



Felipe Ferreira Oliveira

**INVESTIGAÇÃO MULTIDISCIPLINAR DE PROCESSOS EROSIVOS LINEARES
URBANOS: ESTUDO DE CASO DE UMA VOÇOROCA NO BAIRRO DO BEQUIMÃO –
SÃO LUÍS -MA**

São Luís – MA
Janeiro 2018

Felipe Ferreira Oliveira

**INVESTIGAÇÃO MULTIDISCIPLINAR DE PROCESSOS EROSIVOS LINEARES
URBANOS: ESTUDO DE CASO DE UMA VOÇOROCA NO BAIRRO DO BEQUIMÃO –
SÃO LUÍS -MA**

Monografia apresentada à Coordenação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Maranhão, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

São Luís – MA
Janeiro 2018

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Núcleo Integrado de Bibliotecas/UFMA

Oliveira, Felipe Ferreira.

Investigação Multidisciplinar de Processos Erosivos Lineares Urbanos: Estudo de Caso de uma Voçoroca no Bairro do Bequimão São Luís -MA / Felipe Ferreira Oliveira. - 2018.

62 p.

Orientador: Rodrigo da Cruz de Araujo. Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2018.

1. Erodibilidade. 2. Erosão. 3. Solo. 4. Voçoroca.
I. Araujo, Rodrigo da Cruz de. II. Título.

Monografia avaliada e aprovada em sua versão final pela banca examinadora constituída pelos docentes abaixo assinados:

Rodrigo da Cruz de Araujo, Dr. (Orientador)
Universidade Federal do Maranhão

Lucy Rosana Silva, Dra.
Universidade Federal do Maranhão

George Fernandes Azevedo, Dr.
Universidade Federal do Maranhão

“Os céus proclamam a glória de Deus e o firmamento anuncia a obra das suas mãos. Salmos 19.1.”

RESUMO

Processos erosivos lineares têm se mostrado eficazes modificadores da paisagem urbana da ilha de São Luís, em um fenômeno que é fruto da erosão acelerada causada à ação antrópica. Devido a sua complexidade, o estudo desse fenômeno exige naturalmente uma investigação multidisciplinar. O objetivo deste trabalho é diagnosticar a suscetibilidade a erosão de uma área localizada no bairro Bequimão bem como compreender a gênese e evolução de um processo erosivo em estágio de voçoroca. A metodologia adotada neste trabalho consiste no estudo multidisciplinar do processo erosivo considerando os seguintes aspectos: caracterização geotécnica, caracterização do meio físico, uso do solo e cobertura vegetal. Os resultados da pesquisa apontam que todos os fatores condicionantes do processo erosivo considerados neste trabalho colaboram para a evolução do fenômeno, podendo-se confirmar que análises multidisciplinares permitem identificar adequadamente áreas suscetíveis à erosão.

Palavras Chaves: Erosão, Solo, Erodibilidade, Voçoroca.

ABSTRACT

Linear erosive processes have been effective modifiers of the urban landscape of the island of São Luís, in a phenomenon that is fruit of the accelerated erosion caused by the anthropic action. Due to its complexity, the study of this phenomenon naturally requires a multidisciplinary investigation. The objective of this work is to diagnose the susceptibility to erosion of an area located in the Bequimão neighborhood as well as to understand the genesis and evolution of an erosive process in the gully stage. The methodology adopted in this work consists of the multidisciplinary study of the erosive process considering the following aspects: geotechnical characterization, characterization of the physical environment, soil use and vegetation cover. The results of the research indicate that all the erosive conditioning factors considered in this work collaborate for the evolution of the phenomenon, and it can be confirmed that multidisciplinary analyzes allow to identify adequately areas susceptible to erosion.

Key Words: Erosion, Soil, Erodibility, Gully.

AGRADECIMENTOS

À Deus que está presente em mim e em tudo que faço e que me sustentou em todas as dificuldades que atravessei durante essa longa fase da minha graduação, renovando minha força, minhas esperanças e minha fé;

Ao professor Dr. Rodrigo da Cruz de Araujo, por ter me acolhido na orientação e por toda ajuda na realização deste trabalho e principalmente pela paciência;

À minha mãe Biatriz que, com muito amor, além de me alfabetizar, plantou em mim o gosto pelos estudos e nunca me deixou desistir;

Ao meu pai Valdeci que sempre me apoiou em toda minha carreira acadêmica e na vida;

Agradeço a minha namorada Andrezza que sempre me ajudou, mesmo antes de me conhecer e tem alegrado muito o meu coração nesses últimos dois anos. Agradeço também por ter me compreendido nos momentos de ausência.

À Isabella que me ajudou generosamente na realização do ensaio de sedimentação e sempre atendeu minhas “n’s” ligações;

Ao Prof. Anderson da UEMA por voluntariamente ter me ajudado e depois ter me recebido e orientado com toda paciência na sua sala de aula mesmo em meio a aplicação de provas;

À Prof^a Teresinha por ter cedido o Laboratório de Solos e Pavimentação e ao técnico Teodósio na realização dos ensaios de granulometria, Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade;

Agradeço também ao meu grande amigo Isaac, não só por ter me acolhido em sua casa durante os dois últimos anos da minha graduação, mas por tudo o que pude aprender com ele nesse período.

À Isaac, novamente, Gustavo, João Pedro, João Marcos e Eduardo por todo o companheirismo ao longo dos últimos dois anos;

Aos meus amigos e guerreiros da primeira turma de Engenharia Civil da UFMA.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processos e formas erosivas.....	16
Figura 2 - Fatores condicionantes da erosão.	18
Figura 3 - Classificação de vertentes segundo a forma em perfil e em mapa segundo Troeh, (1965 apud Casseti, 2005).	20
Figura 4 - Proposta de separação de zonas de erodibilidade utilizando o triângulo textural.....	24
Figura 5 - Vista em planta da área estudada.	35
Figura 6 - Ilustração dos componentes da área de estudo.	36
Figura 7 - Região com maior concentração de feições erosivas.....	37
Figura 8 - Vista no sentido P01-Mangue.....	38
Figura 9 - Vista no sentido P01-RUA 11.	38
Figura 10 - Início da voçoroca.....	38
Figura 11 - Vista no sentido P02-Mangue.....	38
Figura 12 - Vista no sentido P03-Mangue.....	39
Figura 13 - Vista no sentido P03-Mangue.....	39
Figura 14 - Vista no sentido P04-Mangue.....	39
Figura 15 - Vista no sentido P04-Mangue.....	39
Figura 16 - Fim da voçoroca.	40
Figura 17 - Vista no sentido P05-Mangue.....	40
Figura 18 - Total pluviométricos trimestral observado jan/fev/mar de 2017 (mm).	42
Figura 19 - Vista em planta da área 2011.....	45
Figura 20 - Vista em planta de 2007.	45
Figura 21 - Curva granulométrica da amostra do solo da feição erosiva.	49
Figura 22 - Regressão linear do número de golpes x umidade do solo da amostra.....	50
Figura 23 - Proposta de separação de faixas de erodibilidade (ARAUJO, 2013) com a inserção dos solo da voçoroca V01.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Critérios adotados por Santos (2001) quanto à relação erodibilidade, IP (índice de plasticidade) e Coeficiente de Uniformidade (Cu).....	25
Tabela 2 - Coeficientes de escoamento superficial segundo os tipos de cobertura do terreno.	26
Tabela 3 - Valor de P para algumas práticas conservacionistas.....	27
Tabela 4 - Resumo da umidade. Peso em gramas (g).....	46
Tabela 5 - Resultado do peneiramento grosso.....	47
Tabela 6 - Resumo da sedimentação.	48
Tabela 7 - Resultado do peneiramento fino.....	48
Tabela 8 - Classificação das faixas granulométricas segundo a NBR 6502 (ABNT, 1995). ...	49
Tabela 9 - Determinação do Limite de Liquidez da amostra.	50
Tabela 10 - Resultado do LL e LP da amostra de solo.....	51
Tabela 11 - Filtragem dos parâmetros para elaboração da Classificação Unificada.....	51
Tabela 12 - Resumo da classificação da erodibilidade.....	53
Tabela 13 - Tabela resumo da caracterização do meio físico, caracterização geotécnica e uso e cobertura do solo.	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
Cc	Coeficiente de Curvatura
Cu	Coeficiente de Uniformidade
IC	Índice de Contração
IP	Índice de Plasticidade
K	Fator erodibilidade do solo
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
NBR	Norma Brasileira
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 EROSÃO, FATORES CONDICIONANTES E DINÂMICA DO PROCESSO EROSIVO.....	15
2.1 Erosão	15
2.2 Fatores Condicionantes da Erosão.....	17
2.2.1 Clima	18
2.2.2 Geomorfologia.....	19
2.2.3 Solo.....	20
2.2.4 Cobertura vegetal.....	25
2.2.5 Uso do Solo	27
2.3 Dinâmica do processo erosivo.....	28
3 METODOLOGIA.....	31
3.1 Trabalho de campo	31
3.1.1 Coleta de amostras.....	32
3.1.2 Caracterização da feição erosiva	32
3.1.3 Caracterização do meio físico.....	32
3.1.4 Uso e cobertura do solo	32
3.2 Trabalho de laboratório	32
3.2.1 Limite de Liquidez (LL)	33
3.2.2 Limite de Plasticidade (LP)	33
3.2.3 Granulometria.....	33
3.3 Trabalho de gabinete	33
4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA ESTUDADA	35
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO MEIO FÍSICO.....	41
4.1.1 Clima	41
4.1.2 Geomorfologia.....	42
4.2 USO E COBERTURA DO SOLO.....	44

4.2.1	Uso do solo	44
4.2.2	Cobertura vegetal.....	45
4.3	CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA	46
4.3.1	Teor de umidade	46
4.3.2	Granulometria.....	47
4.3.3	Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade	50
4.3.4	Classificação da amostra	51
4.3.5	Avaliação indireta da erodibilidade.....	52
5	SUSCETIBILIDADE A EROSÃO	54
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	56
	REFERÊNCIAS	58
	ANEXO A – Aberturas das malhas das peneiras padronizadas pela ASTM.	62
	ANEXO B – Sistema de classificação unificada (USC/ASTM).	62

1 INTRODUÇÃO

Dentre as múltiplas manifestações do processo erosivo, uma apresenta-se como objeto de estudo bastante singular devido ao local onde ocorre e o agente erosivo que o desencadeia ou favorece a sua evolução. O processo erosivo de que se fala é a erosão urbana, tal fenômeno acontece no perímetro urbano e tem como principal agente no seu desencadeamento e evolução a ação antrópica.

A erosão urbana é fruto da “inadequação do planejamento de uso do solo representada principalmente pelo crescente número de habitações implantadas em locais inadequados e sem elaboração do devido estudo de impacto ambiental” (MAGALHÃES, 2001). Visto que o homem desempenha o papel de agente erosivo, a erosão urbana, portanto, pode ser prevista, evitada e controlada, bastando que as intervenções antrópicas busquem equilibrar a demanda de uso do solo com a capacidade de utilização saudável deste recurso natural. É nesse cenário que o estudo da erosão serve como auxílio na tomada de decisão.

Muitos trabalhos têm sido realizados na Ilha de São Luís - MA direcionados a investigação do potencial erosivo de determinadas áreas degradadas, principalmente as que são produtos da erosão urbana e que apresentam feições erosivas tais como ravinas e voçorocas. Tais estudos, geralmente atacam o aspecto geotécnico do problema, citam-se trabalhos como os de: Sathler et al. (2009), Lisboa et al. (2015) e Silva (2015). Graças a esses e outros trabalhos muitas feições erosivas, com o destaque para as voçorocas, estão catalogadas na ilha do Maranhão.

Quando se trata da investigação do potencial erosivo de uma área como um todo é necessário considerar outras ferramentas além do aspecto geotécnico na investigação, pois as feições erosivas são produtos não apenas das características intrínsecas do solo, mais também do clima, geologia, geomorfologia, cobertura vegetal, uso do solo (ação antrópica).

As considerações feitas deixam clara a necessidade de uma investigação multidisciplinar. Estudar a erosão de uma maneira multidisciplinar é considerar além do aspecto geotécnico (aspecto esse que está relacionado a uma investigação de engenharia) outras ciências que também investigam o mesmo fenômeno. Jesus (2013, p.3) observa que:

Os solos, bem como os processos erosivos, como temas de investigação científica, assim como outros temas, também vem

recebendo um tratamento especializado pelas diversas áreas do saber, tais como: engenharias, geologia, geografia e outras. Segundo Resende et al. (1995), é muito vantajoso ampliar os conhecimentos sobre os solos, pois ele ocupa uma posição peculiar ligada às várias esferas que afetam a vida humana.

A fim de contribuir no estudo da erosão urbana na cidade de São Luís, capital do Maranhão, este trabalho objetiva diagnosticar a suscetibilidade a erosão de uma área localizada no bairro Bequimão, bem como compreender a gênese e evolução de um processo erosivo em estágio de voçoroca. Para tanto se distingue os seguintes objetivos específicos:

- a) Caracterizar o meio físico;
- b) Caracterizar o uso e cobertura do solo;
- c) Caracterizar os aspectos geotécnicos do solo;
- d) Identificar, cadastrar e caracterizar os processos erosivos lineares.

