

UFRRJ
INSTITUTO DE AGRONOMIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
CIÊNCIA DO SOLO

TESE

Mapeamento Digital de Solos
da Formação Solimões
Sob Floresta Tropical Amazônica

André Luis Oliveira Villela

2013



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
CIÊNCIA DO SOLO

MAPEAMENTO DIGITAL DE SOLOS DA FORMAÇÃO
SOLIMÕES SOB FLORESTA TROPICAL AMAZÔNICA

ANDRÉ LUIS OLIVEIRA VILLELA

Sob a Orientação do Professor

Marcos Bacis Ceddia

e Co-orientação dos Professores

Gustavo de Mattos Vasques

Carlos Alberto Varella

Tese submetida como requisito
parcial para obtenção do grau de
Doutor, no Curso de Pós-
Graduação em Agronomia, Área de
Concentração em Ciência do Solo

Seropédica, RJ

Agosto de 2013

631.47811

V735m

T

Villela, André Luis Oliveira, 1975-

Mapeamento digital de solos da Formação Solimões sob floresta tropical amazônica / André Luis Oliveira Villela. – 2013.

112 f.: il.

Orientador: Marcos Bacis Ceddia.

Tese (doutorado) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Curso de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo, 2013.

Bibliografia: f. 90-96.

1. Levantamentos do solo – Amazônia – Teses. 2. Mapeamento digital - Amazônia – Teses. 3. Mapeamento do solo - Amazônia - Teses. 4. Solos – Formação - Amazônia - Teses. 5. Ciência do solo - Amazônia – Teses. I. Ceddia, Marcos Bacis, 1968-. II. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Curso de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo. III. Título.

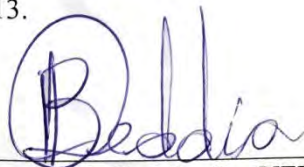
É permitida a cópia parcial ou total desta Tese, desde que seja citada a fonte

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA – CIÊNCIA DO SOLO

ANDRÉ LUIS OLIVEIRA VILLELA

Tese submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor**, no Curso de Pós-Graduação em Agronomia, área de Concentração em Ciência do Solo.

TESE APROVADA EM 29/08/2013.



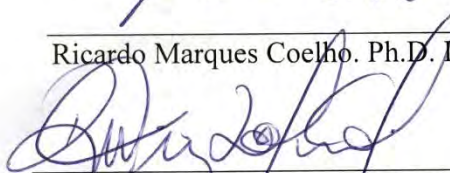
Marcos Bacis Ceddia. Dr. UFRRJ
(Orientador)




Maria de Lourdes Mendonça Santos Brefin. Ph.D. Embrapa Solos



Ricardo Marques Coelho. Ph.D. IAC/SP



Ricardo Simão Diniz Dalmolin. Dr. UFSM



Adelson Paulo de Araújo. Dr. UFRRJ

DEDICO

Aos meus pais, Edson e Nely, que jamais descuidaram de sua cria, muitas outras existências serão insuficientes para retribuir tanto amor e determinação. Todo esforço deles não foi em vão.... “Sei do vento que entortou a flor, passou também por nosso lar, e foi você quem desviou com golpes de pincel... Põe mais um na mesa de jantar, que hoje eu vou pra aí te ver...”

Às minhas irmãs, Andréia e Adriana, e aos agregados mais novos, Leo e Pedro, por serem parte do meu passado, meu presente e, com toda certeza, do meu futuro. Amo vocês. “E eu, pensando em você, invento a verdade e muito mais...”

OFEREÇO

Às minhas filhas Gabriela, Mariana e Carolina, que, em momentos importantes, não tiveram o meu mais atencioso olhar, meu sincero perdão. Este tempo difícil fez parte de um ousado plano de um futuro melhor, mais simples e tranquilo, de mais olhos nos olhos, sorrisos puros e muita felicidade. Vamos em frente, “o mundo começa agora, apenas começamos...”

Em especial, à minha esposa Elaine. Você tem sido MÃE, pai, esposa, amiga, companheira, fiel e guerreira, meu chão, meu esteio e meu céu. “Então tá tudo dito, é tão bonito, e eu acredito num claro futuro...”

HOMENAGEIO

Os meus orientadores Bacis, Varella e Gustavo, por todas as oportunidades, pela paciência, perseverança. Vou levar sempre comigo as emoções deste intenso convívio e aprendizado. Vou levar uma vida e meia para lhes agradecer. “De tanto não parar a gente chegou lá, do outro lado da montanha, aonde tudo começou...”

“Temo o especialista de uma só especialidade. Tenho dó do homem culto que só estudou nos livros”.

Gilberto de Medeiros Chaves Filho

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que contribuíram para a concretização deste trabalho, em especial à(s):

UFRRJ, que sediou e proporcionou as maiores e melhores experiências nestes 16 anos de acolhimento.

CTUR, pela acolhida e liberação parcial das minhas atividades para que este trabalho pudesse ser concluído.

Departamento de Solos, reduto das minhas melhores experiências profissionais.

PETROBRAS, pelo financiamento do projeto em que este trabalho se insere.

CAPES, pelo apoio financeiro no início das atividades.

Comitê de orientação, por todo empenho e profissionalismo.

Minha família, que compreendeu e tolerou minha ausência nestes longos anos.

Meus alunos, que, comigo aprendendo, muito me ensinaram.

Meus mestres, que dividiram e, assim, multiplicaram conhecimentos.

Funcionários e estudantes desta casa de ensino por tudo que não aparece, mas existe.

Amigos e colegas da UFRRJ, por serem parte indistinta de minha história.

Membros das inúmeras bancas de avaliação ao longo desta jornada.

Todos aqueles que, embora não tenham sido citados aqui, são parte deste trabalho e com toda certeza serão levados para sempre em minhas saudades.

RESUMO

VILLELA, André Luis Oliveira. **Mapeamento digital de solos da Formação Solimões sob Floresta Tropical Amazônica**. 2013. 112f. Tese (Doutorado em Agronomia, Ciência do Solo). Instituto de Agronomia, Departamento de Solos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2013.

A região do território brasileiro coberta por floresta tropical amazônica, por suas dimensões continentais e dificuldade de acesso e interesses diversos em atividades extrativistas, apresenta forte demanda por informações gerais que possam servir como subsídio para a ocupação, exploração e recuperação ordenada e ambientalmente equilibrada. As informações pedológicas disponíveis sobre a área são escassas e em escalas incompatíveis com as demandas atuais, e os investimentos em novas frentes de pesquisa na região ainda são insuficientes. Com a evolução tecnológica, sobretudo na área da informática que possibilita o armazenamento e análises de extensos bancos de dados pedológicos, as técnicas de mapeamento pedológico vêm se aperfeiçoando consideravelmente. Técnicas de pedometria têm sido utilizadas para armazenar e explorar grandes bancos de dados e têm possibilitado o aperfeiçoamento das bases pedológicas existentes e permitido a confecção de novos produtos em escala e áreas mapeadas maiores, com menores investimentos exigidos. A hipótese deste trabalho é de que a técnica de área de referência permite o mapeamento digital sistemático dos solos da região da formação Solimões, e o objetivo geral foi desenvolver e comparar métodos de mapeamento de solos da Formação Solimões, na Província Petrolífera de Urucu, AM, utilizando covariáveis do relevo. Foi executado um levantamento pedológico convencional de uma região com 8.000 ha, em nível de detalhe para ser utilizado como área de referência (AR) para a ampliação do mapa, com técnicas de mapeamento digital de solos (MDS) para uma área de 73.000 ha com redução de escala e agrupamento de legenda. Foi então elaborada modelagem numérica do terreno (MDT) (11 covariáveis derivadas do MDT) para posterior utilização deste fator de formação do solo, como preditor das unidades de mapeamento, em funções discriminantes (FD) e um sistema especialista baseado em modelo de árvores de classificação (AC). Foram desenvolvidas 4 cartas MDS, sendo duas treinadas por modelos baseados no modelo conceitual do pedólogo sobre a região em estudo, e duas treinadas por modelos baseados em análise estatística de informações sobre a área de referência. As técnicas mostraram-se eficientes para predição de unidades de mapeamento (UM) na região de estudo, com exatidão global (EG) variando entre 74,62% a 88,81% e índice kappa entre 0,68 e 0,85. O MDS baseado em sistema especialista e AC apresentou resultados sensivelmente melhores em termos de índice kappa, EG geral e EG para 3 das 4 UM da área. Embora as FD não tenham apresentado os maiores índices de acurácia, estas tem grande potencial de uso em MDS, sobretudo para a confecção de mapas preliminares para o levantamento pedológico de novas regiões, utilizando-se do conhecimento de AR de áreas vizinhas. Foram observadas limitações no emprego de FD para o mapeamento de UM's com pequena expressão territorial, sendo recomendável o aumento do número de observações de treinamento inversamente proporcional à frequência de observação destas UM's. A maior contribuição deste trabalho para a comunidade científica foi o estabelecimento de bases e técnicas de MDS, utilizando AR e relação solo-relevo para o mapeamento sistemático de novas áreas da formação Solimões.

Palavras-chave: Levantamento de solo. Mapa pedológico. Solo-relevo. Pedometria. Funções discriminantes. Área de referência.

ABSTRACT

VILLELA, André Luis Oliveira. **Digital mapping of soil form the Solimões Formation in the Amazon rainforest. 2013. 112p.** Thesis (Doctor in Agronomy, Soil Science). Instituto de Agronomia, Departamento de Solos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2013.

The Brazilian territory region covered by the Amazon rainforest, due to its continental dimensions and difficulty of access and various interests in extractive activities, has great demand for information to provide support for the occupation, exploitation, and systematic recuperation thus keeping environmental safeguards. The regional soil information available is scarce and in scales inconsistent with the current demands, and the investments in new areas of research in the region is still insufficient. With technological developments, especially in the area of informatics that enables the storage and analysis of large banks of pedological data, the soil mapping techniques improved considerably. Pedometric techniques have been used to store and to explore large databases, thus enabling the improvement of existing soil databases and allowing manufacture of new products in larger scale and mapped areas, with low investment required. The hypothesis of this study is that the technique of reference area may allow the systematic digital mapping of soils from the Solimões Formation, in the Amazon State. The general objective was to develop and compare methods for mapping soils in the Oil Province Urucú (AM), using relief covariates. A conventional pedological survey of an area of 8.000 hectares, at the detail level, was executed to be used as a reference area (RA), in the augmentation of the map using digital soil mapping (MDS) techniques for an area of 73.000 hectares after downscaling and grouping of the legend. The numerical modeling of the terrain (MDT) was used (11 covariates derived from MDT) for further application of this soil formation factor as a predictor of the map units, in discriminant functions (DF), and in an expert system based on a tree model classification (AC). Four MDS models were developed, where two were trained using the studied region conceptual model of the pedologist, and the other two were trained with models based on a statistical analysis of the reference area information. The techniques were effective for predicting the mapping units (MU) in the study region, with overall accuracy (EG) ranging from 74.62 % to 88.81 %, and the kappa index was between 0.68 and 0.85. The MDS based in the expert system and AC showed significantly better results in terms of the kappa index, general EG, and the EG for 3 of the 4 mapping units in the area. Although the FD had not the highest accuracy levels, they showed a great potential for use in MDS, especially for preliminary mapping for the pedological survey of new regions, using knowledge of AR neighboring areas. The limitations were observed in the use of FD for mapping unities with small territorial expression, and it is recommended to increase the number of training observations in a way inversely proportional to the frequency of observation of these MUs. The major contribution of this work to scientific community was the establishment of bases and techniques of MDS, using AR and the soil relief relationship, for systematic mapping of new soils form Solimões Formation.

Keywords: Soil survey. Soil map. Soil-relief. Pedometrics. Discriminant functions. Reference area.

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 1 |
| 2 | REVISÃO DE LITERATURA | 5 |
| 2.1 | Mapeamento Pedológico..... | 5 |
| 2.1.1 | Mapeamento convencional de solos | 5 |
| 2.1.2 | Mapeamento digital de solos..... | 6 |
| 2.2 | Relações Quantitativas para Predição Espacial | 7 |
| 2.2.1 | Correlação ambiental | 7 |
| 2.2.2 | Áreas de referência..... | 11 |
| 2.2.3 | Análise discriminante..... | 12 |
| 2.3 | Avaliação de Cartas Pedológicas | 14 |
| 2.4 | Fatores de Formação do Solo na Formação Solimões..... | 17 |
| 2.4.1 | Material de origem | 17 |
| 2.4.2 | Relevo, organismos, clima, e tempo | 20 |
| 2.4.3 | Solos..... | 24 |
| 3 | MATERIAL E MÉTODOS..... | 26 |
| 3.1 | Área estudada, Localização, Limites e Escalas | 26 |
| 3.2 | Base Planialtimétrica | 27 |
| 3.3 | Mapeamento Pedológico Convencional Detalhado | 28 |
| 3.3.1 | Levantamento pedológico | 28 |
| 3.3.2 | Classes de solos encontradas na área de estudo..... | 30 |
| 3.3.3 | Critérios para unidades de mapeamento e fases empregadas | 34 |
| 3.4 | Validação da Carta Pedológica Convencional..... | 37 |
| 3.5 | Agregação da Legenda da Carta Convencional para o MDS | 39 |
| 3.6 | Descrição das Unidades de Mapeamento para o MDS..... | 39 |
| 3.7 | Ajuste da Carta Pedológica Convencional Simplificada | 40 |
| 3.8 | Banco de Dados Digital e Programas Utilizados..... | 41 |
| 3.9 | Modelagem do Terreno e Relação Solo-Relevo | 41 |
| 3.10 | Mapas Temáticos Derivados do MDEHC..... | 43 |
| 3.10.1 | Geoformas | 44 |
| 3.10.2 | Hidroformas | 49 |
| 3.11 | Mapeamento Digital de Solos por Técnicas de Área de Referência | 53 |
| 3.11.1 | MDS 1: Funções discriminantes em pontos indicados pelo pedólogo.... | 54 |
| 3.11.2 | MDS 2: Funções discriminantes em pontos de observação de solo | 57 |
| 3.11.3 | MDS 3: Árvores de decisão em carta área de referência | 58 |
| 3.11.4 | MDS 4: Funções discriminantes em carta área de referência | 60 |
| 3.12 | Geração das Cartas Digitais no SIG..... | 62 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.13 | Validação das Cartas Digitais | 62 |
| 3.14 | Confecção do MDS em Escala 1:50.000 para todo o Polígono da BOGPM | 63 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 64 |
| 4.1 | Mapeamento Pedológico Convencional Detalhado | 64 |
| 4.1.1 | Unidades de mapeamento da carta pedológica convencional | 64 |
| 4.1.2 | Carta pedológica convencional | 64 |
| 4.1.3 | Validação da carta pedológica convencional | 66 |
| 4.1.4 | Validação da carta pedológica área de referência | 68 |
| 4.2 | Mapeamento Digital de Solos por Técnicas de Área de Referência..... | 69 |
| 4.2.1 | Análise multivariada | 69 |
| 4.2.2 | Algoritmo de classificação em árvore..... | 72 |
| 4.2.3 | Cartas pedológicas digitais..... | 73 |
| 4.2.4 | Análise comparativa das cartas pedológicas digitais | 78 |
| 4.2.5 | Validação das cartas pedológicas digitais | 82 |
| 4.2.6 | Análise comparativa da validação das cartas pedológicas digitais | 85 |
| 4.2.7 | Análise geral de custos para elaboração cartas pedológicas | 88 |
| 5 | CONCLUSÕES | 89 |
| 6 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 90 |
| 7 | APÊNDICE | 97 |

1 INTRODUÇÃO

A região norte do Brasil, onde está inserida a Amazônia Legal, é caracterizada por vasta extensão territorial, coberta por uma densa floresta tropical e historicamente tem sido alvo de intensa exploração, através de diversas atividades humanas. Dada a importância ecológica desta região, que é tida como a de maior biodiversidade do planeta, atenção mundial vem sendo dispensada a este bioma (Figura 1). Como o processo de ocupação e exploração humana é necessário e irreversível, estudos ambientais são fundamentais para nortear as ações de maneira equilibrada e com o menor prejuízo ambiental possível. Diversos estudos vêm sendo desenvolvidos visando à sistematização de informações ambientais na região. Porém pouca informação pedológica existe, principalmente em escalas adequadas ao planejamento das ações exploratórias ou de recuperação ambiental.

