

**CLAUDIO MANOEL LESSA DE CASTRO**

**ANÁLISE DOS PROCESSOS EROSIVOS E AS RELAÇÕES  
COM AS PERDAS ACEITÁVEIS DE SOLOS NA  
BACIA DO ALTO-PARAÍBA/PB**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**

**Programa Regional de Pós Graduação em  
Desenvolvimento e Meio  
Ambiente**

**PRODEMA**

**João Pessoa – PB**

**2011**

C355a Castro, Claudio Manoel Lessa de.

Análise dos processos erosivos e as relações com as perdas aceitáveis de solos na Bacia do Alto-Paraíba/PB /  
Claudio Manoel Lessa de Castro - João Pessoa: Editora  
Universitária da UFPB, 2011.  
135f.

Orientadores: Eduardo Rodrigues Viana de Lima, Maria  
Cristina Basílio Crispim da Silva

Dissertação (Mestrado) – UFPB/PRODEMA

1. Erosão do solo. 2. Erosão do solo – Bacia Hidrográfica  
do Alto-Paraíba. 3. Equação Universal de Perda do Solo.  
4. Bacia Hidrográfica do Alto-Paraíba – vulnerabilidade.

UFPB/BC

CDU: 631.459(043)

**CLAUDIO MANOEL LESSA DE CASTRO**

**ANÁLISE DOS PROCESSOS EROSIVOS E AS RELAÇÕES  
COM AS PERDAS ACEITÁVEIS DE SOLOS NA  
BACIA DO ALTO-PARAÍBA/PB**

Dissertação apresentada ao Programa Regional de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente – PRODEMA, da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de MESTRE EM GERENCIAMENTO DE RECURSOS NATURAIS.

Orientadores:

Prof<sup>o</sup>. Dr. Eduardo Rodrigues Viana de Lima

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria Cristina Basílio Crispim da Silva

**João Pessoa – PB  
2011**

**ANÁLISE DOS PROCESSOS EROSIVOS E AS RELAÇÕES  
COM AS PERDAS ACEITÁVEIS DE SOLOS NA BACIA DO  
ALTO PARAÍBA/PB**

**CLAUDIO MANOEL LESSA DE CASTRO**

Dissertação apresentada ao curso de pós-graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal da Paraíba, como requisito para homologação deste no Programa de Pós Graduação.

Aprovado em \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof<sup>o</sup>. Dr. Eduardo Rodrigues Viana de Lima – UFPB  
Orientador

---

Prof<sup>a</sup>. Dra. Maria Cristina B. Crispim da Silva – UFPB  
Co-Orientadora

---

Prof. Dr. Roberto Sassi – UFPB  
Examinador Interno

---

Prof. Dr. Pedro Costa Guedes Vianna – UFPB  
Examinador Interno

---

Prof<sup>a</sup>. PhD. Iêde de Brito Chaves – UFCG  
Examinador Externo

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a meu Pai (*in memoriam*) e minha Mãe que me ensinaram o amor e o respeito a todos os seres da criação;

À minha esposa Selma Lessa pelo amor e

companheirismo de todas as horas;

Aos meus filhos Pedro Lessa, Claudio Lessa Filho e Andrea Lessa,

pela luz que trouxeram à minha vida.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao Eterno Brahman – Deus Onipotente pela minha existência;

Agradeço a meus Pais: Plácido de Medeiros Castro e Yedda Lessa de Medeiros Castro, pela orientação na vida e a educação proporcionada;

A minha esposa Selma Lessa que sempre me incentivou e me motivou a atingir meus objetivos;

A meu filho Pedro Lessa, a motivação para este estudo na área Ambiental, contribuindo, assim, para que ele tenha um futuro melhor;

Ao meu orientador Eduardo Rodrigues Viana de Lima, que me guiou com sua experiência e serenidade nos caminhos dos conhecimentos necessários para escrever esta dissertação;

A minha orientadora Maria Cristina Crispim da Silva, meu primeiro contato na UFPB, que me apoiou em todos os momentos, e que me fez apreciar ainda mais, a Biologia;

Aos professores do PRODEMA, dentre vários, cito em especial os professores Maristela Andrade, Coordenadora do PRODEMA na UFPB, que me trouxe muitos conhecimentos na área da antropologia; Roberto Sassi, exemplo para mim de sabedoria, conhecimento e humildade; Belinda Cunha, que quase me fez cursar Direito; Eduardo Viana, expert em SIG. Todos, com suas disciplinas me fizeram enxergar e a valorizar a diversidade de conhecimentos e interconexões existentes nas ciências ambientais.

À secretária do PRODEMA, Amélia Limeira, pelo auxílio ao cumprimento dos procedimentos internos do programa, sempre estando disponível às minhas solicitações.

Ao professor Ivandro de França da Silva, da UFPB/campus Areia, pelas orientações e material fornecido às minhas pesquisas;

Ao Professor do Departamento de Geografia da UFPB, Bartolomeu Israel de Souza, pelas informações utilizadas nesta dissertação;

Ao ilustre Professor PhD Antonio José Teixeira Guerra, da UFRJ, mestre e grande amigo, o grande responsável pelo meu apreço à Geomorfologia;

Aos componentes da Banca de Avaliação da Dissertação, Professor Dr. Pedro Costa Guedes Vianna e Professor PhD Iêde de Brito Chaves, que aceitaram meu convite contribuindo para o alcance do meu objetivo;

Ao amigo-irmão José Antonio da Conceição (Físico), que há mais de 40 anos sempre esteve me apoiando e aconselhando; meu segundo Pai;

A Aron David Davidovitsch (Engº. Geotécnico) (*in memoriam*) grande e inesquecível amigo e irmão;

Finalizando, meus queridos amigos de curso, que sempre serão lembrados por mim: (em ordem alfabética) Anderson Emmanuel (Biólogo); Andre Luiz Queiroga (Químico); Catiana Oliveira (Bióloga); Eugênio Pacelli (Biólogo); Gisele Bezerra (Bióloga); Henrique Elias (Geógrafo); Lucia Aquino (Geógrafa); Luciana Ligia (Jornalista); Sergio Roberto Alcântara (Biólogo) e Valnir Meneses (Geógrafo).

ॐ ཨོཾ་མ་ཎི་པདྨེ་ཧཱུྃ།  
 OM MANI PÄDME HUM

"O mantra **Om Mani Pädme Hum** contém a essência de todo o ensinamento Budista.

**OM** significa poder alcançar perfeição na prática da generosidade;

**MA** significa poder aperfeiçoar a prática da ética pura;

**NI** significa poder alcançar perfeição na prática da tolerância e paciência;

**PÄD** significa poder alcançar perfeição da perseverança;

**ME** significa poder alcançar perfeição na prática da consideração;

**HUM** significa poder alcançar perfeição na prática da sabedoria"

## RESUMO

O objetivo deste trabalho é o de determinar se a perda de solo por erosão para os solos existentes na Bacia Hidrográfica do Alto-Paraíba estão compatíveis com as tolerâncias máximas já determinadas para os solos do Estado da Paraíba, em estudo realizado pelo Departamento de Solos e Engenharia Rural da UFPB, campus Areia/PB. No presente trabalho, realizou-se o estudo sobre a vulnerabilidade à erosão, avaliando-se a adequação das atuais formas de uso e ocupação do solo frente a esta vulnerabilidade. Esta análise foi feita com base na aplicação do modelo matemático representado pela Equação Universal de Perda de Solo - USLE. Os procedimentos operacionais foram feitos com o apoio de imagens de satélite, e com SIGs e utilização do software SPRING. O mapa comparativo entre as Perdas de Solo e as Tolerâncias de Perdas de Solo foi resultado de uma combinação vetorial entre estes mapas temáticos. Cerca de 61 % da área encontra-se sob condição aceitável de perda de solos, ou seja, os valores estão dentro do esperado pelos estudos efetuados pela UFPB / Campus Areia, e cerca de 38 % ficaram com valores acima do previsto, ou seja, perdas de solo não aceitáveis. Esta tolerância depende essencialmente das características dos solos, da profundidade e da topografia, e, constitui-se, dessa forma, em informação de significativa importância, visto que permite ao planejador ou proprietário de terra, saber que tipo de uso pode fazer para que não haja degradação dos solos e estes possam ser explorados com elevados níveis de produtividade, permitindo o desenvolvimento sustentável da terra. Os valores de *erosividade* mais baixos ocorreram na área de menor declividade e cobertura vegetal do tipo caatinga aberta e densa. Obtivemos através da análise dos dados, o percentual de 76% representando cobertura vegetal aberta, rala, solo exposto e pequenas culturas de subsistência, o que corroboram para a existência de processos erosivos. Os maiores valores de *erodibilidade* estão associados, à classe de solo Planossolo. Ao calcular as perdas de solo dessa bacia hidrográfica, com a utilização da Equação Universal de Perdas de Solo por erosão laminar, considerou-se os intervalos para essas perdas sendo: nula ou ligeira, para valores inferiores a  $2 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  (76,13 %); perda de solo moderada, entre 2 e  $4 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  (9,77 %); perda de solo alta, entre 4 e  $6 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  (4,79%) e perda de solo muito alta, para valores superiores a  $6 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  (9,31 %).

Palavras-chave: Erosão. Equação Universal de Perda de Solo. Bacia Hidrográfica do Alto-Paraíba. Vulnerabilidade.

## ABSTRACT

The aim of this study was to determine if the soil losses by erosion in Alto Paraíba basin soils are below the maximum tolerance determined by the Soils Department and Rural Engineering of Paraíba Federal University, campus of Areia/PB. by the Soils Department and Rural Engineering of Paraíba Federal University, campus of Areia/PB. This analysis was based on the Universal Soil Loss Equation mathematic model. Operational procedures were carried out with satellite images and GIS/*SPRING*. The comparative map obtained between the Losses of Soil Map and Losses of Soil Tolerance Map, was the result of a vectorial combination between these maps. About 61% of the area is under acceptable conditions of soil losses, into the expected studies developed by UFPB/AREIA, and approximated 38% with override values of non acceptable soil losses. This tolerance depends essentially of the soil characteristics, of its depth and topography, and constitutes, this way, important information that allows to the land owner or planner, to know what the best way of soil usage is, and avoiding its degradation and exploitation it with high productivity level allowing the sustainable development of the land. The values of lower erosivity occurred in minor steepest area and open vegetal cover and dense caatinga (a xeric shrubland). It was obtained through data analyses, the tax of 76% representing open and sparse vegetal cover or exposed soil and little crops, that corroborates to erosive process. The largest values of erodibility are associated to planosols. Calculating the soil losses of that basin, with the usage of Universal Soil Loss Equation by laminar erosion, it was considered the intervals for these losses as being: null or light, to values minor than  $2 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$  (76,13 %); moderate soil losses among 2 and  $4 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$  (9,77 %); high soil losses, among 4 and  $6 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$  (4,79 %) and very high soil losses, over  $6 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$  (9,31 %).

Keywords: Erosion. Universal Soil Loss Equation. Alto-Paraíba Basin. Vulnerability

## LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

**AESA** – Agência de Gestão de águas do Estado da Paraíba

**DNOCS** – Departamento Nacional de Obras Contra a Seca.

**Eh** – potencial de oxirredução

**EMBRAPA** – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

**EUA** – Estados Unidos da América

**EUPS** – Equação Universal de Perda de Solo.

**FAO** – Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação

**IBGE** – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

**INPE** – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

**IPT/SP** – Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo

**LMRS** – Laboratório de Meteorologia e dos Recursos Hídricos do Estado da Paraíba.

**MDE** – Modelo Digital de Elevação

**MJ** – (Mega-Joule) – Unidade de energia e trabalho no Sistema Internacional.

**PB** – Paraíba.

**pH** – potencial do íon hidrogênio

**PROÁGUA** - Semi-Árido Programa de Desenvolvimento Sustentável dos recursos Hídricos do Semi-Árido Brasileiro.

**S** – South (Sul)

**SAIA** – Secretaria de Agricultura, Irrigação e Abastecimento do Estado da Paraíba.

**SCIENTEC** – Associação para o Desenvolvimento da Ciência e Tecnologia da UFPB.

**SEMARH** – Secretaria de Estado e do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Ciência e Tecnologia do Estado da Paraíba.

**SIBCS** – Sistema Brasileiro de Classificação de Solos

**SIG** – Sistema de Informação geográfica.

**SPRING** – Sistema de Processamento de Imagens Georreferenciadas.

**SRTM** – *Shuttle Radar Topography Mission*

**SUDEMA** – Superintendência de Administração do Meio Ambiente.

**TM** – Mapa Temático – sensores para composição de bandas das imagens:

(Red) R-4, (Green) G-3, (Blue) B-2;

**UFPB** – Universidade Federal da Paraíba.

**UTM** – Projeção Universal Transversa de Mercator

**W** - West (Oeste)

## LISTA DE FIGURAS E ILUSTRAÇÕES

	Página
1. Localização dos Cariris Velhos.....	28
2. Área de Estudo – Bacia Hidrográfica do Alto-Paraíba.....	30
3. Mapa Hipsométrico da Bacia Hidrográfica do Alto-Paraíba.....	32
4. Mapa de Solos da Bacia Hidrográfica do Alto-Paraíba.....	33
5. Foto de pavimento em solo Luvisolo crômico.....	37
6. Perfil de solo.....	40
7. Formação do solo e perfil geral.....	42
8. Perfis dos principais tipos de solos nos ecossistemas da Terra.....	46
9. Características das zonas de intemperismo.....	61
10. Escoamento da água na superfície do solo.....	74
11. Mapa Temático de Erosividade.....	102
12. Mapa Temático de Erodibilidade.....	103
13. Mapa Temático da Declividade.....	104
14. Mapa Temático do Fator Topográfico.....	105
15. Mapa Temático do Uso do Solo e respectivas coberturas.....	106
16. Mapa Temático do Fator C – Uso e Manejo do Solo.....	109
17. Mapa Temático da Tolerância de Perda de Solo para o Estado da Paraíba baseado nos estudos da UFPB/Areia.....	110
18. Mapa Temático das Perdas de Solo, baseado na EUPS.....	114
19. Mapa Temático comparativo entre as Perdas de Solo e a Tolerância de Perdas de Solo.....	116

## LISTA DE TABELAS

	Página
1. Solos representativos do Estado da Paraíba utilizados neste estudo.....	87
2. Determinação das classes de permeabilidade do solo em função da textura e grau de estrutura.....	89
3. Valores médios de profundidades efetivas dos perfis e de relação textural entre os horizontes subsuperficiais e superficiais.....	91
4. Valores médios de tolerância de perda de solos por erosão para as principais ordens de solos do Estado da Paraíba.....	92
5. Registro das médias mensais e anuais dos postos pluviométricos das sedes municipais que pertencem à bacia hidrográfica do Alto-Paraíba. Série histórica de 1994 a 2009.....	100
6. Valores comparativos do fator P.....	108

## LISTA DE QUADROS

	Página
1. Áreas ocupadas pelas diferentes classes de solos.....	36
2. Papel dos diversos agentes de erosão.....	69
3. Esquema geral da erosão – Formas, Agentes e Tipos.....	73

## SUMÁRIO

	Página
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	19
<b>2. JUSTIFICATIVA</b> .....	21
<b>3. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA</b> .....	24
<b>4. OBJETIVOS</b>	
4.1 Objetivos gerais .....	25
4.2 Objetivos específicos .....	25
<b>5. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO</b>	
5.1 O semi-árido nordestino. ....	25
5.2 Caracterização físico-ambiental da região de estudo .....	28
<b>6. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	
<b>6.1 SOLOS</b>	
6.1.1 Conceitos .....	38
6.1.2 Taxonomia de solos .....	40
6.1.2.1 Nomenclatura de horizontes e camadas de solos .....	40
6.1.2.2 Definição de símbolos e sufixos de horizontes e camada .....	42
6.1.3 Fatores de formação dos solos .....	44
6.1.3.1 Rocha .....	47
6.1.3.2 Clima .....	47
6.1.3.3 Relevo .....	49
6.1.3.4 Organismos .....	50
6.1.3.5 Tempo .....	51
6.1.4 Processos pedogenéticos .....	52
6.1.4.1 Formação do substrato pedogenético. Intemperismo e a origem dos sedimentos .....	53
6.1.4.2 Tipos de intemperismo .....	56
6.1.4.3 O Intemperismo e o Clima .....	60
<b>6.2. EROSÃO DE SOLOS</b>	
6.2.1 Generalidades .....	63
6.2.2 Conceituação .....	64
6.2.2.1 Erosão .....	64

6.2.2.2 Denudação .....	64
6.2.2.3 Corrasão .....	64
6.2.2.4 Corrosão .....	65
6.2.2.5 Dissolução .....	65
6.2.2.6 Infiltração .....	65
6.2.2.7 Escoamento .....	66
6.2.3 Formas, agentes e tipos de erosão .....	69
6.2.3.1 Formas de Erosão .....	70
6.2.3.1.1 Erosão acelerada, ou antrópica .....	70
6.2.3.1.2 Erosão geológica (ou geomorfológica) .....	72
6.2.3.2 Agentes Erosivos .....	72
6.2.3.3 Tipos de Erosão .....	76
6.2.3.3.1 Erosão eólica .....	76
6.2.3.3.2 Erosão fluvial .....	76
6.2.3.3.3 Erosão hídrica superficial .....	77
6.2.3.3.4 Erosão por remoção em massa .....	78
6.2.3.3.5 Erosão provocada por ação humana ou de animais .....	79
6.2.3.3.6 Erosão devido a eventos extremos .....	79
6.3. A EROSÃO DE SOLOS E OS PROBLEMAS SOCIAIS E AMBIENTAIS CAUSADOS .....	80
6.4. PERDA DE SOLO MÁXIMA ACEITÁVEL PARA O ESTADO DA PARAÍBA .....	85
<b>7. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS</b>	
7.1 Estudo de caso: A Aplicação da Equação Universal de Perda de Solos na Bacia Hidrográfica do Alto-Paraíba .....	95
7.2 Potencial Natural de Erosão (PNE) .....	96
7.3 Potencial antrópico de erosão .....	97
7.4 Obtenção do Potencial Natural de Erosão (PNE) .....	99
7.4.1 Fator erosividade (R) .....	99

**8. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

8.1 Mapa Temático de Erosividade - Fator R da EUPS .....	101
8.2 Mapa Temático de Erodibilidade - Fator K da EUPS .....	102
8.3 Mapa Temático da Declividade e Mapa Temático do Fator Topográfico .....	104
8.4 Mapa Temático do Uso do Solo .....	106
8.5 Mapa Temático do Fator C de uso e manejo do Solo.....	109
8.6 Mapa Temático de Tolerância de Perdas de Solo .....	110
8.7 Mapa Temático de Perdas de Solo .....	114
8.8 Mapa Temático comparativo entre Perdas de Solo x Tolerância de Perdas de Solo .....	116
<b>9. CONCLUSÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>118</b>
<b>10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>122</b>

## 1. INTRODUÇÃO

No desenvolvimento de uma região faz-se necessário acompanhar e apontar aspectos que possam introduzir falhas no planejamento e gestão dos recursos oferecidos por ela. A racionalização da exploração dos bens disponíveis e o direcionamento da ocupação do solo devem ser feitos em função da sua capacidade de exploração como tentativas de se preservar a qualidade do ambiente (SILVA, SCHULZ & CAMARGO, 2004). Entre outros, os problemas decorrentes do mau uso e ocupação do solo constituem-se em alterações no ciclo hidrológico e na cobertura do solo pelos desmatamentos, diminuição da porcentagem de água infiltrada e aumento do escoamento superficial e conseqüentemente na produção de sedimentos, empobrecimento do solo (queda de sua fertilidade), contaminação dos cursos d'água e da cadeia alimentar e perdas por erosão.

Dentre as modalidades de erosão, a laminar define-se pela combinação da ação da energia da gota d'água da chuva com o movimento da água no declive. O processo é tal que finas camadas de solo são removidas da superfície do solo, uma após a outra, e a erosão não é claramente evidenciada por simples inspeção visual (SOARES, 2002), podendo ser detectada pela coloração mais clara do solo, pela exposição das raízes e pela queda da produtividade agrícola (BERTONI & LOMBARDI NETO, 1990). Devido a isso, a quantificação do material erodido torna-se uma ferramenta de medida não só indicativa como preditiva, uma vez que descreve a situação atual e futura das terras.

Para modelagem de quantificação de perda de solo, muitas equações têm sido empregadas, dentre elas a EUPS (Equação Universal de Perda de Solo), a qual permite uma análise da perda de solo levando-se em conta a intensidade da chuva, a erodibilidade dos solos, o comprimento e a declividade da encosta, e o tipo de uso e práticas conservacionistas.

A erosão, entendida como um processo de degradação do solo devido a atuação dos fatores naturais e antrópicos têm, cada vez mais, merecido a atenção dos pesquisadores, tanto no que diz respeito à manutenção da produtividade agrícola como no que se refere à preservação de uma forma geral.

As atividades humanas constituem o principal agente deflagrador dos processos erosivos, quando a erosão normal, causada pelos fatores naturais dá lugar á erosão acelerada, resultado da interferência antrópica.

A erosão hídrica laminar, definida como a remoção mais ou menos uniforme de uma camada superficial de solo, é a forma de erosão menos perceptível e por isso mesmo perigosa, pois quando é notada, a perda de solos já foi significativa, por erosão em sulcos.

Para estudar este tipo de fenômeno dispõe-se de métodos diretos, baseados na coleta do material erodido, em campos experimentais e/ou em laboratório, ou ainda de métodos indiretos, por meio de modelagem matemática. Estes modelos podem ser associados às técnicas de geoprocessamento, que permitem análises espaciais do fenômeno, visando o planejamento racional do uso e ocupação do solo e na exposição das áreas que necessitam de adoção de práticas de controle da erosão.

Dentre esses modelos, a Equação Universal de Perda de Solos (EUPS), proposta por Wischmeier e Smith (1978) quando espacializada por meio de um Sistema de Informação geográficas (SIG) permite uma análise da perda de solo por erosão laminar, possibilitando contextualizar os resultados obtidos em função do uso e ocupação das terras.

A área estudada nesse trabalho foi a Bacia do Alto-Paraíba, a maior das três sub-bacias do Rio Paraíba, localizada no centro-sul do estado da Paraíba, num eixo que se distancia de 180 a pouco mais de 300 km de João Pessoa, capital do Estado.

Apresentamos, nesta dissertação, a partir da quinta parte, a área de estudo, caracterizando-a física e ambientalmente. Posteriormente, conceituamos o solo, sua taxonomia, seus fatores de formação e os processos pedogenéticos que o compõem. Em seguida, abordamos sobre os tipos de intemperismo, um texto sobre a erosão de solos, os agentes erosivos, bem como os tipos e formas de erosão. Quanto aos aspectos sociais e ambientais, causados pela erosão de solos, estes são abordados em seguida. Na nona parte desta dissertação, mostramos a pesquisa desenvolvida na UFPB / Campus Areia, sobre a Tolerância de Perda Máxima Aceitável de Solos para o Estado da Paraíba, e, finalizando, apresentamos a Metodologia aplicada e o Estudo de Caso com os respectivos Mapas Temáticos e Resultados, Discussão, Considerações Finais e Recomendações.

## 2. JUSTIFICATIVA

O estudo da erosão como objeto de ciência, tem levado muito mais a sua descrição e explicação como processo físico do que à sua compreensão como problema sociocultural. Seria ingenuidade aquele que acreditasse a todos poder convencer a buscar um efetivo combate à erosão, sob pretexto de que logrou poder bem descrever os processos erosivos.

Sem dúvida é importante reconhecer e descrever a erosão como um processo físico, cuja dinâmica mesma independe da sua relevância socioeconômica ou ambiental. Mas é fundamental que também passemos a compreender a erosão como um complexo problema implicado no processo físico compreendido. Para tanto, necessitaremos tratar a erosão em um sistema de relações que a invistam de adequada significação em nosso contexto sociocultural (D'AGOSTINI, 1999).

A passagem da percepção da erosão como um processo físico degradador do meio ambiente para a percepção da erosão como um problema – uma ameaça à sustentabilidade das relações “homem x meio” – é, certamente, uma passagem do mundo do complicado para o mundo do complexo. A abordagem ainda dominante é a da descoberta e da dissecação do efeito de cada fator e subfator que promove ou afeta o processo erosivo. Uma vez conhecidos os efeitos de cada um dos inúmeros subfatores nas inúmeras condições possíveis, consideradas ainda as interações entre fatores e subfatores nas combinações imagináveis, saber-se-ia não apenas como controlar o processo erosivo, mas também predizer o seu resultado. Faltaria, ainda, no entanto, compreender porque se controla tão insatisfatoriamente a erosão, quando técnicas elementares e reconhecidamente eficientes estão disponíveis e poderiam ser adotadas (GARDNER, 1991).

A complexidade da questão sugere que os melhores esforços deveriam ser direcionados para o equacionamento do problema erosão, muito mais do que para a modelagem do processo e predição dos seus resultados. Em outras palavras, muito mais do que modelar o processo erosivo, deveríamos modelar o problema erosão implicado no processo. O problema, no entanto, não pode ter sua significação reduzida àquela possível de ser tratada através de um sistema de relações compreensíveis unicamente a partir de princípios físicos. O problema associado à erosão é, antes de tudo, de natureza comportamental, de prioridades, de valores e critérios, de atitudes objetivas de um ser essencialmente subjetivo. Não se pode pretender encaminhar o equacionamento de uma questão complexa, impregnada de

subjetividades, com a simplicidade de objetivas mensurações complicadas. Tanto ou mais do que medir efeitos de técnicas de manejo e comportamento do meio, necessitamos “medir” o quanto nossas ações são coerentes com o discurso contemporâneo do conservacionismo.

A significação da erosão como objeto de ciência faz parte do contexto cultural a partir do qual, geração após geração, o homem procura encontrar uma coerência intelectual para suas ações sobre o meio em que vive.

Erwin Schroedinger, citado em Prigogine & Stengers (1991), já asseverava que todas as proposições ou descobertas científicas são despidas de significação fora do contexto cultural em que são formuladas ou percebidas. Portanto, não pretendemos caracterizar este trabalho pela quantidade de informações pesquisadas e disponíveis para a descrição de um processo – a erosão – mas, e acima de tudo, pela natureza, forma e significação da questão que se recoloca a partir de um conhecimento já existente.

Desde a primeira crise do determinismo surgida ainda no início do Século XIX, pela dificuldade em compatibilizar o significado da organização da matéria e da evolução da vida com a interpretação clássica do conceito de entropia <sup>[1]</sup>, o cenário da rica diversidade dos sistemas complexos nos revela uma natureza insubmissa às crenças e às ambições voltadas à sua completa decifração (STEWART, 1991; PRIGOGINE, 1996). Desde então, e especialmente nas últimas décadas, um novo paradigma, que se contrapõe ao determinismo reducionista, surge e se afirma como a mais promissora oportunidade de uma coerência intelectual em nossos diálogos com a natureza. Assim como no paradigma em construção, que a partir de teorias ou concepções como das Estruturas dissipativas e da Auto-organização torna o mundo das ciências consciente da complexidade do Universo, já não basta tratar a complexidade do problema erosão, com modelos nos quais o ser humano é apenas um espectador privilegiado no processo.

[1] Na ciência clássica, o aumento da entropia está associado a uma inexorável evolução rumo à desordem. O enunciado do Segundo Princípio da Termodinâmica, como formulado por seu criador Rudolf Clausius, diz que “a entropia do universo cresce na direção de um máximo”. Significa que, em um sistema isolado, aqueles que não trocam matéria nem energia com o meio externo, a entropia cresce ao longo do tempo, até seu valor máximo correspondente ao equilíbrio termodinâmico\*. A associação do aumento da entropia a uma sempre crescente desordem na natureza representou, assim, uma dificuldade em compreender o significado físico da organização da matéria e de sua

evolução rumo à complexidade, como então já apontava o trabalho de Darwin. Hoje, a organização da matéria em estruturas complexas, como a de seres vivos, tem significado físico perfeitamente compatível com o conceito de entropia e com o Segundo Princípio da Termodinâmica (Prigogine, 1989)

\* Um sistema se encontra em equilíbrio termodinâmico quando todas as suas variáveis termodinâmicas não se alteram com o tempo, em outras palavras, em qualquer ponto do sistema, verificar-se-á a mesma temperatura (equilíbrio térmico), a mesma pressão (equilíbrio mecânico) e a mesma concentração de seus componentes (equilíbrio químico).

### 3. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O processo erosivo constitui-se na principal causa de degradação dos solos, trazendo como consequência, prejuízos ao setor agrícola e ao meio ambiente, com reflexos econômicos e sociais. Dentre os prejuízos causados pela erosão, provavelmente o mais maléfico seja a própria perda de solos, uma vez que a natureza leva cerca de 100 anos para formar uma camada de 1 cm de espessura de solo (BENNETT, 1955), a qual, muitas vezes, poderá ser carregada em uma única precipitação.

Com o crescente incremento da população, aumenta a necessidade de intensificação do uso da terra, gerando, desta forma, maior necessidade de avaliar a sua susceptibilidade aos processos erosivos, para que possa ser feito um planejamento de uso e ocupação da terra da forma mais adequada possível, buscando a redução de ocorrências de processos erosivos. No entanto, para a realização de um programa conservacionista, torna-se de fundamental importância a busca do entendimento dos processos físicos associados à erosão hídrica.

Considerando os problemas de escassez hídrica da região Nordeste do país, em especial no Estado da Paraíba, com predominância de clima semi-árido, observa-se o fato de que esta região apresenta-se como sendo vasta e pobre, sendo que sua área e população são maiores do que a de muitos países. Essas áreas semi-áridas, por conseguinte, apresentam-se assim já muito devastadas, em que a alarmante situação social em que vive parte da população aliadas a ocorrência de secas e a existência de extensas áreas de solos de baixa qualidade, contribuem, por exemplo, para a vulnerabilidade da sustentabilidade dos recursos naturais. Dessa forma, hoje o Nordeste apresenta-se como uma das áreas mais degradadas do Brasil, com grandes áreas denudadas, e que isto é suficientemente alarmante para a vida do homem e para a civilização atual e futura, da região.

Desta forma, este trabalho visa avaliar o potencial de erosão da sub-bacia do Alto-Paraíba, comparando os volumes de perda de solo calculados mediante a aplicação da Equação Universal de Perda de Solo, com a utilização de Sistemas de Informações Geográficas, imagens de satélites e elaboração de mapas temáticos, e comparar esses volumes, com valores já dimensionados como tolerância máxima de perda de solos por erosão, para o estado da Paraíba, calculados pela Universidade Federal da Paraíba, Campus Areia/PB.

## **4. OBJETIVOS**

### **4.1 Objetivo geral**

O presente trabalho visa utilizar o geoprocessamento para estimar a perda de solos, por erosão laminar, na sub-bacia hidrográfica do Alto-Paraíba, utilizando o Sistema de Processamento de Imagens Georreferenciadas – SPRING.

### **4.2 Objetivos específicos**

- Gerar os dados para a Equação Universal de Perda de Solo.
- Determinar as perdas de solo por erosão laminar, mediante a aplicação da Equação Universal de Perda de Solo na sub-bacia do Alto-Paraíba e
- Estimar as perdas por erosão hídrica dos solos da bacia hidrográfica do Alto-Paraíba e compará-las com seus limites de tolerância e de perdas, visando determinar os níveis de vulnerabilidade das terras à erosão.
- Analisar os impactos das perdas de solo com os problemas sociais e ambientais causados.

## **5. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO**

### **5.1 O semi-árido nordestino.**

O Nordeste detém, como uma das suas peculiaridades, o terceiro lugar em superfície em relação às bacias hidrográficas do Brasil (CARNEIRO, 1998), entretanto, para este autor, mesmo ocupando esse lugar, a bacia nordestina é pouco significativa em termos de reservas hídricas, em face dos condicionantes do próprio meio, ou seja, geologia, clima, vegetação e solo, os quais exercem, por exemplo, influência considerável no regime dos rios. Assim, tem-se que o potencial médio da água doce nos rios do Nordeste é de 186,20 km<sup>3</sup>/ano, representando apenas 3% do total nacional e é, relativamente, o mais baixo no Brasil (REBOUÇAS, 1997a).

Aliado aos problemas de escassez hídrica cresce-se o fato de que o semi-árido nordestino apresenta-se como sendo uma região muito vasta e pobre, sendo que sua área e população são maiores do que a de muitos países (AB'SÁBER, 1985; MENDES, 1997). Essas áreas semi-áridas, por conseguinte, apresentam-se assim já muito devastadas, em que a alarmante miséria em que vive parte da população, a ocorrência de secas e a existência e extensas áreas de solos de baixa qualidade contribuem, por exemplo, para a vulnerabilidade da sustentabilidade dos recursos

naturais. Dessa forma, hoje o Nordeste apresenta-se como uma das áreas mais degradadas do Brasil (MENDES, *op.cit.*). Essa mesma percepção pode ser observada no trabalho de Duque (1980) no momento em que expõe que o sertão está se tornando mais denudado, mais lavado, mais desértico e que isto, é suficientemente alarmante para a vida do homem e para a civilização atual e futura, da região.

Na busca de um novo modelo para se atingir a sustentabilidade dos elementos que se apresentam, em particular, nas bacias hidrográficas do semi-árido nordestino, tem-se o processo de gestão que para ser efetivo deve ser pautado na participação dos grupos humanos. Nessa perspectiva, um dos exemplos de programas que está sendo colocado em prática para a promoção da gestão, em particular, dos recursos hídricos na Região Nordeste é o Programa de Desenvolvimento Sustentável dos recursos Hídricos do Semi-Árido Brasileiro – PROÁGUA Semi-Árido. O programa foi concebido a partir do apoio que o Banco Mundial concedeu após solicitação do Governo Federal, tendo, no ano de 1997, concluído as atividades tidas como de estruturação do programa, bem como a sua viabilização junto aos organismos financeiros (KETTELHUT, *et.al.*, 1999). Azevedo & Baltar (2000) refletem que esse é um projeto arrojado, que apóia o processo de estruturação dos sistemas de recursos hídricos nos estados do Nordeste e em Minas Gerais e da implementação de infra-estrutura hídrica prioritária. A alocação de recursos deste programa é realizada de maneira competitiva e os estados com melhor desempenho têm a oportunidade de obter um maior montante de investimentos. O projeto oferece também apoio institucional da Secretaria de Recursos Hídricos do Ministério do Meio Ambiente, assim, como ao desenvolvimento de estudos, planos de bacias, projetos de engenharia e apoio à formação e fortalecimento de associações de usuários e comitês em bacias federais prioritárias.

No aspecto geral, todos os estados nordestinos organizaram ou estão organizando suas legislações e seus Sistemas de Gestão de Recursos Hídricos. Entretanto, apesar da bacia hidrográfica ser o alvo de práticas mais freqüentes da gestão hídrica, espera-se que futuramente este espaço seja também considerado ideal como unidade de planejamento para ações de gestão participativa e integrada dos outros recursos presentes nas bacias nordestinas. A efetivação desses pensamentos tem a sua urgência em locais como o Estado da Paraíba que é

caracterizado por apresentar a zona semi-árida como sendo a mais extensa em área, com 43.555 km<sup>2</sup> (77,30% do total do Estado) (PARAÍBA, 1997a). Esta zona semi-árida absorve ainda o maior número absoluto de habitantes. Esse indicador reflete as dificuldades enfrentadas pela população que vive naquela zona, dada a escassez relativa de recursos naturais que a caracteriza. Por isso, a sua população encontra-se sujeita as condições de insustentabilidade, tanto econômica quanto social, bem mais difíceis de controlar do que as encontradas nas Zonas Litoral, Mata e Agreste-brejo. Comparando com as outras áreas semi-áridas do Nordeste, a da Paraíba é uma das mais afetadas pela degradação ambiental. Conseqüentemente, das três zonas geoeconômicas do Estado, a Semi-Árida enfrenta forte pressão sobre os recursos disponíveis, em especial os hídricos (PARAÍBA, *op.cit.*).

A Paraíba, assim como o Nordeste e as demais regiões brasileiras, vem também utilizando a bacia hidrográfica como o ambiente a ser exercido, com mais ênfase, a gestão dos recursos hídricos. Neste aspecto, as atividades práticas de gestão de bacias hidrográficas vêm sendo desenvolvidas à luz da Lei 6.308, de 02/07/1996, que instituiu a Política Estadual de Recursos Hídricos. O Decreto nº. 18.378, de 31/07/1996, regulamentou o Sistema Integrado do Planejamento e Gerenciamento de Recursos Hídricos.