A metodologia adotada neste trabalho consiste em estudar a erosão considerando os seguintes aspectos: caracterização geotécnica, caracterização do meio físico (geomorfologia e clima), uso do solo e cobertura vegetal.

A caracterização geotécnica é largamente utilizada na literatura para relacionar a erodibilidade do solo com suas propriedades geotécnicas. Angulo (1983), por exemplo, estudou a relação entre a erodibilidade e algumas propriedades de solos brasileiros. Citam-se ainda alguns trabalhos de correlacionar propriedades geotécnicas e potencial erosivo dos solos os dos autores: Araujo (2013), Mannigel et al. (2002), Meireles (1967) e Santos (2001).

A caracterização do meio físico conta com o apoio de vários autores como: Almeida Filho e Ridente Júnior (2001), Moreira e Pires Neto (1998), Iwasa e Fendrich (1998), Salomão e Iwasa (1995), Troeh (1996), Casseti (2005) que concordam que a capacidade da erosão de atuar em determinadas áreas depende das características de elementos climático, geomorfológico e pedológico.

A caracterização do uso e cobertura do solo também conta com o apoio dos seguintes autores na literatura: Silva (2007), Salomão e Iwasa (1995), Jorge e Uehara (1998), Drew (1994), que são de acordo em afirmar que a cobertura do solo dificulta a ação erosiva da água e que a ocupação inadequada do solo pode favorecer a atuação do processo erosivo.

2 EROSÃO, FATORES CONDICIONANTES E DINÂMICA DO PROCESSO EROSIVO

Este capítulo é dedicado a uma revisão bibliográfica sobre erosão, fatores condicionantes e a dinâmica do processo erosivo. Buscou-se apresentar os conceitos de erosão segundo vários autores a fim de ampliar o conhecimento sobre o tema. Na apresentação dos fatores condicionantes, sempre é buscado correlacionar cada um diretamente com o seu mecanismo de erosão. A dinâmica do processo erosivo apresentada neste trabalho é a dinâmica da erosão pluvial. Dentre todos os agentes citados a água, manifesta na forma de chuva, é o mais relevante para a finalidade deste trabalho (além de a feição erosiva em estudo ser produto da erosão pluvial), portanto sua atuação é pormenorizada.

2.1 Erosão

Etimologicamente a palavra erosão deriva da palavra *erodere*, proveniente do latim, que significa corroer, devorar e etc. (MORTARI, 1994), portanto, todos os processos de desgaste realizados pela água, vento e geleiras que são denominados de processos erosivos. Para delimitar a definição de erosão neste trabalho faz-se necessário apresentar outros conceitos, trabalho esse que fora realizado por Araujo (2000, p.5) quando diz que:

(...) um estudo sobre erosão deve se iniciar apresentando alguns conceitos deste fenômeno, segundo diversos autores. Pastore (1986) e Vilar e Prandi (1993), por exemplo, conceituam o fenômeno de modo semelhante, descrevendo que erosão no seu sentido mais amplo é o processo geral ou grupo de processos através do qual os materiais terrosos ou rochosos da crosta terrestre são desagregados, dissolvidos ou desgastados, e transportados de um ponto a outro por agentes naturais, tais como rios, mares, vento e chuva. Outra definição semelhante é apresentada por Marçal (1998), quando afirma que “o termo erosão refere-se ao desgaste da superfície terrestre sob ação dos agentes erosivos, principalmente a água e o vento, e em zonas montanhosas a neve e o gelo”. Guerra (1995) relata que “a erosão dos solos é um processo que ocorre em duas fases: uma que constitui a remoção (detachment) de partículas, e outra que é o transporte desse

material, efetuado pelos agentes erosivos”. Pode-se citar ainda a definição de Gray e Leiser (1989), segundo os quais “erosão é a remoção das camadas superficiais de solo por agentes como vento, água e gelo. A erosão de solos envolve os processos de destacamento e transporte por estes agentes, sendo iniciada por arranque, impacto, ou forças de tração atuando sobre o material”.

Portanto, o termo erosão neste trabalho refere-se à síntese das definições dos autores supracitados, entendendo-a como: um processo (ou grupo de processos) que remove as camadas superficiais de solo e transporta-as através dos agentes erosivos, tais como: rios, mares, vento e chuva, onde os dois últimos atuam com maior relevância nas regiões tropicais, ocorrendo em duas fases: remoção de partículas e transporte e seu produto é o sulco, ravina, voçoroca, conforme Figura 1.



Fonte: Jesus (2013).

Devido às características da área de estudo, será considerado apenas o agente hídrico manifestado na forma de chuva. A forma erosiva estudada neste trabalho é a voçoroca que é um tipo de erosão linear produto da ação pluvial. Os demais processos e formas erosivas são apresentados por completude do tema.

Distingue-se ainda dois tipos de erosão, erosão natural e erosão acelerada.

- A erosão acelerada é fruto do desequilíbrio entre o processo de formação dos solos e o processo erosivo. Esse desequilíbrio ocorre quando o processo erosivo supera o processo de formação dos solos (alteração das rochas e de processos pedogenéticos comandados por agentes físico, químicos e orgânicos, ocorrendo ao longo de centenas de anos) (MORTARI, 1994).
- A erosão natural acontece quando a dinâmica de erosão e formação do solo é equilibrada, ou seja, o processo de formação do solo compensa a erosão.

Barros (1956) expõe o prejuízo da erosão acelerada, danos algumas vezes irreparáveis para uma geração tendo em vista o tempo necessário para o solo se regenerar. O desequilíbrio pode ser ativado por alterações nas condições de clima, alterações na geologia, pela ação conjunta dos fatores naturais e antrópicos ou apenas pela ação do homem. Quando desencadeada pela ação do homem geralmente está relacionado ao uso inadequado do solo, como: desmatamento, crescimento urbano desordenado, agricultura, obras de grande porte (fábricas, barragens), etc.

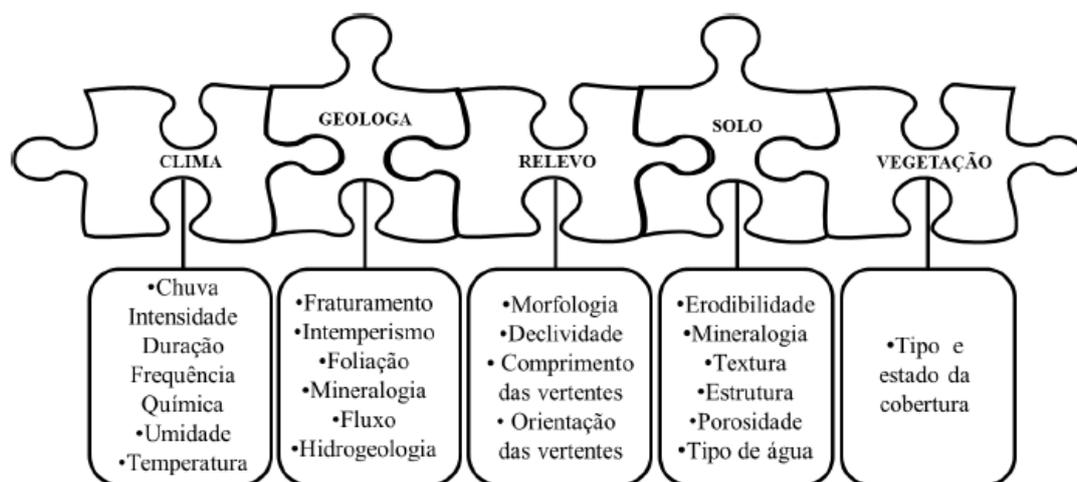
A capacidade de um agente provocar mais, ou menos, erosão é denominada de erosividade. A propriedade de um solo ser mais, ou menos, suscetível à erosão é denominada de erodibilidade. Portanto erosividade é uma propriedade relacionada ao agente enquanto erodibilidade é uma propriedade relacionada ao solo. Sendo mais preciso, neste trabalho suscetibilidade à erosão diz respeito ao conjunto de fatores que favorecem o início e evolução das feições erosivas como sulcos, ravinas e voçorocas. O conjunto de fatores que será estudado neste trabalho são as características geotécnicas, clima, geomorfologia, uso do solo, cobertura vegetal. Pretende-se investigar quais apresentam características favoráveis e quais mostram-se desfavoráveis a evolução do processo erosivo.

2.2 Fatores Condicionantes da Erosão

Uma vez definido o que é erosão, como se classifica e quais são os seus agentes, serão apresentados os elementos que contribuem para a formação e evolução desse processo. Como citado anteriormente, para investigar o potencial erosivo de determinada área é necessário considerar as várias variáveis que estão relacionadas a gênese desse processo, portanto fatores como: clima, geologia, geomorfologia, solo e

cobertura vegetal e uso do solo são imprescindíveis para realizar tal estudo e por isso serão estudados detalhadamente, ver esquema representado na Figura 2.

Figura 2 - Fatores condicionantes da erosão.



Fonte: Jesus (2013).

Devido algumas limitações, o fator condicionante geologia não será utilizado como ferramenta de pesquisa neste trabalho, é apresentado apenas por completude do tema.

2.2.1 Clima

No que tange ao processo erosivo, o clima contribui com dois agentes, chuva e vento, sendo ambos responsáveis pela desagregação das partículas e seu transporte. A precipitação é o elemento mais importante do clima no que se refere aos processos erosivos. Seu impacto sobre o solo sofre forte influência do vento. Segundo Jesus (2013) o impacto das gotas de chuva sobre o solo favorece a desagregação das partículas do solo, além do que a água também atuará como agente de transporte dessas partículas. Com relação a chuva deve-se destacar os seguintes aspectos:

- A ação erosiva da chuva depende de sua distribuição e intensidade no tempo e no espaço. A capacidade erosiva da chuva é denominada de erosividade (ALMEIDA FILHO; RIDENTE JUNIOR, 2001);
- Mesmo com totais de precipitação iguais, chuvas pouco intensas de longa duração provocam menos danos se comparadas às chuvas curtas e muito intensas (MOREIRA; PIRES NETO, 1998);

- Chuvas torrenciais, precedidas por períodos chuvosos responsáveis pela saturação do solo, determinam em locais de escoamento concentrado feições erosivas que se expandem com muita velocidade (INFANTI JUNIOR, FORNASARI FILHO, 1998).

2.2.2 Geomorfologia

A influência do relevo na erosão está associada principalmente à declividade, ao comprimento e à forma de vertente. Quanto maior o declive, maior a velocidade do escoamento. Se o comprimento de vertente também for extenso, essa velocidade se amplia ainda mais (JESUS, 2013).

Bertoni e Lombardi Neto (2008) destacam que um terreno com 20,00 m de comprimento e 20,00 % de declividade tem a mesma taxa de perda de terra que um terreno de 180,00 m de comprimento e 1,00 % de declividade, nas mesmas condições de chuva, tipo de solo e tipo de cobertura e manejo.

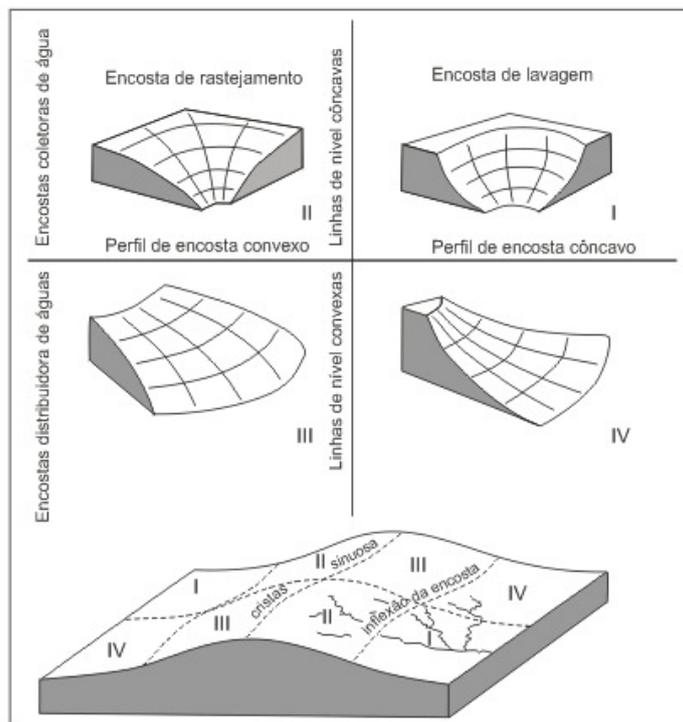
Vertentes convexas, retilíneas e côncavas influenciam, de maneira distinta, no volume e na velocidade do escoamento superficial (JESUS, 2013):

- As vertentes com curvas de nível côncavas e perfil côncavo e as vertentes com curvas de nível côncavas e perfil convexo, por exemplo, são concentradoras do fluxo superficial.
- Ao contrário, as vertentes com curvas de nível convexas e perfil convexo e as vertentes com curvas de nível convexas e perfil côncavo fazem com que as linhas de fluxo d'água sejam dispersadas.