A Província Petrolífera de Urucu (PPU) é composta por cinco campos de exploração e produção de petróleo e gás natural e está localizada no município de Coari, estado do Amazonas. A PPU está inserida na Bacia Sedimentar do Solimões, região onde se encontra a segunda maior reserva de gás do Brasil e se produz o petróleo de melhor qualidade do país. Desde 1988, a Petrobrás vem explorando gás natural e petróleo na província petrolífera de Urucu. A unidade (Figura 2), denominada Base de Operações Geólogo Pedro Moura (BOGPM), está situada em área coberta por floresta amazônica distando 650 km a sudoeste de Manaus. Desde a sua criação, a Petrobrás vem desenvolvendo um programa de conservação do meio ambiente, no entanto, a abertura de estradas, clareiras, jazidas e poços de petróleo e gás natural vem causando alguns impactos ambientais. Como se trata região de acesso extremamente difícil, coberta por densa floresta tropical, é muito carente de pesquisas sobre o meio físico. Diante da necessidade de estudos detalhados visando o estabelecimento de protocolos de exploração ambiental na região, bem como ações de restauração das áreas já exploradas, foi elaborado um projeto com a missão de mapear com nível de detalhe adequado os solos da região e desenvolver metodologias para mapeamento de áreas circunvizinhas.



Figura 1: Vista aérea de parte da Base de Operações Geólogo Pedro Moura sobre trecho do rio Urucu, Coari - AM.



Figura 2: Vista aérea da Refinaria da BOGPM, Coari - AM.

Os levantamentos pedológicos convencionais são ótimas fontes de informação mais comumente utilizadas para planejamento, uso e recuperação de áreas em exploração. Além da já citada demanda por informações que permitam o planejamento, manejo e recuperação adequados para a área, acredita-se que a carta de solos convencional possa ser bastante útil para a confecção de mapas preliminares, em escalas menos detalhadas para outras regiões circunvizinhas pertencentes à formação Solimões.

A obtenção de dados de solos, em nível de campo, para fins de mapeamentos pedológicos convencionais ou digitais, não é tarefa simples. São necessários a mobilização e o deslocamento da equipe técnica com suprimentos e equipamentos ao longo da área a ser mapeada. Esta tarefa torna-se mais complexa quando se trata de mapeamento de solos sob a floresta tropical amazônica, com toda sorte de obstáculos ao acesso de regiões remotas. A região estudada só é acessível por via fluvial ou aérea, sendo possível o deslocamento terrestre por estradas e picadas abertas a partir destas vias, floresta adentro. Em situações como esta, é desejável e recomendável que se aproveite toda informação disponível sobre a área e, para áreas onde já existe uma carta ou mapa pedológico, este pode ser utilizado como área de referência. Em anos recentes, o mapeamento digital dos solos tem experimentado um rápido desenvolvimento de métodos novos e econômicos, devido, principalmente, à crescente disponibilidade de mapas auxiliares. Uma das vantagens do mapeamento digital com base no conhecimento dos padrões regionais de solos é a possibilidade de prever a ocorrência de tipos de solos em áreas não mapeadas, com uso de informações geradas previamente em áreas de referência (LAGACHERIE & VOLTZ, 2000).

Uma metodologia de área de referência foi estudada e descrita por Lagacherie (1995), e é baseada na utilização de mapas ou cartas pedológicas existentes para mapear áreas maiores que a mapeada originalmente ou áreas adjacentes, desde que estas estejam sob domínio dos mesmos fatores de formação do solo. A técnica consiste de análise dos padrões

(modelo conceitual) utilizados para a confecção da carta pedológica inicial, seleção de covariáveis disponíveis, estabelecimento de um modelo preditor e criação de algoritmo para o mapeamento desejado. Esta metodologia foi aplicada para MDS, na França, e obteve resultados considerados promissores. Assim acredita-se na eficiência e potencial desta técnica para o MDS da região amazônica.

Apesar de consagrado por Dokouchaev (1883), desde os primórdios da Ciência do Solo, que os solos resultam da interação entre os cinco fatores: clima, organismos, relevo, material de origem e tempo, pressupõe-se que, em escala local, quando as demais variáveis são semelhantes, o relevo condiciona a ocorrência dos solos, que são influenciados pela dinâmica do fluxo da água, energia e processos de redistribuição de material nas vertentes, controlando sobremaneira sua distribuição (McKENZIE e RYAN, 1999). Compreende-se que, a partir da morfologia do relevo, é possível fazer inferências sobre a ocorrência das unidades de solo, sempre que os demais fatores condicionantes podem ser considerados homogêneos na escala de abordagem adotada. Por isso, esses modelos expressam a topografia como instrumento auxiliar na identificação de solos, contribuindo na compreensão das relações relevo-solo e oferece potencial para predição de unidades de mapeamento. No caso da Província petrolífera de Urucu, dada a homogeneidade dos demais fatores de formação, bem como a inexistência de outras bases em escala adequada, o relevo é o fator que melhor prediz a distribuição espacial dos solos.

Segundo MacBRATNEY et al. (2003), o mapeamento digital de solos introduz algumas vantagens em relação ao método convencional para o mapeamento de solos, por ser uma alternativa rápida e econômica. Pode ser definido como a criação de sistemas espaciais de informação, utilizando modelos numéricos para a inferência das variações espaciais dos tipos de solos, a partir de observações e conhecimento dos solos e de variáveis ambientais correlacionadas, como as variáveis geomorfométricas declividade, curvaturas, dentre outras (Lagacherie & MacBratney, 2007).

A modelagem quantitativa e digital dos solos é designada de Pedometria (MacBRATNEY et al., 2003). Esses modelos estão sendo combinados com Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e técnicas de inteligência artificial, Redes Neurais Artificiais (RNA), árvores de classificação (AC), entre outros, (MENDONÇA-SANTOS e SANTOS, 2003), no intuito de descrever, classificar e estudar os padrões de variação espacial dos solos.

Para que um mapa produzido possua validade e aplicabilidade, é necessária a realização de validação em campo. No processo de validação, verifica-se a pureza e precisão daquele mapa para fins de aperfeiçoamento do modelo pré-existente (SILVA, 2000). Sem submissão a testes de validação, é praticamente impossível estimar a acurácia e, conseqüentemente, as limitações da mesma. Em grandes levantamentos, com diversas equipes de pedólogos, é frequente a inobservância da expressividade de algumas classes de solos que ocorrem em pontos específicos da área em estudo, ficando estas classes descritas como inclusões em outras unidades de mapeamento. Outro fato frequente é a existência de dúvidas no momento do estabelecimento das unidades de mapeamento. Por estes motivos é fundamental que sejam feitas incursões à área estudada para fins de validação.

É prática comum a validação de cartas digitais de solos comparando-as com cartas convencionais. O problema é que muito pouco ou nada se conhece sobre a acurácia da carta convencional. Assim, é tomada como verdade de campo uma carta não validada. Outro problema comum se refere à agregação de legendas e redução da escala dos mapas, onde geralmente os critérios de agregação não são explicitados de forma adequada.

Diante do que foi exposto, a hipótese deste trabalho é a de que a técnica de área de referência permite o mapeamento digital sistemático dos solos da região da formação Solimões, sendo seu objetivo geral, foi desenvolver e comparar métodos de mapeamento digital de solos da Formação Solimões, na Província Petrolífera de Urucu, AM, utilizando covariáveis do relevo.

Já seus principais objetivos específicos são:

a) Executar o Levantamento e Mapeamento Pedológico Convencional da BOGPM, em nível de detalhe (1:10.000), para ser utilizado como área de referência (AR);

b) Desenvolver modelos digitais de terreno (MDT) e derivar mapas temáticos a serem utilizados como covariáveis preditoras da relação solo-relevo;

c) Utilizar a AR para o mapeamento digital de solos em escala semi-detalhada (1:25.000), em uma área mais extensa da formação Solimões, utilizando função discriminante e árvore de classificação em um sistema especialista.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Mapeamento Pedológico

2.1.1 Mapeamento convencional de solos

O levantamento pedológico consiste da caracterização e classificação das unidades de solos, bem como seus agrupamentos, estabelecendo limites geográficos, representados em um mapa. A descrição e interpretação é feita de acordo com necessidades específicas e tem por finalidade a ordenação do conhecimento com relação ao objeto, visando à memorização consistente de maneira fácil e precisa (SANTANA, 1983).

O levantamento de solos convencional continua sendo a mais popular forma de mapeamento de solos. Este método de mapeamento tem suas raízes na taxonomia biológica e levantamentos geológicos. Dentre os fundamentos teóricos básicos do método, destacam-se os trabalhos de Dokouchaev (1883) e Jenny (1941), onde o primeiro aborda o tema e o segundo aborda de maneira quantitativa as complexas relações entre os fatores de formação dos solos por meio de um modelo expresso pela equação $S = f$ (material de origem, clima, relevo, organismos e tempo). Embora um modelo determinístico tenha sido apresentado, percebeu-se que este não era simples de prever os solos, em função das complexas interações entre os fatores de formação.

Apesar das limitações do modelo de Jenny em mapear a variabilidade espacial dos solos, o mapeamento convencional obteve êxito. A solução para contornar as limitações foi:

- a) como não se pode catalogar toda a variabilidade, utiliza-se o perfil representativo¹;
- b) para a representação cartográfica, utiliza-se como entidade espacial a Unidade de mapeamento².

As consequências desses procedimentos no que se refere à visualização e modelagem dos mapas foram:

- a) Os mapas são representados por entidades espaciais discretas (visão de objetos);
- b) A visão de objetos implica na impressão equivocada de que em cada unidade de mapeamento os atributos do solo são homogêneos (homogeneidade intra-classe) e que nos limites das unidades de mapeamento as variações são abruptas (o que não representa a realidade).

Do ponto de vista metodológico, o método convencional de mapeamento de solos consiste de três etapas:

- a) Observação de dados auxiliares de campo (fotografia aérea, geologia, vegetação, etc.) e de perfis de solo descritos;

¹ Perfil representativo – Unidade de classificação mais homogênea em qualquer nível categórico de sistemas taxonômicos. A nomenclatura do perfil representativo, bem como seus atributos químicos, físicos e mineralógicos são utilizados para representar uma determinada unidade de mapeamento.

² Unidade de mapeamento – Grupo de área de solo criada para possibilitar a representação cartográfica e mostrar a distribuição espacial dos solos.

b) Incorporação dos atributos dos solos em um modelo conceitual implícito que é usado para inferir a variação do solo;

c) Aplicação do modelo conceitual, que é usado para inferir o solo em locais não observados.

O modelo conceitual de variação do solo é então transformado em modelo cartográfico, delimitando unidades de mapeamento de solos em fotos aéreas e mapas topográficos. Nesses casos, as escalas das fotografias e/ou do mapa topográfico, bem como a densidade de pontos amostrais (perfis representativos e amostras extras), definem a escala final do mapa de solos.

As unidades taxonômicas identificadas na área devem ser tipificadas por perfis completos representativos e suas amplitudes de variação estabelecidas por perfis complementares e amostras extras, precisamente coletadas para análises de laboratório. As unidades de mapeamento são identificadas por caminhamentos no campo, em topossequência e com observações a pequenos intervalos. Essas unidades são, normalmente, unidades simples, homogêneas em termos de composição, e definidas de acordo com limites pré-estabelecidos, admitindo-se até 15% de inclusões de outros solos em suas composições.

As principais críticas a esse método de mapeamento são:

a) O modelo conceitual desenvolvido é primariamente implícito e construído de maneira heurística;

b) Os resultados são excessivamente dependentes do conhecimento (experiência) do executor;

c) Em essência, os mapas não são testados e, portanto, o produto final é um mapa sem conhecimento das limitações e acurácia.

De acordo com Burrough et al. (1971), menos de 0,001% da área é de fato observada, refletindo o custo elevado da amostragem de campo. Segundo Zhu et al. (1999, 2001), a precisão e eficácia de levantamentos tradicionais são limitadas, principalmente pela técnica de cartografia baseada em polígonos e pelo processo manual de produção do mapa pedológico.

2.1.2 Mapeamento digital de solos

O mapeamento digital de solos (MDS) utiliza técnicas similares ao mapeamento convencional, em teoria, mas o grande diferencial é que frequentemente produz expressões quantitativas da variabilidade do solo com medidas de acurácia³.

O MDS é definido como a criação e população de sistemas espaciais de informação de solos, através do uso de modelos numéricos para a inferência das variações espaciais e temporais dos tipos de solos e de suas propriedades, a partir de observações e conhecimento dos solos e de variáveis ambientais correlacionadas (Lagacherie & MacBratney, 2007). Para melhor entender o surgimento do termo mapeamento digital de solos, é importante fazer um breve relato da evolução dos conceitos.

Considerando as limitações do método convencional de mapeamento de solos e com o crescente desenvolvimento de algoritmos e ferramentas computacionais, sobretudo a partir da

³ Acurácia mede a proximidade de cada observação ao valor-alvo que se procura atingir, enquanto que precisão é a proximidade de cada observação de sua própria média. Um bom estimador é aquele que reúne acurácia e precisão (Bussab & Morettin, 1981).

década de 70, do século passado, uma série de avanços foi possibilitando o surgimento de uma nova perspectiva metodológica de mapeamento, em que a variabilidade espacial dos solos pudesse ser mais bem mapeada e representada, para os diversos fins. O desenvolvimento de novas tecnologias implicou numa série de trabalhos sobre modelagem e variabilidade espacial.

Tentando aliar a equação de Jenny e solucionar quantitativamente a equação, McBratney et al. (2003) propuseram então aliar em um modelo determinístico-estocástico, o conhecimento pedológico sobre os processos de formação e distribuição dos solos na paisagem $\{S = f(\text{material de origem, clima, relevo, organismos e tempo})\}$ com técnicas quantitativas usadas em pedometria. A proposta na forma de equação é:

$$S = f(\text{Solo, espaço, material de origem, clima, relevo, organismos e tempo})$$

Basicamente, a diferença entre a equação de Jenny e a proposta apresentada por McBratney et al. (2003) é a incorporação dos fatores solo e espaço. A introdução da informação solo tem como objetivo associar ao modelo o conhecimento existente sobre os solos. Esse conhecimento pode ser incorporado de diferentes formas, como, por exemplo, a classe de solo do local e/ou atributos do solo medidos que auxiliem no mapeamento. O espaço se refere às coordenadas x , y e outras medidas de distância, da informação de solo associada.

Apesar de todas as vantagens e dos crescentes avanços, o mapeamento digital de solos ainda é visto com desconfiança por muitos pedólogos. Um dos pontos de discordância é a ausência de um padrão na condução dos trabalhos de mapeamento digital ao contrário do que ocorre com os levantamentos convencionais que se utilizam de protocolos conhecidos há quase um século. Porém, Sarmiento (2010) relata que ao analisar a rotina dos trabalhos com mapeamentos digitais é possível constatar que a grande maioria segue algumas etapas que podem ser consideradas equivalentes àquelas que são usadas nos levantamentos convencionais. O mapeamento digital, assim como o levantamento convencional, faz uso de informações coletadas ou disponíveis em pontos de observação de solos. Essas informações são utilizadas para ajustar um modelo quantitativo com variáveis relativas às condições do ambiente nos mesmos locais e o modelo ajustado é depois empregado para prever propriedades do solo ou classes de solos para o restante da área (MCBRATNEY, et al., 2003) e (LAGACHERIE, 2008).

2.2 Relações Quantitativas para Predição Espacial

Diversos pesquisadores têm desenvolvido trabalhos com abordagens e técnicas que utilizam os conceitos introduzidos por Jenny (1941) e posteriormente desenvolvidos e ampliados por McBratney et al. (2003). Esta abordagem vem sendo chamada de correlação ambiental (MCKENZIE; AUSTIN, 1993) e utiliza como planos básicos de informação os modelos digitais de elevação (MDE) e suas derivadas, produtos de sensoriamento remoto ou proximal ou bases cartográficas digitais ou digitalizadas com temáticos de fatores de formação e solos para a previsão de classes ou atributos dos solos de uma região. Diversas vezes, apenas um subconjunto dos fatores (o que está disponível) é correlacionado com o solo e suas coordenadas.

2.2.1 Correlação ambiental

Verifica-se uma constante tentativa na formulação de modelos para compartimentar a paisagem de forma a refletir a sua dinâmica interna e suas interações. Dentre essas interações, podem-se citar modelos que visam compreender a associação do solo com as formas da paisagem (CRIVELENTI, 2009). Como a paisagem é o resultado material de todos os

processos passados e presentes em um determinado local, ela atua como um sistema complexo e dinâmico, onde diferentes fatores interagem e evoluem em conjunto (SANTOS, 2002). Pode-se afirmar que as relações quantitativas têm sido mais facilmente encontradas entre o relevo e o solo, porém há várias evidências destas relações entre os demais fatores e os solos ou vice-versa. Diferentes feições da paisagem, expressas pelo relevo, provocam variações nos atributos do solo, em diferentes intensidades, em função do local específico da paisagem (SCHOORL et al., 2000). Dentro do possível, estas variações devem ser correlacionadas a eventos geológicos, geomorfológicos e hidrológicos, pois sua dinâmica também influencia o grau de evolução dos solos na paisagem.