Para a execução dos trabalhos de gestão dos recursos hídricos, o território estadual foi dividido em quatro regiões denominadas Áreas de Atuação de gerências de Bacias (PARAÍBA, 2000a). Assim, estas áreas são:

Área I – tem como sede João Pessoa (SEMARH) e abrange as bacias: Popocas/Abiaí, Gramame, Baixo-Paraíba, Miriri, Mamanguape, Camaratuba, Guajú, Curimataú e Jacu;

Área II – possui sua sede em Campina Grande (LMRS) e absorve as seguintes bacias: Alto-Paraíba, Taperoá, Médio-Paraíba e Seridó (Setor Leste);

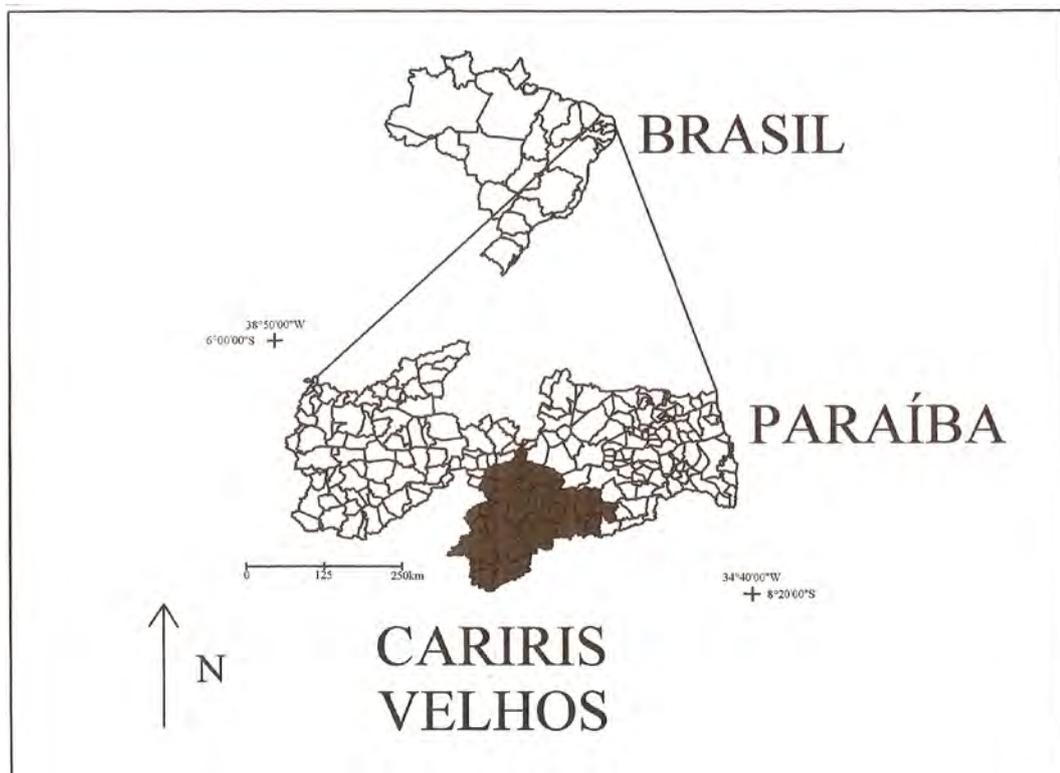
Área III – com sede em Itaporanga (Núcleo Administrativo da SAIA), sendo as seguintes bacias administradas por este núcleo: Piancó, Espinharas e Seridó (Setor Oeste);

Área IV – com sede em Sousa (Núcleo Administrativo do DNOCS), abrangendo as bacias: do Peixe, Alto-Piranhas e Médio-Piranhas.

A instalação destas unidades teve como objetivo tornar mais efetiva a presença da SEMARH nas bacias, facilitar o entendimento com os usuários de água e agilizar a tramitação de processos, entre outras vantagens (PARAÍBA, *op.cit.*).

## 5.2 Caracterizações físico-ambiental da região de estudo

A bacia do Alto-Paraíba (também denominada região do Cariri) encontra-se localizado no centro-sul do estado da Paraíba, num eixo que se distancia de 180 a pouco mais de 300 km de João Pessoa (capital), perfazendo um vasto território com área de 11.192,01 km<sup>2</sup>, o que equivale a pouco mais de 20% do estado em questão (Figura 1).



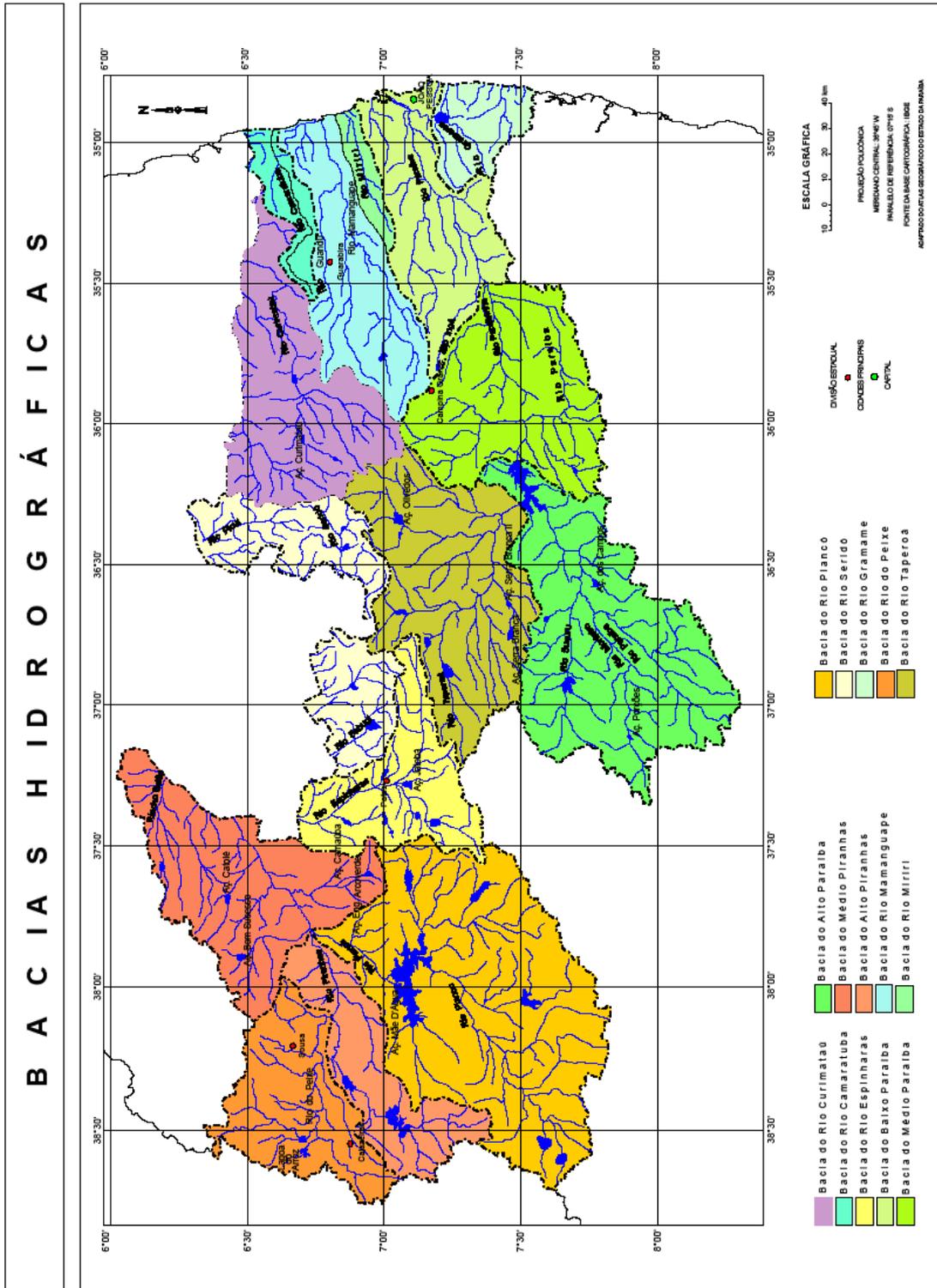
**Figura 1** – Localização dos Cariris Velhos (onde se insere a BH do Alto-Paraíba) na Paraíba e no Brasil.

Os elementos comuns do conjunto de paisagens existentes nos Cariris Velhos são os baixos índices pluviométricos, as temperaturas médias elevadas (cerca de 27°C), os déficits hídricos acentuados, a caatinga hiperxerófila, as limitações edáficas (solos rasos e, em muitos casos, com pedregosidade e riscos de salinidade), cidades pequenas e baixa densidade demográfica.

Em termos administrativos, a sub-bacia do Alto-Paraíba é composta por 29 municípios, dos quais 12 fazem parte do Cariri Oriental (ou de Cabaceiras) e 17 estão inseridos no Cariri Ocidental (ou de Monteiro), conforme pode ser observada na figura 2.

Os municípios que compõem o lado oriental são: Alcantil, Barra de Santana, Caturité, Boqueirão, Riacho de Santo André, São Domingos do Cariri, São João do Cariri, Santo André, Boa vista, Campina Grande, Gado Bravo, Juazeirinho, Queimadas, Santa Cecília, e Soledade.

Os municípios componentes o lado ocidental são: Camalaú, Congo, Coxixola, Ampara, Livramento, Monteiro, Parari, Prata, Ouro Velho, São João do Tigre, São José dos Cordeiros, Sumé, Taperoá, Serra Branca, Zabelê, Assunção, Salgadinho, Passagem, Areias de Baraúnas, Cacimbas e Desterro.



**Figura 2** – Área de estudo – Bacia Hidrográfica do Alto-Paraíba. (Fonte: SUDEMA)

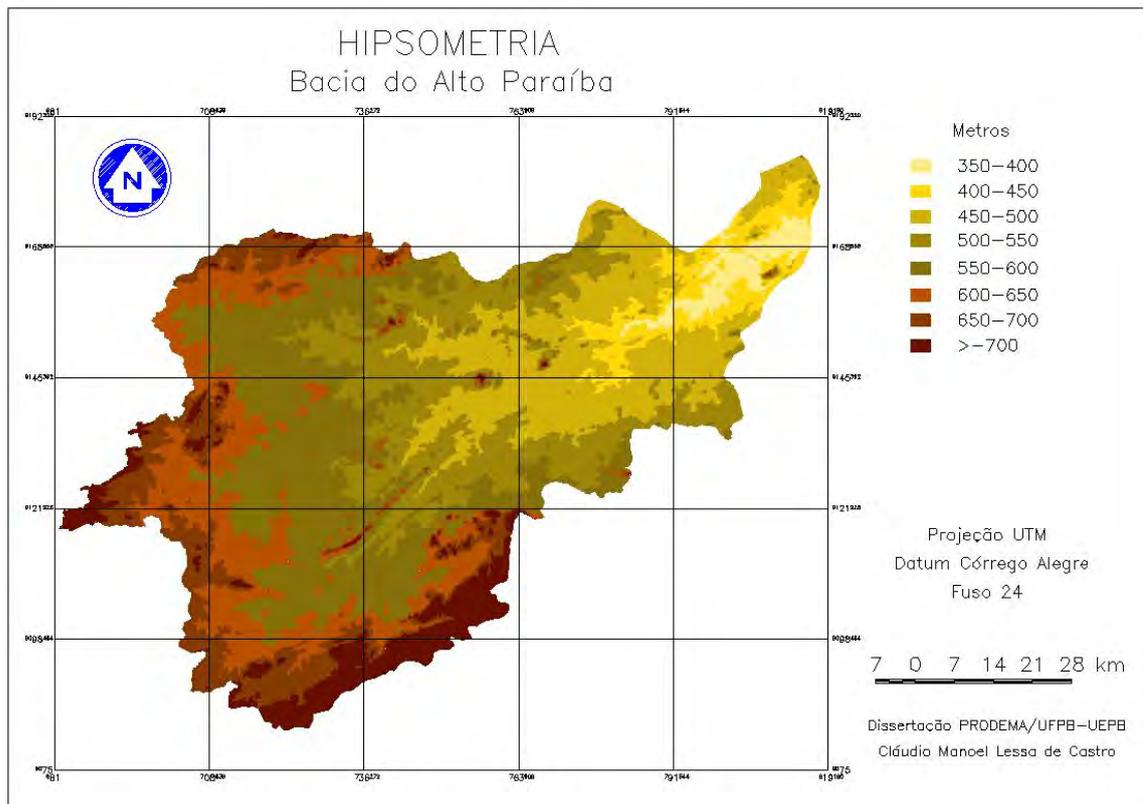
A subdivisão anteriormente mencionada está baseada nas diferenças intra-regionais no que diz respeito a determinadas especificidades físicas e econômicas que caracterizam essas terras. Nesse caso, de forma geral, o lado Oriental apresenta médias pluviométricas mais baixas (400 a 500 mm/ano), relevo com topografia suave ondulada a ondulada e uma economia predominantemente pastoril, onde se destaca a criação de caprinos. Já o lado Ocidental registra médias pluviométricas um pouco maiores (500 a 600 mm/ano), relevo com declividade mais acentuada e uma economia mais dinâmica, tanto na pecuária como na agricultura.

Do ponto de vista geomorfológico, os processos erosivos que atuaram na Bacia do Alto-Paraíba, determinando as suas formas de relevo, estão inseridos na elaboração de extensas superfícies aplainadas presentes na área central do Planalto da Borborema, decorrentes de fases climáticas ora mais xéricas ora menos xéricas, resultando na criação de amplos pediplanos. Atualmente essas superfícies estão submetidas a um princípio de dissecação predominante em interflúvios tabulares, com ocorrência ocasional de alinhamentos de cristas, inselbergs e amontoados de caos de blocos (BRASIL, 1981).

Tomado em seu conjunto, o Planalto da Borborema nessa região caracteriza-se pelo predomínio de um relevo semi-colinoso. Entretanto, em sua porção sudeste, este planalto encontra-se muito dissecado pelos formadores da bacia hidrográfica do rio Paraíba (Carvalho, 1982), formando uma depressão intermontana (250 m), num vale estreito e encaixado, margeando as linhas de serras no limite com Pernambuco, podendo estas chegar a 1.180 m, embora a altitude média da região esteja situada na faixa dos 450-500 m (figura 3).

Quanto ao aspecto climático, este é o elemento natural que mais chama atenção no Alto-Paraíba, destacando-se, particularmente, a pequena quantidade de chuvas que ocorre na região, o que acaba influenciando fortemente o processo de degradação do solo que vem se estabelecendo em seu território (AB'SÁBER, 1985).

A localização dessa região exerce papel fundamental na compreensão dos baixos índices pluviométricos aí dominantes. O Alto-Paraíba está situado no fim do percurso dos fluxos úmidos que se direcionam para o semi-árido nordestino e em situação de sotavento, fazendo parte da área mais seca do Brasil, com médias pluviométricas de cerca de 500 mm/ano (Nimer, 1979).



**Figura 3** – Hipsometria da Bacia Hidrográfica do Alto-Paraíba.

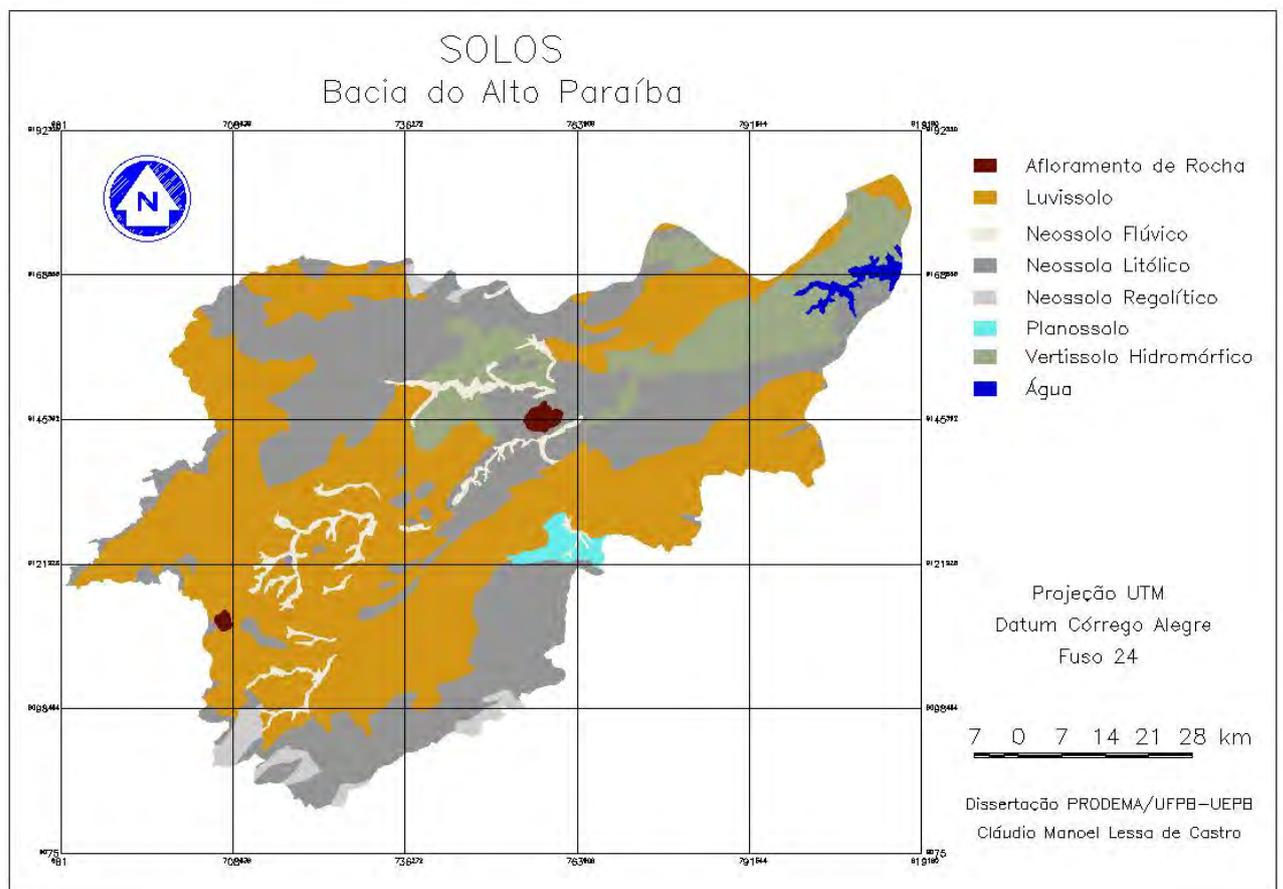
Apesar dessa média, a complexidade relativa à quantidade e distribuição das chuvas nessa região é muito elevada, tanto em nível temporal como espacial. No primeiro caso, embora a maior parte das chuvas se concentre entre os meses de fevereiro a maio, mesmo nesse período a sua distribuição está longe de ser homogênea, sendo comum, por exemplo, que a pluviosidade esperada para 01 mês possa ocorrer em poucos dias ou mesmo horas, enquanto a próxima chuva só venha ocorrer muitas semanas à frente. No segundo caso, relativo à distribuição espacial das chuvas, também é comum que essa repartição se caracterize pela elevada heterogeneidade, ocorrendo que, no mesmo município, enquanto alguns setores podem receber uma descarga pluvial esperada ou mesmo acima da média estimada, em outras áreas o total recebido pode ficar muito aquém desse valor. Portanto, as médias pluviométricas são abstrações muito distantes do que realmente acontece nessas terras.

Entretanto, entende-se que a dominância, por si só, dessas características climáticas, embora desempenhem papel importante para o estabelecimento da

degradação nessa região, não a determinam, mas as formas seculares com que essas terras foram e são ocupadas, estas sim são desencadeadoras do processo.

Quanto a Bacia Hidrográfica do Alto-Paraíba, a variedade pedológica é bastante diversificada, não apenas nas classes de solos existentes, mas também nas diversas associações em que estes ocorrem, conforme atestam os documentos BRASIL (1972) e PARAÍBA (1997). De forma geral, os solos encontrados nessa região são originários de rochas cristalinas, predominantemente rasos, argilosos, pouco lixiviados, com domínio de erosão laminar e fertilidade variada, embora, nesse último aspecto, existam as condições mais favoráveis ao desenvolvimento da agricultura.

A disponibilidade em meio digital de um mapeamento de solos para todo o território paraibano (PARAÍBA, 1997), permitiu fazer uma adaptação da escala original (1:250.000) para a que foi adotada nesse trabalho (1:100.000), através do software SPRING, o que pode ser visualizado na figura 4.



**Figura 4** - Classes de solos presentes no Alto Paraíba/PB.

Baseando-se em BRASIL (1972), Sá *et al.* (1994), Palmieri & Larach (1996), PARAÍBA (1997) e EMBRAPA (2006), descreve-se algumas características das classes de solos encontradas nessa região, consideradas mais importantes para se entender a relação entre esses elementos da paisagem e a degradação:

- 1) Luvissole Hipocrômico (TP): ocorrem nas superfícies onduladas a forte onduladas, com perfis relativamente profundos (150 a 250 cm), pH ácido, sendo moderadamente a bem drenados. Apresentam, originalmente, cobertura vegetal densa e diversificada.
- 2) Luvissole Crômico (TC): ocorrem em relevo suave ondulado e raramente ondulado, sendo pouco profundos ou rasos, com pH de baixa acidez e, em alguns casos, básico. Na superfície é comum a ocorrência de cascalhos e calhaus de quartzo (Pavimento Desértico). Tal como no tipo de solo anterior, a vegetação original é composta por um tipo de mata seca de alto porte.
- 3) Planossolo Nátrico (SN): possuem as mesmas características que a classificação anterior, embora apresente maior enriquecimento em sódio, o que torna as caatingas existentes ainda mais empobrecidas.
- 4) Vertissolo Hidromórfico (VG): ocorrem nas áreas de relevo suave ondulado a ondulado, em depressões com problemas de drenagem e elevada presença de argilas de alta atividade química (montmoriloníticas), o que confere a esses solos notável capacidade de dilatação, quando molhados, e contração, quando secos. Nesse processo, nas fendas abertas durante a estação seca, caem materiais da parte superficial que atingem as partes profundas do perfil, enquanto durante a estação chuvosa, devido à expansão das argilas, materiais das partes baixas do perfil são pressionados e podem ser expelidos, existindo assim um auto-revolvimento nesses solos, o que lhes confere elevada fragilidade à erosão. Dessa forma, apesar de, em princípio, apresentarem cobertura vegetal relativamente densa e variada, em caso de desmatamento, ocorrem dificuldades para a sua recolonização por parte de diversas plantas, uma vez que as suas sementes, junto com algumas partículas desse tipo de solo, são arrastadas horizontalmente nesse processo sazonal de expansão/retração. Além dessa característica, em virtude da maior deficiência de drenagem presente em algumas áreas, podem,

ocasionalmente, ocorrer problemas em relação ao desenvolvimento das plantas devido ao acúmulo de sais.

- 5) Neossolo Flúvico (RU): ocorrem nas áreas de relevo plano ou com ondulações muito suaves, correspondentes as faixas estreitas ao longo dos cursos d'água, provenientes de deposições fluviais. Apresentam fertilidade natural alta, sendo pouco profundos ou profundos, moderadamente ácidos e alcalinos nas camadas inferiores, sem problemas de erosão, com drenagem moderada ou imperfeita. Originalmente eram ocupados por matas ciliares, com elevada presença de espécies de porte arbóreo, entretanto, onde a drenagem mostra-se deficiente, também podem apresentar problemas devido ao acúmulo de sais, o que desfavorece a diversidade, a densidade e o porte das plantas que colonizam esses tipos de solo.
- 6) Neossolo Regolítico (RR): ocorrem em áreas de relevo plano, suave ondulado e ondulado, sendo pouco desenvolvidos, muito arenosos, profundos e fortemente drenados. Apresentam cobertura vegetal densa e diversificada.
- 7) Neossolo Litólico (RL): ocorrem em áreas de relevo suave ondulado a montanhoso, sendo pouco desenvolvido, muito raso ou raso, moderadamente ácido, com drenagem moderada a acentuada. Apresentam rica cobertura vegetal quando isentos de uso.

O uso do software Spring 4.3 (INPE), também permitiu que fosse efetuada a quantificação dessas classes de solos na Bacia Hidrográfica do Alto - Paraíba, organizadas no Quadro 1, de acordo com a sua maior abrangência espacial na região.

**Quadro 1** - Áreas ocupadas pelas diferentes classes de solos, afloramento de rochas e água, no Alto-Paraíba.

<b>CLASSES DE SOLOS</b>	<b>ÁREA OCUPADA NO ALTO - PARAIBA (km<sup>2</sup> / %)</b>
Luvissole Crômico (TC)	2.770,00 / 41,20
Neossolo Litólico ((RL)	2.450,00 / 36,44
Vertissolo Hidromórfico (VG)	760,00 / 11,31
Neossolo Flúvico (RU)	240,00 / 3,56
Neossolo Regolítico (RR)	148,00 / 2,20
Luvissole Hipocrômico (TP)	125,00 / 1,86
Planossolo Nátrico (SN)	95,00 / 1,42
Afloramento de rocha (AR)	55,00 / 0,008
Água	80,00 / 1,12
Área total	6.723,00 / 100,00%

Pelo exposto nessa última tabela, os solos das classes Luvissole Crômico (Figura 5) e Neossolo Litólico ocupam juntos 5.220,00 km<sup>2</sup> de toda a região, o que equivale a 77,64% da área de estudo. A localização desses tipos de solos, em termos topográficos, é muito variável, embora estejam mais presentes nas áreas de declive suave a moderado. O relevo pouco declivoso sobre o qual, em grande parte, estão assentados, às vezes com presença próxima de algum recurso hídrico, suas grandes extensões territoriais e fertilidades naturais fizeram, historicamente, com que estes solos apresentassem elevada concentração populacional e uso antigo, o que os torna mais passíveis ao processo de degradação existente na região.

Acrescenta-se que a presença de áreas degradadas nos solos acima destacados, além da pequena expressão territorial ocupada por eles, está relacionada ao fato da agricultura irrigada, uso desencadeador da acentuação da salinização e gerador da degradação nessas classes de solos, serem uma característica pouco presente no Alto-Paraíba.



Figura 5 - Pavimento em solo Luvissole Crômico. Município de São João do Cariri.

Foto: Bartolomeu Israel de Souza. Maio/2007.

## 6. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 6.1 Solos

#### 6.1.1 Conceitos

O solo, dependendo dos objetivos e enfoques científicos, tem sido interpretado de maneira diversa: produto do intemperismo físico, químico das rochas (Geologia); material escavável, que perde a sua resistência quando em contato com a água (Engenharia Civil); camada superficial de terra arável, possuidora de vida microbiana (Agricultura) (Agronomia).

Com o advento da Pedologia e da Edafologia, ciência que estuda o solo – fundamentado inicialmente na Rússia por Dokuchaiev, em 1880 – o solo passou a ser entendido como uma camada viva que recobre a superfície da Terra, em evolução permanente, por meio da alteração das rochas e de processos pedogenéticos, comandados por agentes físicos, químicos e biológicos.

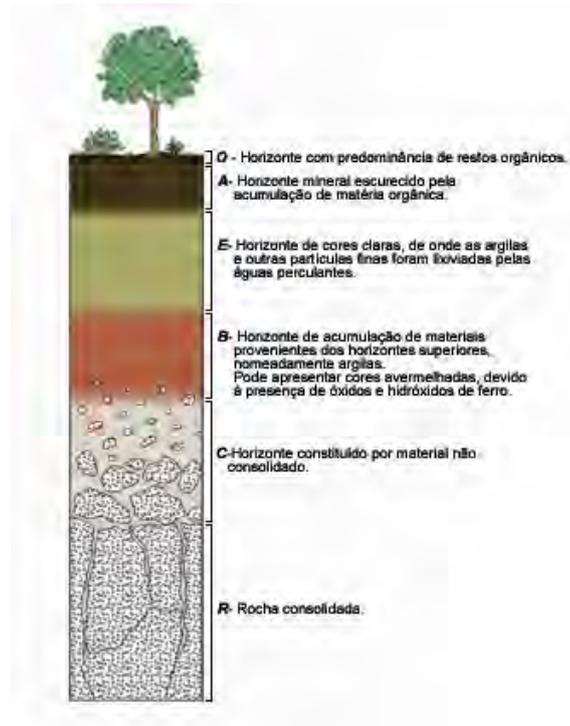
Dentre as diversas definições de solo, a que melhor se adapta ao levantamento pedológico é a do *Soil Taxonomy* (1975) e do *Soil Survey Manual* (1984):

*“Solo é a coletividade de indivíduos naturais, na superfície da terra, eventualmente modificado ou mesmo construídos pelo homem, contendo matéria orgânica viva e servindo ou sendo capaz de servir à sustentação de plantas ao ar livre. Em sua parte superior, limita-se com o ar atmosférico ou águas rasas. Lateralmente, limita-se gradualmente com rocha consolidada ou parcialmente desintegrada, água profunda ou gelo. O limite inferior é talvez o mais difícil de definir. Mas, o que é reconhecido como solo deve excluir o material que mostre pouco efeito das interações de clima, organismos, material originário e relevo, através do tempo”.*

Para Moniz (1972), o solo é definido como a coleção de corpos naturais ocorrendo na superfície da Terra, contendo matéria viva e suportando ou sendo capaz de suportar plantas. É, enfim, a camada superficial da crosta terrestre em que se sustentam e se nutrem as plantas. Essa tênue camada é composta por minerais provenientes das rochas em diferentes estágios de desagregação, água e substâncias químicas em dissolução, ar, organismos vivos e matéria orgânica em distintas fases de decomposição.

Uma definição completa e atualizada de solo foi apresentada por Birkeland (1974): “*material natural consistindo de camadas ou horizontes de compostos minerais e/ou orgânicos com variadas espessuras, diferindo do material original por propriedade morfológica, física, química e mineralógica, e por características biológicas. Os horizontes do solo são inconsolidados, mas alguns contêm suficientes porções de sílica, carbonatos ou óxidos de ferro para cimentá-los*”.

Segundo Salomão e Antunes (1998), a diferenciação vertical entre os horizontes, que definem o perfil do solo (Figura 6), tem sido utilizada como principal critério de classificação e mapeamento do solo. Esta diferenciação também se verifica lateralmente, ao longo das vertentes, sendo fundamental considerá-la nos estudos das relações genéticas entre o solo e os demais elementos que constituem o meio natural: o substrato geológico, o relevo, a vegetação, o comportamento hídrico e, conseqüentemente, interpretar os processos da dinâmica superficial (erosão, escorregamento, colapso) e os fenômenos e comportamentos do meio físico relacionados com as diferentes formas de interferência da ação humana. Portanto os solos ocorrem na paisagem compondo unidades ou compartimentos delimitáveis por meio da distinção de características morfológicas (cor, textura, estrutura, consistência, cerosidade, nódulos, concreções, etc.) dos horizontes pedológicos, observáveis no campo, e características físicas e químicas, determinadas por meio de ensaios laboratoriais e *in situ*. A espessura dos horizontes e a transição vertical e lateral entre estes são atributos igualmente importantes, utilizados na caracterização, classificação e mapeamento dos solos.



**Figura 6** - Perfil de solo – Horizontes - Fonte: [http:// www.escola.agrarias.ufpr.br](http://www.escola.agrarias.ufpr.br)

### 6.1.2 Taxonomia de solos

A completa caracterização dos solos tem como maiores objetivos a sua classificação e delimitação cartográfica. Depois de descritos e caracterizados, os solos deverão ser então classificados em sistemas taxonômicos organizados com este propósito. No Brasil, vem sendo desenvolvido um sistema de classificação, disponível na publicação *SISTEMA BRASILEIRO DE CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS* (2006), da Embrapa, organizado com o propósito de atender às condições de clima tropical a que está submetida à maior parte do País, e que se encontra estruturado até o seu quarto nível categórico

#### 6.1.2.1 Nomenclatura de horizontes e camadas de solos

Por *horizonte* do solo deve-se entender uma seção de constituição mineral ou orgânica, à superfície do terreno ou aproximadamente paralela a esta, parcialmente exposta no perfil e dotada de propriedades geradas por processos formadores do solo que lhe confere características de interrelacionamento com outros horizontes componentes do perfil, dos quais se diferencia em virtude de diversidade de propriedades, resultantes da ação da pedogênese (*SOIL SURVEY MANUAL*, 1962).

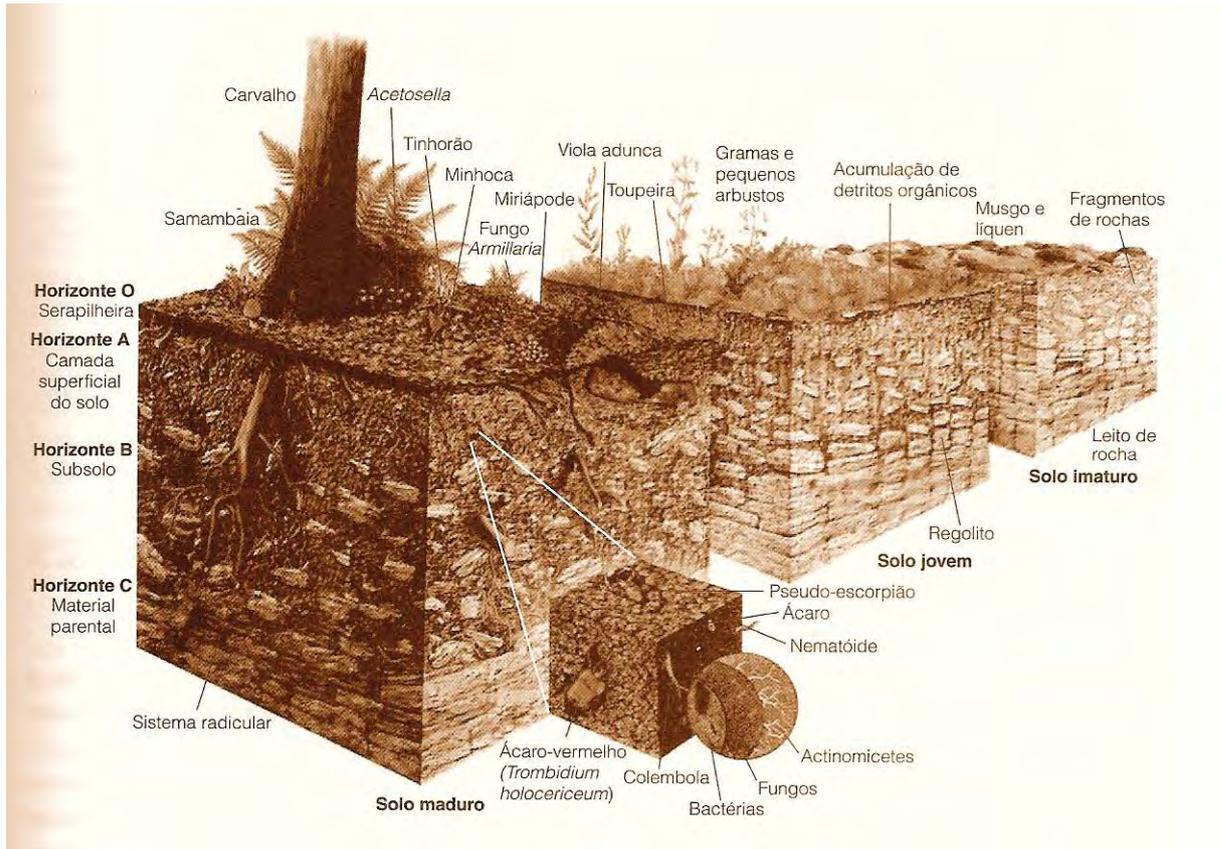
Por *horizonte genético* devem-se entender diferenciações qualitativas em determinadas seções dos perfis de solos, condicionadas pelos diferentes graus de alteração por que passam o material de origem. Tais diferenças são avaliadas por meio de atributos ou conjunto deles, que levam a uma distinção destas com as demais seções do perfil. Horizontes genéticos (pedogênicos), ainda que constituam manifestação de transformações determinadas por processamento da formação dos solos, podem não ser preferidos (escolhidos) para concessão de prerrogativa taxonômica, em termos de características diferenciais para estabelecimento e distinção de classes em sistemas taxonômicos.

