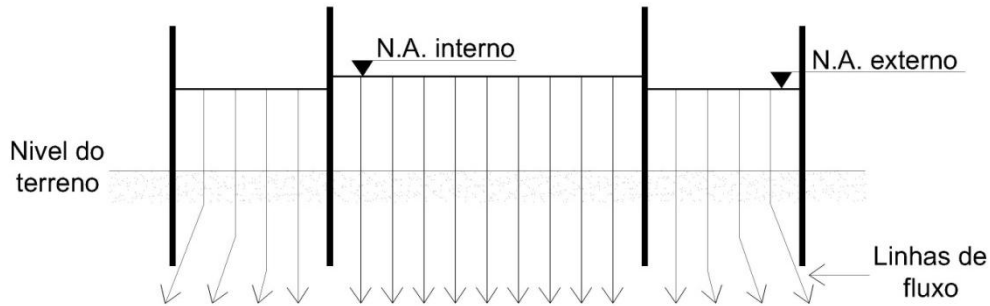


Figura 11 – Esquema simplificado do processo de infiltração de água durante o ensaio.

Para determinação da condutividade hidráulica, realiza-se leitura da variação de volume de água no anel central, com auxílio de um reservatório graduado a ele conectado, a intervalos de tempo regulares até obter-se um regime permanente de infiltração. A condutividade hidráulica saturada de campo (k_{fs}) é obtida a partir da seguinte expressão (Equação 1), baseada na equação de Darcy para carga constante:

$$k_{fs} = \frac{Q}{\left(\frac{h+Z_w}{Z_w}\right)A.t} \quad (1)$$

onde:

k_{fs} : condutividade hidráulica saturada de campo;

Q: volume de água infiltrada;

h: altura da lâmina d'água no anel central quando a regime constante;

Z_w : profundidade da frente de saturação;

A: área da seção do anel central;

t: tempo entre duas leituras.

A partir dos dados de todo o ensaio também é construído um gráfico da infiltração em função do tempo do ensaio, fornecendo uma curva característica do processo de infiltração.

4.2.2. Ensaio de resistência mecânica à penetração

Um dos indicadores de compactação no solo é sua resistência mecânica à penetração, com os penetrômetros fornecendo boas estimativas de sua resistência, apresentando como principais vantagens a facilidade e rapidez na obtenção dos resultados (Bengough e Mullins, 1990).

O penetrômetro de impacto ou dinâmico tem como princípio de funcionamento a penetração de uma haste com ponteira metálica no solo através do impacto de um êmbolo (martelo) de massa conhecida a uma altura fixa, fornecendo uma energia constante a cada golpe. Assim, associando-se a quantidade de golpes e a profundidade de penetração da ponteira, verifica-se a resistência à penetração do solo em diferentes profundidades, possibilitando uma rápida avaliação do grau de compactação (Herrick & Jones, 2002).

Para determinação da resistência à penetração utilizou-se um penetrômetro dinâmico (Figuras 12 e 13), sendo o ensaio realizado a partir da superfície do solo até uma profundidade de cerca de 1,80 m. O penetrômetro utilizado é composto por duas hastes metálicas, uma inferior, na qual é rosqueada a ponteira metálica, e a superior onde desliza-se verticalmente o êmbolo (martelo) a partir de uma altura conhecida, impactando a junção responsável pela união das hastes descritas.



Figura 12 - Ensaio de resistência mecânica à penetração

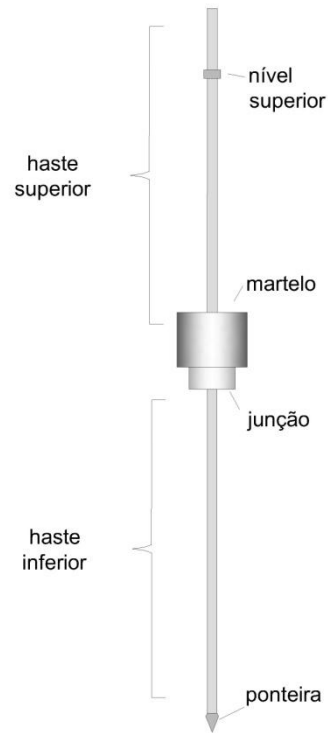


Figura 13 - Esquema simplificado do penetrômetro dinâmico utilizado.

A partir do número de golpes e da profundidade de penetração da haste em cada golpe, determina-se a resistência do solo à penetração e, para cada local de ensaio, construiu-se uma curva relacionando a resistência com a profundidade. A resistência do solo foi obtida por meio da equação 1, apresentada por Cassan (1982), utilizada por Vanags *et al* (2004) e Furegatti (2012):

$$R = \frac{mgH}{A \cdot \Delta Z} \frac{m}{m+m'} \quad (2)$$

onde:

R: resistência à penetração (Pa);

A: área da base do cone (m²);

g: aceleração da gravidade (9,81 m/s²);

H: altura de queda do martelo (m);

m: massa do martelo (kg),

m': massa total do penetrômetro (kg).

Δz : profundidade da penetração da haste para um golpe (m).

Este ensaio foi realizado em diferentes pontos da bacia, de modo a avaliar a resistência do solo sobre os vários usos e em diferentes materiais geológicos, sendo ainda determinada a umidade do solo em intervalos de profundidade de 20 cm.

4.3. Trabalhos de laboratório

Os trabalhos de laboratórios envolveram o preparo das amostras e realização de ensaios para caracterização dos materiais em termos de granulometria, índices físicos, condutividade hidráulica saturada e erodibilidade.

4.3.1. Caracterização geral

Os materiais coletados foram caracterizados em termos de granulometria, massa específica dos sólidos (ρ_s), massa específica do solo seco (ρ_d) e de índices físicos, como índice de vazios (e) e porosidade (n).

O ensaio de análise granulométrica conjunta (Figura 14) foi realizado mediante as Normas Brasileiras ABNT NBR 6457 e ABNT NBR 7181 e o ensaio para determinação de massa específica dos sólidos (ρ_s) (Figura 15) executado segundo a Norma Brasileira ABNT NBR 6508, ambos realizados a partir das amostras deformadas coletadas.



Figura 14 - Etapa de sedimentação da análise granulométrica conjunta.

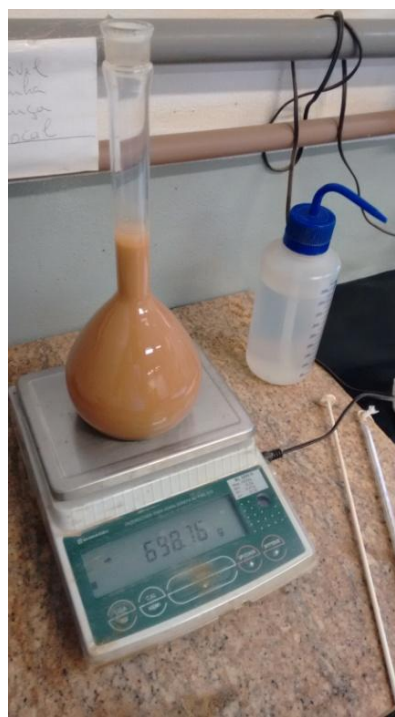


Figura 15 - Ensaio de massa específica dos sólidos.

4.3.2. Condutividade hidráulica saturada

O ensaio de condutividade hidráulica saturada é realizado em laboratório, sob carga hidráulica constante, como apresentado na Figura 16. As amostras utilizadas foram extraídas com auxílio de um tubo de PVC de parede rígida, de cerca de 9,7 cm de diâmetro por 15 cm de altura, sendo posteriormente rasadas e preparadas para o ensaio juntamente ao tubo.



Figura 16 - Ensaio de condutividade hidráulica saturada em laboratório.

A carga hidráulica imposta as colunas é constante, mantida pelo regularizador de nível que, por sua vez, é abastecido por uma tubulação diretamente ligada a torneira. A condutividade hidráulica saturada (K) é determinada pela Equação 3:

$$K = \frac{V.L}{A.t.h} \quad (3)$$

onde:

- K: condutividade hidráulica saturada;
- V: volume de água coletado;
- L: comprimento (altura) da amostra na coluna;
- A: área da seção transversal da amostra da coluna;
- t: tempo da coleta;
- h: carga hidráulica constante no topo da amostra.

4.3.3. Erodibilidade

O índice de erodibilidade baseia-se em dois ensaios: o de absorção de água e o de perda de massa por imersão, realizados em sequência, utilizando amostras indeformadas retiradas com auxílio de tubos de PVC de parede rígida de cerca de 4 cm de diâmetro por 2 cm de altura. Após serem rasadas, as amostras devem secar ao ar e na sombra por, no mínimo, sete dias.

O primeiro ensaio consiste na absorção de água pela amostra utilizando um equipamento composto por um recipiente cilíndrico, de mesmo diâmetro da amostra, ligado a um tubo de vidro disposto na horizontal. Em seguida, ambos são preenchidos com água e uma pedra porosa é inserida no recipiente, de modo que a superfície da pedra fique a mesma altura do tubo de vidro, evitando uma carga hidráulica. A pedra deve ser mantida saturada. Por fim, a amostra, já rasada e pesada, é colocada na

superfície da pedra porosa, iniciando-se a leitura dos volumes de água absorvida a determinados intervalos de tempo. Finaliza-se o ensaio quando a amostra estiver totalmente saturada, isto é, quando a água preencher completamente sua superfície. A Figura 17 ilustra o método descrito e a Figura 18 apresenta o equipamento utilizado nos ensaios.

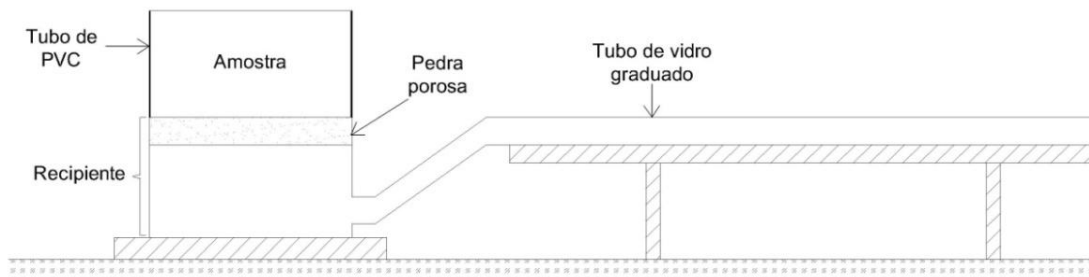


Figura 17 - Esquema simplificado do ensaio de absorção de água (modificado de Pejon 1992).

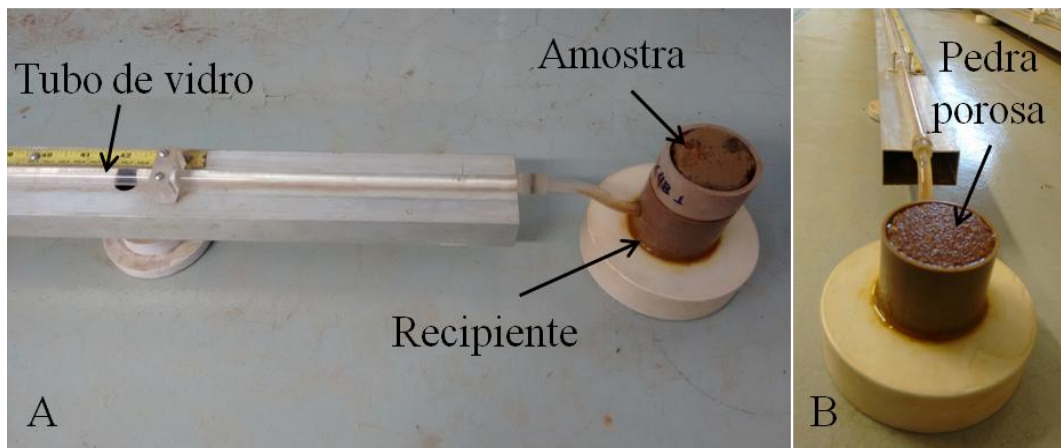


Figura 18 - Equipamento utilizado no ensaio de absorção de água.

A partir dos dados deste primeiro ensaio determina-se o índice de absorção (S) construindo-se um gráfico do volume de água absorvido por unidade de área basal da amostra (q) em função da raiz quadrada do tempo respectivo (\sqrt{t}). O índice de absorção é o coeficiente angular da reta ajustada aos pontos do gráfico.

A segunda etapa do ensaio de erodibilidade constitui-se na perda de massa por imersão, onde, findado o ensaio de absorção de água, retira-se a amostra saturada do recipiente cilíndrico e insere-se em um cilindro que, por sua vez, é apoiado em um suporte de modo que a superfície livre da amostra fique na posição vertical. A Figura 19 apresenta o equipamento utilizado nesta etapa.



Figura 19 – Equipamento utilizado no ensaio de perda de massa por imersão.

Em seguida, o conjunto é imerso em um tanque com água, com um recipiente menor sendo disposto abaixo da base da amostra, de modo a coletar o material desprendido. Após 24 horas o recipiente coletor é retirado do tanque e levado à estufa, determinando-se, posteriormente, a massa seca do material desprendido e a porcentagem (P) relativa à massa inicial da amostra.

Por fim, o cálculo do índice de erodibilidade (E) foi realizado seguindo os modelos propostos por Nogami & Villibor (1979), $E = 52.S/P$, e por Pejon (1992), $E = 40.S/P$. Em ambos os modelos, para um valor de E menor que 1, considera-se que o material inconsolidado apresenta elevada erodibilidade.

4.4. Lista de materiais

Os materiais utilizados neste estudo são apresentados a seguir, de acordo com as etapas de trabalho:

- Mapa topográfico da região da Serra de Itaqueri, em escala 1:10000;
- Fotografias aéreas, em diferentes escalas, dos anos de 1972, 1988, 2000 e 2006;
- Imagens de satélite do ano de 2013;
- Softwares ArcMap 10.1 e AutoCAD Map 3D 2016;
- Penetrômetro dinâmico;
- Infiltrômetro de duplo anel;
- Materiais para abertura de trincheiras e coleta de amostras deformadas e indeformadas (espátulas, tubos de PVC de parede rígida, sacos e caixas para armazenamento das amostras);
- Balança semi-analítica;
- Conjunto de peneiras e provetas (análise granulométrica conjunta);

- Conjunto tubo de vidro graduado, pedra porosa e recipiente cilíndrico (ensaio de absorção de água); suporte horizontal e recipiente coletor (ensaio de perda de massa por imersão).

5. CARACTERIZAÇÃO BÁSICA DA ÁREA DE ESTUDO

A Bacia do Ribeirão do Pinheirinho possui uma área de 4000 ha, compreendendo parte dos municípios de Brotas e Itirapina, centro do Estado de São Paulo (Figura 20).

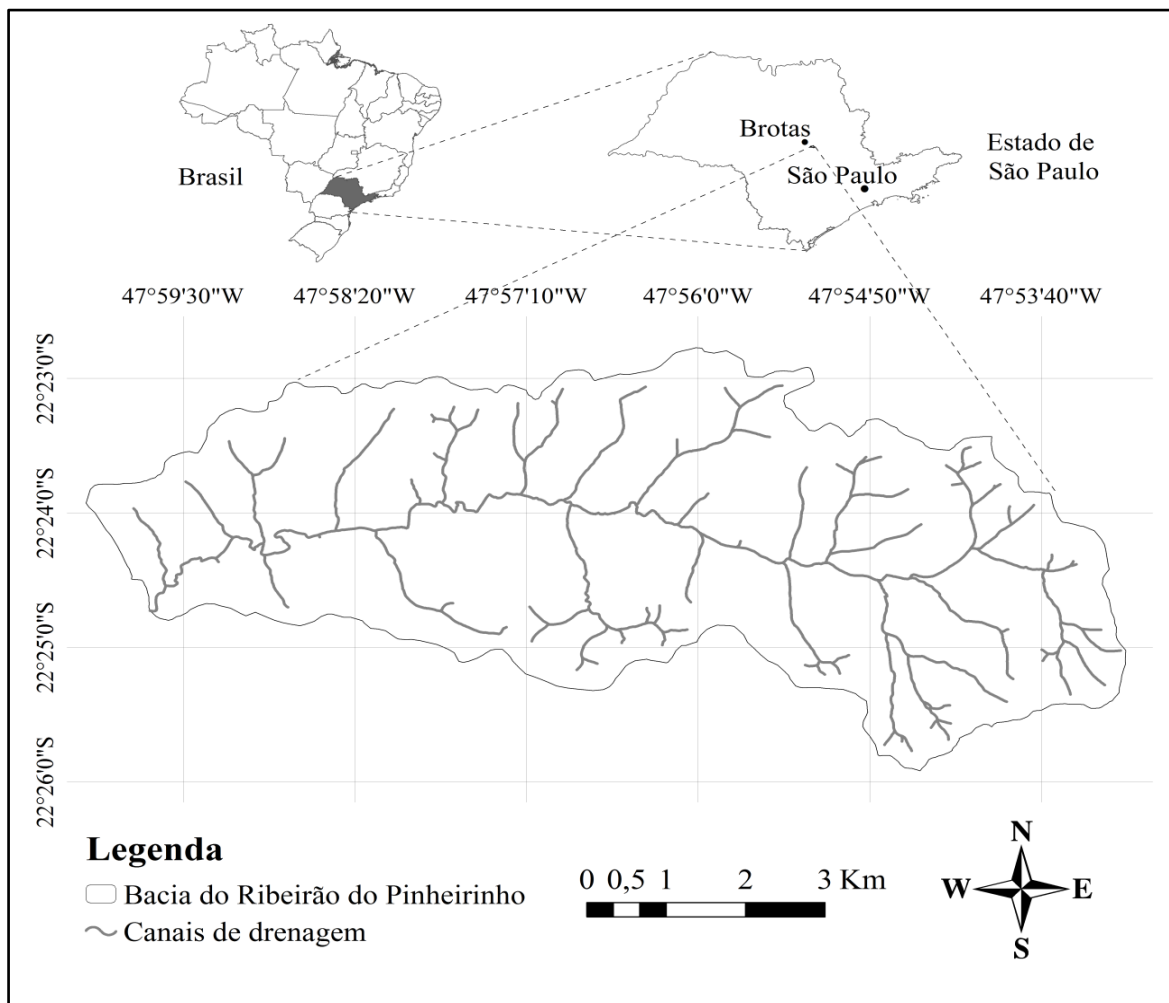


Figura 20 - Localização da Bacia do Ribeirão do Pinheirinho.

De acordo com a classificação de Köppen (1948), o clima da região é do tipo Cwa - subtropical de inverno seco (com temperaturas inferiores a 18°C) e verão quente (com temperaturas superiores a 22°C), apresentando precipitações médias variando entre 1200 a 2000 mm.

A vegetação da região varia entre Cerrados, Cerradões e Matas de Galeria que acompanham cursos d'água. Contudo, destaca-se o amplo uso do solo para agropecuária, com maior parte da bacia sendo a cana-de-açúcar, o reflorestamento e as pastagens os que predominam na atualidade.

Geologicamente a região é constituída por materiais arenosos relacionados à Formação Itaqueri (vários arenitos com diferentes graus de cimentação), recobrendo basaltos da Formação Serra Geral e os arenitos eólicos bem cimentados da Formação Botucatu. O mapa geológico da área de estudo é apresentado no Apêndice A.

6. RESULTADOS

6.1. Distribuição dos materiais inconsolidados originais

A partir dos dados relacionados ao relevo e materiais geológicos (rochosos e inconsolidados), elaborou-se um mapa de materiais inconsolidados, apresentado no Apêndice B. Para as diferentes tipologias de materiais inconsolidados, desenvolveu-se os perfis estratigráficos (Figuras 21 a 23). Os diferentes tipos em função da gênese foram classificados de acordo com Dearman & Fookes (1974), Anon (1977), ISRM (1978) e IAEG (1981). A distribuição das diferentes unidades em relação ao relevo encontra-se exemplificada na seção vertical A-B (Apêndice C) e sua localização encontra-se no Mapa de materiais inconsolidados originais (Apêndice B).

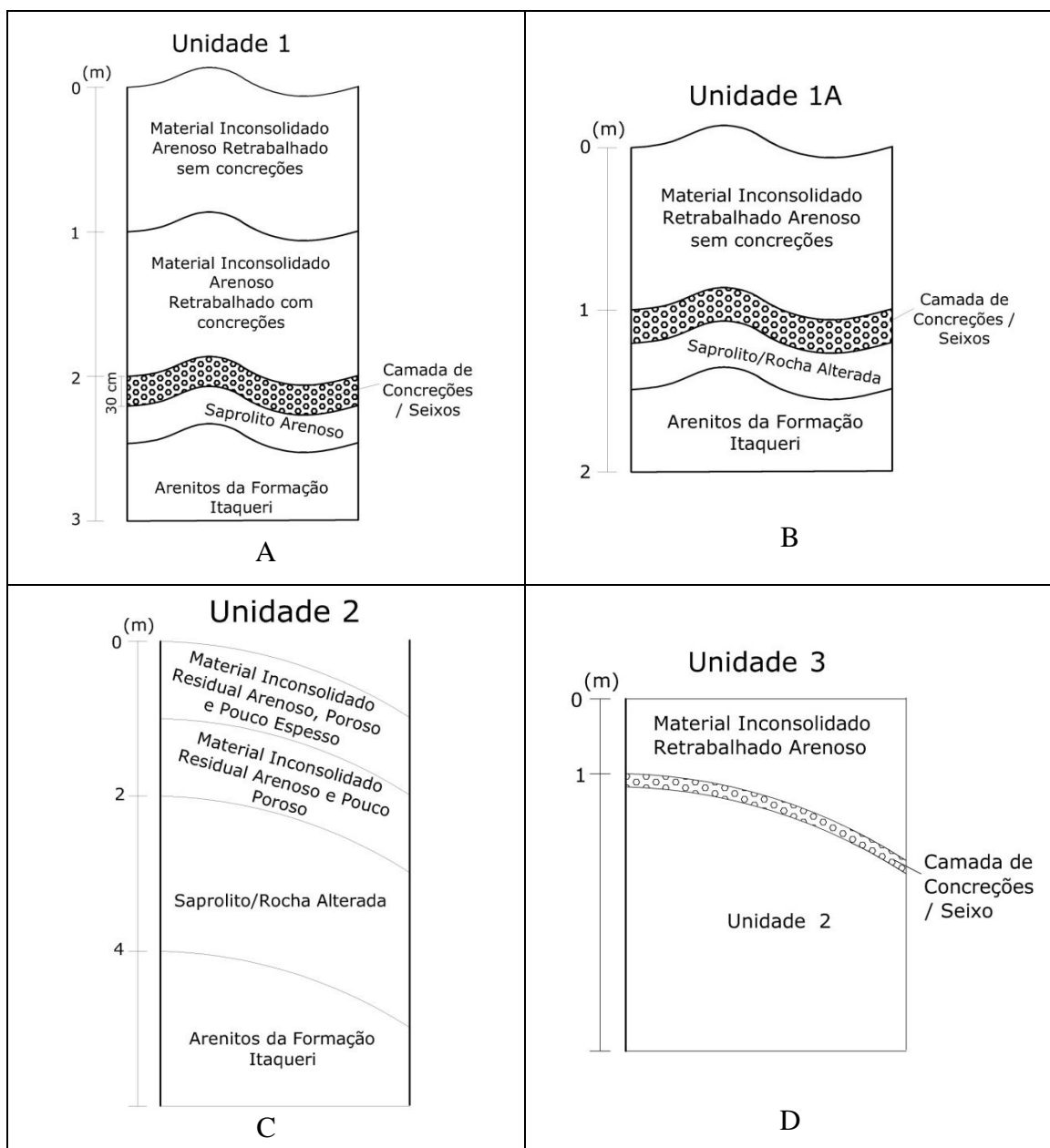


Figura 21 - Perfis estratigráficos de materiais inconsolidados.

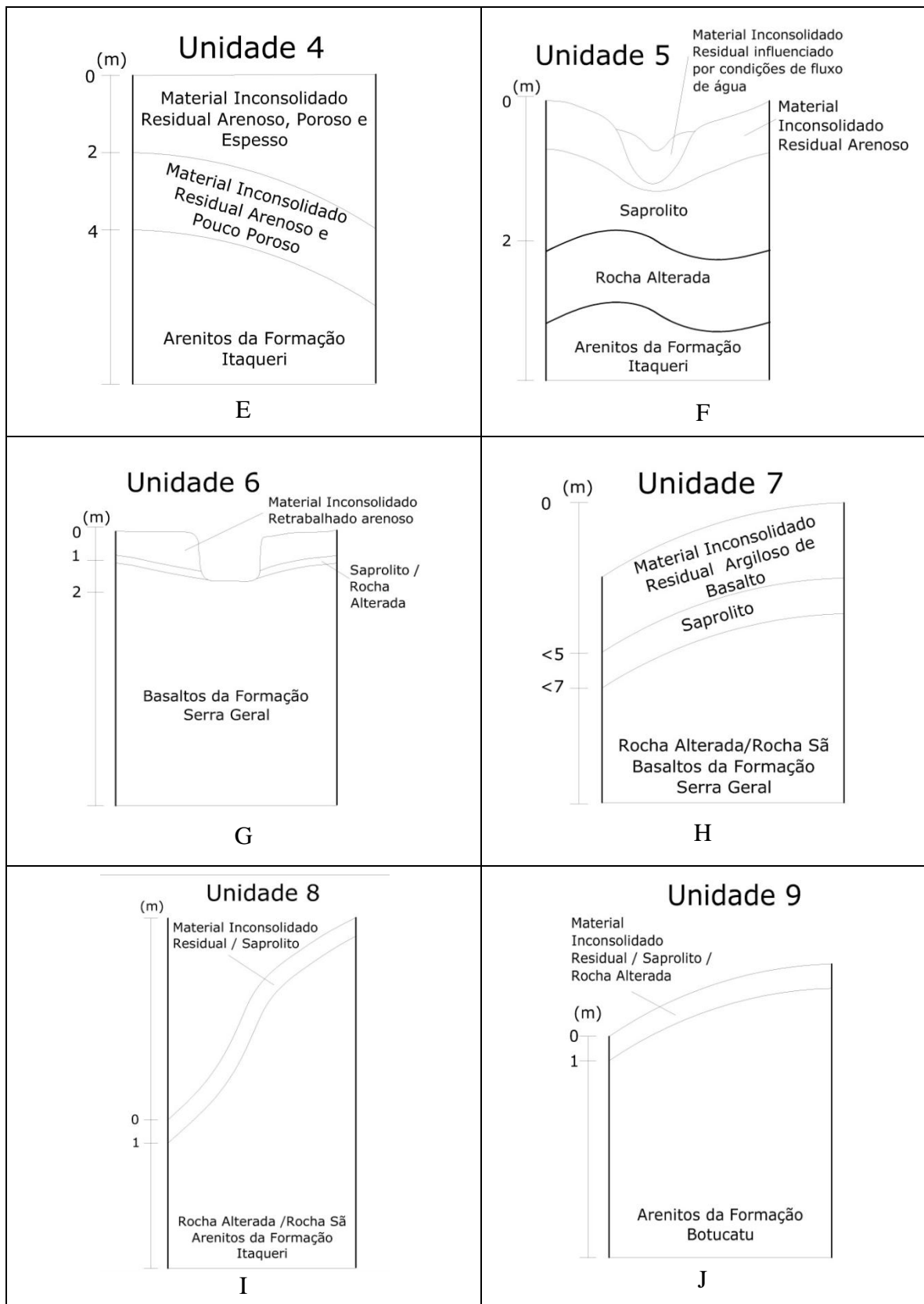


Figura 22 - Perfis estratigráficos de materiais inconsolidados.