Diversos modelos de paisagem se propõem a estudar e entender as relações solo-relevo. No entanto, destacam-se, dentre as principais formas de abordagens identificadas na literatura, três linhas que norteiam os trabalhos focados na relação solo-relevo: a) superfícies geomórficas, b) curvatura do terreno e c) segmento de vertente (CAMPOS *et al.*, 2006).

O modelo de paisagem solo-relevo que faz aplicação das superfícies geomórficas teve maior impulso a partir dos trabalhos de Ruhe (1956) e Daniels *et al.* (1971). Para Ruhe (1956), as superfícies geomórficas seguem os seguintes princípios: a) uma superfície é mais jovem do que qualquer outro material ou superfície que ela corta; b) uma superfície é mais velha, ou de mesma idade, que os depósitos do fundo de vale inferior; c) uma superfície é mais jovem do que as adjacentes situadas em posição superior, ou mais velha do que as situadas em posição inferior; d) uma superfície é mais velha ou de mesma idade aos depósitos situados sobre ela. Segundo Daniels *et al.* (1971), os processos de erosão e deposição de solos na paisagem estão ligados ao conceito de superfícies geomórficas, sendo deposicionais ou erosionais, ocorrendo ambas de modo adjacente. Para esse autor, os estudos das relações entre solos, geologia e superfícies geomórficas são importantes para a compreensão da ocorrência dos solos na paisagem, permitindo a predição de sua distribuição.

Um dos primeiros estudos a considerar o modelo de curvatura na predição do solo foi realizado por Troeh (1965), que analisou dados de elevação de duas catenas para derivar a declividade e curvatura da vertente. Baseando-se na curvatura, faz a classificação de quatro principais tipos de vertentes (Figura 3): as coletoras de água, com plano de curvatura convergente (quadrantes I e II) e as distribuidoras de água, com plano de curvatura divergente (quadrantes III e IV). Sob o aspecto do perfil de curvatura, as vertentes convexas são as que facilitam o desenvolvimento do rastejamento (quadrantes II e III) e as côncavas as que favorecem a lavagem pela água das chuvas (quadrantes I e IV).

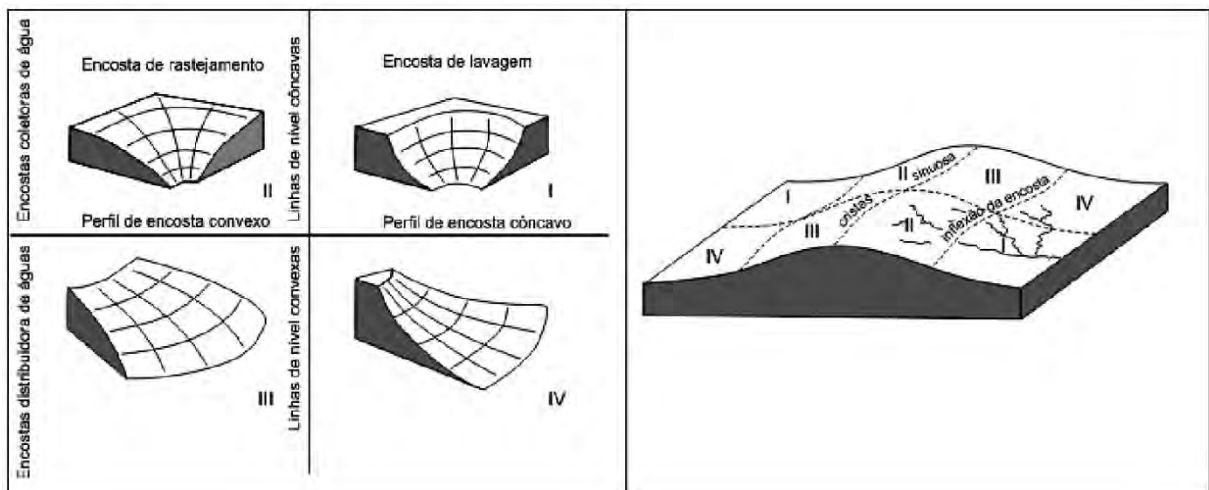


Figura 3: Classificação das formas de vertentes segundo a curvatura. (TROEH, 1965).

O terceiro modelo de paisagem referencia-se em segmentos (ou compartimentos) de vertentes, segundo nove unidades hipotéticas de vertentes apresentadas por Dalrymple *et al.* (1968), associadas a processos geomorfológicos dominantes (Figura 4), podendo as unidades estarem ausentes ou presentes de forma repetida na catena.

Características dos solos nas nove unidades dos segmentos de vertentes são apresentadas e discutidas por Vidal-Torrado *et al.* (2005): no segmento 1 o solo é profundo, com taxas de erosão mínima, onde predomina a pedogênese; no segmento 2 menos profundo, em relação ao primeiro, devido ao processo de eluviação, pelo movimento lateral da água; o segmento 3 se caracteriza por sofrer mais erosão do que os demais, exceto quando comparado ao segmento 4, não permitindo acúmulo de materiais na superfície; o segmento 4 apresenta solos rasos e/ou afloramento de rochas, representando uma escarpa, cuja formação se dá pela rocha que divide o sopé de transporte, representada pelo segmento 5; isso provoca o surgimento de uma zona de acumulação, sopé de deposição, no segmento 6 e nas planícies, representadas pelo segmento 7, onde predominam processos de deposição aluvial por contribuição do fluxo subsuperficial da água (onde ocorre também saturação hídrica) designados ambientes de hidromorfia.

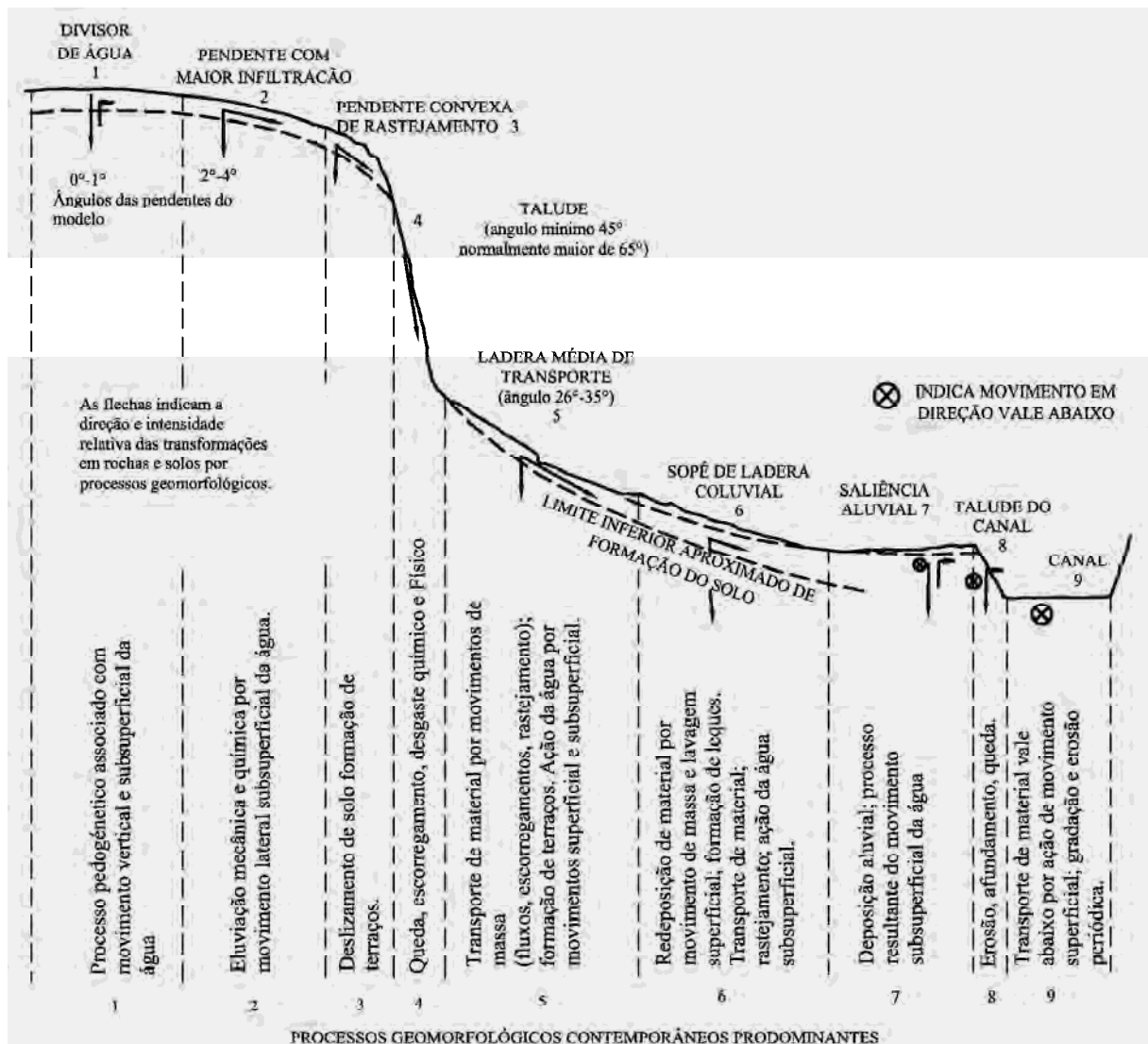


Figura 4: Unidades hipotéticas do modelo de segmento de vertentes (DALRYMPLE *et al.*, 1968).

O modelo segmentos de vertentes enfatiza as interações entre os materiais do solo e sua movimentação, transporte e redeposição pela água e gravidade, em superfície e subsuperfície do terreno, portanto é considerado um modelo pedogeomórfico, pois relaciona processos geomórficos superficiais aos processos pedológicos subsuperficiais atuais (CAMPOS et al., 2006).

Atualmente, diversos trabalhos partem das premissas desses modelos de paisagem, ou da combinação deles, para compreender a relação do solo com o relevo. Dentre eles, Teramoto *et al.* (2001) avaliaram a relação solo, superfície geomórfica e substrato geológico (arenito e siltito), fazendo inter-relações por meio de tabulação cruzada com base no conceito de homogeneidade das superfícies geomorfológicas em relação às unidades de mapeamento de solos e litologia. Esses autores mencionam a relação encontrada entre substrato geológico e unidades de solos. Por fim, concluíram que a variabilidade dos atributos químicos e físicos dos solos na camada entre 60-80 cm é influenciada principalmente pela natureza química e física do substrato geológico, enquanto que os atributos morfológicos dos solos são determinados principalmente pelo relevo.

Ao focar as relações solo-relevo com ênfase no material de origem, em uma topossequência cujo substrato é de Arenito sobre Basalto, Coelho *et al.* (1994) investigaram a influência da rocha sobre os solos segundo sua posição em segmentos de vertente e analisaram atributos físicos, químicos e mineralógicos para estimar a influência da rocha na formação dos solos em perfil topográfico. Os autores definiram três segmentos geomorfológicos distintos e concluíram que o material de origem, derivado da litologia, contribui na formação dos solos do transecto e que o grau de contribuição do Arenito ou Basalto, expresso nos atributos dos solos, varia segundo a posição do solo na vertente.

O comportamento físico e hídrico de um Latossolo foi estudado por Souza *et al.* (2004) por meio de interpolação de informações amostrais. Os autores observaram que pequenas variações nas formas do relevo condicionam variabilidade diferenciada para atributos do solo estudado. Por meio da análise da curvatura da vertente, verificaram que foi maior a variabilidade espacial dos atributos físicos e hídricos do solo em áreas côncavas e convexas, enquanto que nas áreas de curvatura linear, com relevo mais homogêneo, os atributos apresentaram menor variabilidade. A explicação está associada à influência do fluxo da água e dependência espacial dos atributos físicos e hídricos do solo aos elementos do relevo (pedoformas).

Para o bom entendimento e aplicação destes modelos, é frequentemente necessário o uso de Modelos Digitais de Elevação (MDE) e seus derivados (LARK, 1999). Nas últimas décadas, um crescente número de trabalhos vem sendo desenvolvido com base no modelo de curvatura das vertentes para compreender as relações solo-relevo, predizer unidades de mapeamento de solos e correlacionar a distribuição dos atributos dos solos com a morfologia do relevo. Nesses estudos são aplicadas equações a modelos numéricos do terreno que resultam num conjunto de atributos, ou variáveis topográficas, gerados a partir de curvas de nível ou por meio de sensores, os quais representam distintas unidades de paisagem. A aplicação desse modelo é facilitada e torna-se possível devido ao avanço no campo da informática que propicia seu desenvolvimento. Apesar da aplicação de novas técnicas para abordar as relações solo-relevo, faz-se necessário o amadurecimento do método.

Birkeland (1984) e Briggs & Shishira (1985) concluíram que é possível reduzir a intensidade de amostragem de alguns atributos do solo, dentro de unidades homogêneas do relevo. Seus estudos indicaram que as formas do relevo, por exercerem influência no fluxo de água, energia e nos processos de redistribuição de material nas vertentes, controlam

sobremaneira a distribuição dos solos. De acordo com Mulla & McBratney (1999) e Park & Burt (2002), os aspectos topográficos do terreno são os mais importantes indicadores da variação das propriedades do solo. Assim, o entendimento das inter-relações solo-paisagem com os fatores de formação do solo e os processos pedogenéticos permite a compreensão da geografia dos solos, bem como sua predição (BOCKHEIM et al., 2005).

Pode-se perceber que o modelo de paisagem e curvaturas do terreno vem tornando-se uma ferramenta de apoio ao mapeamento digital de solos (pedometria) cada vez mais requisitada graças às variáveis topográficas obtidas por meio de mapeamento digital do relevo derivadas dos MDTs, também designada geomorfometria (WOOD, 1996 e 2009).

De forma geral, o sucesso das predições quantitativas depende do bom relacionamento entre o solo estudado e o seu ambiente, que é descrito através de variáveis preditoras que representam os fatores de formação do solo nos modelos conceituais (solo, espaço, material de origem, clima, relevo, organismos e tempo). Essas variáveis e as observações de solo (variável de resposta) devem ser amostradas em densidade adequada e relacionadas através de modelos que se adequem às relações observadas.

O principal mérito da análise digital do terreno é a maior eficiência obtida no trabalho de campo após a realização da classificação digital preliminar, apoiada num modelo de ocorrência de solos previamente conhecido (IPPOLITI *et al.*, 2005). O mapeamento pedométrico melhora os trabalhos de mapeamentos de solos, resultando em mapas mais objetivos e detalhados (HENGL, 2003).

Nessa linha de trabalho, um conjunto de autores vem desenvolvendo estudos de caso, demonstrando que levantamentos de solos podem ser melhorados por meio do emprego de atributos topográficos derivados de MDT, fornecendo um método para geração de mapas de melhor resolução. As aplicações desses atributos são potencialmente importantes, pois possibilitam a identificação das feições do relevo, segundo experiências apresentadas por: Klingebiel *et al.* (1987), Dikau (1989), Nizeyimana e Bick., (1992), Moore *et al.* (1993), Gessler *et al.* (1995), Hermuche *et al.* (2002), Ribeiro *et al.* (2002), Hermuche *et al.* (2003), Ippoliti *et al.* (2005), Carvalho Junior *et al.* (2006), Chagas (2006), Sirtoli (2008), Sirtoli *et al.* (2008a), Sirtoli *et al.* (2008b), Muñoz (2009) e Crivelenti (2009).

2.2.2 Áreas de referência

De acordo com Lagacherie (1995), muita pesquisa tem sido focada no uso inovativo de mapas de solos, tanto como uma fonte de dados para modelos de avaliação das terras ou como uma fonte adicional de informação para melhorar a eficiência de técnicas de interpolação, como a krigagem. Esses estudos têm demonstrado a eficiência de mapas detalhados de solos (>1:25.000). No entanto, mapas detalhados não estão disponíveis em grande parte do território dos países, sobretudo no Brasil.

Pensando em superar essa deficiência, Favrot (1981) propôs o método da Área de Referência (AR). O objetivo desse método é caracterizar a cobertura de solos de regiões topograficamente e geologicamente identificáveis, denominadas “pequenas regiões naturais”. O primeiro passo desse método consiste em efetuar o mapeamento detalhado de uma pequena, mas representativa área, de uma pequena região natural, a qual é denominada AR. Nesta AR caracterizam-se as principais classes de solos de toda a região e se estabelecem as regras de mapeamento. Essa primeira etapa facilita e acelera a etapa seguinte, a qual consiste na condução de novos trabalhos de mapeamento em áreas circunvizinhas. Na condução dos novos trabalhos de mapeamento, são levantados novos pontos de observação onde se esperam encontrar as mesmas classes de solos identificadas e mapeadas na AR. Assim, também se

espera poder fazer o delineamento dos limites de unidades de mapeamento a partir das regras de mapeamento preestabelecidas na AR.