A conceituação de *horizonte diagnóstico* constitui matéria pertinente ao estabelecimento de requisito referente a um conjunto de propriedades selecionadas, em grau arbitrado como expressivo, por razão de conveniência (arbítrio) para construção taxonômica, adotado para criar, identificar e distinguir classes (táxons) de solos.

No referente aos horizontes pedogênicos, a conceituação é de natureza mais genética e o enunciado das definições é ordinariamente mais qualitativo. No caso dos horizontes diagnósticos as conceituações são mais de tendência distintiva (fins taxonômicos de delimitação de classes) e o enunciado das definições é desejavelmente mais quantitativo.

Portanto, horizontes genéticos (pedogênicos), nem sempre são diagnósticos de classes de solos. No “Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS”, para boa parte deles são estabelecidas condições, quase sempre de espessura, para que sejam diagnósticos de classes em alguns de seus níveis categóricos.

Por *camada* deve-se entender uma seção de constituição mineral ou orgânica, à superfície do terreno ou aproximadamente paralela a esta, parcialmente exposta no perfil do solo e possuindo conjunto de propriedades não resultantes ou pouco influenciadas pela atuação dos processos pedogenéticos (*SOIL SURVEY MANUAL*, 1962).



**Figura 7** – Formação do solo e perfil geral. Os horizontes, ou camadas, variam em número, composição e espessura, dependendo do tipo de solo. Modificado de Miller Jr. (2007).

### 6.1.2.2 Definição de símbolos e sufixos de horizontes e camadas

A seguir são caracterizados sucintamente os símbolos e notações de horizontes e camadas de solos adotados no Brasil (Figura 7). Definições pormenorizadas podem ser encontradas na publicação “Definição e Notação de Horizontes e Camadas do Solo (1998), da EMBRAPA”. Para a designação dos horizontes e camadas do solo, usam-se letras maiúsculas, minúsculas e números arábicos. As letras minúsculas são usadas como sufixos para qualificar distinções específicas dos horizontes ou camadas principais, diagnósticos ou não, enquanto as maiúsculas são usadas para designar horizontes ou camadas principais, horizontes transicionais ou combinações destes.

Símbolos de horizontes e camadas:

**O** - Horizonte ou camada superficial de cobertura, de constituição orgânica, sobreposto a alguns solos minerais, podendo estar ocasionalmente saturado com água.

**H** - Horizonte ou camada de constituição orgânica, superficial ou não, composto de resíduos orgânicos acumulados ou em acumulação sob condições de prolongada estagnação de água, salvo se artificialmente drenado.

**A** - Horizonte mineral, superficial ou em seqüência a horizonte ou camada O ou H, de concentração de matéria orgânica decomposta e perda ou decomposição principalmente de componentes minerais. (Fe, Al e argila).

**AB (ou AE)** - Horizonte subsuperficial, com predomínio de características de horizonte A e algumas características de horizonte B (ou E).

**A/B (ou A/E ou A/C)** - Horizonte mesclado com partes de horizonte A e de horizonte B (ou A e E ou A e C), porém com predomínio de material de A.

**AC** - Horizonte subsuperficial, com predomínio de características de horizonte A e algumas características de horizonte C.

**E** - Horizonte mineral, cuja característica principal é a perda de argilas silicatadas, óxidos de ferro e alumínio ou matéria orgânica, individualmente ou em conjunto, com resultante concentração residual de areia e silte constituídos de quartzo ou outros minerais resistentes e/ou resultante descoramento.

**EA (ou EB)** - Horizonte subsuperficial, com predomínio de características de horizonte E e algumas características de horizonte A (ou B).

**E/A** - Horizonte mesclado com partes de horizonte E e de horizonte A, porém com predomínio de material de E.

**E/Bt** - Presença de lamelas espessas (Bt), dentro de horizonte E.

**BA (ou BE)** - Horizonte subsuperficial, com predomínio de características de horizonte B e algumas características de horizonte A (ou E).

**B/A (ou B/E)** - Horizonte mesclado com partes de horizonte B e de horizonte A (ou E), porém com predomínio de material de B.

**B** - Horizonte subsuperficial de acumulação de argila, Fe, Al, Si, húmus, CaCO<sub>3</sub>, CaSO<sub>4</sub>, ou de perda de CaCO<sub>3</sub>, ou de acumulação de sesquióxidos; ou com bom desenvolvimento estrutural.

**BC** - Horizonte subsuperficial, com predomínio de características de horizonte e algumas características de horizonte C.

**B/C** - Horizonte mesclado com partes de horizonte B e de horizonte C, porém com predomínio de material de B.

**CB (ou CA)** - Horizonte subsuperficial, com predomínio de características de horizonte C e algumas características de horizonte B (ou A).

**C/B (ou C/A)** - Horizonte mesclado com partes de horizonte C e de horizonte B (ou A), porém com predomínio de material de C.

**C** - Horizonte ou camada mineral de material inconsolidado sob o *solum*, relativamente pouco afetado por processos pedogenéticos, a partir do qual o *solum* pode ou não ter se formado, sem ou com pouca expressão de propriedades identificadoras de qualquer outro horizonte principal.

**F** - Horizonte ou camada de material mineral consolidada sob A, E ou B, rico em ferro e/ou alumínio e pobre em matéria orgânica, proveniente do endurecimento irreversível da plintita, ou originado de formas de concentração possivelmente não derivadas de plintita, inclusive promovidas por translocação lateral de ferro e/ou alumínio.

**R** - Camada mineral de material consolidado, que constitui substrato rochoso contínuo ou praticamente contínuo, a não ser pelas poucas e estreitas fendas que pode apresentar.

### 6.1.3 Fatores de formação dos solos.

Estudos sobre os solos demonstram que a sua origem e evolução estão condicionadas a cinco fatores (SALOMÃO e ANTUNES, 1998):

- Clima, condicionando principalmente a ação da água da chuva e da temperatura;
- Materiais de origem, condicionando a circulação interna da água e a composição e conteúdo mineral;
- Organismos, vegetais e animais, interferindo no microclima, formando elementos orgânicos e minerais, e modificando as características físicas e químicas;
- Relevo, interferindo na dinâmica da água, no microclima e nos processos de erosão e sedimentação;

- Tempo, transcorrido sob a ação dos demais fatores.

Os pesquisadores Buckman e Brady (1960), considerando a importância dos fatores de formação, definem os solos como *“corpos dinâmicos naturais que possuem características decorrentes das influências combinadas de clima e atividades bióticas, modificadas pela topografia, que atua sobre os materiais originários, ao longo de certo período de tempo”*.

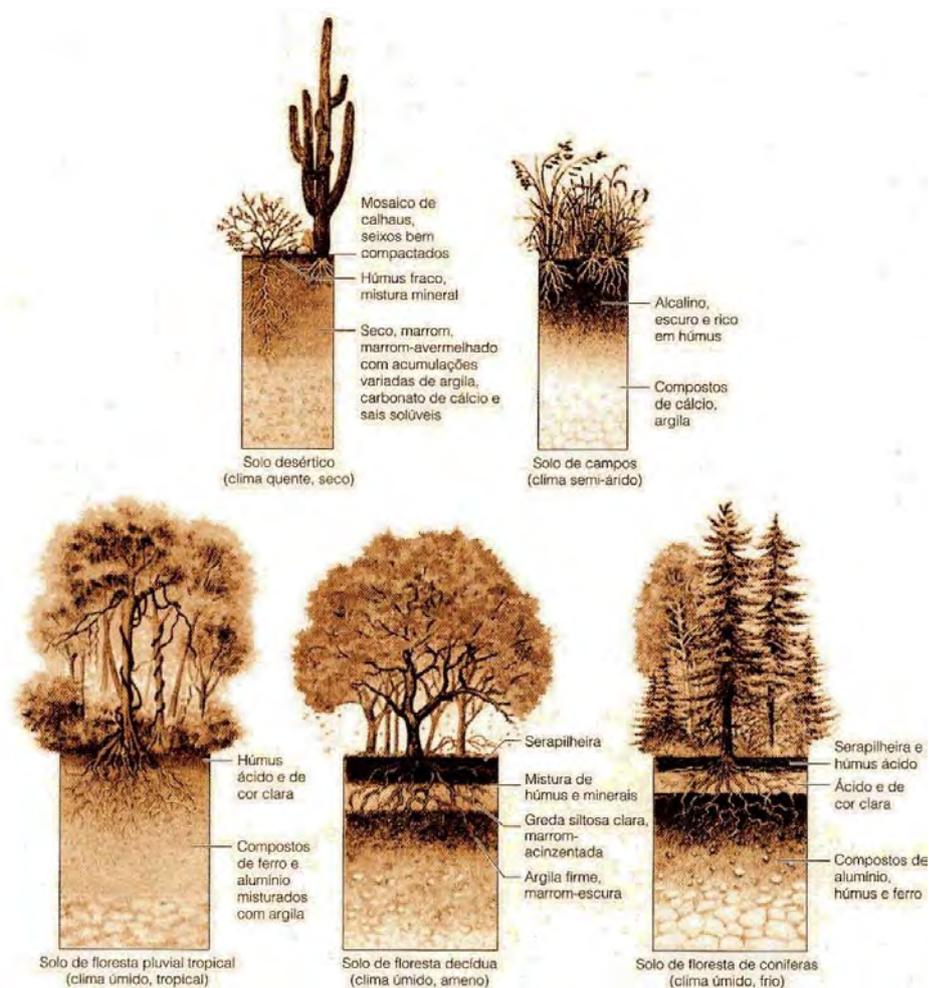
Simplificadamente, pode-se afirmar que o desenvolvimento do solo inicia-se com o intemperismo, representado pelos fenômenos físicos e químicos que, agindo sobre a rocha, conduzem à formação de resíduos não-consolidados comumente conhecidos por regolitos saprolíticos que constituem o *substrato pedogenético*, material originário do solo, do ponto de vista pedológico. Este material, proveniente da desagregação da rocha, poderá permanecer no local em que se desenvolveu, ou ser transportado para outro. Sendo submetido por tempo relativamente longo aos processos pedogenéticos, esse material residual ou transportado, passa a desenvolver um verdadeiro solo, do ponto de vista pedológico. Em certas condições, o solo assim formado, poderá ser retrabalhado por processos de dinâmica superficial, fornecendo material que, transportado e depositado em outro local, passará a constituir um novo substrato pedogenético (VARGAS, 1978). Vale lembrar que do ponto de vista técnico (o da Engenharia), o substrato pedogenético é considerado solo, se tiver um comportamento como aquele acima conceituado, segundo Vargas (1978). Outros autores usam o conceito de materiais inconsolidados (SOUZA e ZUQUETTE, 1991).

Assim, pode-se identificar a existência de duas grandes categorias de substrato pedogenético:

- Residual ou autóctone, formado no local, diretamente da desagregação da rocha subjacente ao perfil do solo;
- Transportado ou alóctone que, dependendo do agente responsável pelo transporte dos materiais, pode receber as seguintes denominações como substrato pedogenético:

- Coluvionar: ação da gravidade;
- Aluvionar: ação de águas correntes;
- Glacial: ação de geleiras;
- Eólico: ação dos ventos.

Estas denominações, aplicadas ao substrato pedogenético, são apropriadas apenas para se referirem à formação e disposição dos materiais originários, embora sejam, por alguns autores, aplicados aos solos que se desenvolveram por intemperismo, a partir desses depósitos, por exemplo, solos glaciais, aluviais, eólicos e residuais. Segundo os autores Buckman e Brady (1960), “*tais agrupamentos são muito generalizados, por haver grandes diversidades no âmbito de cada grupo de solos*”. (Figura 8).



**Figura 8** – Perfis dos principais tipos de solos, normalmente encontrados nos cinco tipos de ecossistemas existentes na Terra. Modificado de Miller Jr. (2007).

### **6.1.3.1 Rocha**

A natureza da rocha-matriz, sua composição mineralógica e química, e o estado original de fraturamento, exercem influência capital sobre as características do solo da qual se origina.

Em linhas gerais, pode-se afirmar que o desenvolvimento do solo está diretamente condicionado à circulação interna de água, tendo em vista o papel imprescindível que esta desempenha nas alterações físicas e químicas, envolvidas no processo de alteração, e o seu importante papel de transporte de soluções (GUERRA, SILVA e BOTELHO, 1999). Neste caso, a permeabilidade da rocha subjacente, condicionada pela natureza petrográfica, estado de alteração e fraturamento, é fator de suma importância na evolução do solo. Rochas compostas por minerais ricos em sílica como, por exemplo, o quartzo produz solos de textura arenosa, enquanto aquelas com significativa porcentagem de minerais ferromagnesianos (biotita, olivina, piroxênios) e feldspatos, oferecem condições para o desenvolvimento de solos argilosos. O ferro e o manganês têm parte ativa no processo de oxi-redução e são elementos fundamentais na coloração do solo. O potássio e o sódio causam a dispersão do colóide argiloso, enquanto o cálcio e o magnésio têm alto poder floculante, assegurando estabilidade ao solo (BUCKMAN e BRADY, 1960).

Segundo estes autores, o tempo necessário para que um solo se desenvolva está bastante relacionado à constituição mineralógica do substrato rochoso, especialmente segundo a facilidade, mais ou menos relevante, com que a água atravessa a cobertura pedológica, reaja com os constituintes minerais da rocha e remova os elementos liberados pela alteração.

### **6.1.3.2 Clima**

O fator climático atua diretamente na formação do solo, por meio de alteração dos minerais do substrato, ou indiretamente, por meio da vegetação. A importância do clima na formação do solo levou à concepção do critério de zonalidade climática adotada pelas primeiras classificações pedológicas sendo mantida até hoje por numerosos especialistas. Pode-se dizer que, em geral, os aspectos climáticos mais

importantes no desenvolvimento pedogenético são representados pela temperatura e precipitação pluviométrica (GUERRA, SILVA e BOTELHO, 1999).

A influência da temperatura mostra-se bastante evidente quando se aplica a Lei de Vant'Hoff, segundo a qual, para cada aumento de 10°C de temperatura, a velocidade de uma reação química aumenta de duas a três vezes. Assim, com o aumento da temperatura, torna-se maior a profundidade do terreno submetido à alteração física e química. Resulta daí que, mantidas as condições pluviométricas, as regiões de clima temperado apresentam solos substancialmente menos profundos que as regiões tropicais, onde é comum encontrar solos com vários metros de profundidade (SALOMÃO e ANTUNES, 1998).

Outro aspecto ilustrativo quanto à influência da temperatura no desenvolvimento pedogenético é a interferência na produção e acumulação de matéria orgânica. Solos encontrados em regiões tropicais e intertropicais são, em geral, pobres em matéria orgânica, ao contrário dos encontrados em regiões de clima temperado e frio. Segundo Bertoni e Lombardi Neto (2008), a temperatura do meio ambiente interfere diretamente na proliferação de microorganismos responsáveis pela destruição da matéria orgânica. Assim, em regiões de clima quente, observam-se condições favoráveis à vida microbiana no solo, que não permite o acúmulo de matéria orgânica e desenvolvimento do húmus. Para que haja concentração da matéria orgânica em solos tropicais, há a necessidade de aporte muito grande de restos vegetais, como o observado em locais de ocorrência florestal, ou em terrenos de agradação, como várzeas, onde se acumula matéria orgânica.

Quanto à influência das precipitações pluviométricas, das águas provenientes dos aquíferos e de irrigações no desenvolvimento pedogenético, deve-se considerar não apenas a ação da água no processo de alteração química dos minerais, mas, também, o seu importante papel na promoção do movimento de soluções e do processo de lixiviação do solo. Pode-se, assim dizer, que a maturação (ou clímax) do solo, é facilmente atingida em regiões de elevada pluviosidade onde se observa (BERTONI e LOMBARDI NETO, 2008):

- Elevada concentração hidrogeniônica do solo, com conseqüente aumento da alteração química por hidrólise;

- Condições facilitadas de transporte de soluções do interior do solo;
- Possibilidade de remoção de elementos solúveis e de acumulação dos elementos insolúveis em determinadas posições do perfil.

Entretanto, em regiões onde a precipitação pluviométrica é escassa, a lixiviação se reduz consideravelmente, promovendo um enriquecimento em sais solúveis como carbonatos, sulfatos e cloretos, dificultando o aprofundamento da alteração. Observa-se, assim, maior tendência para solos salinos e pouco profundos (BERTONI e LOMBARDI NETO, 2008).

Existem, desta forma, certas tendências de evolução pedológica condicionadas, especialmente, pelo clima regional e local, destacando-se as seguintes, segundo estes mesmos autores:

- Podzolização: Fenômeno característico de regiões de clima temperado, condicionado por acúmulo de matéria orgânica, produção de ácidos húmicos, dispersão de sesquióxidos de ferro e alumínio e enriquecimento em sílica que, em certos casos, constitui mais de 80% da fração mineral dos horizontes superiores.
- Laterização: Fenômeno característico de regiões de clima tropical e intertropical (quente e úmido), condicionado pela lixiviação de bases e sílica produzida por hidrólise, acumulação de sesquióxidos de ferro e alumínio e a produção de argilominerais do grupo caolinítico.
- Salinização: Fenômeno característico de regiões de clima árido ou semi-árido, condicionado pela concentração de bases na forma de sais, que se precipitam nos horizontes superiores.
- Gleização: Fenômeno também conhecido por *hidromorfia*, característicos de locais saturados de água (microclima úmido e/ou terrenos mal drenados), onde cátions metálicos, especialmente o ferro, se mantêm na forma reduzida, favorecendo sua lixiviação, normalmente acompanhada pela remoção de argilominerais.

### **6.1.3.3 Relevo**

A influência do relevo na formação do solo manifesta-se, fundamentalmente, pela sua interferência na dinâmica da água e nos processos de erosão e

sedimentação. Deve-se, entretanto, nestes casos, considerar também as características dos terrenos relacionadas à percolação das águas superficiais e subsuperficiais (MOREIRA & PIRES NETO, 1998).

Assim, áreas com relevo pouco movimentado (topografia suave) e com materiais (solos e/ou rochas) permeáveis, facilitam a infiltração das águas pluviais, superando as taxas de escoamento superficial e subsuperficial. Neste caso, os processos pedogenéticos atuam com maior vigor em profundidade, alterando as rochas e removendo, com relativa facilidade, os elementos químicos solúveis. As perdas do solo por erosão são menos significativas. Os solos tendem a ser profundos e muito lixiviados (SALOMÃO & ANTUNES, 1998).

Os autores citados também afirmam que caso o terreno seja pouco permeável, grande parte das águas pluviais não se infiltra, saturando, nos períodos de chuva, os materiais de cobertura. Fenômenos químicos de redução de cátions metálicos podem se manifestar, reproduzindo solos conhecidos por hidromórficos, ou solos concentrados em sais, caso haja aporte de elementos solúveis proveniente de setores de montante das vertentes. Porém, em áreas com relevo muito movimentado (topografia declivosa), grande parte das águas de chuva é perdida em escoamentos laterais, favorecendo os processos erosivos e retardando o aprofundamento da pedogênese. Neste caso, os solos formados são pouco desenvolvidos e normalmente rasos.

#### **6.1.3.4 Organismos**

A influência da vegetação na formação do solo manifesta-se, de maneira direta, pelo fornecimento de resíduos orgânicos e elementos minerais e, indiretamente, modificando o microclima e protegendo o solo contra a erosão (SALOMÃO & ANTUNES, 1998).

Os restos vegetais, acumulados na superfície do solo, passam progressivamente por transformações físico-químicas sob estreita dependência do clima, produzindo o húmus. A produção, acumulação e migração do húmus representam aspectos fundamentais de desenvolvimento pedogenético.

Num estágio inicial de evolução do solo, a participação dos organismos vivos manifesta-se, principalmente, pela atividade de espécies inferiores, como bactérias,

fungos e líquens, que contribuem na alteração de certos minerais. A atividade desses microorganismos continua durante todo o processo evolutivo do solo, determinando a decomposição de restos vegetais e animais que se encontravam depositados no solo, permitindo a produção de anidrido carbônico e de ácidos orgânicos. Estas substâncias passam, então, a desempenhar fundamental papel na aceleração da decomposição dos minerais (BERTONI e LOMBARDI NETO, 2008).

Dependendo da espécie vegetal, podem-se esperar efeitos diversos na pedogênese. Por exemplo, em regiões de floresta, a produção do húmus verifica-se em grande intensidade devido a abundância de restos vegetais, especialmente de folhas, que caem na superfície do terreno, decompondo-se e transformando-se em húmus, repondo continuamente o conteúdo orgânico do solo. Por outro lado, em regiões de vegetação herbácea (cerrados), observam-se pequenas concentrações de matéria orgânica nas camadas superficiais do solo, tendo em vista o pequeno aporte de restos vegetais verificado pela baixa densidade vegetal (BERTONI e LOMBARDI NETO, 2008).

Espécies vegetais, constituídas por raízes profundas, e seres vivos que se instalam no interior do solo, como minhocas, formigas e cupins, contribuem de maneira decisiva para o aprofundamento e a evolução do solo: desenvolvem a sua porosidade, tornando-o mais permeável à circulação de água e dos gases, fundamentais nos processos pedogenéticos; promovem a estruturação do solo, tornando-o mais estável ante os processos de degradação; contribuem para a alteração do substrato rochoso e absorvem ou transportam notável quantidade de elementos das zonas profundas, repondo-os em posições superiores do perfil (BERTONI e LOMBARDI NETO, 2008).

#### **6.1.3.5 Tempo**

Entendendo-se o solo como um sistema dinâmico, em contínuo desenvolvimento, é evidente que as suas características relacionam-se com o estado mais ou menos avançado da sua evolução. Entretanto, o tempo necessário para que um solo atinja determinado estágio evolutivo depende da influência dos demais fatores relacionados à sua formação. Assim, os processos de alteração das rochas e de lixiviação ocorrerão com maior rapidez em substratos mais permeáveis e ricos em minerais facilmente intemperizados pela ação das águas. As regiões de

clima quente e úmido e com densa cobertura vegetal desenvolvem o solo em um menor período de tempo que as regiões de clima seco, com escassa vegetação (GUERRA, SILVA e BOTELHO, 1999).

É importante observar que superfícies topográficas, interpretadas como mais antigas, em relação a outras de uma mesma região, não apresentam, necessariamente, solos pedogeneticamente mais evoluídos ou mesmo mais espessos, pois a evolução pedológica depende sempre da conjugação dos fatores de formação do solo (BERTONI e LOMBARDI NETO, 2008).

Deve-se, portanto, procurar relacionar a idade dos solos à velocidade da sua pedogênese sendo, para isso, fundamental conhecer a influência local de cada fator e dos processos responsáveis pelo seu desenvolvimento. Entretanto, o conhecimento da história evolutiva dos solos é, em certos casos, tarefa muito difícil, pois existem problemas de intensidade, retrogressão, inércia e transformação, concernente ao desenvolvimento do solo, próprios de cada local. É o caso, por exemplo, de solos enterrados ou superpostos e de solos resultantes da transformação pedológica de outros solos. Estes casos, apesar de sua complexidade, podem, desde que adequadamente interpretados, apresentar indicações seguras para a conclusão da idade relativa de desenvolvimento pedogenético de uma dada região (GUERRA, SILVA e BOTELHO, 1999).

#### **6.1.4 Processos pedogenéticos**

Sob a influência conjunta de fatores responsáveis pela formação do solo, fenômenos se manifestam simultaneamente, em diferentes intensidades, constituindo os processos pedogenéticos.

Simonson (1959) considera a existência de cinco processos: *adições*, *perdas*, *transformações*, *remanejamentos mecânicos* e *transportes seletivos*, cada qual compreendendo uma série de mecanismos característicos. A predominância de um processo sobre o outro depende do meio ambiente considerado. Portanto, qualquer modificação ambiental, como a que vem acontecendo com a ocupação antrópica, provoca imediatas alterações no curso da pedogênese.

A atuação combinada dos processos verifica-se segundo dois estágios que se superpõem: *formação do substrato pedogenético* e *diferenciação dos horizontes* (SIMONSON, 1959).

#### **6.1.4.1 Formação do substrato pedogenético. Intemperismo e a origem dos sedimentos.**

A formação do substrato pedogenético desenvolve-se por meio do intemperismo, alteração física e química das rochas, que, em certos casos, é seguido pelo transporte e sedimentação dos materiais intemperizados (SIMONSON, 1959).

O intemperismo ou meteorização é o conjunto de processos naturais que causa a alteração das rochas, próximas da superfície terrestre, em produtos que estejam mais em equilíbrio com as novas condições físico-químicas diferentes das que deram origem à maioria dessas rochas (OLLIER, 1969 e 1975).

Segundo Guerra & Guerra (2001), o intemperismo seria o conjunto de processos mecânicos, químicos e biológicos que ocasionam a desintegração e decomposição das rochas, podendo ser subdividido em '*intemperismo diferencial*', ocorrendo quando um determinado tipo de rocha apresenta minerais com diferentes graus de resistência ao intemperismo; o resultado é o desenvolvimento de uma superfície irregular nas rochas, que sofrem este tipo de intemperismo, e, o '*intemperismo profundo*', referindo-se ao intemperismo das rochas que estão a dezenas de metros de profundidade dentro do solo, ocorrendo devido à ação da água que se infiltra no solo até atingi-las.

Outro importante pesquisador, Christofolletti, (1980), afirma que a 'meteorização' ou 'intemperismo', é o fenômeno responsável pela produção de detritos a serem erodidos, constituindo etapa na formação do *regolito*; representa pré-requisito necessário para a movimentação de fragmentos rochosos ao longo das vertentes; pode-se distinguir entre o intemperismo químico e bioquímico, responsável pela decomposição das rochas, e o intemperismo físico, responsável pela fragmentação das mesmas. No que tange à *fragmentação das rochas*, segundo este mesmo autor, três processos assumem importância básica:

- A **termoclastia** – que resulta das oscilações de calor entre o dia e a noite, ocasionando grandes diferenças no gradiente térmico. Essas elevadas amplitudes ocorrem de modo mais comum nas áreas desérticas, e a alternância sucessiva de dilatação e contração provoca a fragmentação das rochas (por exemplo, microfissuras não conectadas, com a variação térmica, passam a se conectar, colaborando para o fraturamento da rocha). Trata-se de um fenômeno lento e variável conforme as rochas e suas características (textura, estrutura, etc.);
- A **crioclastia** – resulta da alternância gelo – degelo, sendo fenômeno comum nas zonas periglaciárias. Nas superfícies horizontais o solo alternadamente gelado e degelado sofre uma mistura, intrincamento dos materiais, cujo processo recebe o nome de *crioturbação* ou *geliturbação*.
- A **haloclastia** – resulta da cristalização e estufamento dos sais, podendo ocorrer nas zonas litorâneas e nos desertos. Também é responsável pela fragmentação de rochas, e os resultados são semelhantes aos da crioclastia. Da mesma forma, os fragmentos intrincam-se gerando o processo de *haloturbação*.

Nos ambientes naturais, entre os parâmetros físico-químicos mais importantes, tem-se o pH (*potencial do íon hidrogênio*) e o Eh (*potencial de oxirredução*) (SUGUIO, 2003). O “pH” é a medida da força de um ácido ou de uma base, que é definido como logaritmo negativo, na base 10, da sua concentração de íons de hidrogênio ( $\text{pH} = \log_{10} 1/\text{H}^+$ ). Esta concentração é expressa em moles de íons de hidrogênio por litro de solução e varia de 0 a 14, sendo os valores inferiores a 7 indicativos de *acidez* e, superiores a 7 de *alcalinidade*. Estes valores podem ser obtidos por papel indicador ou por um medidor eletrônico. O “Eh” é a medida em volts, da tendência de um ambiente produzir reações de oxidação ou de redução, sendo, em geral, obtido por um medidor eletrônico. O potencial de oxirredução varia desde fortemente redutor (zonas de sulfetos de ferro, como a pirita) até fortemente oxidante (zona de óxidos e hidróxidos de ferro, como a hematita). Ambos constituem variáveis independentes, que podem ocasionar a oxidação do ferro, a lixiviação da andesina ou a decomposição da matéria orgânica (SUGUIO, 2003).

Além disso, muitas rochas expostas ao intemperismo foram formadas sob condições de temperatura e pressão bem mais elevadas que as normalmente

existentes na superfície e na ausência de ar e água. Por outro lado, o intemperismo é, em grande parte, uma resposta às condições de superfície com pressão e temperaturas baixas e com a presença daqueles elementos.

A zona de intemperismo, que corresponde à profundidade afetada por este fenômeno envolve, na prática, meia dúzia de tipos de rochas mais comuns compostas por poucos minerais principais (silicatos, óxidos, sulfetos, carbonatos, sulfatos e fosfatos), formados por oito elementos químicos mais importantes (O, Si, Al, Fe, Ca, Mg, Na e K). Segundo Leopold *et.al.* (1964), dos quase 150 milhões de quilômetros quadrados de terras emersas, sujeitas à ação do intemperismo, 75% são ocupadas por rochas sedimentares e apenas 25% por rochas cristalinas (metamórficas e ígneas). Por outro lado, mais de 90% das regiões continentais são ocupados por folhelhos (52%), arenitos (15%), granitos e granodioritos (15%), calcários (7%), basaltos (3%) e outras rochas (8%).

Uma rocha que sofre intemperismo libera os seus produtos, que podem ser removidos fisicamente (ou mecanicamente) e em solução. O processo de remoção desses produtos é conhecido por *erosão* e a movimentação desses materiais é chamada de *transporte*.

O conjunto do intemperismo e erosão constituem o processo também conhecido como *denudação* (SUGUIO, 2003). Por outro lado, não é fácil estabelecer os limites precisos entre intemperismo, erosão e transporte, pois são processos mais ou menos simultâneos e intimamente relacionados. Os sedimentos transportados são eventualmente depositados intermediariamente, mas o destino final são os oceanos. Lá, eles são acumulados, compactados e, pela *diagênese* (ou *litificação*) podem formar as rochas sedimentares. Os movimentos crustais podem conduzir estas rochas acima do nível do mar e, desta maneira, inicia-se um novo ciclo de intemperismo.

Segundo Suguio (2003), o intemperismo age na interface entre a atmosfera e a litosfera e inclui os processos que levam à desagregação das rochas expostas na superfície da Terra. São originadas partículas minerais discretas (produtos residuais) presentes na rocha matriz, que permanecem mais ou menos inalteradas, ao lado de novos minerais formados por intemperismo, além de materiais em solução. Os novos minerais produzidos por intemperismo resultam das reações de silicatos, sulfetos ou

óxidos com água, que é mais abundante nos ambientes de intemperismo que nos de formação das rochas ígneas e metamórficas.

A natureza e a efetividade dos processos de intemperismo dependem principalmente de três grupos de variáveis:

- Condições climáticas – principalmente temperatura e pluviosidade;
- Propriedade dos materiais – composição, coesão, etc.;
- Variáveis locais – vegetação, vida animal, lençol freático, etc.

A suscetibilidade das rochas ao intemperismo depende também da textura. Sob determinadas condições, rochas de composições mineralógicas e químicas praticamente iguais, as mais grossas alteram-se mais rapidamente que as mais finas. Ademais, é raro que todos os minerais componentes exibam a mesma intensidade de alteração.

#### **6.1.4.2 Tipos de intemperismo**

- O *intemperismo físico ou mecânico* (também conhecido por *desintegração*) - corresponde à ruptura das rochas da crosta terrestre por solicitação de esforços inteiramente mecânicos atribuídos a várias causas. Algumas dessas forças originam-se no interior das próprias rochas, enquanto outras são aplicadas externamente. Os esforços aplicados conduzem à deformação e, eventualmente, ao colapso das rochas. Os principais mecanismos são: *alívio de pressão* (ocorre quando rochas acham-se comprimidas a grandes profundidades pelo peso das rochas superpostas; quando as rochas de cima são gradualmente intemperizadas e erodidas, a pressão exercida é aliviada, então as rochas expandem-se e, freqüentemente, provocam fraturas), *cristalização ou congelamento em poros e fraturas* (ocorre quando a água preenche fissuras e poros das rochas e sofre congelamento; o volume d'água contido torna-se 9,20% maior e passa a exercer uma força de expansão por congelamento de 150 kg/cm<sup>2</sup>, suficiente para fraturar uma rocha como granito) e *expansão térmica* (como a maioria das rochas possui um coeficiente de condutibilidade térmico muito baixo, estabelece-se um gradiente de temperatura entre a superfície e o interior, quando uma rocha é aquecida; dessa maneira, a

superfície da rocha expande-se mais que seu interior, desenvolvendo-se tensões que podem levar ao fraturamento) (ROTH, 1965).

- O *intemperismo químico ou mineralógico* – ocorre quando o equilíbrio do conjunto de átomos, que constitui os minerais é rompido e ocorrem reações químicas que conduzem o mineral a um arranjo mais estável, sob novas condições mais próximas da superfície terrestre. O equilíbrio físico-químico determina que todas as substâncias estejam presentes na forma de fases, que sejam estáveis sob pressão e temperatura relativamente baixas. As fases componentes de um sistema natural (líquida, gasosa e a estrutura cristalina sólida) são estáveis sob certas condições de pressão ou temperatura. Quando essas condições ou a composição química são modificadas pela presença de água e/ou ar, certos minerais ou fases tornam-se instáveis e podem surgir novos minerais mais estáveis sob estas condições denominados *neoformados* (autigênicos) e *transformados* (OLLIER, 1975; LOUGHNAN, 1969; LEHMAN, 1963).

O agente principal de intemperismo químico é a água. Poucos minerais formadores das rochas reagem com água pura, exceto os minerais mais solúveis dos *evaporitos*. Porém, as águas pluviais e subterrâneas são, em geral, levemente ácidas pela dissolução do dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) da atmosfera, formando um ácido carbônico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) diluído. O pH é também freqüentemente diminuído pela presença de ácidos fúlvicos e/ou húmicos produzidos por processos biológicos de degradação de materiais vegetais dos solos. Os principais tipos de reações químicas que ocorrem durante o intemperismo químico das rochas são: *dissolução*; *oxidação* ou *redução*; *hidratação* ou *hidrólise*; *carbonatação* e *quelação* ou *complexação* (LEHMAN, 1963).

- Dissolução – é geralmente o primeiro estágio de intemperismo químico; o volume de material dissolvido depende da quantidade e qualidade da água envolvida e da solubilidade do mineral;
- Oxidação ou redução – é uma reação com o oxigênio para formar óxidos ou com oxigênio e água para formar hidróxidos;

- Redução – é o processo oposto ao da oxidação e ocorre na natureza em ambientes subaquosos anaeróbicos, isto é, pobres ou praticamente isentos de oxigênio;
- Hidratação ou hidrólise – a hidratação consiste na adição de água a um mineral sem que ocorra qualquer reação química, enquanto que a hidrólise é uma reação química entre o mineral e a água, isto é, entre os íons  $H^+$  e  $OH^-$  da água e os íons do mineral;
- Carbonatação – resulta da reação de íons carbonato ou bicarbonato com os minerais formadores das rochas. A solubilidade do gás carbônico (ou dióxido de carbono) é mais alta em águas com temperaturas baixas, onde a sua atividade química é aumentada;
- Quelação ou complexação <sup>[2]</sup> – segundo Lehman (1963), este é um processo orgânico pelo qual cátions metálicos são incorporados às moléculas de hidrocarbonetos; muitos processos orgânicos requerem, para seu funcionamento, a presença de quelatos organometálicos. Dessa maneira, acredita-se que nos solos onde se desenvolvam e se decomponham plantas existam quelatos de cátions metálicos, embora poucos compostos complexos tenham sido identificados com certeza (LOUGHNAN, 1969:47-49).

Os processos de intemperismo químico dão origem a duas frações componentes: os *resíduos* (ou produtos residuais) e os *solutos* (ou materiais em solução). Os resíduos correspondem à parte dificilmente solúvel em água, nas condições superficiais, sendo compostos principalmente de quartzo e, dependendo do grau de intemperismo, por quantidades variáveis de feldspato e mica. Os solutos incluem elementos como os metais alcalinos, principalmente sódio e potássio, além de terras raras, magnésio, cálcio e estrôncio. Eles tendem a ser lixiviados do perfil de intemperismo e em sua trajetória vão terminar nos oceanos onde são precipitados como calcários, dolomitas e outros evaporitos.