Portanto, os dois primeiros tipos de vertentes podem induzir mais facilmente a ocorrência de incisões erosivas. Troeh (1965, apud Casseti, 2005) apresenta uma classificação que considera não só as formas em perfil, mas também as formas em planta (Figura 3), onde se distingue:

- Vertentes com curvas de nível côncavas e perfil côncavo (tipo I);
- Vertentes com curvas de nível côncavas e perfil convexo (tipo II);
- Vertentes com curvas de nível convexas e perfil convexo (tipo III);
- Vertentes com curvas de nível convexas e perfil côncavo (tipo IV).

Figura 3 - Classificação de vertentes segundo a forma em perfil e em mapa segundo Troeh, (1965 apud Casseti, 2005).



Fonte: Jesus (2013).

2.2.3 Solo

O solo é um recurso básico que suporta toda a cobertura vegetal de terra, sem a qual os seres vivos não poderiam existir. Nessa cobertura incluem-se, além das culturas, todos os tipos de árvores, gramíneas, raízes e herbáceas que podem ser utilizadas pelo homem (BERTONI, 1968). Além disso, “a formação de um solo é função da rocha de origem, da ação dos organismos vivos, do clima, da fisiografia e do tempo” (CAPUTO, 1988, p.15).

O conhecimento das características físicas de um solo é fundamental para entender a dinâmica da erosão, pois, segundo Bertoni e Lombardi Neto (2008, p.82) “alguns solos erosionam mais que outros (...) essa diferença, devida às propriedades do próprio solo, é denominada erodibilidade do solo”, o que resulta que solos com características diferentes são erodidos com intensidades diferentes. Algumas características dos solos relevantes ao estudo da erodibilidade são apresentadas a seguir:

a) Cor

As cores do solo podem ser interpretadas em termos de constituintes (matéria orgânica, carbonato de cálcio, ferro e etc.), e de mecanismos como atividades biológicas, animais e vegetais, regimes hídricos e etc. Devido essas informações que a cor do solo fornece, torna-se possível fazer a relação com a susceptibilidade à erosão. Segundo Silva (2007, p.105) é possível efetuar algumas correlações entre a cor do solo e processos atuantes no mesmo. Por exemplo, segundo os mesmos autores:

- Solos mais escuros (enriquecidos com matéria orgânica) tendem a serem menos suscetíveis à erosão, em função da maior presença de matéria orgânica, que confere maior estabilidade aos agregados do solo;
- Solos mais claros (cores amareladas ou brunadas) são correlacionados com a erosão por intermédio do teor de umidade (solos mais secos) e do desenvolvimento da vegetação da seguinte maneira: a pouca umidade inibe o crescimento da cobertura vegetal, aumentando assim, o risco à erosão. As vertentes que recebem maior insolação apresentam menos umidade, solos mais claros, mais rasos e vegetação menor porte e mais espaçada, e maior incidência de processos erosivos.

b) Textura

Segundo Guerra e Botelho (1996, p. 101) “Os teores de areia, silte e argila, atuam sobre a erosão, à medida que podem oferecer maior ou menor resistência ao destacamento (*detachment*) e ao próprio transporte pela água resultante do escoamento superficial, difuso ou concentrado”. Ainda segundo esses autores pode-se relacionar algumas faixas dessas frações com a erosão da seguinte maneira:

- A areia fina e o silte são as frações granulométricas que apresentam maior facilidade de serem erodidas, pois não possuem muita coesão, nem peso suficiente que dificulte a ação da água, tanto no *splash*, como no escoamento superficial;
- A areia grossa e a argila são as frações granulométricas que oferecem maior resistência à erosão. As areias, devido ao seu diâmetro, apresentam um peso maior que dificulta a ação da água, enquanto as argilas, devido à sua coesão, em

especial quando combinadas com matéria orgânica, formam agregados estáveis, que também oferecem resistência à ação da água.

c) Porosidade:

É interessante apresentar algumas considerações sobre a relação textura/porosidade antes de entrar na relação porosidade/erosão, sobre isso, três observações são pertinentes:

“Não se deve imaginar que solos arenosos possuem alta porosidade, em especial aqueles com elevado teor de areia fina, pois a compactação provocada pela mecanização irá aumentar a densidade aparente, reduzindo sua porosidade” (MORGAN, 1984 apud GUERRA; BOTELHO 1996, p. 102).

“Em geral, os solos com textura mais fina têm maior porosidade, porém necessitam de maiores cuidados na manutenção da aeração; os arenosos têm menor porcentagem de porosidade e quase uma constante aeração” (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2008, p.110).

“Solos argilosos, muitas vezes, possuem maior porosidade, em especial quando essas argilas apresentam elevados índices de floclulação, facilitando a penetração das águas, através dos seus poros” (PRADO, 1995 apud GUERRA; BOTELHO 1996, 102).

A porosidade tem relação direta com a intercomunicabilidade entre os poros, sobre essa relação Silva (2007, p.XX) explica que:

Um fator de grande importância [no estudo da erosão dos solos] refere-se à intercomunicabilidade entre os poros. As mudanças verticais bruscas no diâmetro e na morfologia dos poros podem acarretar sérios problemas de erosão, principalmente em solos com descontinuidades texturais e estruturais abruptas, ou seja, horizontes superficiais arenosos, com porosidade textural grosseira e horizontes subsuperficiais argilosos, com porosidade textural fina e poros fissurais. Neste caso, a água infiltra rapidamente no horizonte superficial e sofre uma brusca redução na velocidade de infiltração no topo do horizonte B, levando a um encharcamento da superfície, iniciando um movimento lateral e podendo provocar erosão.

d) Agregados

A presença de determinado tipo de agregado em um solo pode ser relacionada com a erosão por intermédio de critérios como poros, circulação de água e ar e atividade biológica, podendo-se fazer as seguintes observações para a relação forma dos agregados/erosão de acordo com Silva (2007):

- **Agregados arredondadas** - a presença dessas estruturas significa um meio poroso onde a água, o ar e a vida animal e vegetal circulam livremente. Normalmente esses agregados são estáveis em água, indicando uma boa resistência à erosão;
- **Os agregados angulosos** - são mais compactos e, por isso, restringem, a atividade biológica, principalmente a animal. A água e o ar circulam mais facilmente nas fissuras existentes entre os agregados. Em períodos úmidos, essa circulação de água é mais restrita, em função da expansão dos minerais de argila e do conseqüente fechamento das fissuras, acarretando um impedimento à circulação vertical da água, podendo promover o aparecimento de sinais erosivos nos solos que apresentam tais estruturas;
- **Agregados laminares** - apresentam forte impedimento à circulação vertical de água. A disposição predominantemente lateral das partículas do solo cria descontinuidade nas circulação da água, ar e vida (vegetal e animal);

e) Correlações entre erodibilidade e propriedades geotécnicas dos solos

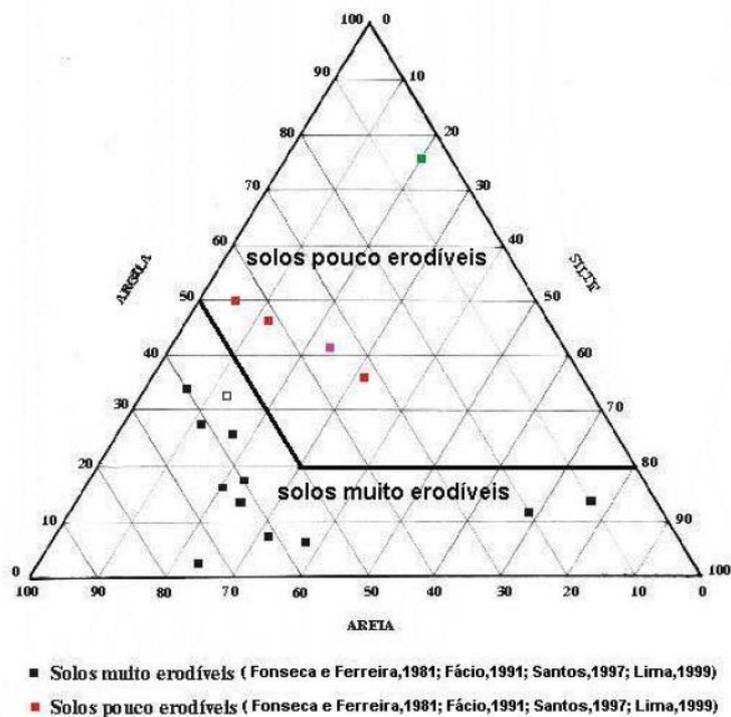
Muitas vezes, a avaliação do potencial de erosão de um solo é feita não de forma direta, mais sim por meio de medidas indiretas¹ que possam representa-la. Assim, tem sido comum a apresentação de propostas buscando relacionar a erodibilidade dos solos com suas características (ARAÚJO, 2013).

O solo pode ser classificado simplesmente pela sua textura. As classes texturais do solo guardam relação com a erodibilidade. De Araújo (2013), a partir da comparação dos resultados de seu estudo junto a outros solos relatados na literatura (FÁCIO, 1991; FONSECA; FERREIRA, 1981; LIMA, 1999; SANTOS, 1997) apresenta uma proposta de separação de duas zonas, indicando a provável tendência de comportamento dos

¹ Exemplos de ensaios apropriados para a avaliação direta da erodibilidade são: MCT expedito, Desagregação e Inderbtizen.

solos segundo a qual solos muito erodíveis se concentrariam na região de mais de 50,00 % de areia e menos de 50,00 % de argila conforme Figura 4.

Figura 4 - Proposta de separação de zonas de erodibilidade utilizando o triângulo textural.



Fonte: Adaptado de Araujo (2013).

Já Bouyoucos, relaciona a erodibilidade do solo como apresentado na Equação 1 que utiliza as porcentagens de areia, silte e argila (BOUYOUCOS, 1935):

$$E = \frac{\%areia + \%silte}{\%argila} \quad (\text{Equação 1})$$

Essa equação parte do pressuposto de que a argila age como ligante, dificultando o destacamento das partículas do solo, e que as partículas mais grossas que a areia não seriam destacáveis. Mannigel et al. (2002) classificaram os valores do fator erodibilidade do solo (K) nas seguintes classes:

- Baixo: com valores entre 0,01 e 0,03 t.ha.h/ha.MJ.mm;
- Médio: com valores entre 0,03 e 0,06 t.ha.h/ha.MJ.mm, e
- Alto: com valores acima de 0,06 t.ha.h/ha.MJ.mm.

Tais valores são obtidos por intermédio da Equação 2:

$$K = \left(\frac{\% \text{areia} + \% \text{silte}}{\% \text{argila}} \right) / 100 \quad (\text{Equação 2})$$

Meireles (1967) afirma que solos fortemente erodíveis apresentam os seguintes comportamentos:

Fortemente erodíveis:

- $LL \leq 21,00\%$ e $IP \leq 8,00\%$ e $\% \text{ passa \#200} \leq 20,00\%$

Passíveis de forte erosão:

- $20,00\% < \% \text{ passa \#200} < 40\%$

Pouco erodíveis:

- $\% \text{ passa \#200} > 40,00\%$

Outra proposta para avaliar a erodibilidade dos solos relacionando índice de plasticidade (IP) e Coeficiente de Uniformidade (Cu) é apresentada na Tabela 1 (SANTOS, 2001).

Tabela 1 - Critérios adotados por Santos (2001) quanto à relação erodibilidade, IP (índice de plasticidade) e Coeficiente de Uniformidade (Cu).

IP	Erodibilidade	Cu	Erodibilidade
IP > 15	boa resistência a erosão	Cu < 5	solos erodíveis
15 > IP > 6	média resistência a erosão	5 < Cu < 15	solos de média erodibilidade
IP < 6	baixa resistência a erosão	Cu > 15	solos de baixa erodibilidade

Fonte: Adaptado de Santos (2001).

2.2.4 Cobertura vegetal

A cobertura vegetal desempenha um papel importante no controle de erosões, pois minimiza os efeitos do impacto da gota de chuva e do escoamento superficial. Isso é explicado pelo fato de que quando a gota cai na vegetação divide-se em gotas menores e começa a valer a energia potencial gravitacional não mais da altura da nuvem ao solo, mas da altura da vegetação ao solo e agora de massas menores, diminuindo o impacto (*splash*). No caso do escoamento a vegetação serve como obstáculo, dissipando assim a energia cinética (SILVA, 2007).

Segundo Salomão e Iwasa (1995), a cobertura vegetal é responsável por: proteger o solo do impacto direto das gotas de chuva; dispersar a energia do deflúvio; aumentar a infiltração através dos poros produzidos pelo sistema radicular, e aumentar a capacidade de retenção de água.

Na Tabela 2 é possível notar a importância da cobertura vegetal, pois, em áreas vegetadas, o escoamento superficial tende a ser inferior a 50,00 %. Já se a área estiver impermeabilizada, a porcentagem de infiltração é inferior a 5,00 %, o restante escoando superficialmente e agindo no processo erosivo (JESUS, 2013).

Tabela 2 - Coeficientes de escoamento superficial segundo os tipos de cobertura do terreno.

Características da bacia	Coeficiente de escoamento (%)
Superfícies impermeáveis	90-95
Florestas e matas de árvores de folhagem em terrenos com declividades variadas	5-50

Fonte: Villela e Mattos 1975 apud Jorge e Uehara, 1998 – adaptado.