Quando se desenvolve mapeamento tendo como base o método da AR, o que está sendo testado é a hipótese de que é possível delimitar áreas (denominadas “pequenas áreas naturais”) que englobem um número finito de classes de solos, as quais são recorrentes em associação umas com as outras na paisagem, formando um padrão repetitivo e identificável. Desta forma, uma AR propositalmente escolhida seria suficiente para identificar todas as classes de solos de uma área maior e também determinar suas relações espaciais.

Segundo Lagacherie et al. (1995), a hipótese assumida no método da AR ainda precisa ser experimentalmente confirmada, embora já existam estudos, sobretudo na França, demonstrando que o método de AR é satisfatório. Ainda segundo Lagacherie et al. (1995), os resultados obtidos na França demonstram que os trabalhos efetuados utilizando AR têm reduzido a necessidade de trabalhos de campo, e que em geral menos de 10% das unidades de solos encontradas nas novas áreas são diferentes daquelas estabelecidas nas AR. Por outro lado, o mesmo autor observa que houve ganhos de eficiência foram obtidos quando se aplicou a técnica de AR pela mesma equipe que faz os mapeamentos das outras áreas. Assim, a desvantagem do método da AR é que a experiência obtida durante o mapeamento da área de referência parece não ser ainda adequadamente explicitada nos relatórios e mapas publicados, limitando sua transferência a outros pedólogos. Para contornar a limitação do método, Lagacherie et al. (1995) e outros pesquisadores têm apresentado procedimentos computadorizados de levantamento de solos onde se procura reproduzir o raciocínio que um pedólogo experiente segue durante um levantamento realizado após uma pesquisa em uma área de referência.

De acordo com Walter et al (2007), dois tipos de regras de conhecimentos de especialistas têm sido derivadas de mapas de solos, as quais são denominadas “regras solo paisagem” e “regras de padrão de solos”. No primeiro caso (solo paisagem), utilizam-se como preditores os fatores do modelo SCORPAN, tais como derivadas do MDE e de sensores remotos para prever classes de solos em lugares não visitados. Para a predição, têm sido utilizados algoritmos como árvores de classificação (LAGACHERIE, 1992; LAGACHERIE and HOLMES, 1997; BUI et al, 1997), as quais fornecem um conjunto de regras de probabilidades de predição de unidades de mapeamento de solos. No segundo caso (regras de padrões de solos), regras de padrões de distribuições de solos são capturadas nas áreas de referência para inferência em uma área de interesse. Neste caso, utiliza-se como exemplo ilustrativo a ocorrência de três tipos de unidades de mapeamento, aqui denominadas A, B e C. Se o pedólogo observa que na área de referência, sistematicamente, a unidade de mapeamento C ocorre entre as unidades de mapeamento A e B, então cria-se uma regra de padrão de distribuição onde essa variação sistemática é transformada em regra de mapeamento. Assim, por exemplo poder-se-ia determinar uma distância na qual, dado a presença da unidade C, encontrar-se-iam as probabilidades de ocorrência das unidades B e A. Lagacherie et al. (1995), utilizou essa técnica no Valley of Herault no sul da França e considerou a técnica promissora para regiões onde padrões de distribuição de solos são identificáveis e recorrentes.

2.2.3 Análise discriminante

Segundo Khatree & Naik (2000), análise discriminante é uma técnica da estatística multivariada que estuda a separação de objetos em duas ou mais classes. A discriminação é a primeira etapa, a etapa exploratória, e consiste em procurar características capazes de serem utilizadas para alocar objetos em diferentes grupos previamente definidos. A classificação ou

alocação pode ser definida como um conjunto de regras que serão utilizadas para alocar novos objetos (JOHNSON & WICHERN, 1999). Certa confusão existe porque a função que separa os objetos pode também servir para alocar e vice-versa, ou seja, normalmente a discriminação e a classificação se sobrepõem na análise, e a distinção entre a separação e a alocação é confusa.

Segundo Regazzi (2000), o problema da discriminação entre dois ou mais grupos visando posterior classificação foi inicialmente abordado por Fisher (1936), quando estudou funções matemáticas capazes de classificar um indivíduo X em uma de várias populações P_i , com base em medidas de um número “ p ” de características, buscando minimizar a probabilidade de má classificação, ou seja, alocar um indivíduo em uma população “ P_i ” quando ele realmente pertence a uma população “ P_j ”.

Regras de classificação:

Uma boa regra de classificação deve resultar em poucos e pequenos erros, e para que isso ocorra, a regra de classificação deve considerar probabilidades a priori e os custos de uma má classificação (JOHNSON & WICHERN, 1999). Essas regras devem considerar se as variâncias das populações são iguais ou não, pois variâncias iguais geram funções discriminantes lineares e variâncias diferentes geram funções discriminantes quadráticas. As funções discriminantes podem ser modelos estatísticos, de redes neurais ou lógica fuzzy. Estes dois últimos geram planos não lineares de separação. Seus parâmetros são ajustados a partir de amostras de treinamento e o modelo de Fisher é estatístico.

A função discriminante de Fisher é uma combinação linear de características originais que se caracteriza por produzir separação máxima entre duas populações.

Segundo Varella (2004), os classificadores estatísticos são desenvolvidos com base no teorema de Bayes. Os classificadores Bayesianos são considerados ótimos, pois minimizam o erro de classificação. O teorema de Bayes permite calcular a probabilidade a *posteriori*, a qual representa a probabilidade condicional de que, dado que o objeto X seja conhecido, o mesmo pertença à classe j . Para o cálculo desta probabilidade a *posteriori*, leva-se em consideração a probabilidade a *priori* de ocorrência de cada classe. A probabilidade a *posteriori* é obtida por meio da função discriminante quadrática, conforme mostrado a seguir:

Equação 1

$$D_j^2(X) = -\frac{1}{2} \ln |\Sigma_j| - \frac{1}{2} (X - \bar{X}_j)' \Sigma_j^{-1} (X - \bar{X}_j) + 2 \ln p_j$$

em que,

- $D_j^2(X)$ = probabilidade condicional de que dado que o objeto X ser conhecido, o mesmo pertença à classe j ;
- X = vetor de características do objeto a ser classificado;
- \bar{X}_j = vetor de médias da classe j ;
- Σ_j = matriz de covariância da classe j ;
- p_j = probabilidade a *priori* de ocorrência da classe j .

Quando matriz de covariância é considerada comum para as classes, que é obtida pela média das covariâncias das classes, a função discriminante ótima é linear e reduz-se ao seguinte:

$$D_j(X) = -\frac{1}{2} \bar{X}_j^T (\hat{\Sigma}_c)^{-1} \bar{X}_j + X^T (\hat{\Sigma}_c)^{-1} \bar{X}_j + \ln P(w_j)$$

em que, $D_j(X)$ = valor da função discriminante linear da classe w_j dado X ; $\hat{\Sigma}_c$ = matriz de covariância comum das classes w_j 's.

Sendo assim, nos valores encontrados de $D_1(X)$, $D_2(X)$,..., $D_k(X)$ das k classes, o maior valor dos $D_k(X)$'s será onde o indivíduo X terá maior probabilidade de pertencer.

A acurácia do classificador estatístico é estimada utilizando-se o método da validação cruzada. Para utilizá-lo, é necessário que o conjunto dos dados sejam divididos em duas partes: uma para treinar o classificador e outra para estimar a acurácia de classificação (KHATTREE & NAIK, 2000).

Na etapa de treinamento do modelo, a validação cruzada é executada, deixando uma amostra de fora (leave-one-out) proposta por Lachenbruch & Mickey (1968). Assim, uma a uma, amostras são retiradas do conjunto e as demais são utilizadas para a predição e, ao fim, tem-se um conjunto de testes igual ao número de amostras em análise. A acurácia é dada então pela média de acertos da função discriminante, utilizando individualmente amostras que não participaram do desenvolvimento dos classificadores.

Segundo Houry Junior (2004), para a avaliação da acurácia do classificador, uma amostra de teste especialmente separada das de treinamento é utilizada para a validação do procedimento. No programa SAS System, a opção "crossvalidate" do procedimento "discrim" executa esta análise. (SAS, 1999).

Exemplo do uso de funções discriminantes (FD) para o mapeamento de classes de solo foi encontrado no trabalho de Illes et al., (2011), que gerou MDS por FD e árvores de classificação (AC) em áreas de cultivos de florestas na Hungria. Embora estes autores tenham encontrado resultados melhores combinando FD com AC, concluíram que as FD são adequadas para a classificação de unidades de mapeamento. Concluem, ainda, que, para as unidades de mapeamento com menor expressão territorial foi necessária uma maior frequência de amostragem para uma predição adequada.

2.3 Avaliação de Cartas Pedológicas

Qualquer carta pedológica, convencional ou digital, preferencialmente deverá ser utilizada somente após verificação da qualidade das informações contidas. Deverão ser analisadas desde a qualidade dos levantamentos, metodologia utilizada para mapeamento, escalas etc. O pedólogo que produziu tais informações deve, antes de publicar, avaliar se o produto cartográfico elaborado atinge os objetivos esperados e qual é a acurácia do mesmo. Isso pode ser feito comparando a carta com outra de referência ou a concordância com pontos de validação (ROSSITER, 2004).

Para avaliação da exatidão e validação da modelagem aplicada, podem ser escolhidos locais representativos das unidades separadas, nas quais se abrem trincheiras para descrição e caracterização dos solos. Esse procedimento é recomendado por McBratney et al. (2003) para a elaboração de mapeamentos digitais de solos, quando destacam que as investigações de campo são essenciais para o ajuste dos mapas.

Para validações executadas em campo, o que se faz normalmente é coletar estas amostras em regiões do mapa onde se tem certeza de que a feição que ali se encontra corresponde àquela que se tem em mente. Em virtude dos diferentes tipos de solo não

ocorrerem de forma casual na natureza, uma simples amostragem casualizada pode não representar adequadamente todas as categorias esperadas de solo. A estratificação da amostragem pode melhorar as chances de que todas as categorias sejam adequadamente representadas. De forma semelhante, Congalton (1984) comenta que não vêm sendo feitos estudos comparativos entre amostragens sistemáticas em comparação com amostragens casualizadas. Esse autor cita ainda que os elevados custos envolvidos na validação de mapas pedológicos é provavelmente o motivo de não serem feitas comparações diretas entre esquemas de amostragem.

Medidas de acurácia em cartas pedológicas destinam-se a verificar a magnitude de concordância de um mapa com a realidade a qual este pretende representar. A avaliação da acurácia de classificação pode ser obtida a partir da matriz de erros da classificação (CONGALTON e MEAD, 1983). Quando se utiliza um conjunto de pontos amostrais para executar a predição, a matriz de erros é obtida com 75% dos pontos amostrais na etapa de treinamento (ajuste do modelo) e é validada com 25% dos pontos amostrais (não utilizados na etapa anterior). Este procedimento é frequentemente utilizado quando são utilizadas funções discriminantes (VARELLA, 2004).

A matriz de erros é de dimensão $z \times z$, em que z é o número de classes avaliadas na análise discriminante. As colunas dessa matriz apresentam as informações das observações de referência, enquanto as linhas, as informações das observações classificadas. Dessa maneira, na diagonal estão o número de observações corretamente classificadas. A partir dessa matriz, são calculados os erros de omissão, de comissão, a exatidão global e o coeficiente kappa.

Os erros de omissão (exclusão) e de comissão (inclusão) permitem avaliar a exatidão do mapeamento para cada classe considerada individualmente. Um erro de comissão consiste na inclusão de uma área dentro de uma classe à qual ela não pertence. E, por outro lado, um erro de omissão consiste na exclusão de uma área da classe à qual ela pertence de fato. Esses erros servem para avaliar quanto uma classe foi subestimada ou superestimada. Os erros de omissão descrevem a precisão com que determinada classe de um mapa foi definida, enquanto a taxa de erros de inclusão indica quanto uma classe foi superestimada.

A exatidão global é definida como a estimativa da porcentagem de área mapeada que foi corretamente classificada, quando comparada com os dados de referência ou verdade de campo. Pode ser obtida pela divisão da soma da diagonal principal (número de classificações corretas ou concordância real) pelo número total de amostras tomadas. A exatidão ou acurácia global entre o mapa e os pontos de referência é obtida pela soma dos valores corretamente classificados, dividida pelo número total de dados classificados, conforme a seguinte expressão:

Equação 2

$$EG(\%) = \frac{P_c}{P_t} \cdot 100$$

em que:

EG = exatidão global;

P_c = número de observações corretamente classificados;

P_t = número total de observações.

Por meio da exatidão global, representa-se também o percentual de concordância, uma vez que, se EG for igual a 0,72, a concordância entre dois mapas analisados (C%) será igual a

72%, sendo a discordância (D%) igual a 28%. Assim, C% e D% são outros parâmetros de avaliação de mapas.

Contudo, apenas a exatidão global ainda não é o suficiente, sendo pertinente a adoção de um índice que considere a matriz por completo (GONG & HOWART, 1990). Neste caso, o procedimento mais adotado na medição da exatidão das classificações por meio de matrizes de erro é o índice kappa (GONG & HOWART, 1990; CONGALTON & MEAD, 1983; MACHADO, 2002). Essa medida de acurácia, ou mais apropriadamente exatidão, está baseada na diferença entre a concordância real da matriz (concordância entre os dados simulados e os dados de referência, indicada na diagonal principal) e a concordância por chance, indicada pelo total das linhas e colunas (marginais).

O coeficiente kappa é obtido pela lei das probabilidades, a qual diz que a chance de um conjunto de valores estar em uma mesma categoria em dois conjuntos de dados é dada pelo produto das probabilidades isoladas de estarem, nesta mesma categoria, em cada um dos conjuntos de dados (MACHADO, 2002). O Índice kappa é estimado pela seguinte expressão:

Equação 3

$$\hat{K} = \frac{n \sum_{i=1}^c X_{ii} - \sum_{i=1}^c X_{i+} X_{+i}}{n^2 - \sum_{i=1}^c X_{i+} X_{+i}} \quad (5)$$

em que:

- C = número de classes na matriz de erros;
- X_{ii} = valores na linha i e na coluna i;
- X_{i+} = total da linha i;
- X_{+i} = total da coluna i;
- n = número total de observações.

Landis & Koch (1977) e Monserud & Leemans (1992) sugerem que valores de Kappa de 0,75 ou maiores mostram um desempenho do classificador de muito bom a excelente, enquanto valores entre 0,4 e 0,75 representam desempenho moderado a bom, e valores menores que do que 0,4, uma baixa concordância (baixo desempenho) (Tabela 1).

Tabela 1: Índice kappa e o correspondente desempenho da classificação

| Índice Kappa | Desempenho |
|--------------------|------------|
| < 0 | Péssimo |
| $0 < k \leq 0,2$ | Ruim |
| $0,2 < k \leq 0,4$ | Razoável |
| $0,4 < k \leq 0,6$ | Bom |
| $0,6 < k \leq 0,8$ | Muito Bom |
| $0,8 < k \leq 1,0$ | Excelente |

Fonte: Adaptado de Landis & Koch (1977).

Atualmente, a matriz de confusão, a exatidão geral e o índice Kappa constituem o núcleo da avaliação de acurácia. Os três indicadores são igualmente importantes, pois fornecem as informações complementares sobre a qualidade do mapa avaliado. A matriz de erro possibilita identificar as classes mais concordantes e aquelas em que a predição está errando mais, enquanto a exatidão geral e o índice Kappa fornecem medidas sobre a concordância do mapa estimado como um todo (ROSSITER, 2011).

A possibilidade de avaliar a acurácia dos mapas digitais de solos simultaneamente à sua geração representa uma vantagem em relação aos levantamentos convencionais. Nestes, raramente medidas quantitativas de acurácia estão disponíveis e, de acordo com alguns autores (SARMENTO, 2010; LIU & ZHU, 2009; LOPEZ, 2009), caso estas sejam feitas, possivelmente graus de acurácia abaixo do esperado sejam encontrados em muitos casos. Segundo MacMillan (2008), os mapas estimados através de técnicas de mapeamento digital têm apresentado acurácia igual ou superior aos mapas convencionais de solos preparados para a mesma área.

Segundo Ten Caten (2011), o valor médio do índice kappa em estudos realizados no Brasil é de 0,47, que está próximo dos encontrados na literatura internacional, variando de 0,39, em locais de relevos planos, a 0,58 em locais montanhosos. Esses valores estão diretamente ligados às técnicas e escalas utilizadas. É importante ressaltar que a agregação da legenda tende a elevar os resultados na avaliação de mapas. Isso se dá em função da generalização cartográfica. Zeilhofer (2006) relata que valores da ordem de 0,3 a 0,6 têm sido relatados em modelos preditivos de MDS e que valores maiores (acima de 0,6) são normalmente encontrados com simplificações de legenda. Ainda segundo Ten Caten (2011), a fidelidade da reprodução do mapa convencional pelo mapa gerado pelo MDS (índice kappa próximo de 100%) vem sendo utilizada como um indicativo de que a técnica de MDS é aceitável. Contudo, os erros inerentes ao mapa convencional não têm sido reportados, tampouco a influência dos erros previamente existentes é estudada nos mapas gerados (BRUS et al., 2011). Finalmente, a avaliação da qualidade do mapa gerado deverá ser testada a campo e reportada junto dele.