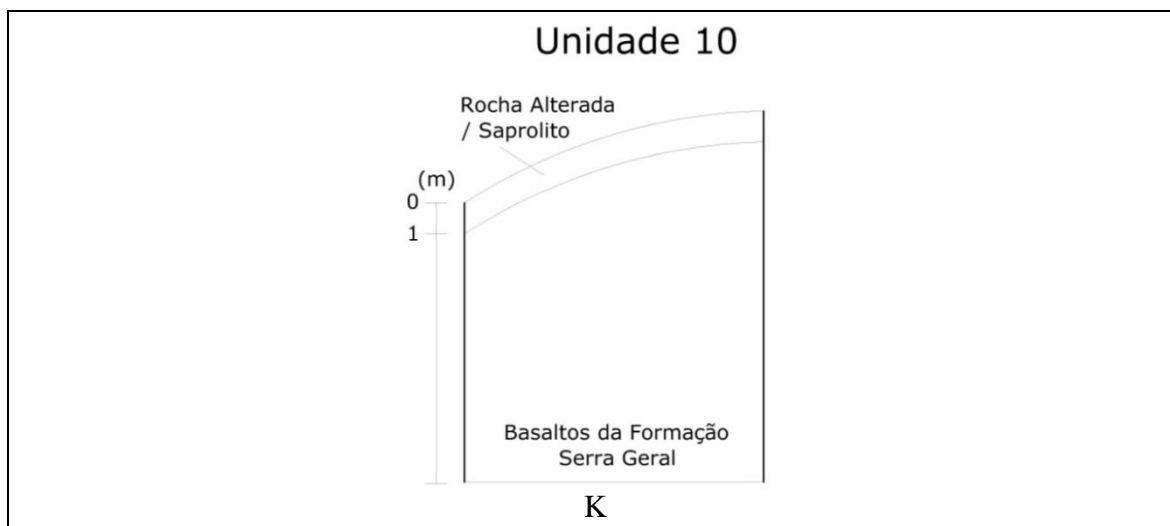


Figura 23 - Perfis estratigráficos de materiais inconsolidados.

6.2. Caracterização dos materiais inconsolidados

A partir dos materiais cartográficos e dados levantados previamente, selecionou-se alguns locais ao longo da área de estudo para realização dos ensaios de campo e coleta de amostras.

Alguns pontos foram escolhidos para realização tanto dos ensaios de resistência mecânica do solo a penetração e de infiltração com infiltrômetro de duplo anel além da coleta de amostras indeformadas e deformadas. Em outros locais, contudo, foram realizados apenas ensaios de resistência à penetração ou coleta de amostras e ensaio de infiltração, sendo realizados, nestes casos, também ensaio de resistência com solo próximos ao estado de saturação (úmido). Em relação à coleta de amostras, na maior parte dos locais foram abertas trincheiras para extração de amostras em profundidade diferentes, sendo que, em alguns locais, as amostras foram retiradas de taludes de estradas secundárias.

A Tabela 1 apresenta a denominação dos locais selecionados bem como os trabalhos realizados no respectivo local. Os mapas apresentados nos Apêndices D e E informam a localização na Bacia dos pontos descritos na Tabela 1. Os locais com realização de ensaios e retirada de amostras são marcados com “X”, e aqueles sem, marcados com “-”.

Tabela 1 - Denominação e detalhamento dos trabalhos realizados nos locais selecionados.

Denominação do Local	Unidade de Materiais Inconsolidados	Uso do solo	Retirada de amostras	Ensaio de resistência mecânica à penetração	Ensaio de infiltração com infiltrômetro de duplo anel
P37	4	Talude de estrada – Cana-de-açúcar	X - talude	-	-
P38	4	Talude de estrada - Eucalipto	X – talude	-	-

Continuação da Tabela 1 - Denominação e detalhamento dos trabalhos realizados nos locais selecionados.

Denominação do Local	Unidade de Materiais Inconsolidados	Uso do solo	Retirada de amostras	Ensaio de resistência mecânica à penetração	Ensaio de infiltração com infiltrômetro de duplo anel
P39	4	Talude de estrada – Cana-de-açúcar	X – talude	-	-
P44	1	Talude natural	X – talude (em duas profundidades)	-	-
P45	4	Talude de estrada – Cana-de-açúcar	X – talude	-	-
P60	2	Talude de estrada – Cana-de-açúcar	X – talude	-	-
DC7	4	Condição natural*	X – trincheira	-	X
DC8	4	Pasto	X – trincheira	-	X
DC13	4	Cana-de-açúcar	X – trincheira	-	-
DC14	2	Pasto	X – trincheira	-	-
DC15	2	Cana-de-açúcar	X – trincheira	-	-
DC16	4	Eucalipto	X – trincheira	-	-
DC17	2	Área sob linha de alta tensão (pasto)	X – trincheira	-	-
DC18	4	Cana-de-açúcar	X – trincheira	-	-
DC19	2	Cana-de-açúcar	X – trincheira	-	-
DC20 / PEN 9	2	Cana-de-açúcar	X – trincheira	X – seco e úmido	X
DC21 / PEN 23	8	Pasto	X – trincheira	X – seco e úmido	X
PEN 1	8	Estrada secundária	-	X – seco	-
PEN 2	1	Estrada secundária	-	X – seco	-
PEN 3	1	Cana-de-açúcar	-	X – seco	-
PEN 4	1	Cana-de-açúcar / terra arada	X – trincheira	X – seco e úmido	X
PEN 5	3	Cana-de-açúcar / terra arada	-	X – seco	-
PEN 6	3	Cana-de-açúcar / terra arada	-	X – seco	-
PEN 7	5	Estrada secundária	-	X – seco	-
PEN 8	2	Cana-de-açúcar / terra arada	-	X – seco	-
PEN 10	3	Estrada secundária	X – trincheira	X – seco e úmido	X
PEN 11	4	Carreador	X – trincheira	X – seco e úmido	X
PEN 12	6	Estrada secundária	-	X – seco	-
PEN 13	4	Cana-de-açúcar / terra arada	X – trincheira	X – seco e úmido	X
PEN 14	4	Cana-de-açúcar / terra arada	-	X – seco	-
PEN 15	1a	Carreador	-	X – seco	-
PEN 16	1a	Condição natural*	-	X – seco	-

Continuação da Tabela 1 - Denominação e detalhamento dos trabalhos realizados nos locais selecionados.

Denominação do Local	Unidade de Materiais Inconsolidados	Uso do solo	Retirada de amostras	Ensaio de resistência mecânica à penetração	Ensaio de infiltração com infiltrômetro de duplo anel
PEN 17	10	Estrada secundária	-	X – seco	-
PEN 18	7	Pasto	X – trincheira	X – seco e úmido	X
PEN 19	7	Estrada secundária	-	X – seco	-
PEN 20	4	Carreador	-	X – seco	-
PEN 21	2	Estrada secundária	-	X – seco e úmido	-
PEN 22	4	Eucalipto	-	X – seco	-

* Condição considerada em função da não utilização do solo para fins agrícolas, com presença de gramíneas e, no caso do local PEN 16, vegetação arbóreo-arbustiva.

Os resultados obtidos a partir dos ensaios de campo e de laboratório foram agrupados em função das unidades de materiais inconsolidados relacionadas aos pontos de amostragem.

6.2.1. Unidade 1

6.2.1.1. Caracterização geral

Os resultados dos ensaios de caracterização geral dos materiais coletados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Caracterização geral dos materiais inconsolidados referentes a Unidade 1.

		Amostras				
		P44A	P44B	PEN 4A	PEN 4B	
Granulometria com defloculante (%)	Pedregulho	0	0	2	1	
	Areia	Grossa	1	2,5	2	2
		Média	30	40,5	32	35
		Fina	37,5	35	34	34
	Silte	20,5	5	14	14,5	
Argila	11	17	16	13,5		
ρ_s^1 (g/cm ³)		2,71	2,60	2,67	2,65	
ρ_d^2 (g/cm ³)		1,68	1,69	1,72	1,67	
e^3		0,61	0,54	0,55	0,58	
n^4 (%)		37,94	35,00	35,58	36,72	
Condutividade hidráulica saturada K _{20°C} (cm/s)		*	*	2,08.10 ⁻³	*	

¹Massa específica dos sólidos. ²Massa específica aparente seca. ³Índice de vazios.

⁴Porosidade.

* Sem medição de vazão.

De modo geral, a Unidade 1 apresenta materiais inconsolidados areno-argilosos, com variação entre areia média e fina em função da profundidade, com teores de argila inferiores a 20%. No caso do ponto PEN 4, verifica-se alguma presença de materiais mais grosseiros, classificados como pedregulho (com diâmetro entre 2 e 4 mm).

A massa específica aparente seca dos materiais apresentou-se em torno de 1,69 g/cm³, com valores próximos para as duas profundidades do ponto P44, associado ao tipo de uso do solo neste local, sem passagem de maquinários agrícolas ou pisoteio de animais. No caso do ponto PEN 4, sob cultivo de cana-de-açúcar, a camada mais superficial apresenta maior massa específica aparente seca, o que, juntamente ao índice de vazios e porosidade, reflete um processo de compactação mecânica.

6.2.1.2. Erodibilidade

A Tabela 3 apresenta os índices de absorção de água, perda de massa por imersão e de erodibilidade, sendo o último determinado pelos métodos de Nogami & Villibor (1979) e Pejon (1992), para cada amostra referente aos materiais amostrados no ponto PEN 4. Os gráficos da Figura 24 apresentam a distribuição dos valores de erodibilidade das amostras tendo como referências as retas associadas aos índices de erodibilidade equivalente a 1, para os dois métodos adotados.

Tabela 3 - Índices de absorção, perda de massa por imersão e de erodibilidade para o ponto PEN 4.

Ponto	Amostra	S	P (%)	E (Nogami & Villibor, 1979) E=52*S/P	E (Pejon, 1992) E=40*S/P
Pen 4A	Pen4A1	0,16	52,83	0,16	0,12
	Pen4A3	0,13	74,97	0,09	0,07
	Pen4A4	0,18	30,94	0,30	0,23
Pen 4B	Pen 4B2	0,57	68,82	0,43	0,33
	Pen 4B3	0,57	70,45	0,42	0,32
	Pen 4B4	0,57	80,46	0,37	0,28
	Pen 4B5	0,63	21,68	1,52	1,17

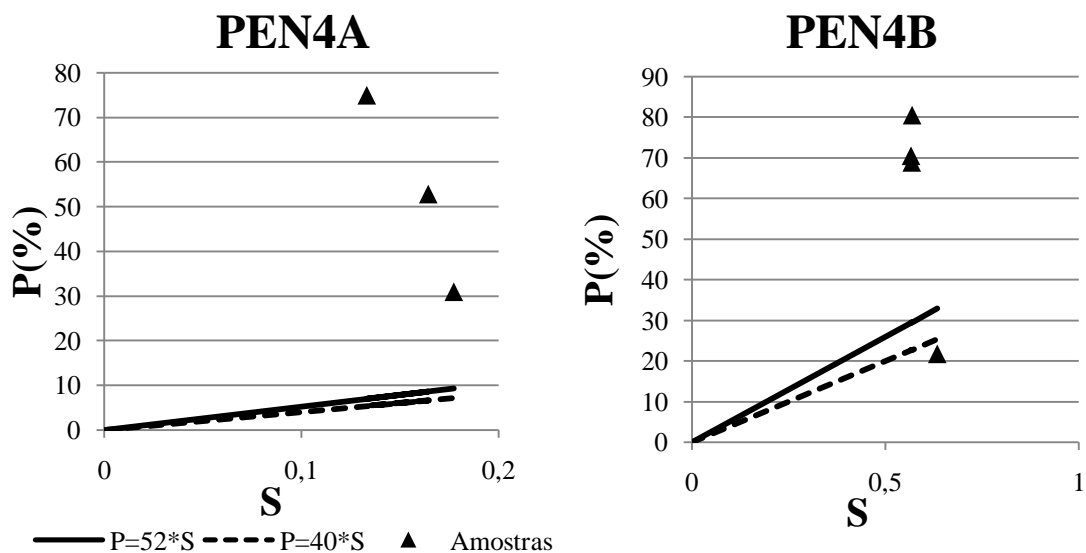


Figura 24 - Distribuição dos valores de erodibilidade das amostras para o ponto PEN 4.

As amostras de ambas as profundidades apresentaram reduzidos valores de erodibilidade, refletindo uma alta erodibilidade destes materiais, sobretudo para o mais superficial (PEN 4A).

6.2.1.3. Infiltração com infiltrômetro de duplo anel

A variação da infiltração para o local PEN 4 é descrita pela curva de infiltração de água no solo apresentada na Figura 25, tendo como condutividade hidráulica saturada média $3,6 \cdot 10^{-4}$ cm/s, após atingido regime constante. A frente de molhamento atingiu cerca de 0,60 m, com um tempo total de ensaio de 85 minutos.

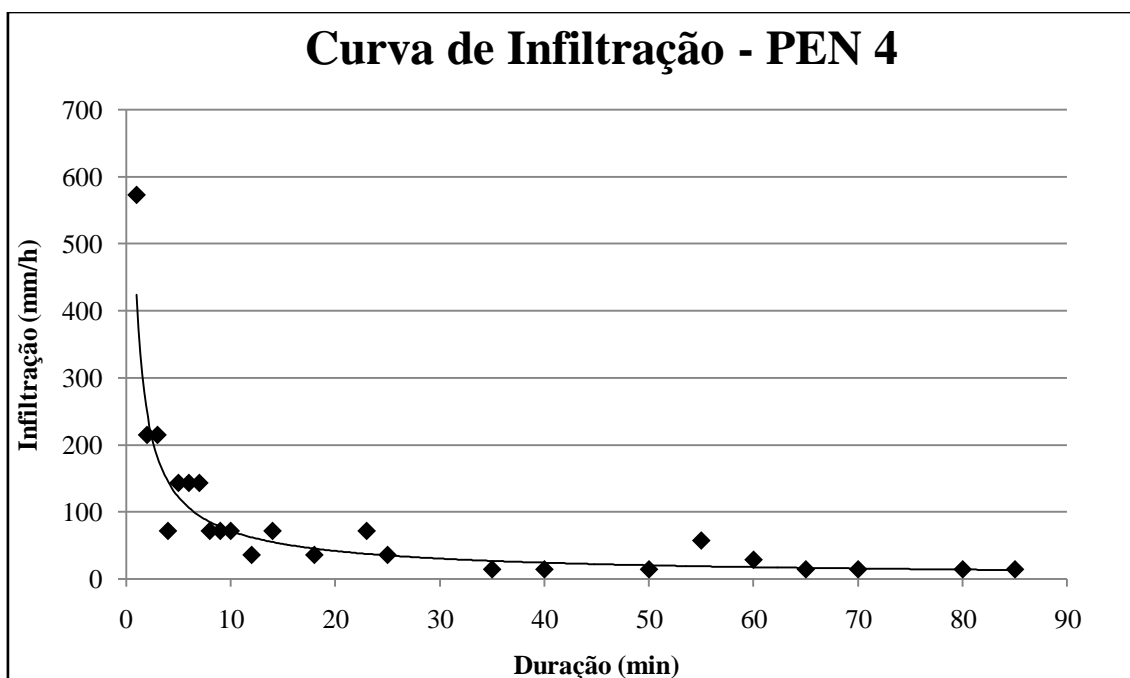


Figura 25 - Curva de infiltração para o ponto PEN 4.

6.2.1.4. Resistência mecânica à penetração

As curvas de resistência mecânica do solo a penetração são apresentadas nas Figuras 26, 27 e 28.

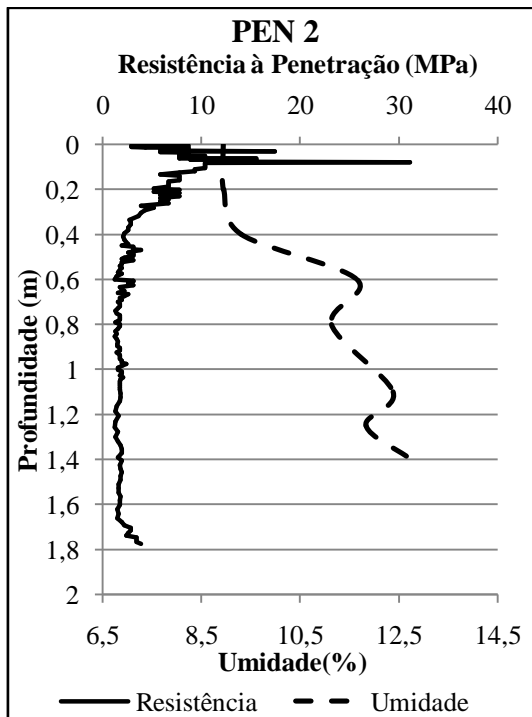


Figura 26 - Resistência mecânica à penetração para o ponto PEN 2.

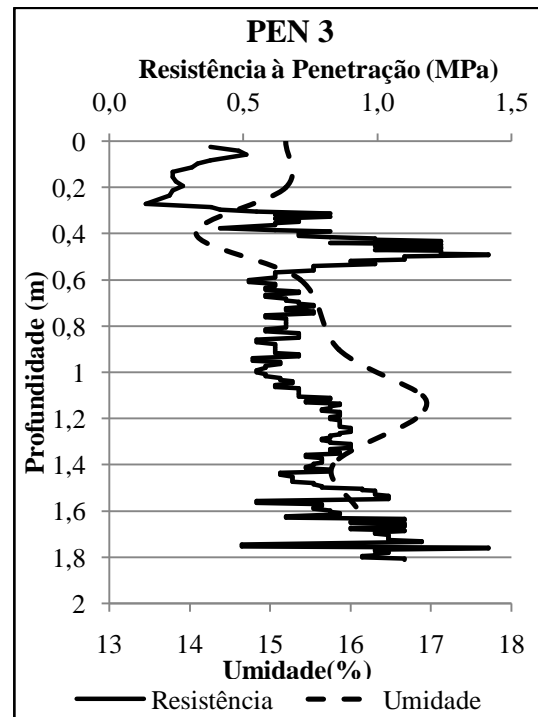


Figura 27 - Resistência mecânica à penetração para o ponto PEN 3.

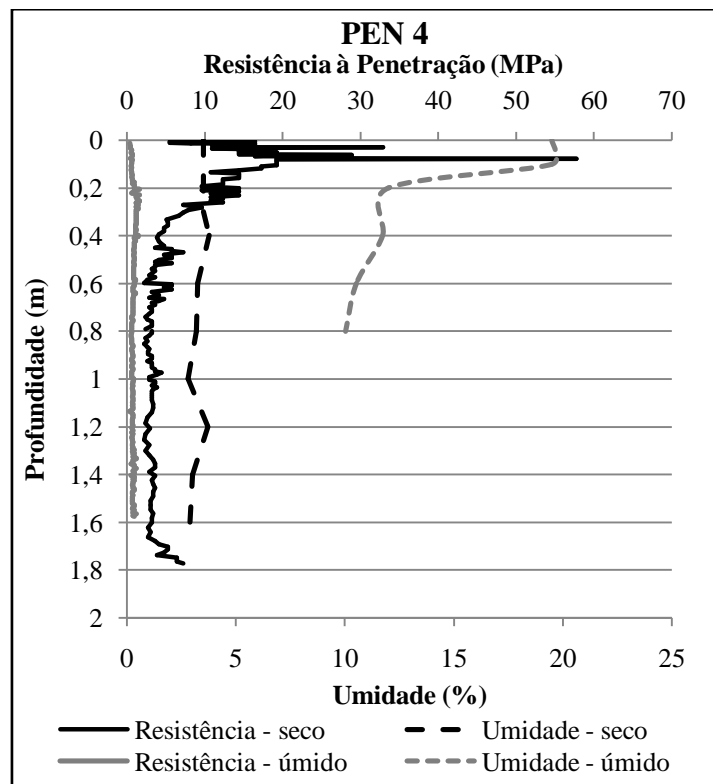


Figura 28 - Resistência mecânica à penetração para o ponto PEN 4, antes e após ensaio de infiltração.

Dentre os três locais, a maior resistência observada foi referente ao local PEN 4 (em meio a cultivo de cana-de-açúcar), com valor médio entre 15 e 20 MPa na profundidade de 0-20 cm, com redução de 12 MPa para 4 MPa a 40 cm de profundidade, com este valor constante até 1,80 m de profundidade.

A resistência nas camadas superficiais (0-20 cm) de solo no ponto PEN 2 (estrada secundária) também mostraram-se elevadas, com valor médio entre 8 e 15 MPa, reduzindo de 7 para 2 MPa a 40 cm de profundidade e mantendo um valor médio de 2 MPa até 1,80 m de profundidade. O ponto PEN 3 apresentou baixa resistência, com valores inferiores a 1,5 MPa ao longo de toda a profundidade analisada.

No caso do ponto PEN 4, também realizou-se o ensaio com penetrômetro após o ensaio de infiltração, sendo observada uma redução da resistência à penetração, com valores inferiores a 1,5 MPa ao longo de toda a profundidade do ensaio.

6.2.2. Unidade 1a

Para esta Unidade de materiais inconsolidados, foram realizados apenas ensaios de resistência mecânica à penetração.

6.2.2.1. Resistência mecânica à penetração

As curvas de resistência mecânica do solo a penetração são apresentadas nas Figuras 29 e 30.

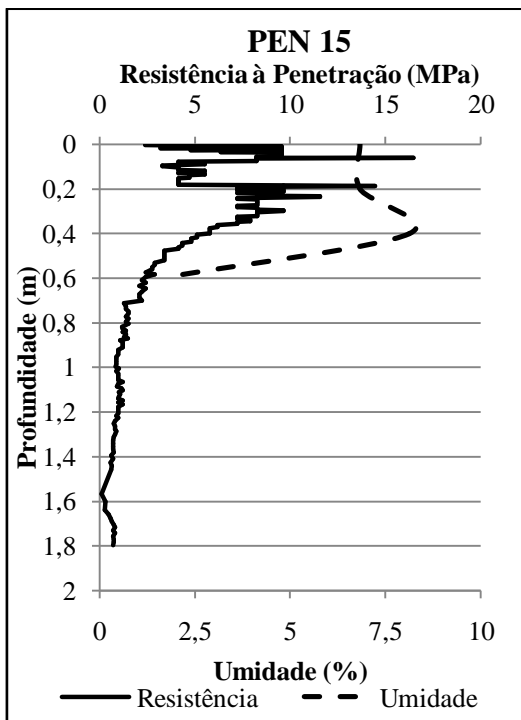


Figura 29 - Resistência mecânica à penetração para o ponto PEN 15.

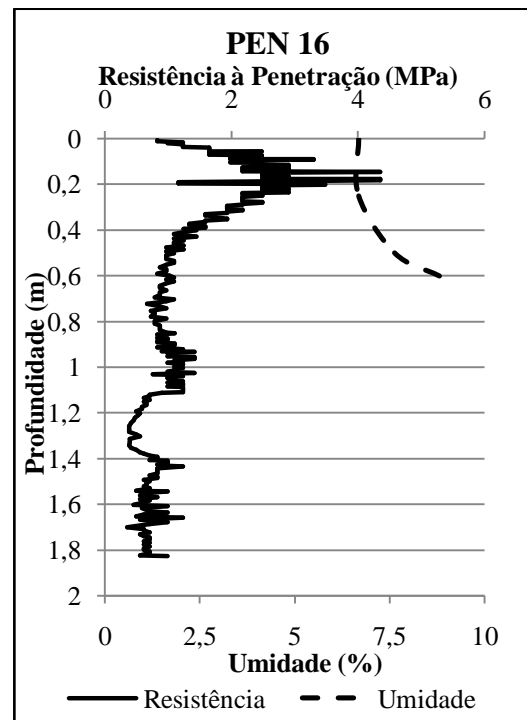


Figura 30 - Resistência mecânica à penetração para o ponto PEN 16.

Dentre os dois locais, a maior resistência observada foi referente ao local PEN 15, onde o ensaio foi realizado em carreador, apresentando valor médio variando entre 10 MPa nos 10 cm superficiais, com redução para 5MPa e aumento novamente para cerca de 10 MPa até 40 cm de profundidade, e, conforme maiores profundidade, redução para 2 MPa após 1,2 m. No caso do ponto PEN 16, as resistências mostraram-se reduzidas, entre 2 a 4 MPa nos 20 cm superficiais, e reduzindo para 1 MPa após 60 cm de profundidade.

Ressalta-se a variação nos valores de resistência para diferentes tipos de uso do solo, mesmo com os locais de ensaio próximos e sob mesma tipologia de materiais inconsolidados.

6.2.3. Unidade 2

6.2.3.1. Caracterização geral

Os resultados dos ensaios de caracterização geral dos materiais coletados são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Caracterização geral dos materiais inconsolidados referentes à Unidade 2.

		Amostra													
		P60	DC 14A	DC 14B	DC 15A	DC 15B	DC 17A	DC 17B	DC 19A	DC 19B	DC20A / PEN 9A	DC20B / PEN 9B	PEN 21A	PEN 21B	
Granulometria com defloculante	Pedregulho	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1,5	
	Areia	Grossa	3,5	2	2	0,7	0,6	2	1,5	2	2	4	4	2,5	2
		Média	31,5	31	32	13,3	10,9	35,5	34,5	34	29	27	30	29,5	26,5
		Fina	32,5	42	29	33	32,5	35,5	33	41	37	23	21	30,5	31,2
	Silte	13	13	7	14,5	17	5,5	7	9,5	10	8	8	10,5	10,8	
Argila	19,5	12	30	38,5	39	21,5	24	13,5	22	38	37	26	28		
ρ_s^1 (g/cm ³)		2,73	2,56	2,41	2,77	2,93	2,64	2,59	2,55	2,57	2,70	2,69	2,69	2,68	
ρ_d^2 (g/cm ³)		1,64	1,56	1,33	1,51	1,38	1,71	1,53	1,85	1,61	1,57	1,29	1,57	**	
e^3		0,67	0,64	0,81	0,84	1,12	0,54	0,69	0,38	0,59	0,72	1,08	0,71	**	
n^4 (%)		39,96	38,86	44,81	45,60	52,86	35,26	40,83	27,28	37,19	41,87	52,01	41,47	**	
Condutividade hidráulica saturada $K_{20^\circ C}$ (cm/s)		$7,5 \cdot 10^{-3}$	*	$3,8 \cdot 10^{-2}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$4,1 \cdot 10^{-3}$	$7,8 \cdot 10^{-5}$	$4,7 \cdot 10^{-2}$	$7,2 \cdot 10^{-3}$	$9,5 \cdot 10^{-3}$	*	**	

¹Massa específica dos sólidos. ²Massa específica aparente seca. ³Índice de vazios. ⁴Porosidade.

* Sem medição de vazão.

**Não foram retiradas amostras indeformadas do ponto PEN 21B, em função da dificuldade tanto para abertura da trincheira quanto para moldar e cravar os tubos de PVC no solo.

De modo geral, a Unidade 2 apresenta uma heterogeneidade quanto a granulometria, com predomínio de materiais inconsolidados areno-argilosos, com variação entre areia média e fina em função da profundidade e teores de argila variando entre 12% e 39%. Os pontos DC15 e DC20 (PEN 9) apresentam os maiores teores de argila, com cerca de 38%.

A massa específica aparente seca dos materiais apresentou-se em torno de 1,55 g/cm³, com valores superiores para os materiais superficiais em relação aos coletados em maiores profundidades, refletindo efeitos da compactação mecânica devido ao uso agrícola.

6.2.3.2. Erodibilidade

As Tabelas 5 a 10 apresentam os índices de absorção de água, perda de massa por imersão e de erodibilidade, sendo o último determinado pelos métodos de Nogami & Villibor (1979) e Pejon (1992), para cada amostra referente aos materiais amostrados na Unidade 2. Os gráficos das Figuras 31 a 36 apresentam a distribuição dos valores de erodibilidade das amostras tendo como referências as retas associadas aos índices de erodibilidade equivalente a 1, para os dois métodos adotados.

Tabela 5 - Índices de absorção, perda de massa por imersão e de erodibilidade para o ponto DC 14.