É possível visualizar o potencial da cobertura vegetal no combate a erosão na equação da perda do solo. A equação da perda do solo segundo Wischmeier e Smith (1978) é:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

A = perda de solo calculada por unidade de área, t/há;

R = fator chuva;

K = fator erodibilidade do solo;

L = fator comprimento de declive;

S = fator grau de declividade;

C = fator uso e manejo;

P = fator prática conservacionista.

“O fator (P) é a relação entre a intensidade esperada de tais perdas com determinada prática conservacionista e aquelas quando a cultura está plantada no sentido do declive (morro abaixo)” (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2008, p.266).

A Tabela 3 relaciona as principais práticas conservacionistas com seus respectivos valores de (P) obtidos pela Seção de Conservação do Solo do Instituto Agrônômico.

Tabela 3 - Valor de P para algumas práticas conservacionistas.

Prática Conservacionista	Valor de P
Plantio morro abaixo	1,0
Plantio em contorno	0,5
Alternância de campinas + plantio em contorno	0,4
Cordões de vegetação permanente	0,2

Fonte: Bertoni e Lombardi Neto (2008).

Observa-se que uma medida conservacionista de um plantio em contorno pode diminuir a perda de solo em até 50,00 %. Isso aponta a força da cobertura vegetal na conservação do solo.

2.2.5 Uso do Solo

Criar condições para que se dê a erosão parcial ou total é o mais negativo dos efeitos do homem sobre o solo (DREW, 1994). Segundo Jesus (2013) a principal dessas condições é o desmatamento, que é uma das primeiras formas de atuação humana que impacta o meio ambiente, resultando na perda da proteção natural do terreno. Na falta da cobertura vegetal, é necessário que se implemente, tanto nas áreas rurais como nas urbanas, infraestrutura adequada para evitar o fluxo concentrado do deflúvio. Ainda segundo Jesus (2013) em áreas urbanas, as primeira recomendações a serem feitas são:

- Ocupação do solo se dê de modo progressivo e acompanhado da implantação de infraestrutura, evitando-se a ocupação esparsa e os desmatamentos e arruamentos inoportunos;
- Evitar os sistemas de arruamento com ruas muito longas perpendiculares às curvas de nível, ocupação de cabeceiras de drenagem, fundos de vale e áreas muito inclinadas;
- Também é extremamente importante o disciplinamento das águas superficiais com instalação de sarjetas, bocas de lobo, galerias condutoras e equipamentos dissipadores da energia do escoamento.

Segundo Iwasa e Fendrich (1998), a maioria dos municípios brasileiros é afetada por erosões lineares, causadas principalmente pela concentração de águas do escoamento superficial. Jesus (2013) observa que o grande detonador da erosão urbana é o escoamento superficial concentrado sobre áreas impermeabilizadas, com sistema de

drenagem ineficiente ou inexistente assim como o lançamento de águas em locais inadequados, como a meia vertente, ou em cabeceiras de drenagem também são grandes causadoras de erosão.

As ações antrópicas correspondem às práticas gerais realizadas pelo homem, e têm grande importância no tipo e intensidade dos processos erosivos. Segundo MOTA (1991), atividades desenvolvidas pelo homem contribuem para a aceleração do processo de erosão do solo, destacando-se:

- Desmatamento de áreas extensas, de terrenos de encostas, da mata ciliar, de locais de solos erodíveis, entre outros;
- Práticas agrícolas: monoculturas; culturas não perenes; plantio em encostas; cultivo intensivo; uso de máquinas e implementos agrícolas;
- Queimadas;
- Agropecuária: criação excessiva de animais em áreas de pastagem (sobre pastoreio);
- Movimentos de terra: escavações e aterros;
- Alterações no escoamento natural das águas: barragens; aterros; alterações nos trajetos decursos d'água; drenagem artificial;
- Impermeabilização do solo: construções, pavimentações, compactação;
- Atividades de mineração;
- Execução de obras: desmatamentos; movimentos de terra; áreas de empréstimos; impermeabilização; alterações no escoamento das águas.

2.3 Dinâmica do processo erosivo

Algumas fases se destacam da dinâmica da formação do processo erosivo (erosão pluvial), são elas: *Splash*, escoamento superficial, erosão laminar, ravinas e voçorocas.

a) *Splash*

O início do processo erosivo começa quando as primeiras gotas de chuva atingem a superfície do solo podendo provocar o *Splash*, salpicamento de partículas. Segundo Bertoni e Lombardi Neto (2008), o impacto das gotas tem pelo menos três

desdobramentos: as gotas desprendem partículas no local que sofre o impacto; transportam, por salpicamento, as partículas desprendidas; imprimem energia, em forma de turbulência à água superficial.

Além desses três impactos, a medida que o Splash rompe os agregados no topo do solo, começa a ocorrer a formação de crostas que podem provocar a selagem do solo. A selagem diminui a taxa de infiltração e aumenta as taxas de escoamento superficial (GUERRA, 2007).

b) Escoamento superficial

À medida que a água se infiltra no solo, iniciando o processo de saturação, poças se formam na superfície, podendo iniciar o escoamento superficial. Seus efeitos na erosão dependem de sua velocidade, declividade e quantidade de escoamento. O escoamento superficial pode acontecer também quando a intensidade da chuva é superior à taxa de infiltração instantânea do solo, ou seja, antes do solo saturar (NUNES, 2006).

c) Erosão laminar

A erosão em lençol (também conhecida como erosão laminar) ocorre nesse estágio de escoamento, quando o fluxo ainda é difuso. O impacto das gotas (*splash*) da chuva sobre uma fina camada de água provoca turbulência no escoamento superficial, potencializa a capacidade do fluxo em desagregar e transportar partículas de solo, aumentando assim a erosão em lençol.

d) Ravinas

As irregularidades existentes no solo podem fazer com que as águas comecem a se concentrar ao longo de determinados planos, formando os primeiros filetes, ou sulcos, que são a origem das ravinas (GUERRA; BOTELHO, 1996; GUERRA, 2007).

O escoamento superficial, quando concentrado, pode levar à formação de ravinas e voçorocas. Nestas situações, o fluxo superficial deixa de ser laminar, concentrando-se em filetes líquidos, que através da velocidade da água provocam erosão no terreno (ARAUJO, 2000). A incisão começa a ocorrer no topo do solo, aprofundando

em direção aos horizontes subsuperficiais. Na maior parte das vezes, essas feições erosivas, formam um sistema de ravinas, ou seja, raramente ocorrem isoladas numa encosta. Além dos fluxos principais, nesse sistema, aparecem também ravinas menores, que podem ser obliteradas, a cada evento chuvoso, formando uma nova rede de ravinas (GUERRA; BOTELHO, 1996).

e) Voçorocas

De acordo com Gray e Leiser (1989) a dinâmica da formação de voçorocas é complexa e não entendida completamente. Portanto, sem dispender trabalho em comparações exaustivas de conceitos sobre a gênese do fenômeno, o entendimento de voçoroca será o de Guerra e Botelho (1996) que concorda com Rego (1978), Vilar e Prandi (1993), DAEE-SP (1990): à medida que as ravinas vão se alargando, se aprofundando e aumentando de comprimento, dão origem às voçorocas, sendo dessa forma a voçoroca uma evolução direta da ravina.

Por outro lado, também existem voçorocas que são formadas pela ação do escoamento subsuperficial. Nesse caso, a água que escoar em subsuperfície remove os sedimentos, através da dissolução dos minerais, provocando a formação de dutos (“pipes”, erosão subterrânea) que, uma vez formados, tendem a aumentar em diâmetro, podendo atingir vários metros, tanto em diâmetro, como em comprimento, podendo eventualmente atingir o lençol freático. Os tetos desses dutos podem colapsar devido aos vazios deixados na subsuperfície, deixando a impressão visual de um grande rasgo no solo.

De acordo com Costa (1981, apud MORTARI, 1994, p.24) “Na voçoroca atuam outros processos sendo palco de diversos fenômenos: erosão superficial, erosão interna, solapamentos, desabamentos e escorregamentos, que se conjugam no sentido de tornar forma de erosão de elevado poder destrutivo”.

3 METODOLOGIA

A investigação da erosão urbana localizada do bairro Bequimão é baseada em três aspectos, são eles: caracterização do meio físico, caracterização geotécnica e uso e cobertura do solo. O trabalho é dividido naturalmente em três etapas: trabalho de campo (coleta de amostras, caracterização da feição erosiva, caracterização do meio físico e caracterização do uso e cobertura do solo), trabalho de laboratório (ensaios) e trabalho de gabinete (análise dos ensaios, compilação de dados, relatório fotográfico).

Os itens caracterização geotécnica, caracterização do meio físico e uso e cobertura do solo serão relacionados com o potencial erosivo da área estudada. Essa relação será feita da seguinte maneira para cada item:

Caracterização geotécnica: através dos ensaios geotécnicos serão utilizadas as correlações descritas na subseção 2.2.3 e o solo será classificado quanto a erosão de acordo com cada tipo de correlação;

Caracterização do meio físico: cada um dos elementos que o compõem (clima e geomorfologia) será utilizado como indicativo de erodibilidade. Neste item não será possível utilizar parâmetros quantitativos como na caracterização geotécnica. A maneira de relacionar os elementos deste item com a erosão é observando o que a literatura aponta como favorecendo ou desfavorecendo o processo erosivo conforme subseções 2.2.1 e 2.2.2.

Uso e cobertura do solo: a exemplo da caracterização do meio físico este item também relacionará o potencial erosivo da área de estudos com o que a literatura aponta como favorecendo ou desfavorecendo o processo tanto no que se refere ao surgimento como também à evolução do processo erosivo. As relações serão feitas como observado nas subseções 2.2.4 e 2.2.5. O objetivo é descobrir se o uso do solo favorece escoamento superficial concentrado, que é um detonador do processo erosivo.

3.1 Trabalho de campo

O trabalho de campo constou de coleta de amostras, caracterização da feição erosiva, caracterização do meio físico e caracterização do uso e cobertura do solo.

3.1.1 Coleta de amostras

A amostra foi retirada (deformada) buscando-se coleta de materiais mais característicos da voçoroca. A partir da coleta das amostras serão realizados os ensaios de laboratório como descrito em 3.2.

3.1.2 Caracterização da feição erosiva

Foram levantadas informações sobre a feição erosiva estudada como comprimento, algumas características do solo, informações sobre o seu entorno, registros fotográficos e outras informações relevantes. Essas informações foram complementadas por imagens de satélites e outras bases de dados bem como informações de moradores.

3.1.3 Caracterização do meio físico

Nessa etapa in loco foram levantadas algumas informações como topografia e forma da vertente. Também foram buscados indícios da influência do clima no processo erosivo.

3.1.4 Uso e cobertura do solo

As informações in loco adquiridas por meio da inspeção local revelaram como o solo está sendo utilizado e qual é o estado da cobertura vegetal. Ainda foi comparado com informações de históricos da área. As informações adquiridas aqui serviram de dados de entrada para gerar parâmetros sobre o potencial erosivo da área estudada.

3.2 Trabalho de laboratório

O trabalho de laboratório consistiu de ensaios de caracterização geotécnica do solo retirado da feição erosiva V01 (Figura 6). Algumas classificações dos solos com respeito a erosão exigem que sejam realizados ensaios geotécnicos como Limite de Liquidez normalizado pela NBR 6459 (ABNT,1984a), Limite de Plasticidade

normalizado pela NBR 7180 (ABNT, 1984b) e Granulometria normalizado pela NBR 7181 (ABNT,1984c).

3.2.1 Limite de Liquidez (LL)

Por definição o limite de liquidez é o menor teor de umidade com que uma amostra de um solo pode ser capaz de fluir. Neste trabalho foi utilizado o método de Casagrande para a obtenção do LL, no qual se utiliza um aparelho que leva seu nome, com o qual se aplicam 25 golpes deixando a concha do aparelho cair de uma altura padrão para que a fenda aberta no material se feche ao final dos golpes.

3.2.2 Limite de Plasticidade (LP)

Por definição o limite de plasticidade é o teor umidade que o solo, estando do estado plástico, se perder umidade, passa para o estado semi-sólido. Segundo **Atterberg** a condição para que uma amostra de solo esteja no estado plástico é a possibilidade de com ela moldar um cilindro de 10,00 cm de comprimento por 3,00 mm de diâmetro, por rolagem sobre uma placa de vidro.

3.2.3 Granulometria

Os percentuais granulométricos foram determinados nas etapas de peneiramento (até a peneira #200) e sedimentação (a partir da peneira #200), a conforme a norma de análise granulométrica e complementares de preparação para ensaios, de peneiras para ensaio (ABNT, 1984c).

3.3 Trabalho de gabinete

É nesta etapa que todas as informações foram compiladas, analisadas e tratadas. Produto desta etapa são algumas tabelas resumos que proporcionam uma visão mais clara e objetiva da pesquisa. É nesta etapa também que os ensaios foram analisados e as informações se transformaram em indicadores de erodibilidade.