2.4 Fatores de Formação do Solo na Formação Solimões

O estudo dos fatores de formação dos solo na Formação Solimões foi amplamente baseado nos relatórios do projeto Radam Brasil (BRASIL, 1978) e foi analisado em detalhes no documento “Estado da Arte” sobre a Base Petrolífera de Urucu, que é um dos volumes constantes do relatório de mapeamento detalhado dos solos da Base petrolífera de Urucu (PETROBRÁS, 2010).

2.4.1 Material de origem

O Território Nacional foi compartimentado em dez Províncias Estruturais, por Almeida et al. (1977), com base em suas feições estratigráficas, tectônicas, metamórficas e magmáticas. De acordo com esses autores, as Províncias Estruturais são: São Francisco, Borborema, Tocantins, Parnaíba, Paraná, Amazônica, Mantiqueira, Rio Branco, Tapajós e Costeira. A área de estudo se insere na Província estrutural Amazônica, uma grande área sedimentar, compartimentada por altos (arcos) do embasamento em três bacias conhecidas como do Acre, Solimões e Amazonas. O local se insere na bacia do Solimões, a qual se separa da bacia do Acre pelo arco de Iquitos e da bacia do Amazonas pelo arco de Purus (Figura 5). Toda a Província Amazônica (e por consequência a bacia do Solimões), do ponto de vista

geocronológico, foi formada no Eon Fanerozóico (vida visível, aparente), o qual compreende as Eras Paleozóica, Mesozóica e Cenozóica.

De acordo com Barata e Caputo (2007), a estratigrafia da bacia do Solimões é composta por duas seqüências de 1ª Ordem, **Paleozóica e Mesozóica/Cenozóica** (Figuras 5 e 6).

A Seqüência Paleozóica é composta por quatro seqüências de 2ª Ordem, quais sejam: 1- Ordoviciano Inferior, 2- Siluriano Superior-Devoniano Inferior, 3- Devoniano Médio-Carbonífero Inferior e 4- Carbonífero Superior-(Permiano Inferior).

A seqüência Mesozóica/Cenozóica é composta de duas seqüências de 2ª Ordem (Cretácea e Terciário-Quartenário).



Figura 5: Províncias geológicas da região da Amazônia Legal (BRASIL, 1978).

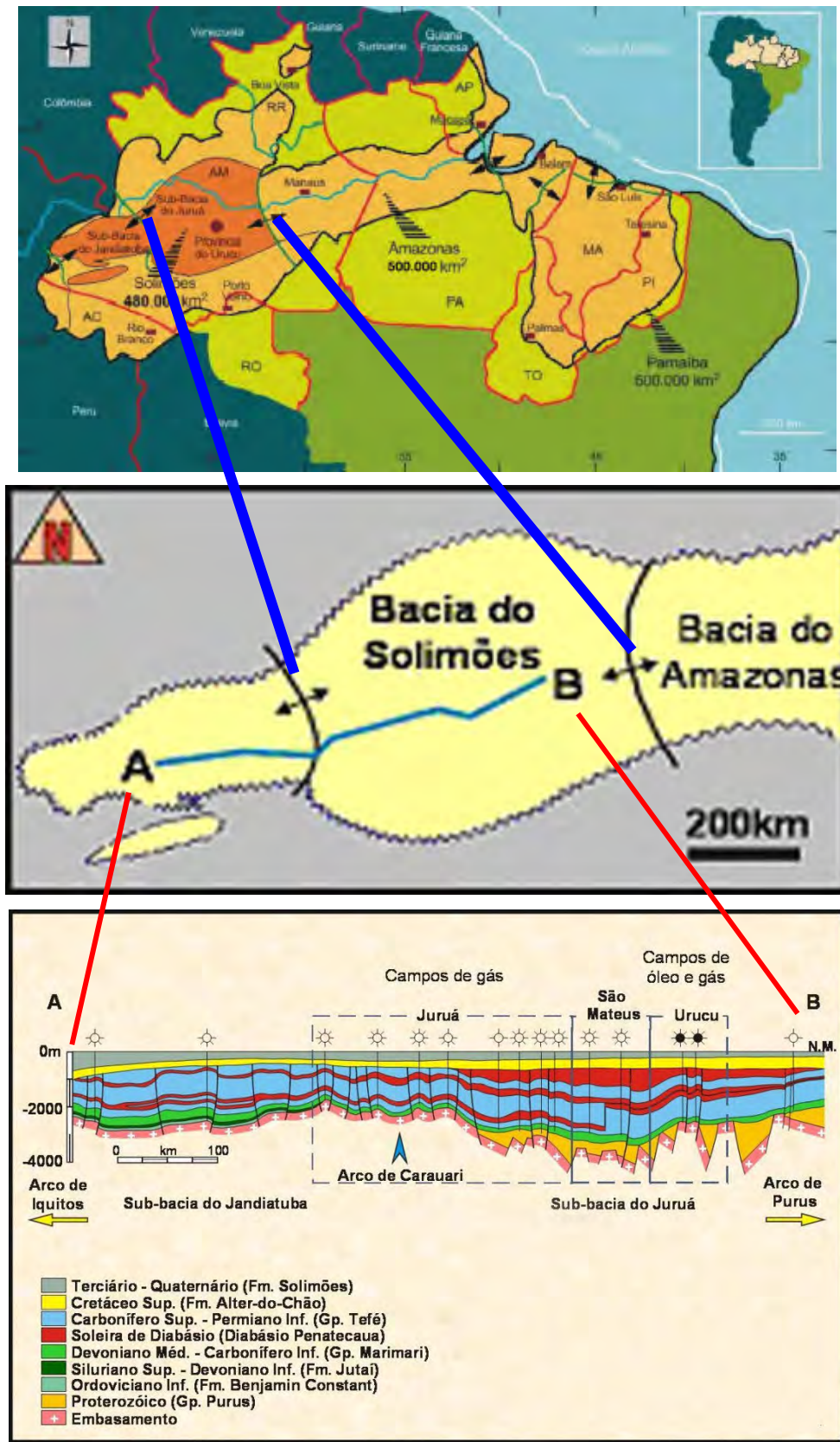


Figura 6: Arcabouço estratigráfico da Formação Solimões (BARATA E CAPUTO, 2007).

Os sedimentos depositados no Período Terciário-Quaternário (Formação Solimões - TQs) é que definem o material de origem dos solos da área de estudo. Esses sedimentos se assentam à formação Alter do Chão (ou formação Barreiras), associados ao período Cretáceo. A Formação Solimões guarda características deposicionais similares com as da formação Alter do Chão, tornando-se bastante difícil sua diferenciação em campo. Basicamente, a Formação Solimões (TQs –Figura 7) é composta de arenitos muito finos e médios com níveis grosseiros e conglomeráticos. A matriz é argilosa, localmente feldspáticos, micáceos e ferruginosos intercalados ou interdigitados com argilitos e siltitos em contato transicional, lentes de arenitos finos e argilitos silticos, lentes de arenitos finos e médios, localmente grosseiros, às vezes ferruginosos.

Os aluviões Holocênicos do Período Quaternário (Ha e Hai- Figura 7) são os depósitos relacionados à rede de drenagem amazônica atual, sobreposto à Formação Solimões. Litologicamente, é composto de argila, silte e areia muito fina e grosseira, níveis limoníticos, pelotas e argila; e lentes de conglomerados.

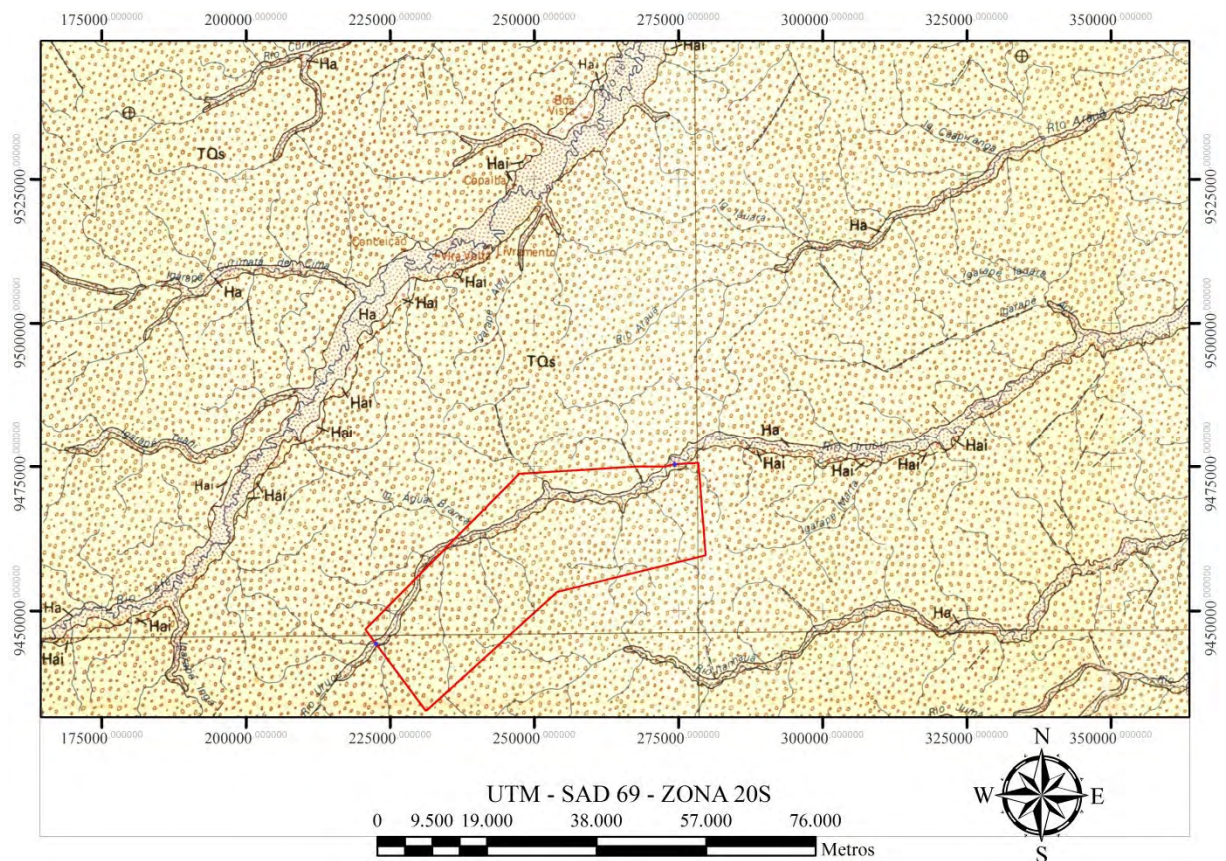


Figura 7: Formação Geológica na área de estudo (adaptado de BRASIL, 1978).

2.4.2 Relevo, organismos, clima, e tempo

O estudo geomorfológico da área referente à folha SB 20 Purus se fundamentou em: altimetria relativa, homogeneidade das formas de relevo e interpretação e análise de imagem de radar. Assim, compartimentou-se a Folha SB 20 Purus em quatro domínios Morfoestruturais denominados: Planície Amazônica, Depressão Interplanáltica da Amazônia Meridional, Planalto Rebaixado da Amazônia (Occidental) e Serras e Chapadas do Cachimbo.

Na área de estudo, o domínio Morfoestrutural predominante é o Planalto Rebaixado da Amazônia (Occidental). Esse domínio é constituído de relevos dissecados em interflúvios

tabulares (T21 e T31), superfícies pediplanadas (EP2), colinas (C11) e planícies fluviais (Apf) (Figura 8).

Os interflúvios tabulares apresentam relevo de topo aplainado, separados geralmente por vales em “V” e/ou localmente por vales de fundo plano mapeados em diferentes índices de dissecação.

As superfícies pediplanadas constituem-se de superfícies de aplainamento elaboradas por processos de pediplanação, esculpidas em litologias pré cambriana e pliopleistocênica. As superfícies pediplanadas (pediplanos neopleistocênicos) correspondem às áreas conservadas pela erosão e ocorrem em trechos descontínuos localizados nos topos dos divisores de água dos rios.

As colinas possuem relevo de topo convexo, separados por vales em “V”, mapeados com diferentes índices de dissecação.

As planícies fluviais consistem de área aplainada resultante de acumulação fluvial periódica ou permanente alagada, geralmente comportando diques marginais ou processos de colmatagem.

De acordo com o posicionamento do Rio Purus e Madeira, dividiu-se o Planalto Rebaixado da Amazônia (Occidental) em três subunidades: Norte do Rio Purus, Rio Purus – Rio Madeira e Sul do Rio Madeira. Especificamente, os rios Coari, Urucu, Arauá e Tefé situam-se na Subunidade Norte do Rio Purus.

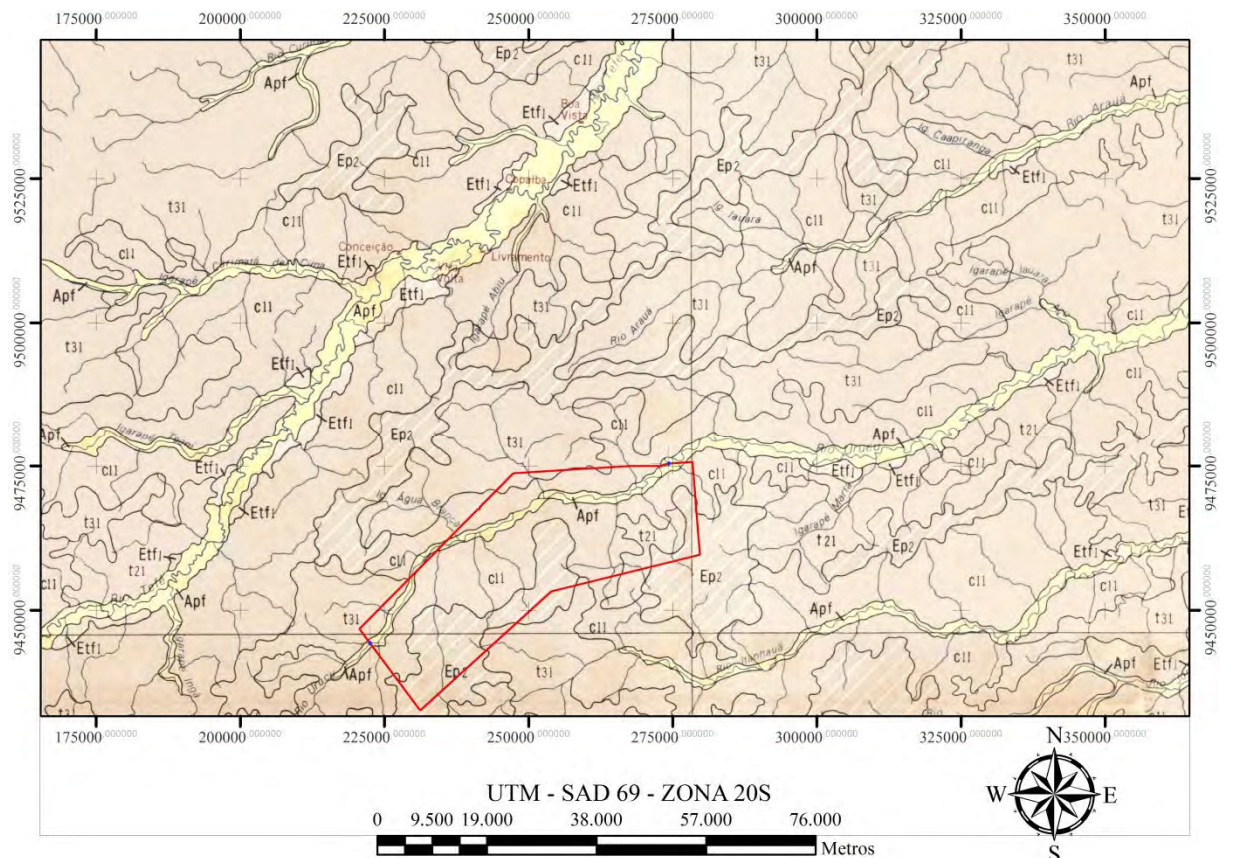


Figura 8: Compartimentos geomorfológicos na área de estudo (adaptado de BRASIL, 1978).