Ponto	Amostra	S	P (%)	E (Nogami & Villibor, 1979) E=52*S/P	E (Pejon, 1992) E=40*S/P
DC 14A	DC14A1	0,48	0,57	43,41	33,39
	DC14A2	0,66	0,43	80,05	61,58
	DC14A3	0,51	0,90	29,34	22,57
	DC14A4	0,43	0,32	69,80	53,69
	DC14A5	0,63	0,49	66,52	51,17
	DC14A6	0,46	0,34	70,52	54,25
DC 14B	DC14B1	1,31	3,86	17,60	13,54
	DC14B2	2,00	3,83	27,16	20,89
	DC14B3	1,26	7,45	8,76	6,74
	DC14B4	1,87	85,82	1,13	0,87
	DC14B5	1,29	4,63	14,52	11,17
	DC14B6	1,34	13,08	5,34	4,10

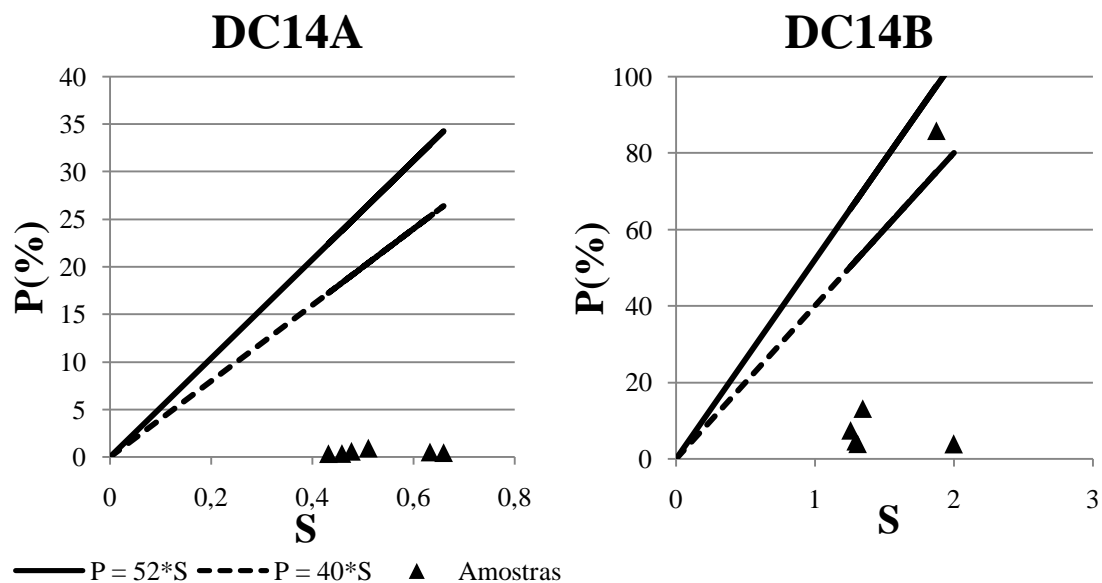


Figura 31 - Distribuição dos valores de erodibilidade das amostras para o ponto DC 14.

Tabela 6 - Índices de absorção, perda de massa por imersão e de erodibilidade para o ponto DC 15.

Ponto	Amostra	S	P (%)	E (Nogami & Villibor, 1979) E=52*S/P	E (Pejon, 1992) E=40*S/P
DC 15A	DC15A1	0,46	0,94	25,09	19,30
	DC15A2	0,25	0,44	29,31	22,55
	DC15A3	0,27	6,24	2,27	1,75
	DC15AXX	0,31	1,75	9,10	7,00
DC 15B	DC15B1	0,41	0,49	43,30	33,31
	DC15B2	0,38	0,73	26,96	20,74
	DC15B3	0,25	0,64	20,45	15,73
	DC15B4	0,19	0,75	13,18	10,14
	DC15B5	0,36	0,64	29,40	22,62

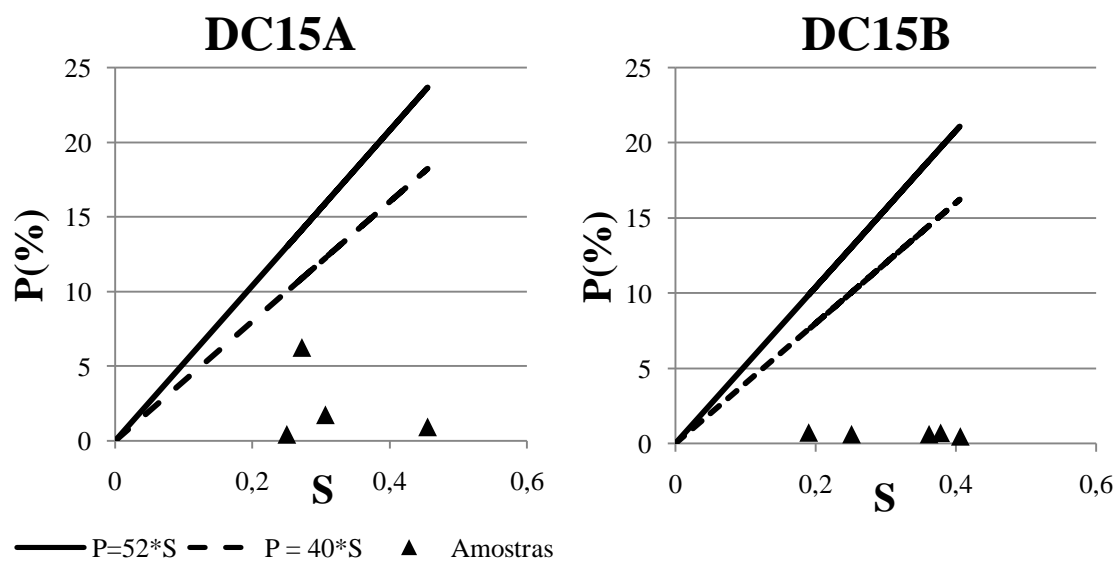


Figura 32 - Distribuição dos valores de erodibilidade das amostras para o ponto DC 15.

Tabela 7 - Índices de absorção, perda de massa por imersão e de erodibilidade para o ponto DC 17.

Ponto	Amostra	S	P (%)	E (Nogami & Villibor, 1979) E=52*S/P	E (Pejon, 1992) E=40*S/P
DC 17A	DC17A1	0,13	5,21	1,29	0,99
	DC17A2	0,81	12,20	3,45	2,65
	DC17A3	1,05	0,55	99,96	76,89
	DC17A4	0,56	4,89	5,98	4,60
	DC17A5	1,17	0,33	182,85	140,65
	DC17A6	1,34	4,73	14,71	11,32
DC 17B	DC17B1	0,76	0,75	52,66	40,51
	DC17B2	1,58	4,49	18,34	14,11
	DC17B3	1,07	0,40	140,58	108,14
	DC17B4	1,70	66,80	1,32	1,02
	DC17B5	1,75	1,89	48,33	37,18
	DC17B6	0,80	0,60	69,86	53,74

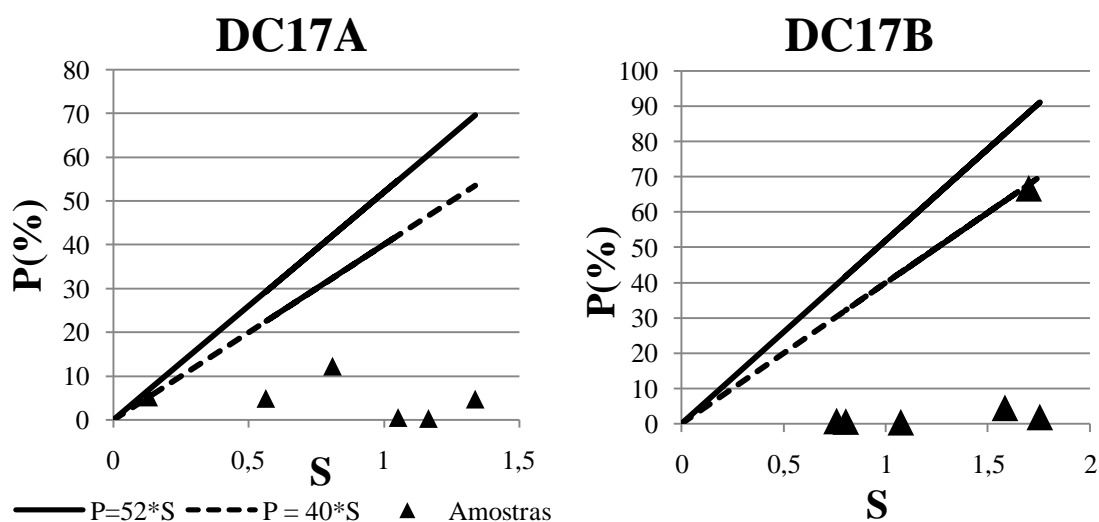


Figura 33 - Distribuição dos valores de erodibilidade das amostras para o ponto DC 17.

Tabela 8 - Índices de absorção, perda de massa por imersão e de erodibilidade para o ponto DC 19.

Ponto	Amostra	S	P (%)	E (Nogami & Villibor, 1979) E=52*S/P	E (Pejon, 1992) E=40*S/P
DC 19A	DC19A1	0,29	1,98	7,73	5,95
	DC19A2	0,27	8,29	1,67	1,28
	DC19A3	0,27	12,70	1,11	0,85
	DC19A4	0,26	15,35	0,89	0,68
	DC19A5	0,24	8,17	1,55	1,19
DC 19B	DC19B1	0,42	18,44	1,18	0,90
	DC19B2	0,45	29,25	0,79	0,61
	DC19B3	0,28	26,69	0,54	0,42
	DC19B4	0,50	51,33	0,51	0,39
	DC19B5	0,30	26,38	0,58	0,45
	DC19B6	0,30	20,38	0,76	0,58

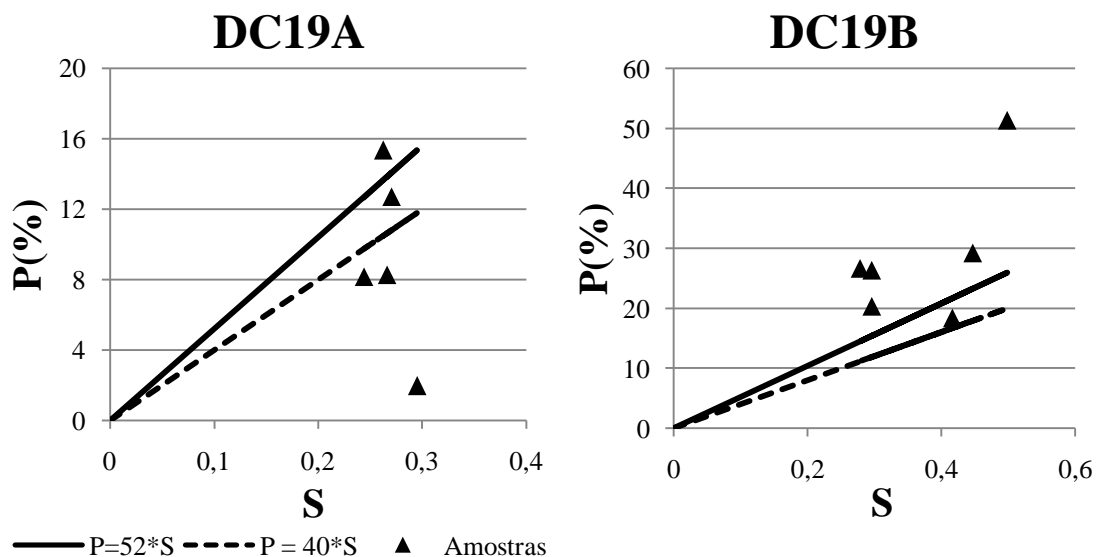


Figura 34 - Distribuição dos valores de erodibilidade das amostras para o ponto DC 19.

De modo geral, as amostras referentes aos pontos DC 14 e DC 15 apresentaram índices de erodibilidade variados, sendo, para a maioria das amostras, superiores a 1, tanto pelo índice de Nogami e Villibor (1979) quanto pelo de Pejon (1992).

Em relação ao ponto DC 15, as amostras dos materiais superficiais mostraram valores mais próximos a 1 comparados aos mais profundos, refletindo uma erodibilidade ligeiramente superior desses materiais. Por outro lado, as amostras dos pontos DC 14 apresentaram comportamento contrário, com índices mais próximos a 1 referentes aos materiais mais profundos.

O ponto DC 17 mostra uma heterogeneidade de valores, dificultando uma caracterização mais precisa neste caso. Destacam-se alguns índices muito elevados, como para as amostras DC17A5 e DC17B3, com valores superiores a 100. Essa discrepância está associada ao reduzido índice de perda de massa por imersão, refletindo um baixo desprendimento de materiais do corpo da amostra. Contudo, também possui amostras com índices próximos a 1, como DC17A1 e DC17B4.

As amostras do ponto DC 19 possui baixos índices de erodibilidade, próximos a 1. Destaca-se os elevados índices de perda de massa por imersão, com grande desprendimento de material.

Tabela 9 - Índices de absorção, perda de massa por imersão e de erodibilidade para o ponto DC 20 / PEN 9.

Ponto	Amostra	S	P (%)	E (Nogami & Villibor, 1979) E=52*S/P	E (Pejon, 1992) E=40*S/P
DC 20A / PEN 9A	DC20A1	0,20	0,68	15,03	11,56
	DC20A2	0,33	2,54	6,78	5,21
	DC20A3	0,27	2,57	5,42	4,17
	DC20A4	0,31	1,48	10,89	8,37
	DC20A5	0,28	1,92	7,48	5,76
	DC20A6	0,41	0,99	21,75	16,73
DC 20B / PEN 9B	DC20B1	0,52	9,01	2,99	2,30
	DC20B2	0,40	8,50	2,46	1,89
	DC20B3	0,43	4,00	5,64	4,34
	DC20B4	0,28	5,79	2,52	1,94
	DC20B5	0,35	2,32	7,78	5,98

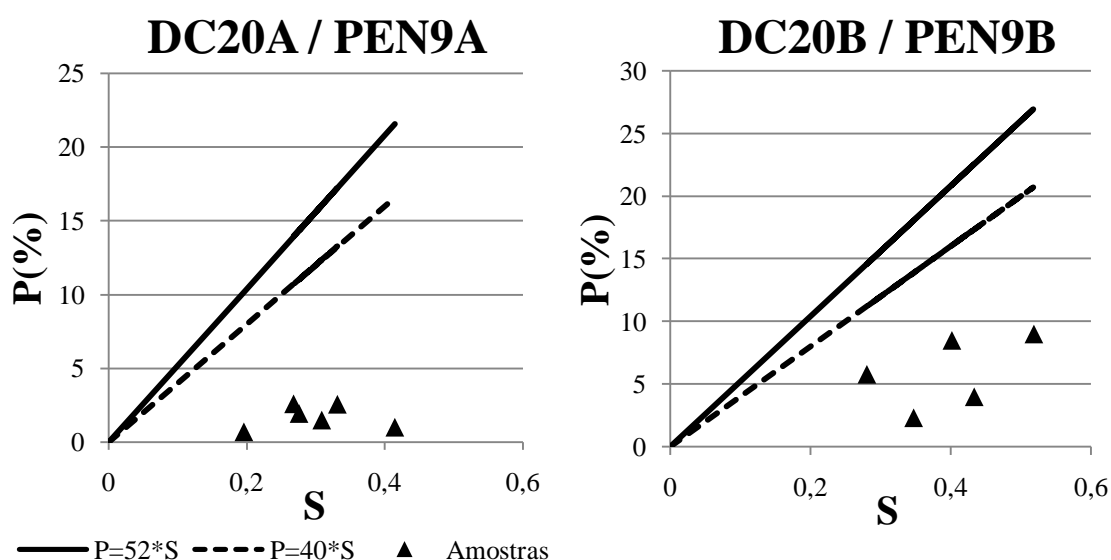


Figura 35 - Distribuição dos valores de erodibilidade das amostras para o ponto DC 20 / PEN 9A .

Tabela 10 - Índices de absorção, perda de massa por imersão e de erodibilidade para o ponto PEN 21.

Ponto	Amostra	S	P (%)	E (Nogami & Villibor, 1979) E=52*S/P	E (Pejon, 1992) E=40*S/P
PEN 21A	Pen21A1	0,65	11,66	2,91	2,24
	Pen21A2	0,31	10,15	1,60	1,23
	Pen21A3	0,53	6,31	4,34	3,34
	Pen21A4	0,39	7,18	2,79	2,14
	Pen21A5	0,30	6,22	2,54	1,95

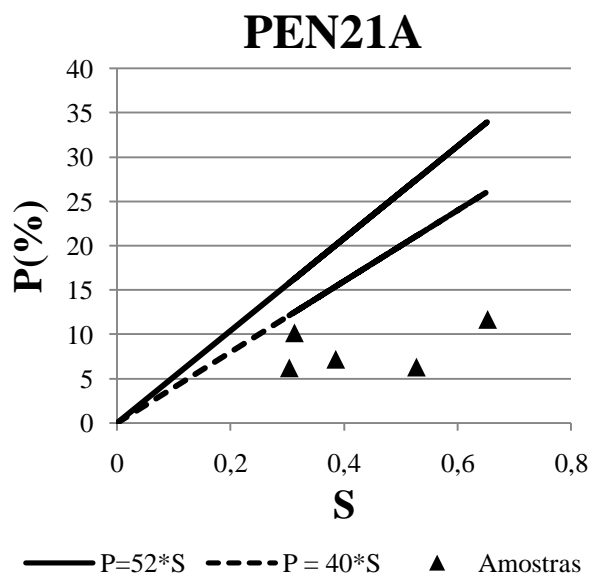


Figura 36 – Distribuição dos valores de erodibilidade das amostras para o ponto PEN 21 .

O ponto DC 20 / PEN 9 possui índices de erodibilidade superiores a 1, tanto pelo método de Nogami e Villibor (1979) quanto pelo de Pejon (1992), sendo superiores para o material mais superficial quando comparado ao mais profundo. Contudo, tais índices são, na maioria, inferiores a 10, reduzidos, portanto, quando confrontados a outros pontos.

As amostras referente ao ponto PEN 21A também apresenta índices pouco superiores a 1, porem todos inferiores a 5, refletindo uma erodibilidade ligeiramente alta, tomando como base amostras dos diversos pontos da Unidade 2.

6.2.3.3. Infiltração com infiltrômetro de duplo anel

A variação da infiltração para o local DC 20A / PEN 9 é descrita pela curva de infiltração de água no solo apresentada na Figura 37, tendo como condutividade hidráulica saturada média $1,2 \cdot 10^{-3}$ cm/s, após atingido regime constante. A frente de molhamento atingiu cerca de 0,50 m, com um tempo total de ensaio de 120 minutos.

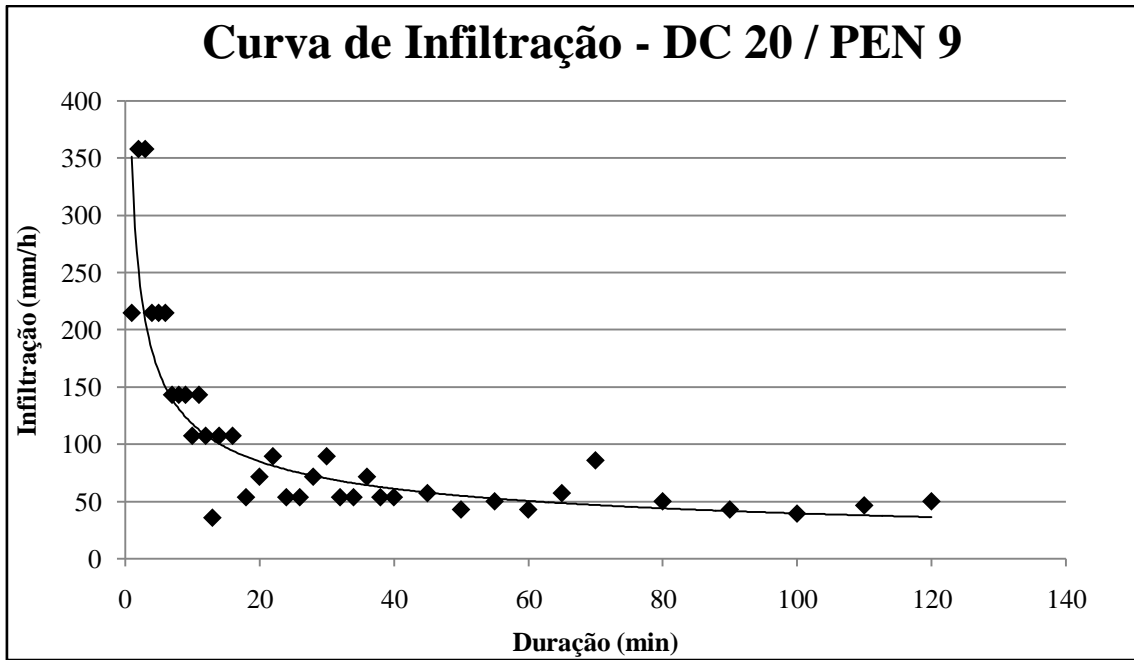


Figura 37 - Curva de infiltração para o ponto DC 20 / PEN 9.

A variação da infiltração para o local PEN 21 é descrita pela curva de infiltração de água no solo apresentada na Figura 38, tendo como condutividade hidráulica saturada média $2,2 \cdot 10^{-4}$ cm/s, após atingido regime constante. A frente de molhamento atingiu cerca de 0,20 m, com um tempo total de ensaio de 141 minutos.

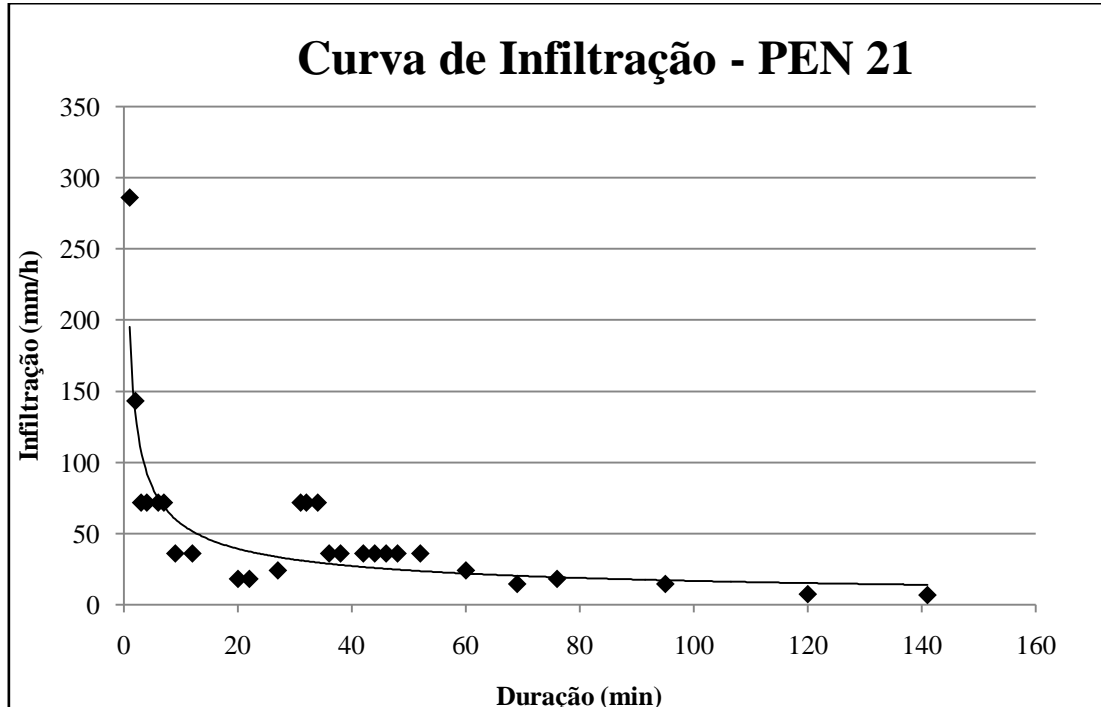


Figura 38 - Curva de infiltração para o ponto DC 20 / PEN 9.

6.2.3.4. Resistência mecânica à penetração

As curvas de resistência mecânica do solo a penetração são apresentadas nas Figuras 39 a 42.

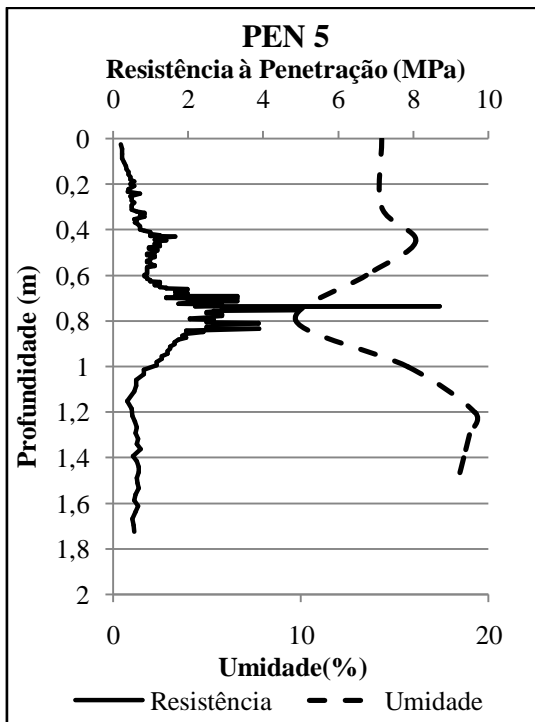


Figura 39 - Resistência mecânica à penetração para o ponto PEN 5.

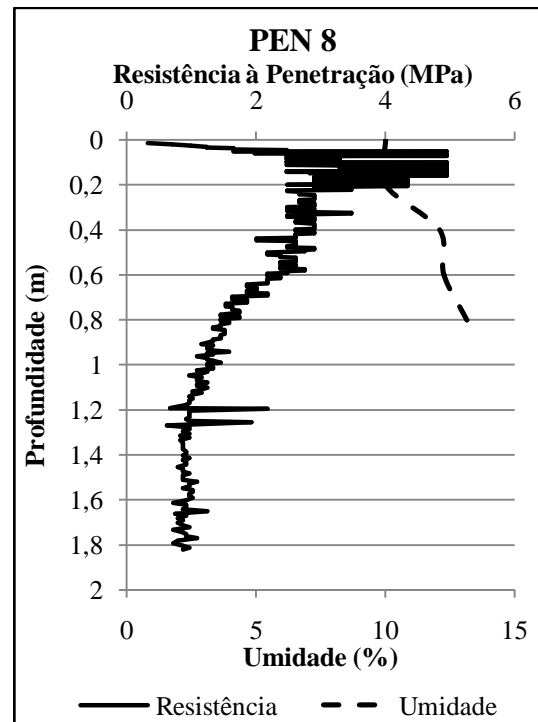


Figura 40 - Resistência mecânica à penetração para o ponto PEN 8.

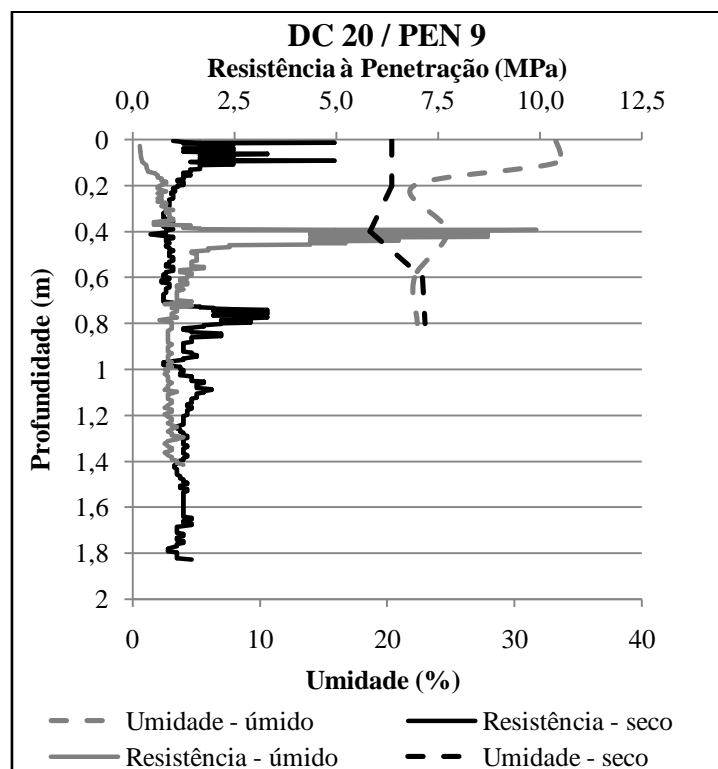


Figura 41 - Resistência mecânica à penetração para o ponto DC 20 / PEN 9, antes e após ensaio de infiltração.

O ponto PEN 5 apresenta uma baixa resistência mecânica nas camadas superficiais, inferior a 1 MP, com aumento para cerca de 3 MPa a 80 cm de profundidade e redução novamente para abaixo de 1 MPa após 1 m de profundidade. Por outro lado, o ponto PEN 8 possui uma resistência de 4 MPa na camada 10-20 cm, com redução gradual para cerca de 1 MPa a 1,2 m de profundidade.

O ponto DC20 / PEN 9 possui uma resistência de 2 MPa nos 15 cm superficiais, com redução para 1 MPa em seguida e uma aumento para cerca de 2 MPa após 70 cm de profundidade, mantendo-se constante até 1,8 m. Após ensaio de infiltração, a resistência é inferior nas camadas superficiais, com gradual aumento chegando a 7,5 MPa a 50 cm de profundidade, reduzindo, em seguida, para cerca de 1,5 MPa.