[2] As reações de oxidação e de redução dependem do potencial de oxirredução (Eh), que varia com a concentração de substâncias reagentes. Na presença de íons  $H^+$  e  $OH^-$ , segundo Ollier (1975), o Eh é função do pH da solução.

Segundo Mackenzie & Garrels (1966), mais de 99% dos materiais transportados em solução pelos rios e a mesma proporção de sólidos dissolvidos na água do mar são compostos por  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  e  $\text{SiO}_2$ . A água do mar apresenta, em geral, concentrações mais altas que a água doce de todos os componentes acima, com exceção da sílica, que é mais abundante nas águas fluviais.

Um dos fatos mais importantes e interessantes do intemperismo químico é a formação de argilominerais ou minerais de argila (SUGUIO, 2003).

Durante os primeiros estágios de intemperismo, os minerais máficos (olivinas, piroxênios e anfibólios), degradam-se para formar argilominerais ricos em ferro e magnésio. O concomitante intemperismo químico dos feldspatos produz partículas coloidais que são lixiviadas da área-fonte, mas também podem permanecer “*in situ*” para formar depósitos de argila residual. Se o intemperismo prosseguir ainda mais, o magnésio e o cálcio serão totalmente lixiviados (SUGUIO, 2003).

O resíduo final de uma rocha intensamente intemperizada é composto de quartzo (se for abundante na rocha matriz), caulinita, bauxita (silicatos e principalmente hidróxido de alumínio) e limonita (hidróxidos de ferro). Para que esses resíduos sejam formados, é necessário um clima quente e úmido associado à baixa taxa de erosão. Além disso, a remoção de produtos intemperizados (erosão) é de grande importância para que haja continuidade nas reações de intemperismo. A erosão faz com que as reações de intemperismo químico prossigam no mesmo sentido, mas se os produtos intemperizados não forem removidos, o sistema poderá ser fechado, e a reação será interrompida nos primeiros estágios (SUGUIO, 2003).

- O *intemperismo biológico* – de acordo com Blatt *et.al.* (1972), o reconhecimento da participação das bactérias no processo de intemperismo químico das rochas data de 1890, das algas de 1891 e dos líquens de 1904. É mesmo provável que o intemperismo dos minerais componentes de uma rocha seja predominantemente resultante das atividades orgânicas dos vegetais.

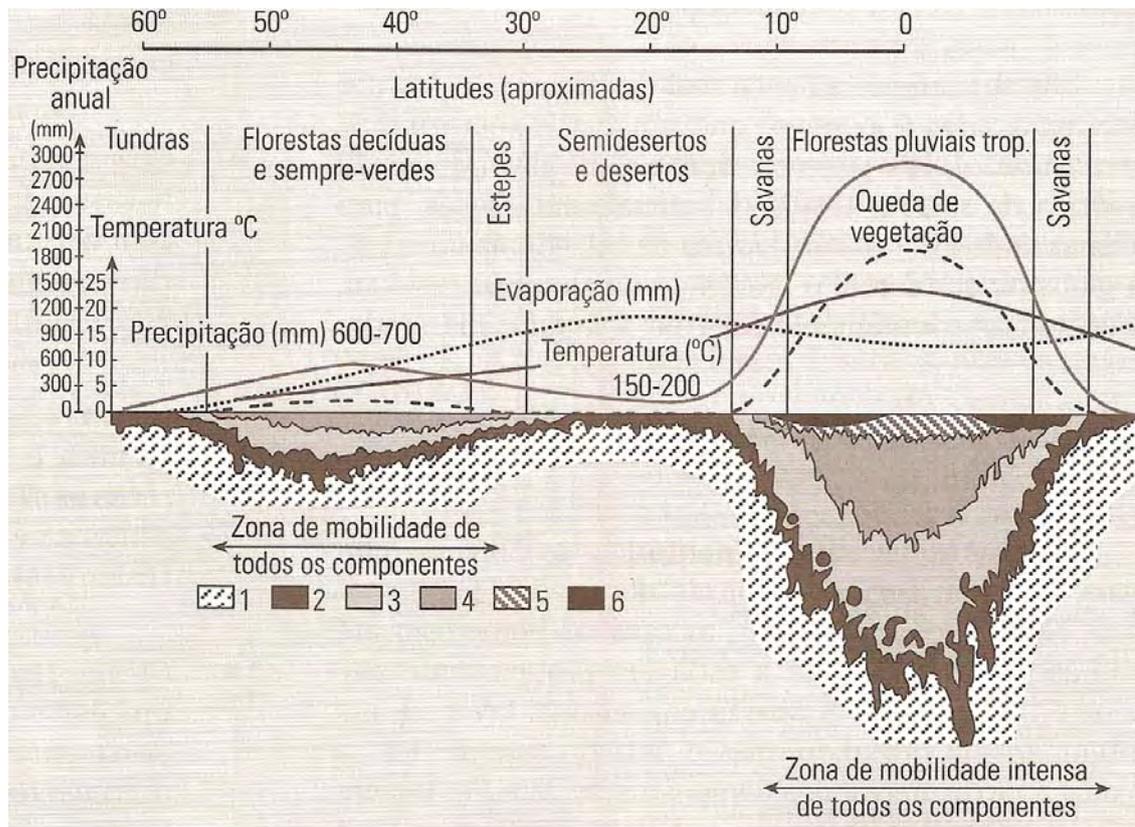
Embora a ação dos organismos vivos em termos de intemperismo seja principalmente química, ela pode ser também física. Assim, a ação da cunha de raízes de árvores ou escavações por animais pode facilitar a atuação de outros

processos de intemperismo físico ou químico. Entre os animais escavadores têm-se as minhocas, cupins, formigas e pequenos roedores, cuja população pode atingir 150.000/ha, e, estima-se que de 10 a 15 t/ano de material particulado fino sejam deslocados até a superfície por esses organismos (SUGUIO, 2003).

Não há dúvida de que o aspecto mais importante do intemperismo biológico é o papel fundamental desempenhado pelos organismos na gênese dos solos. Eles são deste modo definidos como um “*produto de intemperismo biológico, sendo compostos basicamente de resíduos minerais e húmus*” (matéria orgânica gelatinosa formada por restos vegetais em decomposição). O húmus é muito importante na preservação da umidade que, por sua vez, acelera os processos de intemperismo químico. Outro agente importante e de formação dos solos, são as bactérias, que são extremamente ativas sob as condições redutoras (ou anaeróbias), por exemplo, na formação de sulfetos que são típicos desses ambientes. Experiências de laboratório, segundo Retallack (1990), têm mostrado que a albita e muscovita são decompostas duas vezes mais rapidamente na presença de bactérias e tem sido sugerido também que elas sejam responsáveis pela remoção da sílica dos solos tropicais, onde a quantidade média de microorganismos pode chegar a 1 bilhão/g.

#### **6.1.4.3 O Intemperismo e o Clima**

Os diferentes processos de intemperismo são favorecidos por determinados fatores climáticos e/ou inibidos. Deste modo, pode-se estabelecer uma correlação entre os tipos e intensidades de intemperismo e as diferentes regiões climáticas da Terra, que exibem profundidades de intemperismo, bem como processos pedogenéticos variáveis. (Figura 9)



**Figura 9** – Características das zonas de intemperismo, de acordo com as latitudes (modificado de Strakhov, 1967): 1= rocha fresca; 2 = detritos rochosos quimicamente pouco alterados; 3 = zona de predomínio de hidrólise; 4 = zona de caulinita; 5 = zona de ocre e alumina; 6 = ferricrete.

A máxima lixiviação processa-se nas áreas tropicais (aproximadamente 10 graus de latitudes norte e sul), caracteriza-se por altas pluviosidades e temperaturas, sendo ocupadas por florestas pluviais, seguida pela zona de podzolização (35 a 55 graus de latitudes norte e sul) com florestas mistas (decíduas e sempre-verdes). Nas zonas de tundras e zonas desérticas e semidesérticas, o intemperismo químico é desprezível pela baixa temperatura e escassez de água, respectivamente, estabelecendo-se faixas de latitudinais de intemperismos químicos e biológicos mínimos.

Nas regiões tropicais, a hidrólise e a formação de argilominerais residuais podem atingir profundidades superiores a 100 m. A grande profundidade de intemperismo tropical deve-se, em parte, à temperatura elevada, mas, a precipitação abundante é o fator talvez mais importante. Apesar da imensa produtividade biológica, relativamente pouco húmus é acumulado sob a floresta pluvial, em função dos incessantes ataques de microorganismos (micróbios e fungos) e da rápida

reciclagem dos nutrientes. As intensas chuvas promovem uma eficiente lavagem dos compostos mais solúveis (BRINKMANN, 1964).

Segundo este mesmo autor, os tipos de climas reinantes podem determinar as seguintes características de intemperismo:

- Clima tropical sempre úmido – nele verifica-se intensa e profunda decomposição química, caracterizada por intensa lixiviação dos elementos químicos mais solúveis;
- Clima quente com estações úmidas e secas – neste caso, o intemperismo químico ainda é acentuado, com decomposição de silicatos e formação de lateritas, acompanhado de fenômenos de disjunção esferoidal;
- Clima quente e árido – aqui a decomposição química é menos intensa, mas nas estações mais secas os sais sobem à superfície, originando eflorescências de vários tipos de sais, como os carbonatos (calcretes), até gipsita e halita.
- Clima temperado e úmido – no qual alguns processos de intemperismo físico, como o do congelamento (gelivação), assumem importância, em detrimento da decomposição química. Ocorre acentuado acúmulo de húmus e intensa solubilização pela atuação abundante de CO<sub>2</sub>.
- Clima glacial – nele há o predomínio do intemperismo físico por congelamento, enquanto o intemperismo químico e processos pedogenéticos são desprezíveis.

## 6.2 EROSÃO DE SOLOS

### 6.2.1 Generalidades

Os materiais alterados que se encontram na superfície ou subsuperfície do terreno, formando o solo ou as formações superficiais, estão sujeitos à ação dos agentes geológicos. Esses materiais constituem a estrutura das encostas, onde ocorrem em estado de equilíbrio metaestável. Em condições normais, via de regra, o desgaste da superfície por erosão é compensado pela contínua alteração das rochas, mantendo-se, desta forma, o perfil do solo. Entretanto quando se verifica uma ruptura do equilíbrio que favorece os agentes erosivos, sobrevém a erosão que pode ser lenta ou acelerada, podendo assumir aspectos catastróficos.

Sob condições de clima severo, a erosão pode ocorrer à medida que os processos de intemperismo desagregam e decompõem as rochas, mantendo-se a superfície do terreno praticamente desprovida de solos, nela aflorando a rocha. A erosão acelerada afeta principalmente as vertentes mais íngremes, as encostas mais arenosas, ou aquelas despidas de vegetação, bem como as terras utilizadas inadequadamente na agricultura, as quais se tornam, em pouco tempo, degradadas e impróprias ao uso (BIGARELLA, 2003).

Dentre os fenômenos erosivos que atingem o solo, ou mais propriamente, o manto de intemperismo, destaca-se a erosão hídrica, a qual age de duas formas distintas. Numa delas, o ataque da água atinge o solo na superfície, desagregando-o, facilitando desse modo, o transporte das partículas menores. Na outra forma, a ação verifica-se não só na superfície, como também em subsuperfície, numa determinada porção do perfil, isto é, afetando uma massa de material inconsolidado.

A natureza da erosão do solo depende da relação entre a erosividade das gotas de chuva e a da água corrente, e a erodibilidade que implica na desagregação e no transporte do material do solo. Ambas não são necessariamente independentes, podendo interagir de forma mútua.

A água é considerada como agente normal e o mais importante na esculturação erosiva da paisagem. Mesmo nas regiões áridas, ela atua nas chuvas eventuais, ou episodicamente pela condensação de umidade anormal do ar.

A distribuição das principais formas da superfície do terreno está ligada aos diferentes tipos de movimentos crustais. As formações rochosas deslocadas tectonicamente, principalmente pela epirogênese, estão sujeitas à ação dos agentes de intemperismo e de erosão.

## **6.2.2 Conceituação**

**6.2.2.1 Erosão** – o conceito de erosão (do latim: *erodere*) está ligado aos processos de desgaste da superfície do terreno com a retirada e o transporte dos grãos minerais. Implica na relação de fragmentação mecânica das rochas ou na decomposição química das mesmas. Atua através de vários processos intempéricos (mecânicos – corrasão; químicos – corrosão, dissolução; e pela ação das águas correntes, das ondas, dos movimentos das geleiras e dos ventos (erosão: fluvial, marinha, glacial, eólica, etc.). Em sentido amplo, a erosão consiste no desgaste, no afrouxamento do material rochoso e na remoção dos detritos através dos processos atuantes na superfície da Terra; às vezes a erosão é confundida com a denudação (BIGARELLA, 2003).

**6.2.2.2 Denudação** – o termo denudação (do latim: *denudare* = descobrir) desde muito tempo tem sido empregado em geociências para refletir a remoção do material solto (incoerente) resultante da intemperização das rochas, através da ação dos vários processos erosivos. Implica no desgaste da superfície terrestre, expondo estruturas rochosas cada vez mais profundas. Semanticamente, os termos erosão e denudação são muito próximos; o primeiro refere-se aos processos e o segundo as conseqüências. Para Davis (1909), o termo denudação corresponderia aos estágios juventude e maturidade do ciclo de erosão.

**6.2.2.3 Corrasão** – o termo corrasão refere-se ao desgaste exclusivamente mecânico da rocha pela ação de materiais que se movem sobre sua superfície, seja pelos movimentos de massas nas encostas/vertentes pela força da gravidade, ou pelos agentes de transporte que exercem ação erosiva. (águas correntes, ventos e geleiras). O desgaste mecânico implica numa ação abrasiva (causado pelo risco, arranhão, entalhamento, moagem e trituração) sobre os constituintes minerais da rocha num substrato rochoso inalterado (rocha fresca) ou alterado, coerente ou incoerente. A ação corrasiva inclui o varrimento efetuado pelos diversos agentes de transporte carregados de partículas clásticas de vários tamanhos, bem como pelos

ventos com areia. A corrasão vertical exercida pelas correntes fluviais carregadas de detritos desempenha uma ação muito efetiva no embutimento ou encaixamento dos leitos dos rios até atingir o nível de base local. A corrasão lateral dos vales fluviais provoca o alargamento dos planos de inundação, particularmente das regiões áridas e semi-áridas. Tal ação torna-se muito efetiva pela ação do solapamento provocada pela carga do leito do rio sobre os lados do canal onde as rochas tendem a ser mais intemperizadas e inconsistentes do que o próprio leito (RUXTON, 1968), podendo dessa forma, atuar mais rapidamente do que a corrasão vertical.

**6.2.2.4 Corrosão** (*etching*) – o termo corrosão (do verbo latino *corodere*) refere-se ao desgaste de natureza química sobre os constituintes minerais das rochas. A corrosão é muito efetiva e evidente nas paisagens cársticas. Os processos de corrosão ligam-se igualmente à formação dos “planos de corrosão” (*etchplain*) que seriam desenvolvidos em regiões de clima úmido pela ação do intemperismo químico (BIGARELLA, 2003).

**6.2.2.5 Dissolução** – no processo de dissolução, um material no estado sólido ou gasoso é transformado no estado líquido pela ação de um solvente, principalmente pela água (BIGARELLA, 2003).

**6.2.2.6 Infiltração** – constitui o processo pelo qual a água de superfície penetra no solo. É controlada por numerosos fatores, entre eles: a frequência e a intensidade da precipitação, a estrutura do solo (porosidade, permeabilidade, agregação e fendas do solo, a declividade, o tipo de cultivo agrícola e a vegetação. Entre esses fatores, a porosidade geralmente é o mais importante. Ela representa os espaços vazios do solo através dos quais passa a água. É incrementada pela atividade de organismos como as térmitas e as minhocas, entre outros, bem como pelas raízes das plantas, ou pelo cultivo da terra. É reduzida pelo efeito de compactação causado pelo emprego de maquinaria agrícola e pela selagem da superfície provocada pelo salpicamento resultante do impacto das gotas de chuva fragmentando os agregados do solo, cujas partículas passam a obstruir a porosidade do solo (SELBY, 1985). A capacidade de infiltração de um determinado solo varia com o decorrer da chuva. No início a infiltração é rápida diminuindo com o transcorrer do tempo até tornar-se constante. Quando a taxa de precipitação excede a capacidade de infiltração, a água começa a se acumular na superfície do solo para iniciar o escoamento.

O processo de infiltração, conforme Reichardt (1975) é de grande importância prática, pois sua taxa ou velocidade muitas vezes determina o deflúvio superficial (*runoff*) responsável pela erosão pluvial. O processo de infiltração é controlado igualmente pelas condições que antecedem a chuva. Uma precipitação anterior pode deixar o solo parcialmente saturado. Varia também com as diferentes estações do ano que influem de maneira diversa no desenvolvimento da vegetação. Sofre igualmente influência da existência ou não de lavouras e de seu manejo. Depende também da temperatura que afeta as taxas de evaporação.

As áreas com vegetação possuem maior capacidade de infiltração do que aquelas desprotegidas, e, dessa forma, retardam o fluxo superficial. O sistema radicular da cobertura vegetal torna o solo mais poroso e permeável facilitando, sobretudo a infiltração. Nas regiões vegetadas, principalmente naquelas de florestas, o impacto das gotas de chuva é consideravelmente reduzido pela presença da serapilheira. No processo de infiltração, a umidade do solo é importante, fazendo com que a água infiltrante encontre um filme aquoso aderente às partículas constituintes do solo. Quando o filme se espessa preenchendo os poros maiores, a água passa a mover-se mais rapidamente no subsolo (REICHARDT, 1975).

**6.2.2.7 Escoamento** – a água da chuva, ao atingir a superfície terrestre, pode escoar na superfície, em subsuperfície e subterraneamente. O predomínio e a importância relativa desses tipos de escoamento dependem da combinação de diversos fatores, em especial as condições climáticas, as características morfométricas, as condições bióticas e edafológicas e as atividades antrópicas. As mudanças climáticas igualmente influem no comportamento do escoamento, inclusive invertendo a tendência evolutiva dos sistemas de escoamento (POPOLIZIO, 1975).

O escoamento superficial, conforme Popolizio (1975) é aquele que ocorre livremente na superfície terrestre sobre uma película de água aderida ao solo, enquanto o subsuperficial acontece dentro da parte vazia do solo, entre grãos, partículas e materiais semidecompostos relativamente soltos.

Após o impacto das gotas, a água da chuva pode evaporar, infiltrar ou escorrer na superfície do solo. A evaporação é menos significativa em clima úmido, ao passo

que a infiltração, regulada pela permeabilidade, desempenha um papel importante na água que resta e escoar sobre a superfície do terreno.

A relação entre a água que se infiltra e aquela que escorre na vertente obedece à lei fundamental da infiltração, de acordo com o proposto por Fournier (1960), onde numa coluna de solo de altura [L] sobre a qual é mantida permanentemente uma espessura de água [H], após um certo tempo, o débito da coluna é constante e a velocidade [V] de penetração da água pode ser expressa pela equação:

$$V = K (H + L) / L$$

Quando a chuva cai sobre um solo seco, no início do fenômeno não há mais do que uma pequena altura de solo úmido sotoposta a certa altura de água. A relação  $(H + L) / L$  é, então, grande. Logo em seguida, a água penetra rapidamente no solo e o valor de [L] aumenta. Como [H] pouco varia, a relação tende para a unidade, e [V] para [K]. O valor de [K] constitui uma *característica hidrodinâmica* do solo que condiciona a repartição das águas pluviais de infiltração e de escoamento. Se este coeficiente permite a todo o momento, a infiltração de uma quantidade de água superior ou igual aquela fornecida pela chuva, não haverá escoamento superficial sobre o solo. Caso contrário, formar-se-á uma lâmina de água que escorrerá vertente abaixo, dando início ao transporte de detritos terrosos (FOURNIER, 1960).

O valor do coeficiente [K] depende da estrutura do solo, sendo responsável pelo escoamento. Quanto mais porosos um solo, tanto maior o valor de [K], e dessa forma mais intensas devem ser as chuvas para que haja escoamento superficial. Quando, ao contrário, a estrutura do solo e a porosidade não são boas, o valor de [K] é baixo e o escoamento se produz facilmente. A permeabilidade em subsuperfície também influi no início do escoamento. Um horizonte com baixa permeabilidade poderá diminuir ou interromper o movimento descendente da água saturando o solo e dando início ao escoamento (FOURNIER, 1960).

A água que não se infiltra na superfície do solo continua a fluir encosta abaixo até encontrar um solo mais permeável ou atingir um canal definido de drenagem, ou eventualmente, um corpo hídrico. As zonas das baixas encostas saturadas pelo fluxo lateral (ou pelo fluxo de retorno) são características de pequenos vales sob condições climáticas úmidas. Ocorrem nas faixas ribeirinhas ou em cavos (*hollows*)

com níveis elevados de lençol freático, bem como em solos com alto teor de umidade. Essas zonas, quando saturadas com água, originam um fluxo superficial logo após o início da chuva. A zona saturada expande-se rapidamente para cima, ampliando a área do fluxo originado pela chuva. Com o término da precipitação, a área do fluxo superficial diminui progressivamente até reduzir-se aquela sujeita ao 'fluxo de retorno'.

Numa bacia de drenagem, a água é armazenada no solo como água subterrânea, ou na superfície em lagos. As áreas com solos profundos ou com rochas muito diaclasadas recobertas por florestas possuem, em geral, alta capacidade de armazenamento de água. Por outro lado, as áreas muito erodidas e com solos pouco profundos e com vegetação aberta têm capacidade bastante limitada de retenção de água na bacia hidrográfica. Considerando-se diversas bacias hidrográficas de mesmas dimensões e formas, as taxas de infiltração e a capacidade de armazenamento hídrico são em geral muito diferentes entre si (BIGARELLA, 2003).

Grandes cadeias de montanhas e continentes inteiros foram no passado e continuam sendo rebaixados altimetricamente pela remoção dos detritos da alteração das rochas, os quais são transportados em direção aos oceanos ou a níveis de base intermediários nas regiões de drenagem endorréica (drenagem de que corre para o interior não atingindo o oceano, muito comum em regiões desérticas onde vão desaguar em áreas baixas, formando lagos rasos de formação efêmera na época de chuvas mais fortes ou controlados por bacias lacustres) (HOLE, 1968, *apud in* BIGARELLA, 2003).

Vários tipos de erosão atuam no desgaste dos materiais constituintes da crosta terrestre através de processos ligados:

- à erosão marinha ao longo da costa;
- à erosão submarina nos canhões submarinos;
- à erosão fluvial;
- à erosão eólica;
- à erosão nas encostas;
- à erosão causada pelos desmoronamentos originados pela ação da gravidade.

O papel da ação marinha na denudação extensiva de caráter continental parece pouco provável, sendo restrita a áreas menores. Como agente marinho, o papel destrutivo das ondas e correntes é muito efetivo, originando falésias que recuam terra adentro. Por outro lado, as correntes são também responsáveis pela formação de esporões, barras, tômbolos, restingas e praias. O resultado da erosão marinha prolongada na linha de praia, tanto submergente como emergente, pode arrasar promontórios, barras, lagoas, pântanos intercotidais deixando uma costa relativamente plana e abrupta (Quadro 2).

Agentes envolvidos	Processos atuantes na liberação de material solto	Processos de transporte do material
Água corrente: rios em superfície e subsuperfície, fluxos laminar e em filetes	Ação hidráulica	Tração, saltação, suspensão, solução e flotação
Água subterrânea, não incluindo correntes subterrâneas	Lixiviação e corrosão	Solução
Ondas, correntes marinhas e marés	Ação hidráulica	Tração, saltação, suspensão, solução e flotação
Ventos	Abrasão e deflação	Tração, saltação e suspensão
Geleiras	Abrasão, fragmentação e sapamento	Tração e saltação
Gravidade	Movimentos de massa	Tração e saltação

**Quadro 2** – Papel dos diversos agentes de erosão (baseado em Hole, 1968)

### 6.2.3 Formas, agentes e tipos de erosão

Os processos erosivos são complexos e dependentes de vários fatores. Num estudo geral tem-se que considerar as formas de erosão, os agentes erosivos e os tipos de erosão. Existem duas formas de erosão dos solos: a geológica e a acelerada.

A erosão geológica efetua-se dentro das condições naturais do ambiente, sendo menos evidente e percebida apenas com o decorrer do tempo, mas pode ser também rápida, no caso de movimento de massas induzidos por chuvas intensas. A ação acelerada implica na remoção de grande massa de material em curto prazo, abrindo sulcos mais ou menos profundos na superfície do terreno, destruindo o solo no meio rural e as propriedades na área urbana, além de afetar as obras de engenharia de modo geral. Na erosão acelerada há interferência antrópica (que pode ser também lenta), ou decorre de mudanças climáticas, que fazem com que as

taxas e intensidades erosivas sejam maiores do que as verificadas na erosão dita normal (BIGARELLA, 2003).

### **6.2.3.1 Formas de Erosão**

#### **6.2.3.1.1 Erosão acelerada, ou antrópica**

Existe uma diferença entre a erosão geológica normal do solo (ou natural) e a acelerada na qual a atividade antrópica subsequente desempenha um papel importante. A erosão geológica é aquela que atua normalmente sem interferência do homem. A erosão acelerada desenvolve-se com taxas muito incrementadas quando comparada àquelas da erosão normal. Inicia-se muitas vezes de forma muito lenta, passando a sofrer interferências posteriores que aceleram o processo.

O período Neolítico, também chamado de Idade da Pedra Polida (por causa de alguns instrumentos, feitos de pedra lascada e pedra polida), é o período da Pré-História que começa em 8000 a.C. Durante este período surge a agricultura, e a fixação resultante do cultivo da terra e domesticação de animais para o trabalho provoca o sedentarismo (moradia fixa em aldeias). As primeiras aldeias são criadas próximas a rios, de modo a usufruir da terra fértil (onde eram colocadas sementes para plantio) e água para homens e animais. Também neste período começa a domesticação de animais (cabra, boi, cão, dromedário, etc). O trabalho passa a ser dividido entre homens e mulheres, os homens cuidam da segurança, caça e pesca, enquanto as mulheres plantam, colhem e educam os filhos. A disponibilidade de alimento permite também às populações um aumento do tempo de lazer e a necessidade de armazenar os alimentos e as sementes para cultivo leva à criação de peças de cerâmica, que vão gradualmente ganhando fins decorativos (Site do WIKIPEDIA).

Desde este período, o homem vem afetando o ambiente de forma mais ou menos intensa, modificando as condições naturais, criando novas situações para a atuação de fenômenos erosivos acelerados, ao utilizar práticas agrícolas inadequadas à conservação do solo. Modernamente promove a compactação do mesmo com uso de maquinária, ou faz cultivo seguindo as linhas de maior declividade do terreno, ou deixa o solo desprotegido por longo período de tempo.

As taxas naturais de erosão variam consideravelmente, dependendo em grande parte das condições climáticas, da cobertura vegetal, do tipo de solo, do embasamento rochoso e da morfologia do terreno. Segundo Cooke & Doornkamp (1990), nos Estados Unidos as taxas de erosão natural do solo são, via de regra, inferiores a 750 kg/ha/ano. A erosão acelerada, de grande poder destrutivo, ocorre tanto na forma em lençol como naquela em canal ou em ravina. Ambas as formas são favorecidas pela redução da cobertura vegetal e por outros fatores, como relevo, pluviosidade, tipo de solo, granulometria, entre outros.

Com referência à erosão acelerada, Emmett (1968) menciona os embutimentos epicíclicos dos vales aluviais do sudoeste americano ocorridos no século XIX. Na planície aluvial, os ravinamentos cortaram os depósitos dos últimos milhares de anos caracterizados pela presença de canais preenchidos, bem como por terraços de idades distintas, evidenciando um processo agradacional descontínuo. Nessa região, a erosão acelerada ocorreu entre 1880 e 1890 correlaciona-se ao período no qual se verificou um superpastoreio que provocou uma erosão rápida dos vales aluviais, sem que tivesse ocorrido qualquer mudança climática significativa. Aliás, uma análise dos registros pluviométricos em Santa Fé (Novo México), revelou que apesar da ausência de mudanças seculares apreciáveis nos totais mensais e anuais, houve nos anos de maior atividade erosiva, a ocorrência incomum de pesadas chuvas de verão. Entretanto esta constatação não explica a presença anterior à colonização de ciclos erosivos similares. A deterioração da cobertura vegetal seria a explicação mais adequada para os ravinamentos anteriores à atividade antrópica. Em alguns lugares, certas evidências sugerem que a degradação (ravinamento) acompanha o incremento da aridez, e a agradação o da umidificação do clima. Entretanto, em outros locais, as evidências indicam o contrário. (EMMETT, 1968).

O ravinamento é também uma consequência da rarefação da cobertura vegetal resultante das atividades agrárias ou de pastoreio. Nas pesquisas sobre erosão têm sido dada ênfase ao estudo da problemática erosiva nas principais regiões agrícolas do globo, bem como nas áreas sujeitas a incêndios florestais, aos grandes desmatamentos e às queimadas e campos e savanas.

### **6.2.3.1.2 Erosão geológica (ou geomorfológica)**

É aquela processada normalmente, sendo também chamada erosão natural ou normal, envolvendo o arranque das partículas ou materiais (solos, formações superficiais e rochas) e o seu transporte, ou deslocamento, sem intervenção humana, atuando paulatinamente em todos os meios. Nesse processo geomorfológico natural, pode-se dizer que todas as formações que nos rodeiam têm sido modeladas por erosão geológica (CARVALHO, 2008).

### **6.2.3.2 Agentes Erosivos**

Os agentes erosivos são os elementos do meio físico que causam, ou afetam, diretamente a erosão, podendo ser agentes *ativos* e *passivos*, conforme Quadro 3.

Dos *agentes ativos* podem-se citar a água, temperatura, insolação, vento, gelo, neve, a ação de microorganismos e a ação humana.

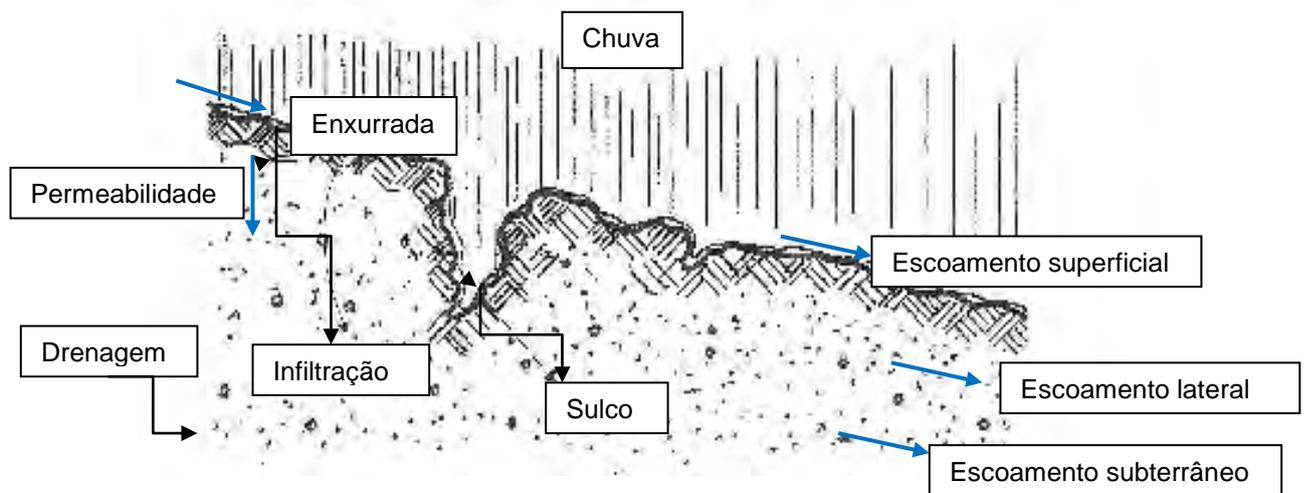
A água, um agente ativo, representa, na maior parte dos fenômenos erosivos, um papel maior que o da gravidade, um agente passivo, porém em muitos deles os dois agentes estão estreitamente ligados.

As águas de chuvas podem originar vários efeitos, dependendo de sua intensidade, quantidade, duração e frequência. Uma chuva forte de certa duração pode provocar grandes eventos erosivos no solo. Se a mesma precipitação cair num tempo maior, causará menores estragos, porque as gotas terão menor peso e não atuarão fortemente. Por outro lado, o solo vai se saturando gradualmente, havendo um tempo de escoamento, sendo que não ocorrerá formação de enxurradas que promovam forte “lavagem” do solo, conseqüentemente, transportando maior quantidade de sedimentos (CARVALHO, 2008).

Erosão							
Formas de erosão				Agentes erosivos			
Geológica ou normal	Acelerada, induzida ou antrópica	Ativos		Passivos			
		Água		Topografia			
		Temperatura		Gravidade			
		Insolação		Tipo de solo			
		Vento		Cobertura vegetal			
		Gelo		Formações superficiais			
		Neve		Práticas antrópicas			
		Ação de microorganismos					
		Ação de animais					
Ação humana							
Tipos de erosão							
Erosão devido a sais solúveis ou de minerais	Eólica	Fluvial	Hídrica superficial	Remoção em massa		Provocada por ação humana ou de animais	De eventos extremos
Decomposição de materiais solúveis pela ação da água	Poeira	Escavação	Erosão pluvial ou por embate	Lenta	Rastejo, rastejamento ou cripe	Em obras diversas	Por enchente
	De transporte pelo ar	Erosão de margem	Erosão em lençol ou laminar		Solifluxão	Por desmatamentos	Por terremotos
	De transporte na superfície	Erosão de leito	Erosão por escoamento difuso, por ravina, sulcos ou dedos	Rápida	Desprendimento de terra ou deslizamento	Na agricultura por aração de solos	Por vulcanismos
			Erosão por escoamento difuso intenso		Escorregamento superficial ou ruptura de talude	Na pecuária como pisoteio de gado	Por tornados e outros
			Erosão por escoamento concentrado (vossoroca)		Escorregamento profundo		Pela variabilidade climática

**Quadro 3** - Esquema Geral da Erosão – Formas, Agentes e Tipos (in CARVALHO, 1982)

Processada a erosão pluvial, a água passa a ter efeito de infiltração e de escoamento. As águas de infiltração dão lugar a movimentos de remoção de materiais quando a umidade excessiva provoca a perda de coesão do solo, ou seja, quando excede os limites de plasticidade ou de liquidez. Também as águas de infiltração originam as alterações de dissolução dos minerais. As águas de escoamento são aquelas que se escoam pela superfície do terreno, em enxurradas de forma difusa, laminar ou concentrada, e cuja força de arrasto e de transporte é variável segundo os diferentes fatores físicos. Dão lugar aos fenômenos de erosão hídrica que podem evoluir até a formação de ravinas e posteriores voçorocas, se houver condições para isso (AMARAL, 1981), ver figura 10.



**Figura 10** – Escoamento da água na superfície do solo (modificado de Amaral, 1981, in CARVALHO, 2008)

O vento é um agente de importância secundária, sendo o responsável por transporte de material já desagregado e tem grande importância nos terrenos planos, onde não se processa escoamento, nas regiões áridas, semi-áridas e nas superfícies deserticas onde a vegetação não protege o solo adequadamente.

A ação de microorganismos e animais têm um papel muito reduzido em comparação com outros agentes, assim como o gelo e a neve não causam nenhum problema em nosso país, mas têm grande importância onde existem esses fenômenos.

A ação humana, responsável pela erosão antrópica, é um agente erosivo ativo que tem atuação crescente com o aumento da população e a ocupação territorial. Essa erosão se manifesta diretamente pelas escavações, movimentos de terras na construção civil, na agricultura e em todas as ações diretas do homem na superfície do solo.

Os *agentes passivos* são a topografia, a gravidade, a tipologia do solo, a cobertura vegetal, as formações superficiais e as práticas gerais realizadas pelo homem (ação antrópica) (CARVALHO, 2008).