O padrão de drenagem na Subunidade Norte do Rio Purus é dendrítico e o curso dos rios maiores (Caniuá, Tapauá, Tefé, Urucu, Coari e Arauá) são meândricos com seções retilinizadas. Esses rios pertencem à segunda geração de drenagem, nascendo e correndo em área de sedimentos da formação Solimões, em direção Sudoeste-Nordeste. Considerando que esses rios cortam os sedimentos da Formação Solimões, cuja idade é pliopleistocênica, e que houve na área uma fase de pediplanação em clima seco, conclui-se que a instalação da rede de drenagem ocorreu no Holoceno. O fato de todo o percurso desses rios se dar na formação Solimões (e por terem ainda nascentes em áreas cobertas por Florestas e/ou Campo Cerrado), explica a ocorrência de águas “claras” (límpidas e transparentes). Os rios de águas claras apresentam baixa carga de Fe, Al e Mn, e boa carga de SiO₂, com pH variando de 6,5 a 4,6. As planícies desses rios apresentam inúmeros meandros em lago, em colmatagem e colmatados. Os rios Coari, Urucu e Arauá desaguam no lago de Coari, o qual desemboca no rio Solimões, através de um pequeno canal. O lago de Coari constitui um lago de Barragens que correspondem à foz afogada dos rios acima citados.

Com base em dados de geomorfologia e fitoecologia (Figura 9), bem como climáticos, de solos e litologia (Figura 10), subdividiu-se a área da folha rio Purus em quatro Domínios Morfoclimáticos, quais sejam: Planaltos e Depressão Dissecados e Superfícies Pediplanadas, Áreas Dissecadas e/ou Pediplanadas, Superfícies Pediplanadas e Áreas Dissecadas e faixa de Transição Planície Amazônica. A área de estudo pertence ao Domínio Morfoclimático Planaltos e Depressões Dissecadas e Superficiais Pediplanadas. Além das informações geológicas e morfoestruturais apresentadas, a área possui clima Eutermaxérico, caracterizado pela ausência de período seco no ano e chuvas mais intensas entre dezembro e maio. As temperaturas na área são elevadas com amplitude térmica significativa entre valores absolutos diurnos e noturnos, no entanto as médias mensais máximas e mínimas acusam pequena amplitude.

Sob essas condições climáticas, os sedimentos inconsolidados da Formação Solimões comportam-se como pouco resistentes ao processo erosivo. Os solos associados a esse domínio Morfoclimático são: Argissolos Vermelho Amarelo e Plintossolos (topo dos interflúvios esculpido da Formação Solimões), e Gleissolos, Neossolos Flúvicos, Neossolo e Quartizarênico e Espodossolos (Planícies fluviais – Holoceno). As concreções ferruginosas encontradas em alguns solos provavelmente se formaram no período intermediário entre a pediplanação (Neopleistocênio - clima seco) e o clima úmido vigente. Assim, o clima seco que elaborou o Pediplano Neopleistocênico foi gradativamente substituído pelo clima úmido, sendo que neste período intermediário ocorreram oscilações capazes de promover o aparecimento de concreções ferruginosas.

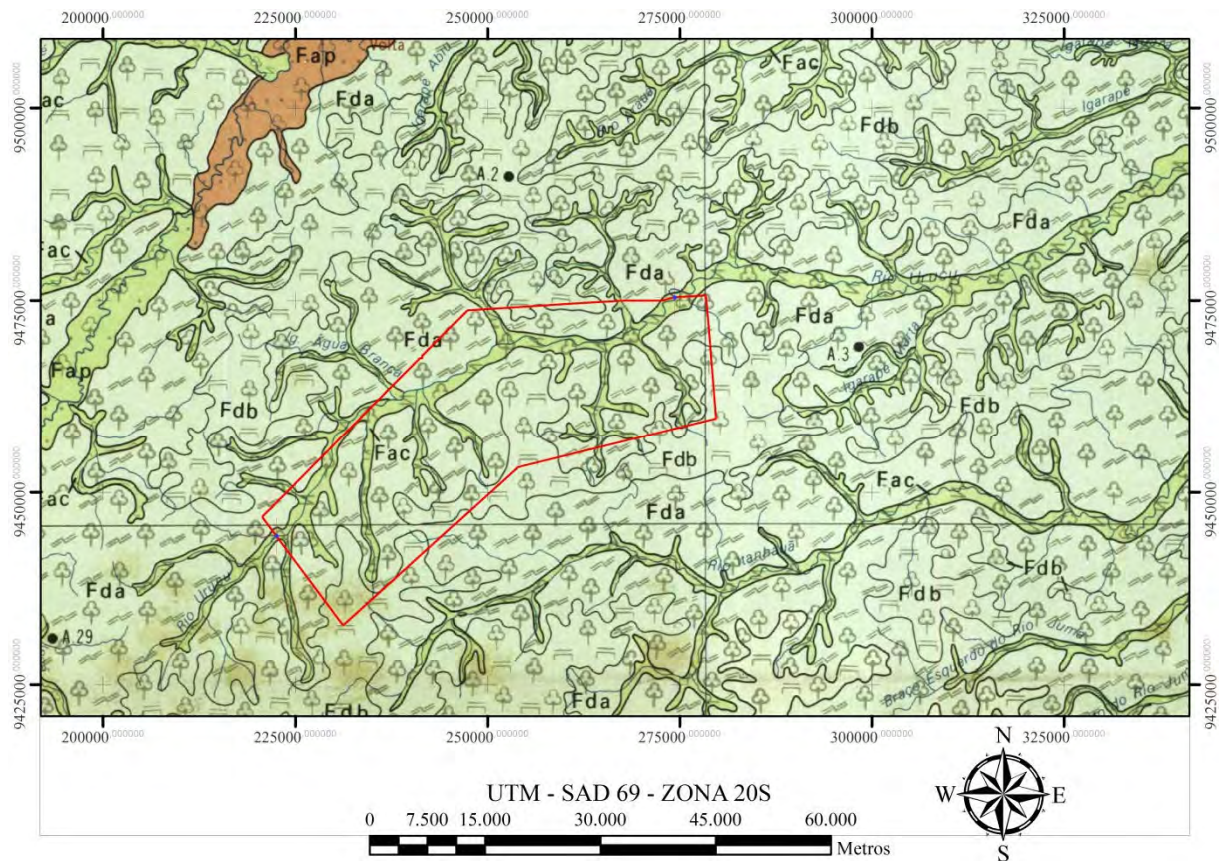


Figura 9: Mapa fitoecológico, 1:1.000.000 (adaptado de BRASIL, 1978)

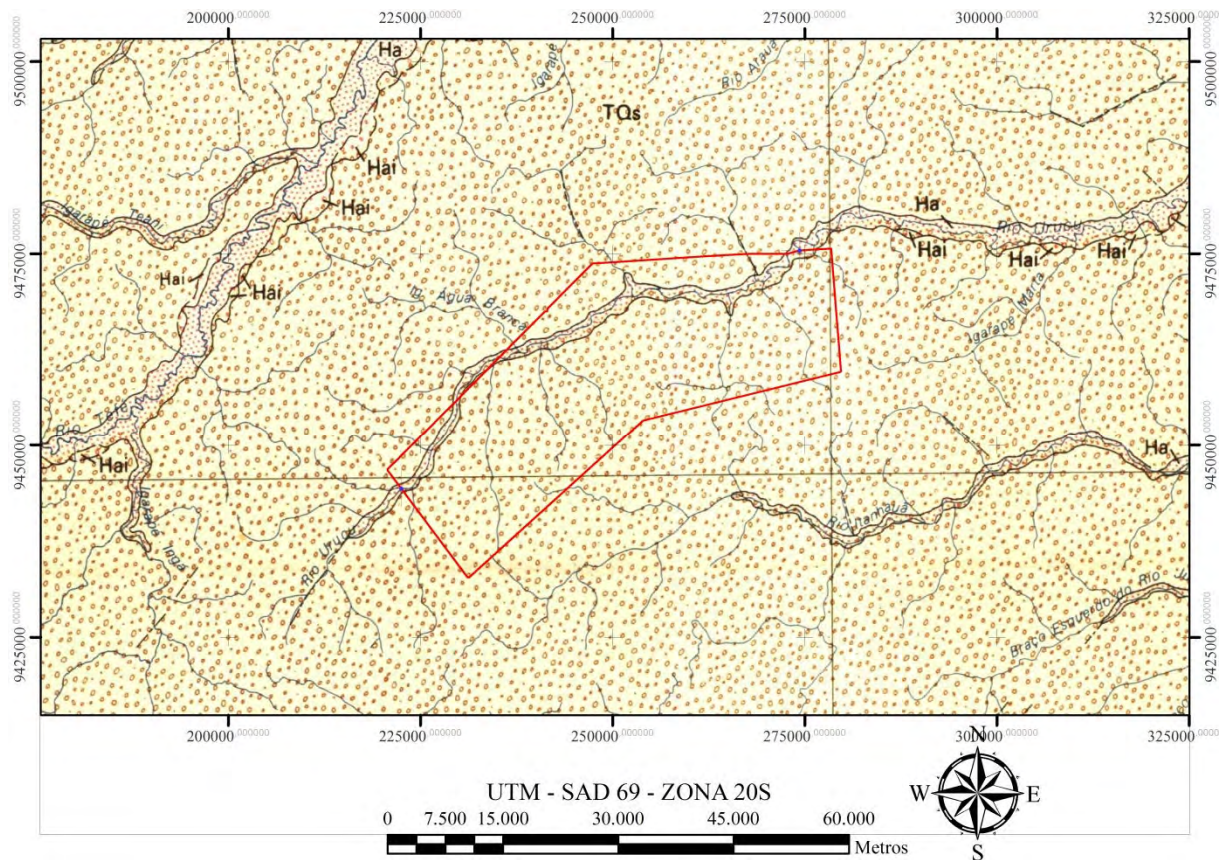


Figura 10: Mapa geológico, escala 1:250.000 (adaptado de BRASIL, 1978)

Hipótese vigente sobre a formação dos relevos aplainados na região

Considerando que os sedimentos da formação Solimões não são resistentes aos processos erosivos e que o clima atual da região é bastante úmido, não deveriam ser encontrados relevos aplainados e sim dissecados. Como também se constatou que na faixa de ocorrência de relevo aplainado ocorre floresta ombrófila densa e Savana parque, somente a vegetação não explica a conservação dos relevos aplainados. Assim, a hipótese aceita e que explica a presença de relevos aplainados é a Variação Paleoclimática. De acordo com essa hipótese, após o Pliopleistocênio superior, onde finda a deposição dos sedimentos da formação Solimões, ocorreu na área o processo de pediplanação. Durante a pediplanação, que durou até o Neoplioplestocênio, o clima seco contribuiu para preservar o relevo aplainado. Na transição do Neoplioplestocênio para o Holoceno e durante o Holoceno, foram ocorrendo flutuações de estações úmidas e secas bem marcadas, as quais são evidenciadas pela presença de concreções ferruginosas (BRASIL, 1978).

Implicações práticas da hipótese para o entendimento dos processos erosivos

A pediplanação formou o relevo aplainado atual e, no passado, o clima seco preservou o aplainamento e manteve a erosão em taxas relativamente baixas. Atualmente, com o clima úmido, a floresta tropical densa protege os solos do processo erosivo, sendo sua retirada o primeiro e principal fator no processo de aceleração da erosão, a qual, considerando a fragilidade dos sedimentos da Formação Solimões, pode ser muito intensa.

2.4.3 Solos

A única carta pedológica disponível da área de estudo é proveniente do projeto Radam Brasil, em escala 1:1.000.000, e discrimina 3 unidades de mapeamento sobre o polígono de interesse (Figura 11). Porém os limites e a elevada generalização entre estas unidades de mapeamento inviabilizam a utilização destas informações em nível local.

De acordo com este mapa, na área de estudo ocorrem 3 unidades de mapeamento, conforme descrição a seguir:

Na área estudada (cor vermelha na Figura 11), ocorre predomínio de Argissolos Vermelho-Amarelos alíticos e Argissolos Vermelho-Amarelos plintossólicos (91% da área), seguido de Plintossolos Háplicos Alíticos típicos e Plintossolos Háplicos Alíticos petroplínticos + Argissolos Acinzentados distróficos (6% da área) e Gleissolos Háplicos Tb distróficos típicos e Plintossolos Háplicos Alíticos típicos (3% da área) (EMBRAPA, 2013).

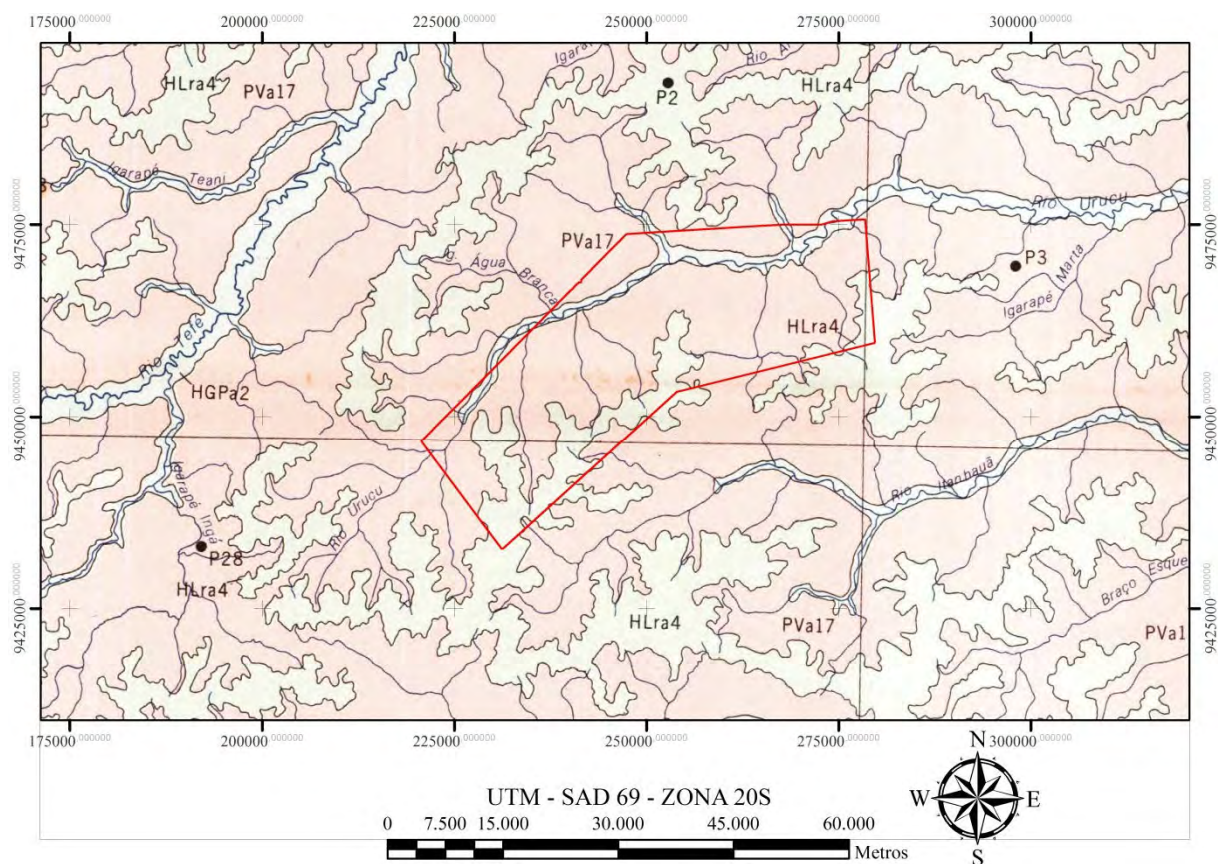


Figura 11: Mapa de solos, escala 1:1.000.000 (adaptado de BRASIL, 1978)

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área estudada, Localização, Limites e Escalas

Desde 1988, a Petrobrás vem explorando gás natural e petróleo na província petrolífera de Urucu. A unidade, denominada Base de Operações Geólogo Pedro Moura (BOGPM), está situada no município de Coari, distando 650 km a sudoeste de Manaus. O trecho do rio Urucu onde se situa a BOGPM é localizado entre os paralelos de 4° 45' e 5° 05' S e os meridianos de 65° 00' e 65° 25' W. O rio Urucu é um tributário do rio Solimões, situado entre os paralelos 4° e 5° S e meridianos 65° e 63° WGr, entre os rios Tefé e Coari. (Figura 12).