Os ensaios das amostras de solo serão traduzidos em parâmetros geotécnicos a fim de correlacionar a erodibilidade do solo da feição erosiva com as propriedades

intrínsecas do solo; os demais fatores condicionantes foram transformados em indicadores de suscetibilidade a erosão que permitiu avaliar se determinado fator favorece ou não o desenvolvimento do processo erosivo; somado ainda as observações de campo e caracterização da feição erosiva tem-se o produto final deste trabalho que é o diagnóstico da suscetibilidade a erosão da área.

4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA ESTUDADA

A área investigada localiza-se no bairro do Bequimão no município de São Luís – MA, compreendida entre as coordenadas $2^{\circ}32'09.1''$ S $44^{\circ}15'20.4''$ W e $2^{\circ}31'51.5''$ S $44^{\circ}15'03.1''$ W (Figura 5). A área é circundada pelo Condomínio A, Condomínio B, mangue e algumas residências (ver Figura 6). Considerando somente a área que contempla as feições erosivas (delimitada em azul na Figura 6), topografia é de declive, pode ser considerada como uma rampa com aproximadamente 300,00 m de comprimento e com um desnível de 20,00 m, totalizando uma declividade média de 6,67 %.

Figura 5 - Vista em planta da área estudada.



Fonte: Google Earth (2017).

Na área estudada foram identificadas três feições erosivas em estágio de voçoroca, que doravante serão designadas por V01, V02 e V03, Figura 6. As três voçorocas apresentam praticamente as mesmas condições de exposições aos agentes erosivos, com a exceção da V01 que praticamente não apresenta cobertura vegetal. Uma particularidade dessas três voçorocas é que elas são aproximadamente paralelas e terminam aproximadamente numa mesma região. Pode-se observar que é neste lugar que V01 é mais larga e mais profunda, conforme se pode verifica na Figura 7.

Figura 7 - Região com maior concentração de feições erosivas.



Fonte: Google Earth (2017).

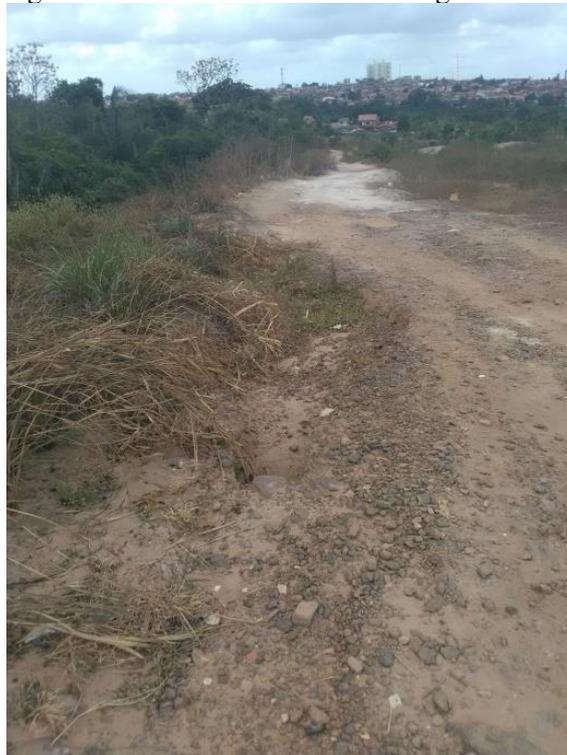
Para melhor caracterização da voçoroca V01 será apresentado alguns registros de alguns pontos relevantes no estudo da área, ao fim será feito algumas considerações.

Figura 9 - Vista no sentido P01-RUA 11.



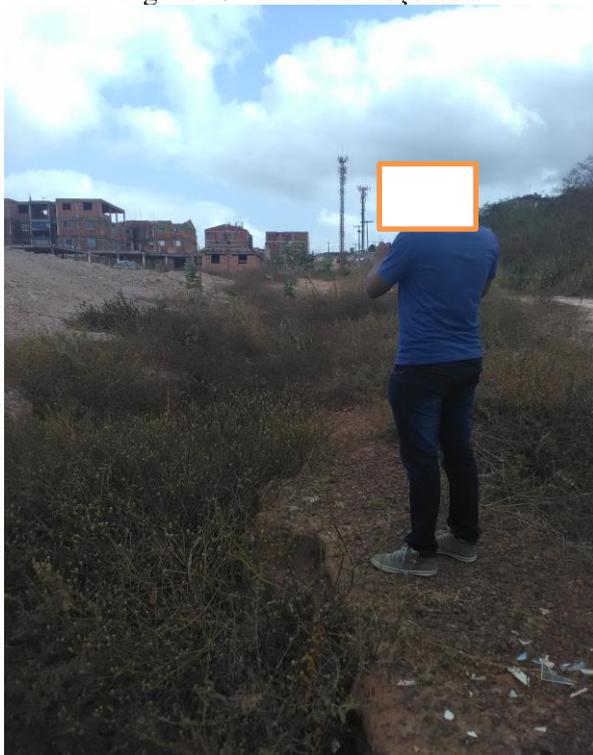
Fonte: próprio autor.

Figura 8 - Vista no sentido P01-Mangue.



Fonte: próprio autor.

Figura 10 - Início da voçoroca.



Fonte: próprio autor.

Figura 11 - Vista no sentido P02-Mangue.



Fonte: próprio autor.

Figura 13 - Vista no sentido P03-Mangue.



Fonte: próprio autor.

Figura 12 - Vista no sentido P03-Mangue.



Fonte: próprio autor.

Figura 14 - Vista no sentido P04-Mangue.



Fonte: próprio autor.

Figura 15 - Vista no sentido P04-Mangue.



Fonte: próprio autor.

Figura 17 - Vista no sentido P05-Mangue.



Fonte: próprio autor.

Figura 16 - Fim da voçoroca.



Fonte: próprio autor.

A feição erosiva V01 tem uma extensão de aproximadamente 250,00 m. Como é possível observar na Figura 5 a voçoroca é desprovida de cobertura vegetal. As Figuras 8 a 17 representam alguns dos principais pontos onde foi possível fazer registro da feição erosiva. Observa-se que ela inicia um pouco discreta na Figura 10 e então começa a ganhar largura e profundidade (Figura 10 a Figura 17). O solo predominante no corpo da feição erosiva tem cor amarela. É possível identificar também o despejo de lixo ao longo da voçoroca, evidenciando a atuação da ação antrópica, Figura 11, 12, 13, 14 e 15.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO MEIO FÍSICO

Esta seção será dedicada à caracterização geral do meio físico da área de estudo. A caracterização versará sobre os seguintes aspectos: clima e geomorfologia.

4.1.1 Clima

Como já citado, dentro do perímetro estudado foram identificadas três feições erosivas em estágio de voçoroca. Esse tipo de feição erosiva denuncia que o agente pluvial é um agente ativo no local, visto que a voçoroca é um produto da erosão pluvial.

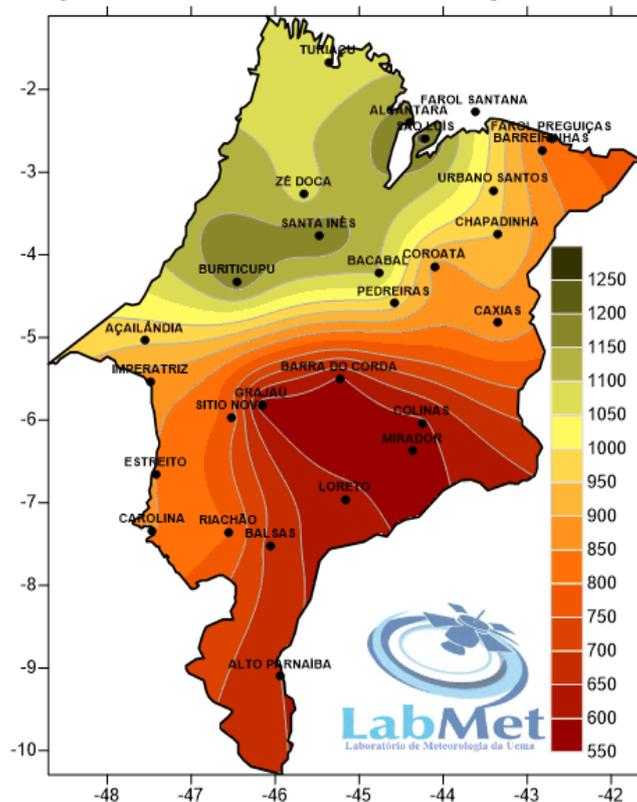
Chuvas intensas (quando temos mais volume de água em um menor intervalo de tempo) possuem uma maior erosividade do que chuvas longas com pouco volume. Na região de São Luís as chuvas intensas são comuns no início do período chuvoso. Para observar este dado recorreu-se ao Informativo Climático de Janeiro de 2017 publicado pelo Núcleo Geoambiental da UEMA. O informativo destaca os seguintes pontos:

- O mês de janeiro de 2017 foi marcado, logo na primeira semana, por alguns fenômenos meteorológicos expressivos, tais como: chuva de granizo, nuvens do tipo rolo, vendaval e chuvas fortes;
- Na noite dia 18 de janeiro de 2017 uma grande área de instabilidade se formou em todo o extremo norte do Maranhão [área de estudo] (...) e causou muita chuva na região e áreas adjacentes. Na capital do Estado [área de estudo], essa condição atmosférica provocou o episódio de chuva mais intenso dos últimos anos para o mês de janeiro. Foram acumulados em São Luís o total de 130,60 mm de chuva em poucas horas [chuva intensa], as quais foram responsáveis por muitos estragos na cidade como queda de muros e árvores, danificação de semáforos e alagamentos.

Muitos outros informativos podem ser encontrados na página do Núcleo Geoambiental da UEMA que confirmam a existência de chuvas intensas em São Luís.

Ainda segundo o Núcleo Geoambiental a climatologia do trimestre jan/fev/mar mostra que normalmente os maiores volumes de chuvas se encontra no extremo norte do estado apresentando volumes superiores a 1.000 mm, como pode ser observado na Figura 18.

Figura 18 - Total pluviométrico trimestral observado jan/fev/mar de 2017 (mm).



Fonte: Núcleo Geoambiental da UEMA (2017).

4.1.2 Geomorfologia

Em uma primeira análise podemos considerar a área de estudo como uma “grande rampa” com declividade no sentido do mangue. A topografia do terreno favorece o escoamento no sentido Condomínio A-Mangue. Do INÍCIO DE V01 (cota de 28,00 m) até o FIM DE V01 (cota de 8,00 m) (ver Figura 5) o comprimento de rampa é de 300,00 m totalizando uma declividade média de 6,67 %.

Conferindo a Equação 4 do fator topografia na equação da perda de solo de Wischmeier e Smith (1965), verifica-se que o acréscimo de declividade é mais significativo do que o acréscimo do comprimento de rampa para a evolução do processo erosivo (basta observar que o expoente de D é quase o dobro de C).

$$LS=0,00984C^{0,63}D^{1,18} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

LS = fator topográfico;

C = comprimento da rampa;

D = grau de declividade em porcentagem.

Considerando a área do Condomínio A, teríamos ainda mais 200,00 m de rampa, totalizando assim cerca de 500,00 m. Esse total é significativo, pois a água ganha velocidade ao longo de toda essa extensão visto não haver barreiras para dissipar a energia do movimento da água.

A vertente foi classificada como sendo do Tipo II com a ressalva que as curvas de nível são levemente côncavas. Portanto a vertente é concentradora do fluxo superficial, contribuindo para a formação do processo erosivo.

4.2 USO E COBERTURA DO SOLO

Neste capítulo será realizada a caracterização do uso do solo e cobertura vegetal da área estudada. Será no uso do solo que será avaliado o impacto da ação antrópica.

4.2.1 Uso do solo

Aqui será destacado o uso do solo e ação antrópica tanto na área estudada como no seu entorno, principalmente a área que fica imediatamente acima, Condomínio A. As principais formas de uso do solo da área são edificações e arruamento. Não foi detectado nenhum tipo de atividade de cultura. Sobre essas formas de ocupar destacam-se os seguintes impactos:

Edificações (Condomínio A): as edificações estão presentes entre a cota 38,00 m e 28,00 m e se estende por 200,00 m. In loco verificou-se que essa área é a de maior declive (10,00%), portanto a que favorece uma velocidade maior do escoamento da água. Porém, parte dessa água perde velocidade quando encontra o Condomínio A e parte desce livremente escoando superficialmente como é possível observar na Figura 6. Por ser uma barreira no caminho da água, nesse contexto, a presença de Edificações desfavorecem o fluxo concentrado da água. Porém como essa área é predominantemente impermeável, toda a água que deixa de infiltrar no solo, escoando superficialmente aumentando o volume de água recebido nas cotas inferiores.

Devido à execução das obras do Condomínio A foram produzido os seguintes impactos: desmatamentos; movimentos de terra; áreas de empréstimos; impermeabilização do solo devido à construções e compactação (circulação de máquinas); alterações no escoamento das águas devido a escavações e aterros.