Com uma variação parecida para o solo no estado seco do ponto DC20 / PEN 9, o ponto PEN 21 apresenta uma alta resistência mecânica na camada 0-20 cm, superior a 10 MPa e chegando a 20 MPa, reduzindo para 2 MPa e aumentando novamente para cerca de 4 MPa (com pico de 18MPa a 60 cm de profundidade), reduzindo, por fim, para cerca de 2 MPa a partir de 1 m. Esse comportamento também é verificado após o ensaio de infiltração, com resistência entre 3 MPa e 4 MPa na camada 0-20 cm, reduzindo para 2 MPa e aumentando novamente para 4 MPa entre 50 cm e 1m de profundidade, reduzindo finalmente para cerca de 2,5 MPa até 1,5 m.

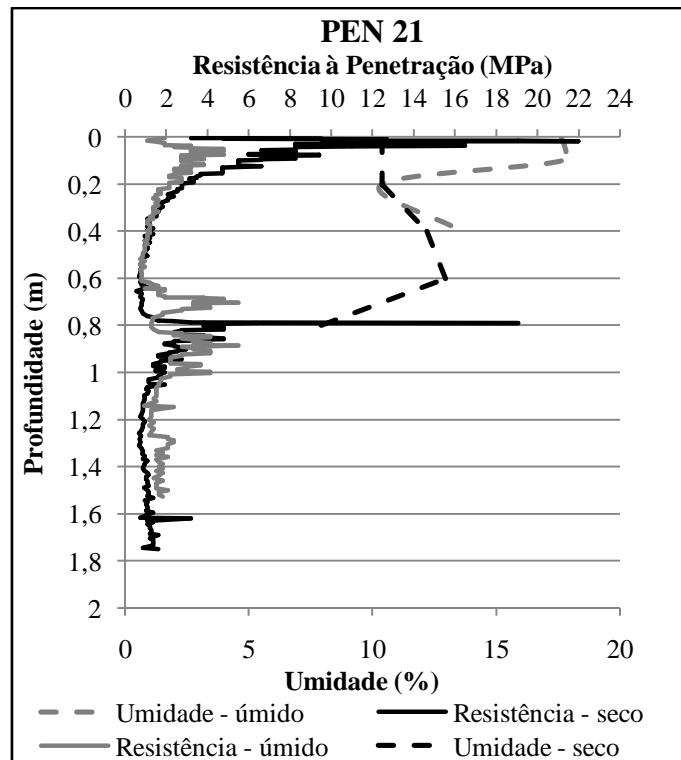


Figura 42 - Resistência mecânica à penetração para o ponto PEN 21, antes e após ensaio de infiltração.

6.2.4. Unidade 3

6.2.4.1. Caracterização geral

Os resultados dos ensaios de caracterização geral dos materiais coletados são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Caracterização geral dos materiais inconsolidados referentes à Unidade 3.

		Amostras		
		PEN 10A	PEN 10B	
Granulometria com defloculante	Pedregulho		0	0
	Areia	Grossa	2	1,5
		Média	41	34,5
		Fina	35,5	37
	Silte		8	8
Argila		13,5	19	
ρ_s^1 (g/cm ³)		2,61	2,66	
ρ_a^2 (g/cm ³)		1,93	1,69	
e^3		0,36	0,58	
n^4 (%)		26,29	36,52	
Condutividade hidráulica saturada $K_{20^\circ C}$ (cm/s)		*	$5,55 \cdot 10^{-4}$	

¹Massa específica dos sólidos. ²Massa específica aparente seca. ³Índice de vazios.

⁴Porosidade.

* Sem medição de vazão.

Os materiais analisados mostraram-se areno-argilosos, com teores de argila inferiores a 20%. A massa específica aparente seca dos materiais apresentou-se elevada, sobretudo para o material referente a camada mais superficial, o que juntamente a ao índice de vazios e porosidade revela um processo de compactação mecânica, reflexo do tráfego de veículos e maquinários agrícolas pelo carreador.

6.2.4.2. Erodibilidade

A Tabela 12 apresenta os índices de absorção de água, perda de massa por imersão e de erodibilidade, sendo o último determinado pelos métodos de Nogami & Villibor (1979) e Pejon (1992), para cada amostra referente aos materiais amostrados na Unidade 3. Os gráficos da Figura 43 apresentam a distribuição dos valores de erodibilidade das amostras tendo como referências as retas associadas aos índices de erodibilidade equivalente a 1, para os dois métodos adotados.

Tabela 12 - Índices de absorção, perda de massa por imersão e de erodibilidade para o ponto PEN 10.

Ponto	Amostra	S	P (%)	E (Nogami & Villibor, 1979) E=52*S/P	E (Pejon, 1992) E=40*S/P
PEN 10A	Pen10A*	0,41	8,10	2,61	2,00
	Pen10A1	0,38	2,45	8,01	6,16
	Pen10A2*	0,36	13,21	1,42	1,09
	Pen10A3	0,25	8,14	1,60	1,23
	Pen10A4	0,19	9,93	0,99	0,76
PEN 10B	Pen10B1	0,25	2,97	4,46	3,43
	Pen10B2	0,29	3,84	3,87	2,98
	Pen10B3	0,23	2,30	5,29	4,07
	Pen10B4	0,25	4,07	3,20	2,46
	Pen10B5	0,19	5,12	1,92	1,48

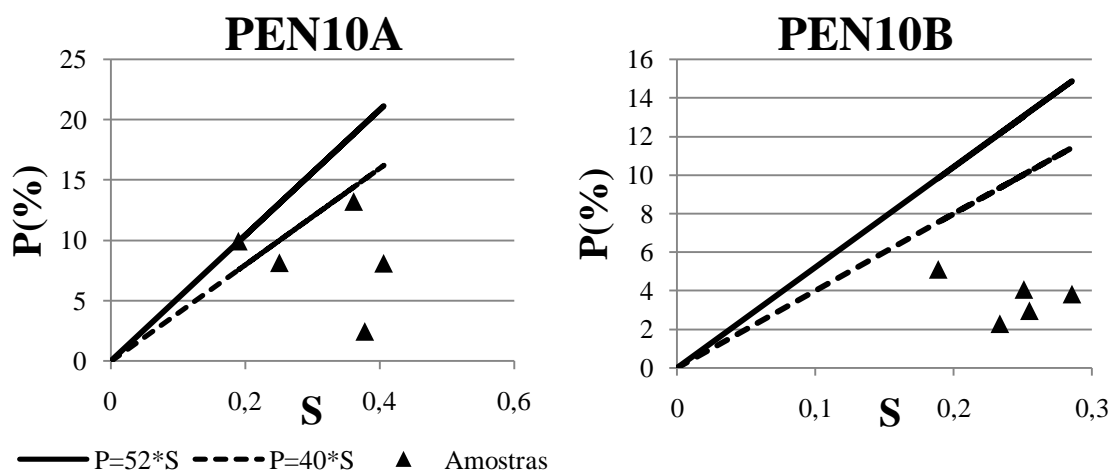


Figura 43 - Distribuição dos valores de erodibilidade das amostras para o ponto PEN 10.

De modo geral, as amostras mostram índices pouco superiores a 1, para ambos os métodos utilizados, com o material superficial apresentando menores índices quando comparado ao mais profundo. Com exceção da amostra PEN10A1, todas apresentaram índices de erodibilidade menores que 5.

6.2.4.3. Infiltração com infiltrômetro de duplo anel

A variação da infiltração para o local PEN 10 é descrita pela curva de infiltração de água no solo apresentada na Figura 44, tendo como condutividade hidráulica saturada média $1,9 \cdot 10^{-4}$ cm/s, após atingido regime constante. A frente de molhamento atingiu cerca de 0,50 m, com um tempo total de ensaio de 100 minutos.

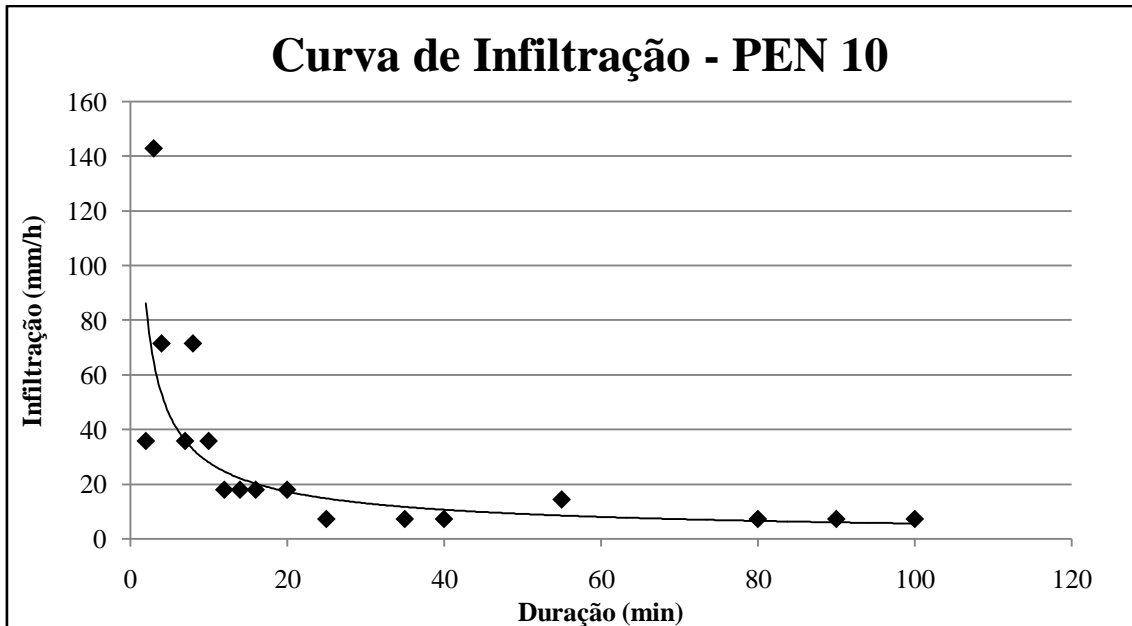


Figura 44 - Curva de infiltração para o ponto PEN 10.

6.2.4.4. Resistência mecânica à penetração

As curvas de resistência mecânica do solo a penetração são apresentadas nas Figuras 45 e 46.

Verifica-se uma baixa resistência mecânica ao longo de toda a profundidade analisada no ponto PEN 6, inferior a 1MPa, sobretudo devido a preparo do solo por maquinário alguns dias antes da realização do ensaio com o penetrômetro.

O ponto PEN 10 apresenta uma maior resistência mecânica nos 20 cm superficiais, com valor de cerca de 2,5 MPa, com redução gradual para menos de 1 MPa após 80 cm de profundidade. Contudo, após o ensaio de infiltração verificou-se um aumento da resistência no ponto, com um aumento a partir da superfície até 20 cm, com valor médio de 6 MPa, reduzindo para 1 MPa após 80 cm de profundidade.

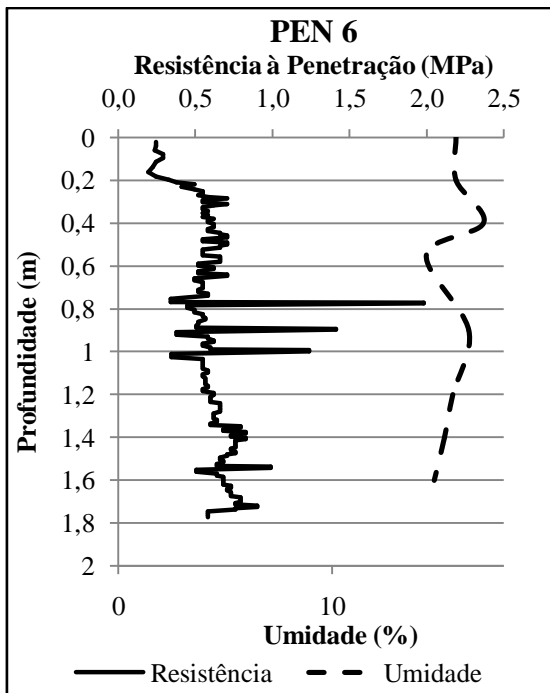


Figura 45 - Resistência mecânica à penetração para o ponto PEN 6.

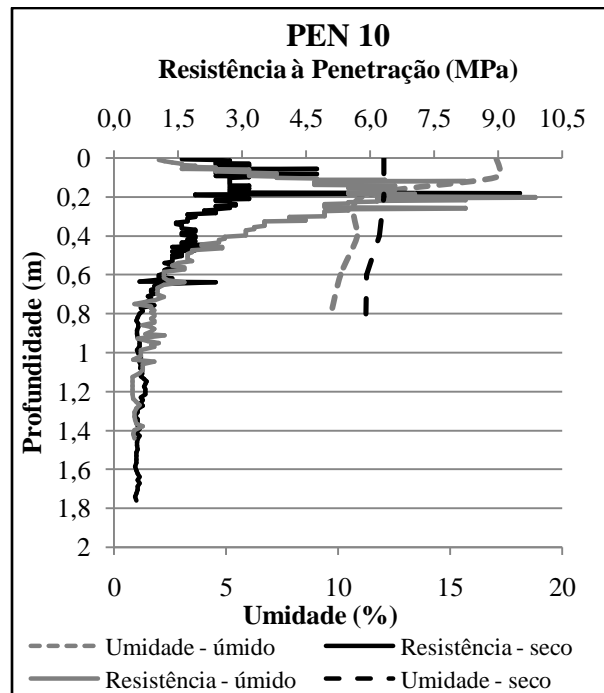


Figura 46 - Resistência mecânica à penetração para o ponto PEN 10, antes e após ensaio de infiltração.

6.2.5. Unidade 4

6.2.5.1. Caracterização geral

Os resultados dos ensaios de caracterização geral dos materiais coletados são apresentados nas Tabelas 13 e 14.

De modo geral, a Unidade 4 apresenta materiais inconsolidados areno-argilosos, com teor médio de areia superior a 70% e teores de argila bastante variados em função da localização do ponto.

A massa específica aparente seca dos materiais apresentou-se, em média, superior a 1,5 g/cm³, com valores superiores para materiais mais superficiais quando comparados aos mais profundos no mesmo local. Alguns pontos, contudo mostraram uma massa específica bastante elevada, como os pontos P37, DC7 (1,8 g/cm³ cada) e DC18 (1,76 g/cm³).

A condutividade hidráulica saturada das amostras está na ordem de 10⁻³ cm/s, para a maior parte dos materiais analisados, e 10⁻⁴ cm/s para as amostras DC 13A e PEN 13 (A e B). Destaca-se a menor condutividade para os materiais superficiais em relação aos mais profundos nos pontos DC 13 (cultivo de cana-de-açúcar), DC 16 (área com cultivo de eucalipto) e PEN 11 (em carreador).

Ressalta-se que não foi possível realizar a medição da vazão das amostras DC7B, DC8A e DC8B em virtude de falhas durante o ensaio, como não saturação da amostra, impossibilitando a saída e coleta de água, ou mesmo o entupimento do equipamento, obstruindo a saída de água.

Tabela 13 - Caracterização geral dos materiais inconsolidados referentes à Unidade 4.

		Amostras										
		P37	P38	P39	P45	DC7A	DC7B	DC8A	DC8B	DC13A	DC13B	
Granulometria com defloculante	Pedregulho	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	
	Areia	Grossa	3	2	1,5	2	1,5	1,5	2	2	3	3
		Média	31	35	39,5	31	32,5	31,5	25	30,5	36,5	44
		Fina	41,5	37	43	43	41	40	38	38,5	26,5	18
	Silte	12,5	8,2	5	11	13	11	8	7,5	11	11,5	
Argila	12	17,8	11	13	12	14	27	21,5	23	23,5		
ρ_s^1 (g/cm ³)		2,66	2,71	2,63	2,62	2,56	2,54	2,53	2,53	2,63	2,62	
ρ_{d^2} (g/cm ³)		1,80	1,51	1,49	1,51	1,80	1,66	1,52	1,43	1,61	1,52	
e^3		0,48	0,79	0,77	0,73	0,42	0,53	0,67	0,77	0,63	0,73	
n^4 (%)		32,30	44,14	43,38	42,24	29,65	34,50	40,04	43,49	38,55	42,04	
Condutividade hidráulica saturada K _{20°C} (cm/s)		2,1.10 ⁻³	8,2.10 ⁻³	4,4.10 ⁻³	6,9.10 ⁻³	3,4.10 ⁻³	*	*	*	3,1.10 ⁻⁴	3,3.10 ⁻³	

¹Massa específica dos sólidos. ²Massa específica aparente seca. ³Índice de vazios. ⁴Porosidade.

* Sem medição de vazão.

Tabela 14 - Caracterização geral dos materiais inconsolidados referentes à Unidade 4.

		Amostra								
		DC16A	DC16B	DC18A	DC18B	PEN 11A	PEN 11B	PEN 13A	PEN 13B	
Granulometria com defloculante	Pedregulho	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Areia	Grossa	2,5	2	2	2	1,5	8	3	2
		Média	34,5	35	30	27	37,5	42,5	40	39,5
		Fina	33	34,5	44	42	32	18,5	22,5	24,5
	Silte	9,5	6,5	8	10	5,5	11	6,5	5,2	
	Argila	20,5	22	16	19	23,5	20	28	28,8	
ρ_s^1 (g/cm ³)		2,64	2,69	2,63	2,78	2,667	2,774	2,641	2,663	
ρ_d^2 (g/cm ³)		1,63	1,56	1,76	1,66	1,68	1,60	1,62	1,36	
e^3		0,62	0,72	0,49	0,67	0,59	0,73	0,63	0,95	
n^4 (%)		38,32	41,92	32,98	40,18	37,10	42,27	38,66	48,77	
Condutividade hidráulica saturada $K_{20^\circ C}$ (cm/s)		$1,4 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$5,7 \cdot 10^{-4}$	$6,1 \cdot 10^{-5}$	

¹Massa específica dos sólidos. ²Massa específica aparente seca. ³Índice de vazios. ⁴Porosidade.

6.2.5.2. Erodibilidade

As Tabelas 15 a 22 apresentam os índices de absorção de água, perda de massa por imersão e de erodibilidade, sendo o último determinado pelos métodos de Nogami & Villibor (1979) e Pejon (1992), para cada amostra referente aos materiais amostrados na Unidade 4. Os gráficos das Figuras 47 a 54 apresentam a distribuição dos valores de erodibilidade das amostras tendo como referências as retas associadas aos índices de erodibilidade equivalente a 1, para os dois métodos adotados.

Tabela 15 – Índices de absorção, perda de massa por imersão e de erodibilidade para o ponto P37.

Ponto	Amostra	S	P (%)	E (Nogami & Villibor, 1979) E=52*S/P	E (Pejon, 1992) E=40*S/P
P37	P37.1	0,59	72,05	0,42	0,33
	P37.2	0,91	20,27	2,34	1,80
	P37.3	0,71	68,98	0,54	0,41
	P37.4	0,28	5,92	2,48	1,91
	P37.5	0,49	6,04	4,20	3,23
	P37.6	0,80	77,62	0,54	0,41

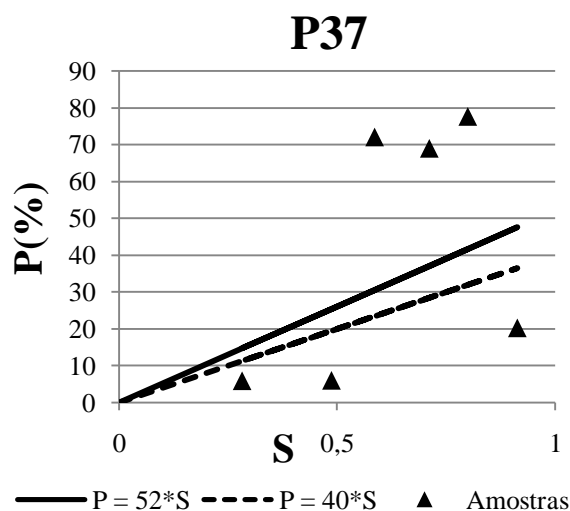


Figura 47 – Distribuição dos valores de erodibilidade das amostras para o ponto P37.

Tabela 16 – Índices de absorção, perda de massa por imersão e de erodibilidade para o ponto P38.

Ponto	Amostra	S	P (%)	E (Nogami & Villibor, 1979) E=52*S/P	E (Pejon, 1992) E=40*S/P
P38	P38.1	0,28	0,91	15,81	12,16
	P38.2	0,33	0,78	22,42	17,24
	P38.3	0,22	1,54	7,26	5,58
	P38.4	0,31	0,85	18,98	14,60
	P38.5	0,37	1,53	12,44	9,57
	P38.6	0,77	1,24	32,27	24,83

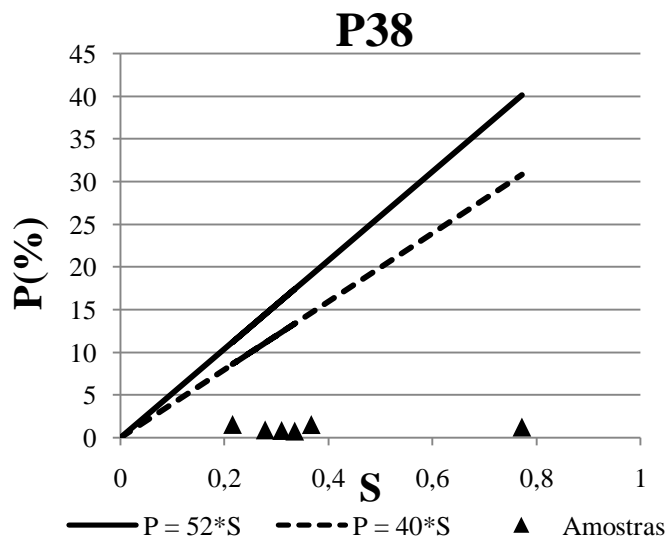


Figura 48 - Distribuição dos valores de erodibilidade das amostras para o ponto P38.

O ponto P37 possui uma variação entre os índices de erodibilidade das amostras analisadas, com três amostras abaixo de 1 e as demais, acima. Contudo mesmo os índices superiores a 1 mostram-se reduzidos, abaixo de 5, refletindo uma maior erodibilidade destes materiais.

As amostras do ponto P38, por outro lado, apresentam índices bastante superiores a 1, por ambos os métodos utilizados, caracterizando tais materiais com baixa erodibilidade.

Tabela 17 - Índices de absorção, perda de massa por imersão e de erodibilidade para o ponto P39.

Ponto	Amostra	S	P (%)	E (Nogami & Villibor, 1979) E=52*S/P	E (Pejon, 1992) E=40*S/P
P39	P392	0,1	0,5	5,4	4,2
	P393	0,0	0,2	5,6	4,3
	P395	0,6	1,7	19,2	14,8

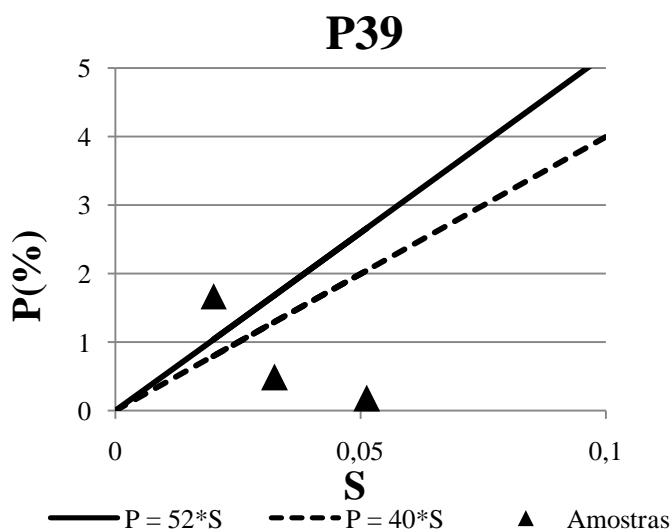


Figura 49 - Distribuição dos valores de erodibilidade das amostras para o ponto P39.

Tabela 18 - Índices de absorção, perda de massa por imersão e de erodibilidade para o ponto DC13.

Ponto	Amostra	S	P (%)	E (Nogami & Villibor, 1979) E=52*S/P	E (Pejon, 1992) E=40*S/P
DC 13A	DC13A1	1,07	2,77	20,14	15,49
	DC13A2	0,66	4,93	7,00	5,38
	DC13A3	0,91	2,66	17,87	13,75
	DC13A4	1,05	1,23	44,46	34,20
	DC13A5	1,49	3,68	21,00	16,16
DC 13B	DC13B1	0,55	34,01	0,84	0,64
	DC13B2	0,48	8,60	2,90	2,23
	DC13B4	0,67	28,96	1,20	0,92
	DC13B5	0,70	9,08	4,03	3,10
	DC13B6	0,90	67,21	0,70	0,54

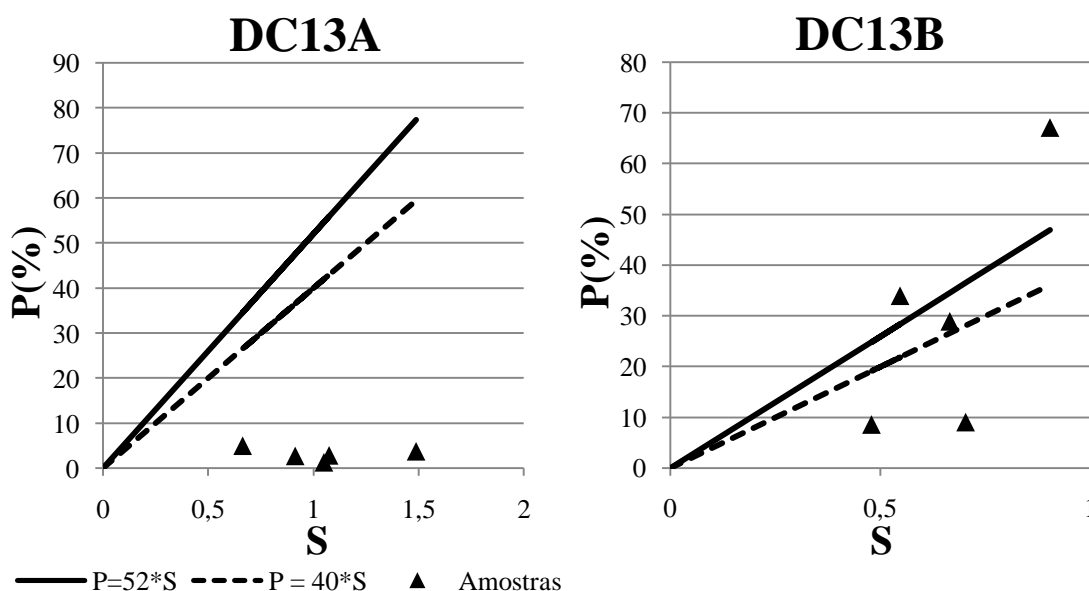


Figura 50 - Distribuição dos valores de erodibilidade das amostras para o ponto DC13.

Os materiais mais superficiais do ponto DC 13 apresentam índices de erodibilidade superiores aos mais profundos, sendo que algumas amostras, como a DC13B1 e DC13B6, com valores abaixo de 1.

Tabela 19 - Índices de absorção, perda de massa por imersão e de erodibilidade para o ponto DC16.

Ponto	Amostra	S	P (%)	E (Nogami & Villibor, 1979) E=52*S/P	E (Pejon, 1992) E=40*S/P
DC16A	DC16A1	0,57	0,63	46,87	36,05
	DC16A3	0,56	1,23	23,76	18,27
	DC16A4	0,74	0,94	41,14	31,65
	DC16A5	0,54	0,74	38,00	29,23
	DC16A6	0,46	0,65	36,93	28,40

Continuação da Tabela 19 - Índices de absorção, perda de massa por imersão e de erodibilidade para o ponto DC16.