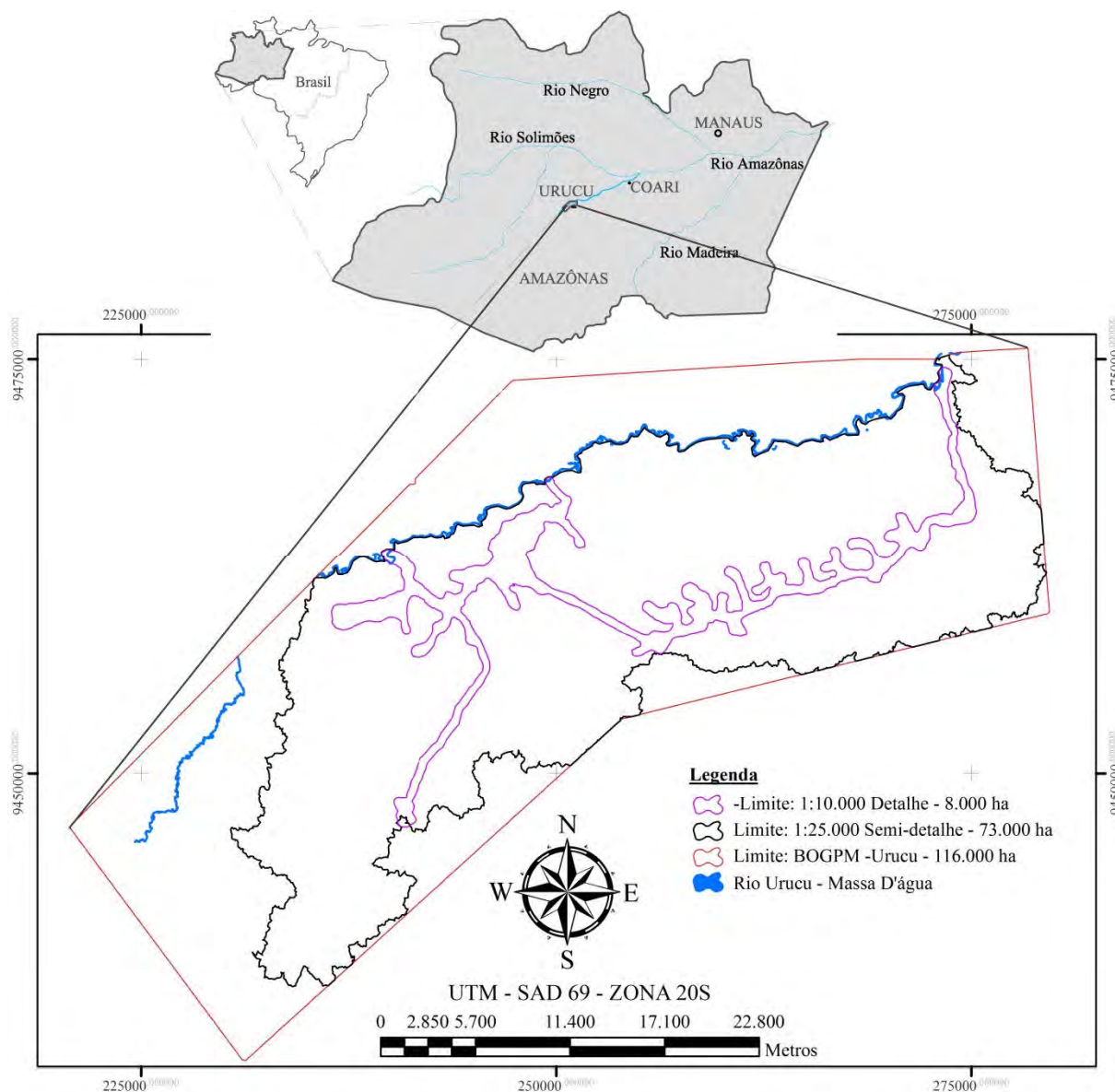


Figura 12: Localização, limites e escalas.

Parte da província petrolífera de Urucu, onde se concentram os campos petrolíferos RUC (Rio Urucu), SUC (Sudoeste de Urucu) e LUC (Leste de Urucu), compreende uma área de aproximadamente 116.000 hectares (polígono envolvente) com base planialtimétrica e hidrográfica em escala 1:5.000, no entanto as áreas objetos desse estudo de caso se restringem

a 73.000 ha em escala semidetalhada (1:25.000) e 8.000 ha em escala detalhada (1:10.000) referentes aos territórios com estradas, dutos e respectivos entornos com jazidas, áreas de empréstimo e locações de exploração petrolífera (Figura 12).

Este trabalho está inserido em um projeto de pesquisa que teve início 2 anos antes do início desta pesquisa. O projeto é intitulado Petrossolos Amazônicos e tem como principais objetivos mapear os solos (classes e atributos) da BOGPM e gerar protocolos de exploração e recuperação ambiental.

Como o projeto de pesquisa se encontrava em fase de vetorização da carta pedológica convencional quando este estudo se iniciou, os dados referentes ao levantamento e mapeamento convencional de solos não foram considerados como produtos desta pesquisa.

3.2 Base Planialtimétrica

A base planialtimétrica utilizada para o mapeamento foi fornecida pela PETROBRAS, e é uma ortoimagem carta de radar, em escala 1:5.000 (Figuras 13 e 14). O sistema de projeção cartográfica é Universal Transversa de Mercator (UTM), com meridiano central 63 Graus WGR e datum horizontal Sirgas 2.000. Foi obtida por Altimetria Ortométrica com equidistância de 2m, produzida aplicando técnicas de retificação digital a partir de imagens do radar aerotransportado interferométrico, de abertura sintética OrbiSAR-1, da Orbisat da Amazônia Indústria e Aerolevantamento S.A., com direitos de reprodução reservados à PETROBRAS.

A imagem foi obtida na Banda X, com resolução 0,5m, polarização HH. Altimetria Ortométrica obtida pela redução de altitudes elipsoidais para o datum vertical Imbituba-SC, através de interpolação com a utilização de modelo geoidal desenvolvido pelo IBGE-EPUSP.

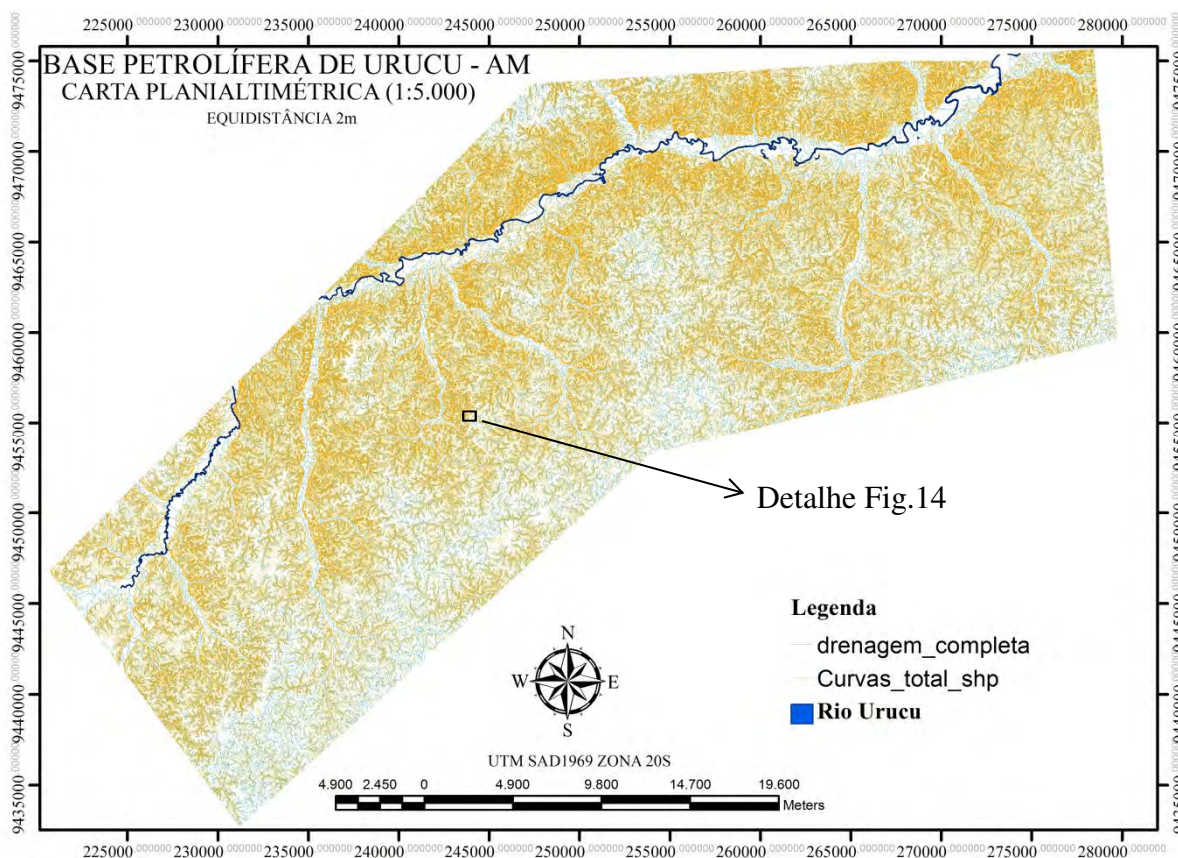


Figura 13: Carta planialtimétrica da área estudada.

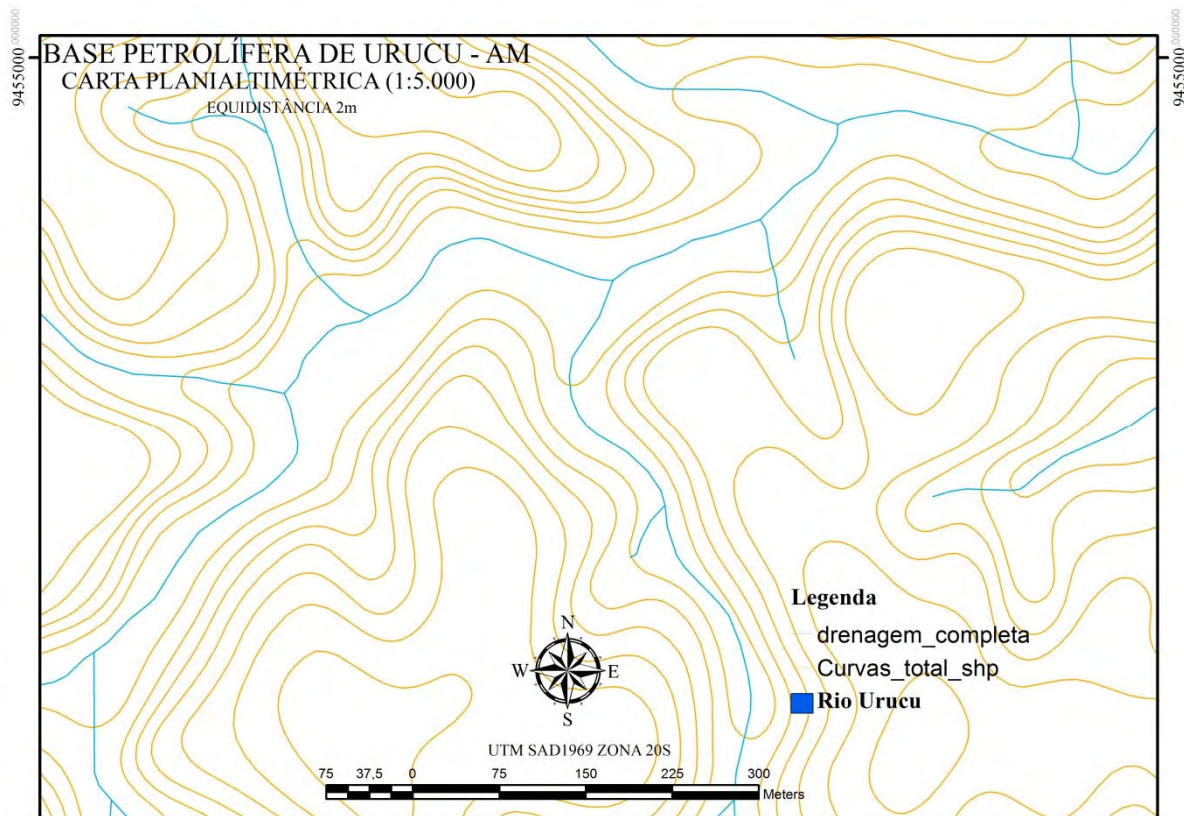


Figura 14: Carta planialtimétrica em detalhe.

3.3 Mapeamento Pedológico Convencional Detalhado

Na área em estudo, em um polígono irregular de aproximadamente 8.000 ha, delimitado no entorno das vias de circulação que interligam as localidades de exploração petrolífera, foi feito o mapeamento detalhado de solos na escala de 1:10.000 (PETROBRAS, 2010).

3.3.1 Levantamento pedológico

O levantamento de solos foi realizado de acordo com normas e critérios estabelecidos pela EMBRAPA/CNPS (1995). As atividades foram organizadas em três fases:

- a) Levantamento bibliográfico e de material básico (mapa de solo expedito e topográfico) e planejamento e separação de pontos a serem levantados;
- b) Campanha de campo onde se realizou a descrição morfológica, testes de infiltração de água no solo, resistência à penetração, densidade e umidade do solo e coleta de amostras de perfis para análises físicas, químicas e mineralógicas;
- c) Tabulação e armazenamento de dados e preparação do relatório técnico do levantamento de solos.

Diversas campanhas de campo foram feitas no sentido de coletar informações sobre os solos de Urucu. Essas campanhas consistiram da abertura de Perfis Completos, Perfis Incompletos e Tradagens. A distribuição espacial destas observações é apresentada nas Figuras 15 e 16. De posse dos mapas topográficos, fez-se a interpretação da área para fins de definição dos pontos estratégicos. Os pontos foram distribuídos de acordo com as diferentes topossequências, padrões de drenagem e declividade e forma das encostas. As coordenadas

destes pontos foram armazenadas em um receptor GNSS modelo Trimble Pro XT com correção pós-processada. A rede de satélites utilizada foi a constelação americana (GPS).

As informações obtidas nestas campanhas foram sistematizadas na forma de tabelas, o que permitiu o agrupamento de unidades taxonômicas e a predição das unidades de mapeamento.

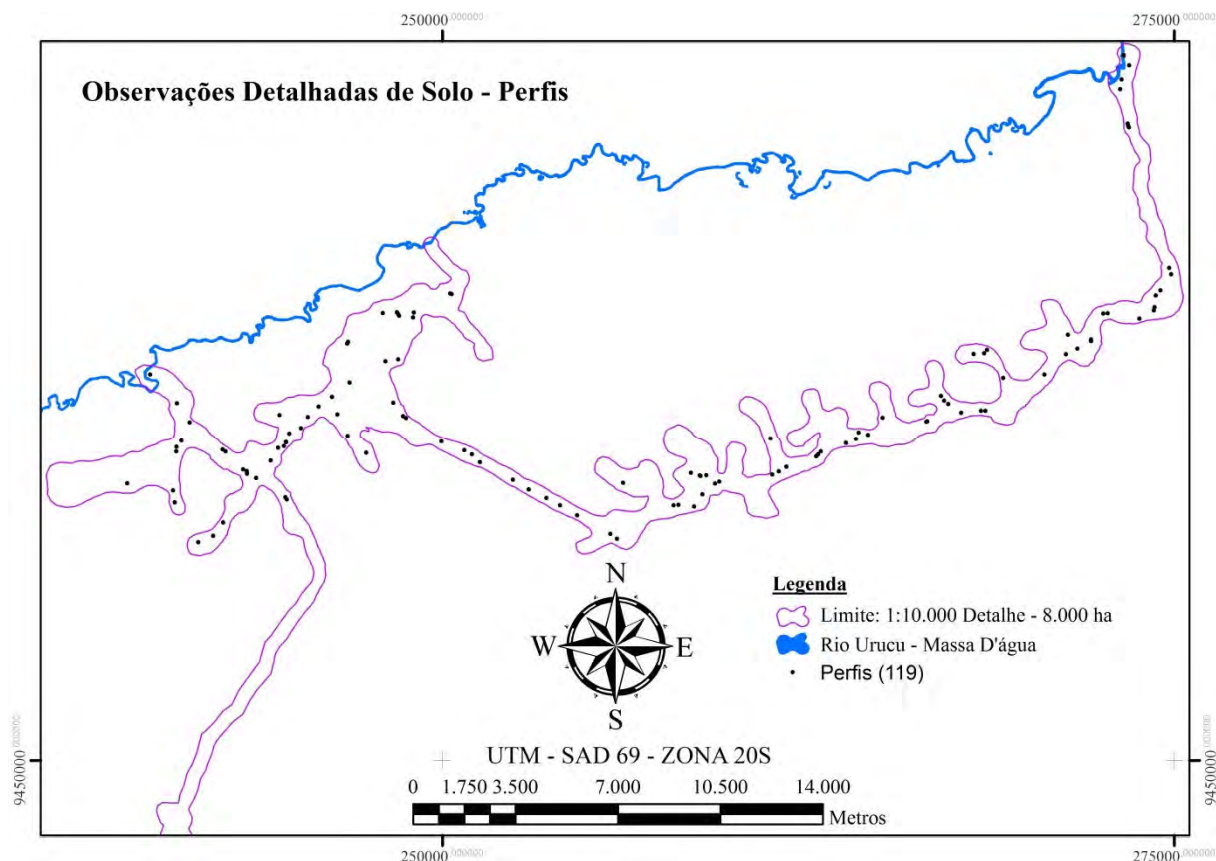


Figura 15: Distribuição espacial dos Perfis de solo ao longo da BOGPM.