As ruas existentes são fruto de um projeto inacabado de obras do PAC, por isso as ruas não estão pavimentadas, não possuem sarjetas e a área edificada como um todo não possui elementos como: bocas de lobo, galerias condutoras e equipamentos dissipadores da energia do escoamento. Dessa forma a água fica livre para fazer o seu curso, não sendo, dessa forma, conduzida. O que se pode notar é que as ruas não têm a infraestrutura necessária de drenagem para combater a ação da água no processo erosivo.

4.2.2 Cobertura vegetal

Observando a Figura 5 na perspectiva de extrair informações sobre a cobertura do solo confirma-se o que foi verificado em campo. Observando fotos de datas anteriores (Figura 19 e Figura 20) verifica-se que em 2007 a área encontrava-se totalmente vegetada, enquanto em 2011 já se mostrava desmatada. A vegetação predominante é a vegetação rasteira, médio porte e algumas poucas palmeiras.

A falta de uma vegetação contínua no entorno da voçoroca V01 contribui para a fragilidade da área e evolução do processo erosivo. A vegetação existente é muito esparsa e quase não contribui na diminuição do impacto das gotas de chuva. Observa-se ainda que, nas regiões onde a voçoroca é mais larga e mais profunda quase não há presença de vegetação.

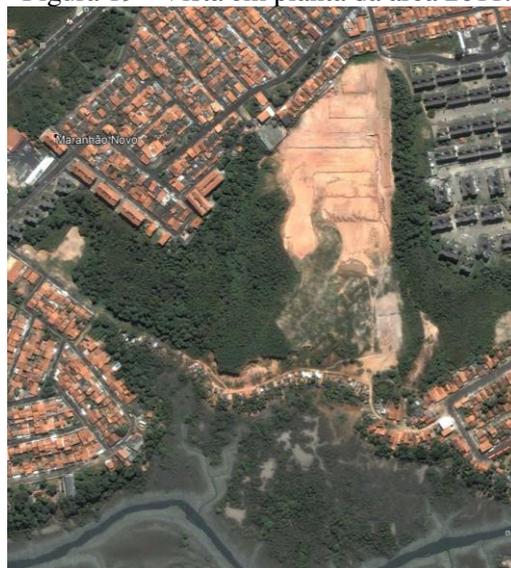
É necessário fazer algumas considerações com relação à cobertura vegetal. Não podemos afirmar qual a condição de cobertura vegetal no processo de formação das feições erosivas (V01, V02 e V03). Como podemos observar na Figura 19 e Figura 20 (comparar com a Figura 5) a área já alternou entre um ciclo de totalmente vegetada e quase sem vegetação. Possivelmente esse ciclo já se repetiu num passado próximo (queimadas) e num mais distante (outras causas). Portanto, o diagnóstico da cobertura vegetal será utilizado para extrair informações de suscetibilidade da área no período dessa pesquisa, mas não será utilizado para inferir sobre a gênese do processo erosivo.

Figura 20 - Vista em planta de 2007.



Fonte: Google Earth (2017)

Figura 19 - Vista em planta da área 2011.



Fonte: Google Earth (2017)

4.3 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA

Nesta seção serão apresentados os resultados dos ensaios. Todos foram realizados no Laboratório de Solos e Pavimentação da Universidade Estadual do Maranhão – UEMA fazendo parte da caracterização geotécnica do solo. Em alguns casos, foi necessário designar a abertura das peneiras tanto pelo padrão da ABNT quanto pelo padrão da ASTM, a relação entre ambas pode ser conferida no Anexo A.

4.3.1 Teor de umidade

Na Tabela 4 é apresentado o resumo da umidade da amostra. Ao pesar as cápsulas de nº 35 e nº 10 não foi observado uma diferença significativa na segunda casa decimal, o dígito da segunda casa nunca ficava fixo. Portanto, foi considerado o mesmo peso do solo antes de ir para a estufa. Já na capsula 41 foi observado uma diferença de 0,05, considerada na Tabela 4.

Tabela 4 - Resumo da umidade. Peso em gramas (g).

TEOR DE UMIDADE			
Cápsula nº	35	10	41
Solo + tara (g)	117,77	115,19	117,20
Sólido + tara (g)	117,77	115,19	117,15
Tara (g)	17,77	15,19	17,20
Peso da água (g)	0,00	0,00	0,05
Peso do sólido (g)	100,00	100,00	99,95
Umidade (%)	0,00	0,00	0,05
Umidade média (%)	0,02		

Fonte: próprio autor.

Os resultados da Tabela 4 mostram que o solo praticamente não apresenta água. Esse resultado pode ser justificado devido ao local e o horário que o solo foi retirado. A amostra foi recolhida no dia 29 de Novembro de 2017 aproximadamente às 13h30, não houve registro de chuvas no local neste dia. O solo foi extraído da parede da feição erosiva, parte totalmente exposta a luz do Sol, sem nenhuma sombra ou penumbra, mais exatamente do trecho compreendido na Figura 6.

4.3.2 Granulometria

Tomados 1.000,00 Kg para a realização do ensaio, apenas 3,63 g ficaram retidos na peneira 2,00 mm. A porcentagem que passa é de 99,64 %, conferir Tabela 5.

Tabela 5 - Resultado do peneiramento grosso.

PENEIRAMENTO GROSSO					
(ABNT NBR 7181)					
Peneira	Peneira	Porcentagem (%)			
ABNT	ABNT	Massa retida	Retida	Retida	Que pasa
n°	(mm)	(g)	(%)	Acumulada	Am. Total
2"	50,10	0,00	0,00	0,00	100,00
1 1/2"	38,10	0,00	0,00	0,00	100,00
1"	25,40	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,10	0,00	0,00	0,00	100,00
3/8"	9,5	0,00	0,00	0,00	100,00
4	4,8	0,00	0,00	0,00	100,00
10	2,0	3,63	0,36	0,36	99,64

Fonte: próprio autor.

Devido a característica arenosa do solo, foi tomado 120,00 g do solo passante na peneira 2,0 mm, conforme recomendação da NBR 7182 (ABNT, 1984) para a realização do ensaio de sedimentação. Na Tabela 5 consta o resumo dos resultados, onde “u” é a viscosidade da água, “L” é a leitura do densímetro, “Ld” é a leitura do densímetro em água na temperatura do ensaio, “a” é a altura de queda do densímetro, “D” é o diâmetro das partículas de solo em suspensão e “Q” é a “porcentagem que passa”.

Tabela 6 - Resumo da sedimentação.

HORA: 14:18 SEDIMENTAÇÃO (ABNT - 7181)							
DENSIMETRO N°: 14 PROVETA N°: 01							
Tempo (s)	Ti ° C	u	L(g/cm)	Ld(g/cm)	a(cm)	D(mm)	Q(%)
30	30	8,17817	1,014	1,002	13,873	0,065	15,45
60	29	8,34592	1,009	1,003	15,179	0,048	8,42
120	29	8,34592	1,009	1,003	15,179	0,034	8,42
240	29	8,34592	1,008	1,003	15,100	0,024	7,09
480	28	8,51955	1,008	1,003	15,100	0,017	6,73
900	30	8,17817	1,008	1,002	15,100	0,012	7,47
1800	26	8,88624	1,008	1,003	15,100	0,009	6,08
3600	27	8,6995	1,008	1,003	15,100	0,006	6,39
7200	27	8,6995	1,008	1,003	15,100	0,004	6,39
14400	27	8,6995	1,008	1,003	15,100	0,003	6,39
28800	26	8,88624	1,008	1,003	15,100	0,002	6,08
90000	25	9,08031	1,008	1,004	15,100	0,001	5,78

Fonte: próprio autor.

Após a etapa de sedimentação, o solo foi lavado e seco até atingir massa constante. Em seguida foi realizado o peneiramento fino, o resumo dos resultados estão expressos na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultado do peneiramento fino.

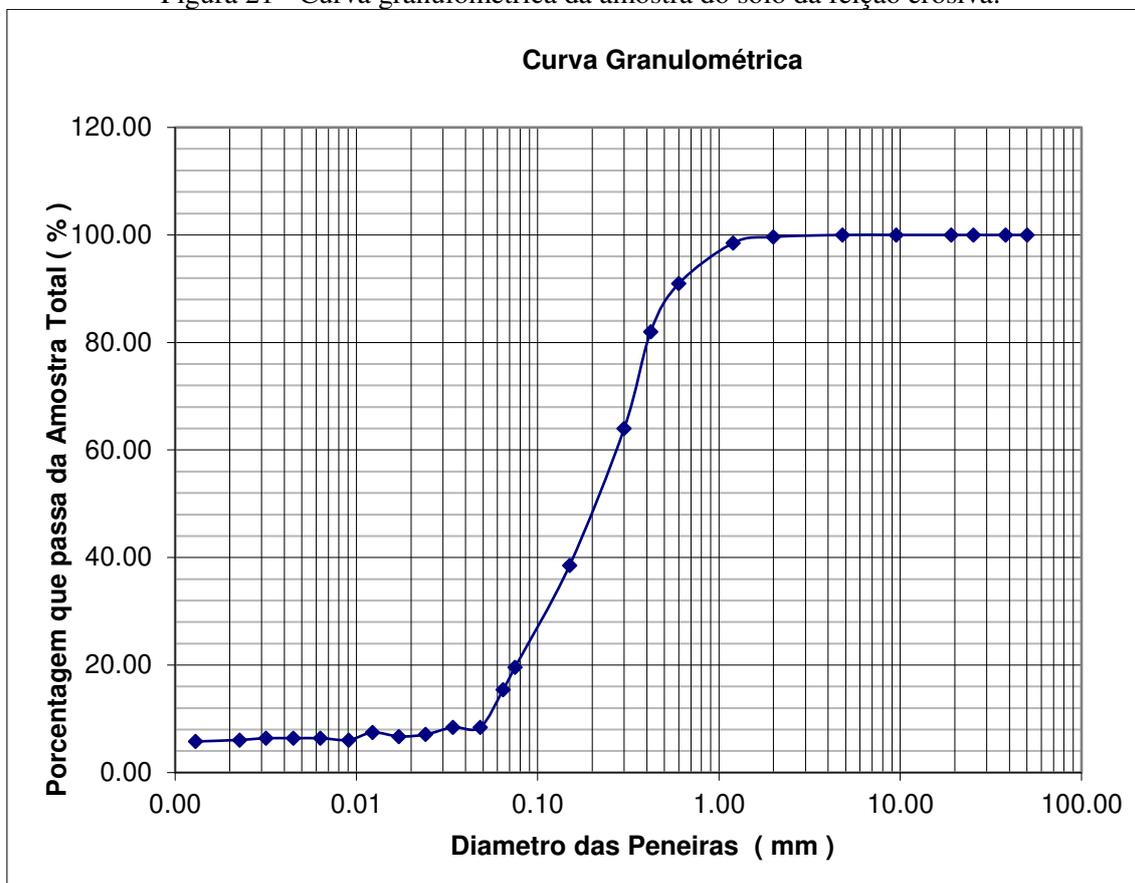
PENEIRAMENTO FINO					
Diâmetro (mm)	Massa Acumulada	massa retida (g)	Porcentagem (%)		
	Retida		Retida	Que passa	Que passa
	(g)	(%)	Acumulada	Am. Miúida	Am. Total
1,20	1,34	1,34	1,12	98,88	98,52
0,60	10,47	9,13	8,73	91,27	90,94
0,42	21,24	10,77	17,70	82,30	82,00
0,30	42,92	21,68	35,77	64,23	63,99
0,15	73,55	30,63	61,30	38,70	38,56
0,075	96,36	22,81	80,31	19,69	19,62

Fonte: próprio autor.

De posse dos resultados de peneiramento grosso, peneiramento fino e sedimentação foi produzida a curva granulométrica onde é possível observar

graficamente a distribuição granulométrica da amostra do solo da feição erosiva (Figura 21).

Figura 21 - Curva granulométrica da amostra do solo da feição erosiva.



Fonte: próprio autor.

Finalmente podemos identificar o percentual de cada faixa granulométrica do solo de acordo com a NBR 6502 (ABNT, 1995), conferir Tabela 8. O solo em estudo é designado como Areia siltosa com pouca argila. Esses resultados serão utilizados para classificar a erodibilidade do solo.

Tabela 8 - Classificação das faixas granulométricas segundo a NBR 6502 (ABNT, 1995).

RESUMO DA GRANULOMETRIA E SEDIMENTAÇÃO (%)			
Pedregulho acima de 2,0mm	0,05	Silte 0,075 a 0,050mm	12,00
Areia grossa 2,0 a 0,42mm	17,95	Silte 0,050 a 0,005mm	2,00
Areia fina 0,42 a 0,075mm	62,00	Argila 0,005 a 0,001mm	0,00
Menor que 0,075mm	20,00	Argila coloidal 0,001mm	6,00

Fonte: próprio autor.

4.3.3 Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade

A Tabela 9 apresenta o resultado do ensaio de Limite de Liquidez da amostra. O LL do solo é de 16,75%.