A topografia, levando em conta o aumento da declividade e o comprimento da rampa, provoca um aumento da erosão, condicionados também pela rugosidade da

superfície. Nos terrenos de maior declividade, a água da chuva escoar tão rapidamente que não há infiltração, provocando um maior esforço nos terrenos, e, conseqüentemente, uma maior erosão.

A gravidade é outro agente de grande importância na ação erosiva, sendo que a declividade dos terrenos favorece a sua atuação. O peso de cada partícula, conjugado com a declividade, permite o maior ou menor deslocamento da partícula.

O tipo do solo, nas formações superficiais, é muito variável e representa grande importância na erosão. As rochas sofrem erosão muito lentamente, mas os solos podem ter uma erosão acelerada dependendo da sua textura e estrutura. A textura, representa o tamanho das partículas que o compõe, enquanto a estrutura representa o arranjo e o agrupamento dessas mesmas partículas, influenciando esses aspectos na permeabilidade. O solo arenoso é de textura grossa e a infiltração da água se processa mais facilmente. O solo argiloso é de textura fina, apresentando dificuldade de infiltração. Os solos arenosos não são bem estruturados e têm pouca resistência à força de arrasto, enquanto os argilosos uma maior coesão entre as partículas, impedindo praticamente uma maior infiltração e, conseqüentemente, maior resistência às forças de arrasto pelo escoamento superficial das águas (BIGARELLA, 2003).

A cobertura vegetal protege o solo contra a erosão pluvial, aumentando a evapotranspiração e a infiltração, diminuindo o escoamento. Parte da água da chuva não chega ao solo, sendo interceptada pela folhagem e evaporada diretamente; outra parte se escoar pelos ramos e troncos lentamente, indo ao solo para se infiltrar. Nem todos os tipos de vegetação oferecem a mesma proteção contra a erosão. Uma floresta é muito mais eficiente nessa proteção do que uma cobertura de vegetação rasteira.

As formações superficiais são os materiais passíveis de erosão que afloram na superfície, como rochas, rochas alteradas ou depósitos aluviais, coluviais e glaciais. A erosão dessas formações superficiais é muito variável e depende da consistência destes, do comportamento na infiltração e no escoamento, da espessura da camada, da declividade e das fraturas existentes (CARVALHO, 2008).

As ações antrópicas, correspondendo às práticas gerais realizadas pelo homem, têm grande importância no tipo e intensidade dos processos erosivos. Como foi citado, é uma ação que se processa diretamente, como agente ativo, ou indiretamente, como agente passivo. Após os trabalhos do homem, o solo que foi modificado de sua condição primária, de cobertura, de topografia ou de outras, passa a ter uma outra condição, passível de acelerar a erosão. Essa ação ocorre de diversas formas, às vezes temporariamente e outras continuamente, tanto na construção de barragens, de estradas, de obras de terraplenagem em geral, desflorestamentos, e, principalmente na agricultura. Na realidade, extensas áreas, hoje em dia, mostram a “passagem” do homem, deixando de ser produtiva para a agricultura e se degenerando em desertos (BIGARELLA, 2003).

### **6.2.3.3 Tipos de Erosão**

A erosão pode se processar segundo quatro grandes tipos: erosão eólica, erosão hídrica superficial, a de remoção em massa e a erosão fluvial (BIGARELLA, 2003; CARVALHO, 2008). Existem outros tipos de classificação, porém, para esta dissertação abordaremos estes tipos citados.

**6.2.3.3.1 Erosão eólica** – ou erosão provocada pelo vento, ocorrendo quando o terreno está muito seco e as partículas do solo perderam sua coesão. Essa erosão depende, ainda, das condições da superfície do terreno, tamanho e estabilidade das partículas, rugosidade da superfície, velocidade e turbulência do vento ou outro fator de influência (LECARPENTIER, 1977). A ação do vento provoca movimento das partículas pelo ar e pela superfície dos terrenos. Nuvens de poeira são verificadas com frequência, podendo ocorrer em grandes proporções, como nos desertos, sendo que às vezes pode prejudicar comunidades distantes. Ocorrências de tempestades de areia sobre a cidade do Cairo já foram verificadas por diversas vezes, enquanto que os seus sedimentos alcançam as costas americanas.

**6.2.3.3.2 Erosão fluvial** – ocorre nos cursos d’água podendo se processar através de escavações locais ou geralmente como erosão de leito e de margens. Se processa de modo contínuo e espontâneo pela ação das correntes dos rios. É de grande interesse na morfologia fluvial podendo explicar a formação dos rios e da rede hidrográfica. Também é responsável pelo alargamento e aprofundamento do

leito dos rios. A erosão de leito é ocasionada pela ação da corrente enquanto a erosão de margem pode ser pela ação da corrente, pela ação de ondas ou mesmo pelo encharcamento (saturação) do solo marginal, provocando os desabamentos. O material erodido é transportado pelos rios, processando-se uma deposição que pode ser temporária onde esse material é denominado *aluvião*. Segundo o estágio de evolução do curso d'água, haverá maior ou menor transporte de sedimentos (CARVALHO, 2008).

**6.2.3.3.3 Erosão hídrica superficial** – pode se processar em forma de erosão pluvial, erosão por escoamento difuso, erosão por escoamento difuso intenso, erosão laminar e erosão por escoamento concentrado. A erosão pluvial ou erosão por embate, é produzida pelo impacto das gotas de chuva ao caírem sobre superfícies desprotegidas. Esse processo é exercido tanto em terrenos planos como em inclinados e também em terrenos cultivados ou matas, desde que haja uma área descoberta. A desintegração parcial dos agregados naturais do solo, liberta partículas finas, deslocando-as e projetando-as a uma certa distância. O golpe das gotas afeta principalmente a estrutura da capa superficial, predispondo a um despreendimento das partículas, que em seguida serão mobilizadas pelo escoamento. Uma chuva forte e de grande duração poderá erodir significativamente o solo (CARVALHO, 2008).

A erosão em lençol ou laminar se processa durante as fortes precipitações, quando o solo superficial já está saturado, sendo produzida por um desgaste suave e uniforme da camada superficial em toda sua extensão. Este tipo de erosão se desenvolve quando há pouco obstáculo, permitindo o escoamento de uma lâmina d'água, sendo um fenômeno muito comum em regiões semi-áridas. É de difícil observação e pode ser percebido pelo aparecimento de raízes ou marcas na estruturas prediais (BERTONI & LOMBARDI NETO, 2008).

A erosão por escoamento difuso ou erosão em sulcos e ravinas é uma forma caracterizada por filetes de água que se dividem em braços que se espalham e se juntam constantemente, infiltrando-se depois de percorrer pouca distância, depositando o material transportado. A água se escoando pelo terreno pode ir formando depressões que pouca a pouca vão aumentando para sulcos. Esse tipo de erosão é generalizado e existe mesmo sob uma cobertura vegetal, sendo um agente

de transporte do material já desagregado pelas chuvas ou outros fatores, tendo uma capacidade reduzida de arranque.

A erosão por escoamento difuso interno é semelhante à anterior, mas os filetes de água percorrem maiores distâncias transportando maior quantidade de material, havendo um escoamento que vai se aprofundando e se concentrando.

A erosão por escoamento concentrado pode ser provocada por falta de boa estrutura de solo que tenha a camada impermeável profunda, permitindo que os sulcos formados pouco a pouco sofram deslizamentos e desabamentos, terminando por formas as voçorocas (BERTONI & LOMBARDI NETO, 2008).

**6.2.3.3.4 Erosão por remoção em massa** – corresponde a movimentos de uma quantidade substancial de materiais das formações superficiais e de rochas sob a influência combinada da gravidade e de saturação do solo pela água – um terreno, de acordo com o teor de água presente, pode plastificar-se ou liquefazer-se, perdendo a coesão interna, assim, a ação da gravidade pode permitir sua deformação. A erosão por remoção em massa pode se processar em várias modalidades, de acordo com o fluxo de material, sendo lento ou rápido (CARVALHO, 2008).

A do tipo lento pode ser por rastejo (*creeping*) e solifluxão. O rastejo é o movimento coletivo lento e contínuo de solo ou de rocha decomposta, comportando-se como um escorregamento de camadas superficiais sobre camadas mais profundas. Pode ser, às vezes, percebido pela deformação que provoca em árvores inclinando-as, como também em cercas ou postes ou pelo seu deslocamento em terrenos inclinados.

A *solifluxão* é o movimento lento de determinada massa de solo e/ou rocha decomposta que esteja saturada de água, sendo causado por chuvas de maior intensidade e duração. A erosão por erosão de massa do tipo rápido é de muito interesse no estudo da estabilidade de taludes, podendo se processar por três formas: por desprendimento de um volume de solo, por escorregamento superficial e por escorregamento profundo. Esses movimentos, originados pela saturação de água no solo, quando caem nos pequenos corpos hídricos podem provocar

enchentes bruscas, deslocando grandes massas de água, ou, no mínimo, contribuir diretamente com grande quantidade de sedimentos que irão provocar assoreamento de rios ou açudes (CARVALHO, 2008).

O desprendimento de terras ou deslizamento é uma porção de solo que se desprende do resto do talude. O escorregamento superficial ou ruptura do talude se caracteriza pelo deslocamento rápido de uma massa de solo que escorra ao longo de uma “curva de escorregamento ou deslizamento” passando pelo pé do talude, e o escorregamento profundo é semelhante ao anterior, mas tem por característica a curva de deslizamento passa por um ponto afastado do pé do talude.

**6.2.3.3.5 Erosão provocada por ação humana ou de animais** – é um dos tipos de erosão que atualmente provoca problemas ou benefícios. O ser humano, devido às necessidades, escava o solo ou produz grandes transformações no meio ambiente considerando seu bem estar, seja em obras, por desmatamentos, na agricultura por aração do solos e por inúmeras outras razões (LECARPENTIER e outros, 1977). A ação erosiva provocada por animais é muito menor. Pode-se citar questões na pecuária como o pisoteio de gado que produz transformações no solo, propiciando ao desencadeamento de processos erosivos.

**6.2.3.3.6 Erosão devido a eventos extremos** – tais eventos podem causar grandes erosões ou predispor o solo a desgastes. Enchentes produzem muito sedimento pela devastação que ocasiona. Da mesma forma outros eventos como terremotos que desestruturam o solo, tornados e tormentas também produzem grandes quantidades de sedimentos. A variabilidade climática devido ao aumento da temperatura global ocasiona maior evaporação das superfícies líquidas com decorrência de precipitações mais frequentes. Como chuva e o escoamento das águas produz erosão é evidente que a produção de sedimentos também aumenta devido às mudanças climáticas. Estes tipos de erosão ainda deverão ser melhor estudados pelas Geociências (CARVALHO, 2008).

### **6.3 A EROÇÃO DE SOLOS E OS PROBLEMAS SOCIAIS E AMBIENTAIS CAUSADOS.**

Os solos são um recurso estratégico, não renovável, de alta importância social, econômica e ambiental. Entretanto, práticas agrícolas inadequadas são responsáveis em grande parte pelo processo de erosão, contribuindo para o decréscimo da produtividade. A erosão hídrica, principal forma de degradação dos solos no Brasil, resultante da ação conjunta do impacto da gota de chuva e da enxurrada sobre o solo, além de partículas, transporta nutrientes, matéria orgânica e defensivos agrícolas, causando prejuízos à atividade agropecuária, com sérias perdas na produtividade, assoreamento de corpos hídricos e de represas.

Cerca de 1,5 bilhões de hectares (aproximadamente 10% da superfície terrestre) já foram irreversivelmente degradados pelo processo de erosão. Além disso, a produtividade agrícola brasileira, de aproximadamente 150 milhões de t ha ano<sup>-1</sup>, pode tornar-se economicamente inviável devido à erosão ou degradação induzida pela erosão. Ao Brasil pertence cerca de 20% dos solos agricultáveis do mundo (BATISTA FILHO, 2007), entretanto, a produção agrícola causa vários impactos ao meio, o que representa custos para os indivíduos e para a sociedade. Entre eles, pode-se citar a degradação de solos, uma das conseqüências da utilização de métodos inadequados de plantio e manejo (GARCIA *et. al.*, 2005). Isto ocorre, principalmente, porque o modelo agrícola brasileiro, baseado na eficiência econômica, visa ganhos indiscriminados de produção. Também em nosso país, a avaliação econômica dos danos causados pela erosão à atividade agrícola restringe-se à quantidade física e monetária do volume de solo levado, juntamente com o equivalente-fertilizante, que se referem aos nutrientes contidos no solo carregado (RODRIGUES, 2001).

O manejo inadequado do solo o expõe a fatores intempéricos, induzindo à destruição gradativa de suas propriedades físicas, químicas e biológicas, bem como ao risco de erosão (CASSOL & LIMA, 2003). Além disso, práticas agrícolas inadequadas contribuem para a baixa produtividade agrícola (BERTONI & LOMBARDI NETO, 1999).

A erosão de solos é um problema mundial, e, embora seja mais sério nos países em desenvolvimento, atualmente tem sido motivo de preocupação nos países tecnologicamente adiantados. Nos Estados Unidos, por exemplo, a erosão de solos

constituiu-se numa séria preocupação, desde o início do século XX. Segundo Bentley (1985), neste século a questão de degradação dos solos americanos vem recebendo cada vez mais atenção. Neste trabalho, este autor citado aponta ainda, que devem ser tomadas medidas mais energéticas, para que se evite a erosão dos solos. Isto deve ser feito através da implementação de práticas conservacionistas, as quais objetivam melhorar o manejo dos recursos hídricos e da própria terra.

Morgan (1986) chama a atenção que os problemas da erosão dos solos sempre estiveram associados à agricultura em regiões tropicais e semi-áridas, mas nos últimos anos ela tem atingido também, áreas climáticas diferentes nos países desenvolvidos, não apenas em áreas agrícolas, mas também destinadas à recreação.

Até mesmo na Europa, mais de um terço do território da região mediterrânea, historicamente a região europeia mais gravemente afetada pela erosão, onde os relatos de erosão do solo nesta região datam desde 3000 anos atrás, as perdas médias anuais de solo são superiores a 15 ton/ha (dados da Confederação Nacional das Cooperativas Agrícolas e do Crédito Agrícola de Portugal). Neste continente, onde os regimes de chuvas não são tão propícios ao desencadeamento dos processos erosivos em alta escala, e onde o contexto social tem estado atento, esses problemas têm ocorrido com maior frequência. Nos últimos anos, foram realizados, vários encontros para tratar desse tema. Um deles foi o *workshop* sobre “Erosão dos Solos em Áreas Agrícolas”, realizado em Coventry, Inglaterra, em 1989, com participação de especialistas de todo o mundo.

Têm sido feitos esforços para se alcançar a compreensão dos mecanismos e processos de erosão dos solos. Neste sentido, Guerra (1991) alertou para a necessidade de serem desenvolvidos projetos que levem em consideração o exercício de uma metodologia de pesquisa integrada; um método em que se levem em conta as propriedades do solo, os efeitos da cobertura vegetal, e das formas de uso da terra – tudo isto em diferentes escalas espaciais e temporais.

As opiniões sobre as causas e conseqüências da erosão dos solos são, muitas vezes, contraditórias. Existe uma infinidade de explicações, teorias e modelos de abordagem do assunto. Mas o que há, ainda, em escala insuficiente, é uma metodologia que procure abordar a erosão e conservação dos solos, levando em

consideração a imbricação dos aspectos técnicos do problema, com suas implicações sócio-econômicas e políticas. Segundo Blaikie (1985), há várias maneiras de se abordar o problema: ideologicamente, politicamente e metodologicamente. Mas o problema é complexo, e qualquer que seja a forma de compreendê-lo, permanece três fontes de incerteza:

a) A dificuldade da obtenção de dados precisos sobre a erosão e degradação dos solos, para as diversas áreas do planeta, e por um longo período de tempo (série histórica);

b) A dificuldade em 'isolar', no processo da erosão dos solos, os efeitos humanos, dos efeitos naturais;

c) A multiplicidade de abordagens pelas quais a erosão dos solos é abordada por biólogos, geógrafos, geólogos, pedólogos, agrônomos, engenheiros, historiadores, cientistas sociais, economistas, etc.

As três fontes de incerteza associam-se, de forma plena, a não consideração dos componentes sociais, políticos e econômicos da erosão dos solos. Este sério problema ambiental ocorre de forma difusa no mundo, e em escala maior ou menor, segundo a desigual distribuição do efetivo humano, e também segundo a diversidade de distribuição dos investimentos tecnológicos e científicos, nos diferentes espaços geográficos (GUERRA, 1991).

Os motivos da erosão, especialmente da chamada erosão acelerada, estão intimamente relacionados com as atividades humanas, e por este motivo, a intervenção do Estado não pode deixar de levar em conta, as contradições existentes na própria sociedade. Esta intervenção afeta a vida dos proprietários rurais, tanto o das áreas erodidas, com daquelas outras, onde ocorre o assoreamento, resultante do transporte dos sedimentos. A intervenção do Estado estará envolvendo questões, desde a reestruturação dos sistemas de preços e créditos, com implicações na formação de divisas com as exportações, até modificações na estrutura legal, e mesmo, constitucional, do país, ao passar pelos procedimentos de apropriação e de posse da terra e de sua utilização para fins sociais e econômicos (GUERRA, 1991).

Segundo Graziano Neto (1986), o desenvolvimento tecnológico da agricultura, no capitalismo, tem instalado sistemas de produção altamente instáveis que requerem, por sua vez, técnicas cada vez mais complexas para seu controle. O resultado final das constantes tentativas de dominar a natureza é a sua própria destruição. O solo é um dos elementos do sistema terrestre que mais sofre, e a sua erosão causa danos, muitas vezes irreversível para a agricultura. O errôneo manejo dos solos, em condições de agricultura tropical, tem levado os solos a perderem fertilidade (pela destruição da matéria orgânica, pela eliminação da microvida, pela lixiviação dos nutrientes) e a perderem a sua estabilidade física, ficando sujeito à compactação e à erosão.

Muito embora haja vários trabalhos que documentem a erosão dos solos e as perdas sofridas pela agricultura, devido aos processos erosivos, há quem opine que a erosão dos solos não é um problema tão importante, porque as inovações técnicas introduzidas pelos fazendeiros, pelos governos e pelos setores privados de pesquisa, conseguem resolver e conviver com o problema. A este propósito, Blaikie (1985) afirma que estas práticas de cultivo e de conservação dos solos, estão na subordinação das possibilidades de acesso às sementes selecionadas, aos fertilizantes químicos, à assistência técnica e ao crédito rural.

No caso do nosso estudo, na bacia hidrográfica do Alto-Paraíba, seria grande o acervo de críticas às possibilidades apontadas acima, entre eles:

- Os pequenos proprietários, na maioria das vezes, são ignorados tanto pelo Estado, quanto pela iniciativa privada, do que resulta uma falta de vontade política para investimentos em pesquisa, assistência técnica e aplicação de créditos rurais, nestas áreas marginais;
- Mesmo quando há avanços tecnológicos, capazes de solucionar o problema da erosão dos solos, esses pequenos proprietários não têm acesso a tais avanços, ficando, portanto, tão marginalizados quanto os próprios espaços sócio-econômicos onde vivem.

As desigualdades que existem, em relação ao acesso às oportunidades tecnológicas e econômicas adequadas, entre a maioria da população afetada pela

erosão, e os grupos poderosos são, ao mesmo tempo, causa e conseqüência da erosão dos solos.

Quanto aos programas de conservação dos solos para que sejam bem sucedidos, é preciso que levem em consideração questões políticas, e que seja feita uma análise profunda da situação social e econômica, das áreas onde esses programas de conservação serão 'implementados'. Vale dizer que os estudos detalhados das propriedades dos solos da Paraíba, bem como das características das encostas, dos regimes pluviométricos, não têm se mostrado suficientes para a elaboração desses programas. Gonçalves (1989) procura demonstrar como natureza e cultura se condicionam reciprocamente, o que pressupõe não assimilar uma coisa a outra, mas procurar entender que o homem, por natureza, 'produz cultura'. Este mesmo autor também afirma que subjacentemente às relações sociais instituídas em meio a tensões, conflitos e lutas, elabora-se um conceito determinado de natureza, que fundamentalmente dela destaca o homem. Isto posto, fica fácil entender porque as políticas de conservação dos solos geralmente fracassam. Mas vários são os motivos deste fracasso, citados a seguir:

- Falhas técnicas de conservação dos solos têm sido apontadas como sendo a causa de um grande número de problemas na política de conservação;
- Muitas técnicas de conservação não se adaptam às práticas agrícolas existente em uma determinada região;
- Na maioria das vezes os proprietários rurais não participam da escolha das técnicas que serão implementadas em suas propriedades;
- As agências encarregadas da implementação das técnicas de conservação dos solos passam frequentemente por problemas, além disso, existe uma falta de coordenação entre as várias instituições envolvidas.

#### **6.4. PERDA DE SOLO MÁXIMA ACEITÁVEL PARA O ESTADO DA PARAÍBA.**

O Departamento de Solos e Engenharia Rural da Universidade Federal da Paraíba, Campus Areia/PB, sob coordenação do Prof<sup>o</sup>. Dr. Ivandro de França da Silva (2008), objetivando determinar a tolerância de perda de solo por erosão para os principais solos da Paraíba, a partir da avaliação de 189 perfis de solos, efetuou estudos através de quatro métodos de avaliação, a saber: Método I, proposto por Lombardi Neto & Bertoni (1975); Método II, modificação do Método I por Bertol & Almeida (2000); Método III, modificação do Método de Bertol & Almeida (2000) e o Método IV, que diferencia do Método III quanto ao grau de permeabilidade, sendo utilizados valores determinados em campo. Todos os valores foram expressos em  $t\ ha^{-1}\ ano^{-1}$ .

Os métodos de estimativa da tolerância de perdas de solo por erosão, embora utilizem atributos que influenciam a erosão do solo e tenham uma base de sustentação lógica e racional, são empíricos, notadamente no que se refere à definição dos fatores de ponderação utilizados para expressar o efeito de cada variável, o que conduz a estimativas de tolerância variáveis para um mesmo solo (BERTOL & ALMEIDA, 2000). Mannering (1981) já havia enfatizado que os métodos para determinação da tolerância de perda de solo por erosão não tinham qualquer base científica para prever taxas de formação de solos e efeitos da erosão sobre a produtividade do solo. Todavia, torna-se importante definir a tolerância para diferentes classes de solo, ainda que por métodos empíricos, com o objetivo de definir um critério de monitoramento da eficácia de sistemas de manejo do solo na redução da erosão (BERTOL & ALMEIDA, 2000).

As informações sobre a tolerância de perdas de solo por erosão podem ser utilizadas em conjunto com a Equação Universal de Perdas de Solo (USLE). Qualquer combinação de práticas agrícolas, avaliada através da USLE, deverá resultar em perdas de solo menores que o limite tolerável, controlando satisfatoriamente o processo de erosão (SKIDMORE, 1982).

A partir da constatação da inexistência de informações sobre os valores de tolerância de perda de solos por erosão para o Estado da Paraíba, esta pesquisa objetivou gerar e disponibilizar estes dados e avaliar os resultados obtidos por

diferentes métodos tendo como base o método proposto por Lombardi Neto & Bertoni (1975).

O trabalho foi realizado no Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Paraíba, em Areia/PB, a partir da compilação de dados de 189 perfis de solos representativos do estado da Paraíba, descritos em diversas fontes de consulta, conforme Tabela 1.

Os perfis de solo descritos em Brasil (1972) foram reclassificados por Campos & Queiroz (2006), segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 1999), em nível de Grande Grupo, sendo o mesmo procedimento adotado para os demais perfis estudados.

As estimativas de tolerância de perda de solo foram calculadas por quatro métodos:

### **Método I**

A tolerância de perda de solo foi calculada pela equação proposta por Lombardi Neto & Bertoni (1975):  $T = h \cdot r \cdot 1.000^{-1}$ , onde: T = tolerância de perdas de solo ( $\text{mm ano}^{-1}$ ); h = profundidade efetiva do solo (mm), limitada a 1.000 mm; r = coeficiente que expressa o efeito da relação textural entre os horizontes B e A na ponderação das perdas de solo ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), e 1.000 = constante que expressa o período de tempo (anos) necessário para desgastar uma camada de solo de 1.000 mm de espessura. segundo o procedimento de Lombardi Neto & Bertoni (1975). O limite de profundidade efetiva do solo em um metro (ou mil milímetros). No cálculo da tolerância de perda de solo é justificado pela suposição de que uma camada de solo de um metro de espessura é desgastada a cada mil anos, desconsiderando a reposição natural de solo (BERTOL & ALMEIDA, 2000).

Solos	Símbolo	Número de perfis	Fonte de consulta
Argissolo Amarelo Eutrófico	PAe	7	2, 11, 13
Argissolo Amarelo Distrófico	PAd	19	1, 3, 11, 14, 18
Argissolo Vermelho Eutrófico	PVe	9	1, 11
Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico	PVAe	6	1, 4, 11, 16
Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico	PVAd	3	1, 11
Argissolo Acinzentado Distrófico	PACd	1	1
	Subtotal	<b>45</b>	
Cambissolo Háptico Ta Eutrófico	CXve	6	1, 6, 11
Cambissolo Háptico Tb Eutrófico	CXbe	3	1, 11
Cambissolo Háptico Ta Distrófico	CXvd	1	13
Cambissolo Háptico Tb Distrófico	CXbd	2	2, 11
	Subtotal	<b>12</b>	
Latossolo Amarelo Eutrófico	LAe	1	9
Latossolo Amarelo Distrófico	LAd	13	1, 10, 11, 13
Latossolo Vermelho Eutrófico	LVe	2	11
Latossolo Vermelho Distrófico	LVd	3	11
Latossolo Vermelho Amarelo Eutrófico	LVAe	2	1, 11
	Subtotal	<b>21</b>	
Luvissolo Crômico Órtico	TCo	16	1, 11, 12
Luvissolo Hipocrômico Órtico	TPo	9	1, 11
	Subtotal	<b>25</b>	
Neossolo Litólico Eutrófico	RLe	14	1, 11, 19
Neossolo Litólico Distrófico	RLd	3	11, 13
Neossolo Litólico Psamítico	RLq	3	11, 14
Neossolo Litólico Húmico	RLh	1	13
Neossolo Regolítico Eutrófico	RRe	4	1, 8, 11
Neossolo Regolítico Distrófico	RRd	3	13, 18
Neossolo Regolítico Psamítico	RRq	16	1, 8, 11, 13, 14
Neossolo Flúvico	RU	3	7
Neossolo Flúvico Ta Eutrófico	RUve	2	1, 13
Neossolo Flúvico Tb Eutrófico	RUbe	6	5, 6, 11
Neossolo Flúvico Sódico	RUn	9	5, 6
Neossolo Flúvico Psamítico	RUq	1	13
Neossolo Quartzarênico Órtico	RQo	5	1, 14, 15
	Subtotal	<b>70</b>	
Planossolo Háptico Eutrófico	SXe	9	1, 11, 14
Planossolo Háptico Distrófico	SXd	2	17, 18
Planossolo Nátrico	SN	1	7
Planossolo Nátrico Órtico	SNo	4	1, 11
	Subtotal	<b>16</b>	
	<b>Total</b>	<b>189</b>	

<sup>(1)</sup>Brasil (1972); <sup>(2)</sup>Brasil (1981); <sup>(3)</sup>Cavalcante Filho (1999); <sup>(4)</sup>Cantalice (1987); <sup>(5)</sup>Chaves et al. (2002a); <sup>(6)</sup>Chaves et al. (2002b); <sup>(7)</sup>Corrêa et al. (2003); <sup>(8)</sup>Leal (2001); <sup>(9)</sup>Lima (1993); <sup>(10)</sup>Nóbrega (1996); <sup>(11)</sup>Paraíba (1978); <sup>(12)</sup>Rolim (2003); <sup>(13)</sup>Santos et al. (2002); <sup>(14)</sup>Santos (2001a); <sup>(15)</sup>Santos (2001b); <sup>(16)</sup>Santos (1998); <sup>(17)</sup>Silva (1997); <sup>(18)</sup>Silva (2000); <sup>(19)</sup>Vieira (1996).

**Tabela 1** - Solos representativos do Estado da Paraíba utilizados neste estudo, número de perfis por solo e fonte de consulta.

## Método II

É uma modificação do Método I, proposto por Bertol & Almeida (2000), quanto ao limite de intervalos na relação textural entre os horizontes A e B e quanto à introdução do teor de argila do horizonte A como variável associada à relação textural. Com os novos valores para a variável “r” do Método I, redenominada de “ $r_a$ ”, a equação é modificada para:  $T = h \cdot r_a \cdot 1.000^{-1}$ , onde: T, h e 1000 são as mesmas definições do Método I, e  $r_a$  = relação que expressa, conjuntamente, o efeito da relação textural entre os horizontes B e A e do teor de argila do horizonte A.

Para uma relação textural inferior a 1,5, a tolerância de perdas de solo de cada perfil foi obtida multiplicando-se a sua profundidade efetiva (limitada a um metro) por um valor “ $r_a$ ” igual a 1,0, 0,9 e 0,8, para solos com teor de argila no horizonte A maior que 40%, entre 40 e 20%, e menor que 20%, e menor que 20%, respectivamente. Para uma relação textural de 1,5 a 2,0, os valores de “ $r_a$ ” utilizados foram de 0,8, 0,7 e 0,6, e, quando superior a 2,0, utilizaram-se valores de “ $r_a$ ” de 0,6, 0,5 e 0,4, para os mesmos intervalos de teores de argila anteriormente referidos.

## Método III

Neste Método, além das variáveis e fatores de ponderação adotados no Método II, foram acrescentadas duas propriedades importantes do ponto de vista da erodibilidade: o teor de matéria orgânica na camada de 0 – 20 cm de profundidade, e o grau de permeabilidade dos solos, conforme sugerido por Galindo & Margolis (1989). O Método III foi proposto por Bertol & Almeida (2000), conforme a equação:  $T = h \cdot r_a \cdot m \cdot p \cdot 1.000^{-1}$ , onde: T, h e 1000 = mesmas definições do Método I;  $r_a$  = mesma definição do Método II; m = fator que expressa o efeito da matéria orgânica na camada de 0 – 20 cm e p = fator que expressa o efeito da permeabilidade do solo.

Com referência ao teor de matéria orgânica, expresso pelo fator “m”, adotou-se o critério de Galindo & Margolis (1989):

- (a) Para solos com teor de matéria orgânica maior que  $2 \text{ g dm}^{-3}$ , multiplicou-se a espessura da camada de solo calculada pelo fator 1,15;
- (b) Para teores de matéria orgânica entre 1 e  $2 \text{ g dm}^{-3}$ , multiplicou-se a espessura da camada de solo calculada pelo fator 1,00;
- (c) Para solos com teor de matéria orgânica menor que  $1 \text{ g dm}^{-3}$ , multiplicou-se a espessura da camada de solo calculada pelo fator 0,85.

A permeabilidade de cada horizonte dos perfis estudados foi baseada em informações de textura e grau de desenvolvimento da estrutura do solo (Tabela 2) nos respectivos horizontes dos solos do banco de dados, segundo a metodologia de Galindo & Margolis (1989):

- (a) Para uma permeabilidade rápida, multiplicou-se a espessura da camada de solo calculada pelo fator 1,15;
- (b) Para uma permeabilidade moderada, multiplicou-se a espessura da camada de solo calculada pelo fator 1,00;
- (c) Para uma permeabilidade lenta, multiplicou-se a espessura da camada de solo calculada pelo fator 0,85.

Textura	Grau de estrutura	Classe de permeabilidade
Argilosa e muito argilosa (argila $\geq 35 \%$ )	Fraca	Lenta
	Moderada	Lenta
	Forte	Moderada
Média ( $15 \% \leq \text{argila} \leq 35 \%$ )	Fraca	Moderada
	Moderada	Moderada
	Forte	Rápida
Arenosa (argila + silte $\leq 15 \%$ )	Fraca	Moderada
	Moderada	Rápida
	Forte	Rápida

**Tabela 2** – Determinação das classes de permeabilidade do solo em função da textura e grau de estrutura, segundo Galindo & Margolis (1989).

#### **Método IV**

O Método IV é uma modificação do anterior, considerando-se valores de permeabilidade do solo obtidos em campo. A definição do fator que expressa a permeabilidade foi baseada na distribuição dos diferentes solos em classes de permeabilidade, segundo Silva & Andrade (1984). A permeabilidade foi classificada como rápida, moderada e lenta, atribuindo-se os valores 1,00; 0,85; e 0,70, para o fator “p”, respectivamente.

Os valores de tolerância de perdas de solo obtidos a partir de cada método, expressos em mm ano<sup>-1</sup>, foram convertidos para t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, a partir dos valores de densidade do solo. Para os perfis que não apresentavam valores de densidade do solo, este parâmetro foi estimado a partir da espessura de horizontes, composição granulométrica (areia, silte e argila) e teor de carbono orgânico utilizando o método de Baumer (ACUTIS & DONATELLI, 2003).

Os valores de tolerância de perda de solo obtidos pelos quatro métodos foram comparados entre si, entre solos dentro de cada método e entre métodos para o conjunto dos solos, pelo teste de Tukey a 5% de nível de significância, adotando-se procedimentos sugeridos por Gomes (1985).

As tolerâncias de perdas de solo obtidas pelo Método I (Tabela 4) variaram conforme a profundidade efetiva do solo e a relação textural entre os horizontes B e A (Tabela 3).

Solos	Profundidade efetiva	Relação textural
	m	
Argissolo Amarelo Eutrófico	0,93	3,1
Argissolo Amarelo Distrófico	1,51	2,5
Argissolo Vermelho Eutrófico	0,97	2,1
Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico	0,77	2,1
Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico	1,23	2,8
Argissolo Acinzentado Distrófico	1,60	2,9
Média	<b>1,20</b>	<b>2,5</b>
Cambissolo Háptico Ta Eutrófico	0,57	1,3
Cambissolo Háptico Tb Eutrófico	1,17	1,2
Cambissolo Háptico Ta Distrófico	0,73	0,5
Cambissolo Háptico Tb Distrófico	1,33	1,3
Média	<b>0,86</b>	<b>1,2</b>
Latossolo Amarelo Eutrófico	0,60	1,6
Latossolo Amarelo Distrófico	1,75	1,4
Latossolo Vermelho Eutrófico	1,30	1,2
Latossolo Vermelho Distrófico	1,24	1,3
Latossolo Vermelho Amarelo Eutrófico	1,15	1,3
Média	<b>1,52</b>	<b>1,4</b>
Luvissolo Crômico Órtico	0,51	2,8
Luvissolo Hipocrômico Órtico	0,47	2,6
Média	<b>0,49</b>	<b>2,7</b>
Neossolo Litólico Eutrófico	0,25	0,6
Neossolo Litólico Distrófico	0,40	0,7
Neossolo Litólico Psamítico	0,37	0,7
Neossolo Litólico Húmico	0,40	0,5
Neossolo Regolítico Eutrófico	0,27	0,8
Neossolo Regolítico Distrófico	0,96	0,75
Neossolo Regolítico Psamítico	0,61	0,9
Neossolo Flúvico	0,19	1,0
Neossolo Flúvico Ta Eutrófico	0,16	0,9
Neossolo Flúvico Tb Eutrófico	0,62	1,1
Neossolo Flúvico Sódico	0,39	1,0
Neossolo Flúvico Psamítico	0,10	0,75
Neossolo Quartzarênico Órtico	0,41	1,0
Média	<b>0,43</b>	<b>0,8</b>
Planossolo Háptico Eutrófico	0,72	4,4
Planossolo Háptico Distrófico	0,72	5,6
Planossolo Nátrico	0,80	10,8
Planossolo Nátrico Órtico	0,61	3,3
Média	<b>0,70</b>	<b>4,7</b>

**Tabela 3** – Valores médios de profundidade efetiva dos perfis e de relação textural entre os horizontes subsuperficiais e superficiais dos principais solos do Estado da Paraíba.