DC16B	DC16B1	0,85	1,40	31,62	24,32
	DC16B2	0,92	1,47	32,78	25,22
	DC16B3	0,77	0,93	43,25	33,27
	DC16B4	0,64	1,06	31,45	24,20
	DC16B5	1,10	1,22	46,62	35,86
	DC16B6	0,77	1,25	31,94	24,57

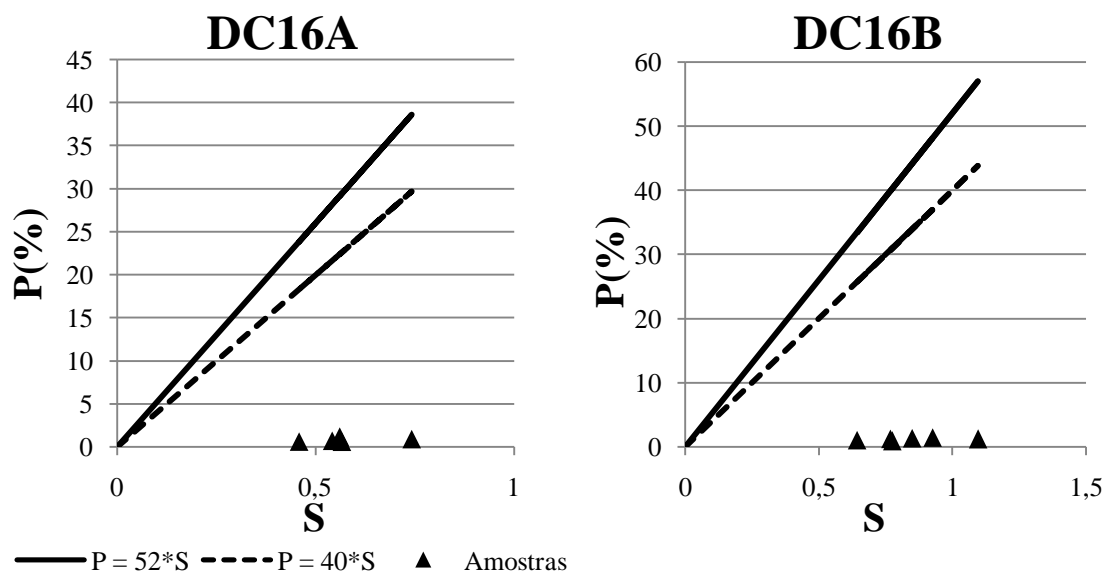


Figura 51 - Distribuição dos valores de erodibilidade das amostras para o ponto DC16.

Tabela 20 – Índices de absorção, perda de massa por imersão e de erodibilidade para o ponto DC18.

Ponto	Amostra	S	P (%)	E (Nogami & Villibor, 1979) E=52*S/P	E (Pejon, 1992) E=40*S/P
DC18A	DC18A1	0,25	0,64	19,90	9,81
	DC18A2	0,24	1,10	11,58	9,76
	DC18A3	0,22	0,67	16,69	8,63
	DC18A4	0,23	0,92	12,86	9,07
	DC18A6	0,23	0,79	15,12	9,23
DC18B	DC18B1	0,57	8,05	3,66	2,81
	DC18B2	0,56	1,49	19,51	15,01
	DC18B22	0,46	10,85	2,19	1,69
	DC18B3	0,51	11,76	2,26	1,74
	DC18B4	0,49	4,39	5,84	4,49

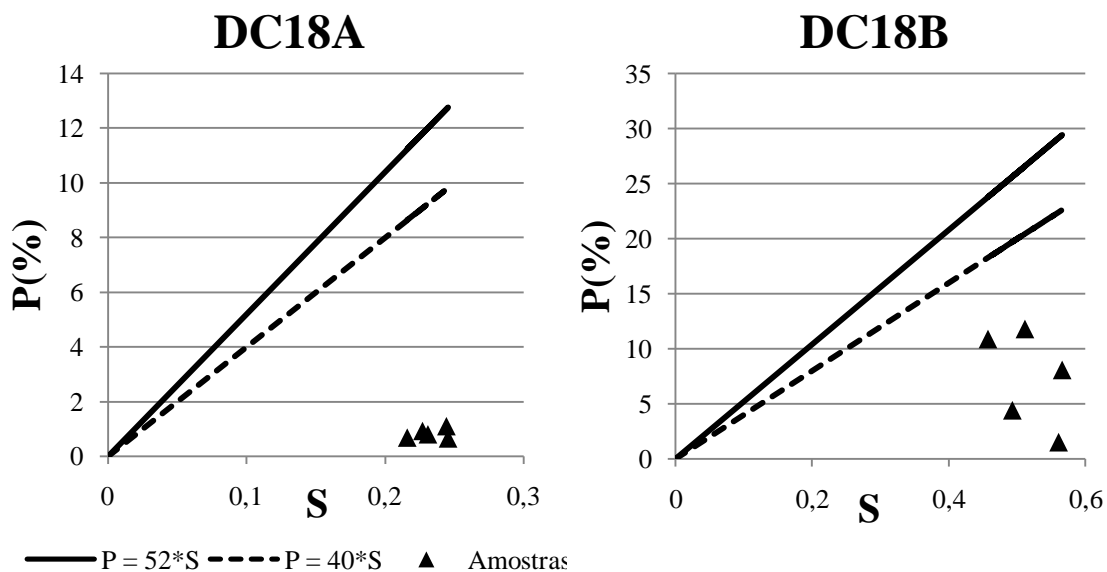


Figura 52 - Distribuição dos valores de erodibilidade das amostras para o ponto DC18.

Tabela 21 – Índices de absorção, perda de massa por imersão e de erodibilidade para o ponto PEN11.

Ponto	Amostra	S	P (%)	E (Nogami & Villibor, 1979) E=52*S/P	E (Pejon, 1992) E=40*S/P
PEN 11A	Pen11A1	0,29	2,59	5,86	4,51
	Pen11A3	0,47	10,88	2,22	1,71
	Pen11A4	0,42	14,56	1,51	1,16
	Pen11A5	0,37	1,63	11,94	9,18
	Pen11A6	0,29	3,62	4,20	3,23
PEN 11B	Pen11B1	1,31	13,43	5,09	3,91
	Pen11B2	1,69	48,70	1,80	1,39
	Pen11B3	1,52	61,76	1,28	0,98
	Pen11B4	1,96	63,80	1,60	1,23
	Pen11B5	1,16	60,67	0,99	0,76
	Pen11B6	2,19	75,53	1,51	1,16

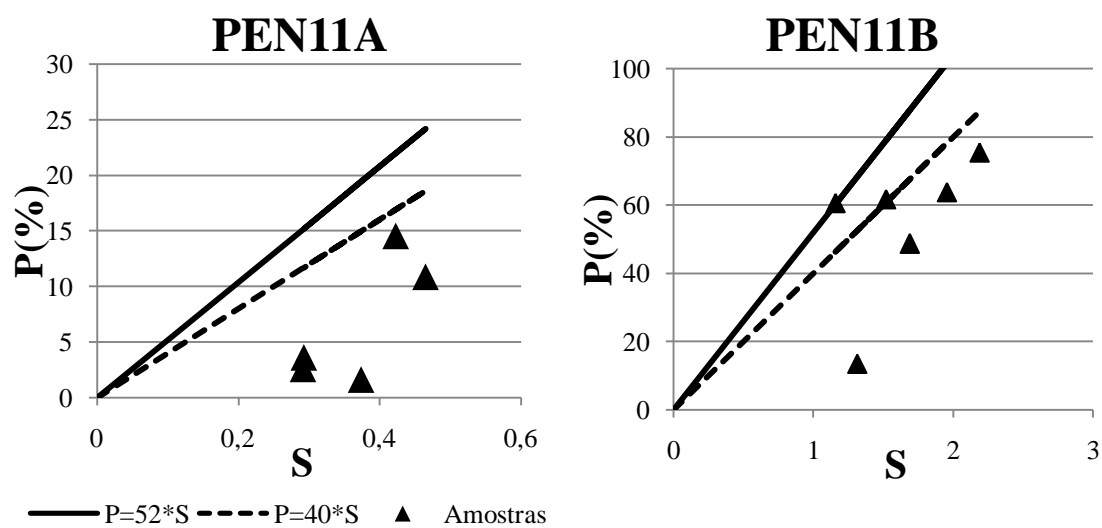


Figura 53 - Distribuição dos valores de erodibilidade das amostras para o ponto PEN11.

Tabela 22 - Índices de absorção, perda de massa por imersão e de erodibilidade para o ponto PEN13.

Ponto	Amostra	S	P (%)	E (Nogami & Villibor, 1979) E=52*S/P	E (Pejon, 1992) E=40*S/P
PEN 13A	Pen13A1	0,33	0,64	27,28	20,98
	Pen13A2	0,30	0,58	26,72	20,55
	Pen13A3	0,45	38,95	0,60	0,46
	Pen13A4	0,64	9,23	3,62	2,79
PEN 13B	Pen13B1	2,08	72,48	1,49	1,15
	Pen13B2	2,37	75,11	1,64	1,26
	Pen13B3	1,95	68,17	1,49	1,14
	Pen13B4	2,17	75,73	1,49	1,15
	Pen13B5	1,58	44,06	1,86	1,43

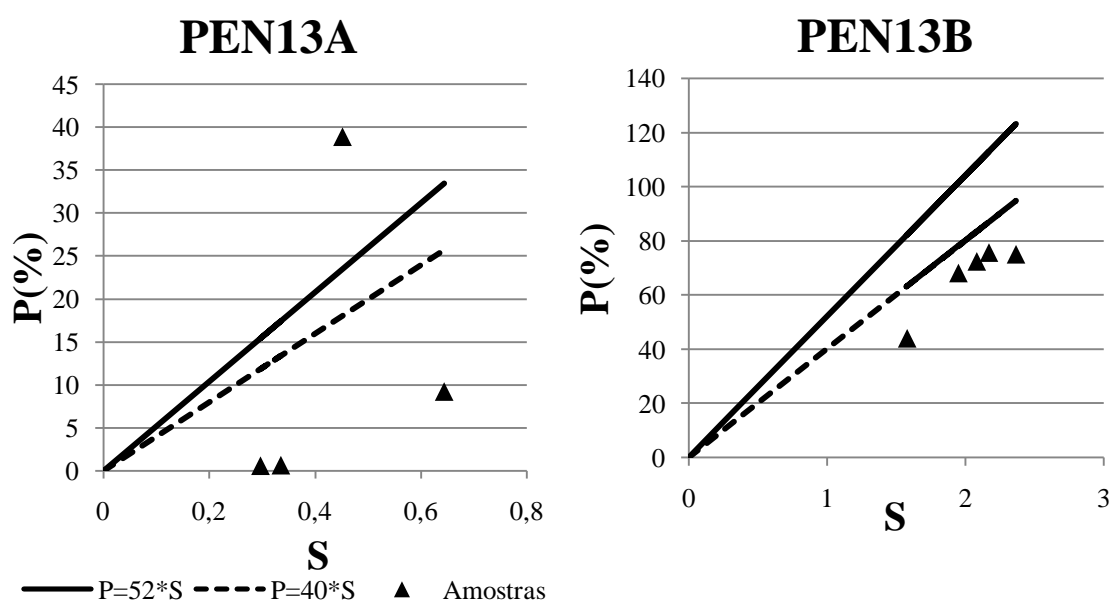


Figura 54 - Distribuição dos valores de erodibilidade das amostras para o ponto PEN13.

As amostras do ponto DC16 possuem índices muito superiores a 1, tanto para os materiais superficiais quanto profundos, mostrando uma homogeneidade deste parâmetro. Por sua vez, o ponto DC18 apresentam índices elevados para os materiais superficiais, enquanto que, para os materiais mais profundos, valores superiores porém próximos a 1.

As amostras superficiais do ponto PEN11 apresentam índices pouco superiores a 1, sendo também pouco superiores quando comparados as amostras do material mais profundo. O ponto PEN 13 também apresenta este comportamento, sendo que, contudo, os índices de duas amostras superficiais (PEN13A1 e PEN13A2) mostram-se bastante discrepantes, superiores a 25, para Nogami & Villibor (1979), e a 20, para Pejon (1992).

6.2.5.3. Infiltração com infiltrômetro de duplo anel

A variação da infiltração para os pontos ensaiados da Unidade 4 são descritos pelas curvas de infiltração de água no solo apresentadas nas Figuras 55 a 58.

O ponto DC 7 apresenta uma condutividade hidráulica saturada média $1,98 \cdot 10^{-3}$ cm/s, após atingido regime constante. A frente de molhamento atingiu cerca de 1,0 m, com um tempo total de ensaio de 140 minutos.

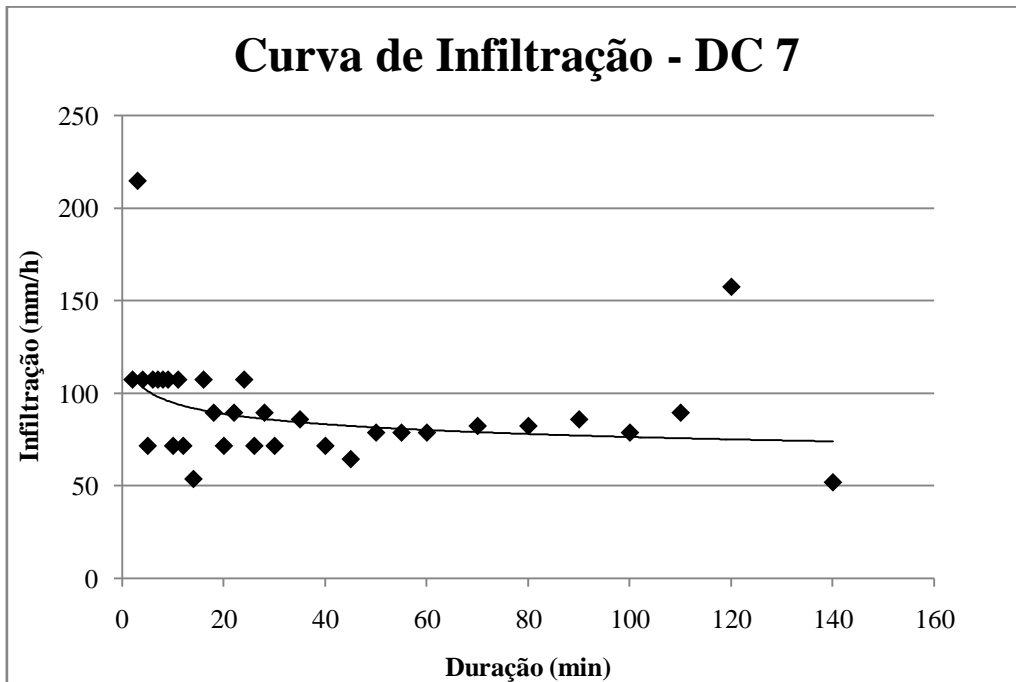


Figura 55 - Curva de infiltração para o ponto DC 7.

O ponto DC 8 apresenta uma condutividade hidráulica saturada média $4,99 \cdot 10^{-4}$ cm/s, após atingido regime constante. A frente de molhamento atingiu cerca de 1,0 m, com um tempo total de ensaio de 130 minutos.

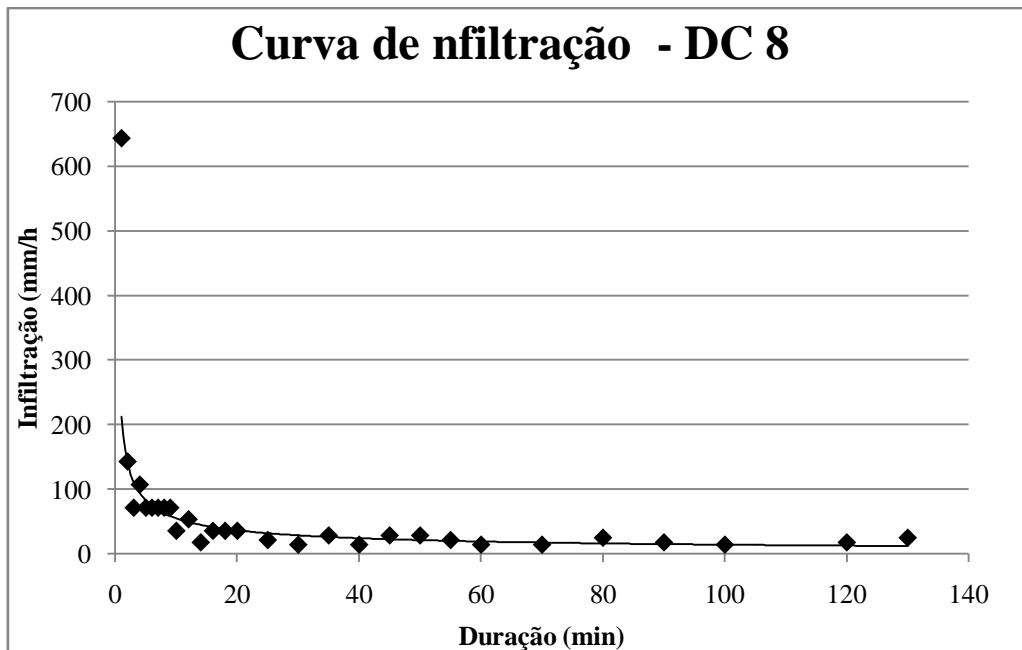


Figura 56 - Curva de infiltração para o ponto DC 8.

O ponto PEN 11 apresenta uma condutividade hidráulica saturada média $3,6 \cdot 10^{-4}$ cm/s, após atingido regime constante. A frente de molhamento atingiu cerca de 0,60 m, com um tempo total de ensaio de 140 minutos.

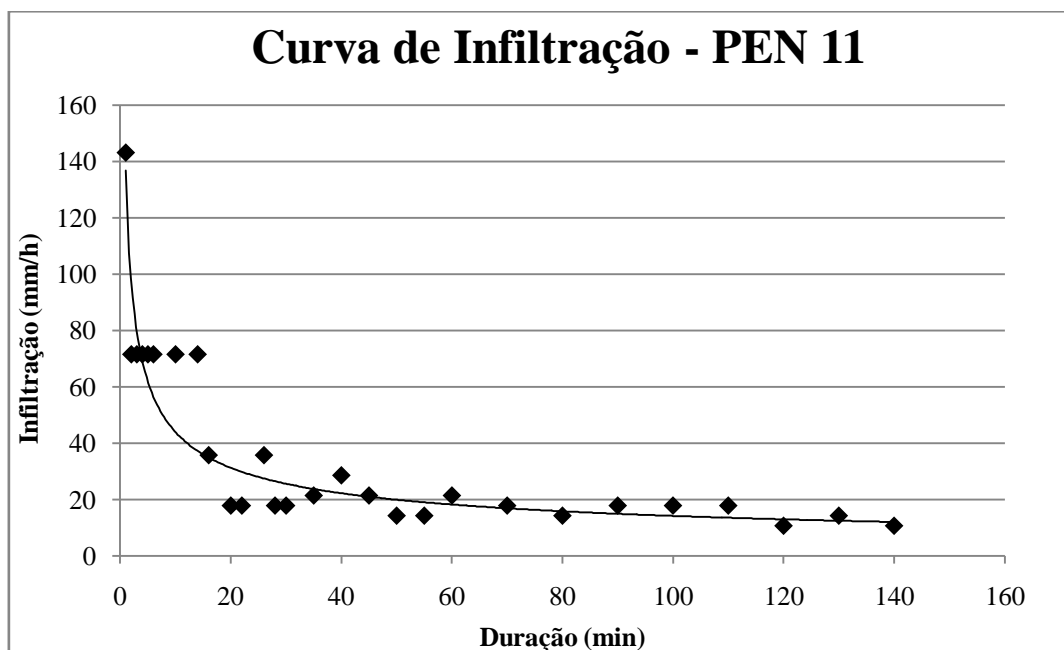


Figura 57 – Curva de infiltração para o ponto PEN 11.

O local PEN 13 tem como condutividade hidráulica saturada média $5,3 \cdot 10^{-4}$ cm/s, após atingido regime constante. A frente de molhamento atingiu cerca de 0,60 m, com um tempo total de ensaio de 120 minutos.

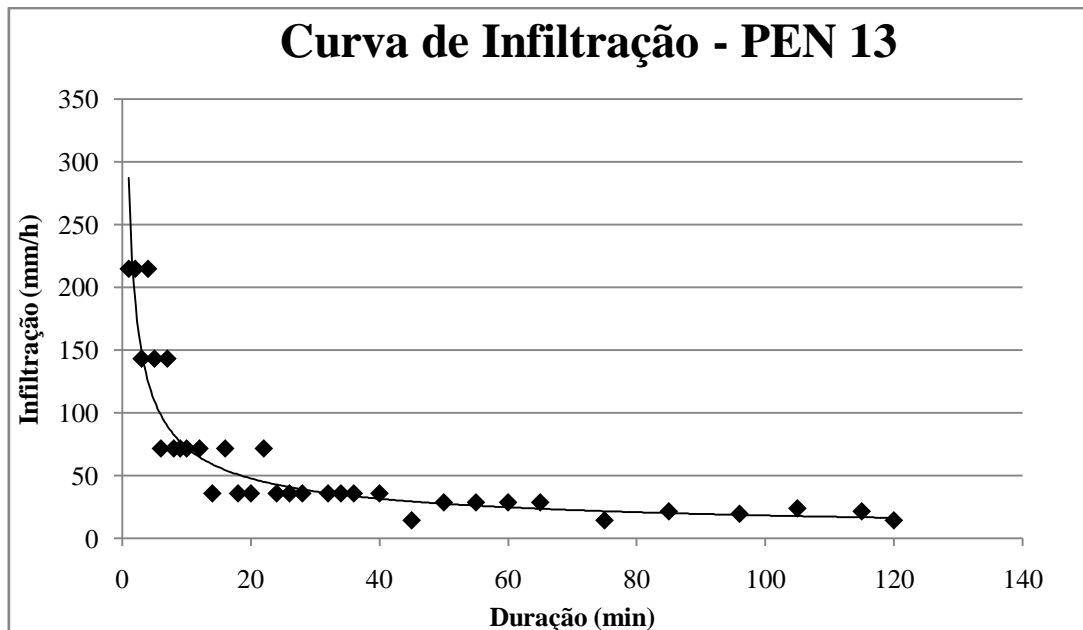


Figura 58 - Curva de infiltração para o ponto PEN 13.

6.2.5.4. Resistência mecânica à penetração

As curvas de resistência mecânica do solo a penetração referentes à Unidade 4 são apresentadas pelas Figuras 59 a 62.

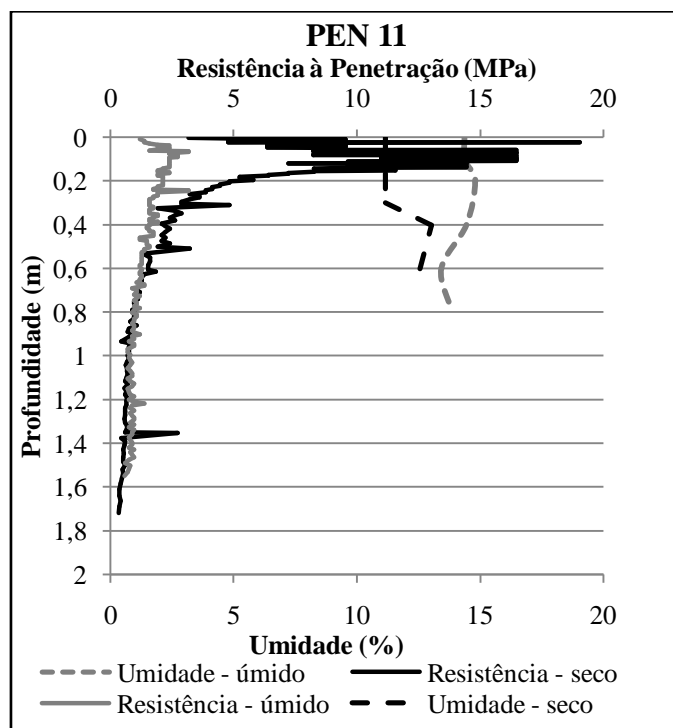


Figura 59 - Resistência mecânica à penetração para o ponto PEN 11, antes e após ensaio de infiltração.

A resistência mecânica no ponto PEN 11 (carreador) mostra-se elevada na camada 0-20 cm, partindo de 10 MPa até 15 MPa, e reduzindo após 20 cm de profundidade e

permanecendo constante em cerca de 2 MPa após 80 cm de profundidade. Após o ensaio de infiltração a resistência apresenta-se bastante inferior aquela avaliada com o solo seco, com valor próximo a 2,5 MPa nos 40 cm superficiais e reduzindo para 2 MPa a partir de 60 cm de profundidade, permanecendo constante.

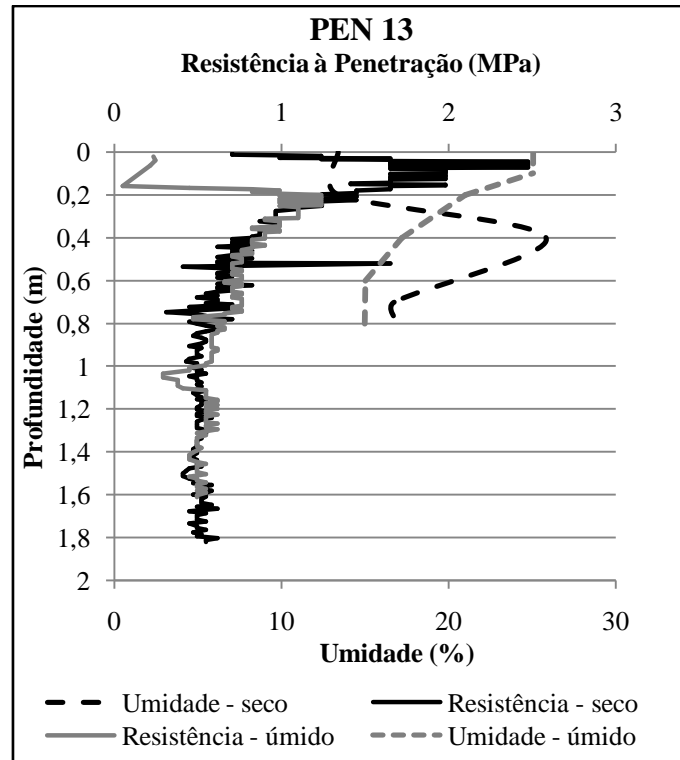


Figura 60 - Resistência mecânica à penetração para o ponto PEN 13, antes e após ensaio de infiltração.

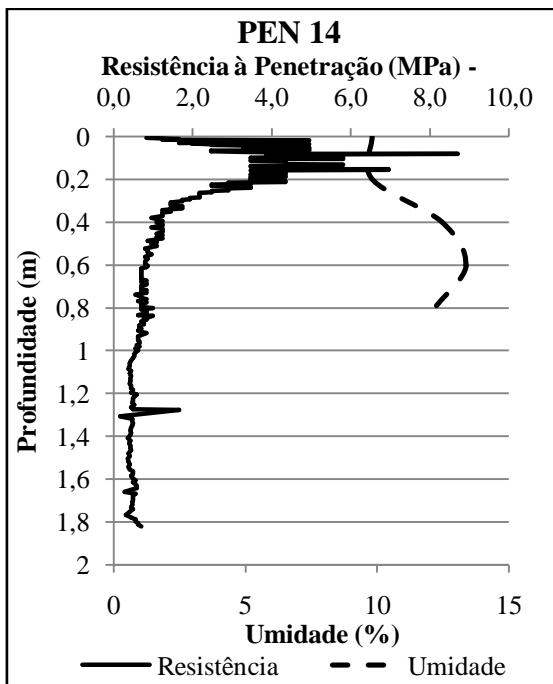


Figura 61 - Resistência mecânica à penetração para o ponto PEN 14.

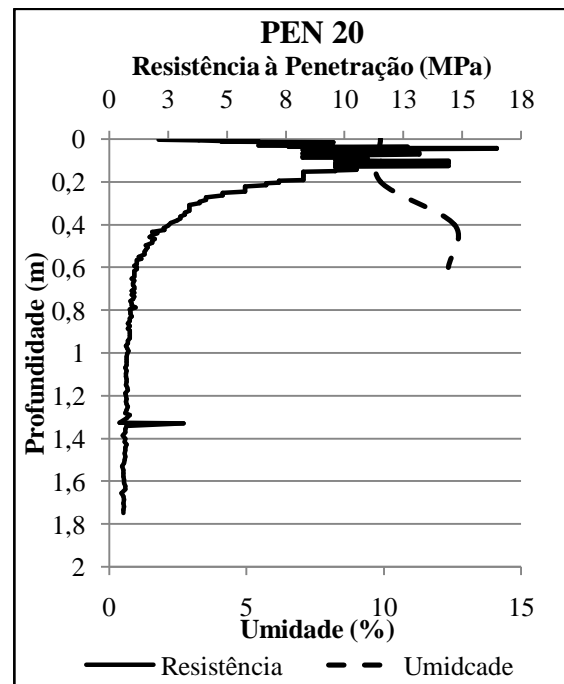


Figura 62 - Resistência mecânica à penetração para o ponto PEN 20.