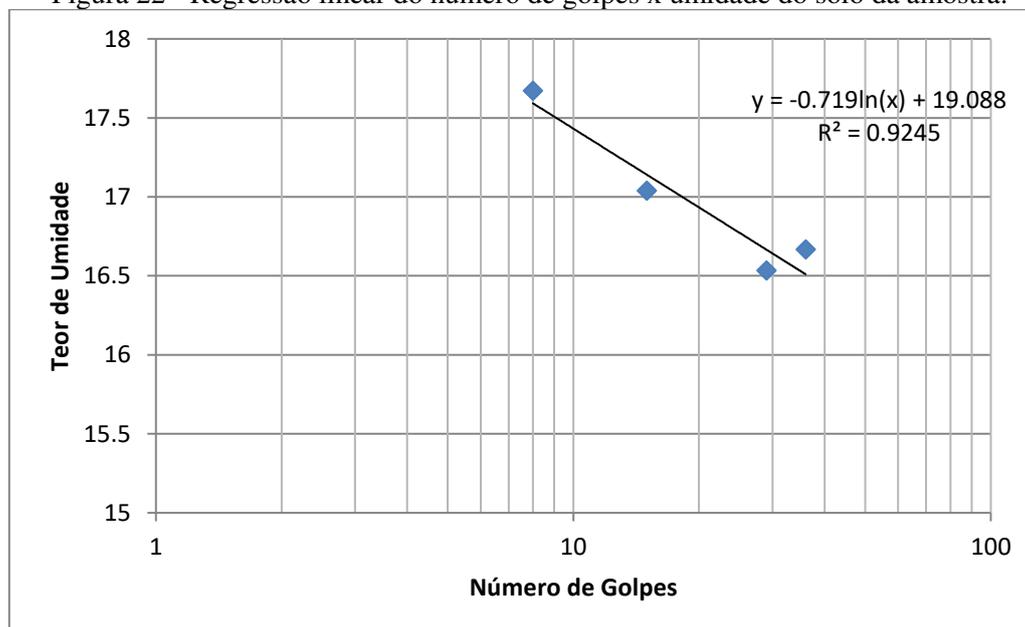
Tabela 9 - Determinação do Limite de Liquidez da amostra.

Determinação do Limite de Liquidez (LL)	Cápsula nº	18	14	35	37
	Cápsula (g)	4,5	4,25	4,4	4,8
	Solo Úmido+Cap (g)	21,68	20,53	21,88	20,2
	Solo seco+cap (g)	19,1	18,16	19,4	18
	Nº de Golpes	8	15	29	36
16,75	Teor de Umidade (%)	17,671	17,038	16,533	16,667

Fonte: próprio autor.

A Figura 22 representa uma interpolação do dados da Tabela 9 onde é possível observar graficamente o comportamento do nº de golpes X teor de umidade.

Figura 22 - Regressão linear do número de golpes x umidade do solo da amostra.



Fonte: próprio autor.

Apesar das tentativas, a amostra não apresentou plasticidade, pois o solo é muito arenoso, 80,00 % de areia e 14,00 % de silte. O solo foi umedecido gradativamente, mas sempre esfarelava, não permitindo a moldagem do cilindro padrão desse tipo de ensaio.

Portando o solo é considerado como não plástico. O resumo dos Limites de Liquidez e Plasticidade são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Resultado do LL e LP da amostra de solo.

RESULTADOS	
Limite de Liquidez (LL):	16,75
Limite de Plasticidade (LP):	S/
Índice de Plasticidade (IP):	-

Fonte: próprio autor.

4.3.4 Classificação da amostra

Para enquadrar as amostras no Sistema de Classificação Unificada (USC/ASTM) (ver Anexo B) é necessário alguns parâmetros de entrada, que são:

- Diâmetro Efetivo (D_{10}): é o diâmetro para o qual 10% das partículas do solo possuem diâmetros inferiores a ele. Analogamente D_{30} e D_{60} ;
- Coeficiente de Uniformidade (C_u): indica a distribuição do tamanho das partículas. É dado por D_{60}/D_{10} (quanto menor o coeficiente, mais uniforme é o solo). Indica uniformidade;
- Coeficiente de Curvatura (C_c): $(D_{30})^2/(D_{60} \times D_{10})$ (solos bem graduados, valor entre 1 e 3). Indica descontinuidades ou concentrações dos tamanhos de grãos.

Segue na Tabela 11 a continuação da apresentação dos parâmetros e a Classificação Unificada do solo.

Tabela 11 - Filtragem dos parâmetros para elaboração da Classificação Unificada dos Solos (USC/ASTM).

% Passa #4	% Passa #200	"Parâmetro" Para Classificação	Classificação
100	20	$C_u = 0,267$ e $C_c = 1,27$	SP

Fonte: Elaborado pelo autor.

O solo foi classificado como SP indicando que é uma areia mal graduada.

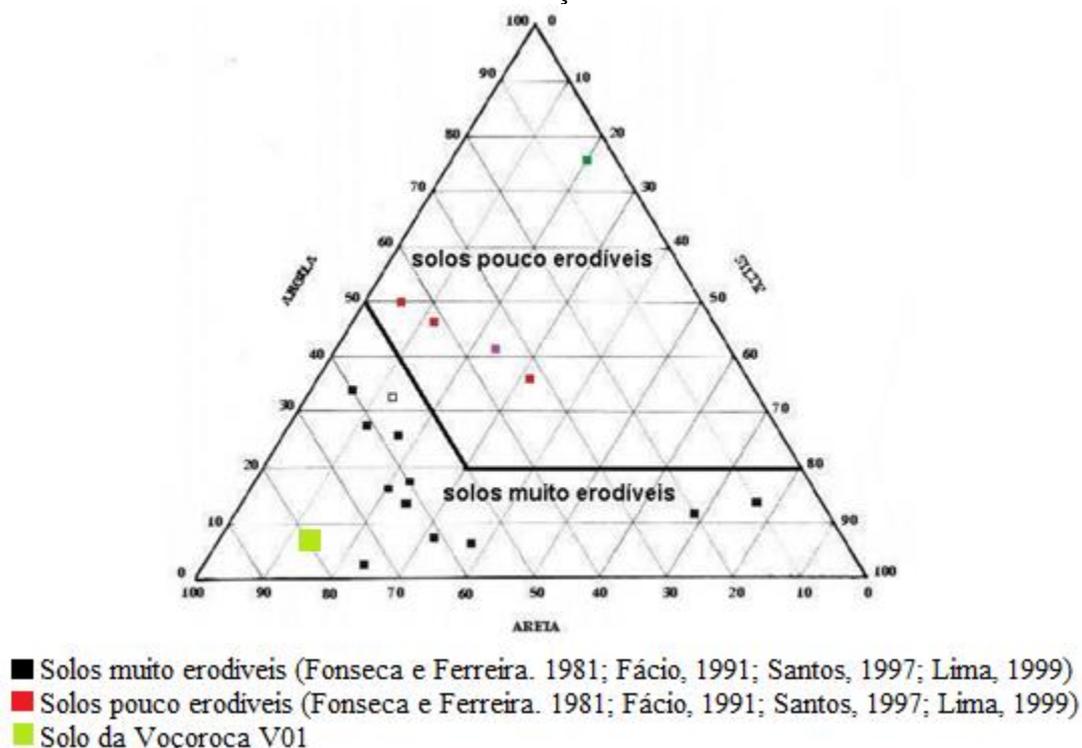
4.3.5 Avaliação indireta da erodibilidade

Nesta seção será feita a correlação entre as propriedades geotécnicas dos solos com o seu potencial de erosão. Esse potencial é avaliado com base nas observações de campo e nos resultados dos ensaios realizados de caracterização dos solos. Para isso, fez-se uma interpretação e comparação desses resultados com os já conhecidos na literatura e com as condições de campo.

a) Araujo (2013)

Iniciando com a separação de zonas de erodibilidade dentro do triângulo textural proposta por Araujo (2013), proposta segundo a qual solos muito erodíveis se concentrariam na região de mais de 50,00 % de areia e menos de 50,00 % de argila. Observa-se na Figura 23 que solo está dentro da faixa de solos muito erodíveis.

Figura 23 - Proposta de separação de faixas de erodibilidade (ARAUJO, 2013) com a inserção dos solo da voçoroca V01.



Fonte: Adaptado de Araujo (2013).

b) Mannigel (2002)

Nas faixas de erodibilidade sugeridas por Mannigel et al. (2002) temos para o solo em estudo que o resultado do fator K (Equação 2) é de 0,16 t.ha.h/ha.MJ.mm, caracterizando, assim, erodibilidade alta.

c) Meireles (1967)

Recordando dos valores de LL, LP e IP vê-se que na proposta de Meireles (1967) o solo recebe a classificação de fortemente erodível:

Fortemente erodíveis: $LL \leq 21\%$ e $IP \leq 8\%$ e $\% \text{ passa } \#200 \leq 20\%$.

d) Santos (2001)

Na classificação de Santos (2001) que leva em consideração o índice de plasticidade e o coeficiente de uniformidade temos para o solo em estudo $Cu = 0,27$. O critério de utilizar IP ou Cu segue a mesma filosofia da classificação SUCS/ASTM onde é levado em consideração a porcentagem de materiais finos e grossos. Dessa forma o solo é classificado como solo erodível.

A Tabela 12 sintetiza os resultados de classificação da erodibilidade segundo cada parâmetro geotécnico.

Tabela 12 - Resumo da classificação da erodibilidade através de parâmetros geotécnicos.

QUADRO RESUMO DAS PROPOSTAS DE ERODIBILIDADE E RESULTAS DA CLASSIFICAÇÃO				
Autor	Araujo (2013)	Mannigel et al. (2002)	Meireles (1967)	Santos (2001)
Parâmetro	Triângulo textural	Equação de Bouyoucos (1935)	LL, IP e % passa #200	IP e Cu
Classificação	solos muito erodíveis	erodibilidade alta	fortemente erodível	solo erodível

Fonte: próprio autor.

5 SUSCETIBILIDADE A EROSÃO

Neste Capítulo vamos sintetizar os resultados sobre a erodibilidade do solo e resumir em uma tabela a fim de obter uma visualização mais compacta dos resultados.

Clima: foi constatada a presença de chuvas intensas, bem como torrenciais, registradas pelo Núcleo Geoambiental da UEMA. Como já apresentado, esse tipo de chuva é a que mais contribui para o desenvolvimento do processo erosivo.

Geomorfologia: in loco foi observado que a área em estudo é uma grande rampa com uma extensão de aproximadamente 500,00 m (RUA 11-FIM DE V01) onde a água pode descer livremente ganhando velocidade e concentrando o fluxo. Além disso, essa grande rampa conta com uma diferença de cota de cerca de 30,00 m (RUA 11, 38,00 m e FIM DE V01 8,00 m). O tipo da vertente foi identificado como sendo do Tipo II, concentradora do fluxo superficial.

Solo: a caracterização geotécnica indica que o solo é potencialmente erodível. Tanto os parâmetros que utilizam a granulometria quanto os que utilizam LL e LP produzem o mesmo resultado. Esse fato indica que o solo por si só já é um agravante para o desenvolvimento do processo erosivo.

Uso do solo: como apresentado na seção 4.2.1 o solo não apresenta infraestrutura necessária para conduzir a água, tanto o Condomínio A quanto o arruamento. A água tende a escoar superficialmente, concentrando o fluxo, favorecendo dessa forma a evolução do processo erosivo.

Cobertura Vegetal: a cobertura vegetal é densa em algumas regiões e esparsa em outras (principalmente no entorno das feições erosivas). A área já alternou entre totalmente vegetada e sem vegetação. A falta de cobertura vegetal no entorno das feições erosivas contribuem drasticamente para a evolução do processo.

O alto potencial erosivo do solo, característica intrínseca do solo determinada pelos parâmetros geotécnicos, somado a: chuvas intensas, falta de cobertura vegetal no entorno das feições erosivas e a tendência de concentração do fluxo numa extensa área de declive produz um panorama favorável ao surgimento e evolução do processo erosivo. A voçoroca é uma forma de manifestação da erosão linear, devido ao solo ser potencialmente erosivo, as feições erosivas surgem nos pontos onde o fluxo se concentra, obedecendo a topografia do terreno. A Tabela 13 sintetiza os principais resultados deste capítulo.

Tabela 13 - Tabela resumo da caracterização do meio físico, caracterização geotécnica e uso e cobertura do solo.

Caracterização do meio físico	Clima	Existência de chuvas intensas principalmente no início do período chuvoso	
	Geomorfologia	Topografia	Rampa de 500,00 m favorecendo o aumento de velocidade da água
		Tipo de vertente	Tipo II
Caracterização geotécnica	Solo	Todos os quatro parâmetros geotécnicos utilizados indicam que o solo estudado tem um alto potencial erodível	
Uso e cobertura do solo	Cobertura vegetal	Alternância de presença e ausência de vegetação. No entorno da feição erosiva V01 e algumas regiões de V02 e V03 não há vegetação.	
	Uso do solo	Edificações e arruamentos inacabados sem infraestrutura necessária para conduzir a água. A água tende a concentrar o fluxo escoando superficialmente.	

Fonte: próprio autor.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em uma primeira análise, a própria existência de feições erosivas, manifesta na forma de voçoroca, constitui um forte indício de que o perímetro investigado no bairro do Bequimão é suscetível ao processo erosivo.