Ordens de solos	Método I	Método II	Método III	Método IV	Média	C.V. (%)
	----- t ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> -----					
Argissolos	8,97Abc	6,67Bb	6,77Bb	5,69Bb	7,03c	32,3
Cambissolos	10,31Ab	8,83Ab	8,71Ab	8,27Aa	9,03b	49,8
Latossolos	13,86Aa	12,36ABa	12,35ABa	10,64Ba	12,30a	22,1
Luvissolos	5,41Ad	4,01ABc	3,94ABc	2,82Bc	4,05e	53,9
Neossolos	6,30Ad	5,18ABbc	4,97Bc	4,39Bbc	5,21d	58,6
Planossolos	6,47Acd	4,94Ac	4,48Bc	3,30Bc	4,80de	42,2
Média	8,55 A	7,00 B	6,87 BC	5,85 C		
C.V. (%)	41,0	42,6	42,7	44,9		

**Tabela 4** – Valores médios de tolerância de perda de solos por erosão (t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>) para as principais ordens de solos do Estado da Paraíba, determinados por quatro métodos <sup>(3)</sup>.

<sup>(3)</sup> Valores seguidos de mesma letra maiúscula, na linha, entre métodos, e minúscula, na coluna, entre ordens de solos, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade.

Os resultados obtidos neste estudo devem ser interpretados como uma primeira aproximação de perda tolerável já que o conceito carece de uma definição exata, tanto no aspecto da manutenção do potencial produtivo como da preservação do recurso natural solo.

Novos modelos devem incluir as taxas de formação do solo e de intemperismo de materiais de origem em diferentes regiões climáticas, além de considerar resultados de pesquisas básicas e multidisciplinares que incluam fatores biofísicos, econômicos, sociais e políticos para ampliar a base de dados de tolerância de perda de solos (LAL, 1984).

A conclusão do estudo da UFPB/AREIA mostrou que os Latossolos foram os solos com os maiores valores médios de tolerância de perdas e os Luvissolos os de menores valores, em consonância com seus atributos diferenciais. E que o uso do Método IV, representado pela modificação do Método III, resultou em menor tolerância às perdas de solo, comparado aos Métodos II e III sendo por isso o método sugerido, tendo-se em mente a importância de estabelecer limites mais rigorosos de perdas, com vistas à minimização do processo erosivo.

## 7. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Diversos modelos matemáticos são empregados na previsão do processo erosivo, tanto para planejamento conservacionista (preventivo) como em seu controle, apresentando a possibilidade de estudar vários cenários diferentes, com baixo custo e de forma rápida.

Entre esses modelos destaca-se o modelo empírico da Equação Universal de Perda de Solos (EUPS). Embora apresentando limitações, os valores numéricos da EUPS podem servir para caracterizar qualitativamente as áreas quanto à sua maior ou menor susceptibilidade à erosão laminar em estudos regionais de erosão (IPT/SP, 1986).

Esta dissertação versa sobre a avaliação da vulnerabilidade à erosão da Bacia Hidrográfica do Alto-Paraíba, de maneira que a EUPS pode ser aplicada no estudo. Adotou-se o conceito em que a vulnerabilidade expressa a capacidade de resposta aos danos ou resiliência do corpo receptor. Neste caso, vulnerabilidade à erosão é a capacidade de resposta dos solos às conseqüências do processo erosivo (MARANDOLA JUNIOR; HOGAN, 2004).

A Grande Bacia Hidrográfica do Alto-Paraíba, localiza-se no centro-sul do estado da Paraíba, num eixo que se distancia de 180 a pouco mais de 300 km de João Pessoa (capital), perfazendo um vasto território com área de 6723,00 km<sup>2</sup>, o que equivale a cerca de 12% do Estado.

A metodologia seguida para caracterizar morfometricamente e hidrologicamente a Bacia Hidrográfica foi desenvolvida através dos seguintes procedimentos:

- a) Coleta de dados para a estruturação de um banco de dados com informações hidrológicas e meteorológicas da bacia hidrográfica do Alto-Paraíba. Os dados foram obtidos e compilados da Agência de Gestão de águas do Estado da Paraíba – AESA.
- b) Os dados meteorológicos procedem de estações dos municípios que formadores da bacia hidrográfica do Alto-Paraíba e de municípios vizinhos a esta grande área, levando-se em consideração a posição geográfica dos

divisores desta bacia, e a interferência climática desses municípios adjacentes a área estudada.

c) As fontes cartográficas e imagens de satélite foram também obtidas do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE.

Como fontes cartográficas básicas, foram utilizadas:

- Modelo Digital de Elevação – MDE, do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM);
- Imagens do Satélite Landsat 5, sensor TM, composição de bandas das imagens: R-4, G-3, B-2;
- Mapas Temáticos digitalizados de unidades de Planos de Informações por Geo-classes: Declividade, Erodibilidade, Erosividade, Índice relativo ao fator uso e manejo do solo, Fator topográfico, Hipsometria, Solos, Uso do solo, Equação USLE e Tolerância de perda de solos.

Com esses mapas foi possível a utilização de recursos de sensoriamento remoto, tratamento digital de imagens e geoprocessamento. O software SPRING, adotado para a integração e armazenamento de dados, é um programa para Sistemas de Informações Geográficas Nacional e de domínio público, desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), que utiliza o modelo de campos e objetos de forma unificada.

Conforme o conceito de modelo de dados do Spring, criou-se um Banco de Dados denominado Alto-Paraíba / Erosão, e as informações utilizadas neste estudo foram armazenadas no Projeto Alto-Paraíba, definido com os parâmetros seguintes:

- Projeção UTM/ Datum Córrego Alegre;
- Fuso 24 Sul;
- Retângulo Envolvente (Coordenadas Geográficas localizadas nos limites da área de trabalho, nos extremos:

$X_1: 37^{\circ} 21' 22'' W$  e  $Y_1: 8^{\circ} 18' 12'' S$

$X_2: 36^{\circ} 07' 44'' W$  e  $Y_2: 7^{\circ} 20' 48'' S$

### 7.1. Estudo de caso: A Aplicação da Equação Universal de Perda de Solos na Bacia Hidrográfica do Alto-Paraíba.

A Equação Universal de Perda de Solos, desenvolvida em 1965, nos EUA, é reconhecida mundialmente para o estudo de erosão laminar, e é expressa pela relação:

$$\mathbf{EUPS = RKLSCP} \quad (1)$$

Na qual, em unidades do Sistema Internacional:

**EUPS** = erosão ou perda de solo por unidade de área, em ton./ha;

**R** = erosividade das chuvas que expressa a erosão potencial, ou poder erosivo da precipitação média anual da região, em MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> ano;

**K** = erodibilidade do solo, ou susceptibilidade a erosão, que representa a perda de solo por energia erosiva de uma unidade da precipitação em ton.ha.h ha<sup>-1</sup> (MJ)<sup>-1</sup>. mm<sup>-1</sup>;

**L** = fator topográfico que expressa a relação com o comprimento padrão de 25 m;

**S** = fator topográfico que expressa a relação com a declividade padrão de 9 %;

**C** = fator cobertura vegetal que expressa a relação entre as perdas de solo para uma dada condição de uso e manejo e a condição de solo descoberto (adimensional);

**P** = relação entre as perdas de solo de um cultivo com uma dada prática conservacionista e para uma condição de cultivo no sentido da pendente (adimensional).

Usualmente, os valores obtidos pela EUPS são confrontados com a Taxa de Tolerância de Perda de Solo. Segundo Smith e Stamey (1965), esta taxa é definida como a intensidade máxima da erosão do solo que permite a manutenção da produtividade do solo para uso agrícola economicamente viável e a manutenção da capacidade da formação de solo para recompor as perdas por erosão. Estes autores estabeleceram padrões de tolerância de perda para diferentes tipos de solos, considerando-se a profundidade favorável ao desenvolvimento do sistema radicular e a relação textural entre horizontes superficiais. Portanto, cada classe de solo possui um limite que estabelece a intensidade máxima de perda por erosão que este solo tem capacidade de recompor.

A Equação Universal de Perda de Solo pode ser subdividida em duas, o que permite avaliar de maneira independente, de um lado os fatores naturais do meio físico, intervenientes no processo de erosão, e de outro lado, as ações antrópicas sobre o meio físico.

Esta subdivisão, já realizada em trabalhos anteriores por Stein *et. al.* (1987), Valério Filho (1994) e Pinto (1995), permite a análise segmentada do processo erosivo, através da Equação do Potencial Natural de Erosão (PNE) e da Equação do Potencial Antrópico de Erosão (CP).

## 7.2 Potencial Natural de Erosão (PNE)

$$\text{PNE} = \text{RKLS} \quad (2)$$

■ A erosividade da chuva (**R**), expressa a capacidade da chuva, esperada em uma localidade, de causar erosão pelo efeito integrado do impacto das gotas de chuva e turbulência do escoamento superficial. Corresponde à perda de solo por unidade de área de uma superfície desprotegida proporcional ao produto de dois valores característicos das chuvas: a Energia Cinética total multiplicada pela intensidade máxima em trinta minutos. Esta intensidade é referida como parâmetro de estimativa da erosividade (**EI<sub>30</sub>**).

Lombardi e Moldenhauer (1980), pesquisando sobre a erosividade da chuva, utilizaram 22 anos de registros de precipitação em Campinas (de 1954 a 1975) e encontraram uma alta correlação entre a média mensal do índice de erosividade **EI<sub>30</sub>** (ou **R**) e a média mensal do coeficiente de chuva. E propuseram a seguinte equação:

$$\text{R} = \text{EI}_{30} = 67,355 (\bar{r}^2 / \text{P})^{0,85} \quad (3)$$

Onde: **EI<sub>30</sub>** – média mensal de erosividade, em MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> ano;

**r** – precipitação média mensal, em mm, e **P** - precipitação média anual, em mm.

Para obtenção da erosividade média anual utiliza-se valores mensais e anuais de precipitação em um período mais longo possível.

■ O fator erodibilidade do solo (**K**) (VIANA DE LIMA, 2003) é a relação das perdas do solo por unidade do índice de erosividade da chuva, em solo preparado convencionalmente, no sentido do declive, mantido continuamente descoberto, com 9% de declividade e 25 m de comprimento de rampa. Lombardi Neto e Bertoni (1975), *apud* Bertoni e Lombardi Neto (1985), ressaltam que as propriedades do solo que influenciam na erodibilidade são aquelas que afetam a infiltração, a permeabilidade, a capacidade total de armazenamento de água e aquelas que resistem às forças de dispersão, salpico, abrasão e transporte pelo escoamento.

■ O fator topográfico **LS** é definido como a relação esperada de perdas de solo por unidade de área em um declive qualquer em relação às perdas de solo correspondentes de uma parcela unitária para o mesmo solo, de 25 m de comprimento e 9% de declive. O fator topográfico é obtido pela equação:

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

**C** – comprimento de rampa, em metros;

**D** – grau de declividade, em porcentagem.

Baseando-se em estudo de Williams e Berndt (1976) *apud* Risso e Chevallier (1992), o comprimento médio da vertente de uma bacia hidrográfica pode ser obtido pela equação:  $\mathbf{L = 0,5 A / L_t}$  (5) onde:

**A** – área de drenagem da bacia em km<sup>2</sup>; **L<sub>t</sub>** – comprimento total dos canais da bacia em km.

Neste trabalho adotaremos para comprimento médio das vertentes, o comprimento indicado para as parcelas unitárias, ou seja, 25,00 m (LEPRUN, 1981).

### 7.3 Potencial antrópico de erosão.

A equação do Potencial Antrópico de Erosão (**CP**) considera os fatores da Equação Universal de Perda de Solo que dependem do uso e manejo dos solos, podendo ser usada para avaliar níveis de impacto sobre o meio físico em função de diferentes formas de uso do solo. A equação do Potencial Antrópico de Erosão é:

**Potencial Antrópico de Erosão = CP** (6) onde:

**C** – índice relativo ao fator uso e manejo do solo;

**P** – índice relativo à prática conservacionista adotada.

O fator de uso e manejo (**C**) expressa a relação entre perdas de solo de um terreno ocupado com determinada cultura, espaçamento e tratamentos culturais, e as perdas correspondentes de um terreno mantido continuamente descoberto. A proteção da cobertura vegetal depende do tipo de vegetação, do número de plantas por metro quadrado, do seu desenvolvimento e também varia ao longo dos meses ou estações do ano. O fator (**C**) mede o efeito combinado de todas as relações das variáveis de cobertura vegetal e manejo agrícola.

O fator da prática conservacionista (**P**) expressa a relação entre as perdas de solo de um terreno cultivado com determinada prática (plantio em nível, terraceamento, etc.), e as perdas quando se planta morro abaixo. Para este fator (**P**), foi considerado o fator unitário (=1,00).

## 7.4 Obtenção do Potencial Natural de Erosão (PNE)

A aplicação do modelo matemático da Equação Universal de Perdas de Solo foi realizada em várias etapas, descritas a seguir.

### 7.4.1 Fator erosividade (R)

O fator erosividade, em MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> ano, foi obtido para toda a área de estudo conforme aplicação da equação (3), da página 96, com os valores das precipitações médias mensais e anuais para obtenção da média anual do índice de erosividade (EI<sub>30</sub>). O valor médio anual do índice de erosividade para toda a Bacia do Alto-Paraíba obtido foi de 198,30 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> ano.

Os dados utilizados registrados em postos pluviométricos em todas as sedes municipais foram obtidos na AESA (Agência Executiva de Gestão de Águas da Paraíba), e aplicados na equação abaixo, conforme mostrado na Tabela 5 a seguir.

$$R = EI_{30} = 67,355 (r^2 / P)^{0,85}$$

(média mensal do índice de erosividade, em MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> ano), onde:

**r** – precipitação média mensal em mm, e, **P** – precipitação média anual em mm.

Os parâmetros da equação PNE, ou sejam, o índice de erosividade (R), o índice de erodibilidade (K) e o fator topográfico (LS), estes foram calculados através do SPRING e plotados como Mapas Temáticos, apresentados no item 8 desta dissertação.

<b>Município – Lado Oriental BH</b>	<b>P</b>	<b>r</b>	<b>R=EI<sub>30</sub></b>
Alcantil	562	47	215,60
Barra de Santana	480	30	114,93
Caturité	506	42	194,70
Boqueirão	457	38	179,01
Riacho de Santo André	339	28	137,36
São Domingos do Cariri	455	38	179,76
São João do Cariri	483	40	186,43
Santo André	626	52	233,61
Boa Vista	384	32	155,03
Campina Grande	664	56	252,03
Gado Bravo	424	35	166,00
Juazeirinho	527	44	203,56
Queimadas	654	55	247,60
Santa Cecília	527	44	203,56
Soledade	437	36	169,70
<b>Município – Lado Ocidental BH</b>	<b>P</b>	<b>r</b>	<b>R=EI<sub>30</sub></b>
Camalaú	565	48	222,45
Congo	455	38	179,76
Coxixola	469	39	183,10
Amparo	616	51	229,18
Livramento	535	45	208,80
Monteiro	697	58	256,71
Parari	567	47	213,98
Prata	605	51	232,67
Ouro Velho	611	51	230,73
São João do Tigre	600	50	226,56
São José dos Cordeiros	576	48	218,84
Sumé	652	55	248,24
Taperoá	608	51	231,70
Serra Branca	501	42	196,35
Zabelê	226	19	100,29
Assunção	439	37	177,10
Salgadinho	496	42	198,03
Passagem	650	55	248,90
Areia de Baraúnas	546	46	213,03
Cacimbas	400	33	157,80
Desterro	656	55	246,96

**Tabela 5** – Registros das médias mensais e anuais dos postos pluviométricos das sedes municipais que pertencem à Bacia Hidrográfica do Alto-Paraíba. Série histórica de 1994 a 2009 (16 anos). Fonte: AESA

## **8. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

A seguir são apresentados e discutidos os resultados da pesquisa, notadamente os mapas temáticos elaborados através do software SPRING.

### **8.1 Mapa Temático de Erosividade representativo do Fator R da EUPS**

Segundo Viana de Lima (2003), o fator R representa um índice numérico que expressa a capacidade da chuva em erodir área com solo desprotegido.

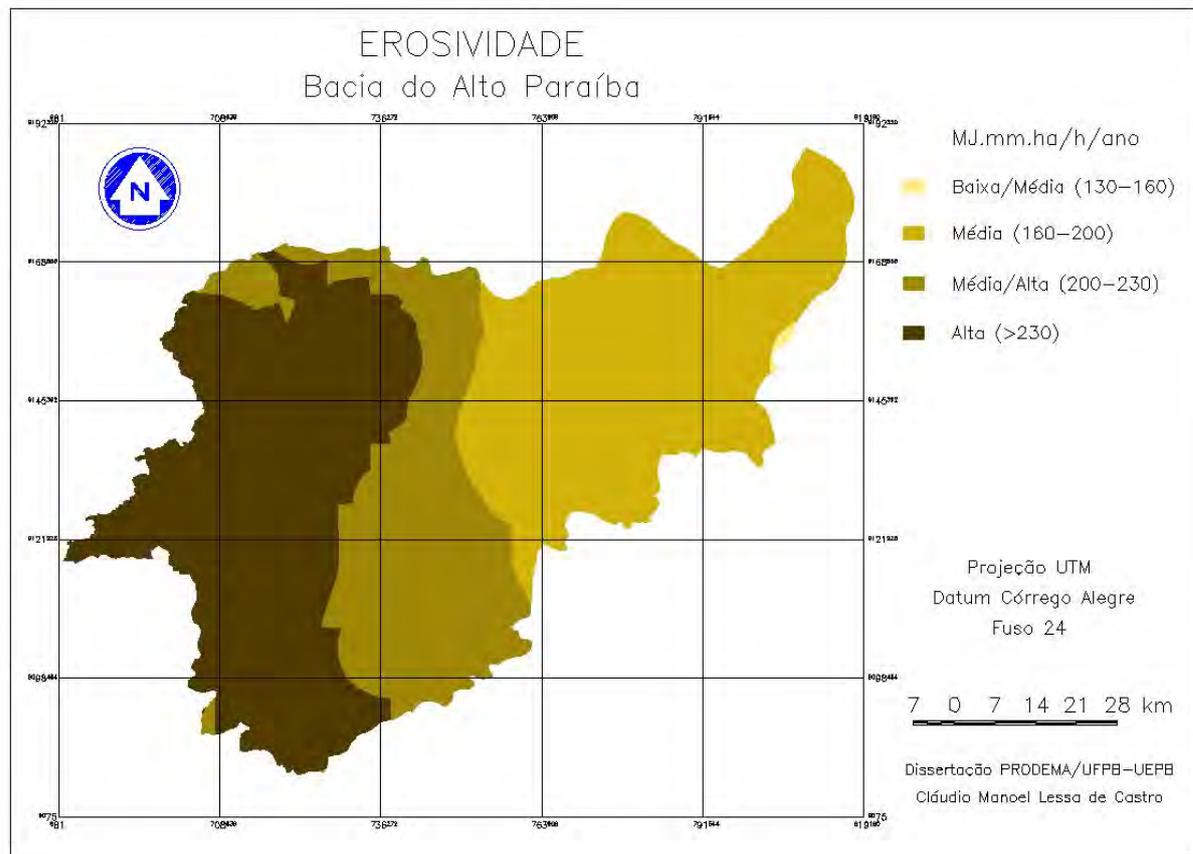
Este mapa representa a capacidade da chuva em provocar erosão numa determinada área durante um período de tempo, sendo a água considerada como agente normal e o mais importante na esculturação erosiva da paisagem, segundo Bigarella (2003), mesmo nas regiões áridas e semi-áridas, nas eventuais chuvas. Leprun (1981) também denomina a erosividade da chuva de agressividade climática.

Com os valores das médias pluviométricas dos municípios inseridos na bacia hidrográfica do Alto-Paraíba, foi calculado o valor de R para cada estação pluviométrica. A partir dos valores de R foi gerada uma grade regular para toda a bacia, que foi em seguida fatiada.

Os valores de erosividade mais baixos ocorrem na área de menor declividade e cobertura vegetal do tipo caatinga aberta e densa (Figura 11).

Considerando-se os valores calculados para as faixas definidas no mapa, observa-se que cerca de 0,16% da área está classificada com erosividade baixa/média; 35,63% com erosividade média; 25% classificada como média/alta e 39,18% com erosividade alta.

Segundo Leprun (1988) o fator R erosividade das chuvas, requer um mínimo de 10 anos de dados para ser representativo, o que foi atendido por este estudo, onde foi considerada uma série histórica de 16 anos.



**Figura 11** – Mapa Temático da Erosividade

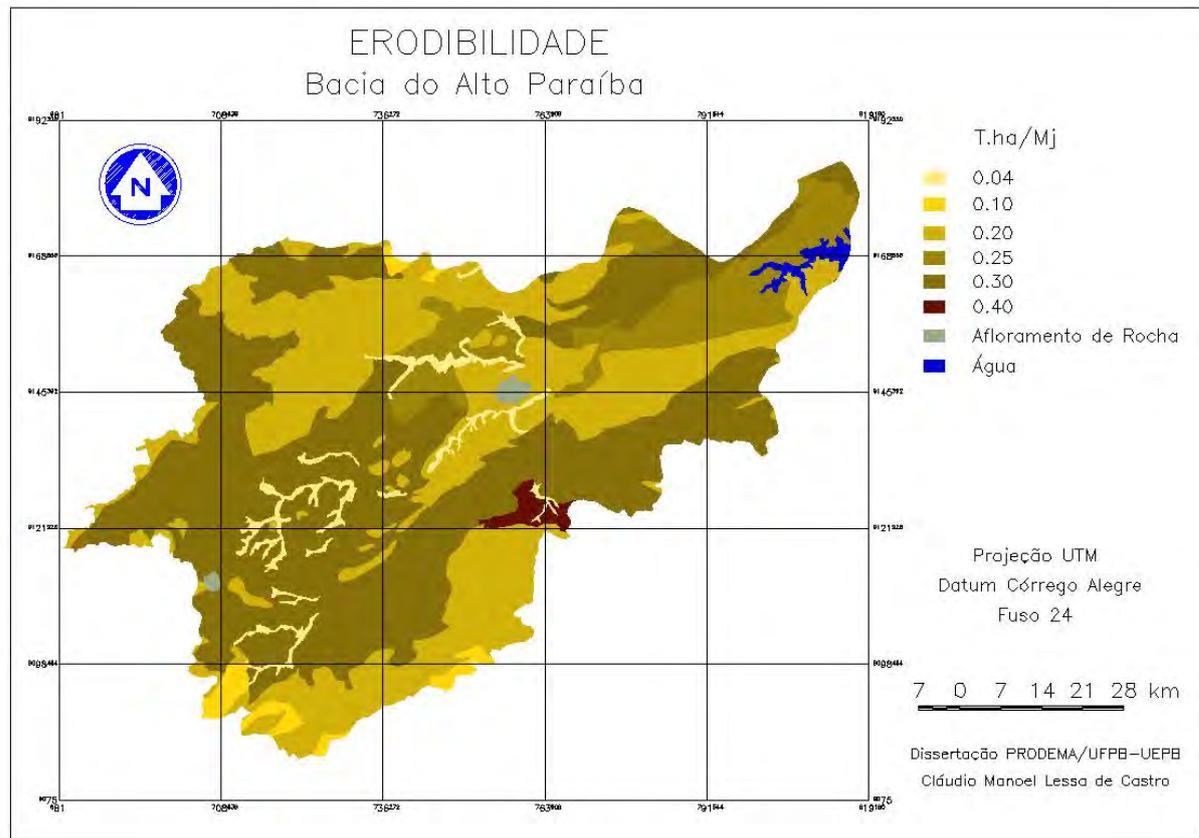
## 8.2 Mapa Temático de Erodibilidade representativo do Fator K da EUPS

A erodibilidade do solo é a propriedade que exprime a susceptibilidade do solo à erosão, e constitui característica inerente do solo e, por conseguinte, está associada às propriedades do solo que, segundo Bertoni e Lombardi Neto (1999):

- a) Afetam a velocidade de infiltração, permeabilidade e capacidade total de armazenamento de água;
- b) Resistem às forças de dispersão, salpico, abrasão e transporte pela chuva e escoamento.

Os valores de erodibilidade foram atribuídos para cada classe de solo que ocorre na área de estudo. A classificação pedológica adotada neste trabalho foi baseada no Mapa de Solos do Estado da Paraíba elaborado pela SCIENTEC, na escala de 1:400.000. Posteriormente, estes valores foram classificados, originando o mapa de erodibilidade elaborado no Spring,

Este Mapa Temático representa o Fator **K** da **EUPS** (Figura 12), significando o efeito integrado dos processos que regulam a infiltração da água e da resistência do solo à decomposição e ao transporte de partículas. Tais fatores são intrínsecos aos tipos de solo.



**Figura 12** – Mapa temático da Erodibilidade.

Efetuando-se a correspondência entre este mapa e o Mapa de Solos apresentado na Figura 4, observa-se que os maiores valores de erodibilidade estão associados à classe de solo Planossolo, que são solos com elevados teores em sódio trocável, presença de horizonte superficial eluvial de textura arenosa ou média, contrastando com o horizonte B, de elevada concentração de argila, sendo considerados solos inaptos para agricultura (CAVALCANTI *et.al.*, 2005). Um dos fatores prioritários é a relação textural, entre os horizontes de subsuperfície e superfície, afetando principalmente a infiltração e a permeabilidade do solo. Uma relação textural alta de argila indica capacidade de infiltração menor nos horizontes de subsuperfície, acelerando com isso, a intensidade de erosão dos horizontes superficiais.

### 8.3 Fator topográfico (LS).

Os dados que compõem o fator topográfico são, em geral, obtidos a partir de cartas topográficas em escala média e grande. Nesse sentido busca-se o nível de informação necessário para detectar o comportamento das encostas, através de um espaçamento entre as curvas de nível que torne isso possível, haja vista o detalhamento que se deseja para o trabalho (VIANA DE LIMA, 2003).

O fator topográfico foi calculado conforme a equação (4), com os valores do comprimento de rampa em metros (Figura 13).

Os valores da declividade foram obtidos no SPRING, a partir de dados obtidos de imagens SRTM. Os dados de comprimento médio de rampa foram definidos, conforme Risso e Chevallier (1992).

O fator topográfico foi obtido pela equação:

$$LS = 0,00984 C^{0,63} D^{1,18} \quad \text{na qual:}$$

**C** – comprimento de rampa, em metros; **D** – grau de declividade, em porcentagem.

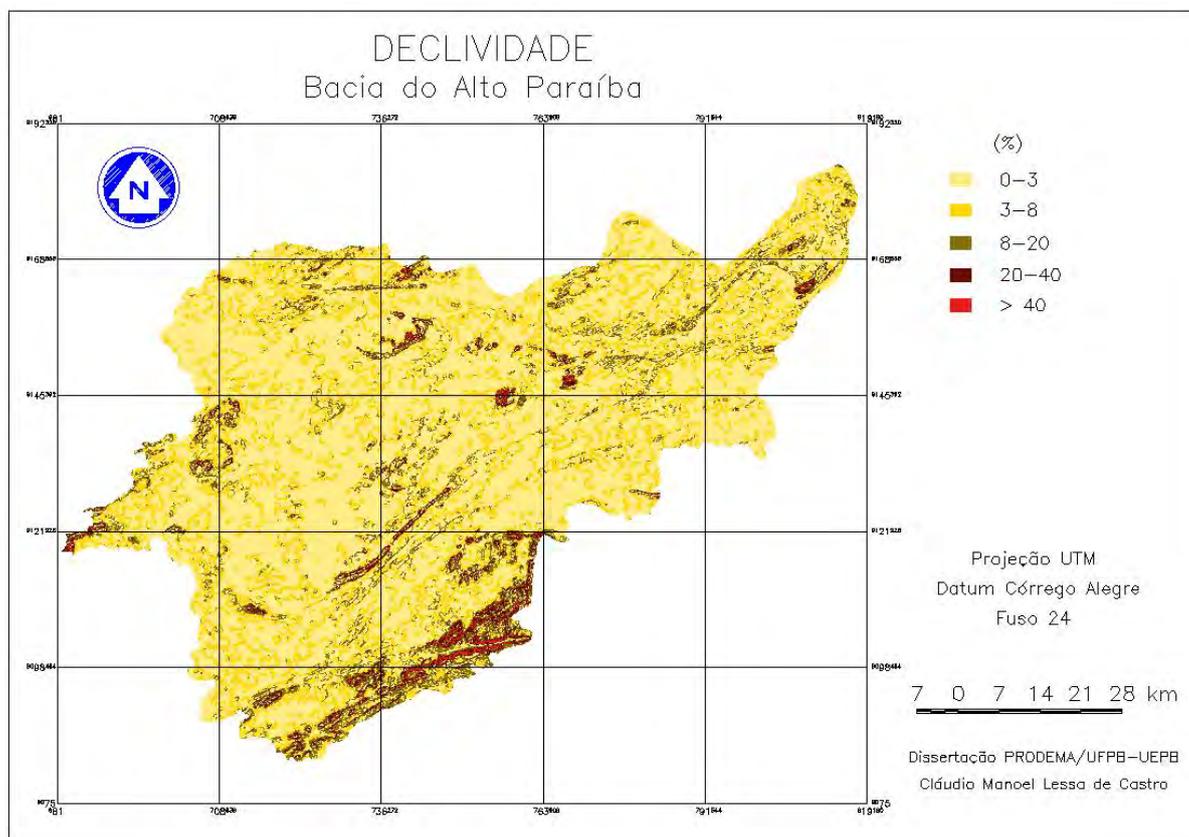
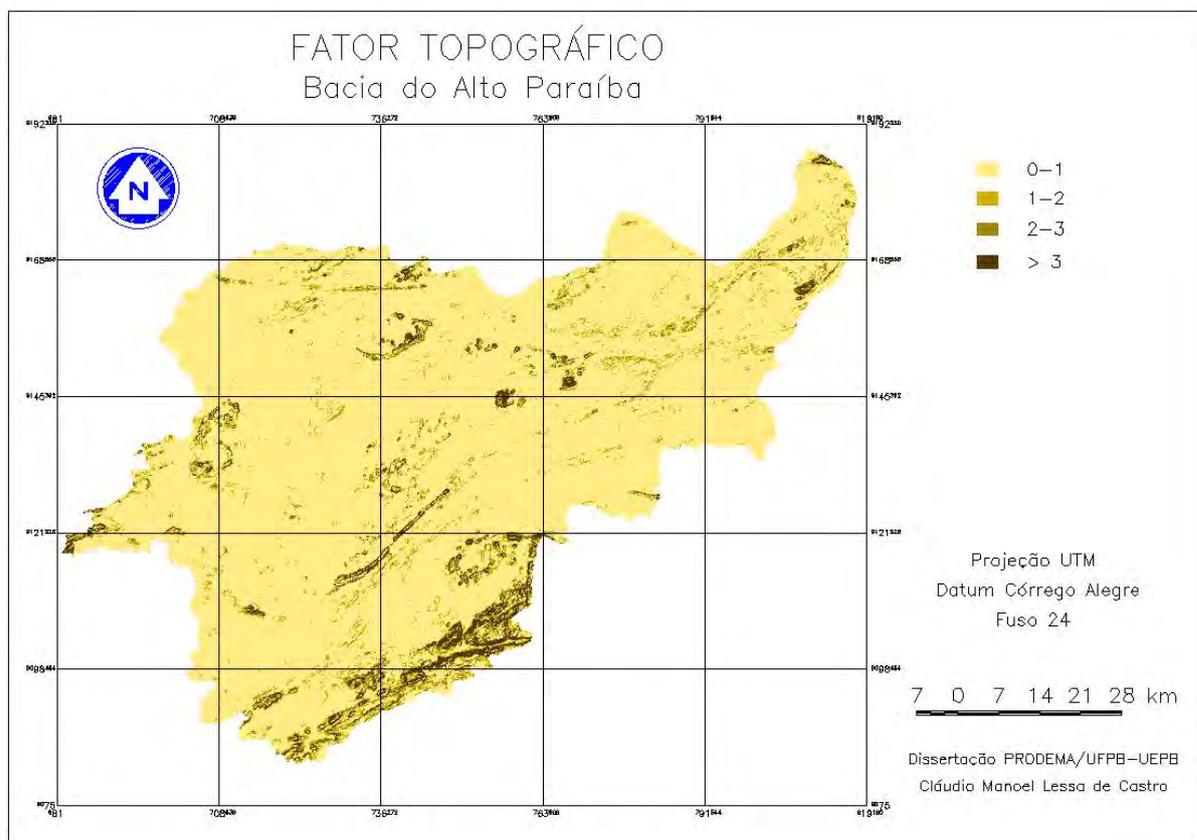


Figura 13 – Mapa Temático da Declividade da Bacia Hidrográfica do Alto-Paraíba, em %.

A declividade da área de estudo, indicou que cerca de 62% da área tem declividade de até 3%, e cerca de 26% declividade entre 3% e 8%, o que leva-se a concluir tratar-se de um relevo que varia de plano a moderadamente ondulado.

Com tais dados aplicados ao software Spring, gerou-se o Mapa Temático do Fator Topográfico (Figura 14), Fator **LS** da **EUPS**. A topografia é o fator que determina uma parcela significativa da influência do índice de erosão, pois, à medida que se aumenta a inclinação da encosta e o comprimento da rampa, o volume e a velocidade do *runoff* aumenta.



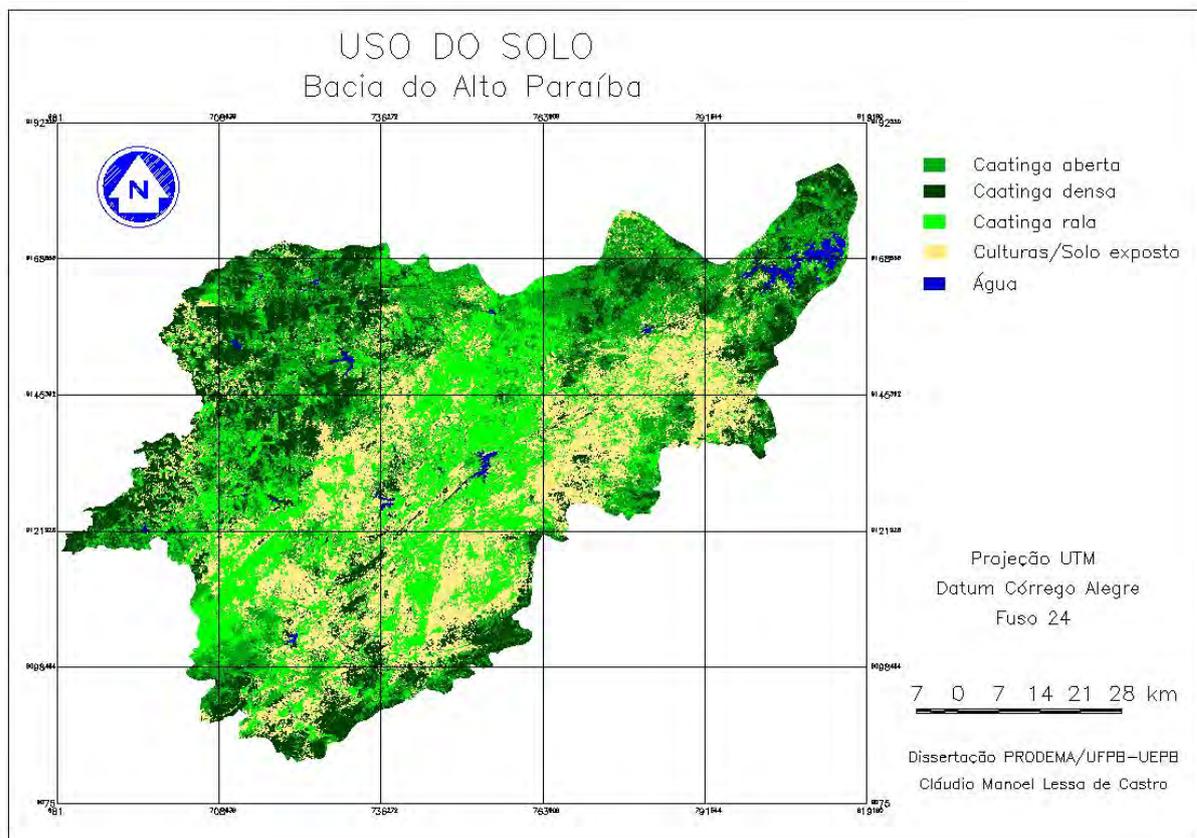
**Figura 14** – Mapa Temático do Fator Topográfico da Bacia do Alto-Paraíba.

O Fator Topográfico é um dado adimensional, assim, analisando o mapa acima, obteve-se que entre os campos de valores 0 a 1 estão com 89% da área total do mapa; entre os valores de 1 a 2, 6,0% da área total; entre os valores 2 a 3% obteve-se 2,2% da área, e superior ao valor 3, obteve-se 2,7% da área total.