O ponto PEN 13 apresenta uma resistência mecânica baixa, próxima a 2 MPa na camada 0-20 cm, reduzindo para menos de 1 MPa após 40 cm de profundidade e permanecendo constante. Do mesmo modo, após o ensaio de infiltração a resistência permanece reduzida, com valor médio inferior a 1 MPa ao longo de toda a profundidade analisada.

A resistência a do ponto PEN 14 é de cerca de 4 MPa na camada 0-20 cm e reduz para 1 MPa a 60 cm de profundidade, permanecendo aproximadamente constante. O ponto PEN 20, por sua vez, apresenta uma maior resistência na camada de 0-20 cm, com valor médio entre 10 MPa a 15 MPa, reduzindo para cerca de 1,5 MPa a 1 m de profundidade e mantendo-se constante em seguida.

6.2.6. Unidade 5

Para esta Unidade de materiais inconsolidados, foram realizados apenas ensaios de resistência mecânica à penetração.

6.2.6.1. Resistência mecânica à penetração

A curva de resistência mecânica do solo a penetração é apresentada na Figura 63.

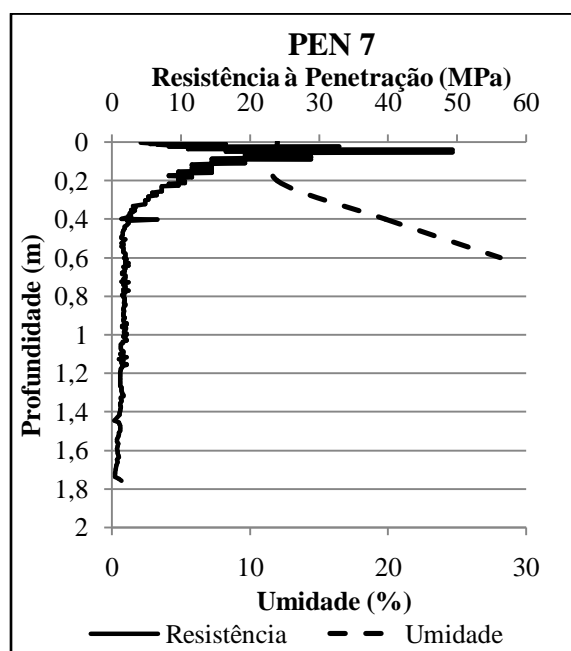


Figura 63 - Resistência mecânica à penetração para o ponto PEN 5.

O ponto PEN 7 apresenta uma elevada resistência mecânica nas camadas superficiais, com valores entre 10 MPa e 30 MPa nos 20 cm superficiais, reduzindo para um valor médio de 2 MPa a partir de 40 cm de profundidade. Esse elevado valor inicial reflete o grau de compactação a que as camadas mais superficiais estão sujeitas, uma vez que o ensaio foi realizado em um carreador.

6.2.7. Unidade 6

Para esta Unidade de materiais inconsolidados, foram realizados apenas ensaios de resistência mecânica à penetração.

6.2.7.1. Resistência mecânica à penetração

A curva de resistência mecânica do solo a penetração é apresentada na Figura 64.

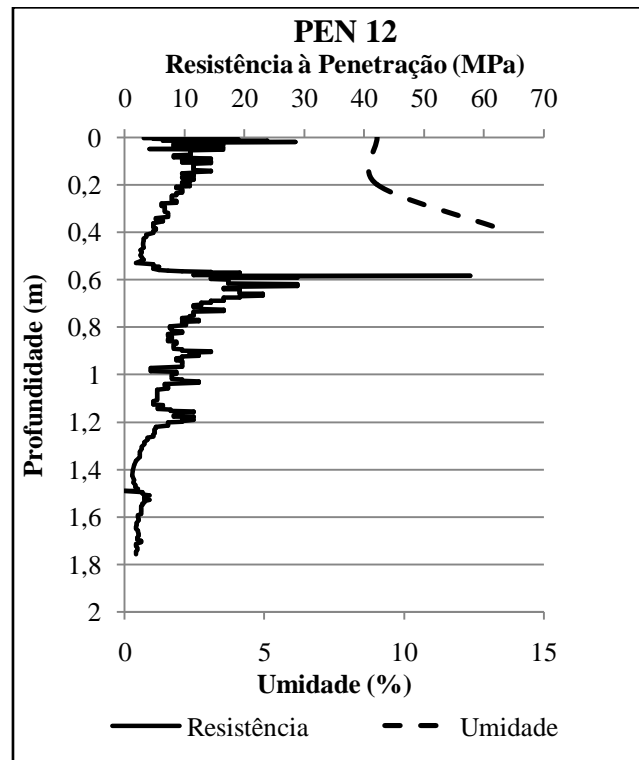


Figura 64 - Resistência mecânica à penetração para o ponto PEN 5.

O ponto PEN 12 apresenta resistência média de 10 MPa na camada de 0 a 20 cm de profundidade, com redução para 2,5 MPa a 50 cm, novamente aumentando para 20 MPa até 70 cm e reduzindo gradualmente para cerca de 2 MPa em 1,40 m de profundidade.

6.2.8. Unidade 7

6.2.8.1. Caracterização geral

Os resultados dos ensaios de caracterização geral dos materiais coletados são apresentados na Tabela 23.

De modo geral, a Unidade 7 apresenta materiais inconsolidados areno-argilosos, com pouca variação entre areia média e fina em função da profundidade e um teor médio de argila de 21%.

A massa específica aparente seca mostrou-se pouco superior para o material mais superficial (1,59 g/cm³). Do mesmo modo, a condutividade hidráulica saturada

apresenta-se maior na camada mais superficial, sendo a presença de raízes e poros na amostra a responsável por essa diferença.

Tabela 23 - Caracterização geral dos materiais inconsolidados referentes à Unidade 7.

		Amostras		
		PEN 18A	PEN 18B	
Granulometria com defloculante	Pedregulho	0	0	
	Areia	Grossa	1,3	1
		Média	26,7	25
		Fina	35	37,9
	Silte	16,5	15	
Argila	20,5	21,1		
ρ_s^1 (g/cm ³)		2,72	2,74	
ρ_d^2 (g/cm ³)		1,59	1,52	
e^3		0,71	0,80	
n^4 (%)		41,43	44,58	
Condutividade hidráulica saturada $K_{20^\circ C}$ (cm/s)		$7,1 \cdot 10^{-3}$	$5,2 \cdot 10^{-3}$	

¹Massa específica dos sólidos. ²Massa específica aparente seca. ³Índice de vazios.

⁴Porosidade.

6.2.8.2. Erodibilidade

A Tabela 24 apresenta os índices de absorção de água, perda de massa por imersão e de erodibilidade, sendo o último determinado pelos métodos de Nogami & Villibor (1979) e Pejon (1992), para cada amostra referente aos materiais amostrados na Unidade 7. Os gráficos da Figura 65 apresentam a distribuição dos valores de erodibilidade das amostras.

Tabela 24 - Índices de absorção, perda de massa por imersão e de erodibilidade para o ponto PEN18.

Ponto	Amostra	S	P (%)	E (Nogami & Villibor, 1979) E=52*S/P	E (Pejon, 1992) E=40*S/P
PEN 18A	Pen18A1	0,31	0,09	173,62	133,55
	Pen18A2	0,33	0,29	60,08	46,22
	Pen18A3	0,30	0,46	33,66	25,89
	Pen18A4	0,27	0,20	69,77	53,67
	Pen18A5	0,25	0,24	54,93	42,25
PEN 18B	Pen18B1	0,25	0,03	410,94	316,10
	Pen18B2	0,35	0,40	44,97	34,59
	Pen18B3	0,26	0,14	97,86	75,28
	Pen18B4	0,29	0,71	21,61	16,63
	Pen18B5	0,25	0,16	82,97	63,82
	Pen18B6	0,29	0,32	47,21	36,32

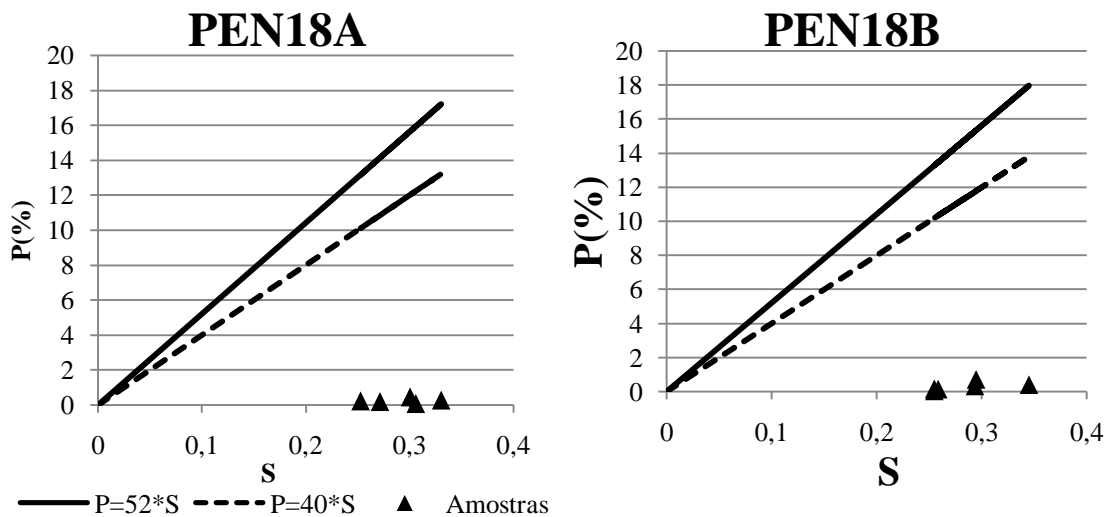


Figura 65 - Distribuição dos valores de erodibilidade das amostras para o ponto PEN18.

Os materiais apresentam baixos índices de erodibilidade, uma vez que os índices foram muito superiores a 1, tanto para o método de Nogami e Villibor (1979) quanto por Pejon (1992).

6.2.8.3. Infiltração com infiltrômetro de duplo anel

A variação da infiltração para o local PEN 18 é descrita pela curva de infiltração de água no solo apresentada na Figura 66, tendo como condutividade hidráulica saturada média $7,8 \cdot 10^{-4}$ cm/s, após atingido regime constante. A frente de molhamento atingiu cerca de 1,0 m, com um tempo total de ensaio de 173 minutos.

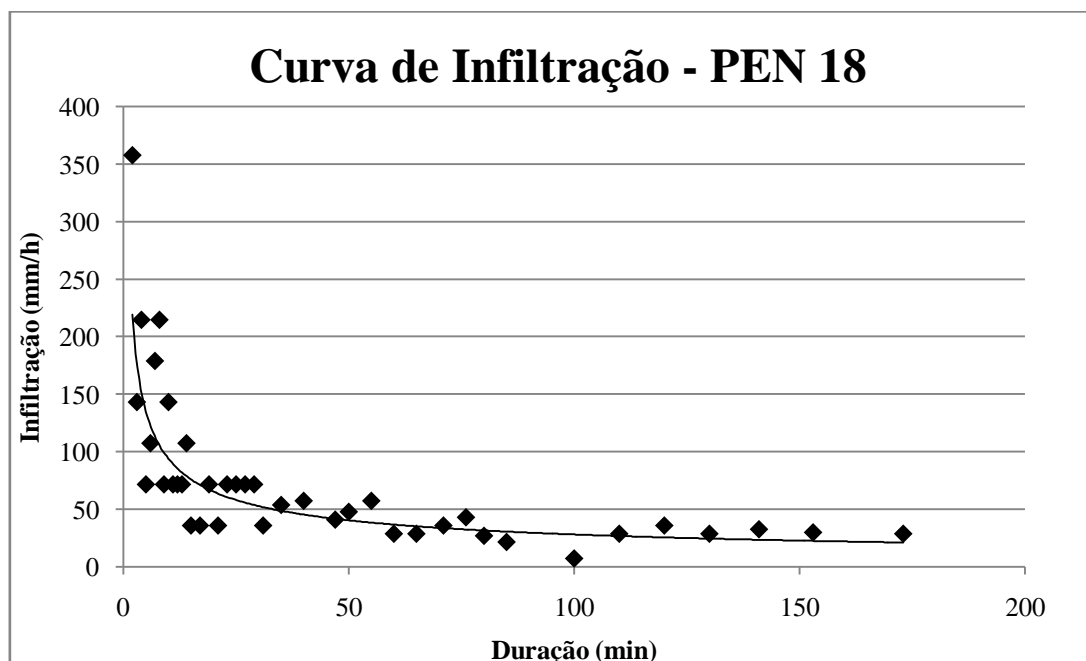


Figura 66 - Curva de infiltração para o ponto PEN 18.

6.2.8.4. Resistência mecânica à penetração

As curvas de resistência mecânica do solo a penetração são apresentadas nas Figuras 67 e 68.

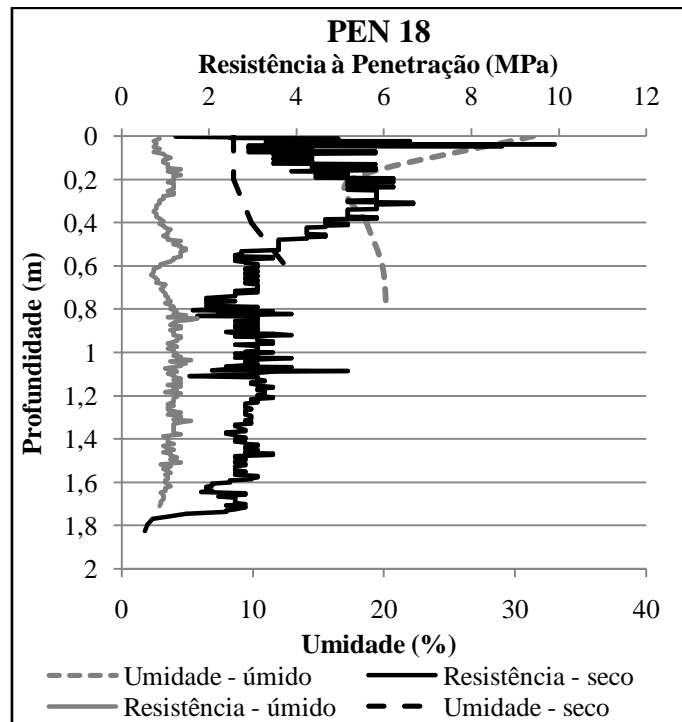


Figura 67 - Resistência mecânica à penetração para o ponto PEN 18, antes e após ensaio de infiltração.

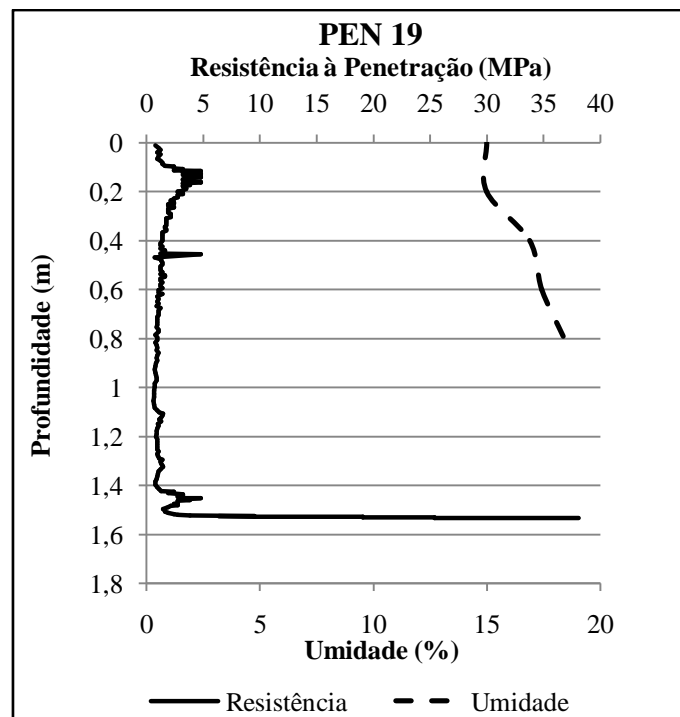


Figura 68 - Resistência mecânica à penetração para o ponto PEN 19.

O ponto PEN 18 apresenta uma resistência média de 5 MPa nos 20 cm superficiais, com aumento para 6 MPa entre 20 e 40 cm e redução para 3MPa em 80 cm de profundidade, permanecendo constante. Após ensaio de infiltração, a resistência média foi de 1 MPa ao longo da profundidade de ensaio.

O ponto PEN 19, por sua vez, apresenta um aumento de 1 MPa a 5 MPa nos 20 cm superficiais, com redução novamente para 1 MPa até cerca de 1,40 m de profundidade, onde há um rápido aumento de resistência, superior a 30 MPa, sendo esse aumento associado a presença de materiais mais grosseiros e rocha fragmentada nas camadas mais profundas.

6.2.9. Unidade 8

6.2.9.1. Caracterização geral

Os resultados dos ensaios de caracterização geral dos materiais coletados são apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 - Caracterização geral dos materiais inconsolidados referentes à Unidade 8.

		Amostras		
		DC21A / PEN 23A	DC21B / PEN 23B	
Granulometria com defloculante	Pedregulho	1,2	1,9	
	Areia	Grossa	2,8	2,5
		Média	26	24,6
		Fina	40	36,5
	Silte	12,5	12,7	
Argila	17,5	21,8		
ρ_s^1 (g/cm ³)		2,63	2,65	
ρ_d^2 (g/cm ³)		1,54	1,45	
e^3		0,71	0,82	
n^4 (%)		41,61	45,13	
Condutividade hidráulica saturada $K_{20^\circ C}$ (cm/s)		$6,0 \cdot 10^{-3}$	$4,6 \cdot 10^{-3}$	

¹Massa específica dos sólidos. ²Massa específica aparente seca. ³Índice de vazios.

⁴Porosidade.

De modo geral, a Unidade 8 apresenta materiais inconsolidados areno-argilosos, com variação entre areia média e fina em função da profundidade, com teores de argila entre 17 e 20%. A massa específica aparente seca dos materiais apresentou-se superior (1,54 g/cm³) para a camada superficial. No entanto, a condutividade hidráulica saturada referente ao material mais superficial mostrou-se pouco superior quando comparada ao material mais profundo, sendo tal diferença associada a presença de raízes e poros na superfície.

6.2.9.2. Erodibilidade

A Tabela 26 apresenta os índices de absorção de água, perda de massa por imersão e de erodibilidade, sendo o último determinado pelos métodos de Nogami & Villibor (1979) e Pejon (1992), para cada amostra referente aos materiais amostrados na Unidade 8. Os gráficos da Figura 69 apresentam a distribuição dos valores de erodibilidade das amostras tendo como referências as retas associadas aos índices de erodibilidade equivalente a 1, para os dois métodos adotados.

Tabela 26 - Índices de absorção, perda de massa por imersão e de erodibilidade para o ponto DC21 / PEN 23.

Ponto	Amostra	S	P (%)	E (Nogami & Villibor, 1979) E=52*S/P	E (Pejon, 1992) E=40*S/P
DC21A / PEN 23A	DC21A1	0,11	0,24	24,81	19,09
	DC21A2	0,16	0,19	44,73	34,41
	DC21A3	0,15	0,12	67,63	52,02
	DC21A4	0,17	0,30	29,48	22,68
	DC21A5	0,13	0,10	63,98	49,21
DC21B / PEN 23B	DC21B1	0,46	0,46	52,59	40,45
	DC21B2	0,17	1,02	8,62	6,63
	DC21B3	0,27	0,02	736,83	566,79
	DC21B4	0,43	0,53	42,89	32,99
	DC21B5	0,46	0,60	39,94	30,73

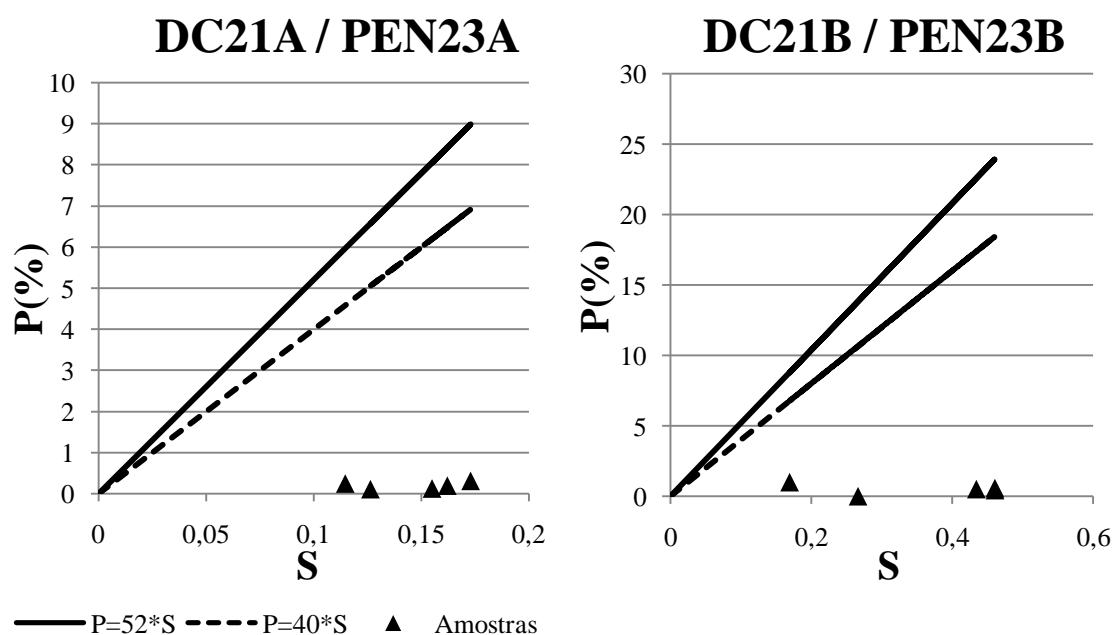


Figura 69 - Distribuição dos valores de erodibilidade das amostras para o ponto DC21 / PEN23.

As amostras das profundidades A e B apresentaram índices muito superiores a 1, refletindo baixa erodibilidade destes materiais. Destacam-se os elevados índices referentes a amostras DC21B3, sendo tais valores associados a presença de raízes que acabam por impedir o desprendimento do material. Além disso, as demais amostras também apresentaram baixas porcentagens referentes ao índice P (perda de massa por imersão).

6.2.9.3. Infiltração com infiltrômetro de duplo anel

A variação da infiltração para o local DC21 / PEN23 é descrita pela curva de infiltração de água no solo apresentada na Figura 70, tendo como condutividade hidráulica saturada média $1,5 \cdot 10^{-3}$ cm/s, após atingido regime constante. A frente de molhamento atingiu cerca de 0,9 m, com um tempo total de ensaio de 75 minutos.

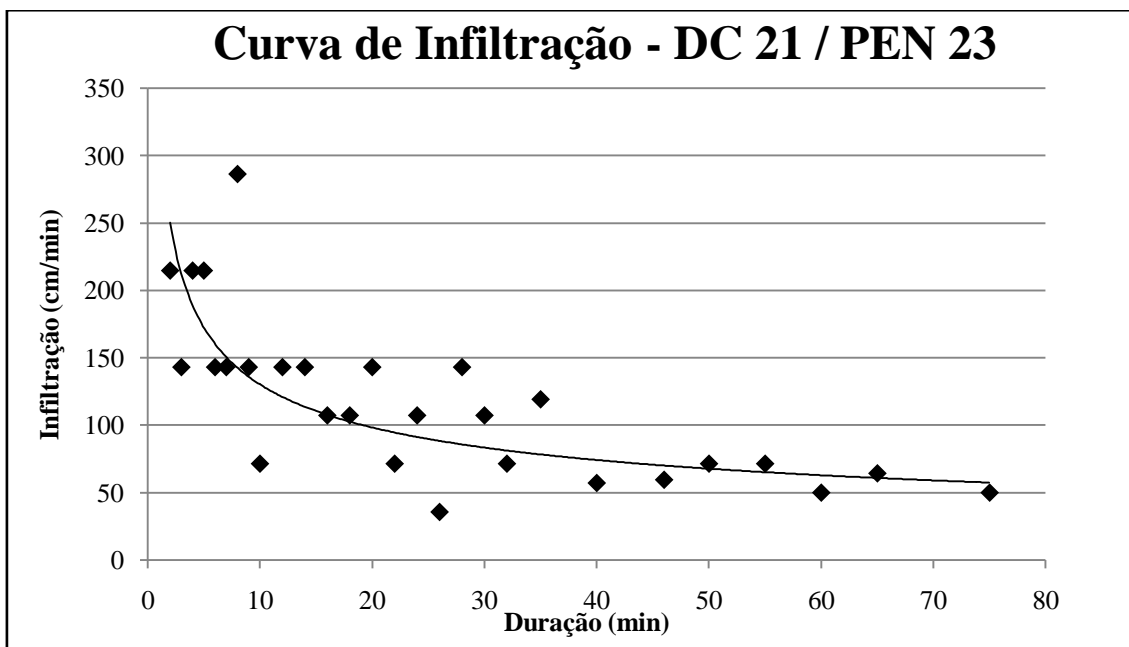


Figura 70 - Curva de infiltração para o ponto DC21 / PEN23.

6.2.9.4. Resistência mecânica à penetração

As curvas de resistência mecânica do solo a penetração são apresentadas nas Figuras 71 e 72.

Dentre os dois locais, a maior resistência observada foi referente ao local PEN 1, onde o ensaio foi realizado em estrada secundária, apresentando valor médio de 2,5 MPa nos 20 cm superficiais e subindo para 10 MPa a 20 cm de profundidade, com posterior redução para cerca de 1,5 MPa e constante a partir de 1 m de profundidade.

O ponto DC21 / PEN 23, por sua vez, apresentou baixos valores de resistências, com Máximo de 3 MPa nos 60 cm superficiais e inferiores a 1 MPa a partir de 80 cm

de profundidade. Após o ensaio de infiltração a resistência mecânica média foi de 1 MPa em toda a profundidade de ensaio, sendo pouco superior a resistência do solo seco a partir dos 80 cm.

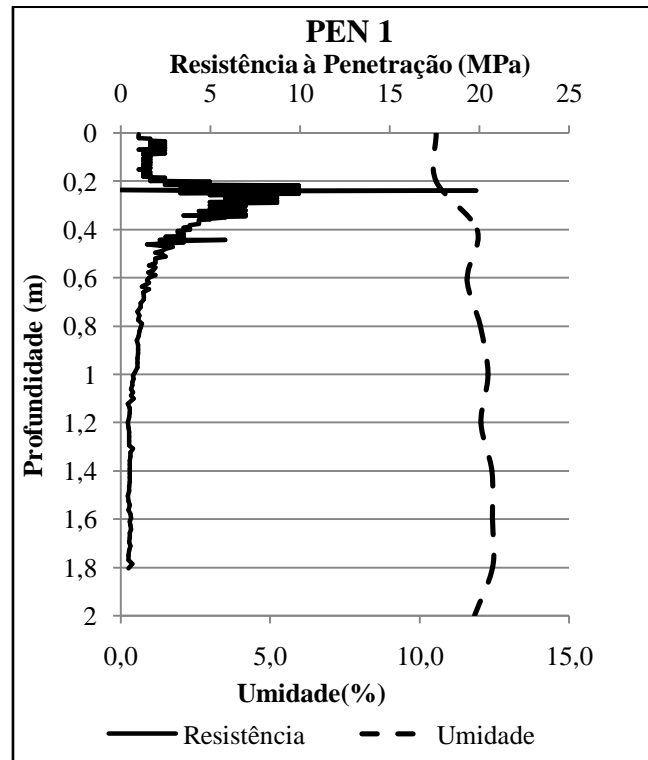


Figura 71 - Resistência mecânica à penetração para o ponto PEN 1.