Observando a Tabela 13 vê-se que todos os fatores condicionantes do processo erosivo colaboram para a evolução do fenômeno. Portanto, verifica-se que a análise dos fatores tidos como condicionantes, de fato, conduzem à conclusão que a área em estudo é potencialmente suscetível à erosão, confirmando a primeira análise e demonstrando, dessa maneira, que análises multidisciplinares permitem identificar adequadamente áreas de susceptibilidade.

Além disso, conclui-se que, separadamente, as características do meio físico, as características geotécnicas e o tipo de uso e cobertura dos solos colaboram para a evolução do processo erosivo.

A caracterização geotécnica do solo da voçoroca V01 indica um alto potencial erosivo. Observa-se que em todas as classificações o solo foi enquadrado na pior situação, evidenciando a alta fragilidade do solo. Ao longo de toda extensão da voçoroca observou-se a uniformidade do solo com característica amarelada bem como nas voçorocas V02 e V03. Essa característica intrínseca do solo somado a ação da chuva são suficientes para afirmar que a área é suscetível ao processo erosivo, considerando que o solo da área tenha as mesmas características que a amostra retirada.

Observa-se que a ação antrópica tem destaque na evolução dos processos erosivos. Isso fica evidente no desmatamento, Figura 19 e Figura 20, no lixo que é despejado de forma inapropriada, Figura 11, 12, 13, 14 e 15 e o próprio uso para edificações. A ocupação do solo gera inevitavelmente impactos, porém a ausência de medidas de minimização desses impactos agrava o cenário.

Uma proposta de relação entre os aspectos estudados neste trabalho para o comportamento do processo erosivo sob a ação dos fatores condicionantes é que: a existência de chuvas intensas é característica do clima de São Luís, esse volume de chuva precipitado numa área de solo erodível somado a uma topografia caracterizada por declive e uma longa rampa (contribuindo para o ganho de velocidade quando escoar superficialmente) tendem a produzir feições erosivas. O fluxo concentrado agrava mais ainda o cenário, proporcionando o desenvolvimento de feições erosivas lineares. Devido a falta de cobertura vegetal a água perde pouca energia, aumentando assim o seu efeito e

impacto a medida que a água desce. A ação antrópica agrava a atividade erosiva, visto que as obras inacabadas no local são desprovidas da infraestrutura necessária para combater a erosão como mecanismos de condução da água e dissipadores de energia.

Sugestões de pesquisas futuras:

Por ter uma natureza complexa, os processos erosivos solicitam um estudo abrangente, portanto uma primeira recomendação é estudar também o aspecto, geológico, mineralógico, porosidade do solo, entre outras propriedades que são relevantes na investigação do processo erosivo.

Recomenda-se ainda a realização de ensaios específicos de erodibilidade do solo, pois são métodos de avaliação direta, portanto, mais precisos.

Por fim, devido a constatação do despejo de lixo em alguns pontos da feição erosiva, recomenda-se estudos no aspecto sanitário que considerem, erosão, lixo e comunidade.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA FILHO, Gerson Salviano de et al. Impacto da expansão urbana no desenvolvimento de processos erosivos lineares no Município de Bauru, SP. In: **Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 21ª Feira Internacional de Tecnologias de Saneamento Ambiental, 4.** ABES, 2001. p. 1-16.
- ANGULO, R. J. **Relações entre a erodibilidade e algumas propriedades de solos brasileiros.** 1983. 168f. Dissertação (Mestrado em conservação dos solos). Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 1983.
- ABNT, NBR. 7182-Ensaio de Compactação. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 1984.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Determinação do limite de liquidez.** NBR 6459, outubro. 1984a.
- _____. **Determinação do limite de plasticidade.** NBR 7180, outubro. 1984b.
- _____. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 1984.
- _____. **Peneiras para ensaio - especificação.** NBR 5734, outubro. 1984c.
- _____. **Rochas e solos.** NBR 6502, setembro. 1995.
- _____. **Solo – análise granulométrica.** NBR 7181, dezembro. 1984d.
- BARROS, W. D. A erosão no Brasil. **Serviço de Documentação do Ministério da Viação e Obras Públicas**, Rio de Janeiro, RJ, 1956. 350p.
- BERTONI, J. O planejador e a utilização dos recursos naturais. **Boletim da Federação dos Engenheiros-Agrônomos do Brasil (FEAB)**, Campinas, 23.p. 1968.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO F. **Conservação do solo.** Ed. Ícone, São Paulo, SP, 2.ed, 355p. 2008.
- CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos solos e suas aplicações.** São Paulo: Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 6ª edição, v. 1, 1988.
- CASSETI, Valter. Geomorfologia. **Fundação de Apoio a Pesquisa–FUNAPE/UFV**, 2005.
- ARAUJO, Rodrigo da Cruz. **Estudo da erodibilidade de solos da formação barreiras – RJ.** 2000. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2000.

ARAÚJO, Rodrigo da Cruz; CAMPOS, Tácio Mauro Pereira. Uso dos ensaios de penetração de cone, desagregação, sucção e resistência à tração para avaliar a erodibilidade. **GEOTECNIA**, n. 128, p. 67-85, 2013.

DREW, David; DOS SANTOS, João Alves. **Processos interativos homem-meio ambiente**. Bertrand Brasil, 1994.

GUERRA, A.J.T. Processos Erosivos nas Encostas. In: **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. Editores: GUERRA, A.J.T.; CUNHA, S.B. 2ªed, Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, RJ, 1995.

GUERRA, A. J. T.; BOTELHO, R. G. M. Características e Propriedades dos Solos Relevantes Para os Estudos Pedológicos e Análise Dos Processos Erosivos. **Anuário do Instituto de Geociências** – V. 19 – 1996.

GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações**. 3ªed. – Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2007.

IWASA, O.Y.; FENDRICH, R. Controle de Erosão Urbana. Oliveira, A. M. S., BRITO, S. N. A. (Org.). **Geologia de Engenharia**. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia - ABGE, São Paulo, SP, p. 271-282. 1998.

JESUS, A.S. **Investigação Multidisciplinar de Processos Erosivos Lineares**: Estudo de Caso da Cidade de Anápolis - GO. 2013. 340 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2013.

Jesus, A.S. **Impactos ambientais na alta bacia urbana do rio das Antas em Anápolis (GO)**. 2007. 159 f. Dissertação de Mestrado em Geografia (Natureza e Apropriação do Espaço do Cerrado), Instituto de Estudos Sócio-Ambientais, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2007.

JORGE, Francisco Nogueira; UEHARA, Kokei. Águas de superfície. **OLIVEIRA, Antônio M. dos Santos e BRITO, Sérgio N. Alves de (Org.). Geologia de Engenharia**. São Paulo [SP]: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, p. 101-109, 1998.

LISBOA, G. Serra et al. Análise morfológica das áreas degradadas por voçorocamento na bacia do Rio Bacanga–São Luís/MA. **REVISTA GEONORTE**, v. 5, n. 14, p. 15-20, 2015.

MAGALHÃES, Ricardo Aguiar et al. Erosão: definições, tipos e formas de controle. **SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROSÃO**, v. 7, p. 1-11, 2001.

MANNIGEL et al. Fator erodibilidade e tolerância de perda dos solos do Estado de São Paulo. **Acta Scientiarum**. Maringá, v. 24, n. 5, p. 1335-1340, abr. 2002.

MARÇAL, M.S. **Degradação Ambiental no Alto Curo da Bacia do Rio Açailândia (MA): Uma Avaliação dos Processos de Erosão Acelerada.** Projeto de Tese de Doutorado UFRJ, RJ, 1998.

MEIRELES, J. M. F. Erosão de taludes de estradas. **Segunda Jornada Luso-Brasileira de Engenharia Civil. Rio de Janeiro e São Paulo, 1967.**

MOREIRA, C.V.R.; PIRES NETO A.G. Clima e Relevo. Oliveira, A.M.S., BRITO, S.N.A.(Org.). **Geologia de Engenharia.** Associação Brasileira de Geologia de Engenharia - ABGE, São Paulo, SP. 1998.

MORGAN, R.P.C. Soil degradation and erosion as a result of agricultural practice. **III: Geomorphology and soils.** Editores: K.S. Richards, R.R. Arnett e S. Ellis. Londres, 370-395. 1984.

MORTARI, Diógenes. **Caracterização geotécnica e análise do processo evolutivo das erosões no Distrito Federal.** 1994. 200 f. Dissertação (Mestrado em Geotécnica) – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 1994.

MOTA, S. **Planejamento Urbano e Preservação Ambiental.** Edições UFC, Fortaleza. 1991.

NUCLEO GEOAMBIENTAL; Laboratório de meteorologia-UGEO/LABMET/UEMA. **Informativo climático disponível em:** www.nugeo.uema.br, acesso em 15 de novembro de 2017.

NUNES, M.C.M. **Erosão hídrica em entressulcos de latossolos do Rio Grande do Sul.** Tese de Doutorado em Ciência do Solo, Programa de Pós- Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. (160 p.) Julho, 2006.

PASTORE, E.L. Contribuição ao Tema Geotecnia e Meio Ambiente: Erosão. **VIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações**, v.5, Porto Alegre, RS, 1986.

PRADO, H. **Solos Tropicais: Potencialidades, limitações, manejo e capacidade de uso.** Piracicaba, 166p. 1995.

REGO, J.J.V. **Erosão Superficial em Taludes de Corte em Solo Residual de Gnaisse.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ. 1978.

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S.B.; CORRÊA, G.F. **Pedologia base para distinção de ambientes.** NEPUT, Viçosa, MG. 1995.

RUELLAN, A. e DOSSO, M. **Regards sur le sol.** Foucher-AUF, Paris, 1993.

SANTOS, C. A. **Comportamento hidrológico superficial, subsuperficial e a erodibilidade dos solos da região de Santo Antônio do Leite, distrito de Ouro Preto**

– **Minas Gerais**. 2001. 107 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2001.

SATHLER, Rafael et al. Caracterização de voçorocas na ilha do Maranhão. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 32, n. 1, p. 34-45, 2009.

SILVA, Antonio Soares da. **Análise morfológica dos solos e erosão**. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S; BOTELHO, R. G. M. **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações**. 3^aed. – Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2007.

SILVA, T. Pereira et al. Análise morfológica dos solos nas voçorocas araçagy I e II no município de São José de Ribamar. **REVISTA GEONORTE**, v. 5, n. 14, p. 21-27, 2015.

TROEH, FREDERICK R. Landform equations fitted to contour maps. **American Journal of Science**, v. 263, n. 7, p. 616-627, 1965.

VILAR, O.M.; PRANDI, E.C. **Erosão dos Solos. Solos do Interior de São Paulo**. ABMS/USPSC, 1993.

VILLELA, Swami Marcondes; MATTOS, Arthur. Hidrologia aplicada. In: **Hidrologia aplicada**. McGraw-Hill, 1975.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses from cropland East of the Rocky Mountains**. Washington, USDA, (Handbook, 282). 1965. 47p.

_____. **Predicting rainfall erosion losses – a guide to conservation planning**. Washington, USDA, Agricultural Handbook, (537). 1978.58p.

ANEXO A – Aberturas das malhas das peneiras padronizadas pela ASTM.

Nº	Abertura mm	Nº	Abertura mm	Nº	Abertura mm
200	0,074	45	0,350	14	1,410
140	0,105	40	0,420	12	1,680
120	0,125	35	0,500	10	2,000
100	0,149	30	0,590	8	2,380
80	0,177	25	0,710	7	2,830
70	0,210	20	0,840	6	3,360
60	0,250	18	1,000	5	4,000
50	0,297	16	1,190	3/16"	4,760

ANEXO B – Sistema de classificação unificada (USC/ASTM).

SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO UNIFICADA (USC / ASTM)						
Tipo de Material	Granulometria			Plasticidade		Classificação
	P ₂₀₀ (%)	P ₄ (%)	C _c , C _u	IP	LL	
Grosso	≤ 5	$(100 - P_4) > (P_4 - P_{200}) : G$ $(100 - P_4) < (P_4 - P_{200}) : S$	$1 \leq C_c \leq 3$ e $C_u > 4$ (para G) $C_u > 6$ (para S) } W Fora destas faixas: P	$7 < IP > 0,73(LL - 20) : C$ $IP \leq 0,73 (LL - 20)$ ou $IP \leq 7$ } M		GW GP SW SP
	$5 < P_{200} \leq 12$					GW - GC GW - GM GP - GC GP - GM SW - SC SW - SM SP - SC SP - SM
	$12 < P_{200} \leq 50$					GC GM SC SM
Fino	> 50			$7 < IP > 0,73(LL - 20) : C$ $IP \leq 0,73 (LL - 20)$ ou $IP \leq 4$ } M $(4 < IP \leq 7)$ e $[IP > 0,73 (LL - 20)] : C - M$	$> 50 : H$ $\leq 50 : L$	CH MH ou OH CL ML ou OL CL - ML
Turfoso	Caracterizado pela cor e odor típicos, partículas fibrosas, fofo, altamente compressível, muito leve e inflamável quando seco, não-plástico. Teste de perda ao fogo (rubro). Limites de consistência antes e depois da secagem. Segundo a NBR 6502, "são solos com grande porcentagem de partículas fibrosas de material carbonoso ao lado de matéria orgânica no estado coloidal".					Pt