## 8.4 Mapa Temático do Uso do Solo

Na área estudada, foram identificados os seguintes tipos de uso/cobertura do solo (Figura 15):

- Caatinga densa – 1.495, 05 km<sup>2</sup> / representando 22,23% da área total;
- Caatinga aberta – 1.690,60 km<sup>2</sup> / representando 25,14% da área total;
- Caatinga rala – 1.575,35 km<sup>2</sup> / representando 23,43% da área total;
- Culturas / solo exposto – 1.875,89 km<sup>2</sup> / representando 28,00% da área total.
- Água – 67,15 km<sup>2</sup> / (1,00%)



**Figura 15** – Mapa temático de Uso do Solo com as respectivas coberturas.

No semi-árido na Paraíba, onde encontra-se inserido esta bacia hidrográfica, os volumes precipitados são os menores do Brasil, é potencialmente sujeita à degradação, principalmente pelas vulnerabilidades climáticas e edáficas dos ecossistemas da região, associadas, bem evidente, a um ambiente sócio-econômico desfavorável. As precipitações ocorrem devido à fluxos de calor verticais muito

intensos oriundos da superfície do solo e apresentam uma variabilidade espaço-temporal muito elevada, sendo de curta duração e alta intensidade.

A vegetação dessa bacia, formada predominantemente por xerófilas, defende-se com mecanismos próprios das altas temperaturas e da falta de precipitações nos longos períodos secos. Os solos da área são geralmente rasos com predominância da classe Luvisolos, com baixa fertilidade natural, susceptíveis à erosão, ocorrendo ravinamentos em alguns locais. Segundo Silans *et.al.* (2002) a vegetação, assim como o solo, apresenta um papel importante na repartição da energia solar, na evapotranspiração, assim como na proteção do solo, minorando os processos erosivos e na fixação da umidade neste, apesar de ainda serem desconhecidos, todos os fatores dos processos conectivos do papel do solo e da vegetação no clima, isto é, os modelos de classificação climática, tradicionalmente utilizados, ainda não são capazes de representar adequadamente toda a dinâmica e interação do clima com outros fatores ambientais, e de maneira generalizada.

Para o fator prática conservacionista (**P**), que expressa à relação entre as perdas de solo de um terreno cultivado com determinada prática (plantio em nível, terraceamento, etc.), e as perdas quando se planta morro abaixo, foi considerado o fator unitário (=1,00). Essas práticas, também considerada fator participante do modelo EUPS, estão relacionadas com as atividades desenvolvidas pelo homem, constituindo, assim, ação interventora, diante do fato de que há necessidade de serem tomadas medidas para atenuar o efeito destrutivo dos processos erosivos (WISCHMEIER & SMITH, 1978).

Para Viana de Lima (2003), existem diversos tipos de práticas conservacionistas, entre as quais as mais comuns para as culturas anuais são plantio em contorno, terraceamento e alternância de capinas. Para o caso do Nordeste do Brasil, as determinações do fator P são pouco numerosas. Leprun (1981) cita dados comprovados através de pesquisas em diferentes instituições nos Estados da Região Nordeste, com o Sul do País e os Estados Unidos, através da Tabela 6, denotando o efeito de proteção à erosão em alguns casos específicos de práticas conservacionistas. Este mesmo autor salienta a prática quase exclusiva do preparo do solo morro abaixo no Nordeste, aumenta a estimativa do fator P nessa região.

PRÁTICAS CONSERVACIONISTAS	FATOR P DA EUPS		
	NE do Brasil	Sul do Brasil	E.U.A.
Plantio morro abaixo	1,0	1,0	1,0
Plantio em contorno	0,3	0,5	0,5
Alternância de capinas	0,3	0,4	0,25

**Tabela 6** – Valores comparativos do fator P (LEPRUN, 1981, *apud in* LIMA, 2003)

Este mesmo autor cita sobre a dificuldade em espacializar a informação do fator P para estudos em áreas de dimensões que ultrapassam em muito as parcelas experimentais, a exemplo do que ocorre em bacias hidrográficas, devido os registros de sensoriamento remoto não possibilitarem a correta identificação das práticas conservacionistas em todas as áreas. Assim a tendência tem sido adotar um único valor para toda a área, procurando não minimizar os efeitos das práticas adotadas.

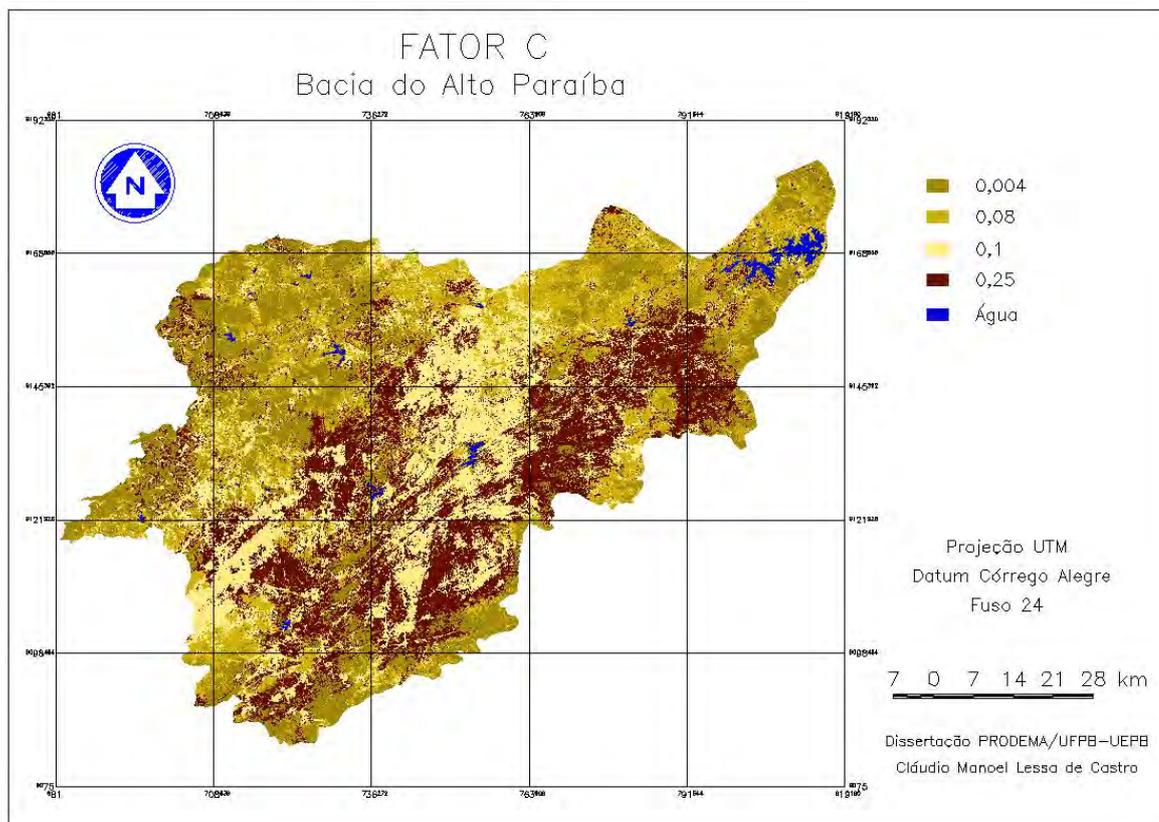
### 8.5 Fator de uso e manejo - Fator C

Expressa a relação entre perdas de solo de um terreno ocupado com determinada cultura, espaçamento e tratos culturais, e as perdas correspondentes de um terreno mantido continuamente descoberto. Este fator mede o efeito combinado de todas as relações das variáveis de cobertura vegetal e manejo agrícola, conforme mostrado na Figura 16.

Para Viana de Lima (2003), o uso da terra e cobertura vegetal são parâmetros de significativa importância nos estudos de erosão, uma vez que são dentre os fatores envolvidos, os de maior variabilidade temporal e, portanto, de maior complexidade de avaliação. Constituem fatores relacionados à proteção direta do solo contra os impactos das gotas de chuva, assim como de impedimento à ação erosiva das águas de escoamento superficial. Este mesmo autor cita que este fator é o que inclui tanto a influência da cobertura vegetal como das culturas agrícolas e seu manejo, e cita Resende & Almeida (1985) que o consideram como o de maior complexidade da EUPS notadamente no que diz respeito ao uso agrícola da terra, uma vez que é o mais susceptível de alterações pelo agricultor.

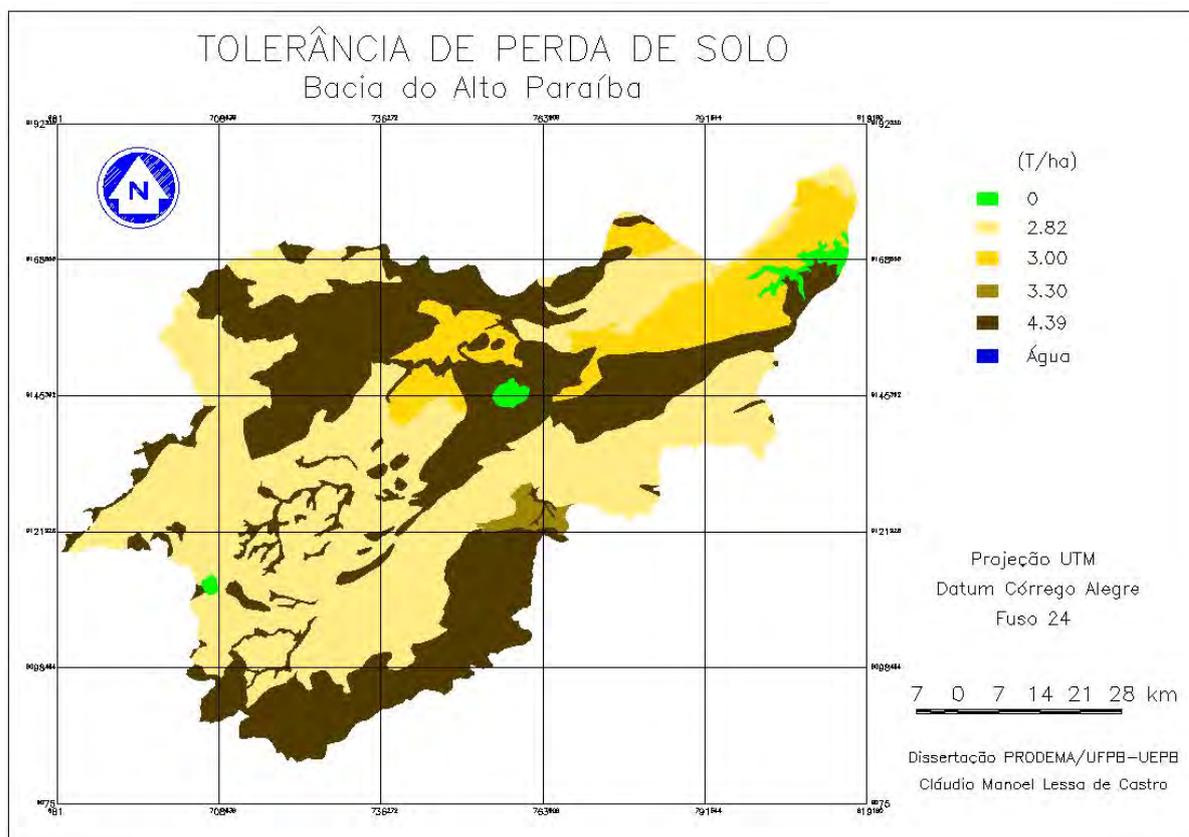
Os fatores antrópicos da EUPS foram integrados conforme proposta de Stein *et.al.* (1987), visando obtê-los a partir do uso e ocupação do solo. Partindo-se desta proposta, adotou-se um valor médio para as diversas classes de agricultura, e um

valor unitário para as áreas degradadas. As classes de uso e ocupação do solo foram obtidas por meio da classificação digital de imagens TM LANDSAT.



**Figura 16** – Mapa temático do Fator C de Uso e Manejo do solo.

## 8.6 Mapa Temático de Tolerância de Perdas de Solo.



**Figura 17** – Mapa Temático da Tolerância de Perdas de Solo baseado nas pesquisas da UFPB/Areia.

Este mapa temático representa os dados pesquisados pela UFPB/campus Areia, apresentado na Tabela 4, Método IV, página 92.

Como observa-se, a maior parte dos valores encontrados situa-se no intervalo 0 e 3 t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, valores esperados para os tipos de solos destas áreas, ou seja, predominância de Luvisolos e Vertissolos, solos rasos, mal drenados, microrelevo gilgai, com presença de montmorilonita (solos expansíveis) e que com a variação térmica, expandem e contraem, criando um auto-revolvimento, sendo susceptíveis aos processos erosivos (Figura 17).

Como resultados do estudo da UFPB/AREIA, analisando-se os valores médios de tolerância de perdas de solo (Tabela 4), observou-se que houve uma variação entre os métodos utilizados. A Amplitude foi de 5,41 a 13,86 t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (Método I), 4,01 a 12,36 t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (Método II), 3,94 a 12,35 t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (Método III) e 2,82 a 10,64 t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (Método IV). Esses valores situam-se para alguns métodos

(Método I e II), dentro dos limites definidos pela Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO), com perdas de  $12 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  para solos profundos e bem drenados, e de 2 a  $4 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  para solos rasos e de baixa permeabilidade (FAO, 1965) bem como dentro da faixa de 4,5 a  $11,5 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , estabelecida para os EUA (WISCHMEIER & SMITH, 1978).

Os Luvisolos e os Neossolos apresentaram os mais baixos valores de tolerância ( $5,41$  e  $6,30 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ). Tal comportamento pode ser explicado pela baixa profundidade efetiva (Tabela 3), resultando em uma taxa infiltração (i) / deflúvio superficial (d) desfavorável ( $i / d < 1,0$ ), aumentando os riscos de erosão. Nos Neossolos Quartzarênicos, a despeito da acentuada drenagem de água no perfil, a baixa resistência à erosão hídrica é conferida pelos altos teores de areia e baixos de argila e matéria orgânica, resultando em fraca agregação (BERTOL & ALMEIDA, 2000). Comportamento semelhante pode ser atribuído aos Neossolos Regolíticos.

Os solos que apresentaram os maiores valores de tolerância foram os Latossolos, com valores médios variando de  $10,6$  a  $13,9 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  para os métodos IV e I, respectivamente. A permeabilidade acentuada, resultado da elevada profundidade efetiva e da baixa relação textural, associadas à predominância de textura médio-argilosa, estrutura bem desenvolvida (tipicamente entre blocos e granular) e teores consideráveis de matéria orgânica, contribuem para a maior resistência à erosão hídrica desses solos (RESENDE, 1985).

Os solos com horizontes B plânico (Planossolos) e B textural (Argissolos e Luvisolos) apresentaram os maiores valores de relação textural entre os horizontes B e A (Tabela 3). A maior relação textural indica um acúmulo de argila em profundidade, favorecendo a formação de um gradiente de drenagem entre os horizontes superficial e subsuperficial, condicionando, por este aspecto, um maior deflúvio superficial. Adicionalmente, Planossolos e Luvisolos apresentaram baixa profundidade efetiva que limita o desenvolvimento do sistema radicular das plantas. Estas características, em conjunto, limitam grandemente a capacidade de drenagem interna, aumentando a suscetibilidade à erosão.

Os Argissolos apresentaram maior valor de tolerância à erosão que os Luvisolos ( $p < 0,05$ ), indicando que estes solos se diferenciam quanto ao comportamento em campo frente aos processos erosivos. Os Luvisolos são solos

de ocorrência expressiva no estado da Paraíba, principalmente na zona semi-árida, e constitui segundo Resende *et. al.* (1988), um sistema tipicamente mais suscetível à erosão hídrica, apesar do relevo relativamente suave em que ocorrem.

Os fatores para a maior tendência a perdas por erosão nestes solos são: a distribuição e intensidade das chuvas da região semi-árida (CHAVES *et. al.*, 1985) e a pouca cobertura vegetal e a grande incidência de superfícies encrostadas (RESENDE, 1983).

Em ambientes de ocorrência dos Luvisolos eutróficos, possuindo minerais primários alteráveis, a erosão laminar, embora remova muitos nutrientes, permite a recuperação da fertilidade, por pousio, num período de cerca de 5 anos. Se, por outro lado, o solo é distrófico, a erosão laminar, sob o ponto de vista do ecossistema, torna este ambiente mais frágil (RESENDE, 1983).

Na determinação da tolerância de perdas de solo obtida pelo Método II (Tabela 4), podem-se verificar três grupos distintos com menores, intermediários e maiores valores de tolerância de perda de solo.

Comportamento similar foi verificado por Bertol & Almeida (2000), em trabalho realizado no estado de Santa Catarina.

O grupo representado pelos menores valores engloba Luvisolos e Planossolos, apresentando tolerância de perdas de 4,01 e 4,94 t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, respectivamente, sendo que ambos não diferiram estatisticamente em relação ao Método I (Tabela 4). O grupo constituído pelos valores de tolerância intermediários foi representado pelos Argissolos e Cambissolos, com valores de tolerância de 6,67 e 8,83 t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, respectivamente, enquanto o grupo constituído pelos maiores valores de tolerância foi representado pelo Latossolos, com valor de tolerância de 12,36 t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>. Ressalta-se que no caso dos Argissolos, o Método II diferiu estatisticamente do Método I, enquanto nas demais não houve diferença significativa (Tabela 4).

Valores semelhantes para Latossolos foram verificados em trabalhos realizados por Silva *et. al.* (2002), em estudo realizado no Vale do Rio Doce na região Centro Leste do estado de Minas Gerais, enquanto Mannigel *et al.* (2002) obtiveram valores médios de 10,46 t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> para Latossolos do estado de São Paulo.

Os valores médios de tolerância de perdas de solo obtidos pelo Método III (Tabela 4), revelaram comportamento similar ao reportado para o Método II para a maioria das ordens de solos, mesmo quando foram acrescentadas duas propriedades importantes do ponto de vista da erodibilidade (teor de matéria

orgânica na camada de 0 - 20 cm de profundidade e o grau de permeabilidade do solo).

Em relação ao Método IV, os valores médios de tolerância de perda de solo obtidos demonstraram que o uso deste método resultou em maior rigor para o estabelecimento do limite de perdas de solo, conforme verificado pelos menores valores de tolerância para as ordens dos Latossolos e Luvisolos.

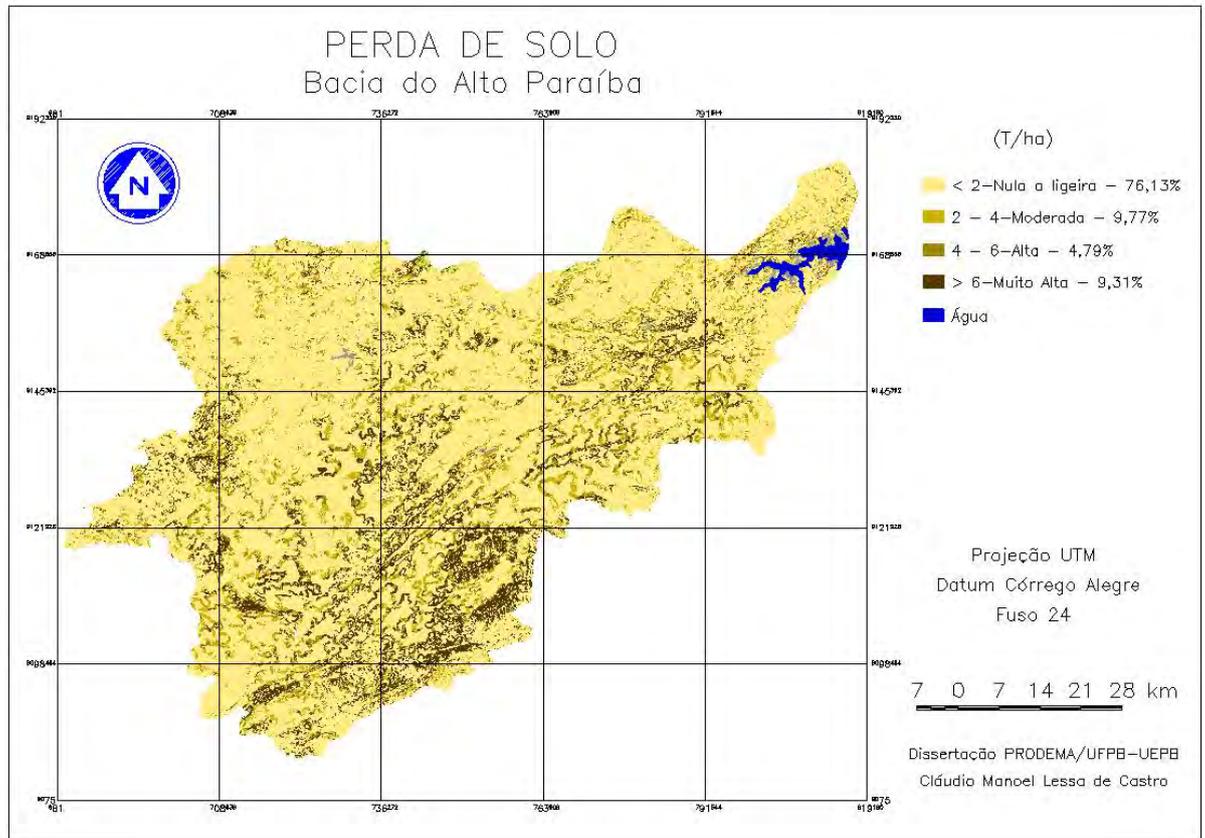
O Método IV difere apenas do Método I para Argissolos, Latossolos, Luvisolos e Neossolos; e difere dos Métodos I e II para Planossolos. Portanto, a maior diferença ocorreu entre o Método I e IV.

Foram verificadas diferenças significativas entre valores médios de tolerância dentro das ordens de solos, para os métodos utilizados no cálculo da tolerância de perda (Tabela 4), Os Latossolos revelaram os maiores valores e os Luvisolos os menores.

Em relação à comparação entre métodos (Tabela 4), o Método IV apresentou menor valor de tolerância, não diferindo apenas do Método III, que por sua vez foi igual ao Método II e menor que o Método I.

## 8.7 Mapa Temático de Perdas de Solo

Baseado na Equação Universal de Perda de Solos (EUPS).



**Figura 18** – Mapa Temático de Perdas de Solo, baseado na Equação Universal de Perda de Solo (EUPS).

Este mapa pode ser usado como uma ferramenta para subsidiar na definição e implementação de políticas públicas no âmbito da ocupação e uso adequado do solo, bem como na preservação, quando necessário, de áreas inadequadas para o desenvolvimento de atividades agropecuárias.

Os processos erosivos são considerados como a principal causa da redução da produtividade dos solos e com a necessidade cada vez maior de se produzir alimento em terras que inevitavelmente sofrem de perda de solos é necessário determinar os limites de tolerância da perda de solos. Um dos critérios mais importantes, do ponto de vista da agronomia, é a espessura da camada de solo favorável ao enraizamento das culturas, ou seja, as profundidades dos horizontes A e B. Além disso, Lombardi Neto e Bertoni (1975) consideram a relação textural da

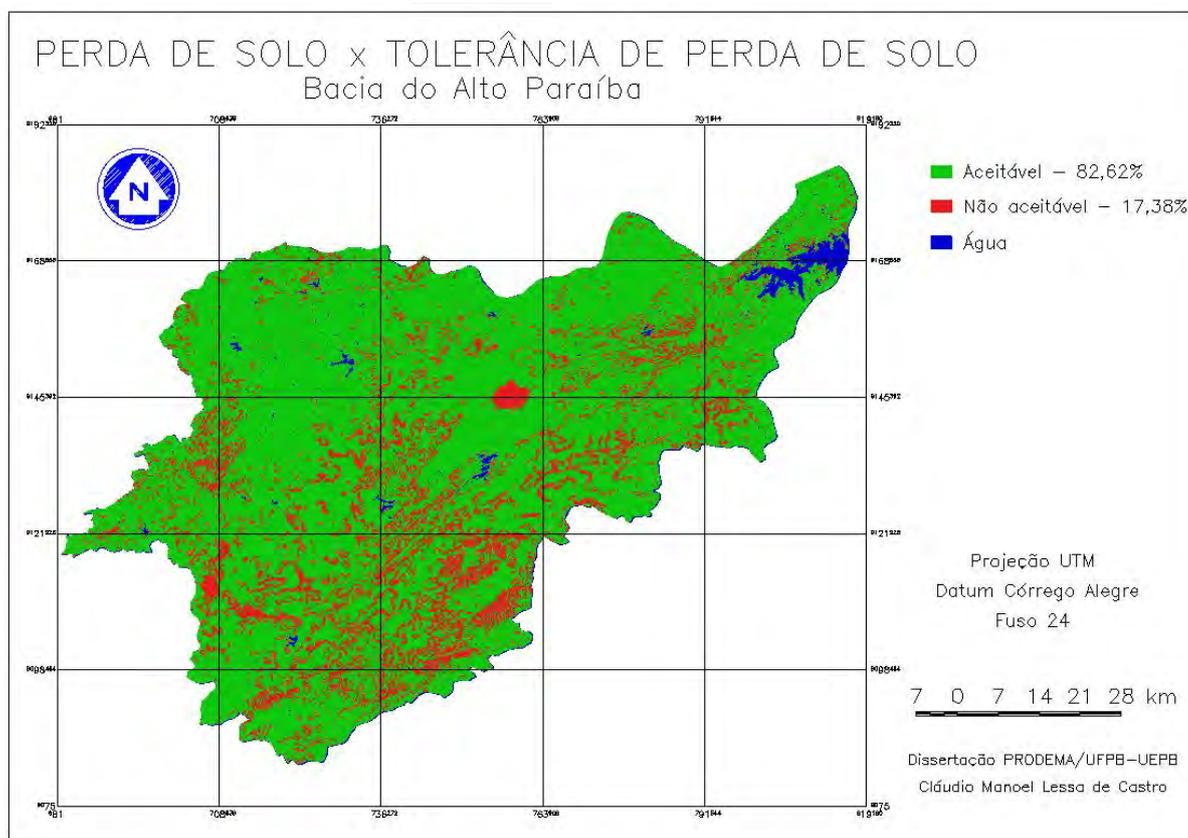
argila entre esses horizontes como um dos fatores importantes para a tolerância de perdas, pois ela afeta a infiltração e a permeabilidade dos solos.

A classificação deste mapa temático apresenta os seguintes percentuais, em relação à área total da bacia hidrográfica (Figura 18):

- Perda de solo nula a ligeira – 76,13 %
- Perda de solo moderada – 9,77 %
- Perda de solo alta – 4,79 %
- Perda de solo muito alta – 9,31 %

Os dados acima mostram que, os riscos erosivos no Alto-Paraíba apresentam uma situação relativamente favorável, se comparados com os de outras regiões do país, onde os fatores topográficos e climáticos são mais favoráveis à erosão laminar. Porém, Reis (1994) observa que a erosão do solo agrícola é a que apresenta melhores opções de controle, tanto pelo conhecimento de técnicas e procedimentos conservativos como por ter sua atuação localizada.

### 8.8 Mapa Temático comparativo entre Tolerância de Perdas de Solo x Perdas de Solo (EUPS) para a bacia hidrográfica do Alto-Paraíba



**Figura 19** – Mapa Temático comparativo entre as Perdas de Solo calculadas pela Equação USLE e a Tolerância de Perdas de Solo para o Estado da PB, calculado pela UFPB/Areia.

Este mapa (Figura 19) é o resultado da comparação entre os mapas apresentados nas Figuras 17 e 18, ou seja, o Mapa Temático de Perdas de Solo calculadas pela Equação USLE e a Tolerância de Perda de Solo para o Estado da PB, proposto pela UFPB/Areia.

Observou-se neste mapa, que cerca de 82,62 % da área está sob condição aceitável de perda de solos, ou seja, os valores estão dentro do esperado pelos estudos efetuados pela UFPB / Campus Areia, e cerca de 17,38 % ficaram com valores acima do previsto, ou seja, perdas de solo não aceitáveis.

Segundo Bertoni & Lombardi Neto (1993), apesar de a tolerância de perda de solos não estar incluída no modelo EUPS, este parâmetro corresponde às perdas

aceitáveis de terra, que permitam ainda que os solos possam suportar elevado nível de produtividade, por longo tempo. A tolerância depende essencialmente das características dos solos, da profundidade e da topografia, e, constitui-se, dessa forma, em informação de significativa importância, visto que permite ao planejador ou proprietário de terra, saber que tipo de uso pode fazer para que não haja degradação dos solos e estes possam ser explorados com elevados níveis de produtividade, permitindo o desenvolvimento sustentável da terra.

## 9. CONCLUSÕES FINAIS E SUGESTÕES

O trabalho buscou avaliar as perdas de solo por erosão laminar na Bacia Hidrográfica do Alto-Paraíba, por meio da Equação Universal de Perda de Solos, desenvolvida por Wischmeier e Smith (1978).

Apesar de suas limitações no aspecto quantitativo, pois além da necessidade de se melhorar a determinação de alguns parâmetros, existe ainda a necessidade de um trabalho de campo na área, para calibrar o modelo. A espacialização das perdas de solo pode auxiliar na tomada de decisão, pois permite identificar áreas de monitoramento prioritário em termos de controle de processos erosivos, para adoção de práticas conservacionistas.

As áreas degradadas e ocupadas por agricultura são as mais críticas por propiciar a erosão laminar de solos, devem ser atendidas prioritariamente com técnicas conservacionistas, ajustando-se à sua capacidade de uso, de acordo com sua classe de aptidão agrícola.

Contribui ainda para a priorização de ações de pesquisa que busquem avaliar os riscos associados aos diferentes usos, visando determinar as funções do ecossistema, sua resiliência e uma compatibilização entre uso e fatores ambientais.

Se cada um dos parâmetros da EUPS tivesse que ser estimado de forma tradicional, ou seja, mediante inúmeros experimentos de campo, isso representaria uma limitação quando se tratasse de grandes áreas. Nesse contexto, as técnicas de geoprocessamento aparecem como ferramentas alternativas para que este tipo de análise possa ser feita em escala regional, em tempo e custos menores. Estas técnicas, utilizadas neste trabalho, foram eficientes para auxiliar e facilitar o processo de análise necessário para atingir os objetivos desta dissertação.

Os valores de *erosividade* mais baixos ocorreram na área de menor declividade e cobertura vegetal do tipo caatinga aberta e densa. Essas categorias de caatinga (densa, aberta e rala) servem para designar o nível de cobertura espacial que a mesma ocupa nos solos. Dessa forma, tal classificação não leva em consideração a questão das espécies presentes. No caso da caatinga densa (ou fechada), os galhos das copas das árvores ou arbustos existentes se tocariam, protegendo mais os solos da erosão. A partir do momento que esse "contato" das copas é diminuído, devido à

rarefação de uma vegetação mais contínua, temos, entre outras conseqüências, uma maior susceptibilidade dos solos à erosão. Desta forma, obtivemos através da análise dos dados, o percentual de 76% representando cobertura vegetal aberta, rala, solo exposto e pequenas culturas de subsistência, o que corroboram para a existência de processos erosivos.

Os maiores valores de *erodibilidade* estão associados, à classe de solo Planossolo, com presença de horizonte superficial aluvial de textura arenosa ou média, e o horizonte B, de elevada concentração de argila, sendo considerados solos inaptos para agricultura. Possui relação textural alta de argila, entre os horizontes de subsuperfície e superfície, acarretando menor capacidade de infiltração nos horizontes de subsuperfície, acelerando com isso, a intensidade de erosão dos horizontes superficiais.

A *declividade* da área de estudo, indicou que cerca de 62% está com declividade de até 3%, e cerca de 26% com declividade entre 3% e 8%, o que nos leva a concluir tratar-se de um relevo que varia de plano a moderadamente ondulado.

Conforme o estudo elaborado pela UFPB / Campus AREIA, os valores calculados para tolerância de perdas por erosão laminar para os solos da região, situaram-se no intervalo 2,82 a 10,64 t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, valores esperados para os tipos de solos existentes na Paraíba. Ao lançar os dados deste estudo no SPRING, para a bacia hidrográfica do Alto-Paraíba, os valores calculados pelo software e plotados no Mapa Temático da figura 17, apresentou valores variando entre 2,82 a 4,39 t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, dentro dos limites esperados pela pesquisa acima citada.

Ao calcular as perdas de solo dessa bacia hidrográfica, com a utilização da Equação Universal de Perdas de Solo por erosão laminar, considerou-se os intervalos para essas perdas sendo: nula ou ligeira, para valores inferiores a 2 t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (76 %); perda de solo moderada, entre 2 e 4 t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (9,8 %); perda de solo alta, entre 4 e 6 t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (4,8%) e perda de solo muito alta, para valores superiores a 6 t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (9,3 %). Posteriormente, apresentamos o Mapa Temático comparativo entre a Tolerância de Perda de Solo e a Perda de Solo calculada pela EUPS (Figura 19), que nos mostrou que cerca de 82,62% (5459 km<sup>2</sup>) da área estudada estaria dentro dos parâmetros calculados pela pesquisa da UFPB/AREIA, e que cerca de 17,38% (1148 km<sup>2</sup>) ficaram com valores acima destes limites de

tolerância de perda de solo por erosão laminar. Atribui-se a estes valores acima da tolerância aos fatores:

- Susceptibilidade de algumas classes de solos à erosão laminar, tais como os encontrados na área estudada: predominância de Luvisolos e Vertissolos, sendo solos rasos, mal drenados, microrelevo gilgai, com presença de montmorilonita (solos expansíveis) e que com a variação térmica, expandem e contraem, criando um auto-revolvimento, sendo propenso à erosão laminar. Os Luvisolos podem apresentar vossorocamento, o que induz a necessidade de práticas conservacionistas adequada às culturas da região. A área de estudo também apresentou solo do tipo Planossolo, que possuem baixa drenabilidade e horizonte B com presença de argila, prejudicando a infiltração das águas de chuva, acarretando carreamento do horizonte A, por erosão laminar. Também foi constatado a existência de Neossolo, sendo sua característica principal a de solos pouco desenvolvidos, rasos com horizonte A diretamente assentado sobre a rocha ou sobre um pequeno horizonte C, geralmente com muito material de rocha em decomposição (regolito).

- Uso e cobertura do solo inadequados, com 76% da cobertura vegetal do tipo caatinga aberta, rala e solo exposto, aliado a práticas de pequenas culturas pela população da região.

Concluí-se, portanto, que para minorar os problemas mencionados, deve-se passar para uma nova abordagem nas políticas de conservação dos solos, resultante da combinação do estudo dos processos físicos e sociais, essenciais na economia política da erosão dos solos. Incluem-se nesta abordagem, algumas análises das áreas onde a erosão ocorre, como por exemplo, as causas de uma inundação, do assoreamento provocado pela erosão. Tais estudos seriam combinados com a análise das relações de produção, com as quais a terra é trabalhada, a tecnologia empregada, os preços dos insumos, etc. Os pequenos proprietários rurais são outro componente do quadro político, que se encontram geralmente dispersos, e não têm força política para determinar ações que evitem a erosão dos solos em suas terras, e muito menos para implementar programas de conservação dos solos.

Ressalta-se que, os programas tradicionais de conservação dos solos tendem a fracassar, porque não resultam de uma visão holística do problema, ou seja, embora seja verdadeiro que há questões técnicas que devem ser consideradas no diagnóstico dos processos erosivos, há que se levar em conta, os motivos sociais, pois também ajudam a explicar as origens do problema. Somente desta forma é que os programas de conservação dos solos poderão, não só recuperar os solos degradados, ao longo do tempo, mas permitir ao Estado intervir em questões ligadas à posse da terra, assistência técnica, crédito rural, etc.

Concluí-se desta forma, que a colocação de quatro premissas, em programas sociais e políticas públicas dos municípios da área estudada e do Estado da Paraíba, para a conservação dos solos, seriam a nosso ver, um grande avanço no contexto social, político e econômico que a erosão dos solos desempenha, ao lado das condições 'naturais'. As Universidades, além das pesquisas já elaboradas, poderiam ser um forte aliado ao Governo do Estado direcionando ainda mais, seus estudos nesta temática, trazendo soluções sociais e técnicas para este problema.