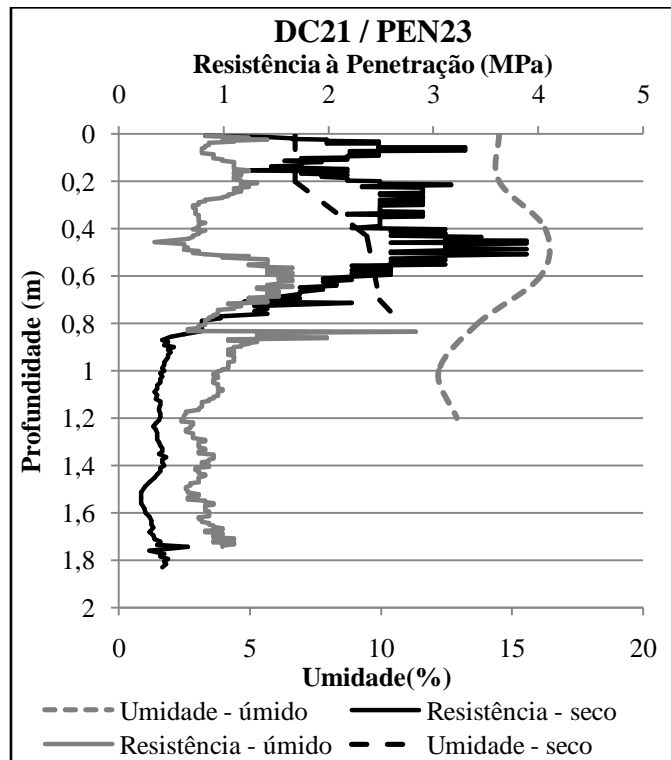


Figura 72 - Resistência mecânica à penetração para o ponto DC 21 / PEN 23, antes e após ensaio de infiltração.

6.2.10. Unidade 10

Para esta Unidade de materiais inconsolidados, foram realizados apenas ensaios de resistência mecânica à penetração.

6.2.10.1. Resistência mecânica à penetração

A curva de resistência mecânica do solo a penetração é apresentada na Figura 73. O ponto PEN 17 apresenta uma resistência média de 5,0 MPa até 60 cm de profundidade, com aumento para valores superiores a 30 MPa entre 80 cm a 1 m e um grande aumento de resistência após 1,30 m de profundidade, sendo esses valores elevados associados a materiais mais grosseiros e rocha fragmentada nas camadas mais profundas.

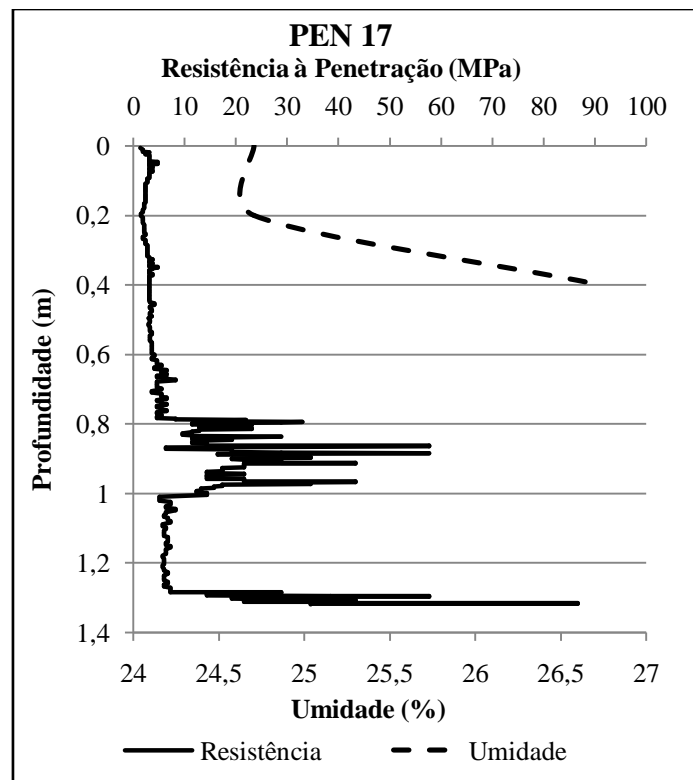


Figura 73 - Resistência mecânica à penetração para o ponto PEN 17.

6.3. Distribuição atual dos materiais inconsolidados

Em decorrência do intenso uso agrícola da bacia, principalmente pela monocultura da cana-de-açúcar, associado ao relevo acidentado e a menor espessura do solo nas regiões próximas aos canais de drenagem, foram identificadas alterações significativas na distribuição dos materiais inconsolidados. A bacia tem como principais usos o agrícola e estradas com e sem pavimento que provocaram mudanças no micro e meso relevo, assim como na distribuição e características dos materiais inconsolidados.

Identificadas as unidades com mais alterações na distribuição dos materiais, elaborou-se um novo mapa de materiais inconsolidados, apresentado no Apêndice F. As unidades que sofreram maior alteração na disposição dos materiais inconsolidados correspondem as hachuradas, sendo estas relacionadas às Unidades 2 e 3 em totalidade e, parcialmente, a 4. A Figura 74 apresenta o perfil estratigráfico dessas três unidades, considerando as modificações registradas em relação às originais.

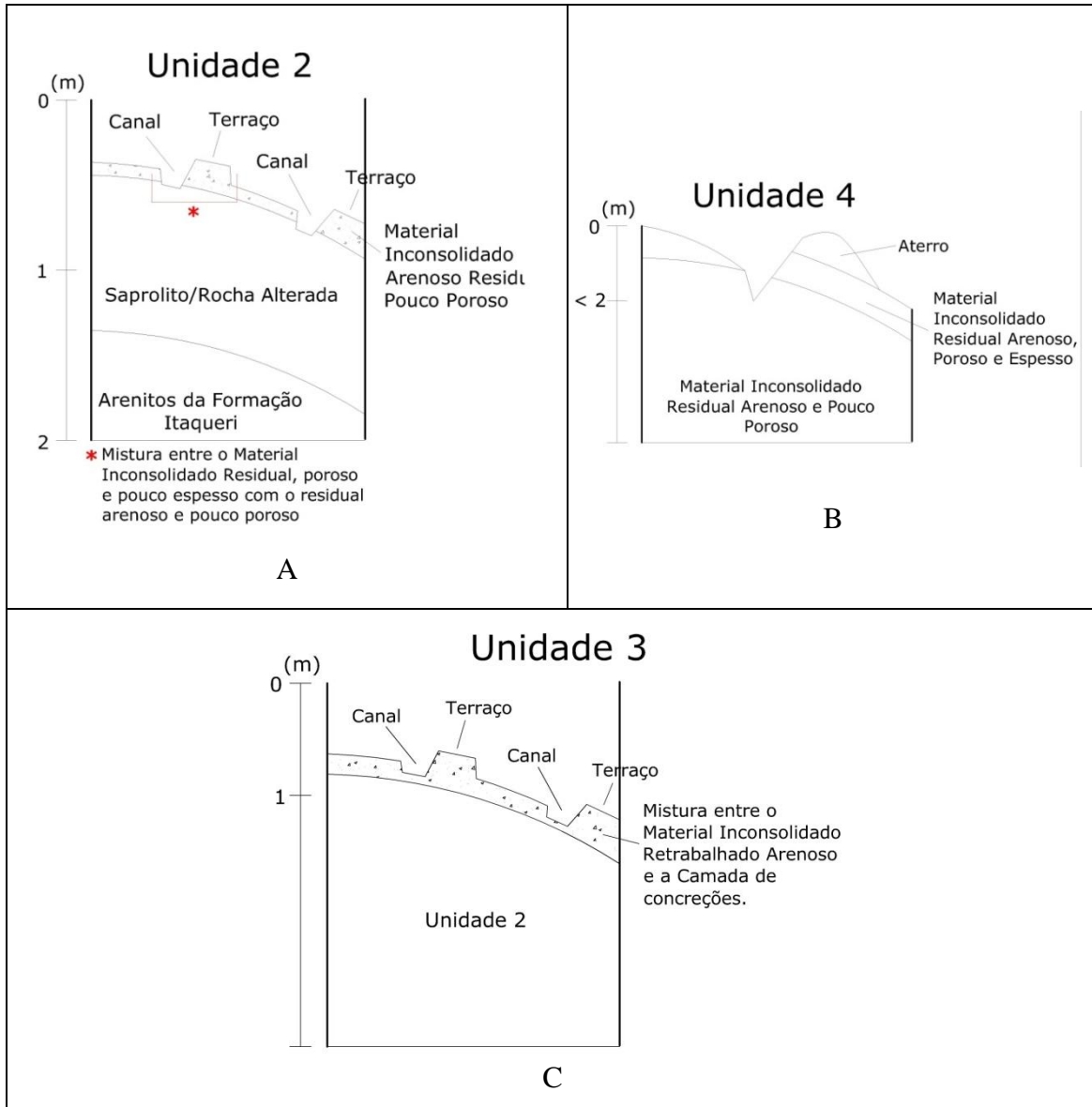


Figura 74 - Perfis estratigráficos de materiais inconsolidados com alteração em suas distribuições.

As estradas, devido a compactação e a pavimentação, são geradoras de alto escoamento superficial que é drenado para as encostas, gerando feições erosivas de dimensões e intensidades variadas. O uso com agricultura, seja a cana-de-açúcar ou reflorestamento, demanda um número significativo de estradas secundárias (aproximadamente 0,02 km² de estradas e carreadores por km² de área da bacia) para o escoamento da produção, resultando no tráfego de maquinário. Como consequência há compactação e aumento da resistência do solo, redução da porosidade, da continuidade

de poros e das taxas de infiltração, potencializando o escoamento superficial, o que gera processos erosivos lineares nas encostas e difusos nos leitos das estradas.

Outro aspecto relacionado à predisposição a erosão devido a alta erodibilidade dos materiais inconsolidados e a declividade, é a constituição de terraços e cordões em nível que alteram as características na escala de meso e micro relevo e na distribuição dos materiais inconsolidados, conforme retratado na Figura 75.

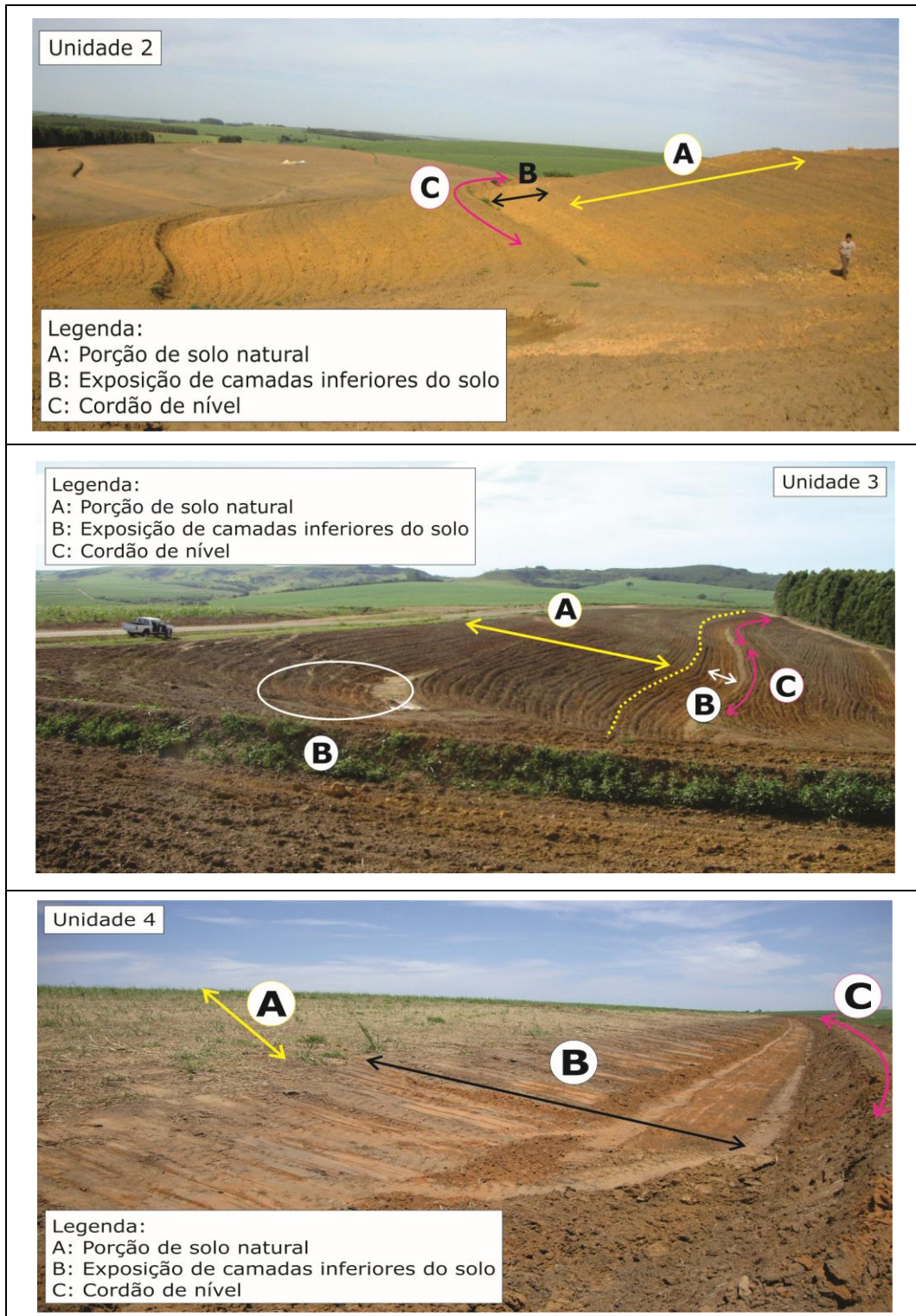


Figura 75 - Terraços e cordões de nível.

O revolvimento constante do solo nessa área leva à exposição de camadas inferiores dos materiais geológicos, assim como as modificações no relevo por meio de alterações no comprimento e formato das encostas, e nos valores de declividade. Os materiais inferiores que se tornam expostos são menos permeáveis que os de recobrimento, de forma a aumentar o escoamento superficial e diminuir as taxas de infiltração de água, o que por vez leva à aceleração dos processos erosivos, e a diminuição da recarga da água subsuperficial. Tais mudanças podem ser observadas em exemplos na Figura 75.

6.4. Alteração da rede de drenagem

A partir dos trabalhos de campo e análise de imagens de satélite e fotos aéreas, foram identificados os canais de drenagem atuais, onde há fluxo de água. A rede de drenagem atual foi comparada com a representada no mapa topográfico de 1980, conforme o mapa apresentado no Apêndice G, indicando o processo de degradação a que foi submetido esse componente ambiental.

A comparação entre as configurações de 1980 e a atual mostra que a maioria das drenagens de cabeceira sofreram redução em sua extensão linear e, em alguns casos, deixaram de existir. Observações de campo apontaram o rebaixamento do nível d'água em toda a rede de drenagem, uma vez que a altitude de ocorrência das nascentes diminuiu em relação ao passado.

Verificou-se ainda, através de trabalhos de campo, as condições das cabeceiras de drenagem dos canais de primeira ordem, além de uma série de alterações nas condições naturais, tais como: processos erosivos, aterramento de cabeceiras, presença de carreadores ou estradas que implicam na compactação do solo, e substituição da vegetação ripária por cultivos. Tais modificações, conseqüentes do uso agrícola, estão relacionadas às mudanças na configuração do sistema de drenagem da região. As cabeceiras dos canais avaliados também são indicadas no mapa do Apêndice G, juntamente aos locais com alterações descritas na Tabela 27.

6.5. Processos erosivos

Na área de estudo observa-se a ocorrência de processos erosivos lineares, em diferentes estágios evolutivos; tanto nas cabeceiras dos canais de drenagem quanto em trechos das encostas próximos aos canais (Figura 76), em decorrência do tipo de materiais inconsolidados e de declividades acentuadas (em média de 5 a 25%) que favorecem a ocorrência do processo erosivo. A Tabela 27 detalha a caracterização de algumas áreas onde processos erosivos foram observados e descritos. A Figura 76 apresenta alguns exemplos dos processos observados.

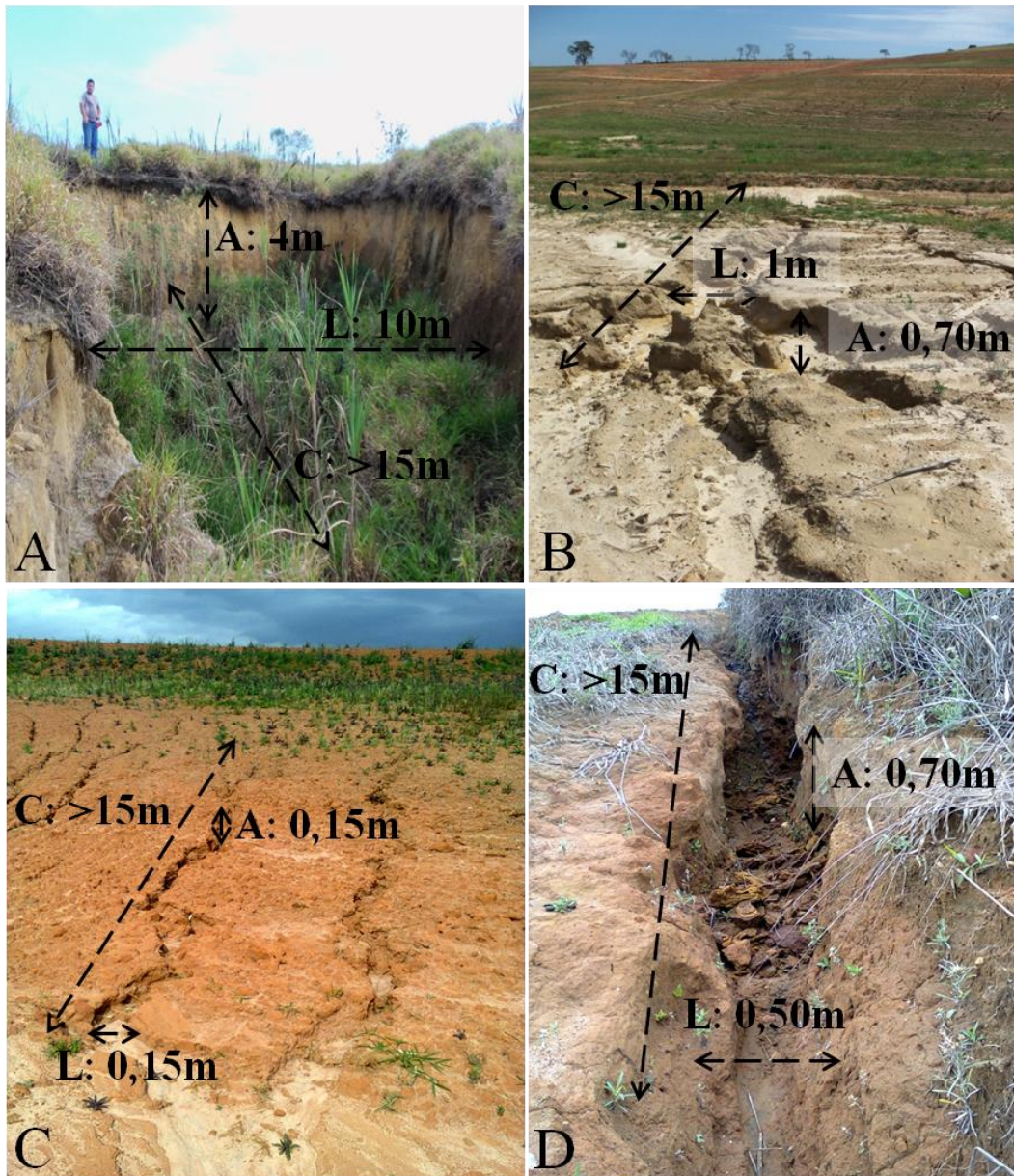


Figura 76 - Exemplos de feições erosivas encontradas na área em estudo (Tabela 27): A- Voçoroca ativa; B e C - Diversos sulcos de encosta; D- Ravina contínua ao canal drenagem, sendo: L: largura, C: comprimento e A: altura.

Tabela 27 - Caracterização geral dos processos de degradação ambiental, com destaque para os processos erosivos.

Área	Caracterização	
	Problema/Alteração	Evidência degradativa
1 Cabeceira de drenagem (Cana/Reflorestamento)	Compactação e exposição do solo no entorno (nos carreadores); Processos erosivos; Aterramento da cabeceira por maquinário	Sulcos e Ravinas contínuos em relação ao canal de drenagem e de cabeceira, com extensões acima de 2 m, larguras e profundidades variadas, entre 0,20 m a 0,80 m e 0,20 m a 1 m, respectivamente; Redução do tamanho linear das drenagens de primeira ordem.
2 Cabeceira de drenagem Figura 76A (Cana)	Processos erosivos	Pequenos sulcos descontínuos em relação ao canal de drenagem, de cerca de 0,10 m de largura, 0,10 m de profundidade e comprimentos entre 0,50 m e 1,5 m; Voçoroca ativa, descontínua em relação ao canal de drenagem, com cerca de 4 m de profundidade, 10 m de largura e comprimento superior a 15 m.
3 Cabeceira de drenagem (Cana)	Compactação e exposição do solo no entorno (nos carreadores); Aterramento da cabeceira da drenagem por ação de maquinário agrícola, identificado pelo revolvimento e exposição do solo.	Ravina de cabeceira, contínua em relação ao canal de drenagem, com cerca de 1 m de largura, 0,60 m de profundidade e comprimento superior a 10 m; Erosão do cordão de nível próximo a drenagem
4 Área com erosão Meio de encosta (Cana) Figura 76B	Processos erosivos	Diversos sulcos de encosta, descontínuos em relação ao canal de drenagem, de cerca de 0,30 m de profundidade e 0,50 m de largura e comprimentos acima de 10 m; Ravina de encosta, descontínua em relação à drenagem, com cerca de 0,70 m de profundidade, 1 m de largura e comprimento acima de 10 m.
5 Cabeceira de drenagem (Cana)	Compactação e exposição do solo no entorno (no carreador) Processos erosivos	Redução do tamanho linear da drenagem de primeira ordem; Voçoroca estável de cabeceira e contínua a drenagem, com cerca de 3 m de profundidade, 3 m de largura e comprimento acima de 10 m, com afloramento de água em seu interior (contribui para abastecimento do corpo d'água).

Continuação da Tabela 27 - Caracterização geral dos processos de degradação ambiental, com destaque para os processos erosivos.

6			Voçoroca estável de cabeceira e contínua a drenagem, com cerca de 3 m de profundidade, 5 m de largura e comprimento acima de 10 m. Sem afloramento de água próximo as paredes da feição, ocorrendo a cerca de 30 m a jusante.
Cabeceira de drenagem (Pasto)		Processos erosivos	
7			Sulcos de encosta, contínuos em relação à drenagem, medindo cerca 0,15 m de largura, 0,15 m de profundidade e comprimento variando entre 1 m e acima de 5 m.
Cabeceira de drenagem Figura 76C (Cana)		Processos erosivos	
8	Exposição e compactação do solo no entorno (nos		Sulcos, contínuos em relação à drenagem, e de cabeceira, de cerca de 0,20 m a 1 m de largura, 0,15 a 0,50 m de profundidade e comprimento variando entre 0,50 m e 5 m;
Cabeceira de drenagem (Cana)	carreadores); Processos erosivos		Voçoroca ativa de cabeceira, contínua em relação à drenagem, com cerca de 4 m de profundidade, 10 m de largura e 20 m de comprimento.
9			Voçoroca ativa e descontínua em relação à drenagem, com cerca de 2,5 m de profundidade, 3 m de largura e comprimento superior à 10 m.
Cabeceira de drenagem (Cana)		Processo erosivo	
10	Compactação e exposição do solo no entorno (nos		Voçoroca ativa, contínua em relação à drenagem e de cabeceira, com dimensões iguais a 2,5 m de profundidade, 3,5 m de largura e comprimento superior a 20 m, com afloramento de água em seu interior;
Cabeceira de drenagem (Cana)	carreadores); Processos erosivos Aterramento desta por ação de maquinário agrícola, identificada pelo revolvimento e exposição de camadas inferiores do solo		Redução do tamanho linear da drenagem de primeira ordem.
11	Compactação e exposição do solo no entorno (nos		Afloramento e fluxo de água subsuperficial no interior de ravina paralela ao canal de drenagem, com cerca de 0,50 m de largura, 0,70 m de profundidade e extensão acima de 15m;
Cabeceira de drenagem Figura 76D (Cana)	carreadores); Processos erosivos Aterramento da cabeceira por maquinário agrícola		Uma segunda ravina de, aproximadamente, mesmas dimensões do outro lado do canal de drenagem; Redução do tamanho linear da drenagem de primeira ordem.

De modo geral, foram identificadas várias feições erosivas lineares na área de estudo, sendo estas 10 voçorocas ativas, 4 voçorocas estáveis, 6 grupos principais de ravinas e 10 grupos principais de sulcos. A maioria dessas feições localiza-se nas cabeceiras, de forma contínua em relação aos canais drenagens de primeira ordem. Por sua vez, os processos erosivos de encosta, descontínuos em relação à drenagem, ocorrem sob a forma de ravinas ou sulcos à montante dos cordões de nível; ou, em menor quantidade, sob a forma de voçorocas, ravinas e sulcos associados aos carregadores e estradas de terra. Quanto às dimensões, as maiores voçorocas alcançam 4 metros de profundidade, 20 metros de largura e cerca de 50 metros de comprimento.

Os sulcos e ravinas, apesar das pequenas dimensões (< 1 m de largura e 0,50 m de profundidade), são bastante frequentes e muitas vezes estas feições são eliminadas por máquinas agrícolas durante o processo preparação para o cultivo. Contudo, é recorrente o retorno de tais feições, indicando que as condições de instalação de processo erosivo acelerado não cessam com a manutenção do terreno para a agricultura. Em algumas ocasiões, as erosões com maiores dimensões são aterradas, sendo realizado um trabalho posterior de preparo do terreno para plantio ou mesmo deixando a área sem uso.

A ocorrência de voçorocas estáveis, com presença de vegetação em seu interior, demonstra possibilidade de controle dos processos erosivos quando cessados os fatores predisponentes e deflagradores, principalmente a exposição do solo à chuva e ao escoamento superficial. O relativo “abandono” da área circundante a estas feições, sem estabelecimento de uso definido e com presença de vegetação rasteira (gramíneas), pode ser apontado como possível responsável pela estabilização das voçorocas. Em algumas situações, cessado o revolvimento e exposição do solo, houve o surgimento de cobertura vegetal protetora e uma melhora na estrutura e agregação do solo ocasionada pela presença de raízes.

7. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A partir dos ensaios de caracterização geral, verificou-se que a bacia em estudo constitui-se de materiais inconsolidados areno-argilosos, residuais da Formação Itaqueri, com predomínio da fração arenosa (60% a 75%) para a maior parte das amostras analisadas. O ensaio para determinação da massa específica aparente seca geral apontou maior compactação dos materiais superficiais em relação aos retirados no mesmo local, porém em maiores profundidades, refletindo uma maior compactação desta camada.

O ensaio de resistência mecânica à penetração permitiu uma avaliação desse processo de compactação ao longo do perfil do solo e para diferentes usos na bacia. Para a maioria dos locais onde foram realizados os ensaios, os maiores valores de resistência foram encontrados para as camadas superficiais, sobretudo entre 0-20 cm de profundidade. Destaca-se que para alguns casos, observou-se uma resistência elevada a maiores profundidades, como os pontos PEN 17 e PEN 19, onde a presença de material rochoso nessas profundidades pode ter originado o aumento da resistência.

Em relação ao tipo de uso do solo, a resistência à penetração mostrou-se superior nos carregadores e estradas secundárias, em virtude do tráfego de veículos e máquinas agrícolas. Valores superiores a 10 MPa foram facilmente encontrados nas camadas mais superficiais (0-20 cm) para a maior parte dos carregadores, com redução em função da profundidade.

As áreas sob cultivo de cana-de-açúcar apresentaram resistências médias inferiores aos de carregadores e estradas secundárias, entre 2,5 MPa a 6,0 MPa na camada entre 0-20 cm de profundidade. Contudo, alguns locais apresentaram valores inferiores a 1 MPa, sendo que o solo nestes pontos havia sido recém-arado e gradado, sendo este o principal fator condicionando da diferença de resistências entre os tipos de usos. Além disso, a presença da vegetação e de matéria orgânica na superfície do solo, como a palha da cana, por exemplo, acaba por proteger o solo do impacto das gotas de chuva, atuar na manutenção da umidade e melhoria da sua estrutura por meio da presença e crescimento radicular.

As áreas de pastagens apresentaram valores distintos entre si, sendo a maior resistência para o ponto PEN 18 (4 MPa a 6 MPa na camada superficial), onde a presença de animais e consequente pisoteio acaba por ocasionar uma compactação mecânica.