- 1) Os problemas são apresentados como sendo puramente ambientais, e como tal, as soluções têm sido apenas ambientais, ou seja, as causas sociais da erosão são totalmente desprezadas;
- 2) O mau manejo ambiental, colocando a culpa do uso 'irracional' da terra dos proprietários rurais, os quais não têm conhecimento sobre os limites e riscos ambientais, e, portanto, não sabem cuidar da terra;
- 3) As densidades demográficas sendo uma das causas da erosão dos solos e da própria destruição de alguns recursos naturais;
- 4) A falta de preparo dos municípios para o envolvimento gradativo de agricultores e criadores de gado e caprinos, numa economia de mercado.

## 10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AB'SABER, A. N. O Domínio Morfoclimático das caatingas brasileiras. São Paulo: USP/IGEUG, Geomorfologia, nº 43, 1974.
- AB'SABER, A. N. Os Domínios Morfoclimáticos na América do Sul. Geomorfologia, nº 52. São Paulo: IGEOG-USP, 1977.
- AB'SABER, A. N. Participação das superfícies aplainadas nas paisagens do Nordeste brasileiro. Geomorfologia, nº 19. São Paulo: IGEOG-USP, 1969.
- AB'SÁBER, A.N. Os Sertões: a originalidade da terra. *Ciências Hoje*, v.3, nº. 18, p. 43-52, 1985.
- ACUTIS, M.; DONATELLI, M. Soilpar 2.00:software to estimate soil hydrological parameter sand functions. *European Journal of Agronomy*, v.1, p. 373-377, 2003.
- AESA - Agência Executiva de Gestão de Águas da Paraíba
- ALBUQUERQUE, A. W.; FILHO, G. M.; SANTOS, J. R.; COSTA, J. P. V.; SOUZA, J. L. Determinação de fatores da equação universal de perda de solo em Sumé, PB. Campina Grande: Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 9, nº 2, 2005, p. 153-160.
- ALBUQUERQUE, A. W.; LOMBARDI NETO, F.; SRINIVASAN, V. S.; SANTOS, J. R. manejo da cobertura do solo e práticas conservacionistas nas perdas de solo e água em Sumé, PB. Campina Grande: Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 6, nº 1, 2002, p. 136-141.
- ALBUQUERQUE, S. G.; SOARES, J. G. G.; GUIMARÃES FILHO, C.; OLIVEIRA, M. C. Dinâmica do estrato herbáceo de uma vegetação de caatinga do sertão pernambucano, sob intensidades de uso por caprinos. Petrolina: Embrapa, 2004. Disponível em <[www.cpatsa.embrapa.br](http://www.cpatsa.embrapa.br)>.
- AMARAL, Nautir David. *Noções de conservação do solo*. 2ª. Ed. Nobel. São Paulo, SP. 1981.
- ARAÚJO FILHO, J. A. & CARVALHO, F. C. Desenvolvimento sustentado da caatinga. Sobral: Embrapa, Circular Técnica, nº. 13, 1997.
- AZEVEDO, Luiz Gabriel Todt de & BALTAR, Alexandre Moreira. Nota Técnica sobre a Atuação do Banco Mundial no Gerenciamento de Recursos Hídricos no Brasil. In: MUÑOZ, Héctor Raúl (Org.). *Interfaces da Gestão de Recursos Hídricos: desafios da Lei das Águas de 1997*. 2ª. Ed. Brasília: Secretaria de Recursos Hídricos, 2000. p. 59-71.

- BATISTA FILHO, M. O Brasil e a segurança alimentar. *Revista Brasileira de Saúde Materno Infantil*, v. 7, n. 2, p. 121-122, 2007.
- BENNETT, H.H. *Elements of soil conservation*. 2ª.ed. Tokyo: Kogakusha. 1955. 358p.
- BERTOL, I.; ALMEIDA, J.A. Tolerância de perda de solo por erosão para os principais solos do Estado de Santa Catarina. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 24. p. 657-668, 2000.
- BERTONI, J. & LOMBARDI NETO, F. *Conservação de Solo*. Poracicaba: Livroceres, 1985.
- BERTONI, J; LOMBARDI NETO, F. *Conservação do Solo*. São Paulo: Ícone, 2ª ed, 355p., 1990.
- BERTONI, J; LOMBARDI NETO, F. *Conservação do solo*. São Paulo, Ícone, 1999.
- BERTONI, José; LOMBARDI NETO, Francisco. *Conservação dos solos- São Paulo: Ícone, 2008 – 6ª. Ed.*
- BIGARELLA, J. J; ANDRADE-LIMA, D; RIEHS, P. J. Considerações a respeito das mudanças paleoambientais na distribuição de algumas espécies vegetais e animais no Brasil. *Simpósio Internacional sobre o Quaternário. Anais da Academia Brasileira de Ciências*, vol. 47 (suplemento). Curitiba-Porto Alegre: Academia Brasileira de Ciências, 1975, p. 411-464.
- BIGARELLA, J.J. - *Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais*. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2003. Vol.III (p.877-1436): II.
- BIRKELAND, P.W. 1974. *Pedology, weathering and geomorphological research*. Boulder: Department of Geological Sciences, University of Colorado. 285p.
- BLATT, H.; MIDDLETON, G. & MURRAY, R. 1972. *Origin of sedimentary rocks*. New Jersey: Prentice Hall Inc.
- BENTLEY, O.G. (1985). Soil erosion and crop productivity: a call for action. In: *Soil Erosion and Productivity*. Edit. R.F. Follet & B.A. Stewart I-7
- BLAIKIE, P. (1985). *The political economy of soil erosion in developing countries*. Longman Group Limited. Essex. England. 188p.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. Escritório de Pesquisas e Experimentação. Equipe de Pedologia e Fertilidade do Solo. *I. Levantamento exploratório de reconhecimento dos solos do Estado da Paraíba. II. Interpretação para uso agrícola dos solos do Estado da Paraíba*. Rio de Janeiro, 1972. 683p. (Boletim Técnico, 15; SUDENE. Série Pedologia, 8).

- BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Secretaria-Geral. *Projeto RADAMBRASIL. Folhas SB. 24/25 Jaguaribe/Natal; geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra*. Rio de Janeiro, 1981. 744p. 7 mapas (Levantamento de Recursos Naturais, 23).
- BRASIL. Projeto RADAMBRASIL. Levantamento de Recursos Naturais. Folha SB. 24/25 – Jaguaribe/Natal, v. 23. Rio de Janeiro: Ministério das Minas e Energia, 1981.
- BRINKMANN, R. 1964. *Lehrbuch der Allgemeinen Geologie*. Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag.
- BUCKMAN, H. O. & BRADY, N. C. 1960. *Nature and properties of soil*. 6ª. ed. New York: McMillan. 567p.
- CAMPOS, M.C.C.; QUEIROZ, S.B. Reclassificação dos perfis descritos no Levantamento Exploratório-Reconhecimento de Solos do Estado da Paraíba. *Revista de Biologia e Ciências da Terra*, v. 6, p. 45-50, 2006.
- CANTALICE, J.R.B. *Efeito de práticas conservacionistas sobre as perdas por erosão de uma Terra Roxa estruturada eutrófica de Catolé do Rocha–PB*. 1987. 56p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal da Paraíba, Areia.
- CARNEIRO, Joaquim Osterne. *Recursos de Solo e Água no Semi-Árido Nordeste*. João Pessoa: A UNIÃO, 1998. 115 p.
- CARVALHO, M. G. R. F. Estado da Paraíba. Classificação Geomorfológica. João Pessoa: UFPB/Ed. Universitária, 1982.
- CARVALHO, N.O. Hidrossedimentologia prática. Rio de Janeiro: Companhia de Pesquisa em Recursos Minerais, 1994.
- CARVALHO, Newton de Oliveira. *Hidrossedimentologia prática*. 2ª. Ed. Ver. Atual. E ampliada. - Rio de Janeiro. 2008.
- CARVALHO, Newton de Oliveira. *Sedimentologia*. Apostila do Curso de Segurança de Barragens, em Itaipava. Eletrobrás. Rio de Janeiro. 1982.
- CASSOL, E. A.; LIMA, V. S. Erosão em entre - sulcos sob diferentes tipos de preparo e manejo do solo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 38, n. 1, p. 117-124, 2003.
- CAVALCANTE FILHO, L.F. *Influência de épocas de colheita na produtividade de cultivares de mandioca (Manihot esculenta Crantz), estabelecida em solo Podzólico Vermelho Amarelo do Brejo Paraibano*. 1999. 63p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Paraíba, Areia.

CAVALIERE, A. Estimativa da adequação de uso das terras na quadrícula de Mogi Mirim (SP) utilizando diferentes métodos. 112 f. 1998. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. Disponível em:

<http://libdigi.unicamp.br/document/?code=vtls000132229>. Acesso em 31/08/2010.

CHAVES, I.B.; FREIRE, O.; AMORIM NETO, M.S. Características da precipitação e risco de erosão na região tropical semi-árida brasileira. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 9, p. 991- 998, 1985.

CHAVES, L.H.G.; CHAVES, I.B.; VASCONCELOS, A.C.F. *Estudo da salinidade e da drenabilidade dos solos no perímetro irrigado de São Gonçalo – (setores 11 e 12), Sousa-PB*. Campina Grande: DNOCS–ATECEL/UFPB, 2002a. 85p.

CHAVES, L.H.G.; CHAVES, I.B.; VASCONCELOS, A.C.F.; LEÃO, A.B. *Estudo da salinidade e da drenabilidade dos solos no Perímetro Engenho Arcoverde, Condado-PB*. Campina Grande: DNOCS–ATECEL/UFPB, 2002b. 77p.

CHRISTOFOLETTI, A. Geomorfologia. São Paulo, Edgard Blücher, 2ª. ed. 1980.

CONFAGRI - Confederação Nacional das Cooperativas Agrícolas e do Crédito Agrícola de Portugal - <http://www.confagri.pt/Ambiente/AreasTematicas/Solo>

CONVENÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS DE COMBATE À DESERTIFICAÇÃO.

Tradução: Delegação de Portugal. Lisboa: Instituto de Promoção Ambiental, 1995.

COOKE, R.U. & DOORNKAMP, J.C. – 1990 – Geomorphology in environmental management. 2<sup>nd</sup>. Ed. Oxford: Clarendon Press. 410 p.

CORRÊA, M.M.; KER, J.C.; MENDONÇA, E.S.; RUIZ, H.A.; BASTOS, R.S. Atributos físicos, químicos e mineralógicos de solos da região das várzeas de Sousa (PB). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 7, p. 311-324, 2003.

D'AGOSTINI, L.R. *Erosão: o problema mais que o processo*. Florianópolis: Ed. Da UFSC, 1999. 131p.

DA SILVA, I. F.; OLIVEIRA, F. P.; SANTOS, D.; NAVES SILVA, M. L. Tolerância de perda de solo por erosão para o Estado da Paraíba. In: REVISTA DE BIOLOGIA E CIÊNCIAS DA TERRA, Vol. 8, Nº. 2, 2º. Semestre 2008. f.60-71 – ISSN 1519-5228

DAVIS, W.M. 1909. Geographical Essays. Boston.

DEFINIÇÃO E NOTAÇÃO DE HORIZONTES E CAMADAS DO SOLO. 2. ed. rev. atual. Rio de Janeiro: EMBRAPA, Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos, 1988. 54 p. (EMBRAPA-SNLCS. Documentos, 3).

- DUQUE, José Guimarães. *Solo e água no polígono das secas*. 5ª. Ed. Mossoró: Fundação Guimarães Duque. 1980. 273 p. (Coleção Mossoroense, v. 142).
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (RJ). *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 2.ed. Brasília: Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412p.
- EMBRAPA. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 2ª ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006.
- EMMET, W.W. - 1968 – Gully erosion. In: Fairbridge, R.W. - The Encyclopedia of Geomorphology. Stroudsburg, Pennsylvania: Dowden, Hutchinson & Ross Inc. pp. 517-519.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. *Soil Erosion by water: some measures for its control on cultivated lands*. Rome: FAO, 1965. 284p.
- FOURNIER, F. – 1960 – Climat et erosion. La relation entre l' erosion Du sol par l' eaux et lês précipitations atmosphériques. Paris: Presses Universitaires de France. 201 p.
- GALINDO, I.C.L.; MARGOLIS, E. Tolerância de perdas por erosão para solos do Estado de Pernambuco. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 13, p. 95-100, 1989.
- GARCIA, G. J; ANTONELLO, S. L; MAGALHÃES, M. G. M. Nova versão do sistema de avaliação de terras – SIAT. *Engenharia Agrícola*, v. 25, n. 2, p. 516-529, 2005.
- GARDNER, W.R. *Soil science as a basic science*. *Soil Science*, Baltimore: v.151, p.2-6. 1991
- GIAROLA, N.F.B.; CURI, N.; SIQUEIRA, J.O.; CHAGAS, C.S.; FERREIRA, M.M. *Solos da região sob influência do reservatório da Hidrelétrica de Itutinga/Camargos (MG): perspectiva ambiental*. Lavras: CEMIG/UFLA/FAEPE, 1997, 101p.
- GOLDFARB, M. C. Contribuição da vegetação tipo caatinga nos processos de transferência de calor e massa no complexo solo-vegetação-atmosfera na região semi-árida de São João do Cariri. 124 p. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica-UFPB, João Pessoa, 2006.
- GOMES, F.P. Curso de estatística experimental. 2. ed., São Paulo: Nobel, 1985. 466p.
- GONÇALVES, C.W.P. (1989). Os (des) caminhos do meio ambiente. Editora Contexto. São Paulo. 148p.

- GRAZIANO NETO, f. (1986). Questão agrária e ecologia-crítica da moderna agricultura. Editora Brasiliense S.A. São Paulo. 154p.
- GUERRA, A.J.T. (1991). Soil characteristics and erosion, with particular reference to organic matter content. Tese de Doutorado. Universidade de Londres. 441p.
- GUERRA, A.J.T., SILVA, A.S., BOTELHO, R.G.M. (Orgs.) Erosão e Conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999. 340p.
- GUERRA, A.T. & GUERRA, A.J.T. Novo Dicionário Geológico – Geomorfológico. 2ª. Ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2001. 625p.
- HOLE, F.D. – 1968 – Erosion. The Encyclopedia of Geomorphology. Stroudsburg, Pennsylvania: Dowden, Hutchinson & Ross Inc. pp. 317-320.
- HUDSON, N. *Soil conservation*. Ames: Iowa State University Press, 1995. 391p.
- LAL, R. Soil erosion impact on agronomic productivity and environment quality. *Critical Reviews in Plant Sciences*, v. 17, n. 4, p.319-464, 1998.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística: Mapa de Solo do Estado da Paraíba elaborado em 2000, na escala 1:20.000.000, pelo INPE. Spring Básico. Tutorial 10 Aulas – Spring - 4.3. Disponível em <[www.dpi.inpe.br/spring](http://www.dpi.inpe.br/spring)>.
- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)
- KETTELHUT, Júlio Thadeu Silva *et.al.*. Experiências de Gestão Descentralizada de Recursos Hídricos. In: FREITAS, Marcos Aurélio Vasconcelos de (Org.) *O Estado das Águas no Brasil*, Brasília, DF: ANEEL, 1999. P. 225-231.
- LAL, R. Soil erosion from tropical arable lands and its control. *Advances in Agronomy*, v.37, p.183-247, 1984.
- LEAL, F.R.R. *Pormenorização pedológica do Regosol eutrófico fase caatinga hipoxerófila relevo suave ondulado como subsídio ao seu manejo agrícola*. 2001. 55p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal da Paraíba, Areia.
- LECARPENTIER, Claude; PRECIADO, Alfonso Perez; KHOBZI, Jack & OSTER, Remy. *La erosion de tierras en Colombia, com mapa de procesos dinámicos*. INDERENA, Instituto Nacional de los Recursos Naturales Renovables y Del Ambiente. 1977.
- LEHMAN, D.S. 1963. Some principles of chelation chemistry. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 27: 167-170

- LEPRUN, J. C. A erosão, a conservação e o manejo do solo no Nordeste brasileiro. Recife: SUDENE, 1981.
- LEPRUN, J. C. Etude comparée des facteurs de l'érosion dans Le Nordeste du Brésil et en Afrique de l'Ouest. BRET, B. (Coord.). Les hommes face aux sécheresses. Paris: IHEAL & EST, 1989, p. 139-154.
- LEPRUN, J. C. Manejo e conservação de solos do Nordeste. Recife: Sudene, 1988.
- LEPRUN, J. C.; SILVA, F.B.R. Avaliação das perdas de solo e água por erosão no Nordeste semi-árido. In: Projeto Áridas, GT-I-Recursos Naturais e Meio Ambiente (Vol. 1.2 Condições do uso e perspectivas de uso sustentável dos geoambientes do semi-árido). Seplan/PR. 1994
- LEPRUN, J. C.; MOLINIER, M.; CADIER, E.; FOTIUS, G.; GALINDO, O. Les sécheresses de La région Nordeste du Brésil et leurs conséquences. Secheresse. Paris: John Libbey/Eurotext, 1995, 6: 23-33.
- LIMA, C.C. *Caracterização de atributos de solo submetidos à queima de resíduos vegetais*. 1993. 66p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal da Paraíba, Areia.
- LOMBARDI NETO, F. & BERTONI, J. Erodibilidade de solos paulistas. Boletim Técnico do Instituto Agrônomo de Campinas, Campinas, n. 27, 1975.
- LOMBARDI NETO, F.; BERTONI, J. *Tolerância de perdas de terras para solos do Estado de São Paulo*. Campinas: Instituto Agrônomo, 1975. 12p. (Boletim Técnico, 28).
- LOMBARDI NETO, F.; MOLDENHAUER, W.C. Erosividade da Chuva: sua distribuição e relação com perdas de solo em Campinas, SP. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA DE CONSERVAÇÃO DE SOLO, 3., 1980, Recife. Anais... Recife: UFRPE, 1980. 136-147p.
- LOUGHNAN, F.C. 1969. Chemical weathering of the silicate minerals. New York. Elsevier Publ. Co. Inc.
- LUSTOSA, J. P. G. Caracterização morfológica, micromorfológica e mineralógica de três toposequências no município de Irauçuba-CE e suas relações com o processo de desertificação. 162 p. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Geociências, UNESP, Rio Claro, 2004.
- MACKENZIE, F.T. & GARRELS, R.M. 1966. Chemical mass balance between rivers and oceans. *Amer. Journ. Sci.* 264: 507-525.

- MANNIGEL, A.R.; CARVALHO, M. de P.; MORETI, D.; MEDEIROS, L.R. Fator erodibilidade e tolerância de perda dos solos do estado de São Paulo. *Revista Acta Scientiarum*, v. 24, p. 1335-1340, 2002.
- MARANDOLA JUNIOR, E. & HOGAN, D.J. Vulnerabilidade: esboço para uma discussão conceitual. In. SEMINÁRIO SOBRE QUESTÃO AMBIENTAL URBANA: EXPERIÊNCIAS E PERSPECTIVAS, 2004, Brasília. Textos... Brasília: Núcleo de Estudos Urbanos e Regionais da Universidade de Brasília, 2004. 13p.
- MARTINS, S.G.; SILVA, M.L.N.; CURTI, N.; FERREIRA, M.M.; FONSECA, S.; MARQUES, J.J.G.S.M. Perdas de solo e água por erosão hídrica em sistemas florestais na região de Aracruz (ES). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 27, n. 3, p.395-403, 2003.
- MENDES, Benedito Vasconcelos. *Biodiversidade e Desenvolvimento Sustentável do Semi-Árido*. Fortaleza: SEMACE, 1997. 108p.: il.
- MILLER JR., G.T. *Ciências Ambientais*. Trad. da 11ª. ed. norte-americana por Welington Braz Carvalho Delitti. São Paulo: Thomson Learning, 2007, 501p.
- MONIZ, A. C. (Coord.) Elementos de Pedologia. São Paulo, Polígono, Ed. Univ. São Paulo, 1972. 459p.
- MOREIRA, C.V.R. & PIRES NETO, A.G. In: *GEOLOGIA DE ENGENHARIA*. São Paulo: ABGE - Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998. p. 69-85.
- MORGAN, R.P.C. (1986). Soil erosion and conservation. Longman Group Limited. Essex, England. 298p.
- NIMER, E. Pluviometria e recursos hídricos de Pernambuco e Paraíba. Rio de Janeiro: IBGE/SUPREN, 1979.
- NÓBREGA, J.C.A. *Estudo comparativo de propriedades físicas de um Latossolo Vermelho-Amarelo, com ênfase na detecção de camadas compactadas ou adensadas*. 1996. 67p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal da Paraíba, Areia.
- OLLIER, C.D. 1969. *Weathering*. Edinburgo: Oliver & Boyd (1ª. Edição).
- OLLIER, C.D. 1975. *Weathering*. Londres: Longman Group Ltd. (2ª. Edição).
- PALMIERI, F. & LARACH, J. O. I. Pedologia e Geomorfologia. In: GUERRA, A. J. T. & CUNHA, S. B. (Orgs.) - Geomorfologia e Meio Ambiente. Rio de Janeiro: Bertrand-Brasil, 1996, p. 59-122.
- PARAÍBA. Governo do Estado. Secretaria de Agricultura e Abastecimento. Comissão Estadual de Planejamento Agrícola. *Zoneamento Agropecuário do Estado*

*da Paraíba*. João Pessoa: UFPB/FUNAPE-CCT-CCA/ELC, 1978. (Vol. 1: Relatório; Vol 2: Anexo de Pedologia).

PARAÍBA. Plano Diretor de Recursos Hídricos do Estado da Paraíba (PDRH-PB). Síntese do estudo de reconhecimento de solos em meio digital do Estado da Paraíba. João Pessoa: SEPLAN, 1997.

\_\_\_\_\_. Secretaria do Planejamento. *Plano de Desenvolvimento Sustentável 1996-2010*. João Pessoa, 1997a. 179p.

\_\_\_\_\_. Desertificação: realidade ou mito? *Revista Brasileira de Geografia*, 50 (1). Rio de Janeiro: IBGE, 1988, p. 7-39.

\_\_\_\_\_. Secretaria Extraordinária do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e Minerais – SEMARH. *Plano Simplificado de Gestão de Recursos Hídricos*. João Pessoa, 2000a. 18p.

\_\_\_\_\_. Lei Estadual nº 6308, de 02 de Julho de 1996. Institui a política Estadual de Recursos Hídricos, suas diretrizes e dá outras providências. Disponível em: <http://www.aesa.pb.gov.br/legislação/lei6544.php>

\_\_\_\_\_. Decreto n.º 18.378, de 31 de julho de 1996 – Dispõe sobre a Estrutura Organizacional do Sistema Gerenciamento de Recursos Hídricos.

PINTO, S. A. F. Contribuição metodológica para análise de indicadores da erosão do solo utilizando técnicas de sensoriamento remoto, geoprocessamento e modelo predictivo. 136 f. Tese (Livre-Docência) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, SP. 1995.

POPOLIZIO, E. 1975 – El pseudokarst y su importancia en los estudios hidrológicos del NEA. *Univ. Nac. Del Nordeste, Fac. Ingenieria, Argentina, Centro Geol. Apli., sec. C, Investigacion*, n. 1, 14p.

PRIGOGINE, I, & STENGERS, I. *A nova aliança; metamorfose da ciência*. Brasília: UnB, 1991. 247p.

PRIGOGINE, I. *O fim das certezas – Tempo, Caos e Leis da Natureza*. São Paulo: UNESP, 1996, 199p.

PRIGOGINE, I. *What is entropy? Naturwissenschaften*, v. 76, p.1-8, 1989.

REBOUÇAS, Aldo da Cunha (Org.) *Panorama da Degradação do Ar, da Água Doce e da Terra no Brasil*. São Paulo: IEA/USP; Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, 1997<sup>a</sup>. P. 59-107.

- REICHARDT, K. 1975 – Processos de transferência no sistema solo – planta – atmosfera. 3ª. Ed. Piracicaba: Publicação Especial do Centro de Energia Nuclear na Agricultura [USP – CNEN] e Fundação Cargill.
- REIS, J.G. Análise das políticas de conservação do solo para o semi-árido. In: Projeto Áridas, GT-I-Recursos Naturais e Meio Ambiente (Vol. 1.2 Condições do uso e perspectivas de uso sustentável dos geoambientes do semi-árido). Seplan/PR. 1994.
- RESENDE, M. Aplicações de conhecimentos pedológicos à conservação de solos. *Informe Agropecuário*, v. 11, n. 128, p. 3-18, 1985.
- RESENDE, M. *Bruno-Não-Cálcico: interpretação de um perfil*. Mossoró: ESAM/FGD/UFV, 1983. 165p. (Coleção Mossoroense, 218).
- RESENDE, M.; CURI, N.; SANTANA, D.P. *Pedologia e fertilidade do solo: interações e aplicações*. Brasília: Ministério da Educação, Lavras: ESAL, Piracicaba: POTAFOS, 1988. 81p.
- RETALLACK, G.J. 1990. *Soils of the past: An introduction to paleopedology*. Boston: Unwyn Hyman.
- RISSO, A. & CHEVALLIER, P. Uso de um modelo numérico do terreno para a obtenção dos parâmetros topográficos da equação universal de perda de solo modificada. In: SIMPÓSIO brasileiro de recursos hídricos, 9., 1991, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: ABRH, 1992.
- RODRIGUES, R. Agricultura e agronomia. *Estudos Avançados*, v. 15, n. 43, p. 289-302, 2001.
- ROLIM, H.O. *Potencial de uso agrícola do rejeito de caulim*. 2003. 100p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Paraíba, Areia.
- ROTH, E.S. 1965. Temperature and water content as factors in desert weathering. *Jour. Geol.*, 73: 454-468.
- RUXTON, B.P. 1968. Order and disorder in landform. In: Stewart, G.A. (ed.) – Land evaluation. Melbourne: MacMillan.
- SÁ, I. B.; FOTIUS, G. A.; RICHÉ, G. R. Degradação ambiental e reabilitação natural no trópico semi-árido brasileiro. Conferência Nacional e Seminário Latino-Americano da Desertificação. Fortaleza: Esquel/PNUD/Governo do Ceará/BNB, 7-11 mar. 1994.
- SALES, M. C. L. & OLIVEIRA, J. G. B. Análise da degradação ambiental no núcleo de desertificação de Irauçuba. SILVA, J. B.; DANTAS, E. W. C.; ZANELLA, M. E.;

- MEIRELES, A. J. A. (Orgs.). Litoral e Sertão: natureza e sociedade no Nordeste brasileiro. Fortaleza: Expressão Gráfica, 2006, p. 223-232.
- SALOMÃO, F. X. T. & ANTUNES, F. S. In: *GEOLOGIA DE ENGENHARIA*. São Paulo: ABGE - Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998. p. 87-99.
- SANTOS, C.D.; MOURA, E.R.T.; GONÇALVES, J.L.G.; SANTOS, D.; QUEIROZ, S.B. *Levantamento semidetalhado de solos da propriedade Sítio do Jardim: reclassificação aproximada dos solos e da aptidão agrícola*. Areia: Universidade Federal da Paraíba, 2002. 79p.
- SANTOS, J.B. *Estudo das relações nitrogênio: potássio e cálcio: magnésio sobre o desenvolvimento vegetativo e produtivo do maracujazeiro amarelo*. 2001b. 88p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Paraíba, Areia.
- SANTOS, R.F. *Ensino-aprendizagem de solos com agricultores e agricultoras de Mata Redonda, Remígio–PB a partir de levantamento utilitário*. 2001a. 123p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Paraíba, Areia.
- SANTOS, R.F. *Sistema de manejo do solo: efeitos sobre o crescimento e rendimento do algodoeiro herbáceo em condição de sequeiro*. 1998. 56p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal da Paraíba, Areia.
- SELBY, M.J. – 1985 – *Earth's changing surface: An introduction to Geomorphology*. Oxford: Clarendon Press.
- SILANS, A. M. B. P.; ALENCAR, R. I. S.; SILVA, F. M.; COSTA, A. M. B.; BARBOSA, F. A. R. Comportamento dos fluxos térmicos na interface entre a camada de rugosidade e a subcamada limite atmosférica sobre uma região de caatinga/PB. VI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. Maceió, 2002a (CD-ROM).
- SILANS, A. M. B. P.; SILVA, F. M. Bilans énergétique et hydrique en une region semi-aride dominée par la caatinga. Proceedings of the Conférence Internationale: Hydrologie des régions méditerranéennes et semi-arides. Montpellier: 01-04 abr. 2003.
- SILANS, A. M. B. P.; SILVA, F. M.; RODRIGUES, A. A.; MARINHO, L. S. Estudo experimental do comportamento térmico do solo em uma região coberta por vegetação tipo caatinga no estado da Paraíba. XII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia. Fortaleza, 2001a (CD-ROM).
- SILANS, A. M. B. P.; WERLANG, L. M. SILVA, F. M. Estudo experimental da interceptação da chuva pela vegetação de caatinga. XIV Simpósio Brasileiro de

Recursos Hídricos e V Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa. Aracaju, 2001b (CD-ROM).

SILANS, A. M. B. P.; WERLANG, L. M. SILVA, F. M. Estudo experimental do comportamento térmico do solo em uma região coberta por vegetação tipo caatinga, no estado da Paraíba. XII Congresso de Meteorologia. Foz do Iguaçu, 2002b (CD-ROM).

SILVA, A. M., SCHULZ; H. E.; CAMARGO, P. B. Erosão e Hidrossedimentação em Bacias Hidrográficas. São Carlos: RiMa, 2003, 2004, 140p. ISBN – 85-86552-52-6.

SILVA, A.P. *Atributos pedoecológico e censitários relativos à desertificação: município de Soledade-Paraíba*. 1997. 60p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal da Paraíba, Areia.

SILVA, I. F.; CAMPOS FILHO, O. R.; ANDRADE, A. P. Erodibilidade de seis solos do semi-árido paraibano obtida com chuva simulada e método nomográfico. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 10. Campinas: RBCS, 1986, p. 283-287.

SILVA, I.F.; ANDRADE, A.P. *Relatório de pesquisa sobre conservação do solo 1977 – 1984*. Areia: Convênio SUDENE-UFPB, 1984, 59p.

SILVA, J. H. Impacto ambiental causado pelo déficit hídrico no processo de degradação ambiental da microrregião do Cariri paraibano. 112 p. Dissertação de Mestrado. PRODEMA-UEPB, Campina Grande, 2003b.

SILVA, M.L.N.; CURI, N.; LEITE, F.P.; CARVALHO NÓBREGA, D.V. Tolerância de perdas de solo por erosão hídrica no Vale do Rio Doce da região Centro Leste do Estado de Minas Gerais. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO, 14., 2002, Cuiabá. *Anais...* Cuiabá: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. CD ROM.

SILVA, R. M.; CAMPOS, S. M. F.; SANTOS, C. A. G. Erosividade da chuva e desertificação no semi-árido paraibano. MOREIRA, E. (Org.). *Agricultura familiar e desertificação*. João Pessoa: Ed. Universitária/UFPB, 2006, p. 291-300.

SILVA, R.B. *Avaliação da qualidade do solo sob três agrossistemas do município de Areia - PB*. 2000. 39p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Paraíba, Areia.

SIMONSON, R.W. 1959. Outline of a generalized theory of soil Genesis. *Soil Sci. Am. Proc.*, nº. 23, p.152-156.

SISTEMA BRASILEIRO DE CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS. 2ª. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 2006. 306 p.

- SKIDMORE, E.L. Soil loss tolerance. In: KRAL, D.M., ed. *Determinants of soil loss tolerance*. Madison: American Society of Agronomy, 1982. Cap. 8, p. 87-93. (ASA Special Publication, 45).
- SMITH, R.M.; STAMEY, W. L. Determining the range of tolerable erosion. *Soil Science*, v. 100, p. 414-424, 1965.
- SOARES, V., Erosão e Sedimentação e sua relação com florestas. Disponível em: <<http://www.itid.inpe.br/dsr/vianeii/CursoHF/Capitulo8c.htm>>, publicado em 29/10/2002. Acessado em 26 de Out. 2010.
- SOIL SURVEY MANUAL. Washington, D.C.: U.S. Department of Agriculture, 1962. Supplement to Agriculture handbook, n.18.
- SOIL SURVEY MANUAL. Washington, D.C.: U.S. Department of Agriculture, 1984. cap.1. (Agriculture Handbook, n. 430).
- SOIL TAXONOMY: a basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. Washington, D.C.: U.S. Department of Agriculture, 1975. 754 p. (Agriculture Handbook, n. 436).
- SOUZA, B. I. & SUERTEGARAY, D. M. A. Estratégias de sobrevivência do pequeno produtor em áreas sujeitas à desertificação. Seminário Luso-brasileiro-caboverdiano: Agricultura familiar em regiões com riscos de desertificação. João Pessoa: UFPB, 2007.
- SOUZA, Bartolomeu Israel. Contribuição ao Estudo da Desertificação na Bacia do Taperoá – PB. 1999. 120 p. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente – PRODEMA), Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa.
- SOUZA, N.C.D.C. & ZUQUETTE, L.V. 1991. Mapeamento geotécnico com base em perfis típicos de alteração para a caracterização de unidades de terreno. In: Simpósio de Geologia do Sudeste, 2, 1991, São Paulo. *Atas...* São Paulo: SBG. P.345-352.
- SPAROVEK, G.; WEILL, M.M.; RANIERI, S.B.L.; SCHNUG, E.; SILVA, E.F. The life-time concept as a tool for erosion tolerance definition. *Scientia Agrícola*, v. 54, p. 130-135, 1997.
- STAMEY, W.L.; SMITH, R.M. A conservation definition of erosion tolerance. *Soil Science*, v. 97, p.183-186, 1964.
- STEIN, D. P.; DONIZELLI, P. L. GIMENEZ, F. A.; PONÇANO, L.; LOMBARDI NETO, F. Potencial de erosão laminar, natural e antrópica na Bacia do Peixe

- Parapanema. In. SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROSÃO, 4., 1987, Marília. Anais... Marília: ABGE, DAEE, 1987. 105-135 p.
- STEWART, I. *Será que Deus joga dados? A nova matemática do caos*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed., 1994. 257p.
- STRAKHOV, N.M. 1967. *Principles of lithogenesis* (v.1). New York: Consultants Bureau.
- SUGUIO, K. *Geologia Sedimentar*. 1ª. ed. São Paulo: Edgard Blücher. 2003, 400p.
- TRICART, J. As Zonas Morfoclimáticas do Nordeste Brasileiro. Salvador: Laboratório de Geomorfologia e Estudos Regionais/UFBA, 6(4), 1959.
- VALÉRIO FILHO, M. Técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto aplicadas ao estudo integrado de bacias hidrográficas. In: FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P. Solos altamente suscetíveis à erosão. Jaboticabal: Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1994. 223-242 p.
- VARGAS, M. 1978. *Introdução à Mecânica dos Solos*. São Paulo: McGraw-Hill/Edusp. 509p.
- VIANA DE LIMA, E. R. Erosão dos Solos: Fatores condicionante e modelagem matemática. Cadernos do LOGEPA. Universidade Federal da Paraíba. Laboratório e Oficina de Geografia da Paraíba. Departamento de Geociências. Ano2 – Nº. 01 – 2003. ISSN: 1677-1117.
- VIEIRA, H. *Fitossociologia de um trecho de mata ciliar em vegetação de agreste no Distrito de São José da Mata – Campina Grande – PB*. 1996. 64p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal da Paraíba, Areia.
- VIEIRA, M.N.F.; VIEIRA, L.S. *Tolerância de perdas de terras para alguns solos amazônicos*. Boletim FCAP, v. 19, p. 69-77, 1990.
- WIKIPEDIA – Site: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Neol%C3%ADtico>.
- WILLIAMS, J. R. & BERNDT, H. D. Sediment yield prediction based on watershed hydrology. Transactions of the ASAE, p. 1100-1104, 1976.
- WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. *Predicting rainfall erosion losses; a guide to conservation planning*. Washington, D.C.: U.S. Department of Agriculture, 1978. 58p. (Agriculture Handbook, 537).
- WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. *Predicting rainfall erosion losses; a guide to conservation planning*. Washington, D.C.: U.S. Department of Agriculture, 1978. 58p. (Agriculture Handbook, 537).