A variação de valores tanto em função do uso do solo quanto seu estágio evolutivo também foi verificada para a condutividade hidráulica saturada de campo. As menores condutividades foram observadas para os carregadores, enquanto que maiores condutividades foram encontradas para locais sob cultivo de cana e pastagem. Contudo, mesmo os locais sob cultivo de cana apresentaram valores distintos, com a taxa de infiltração mostrando-se muito superior nos pontos onde o solo havia sido recém-

preparado para cultivo, uma vez que o processo de infiltração é facilitado em virtude da desestruturação e descompactação das camadas superficiais do solo. 7

Em relação à erodibilidade dos materiais da bacia, estes apresentam uma heterogeneidade de valores, tanto em função da unidade geológica a qual pertence quanto do uso do solo. Para estes materiais, condicionantes externos, como sua exposição em virtude das práticas agrícolas, intensidade de precipitações e forma da encosta são de grande importância para desencadear processos erosivos.

Contudo, alguns materiais merecem destaque, como os amostrados no ponto PEN 4, que apresentaram maior erodibilidade dentre todas as amostras analisadas. A partir dos trabalhos de campo verificou-se que, de fato, a área próxima ao ponto de amostragem PEN 4 apresenta vários processos erosivos em encosta, sobretudo sulcos com diversos comprimentos, além do assoreamento do cordões de nível com material carregado pelo escoamento superficial.

Em relação às encostas, constatou-se que, de maneira geral, a bacia apresenta o formato linear-convexo ((RUHE, 1975) como predominante, sendo também observado o tipo convexo-convexo. Ressalta-se que uma mesma encosta pode apresentar diferentes declividades ao longo de seu comprimento, ou seja, pode ser verificada uma sucessão de tipos geométricos na encostas, sendo considerado, nestes casos, o formato predominante.

Nas encostas imediatamente a montante dos canais de cabeceira, os tipos geométricos predominantes são o linear-côncavo e, em menor escala, o convexo-côncavo. Nestes casos, há uma predisposição à concentração de escoamento, podendo desencadear processos erosivos lineares, como de fato é observado em trechos próximos à diversas cabeceiras de canais.

Como já descrito anteriormente, as feições erosivas de maiores dimensões (ravinas e voçorocas) são encontradas próximas as cabeceiras, devido, sobretudo, ao formato das encostas, predisposição dos materiais inconsolidados e práticas agrícolas que envolvem o revolvimento do solo.

8. CONCLUSÕES

De maneira geral, a bacia do Ribeirão do Pinheirinho é constituída de materiais inconsolidados areno-argilosos, residuais da Formação Itaqueri. Tais materiais, mais porosos, são responsáveis pela infiltração da água da chuva, favorecendo a recarga da água subsuperficial; mas ao mesmo tempo podem apresentar maior suscetibilidade aos processos erosivos quando associados fatores externos, como formato da encosta, desestruturação e exposição do solo e intensidade de chuvas. Devido ao uso predominantemente agrícola com práticas que acabam por expor o solo ao escoamento superficial, é comum a ocorrência de processos erosivos lineares na bacia.

Dentre as práticas agrícolas comuns estão o revolvimento do solo e construção de cordões de nível, que promovem a exposição de camadas inferiores dos materiais geológicos. As Unidades de materiais inconsolidados 2, 3 e 4 são as mais afetadas por essas ações. Além da exposição dos materiais mais profundos e, em alguns casos, com menor permeabilidade, também é ocasionada alteração do relevo por meio de modificações no comprimento e formato da encosta, assim como nos valores de declividade.

O tráfego de maquinário em carregadores e estradas secundárias, sobretudo em épocas de colheita e plantio das culturas, gera compactação do solo e redução da sua porosidade e capacidade de infiltração de água, ocasionando aumento do escoamento superficial. A partir dos ensaios com penetrômetro dinâmico, observou-se que os maiores valores de resistência mecânica à penetração estão associados a carregadores. Nas áreas de cultivo de cana-de-açúcar, foram encontrados valores inferiores aos dos carregadores, derivado, principalmente, das atividades de manejo do solo por maquinário e implementos agrícolas, como aragem e gradagem.

No que se refere aos canais de drenagem, as alterações citadas anteriormente contribuem para o rebaixamento do nível de água em todo o sistema de drenagem da bacia. Esse processo foi evidenciado pelas alterações na configuração do sistema de drenagem ao longo dos anos, tanto pela redução linear dos canais, quanto pela diminuição da altitude de localização das nascentes.

A utilização do solo para fins agrícolas e as conseqüentes técnicas de cultivo, em especial o revolvimento do solo e construção de cordões de nível, associada às características dos materiais geológicos da bacia podem ser apontadas como principais fatores para os processos de degradação observados, em especial a redução do nível dos corpos hídricos de primeira ordem e presença de diversos processos erosivos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANON, Q. (1977). **The description of rock masses for engineering purposes**. Report by the Geological Society Engineering Group Working Party. Q J Eng Geol Hydroge 10:355–388.
- AGUIAR, L. S. G.; DOS SANTOS TARGA, M.; BATISTA, G. T. (2007). **Escoamento superficial na bacia hidrográfica do Ribeirão Itaim**. Revista Ambiente e Água—An Interdisciplinary Journal of Applied Science: v, 2(1).
- BEASLEY, R. P. (1972). **Erosion and Sediment Pollution Control**. The Iowa State University Press. Ames, Iowa. 320p.
- BENGOUGH, A. G.; MULLINS, C. E. (1990). **Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses**. Journal of soil science, v. 41, n. 3, p. 341-358.
- BENNIE, A. T. P.; KRYNAUW, G. N. (1985). Causes, adverse effects and control of soil compaction. In: **South African Journal of Plant and Soil**, v. 2, n. 3, p. 109-114.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. (1990). **Conservação do solo**. São Paulo, Editora Ícone. 355 p.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. (2005). **Conservação do solo**. São Paulo, Editora Ícone. 5ª ed. 355 p.
- BIRKELAND, P. W. (1974). **Pedology, weathering and geomorphological research**. Boulder: Departamento of Geological Sciences, University of Colorado. 285p.
- BLAIKE, P.; BROOKFIELD, H (1987). **Land degradation and society**. Methuen, London.
- CARSON, M. A.; KIRKBY, M. J. (1975). **Hillslope form and process**. Oxford, Cambridge University Press. 475 p.
- CASSAN, M. (1982). **Los Ensayos in Situ em la Mecânica del Suelo**. Barcelona: Editores Técnicos Asociados, S.A. p. 139-166.
- COELHO NETTO, A. L. (1998). Hidrologia de encosta na interface com a geomorfologia. In: GUERRA, J. T.; CUNHA, S. B. (org). **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. 3ª Edição. Rio de Janeiro, Bertrand Brasil. pag 149-210.
- DAVIES, S.; LACEY, A., (2011). **Subsurface compaction: A guide for WA farmers and consultants**. Department of Agriculture and Food, Western Australia.

DEARMAN, W. R.; FOOKES, P. G. (1974). **Engineering geological mapping for civil engineering practice in the United Kingdom**. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 7(3), 223-256.

DUIKER, W. S. (2004). **Effects of soil compaction**. Agricultural Research and Cooperative Extension. College of Agricultural Sciences. Pennsylvania State University.

FAGUNDES, J. R. T. (2010). **Estudo integrado das características geológico-geotécnicas com vista à avaliação de recarga de aquífero: região de São Carlos – SP**. Tese (Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.

FDALR - Departamento Federal de Agricultura e Recursos Terrestres da Nigéria e SWECO International e Niger Surveys and Consultants. (1999). **Assessment of Soil Degradation in Nigeria**. Vol.1.

FOLEY, J. A.; DEFRIES, R.; ASNER, G. P.; BARFORD, C.; BONAN, G.; CARPENTER, S. R.; CHAPIN, F. S.; COE, M. T.; DAILY, G. C.; GIBBS, H. K.; HELKOWSKI, J. H; HOLLOWAY, T.; HOWARD, E. A.; KUCHARIK, C. J.; MONFREDA, C.; PATZ, J. A.; PRENTICE, I. C.; RAMANKUTTY, N.; SNYDER, P. K. (2005). **Global consequences of land use**. Science, V.309, 570-574.

FUREGATTI, S. A. (2012). **Avaliação da variabilidade das características geotécnicas relacionadas aos processos erosivos com ensaios in situ**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

GUERRA, J. T. Processos erosivos nas encostas. In: GUERRA, J. T.; CUNHA, S. B. (org) (1998). **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. 3ª Edição. Rio de Janeiro, Bertrand Brasil. pag 149-210.

GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. (2010). **Erosão e conservação dos solos – Conceitos, Temas e Aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil., 340p.

HERRICK, J. E.; JONES, T. L. (2002). **A dynamic cone penetrometer for measuring soil penetration resistance**. Soil Science Society of America Journal, 66(4), 1320-1324.

IAEG - International Association of Engineering Geology (1981). **Rock and soil description and classification for engineering geological mapping**. Bull Int Assoc Eng Geol 24:253–274.

INTERNATIONAL SOCIETY OF ROCK MECHANICS (ISRM) (1978). **Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses**. Int J Rock Mech Min 15:319–368.

JOHNSON, D.; LEWIS, L. (1995). **Land degradation: creation and destruction**. Blackwell, Oxford, 490 pp.

KARMANN, I. (2000). Ciclo da água subterrânea e sua ação geológica. In: TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C. M.; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F. (org). **Decifrando a Terra**. São Paulo, Oficina de Textos. p. 113-138.

KOEPPEN, W. (1948) *Climatologia: con un estudio de los climas de la tierra*. Fondo de Cultura Econômica. México. 479p.

LINDSKOG P, TENGBERG A (1994). **Land degradation, natural resources and local knowledge in the Sahel zone of Burkina Faso**. *Geojournal* 33:365–375.

MONIZ, A. C. (coord.) (1972). **Elementos de pedologia**. São Paulo, Editora Polígono. Universidade de São Paulo. 459p.

MORGAN, R. P. C. (1986). **Erosion and conservation**. Longman Group. Inglaterra. 298p.

MORGAN, R. P. C. (1995). **Soil erosion and its control**. 2ªed. Longman. New York. 198p.

NOGAMI, J. P.; VILLIBOR, D. F. (1979). **Soil Characterization of mapping units for highway purposes in a tropical área**. *Bulletin of Engineering Geology and the Enviroment*, v. 19.

OLIVEIRA, J. B.; CAMARGO, M. N.; JACOMINE, P. K. T. (1992). **Classes gerais de solos do Brasil: Guia auxiliar para seu conhecimento**. 2ª Edição. Jaboticabal, Funep. 201p.

PALMIERI, F.; LARACH, J. O. I. (1996) *Pedologia e Geomorfologia*. In: GUERRA, J. T., CUNHA, S. B. (org). **Geomorfologia e meio ambiente**. Rio de Janeiro, Editora Bertrand Brasil. 372p.

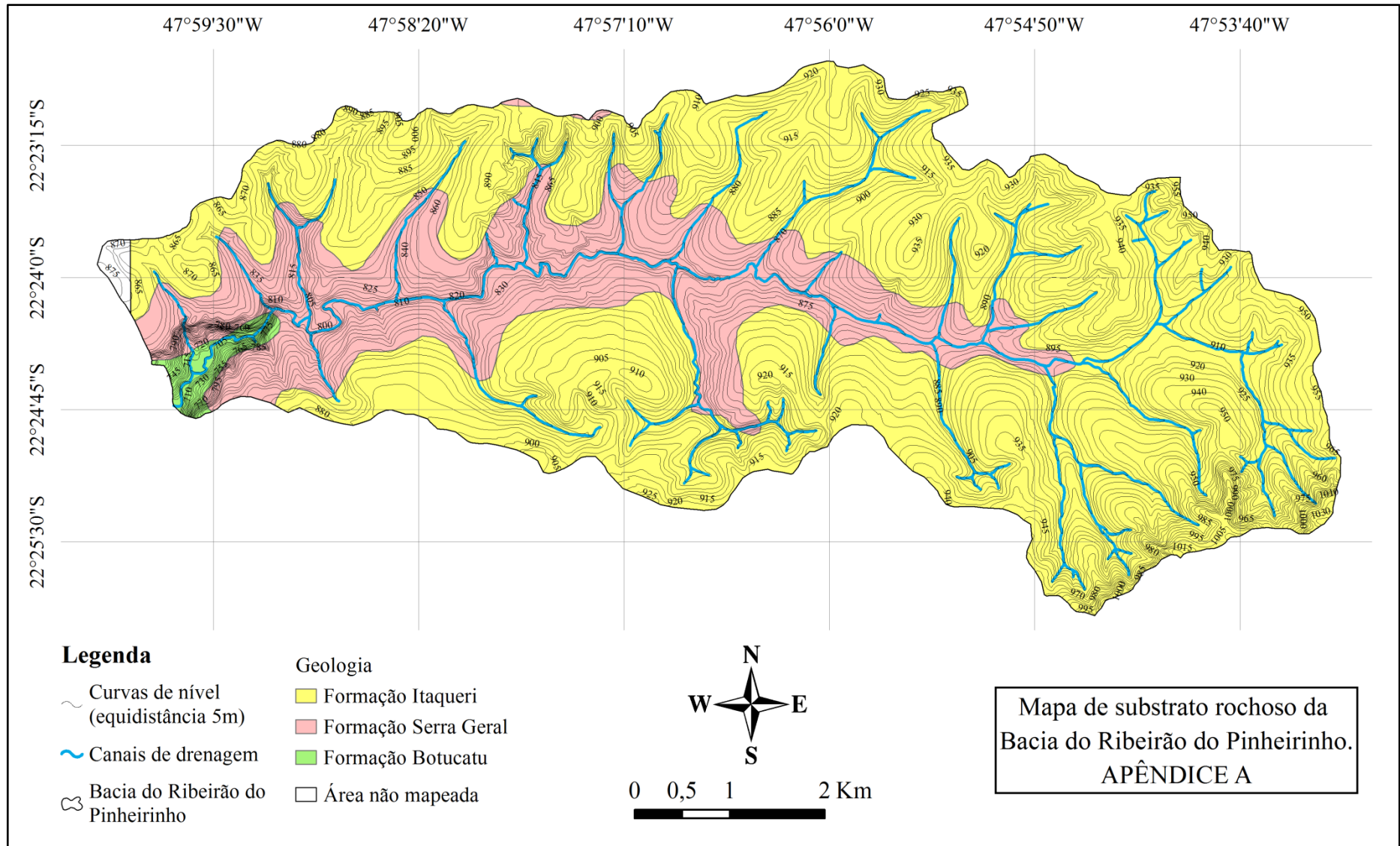
PEJON, O.J. (1992). **Mapeamento Geotécnico da folha de Piracicaba–SP (escala 1:100.000): estudo de aspectos metodológicos, de caracterização e de apresentação dos atributos**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 224 p.

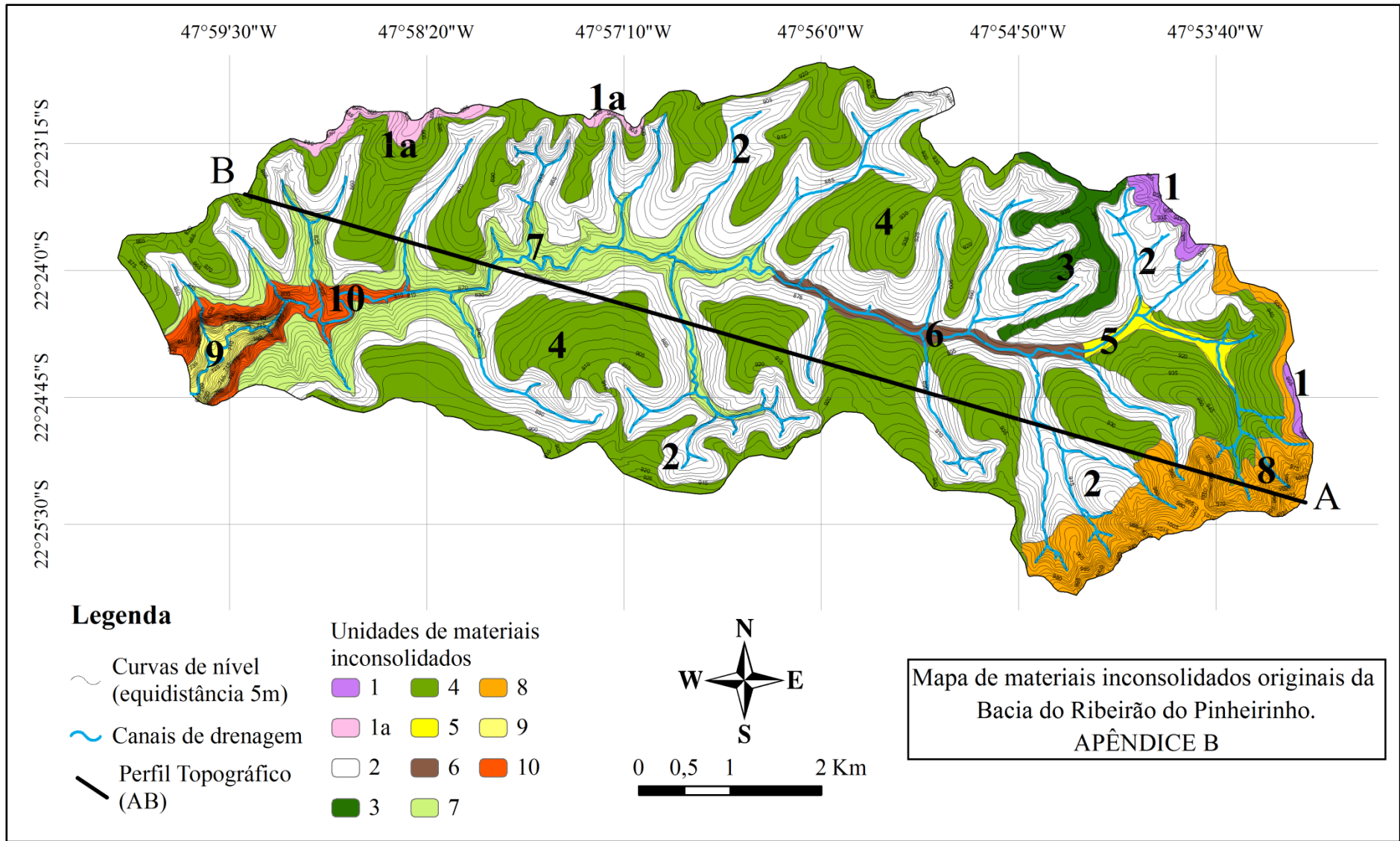
REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J., (2007). **Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação**. *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 5, p. 49-134.

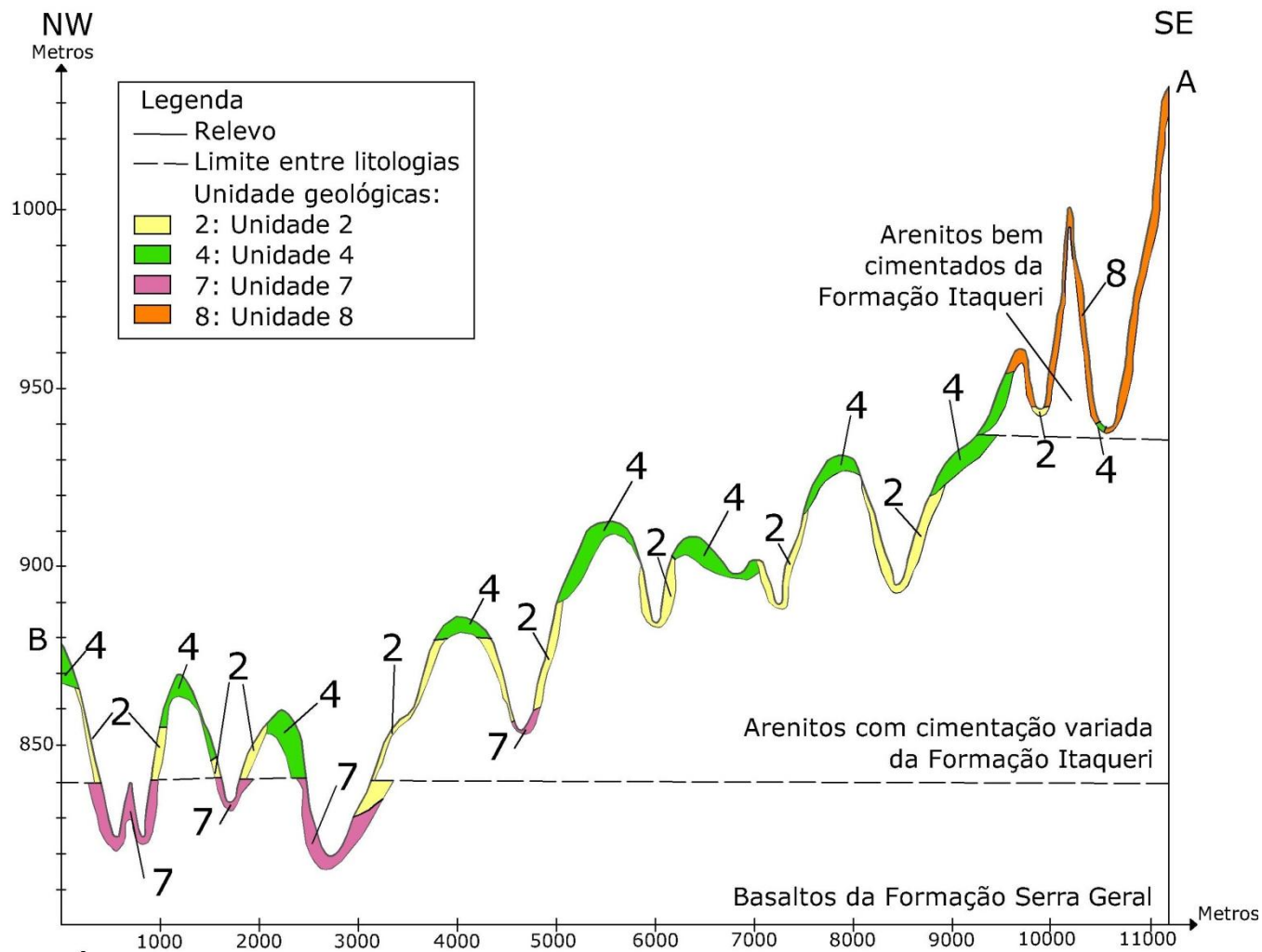
ROCHA, O; PIRES, J. S. R.; SANTOS, J.E. dos. (2000). A bacia hidrográfica como unidade de estudo e planejamento. In: Espindola, E. L. G. **A bacia hidrográfica do rio Monjolinho: Uma abordagem Ecosistêmica e a visão interdisciplinar**. São Paulo: Rima. p.1-16.

- RODRIGUES, J. E. (1982). **Estudo de fenômenos erosivos acelerados: boçorocas**. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.
- RUHE, R.V. (1975). **Geomorphology**. Houghton Mifflin Company, 246 pp.
- TRIPATHI, M. P.; PANDA, R. K.; RAGHUWANSHI, N. S. (2003). **Identification and Prioritisation of Critical Sub-watersheds for Soil Conservation Management using the SWAT Model**. Biosystems Engineering 85 (3), 365–379.
- TROEH, F.R. (1965). **Landform equations fitted to contour maps**. American Journal of Science, v.263, p.616-627.
- TUCCI, C. E.; CLARKE, R. T. (1997). **Impacto das mudanças da cobertura vegetal no escoamento: revisão**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos,2(1), 135-152.
- TUNDISI, J. G. (2003). **Gestão das águas - Ciclo hidrológico e gerenciamento integrado**. Cienc. Cult. vol.55 no.4 São Paulo Oct./Dec.
- XUJIONGXIN (1996). Benggang erosion: the influencing factors. In: **Catena**. V.27. pag. 249-263
- VANAGS, C.; MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B. (2004). The dynamic penetrometer for assessment of soil mechanical resistance. In: **Proceedings of the 3rd Australian New Zealand Soils Conference**. p. 5-9.
- YANG, Q.; MENG, F. R.; ZHAO, Z.; CHOW, T. L.; BENOY, G.; REES, H. W.; BOURQUE, C. P. A. (2009). **Assessing the impacts of flow diversion terraces on stream water and sediment yields at a watershed level using SWAT model**. Agriculture, Ecosystems & Environment, 132(1), 23-31.
- ZUQUETTE, L. V.; PEJON, O. J.; DOS SANTOS COLLARES, J. Q. (2004). **Land degradation assessment based on environmental geoindicators in the Fortaleza metropolitan region, state of Ceará, Brazil**. Environmental geology,45(3), 408-425.

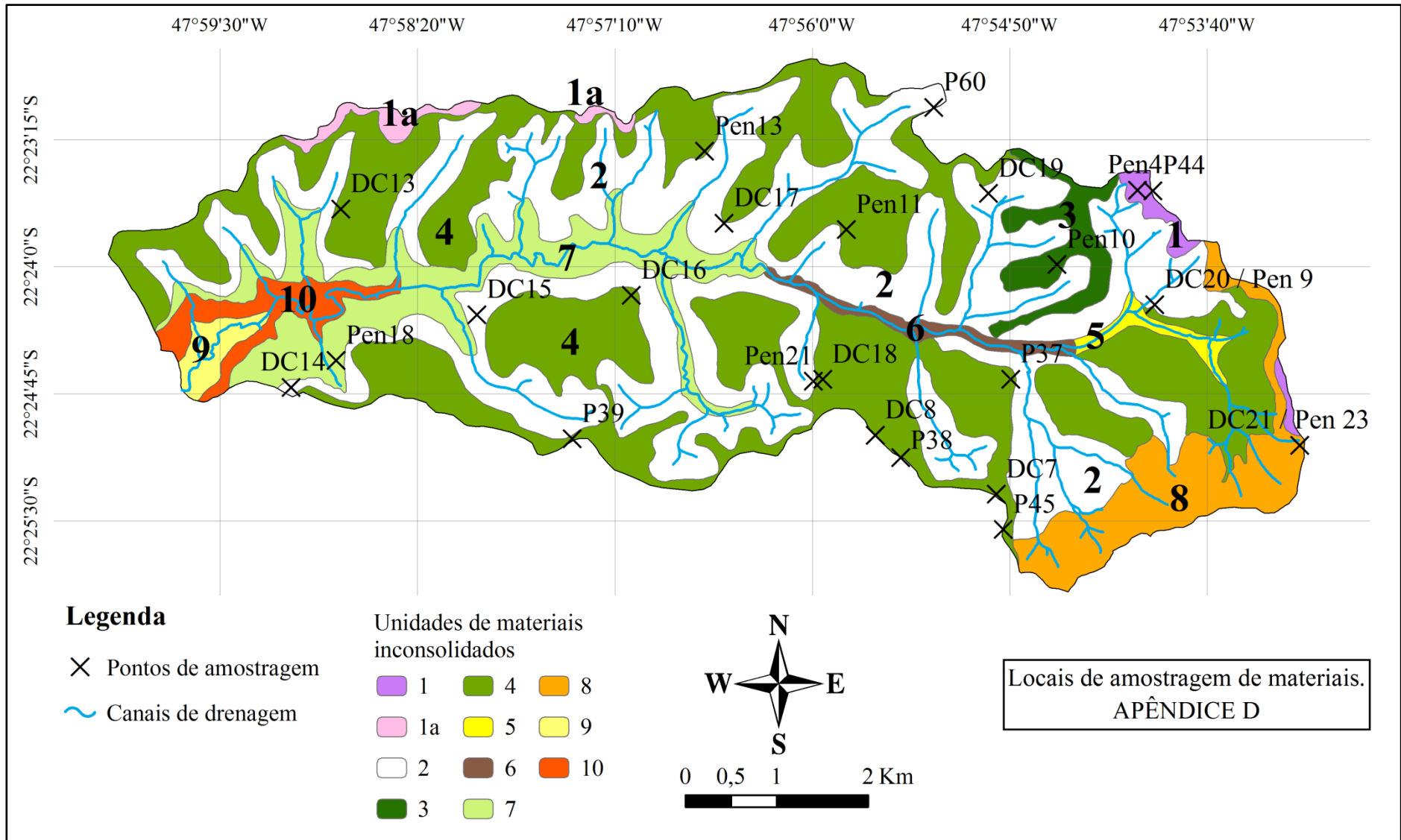
APÊNDICES







APÊNDICE C - Seção geológica com a distribuição de algumas unidades de materiais em relação ao relevo.



47°59'30"W 47°58'20"W 47°57'10"W 47°56'0"W 47°54'50"W 47°53'40"W

22°23'15"S
22°24'0"S
22°24'45"S
22°25'30"S