Ao todo foram feitas 320 observações de campo, sendo 119 perfis completos, 3 perfis incompletos e 198 tradagens. Efetuaram-se, além da descrição morfológica dos perfis e tradagens, testes de campo referentes à resistência à penetração (113 testes em três profundidades – 0 a 60, 60 a 120 e 120 a 180 cm). Em 44 perfis de solo, efetuou-se também a determinação da curva característica de umidade dos principais horizontes dos solos.

Dos trabalhos de escritório, constaram também as alterações e revisões de legenda preliminar e elaboração da legenda de identificação, os acertos finais do mapeamento e revisão das descrições dos perfis e de seus resultados analíticos, bem como a redação e organização de relatório detalhado.

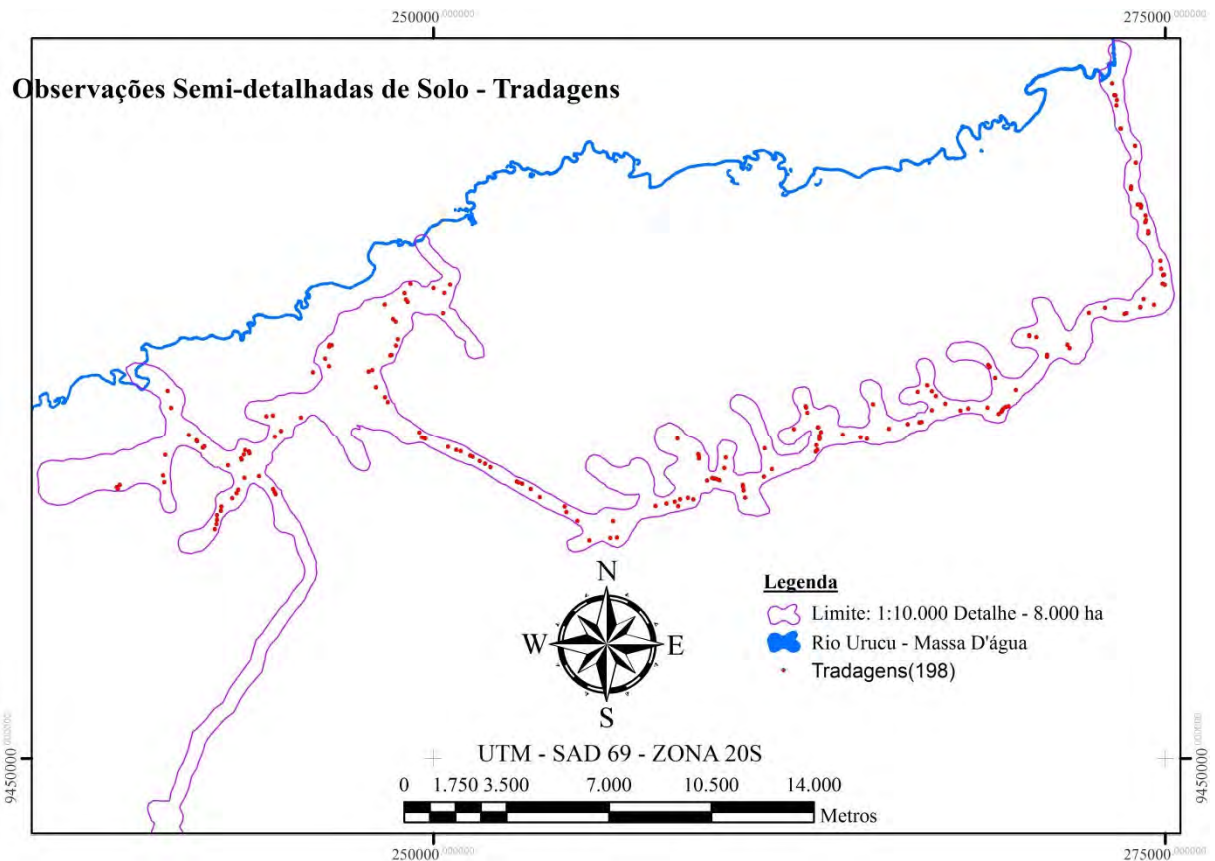


Figura 16: Distribuição espacial das tradagens ao longo da BOGPM.

3.3.2 Classes de solos encontradas na área de estudo

Os solos descritos e coletados na área de estudo foram classificados até o nível de família, e os critérios para distinção de classes, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (2006), são apresentados a seguir. Embora as definições das ordens de solo possam ser encontradas no SiBCS, optou-se por apresentá-las em associação com as figuras e dados descritivos e analíticos das unidades de mapeamento apresentadas no item apêndice, com o objetivo de facilitar ao leitor a compreensão dos tipos de solo e suas respectivas características.

Argissolos

Compreendem solos constituídos por material mineral, que têm como características diferenciais a presença de horizonte B textural de argila de atividade baixa, ou alta conjugada com saturação por bases baixa ou caráter alítico. O horizonte B textural (Bt) encontra-se imediatamente abaixo de qualquer tipo de horizonte superficial, exceto o hístico, sem apresentar, contudo, os requisitos estabelecidos para serem enquadrados nas classes dos Luvissolos, Planossolos, Plintossolos ou Gleissolos (Figura 17).

São de profundidade variável, desde forte a imperfeitamente drenados, de cores avermelhadas ou amarelados e, mais raramente, brunadas ou acinzentadas. A textura varia de arenosa a argilosa no horizonte A e de média a muito argilosa no horizonte Bt, sempre havendo aumento de argila daquele para este. São de forte a moderadamente ácidos, com saturação por bases alta, ou baixa, predominantemente cauliníticos e com relação molecular Ki variando de 1,0 a 3,3 em correlação com baixa atividade das argilas.



**Argissolo
Acinzentado**

Argissolo Amarelo

**Argissolo Vermelho-
amarelo**

**Argissolo
Vermelho**

Figura 17: Argissolos representativos da BOGPM.

Cambissolos

Compreendem solos constituídos por material mineral com horizontes B incipiente subjacente a qualquer tipo de horizonte superficial, desde que em qualquer dos casos não satisfaçam os requisitos estabelecidos para serem enquadrados nas classes Vertissolos, Chernossolos, Plintossolos e Organossolos. Têm sequência de horizontes A ou hístico, Bi, C, com ou sem R (Figura 18).

Devido à heterogeneidade do material de origem, das formas de relevo e das condições climáticas, as características destes solos variam muito. Assim, a classe comporta desde solos de forte até imperfeitamente drenados, de rasos a profundos, de cor bruna ou bruno-amarelada até vermelho escuro, e de alta a baixa saturação por bases e atividade química da fração coloidal.

O horizonte B incipiente (Bi) tem textura franco-arenosa ou mais argilosa e o solum, geralmente, apresenta teores uniformes de argila, podendo ocorrer ligeiro decréscimo ou um pequeno incremento de argila do horizonte A para o Bi. Admite-se diferença marcante do A para o Bi, em casos em que há desenvolvimento de sedimentos aluviais ou outros casos em que há descontinuidade litológica. A estrutura do Bi pode ser em blocos, granular ou prismática, havendo casos, também, de estruturas em grãos simples e maciça. Horizonte com plintita ou gleização pode estar presente em solos desta classe, desde que não satisfaça os requisitos exigidos para ser incluído nas classes dos Plintossolos ou Gleissolos, ou que se apresente em posição não diagnóstica com referência sequência de horizonte do perfil.

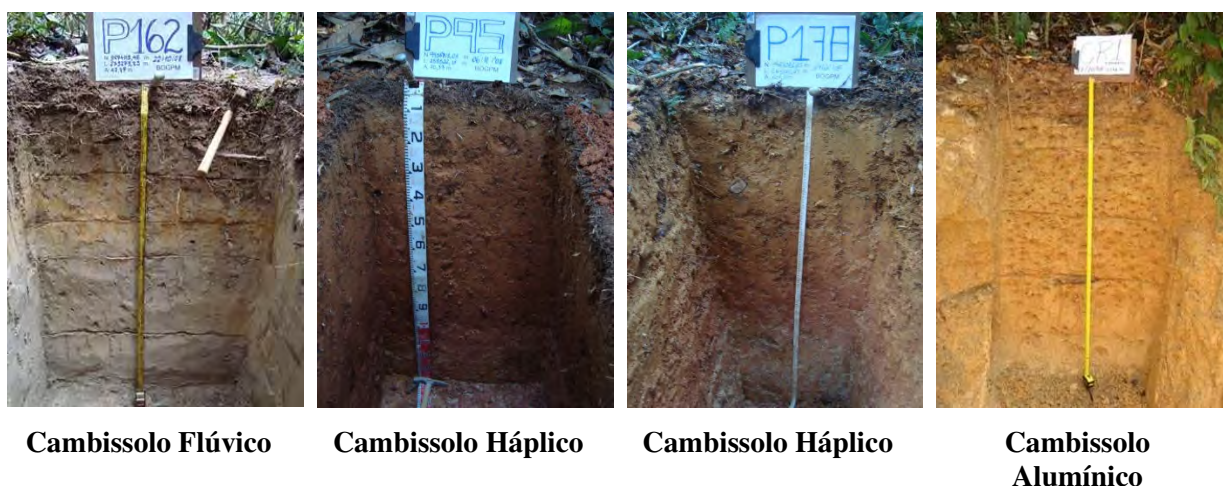


Figura 18: Cambissolos representativos da BOGPM.

Espodossolos

Compreendem solos constituídos por material mineral com horizonte B espódico subjacente a horizonte eluvial E (álbico ou não), ou subjacente a horizonte A, que pode ser de qualquer tipo, ou ainda, subjacente a horizonte hístico com espessura insuficiente para definir a classe dos Organossolos. Apresentam, usualmente, sequência de horizontes A, E, B espódico, C, com nítida diferenciação de horizontes (Figura 19).

A cor do horizonte A varia de cinzenta até preta e a do horizonte E desde cinzenta ou acinzentada-clara até praticamente branca. A cor do horizonte espódico varia desde cinzenta, de tonalidade escura ou preta, até avermelhada ou amarelada. A textura é predominantemente arenosa, sendo menos comumente textura de média a raramente argilosa no horizonte B.



Figura 19: Espodossolos representativos da BOGPM.

Gleissolos

Compreendem solos hidromórficos, constituídos por material mineral que apresentam horizonte glei dentro de 150 cm da superfície do solo, imediatamente abaixo de horizontes A ou E (com ou sem gleização), ou de horizonte hístico com espessura insuficiente para definir a classe dos Organossolos; não apresentam textura exclusivamente areia ou areia franca em todos os horizontes dentro dos primeiros 150 cm da superfície do solo ou até um contato

lítico, tampouco horizonte vértico, ou horizonte B textural com mudança textural abrupta acima ou coincidente com horizonte glei ou qualquer outro tipo de horizonte B diagnóstico acima do horizonte glei. Horizonte plíntico, se presente, deve estar à profundidade superior a 200 cm da superfície do solo (Figura 20).

Os solos desta classe encontram-se permanente ou periodicamente saturados com água, salvo se artificialmente drenados. A água permanece estagnada internamente, ou a saturação é por fluxo lateral no solo. Em qualquer circunstância, a água nos solos pode se elevar por ascensão capilar, atingindo a superfície.

Caracterizam-se pela forte gleização, em decorrência de ambiente redutor, virtualmente livre de oxigênio dissolvido. O processo de gleização implica na manifestação de cores acinzentadas, azuladas ou esverdeadas, devido à redução e solubilização do ferro, permitindo a expressão das cores neutras dos minerais de argila, ou ainda a precipitação de compostos ferrosos.

Apresentam sequência de horizontes A-Cg, A-Big, A-Btg-Cg, A-E-Bt-Cg, Ag-Cg, H-Cg, tendo o horizonte superficial cores desde acinzentadas até pretas, espessura normalmente entre 10 e 50 cm e teores de médios a altos de carbono orgânico.



Gleissolo Háplico

Gleissolo Háplico

Figura 20: Gleissolos representativos da BOGPM.

Neossolos

Compreendem solos constituídos de por material mineral ou orgânico pouco espesso, que não apresentam alterações expressivas em relação ao material originário devido à baixa intensidade de atuação dos processos pedogenéticos, seja em razão de características inerentes ao próprio material de origem, como maior resistência ao intemperismo ou composição químico-mineralógica, ou por influência dos demais fatores de formação (clima, relevo ou tempo), que podem impedir ou limitar a evolução dos solo (Figura 21).

Possuem sequência de horizonte A-R, A-C-R, A-Cr-R, A-Cr, A-C, O-R ou H-C sem atender, contudo, aos requisitos estabelecidos para serem enquadrados nas classes dos Chernossolos, Vertissolos, Plintossolos, Organossolos ou Gleissolos. Esta classe admite diversos tipos de horizontes superficiais, incluindo o horizonte O com menos de 20 cm de espessura, quando sobrejacente à rocha, ou horizonte A húmico ou proeminente com mais de 50 cm quando sobrejacente à camada R, C ou Cr.

Alguns solos podem ainda apresentar horizonte B, mas com insuficiência de requisitos (espessura muito pequena, por exemplo) para caracterizar qualquer tipo de horizonte B diagnóstico. Podem ocorrer horizontes C diagnósticos para outras classes, porém em posição que não permite enquadrá-los nas classes Gleissolos, Vertissolos ou Plintossolos.



Neossolo Quartzarênico

Neossolo Flúvico

Figura 21: Neossolos representativos da BOGPM.

3.3.3 Critérios para unidades de mapeamento e fases empregadas

Unidades de mapeamento (UM) são áreas de solos definidas em função das unidades taxonômicas que as compõem. Uma UM é estabelecida e definida para possibilitar a representação cartográfica e mostrar a distribuição espacial de unidades taxonômicas.

As UM's são designadas pelo nome de uma única unidade taxonômica (Unidade Simples) ou por várias unidades taxonômicas (Unidade Combinada – Associações, Complexos e Grupos Indiferenciados de solos). Em uma unidade simples, há predominância de uma classe de solo, com variações mínimas de características e propriedades. No mínimo 70% dos pedons em cada delimitação de uma unidade simples devem pertencer à classe taxonômica que lhe dá o nome. Entre as unidades combinadas, são de maior relevância, para levantamentos pedológicos, as associações, os complexos e os grupos indiferenciados de solos. Em sua composição, entram dois ou mais componentes.

As associações são constituídas por classes distintas de solos, com limites nítidos ou pouco nítidos entre si, podendo, normalmente, ser separados em levantamentos pedológicos mais pormenorizados. Associações são criadas, principalmente, pela necessidade de generalizações cartográficas, em função da escala e do padrão de ocorrência dos solos de uma área. As associações são representadas pela junção de nomes de duas ou mais classes de solos ou tipo de terreno ligados pelo sinal (+), precedidos da palavra associação. Na descrição das unidades de mapeamento, representadas por associações, é usual a especificação do percentual de ocorrência de cada componente. Cada componente de uma associação deve concorrer com no mínimo 20% da área associada.

O complexo de solo é uma unidade de mapeamento utilizada em levantamentos pedológicos detalhados e consiste em dois ou mais solos taxonomicamente distintos, mas não mapeáveis como unidades individuais. Os complexos são definidos de acordo com as classes de solos que os compõem e são designados pelos nomes das unidades taxonômicas, ligados por hifens e precedidos da palavra complexo.

Os Grupos indiferenciados de solos são constituídos pela combinação de duas ou mais unidades taxonômicas, com semelhanças morfogenéticas e, portanto, pouco diferenciadas. São constituídos por unidades taxonômicas afins, com morfologia e propriedades muito semelhantes e com respostas idênticas às práticas de uso e manejo. Declividade, pedregosidade, rochiosidade e drenagem podem reunir solos distintos no mesmo agrupamento, uma vez que são determinantes do uso e manejo. Os Grupos indiferenciados são designados pelos nomes das unidades taxonômicas e ligados pela conjunção “e”, precedidos da expressão grupo indiferenciado.

Os Tipos de terreno são unidades de mapeamento especiais, não sendo propriamente classes de solos. Entre os tipos de terreno, incluem-se as áreas de empréstimo e de despejo de entulhos, aterros, áreas urbanas, cascalheiras, escarpas rochosas e afloramentos de rochas, assinaladas em mapas de solos e representados por convenções cartográficas apropriadas.

Em unidades de mapeamento simples ou combinadas, é comum a ocorrência de solos em proporções muito menores que o componente ou componentes principais. Essas ocorrências são designadas por Inclusões e, em geral, representam menos de 20% da área total da unidade de mapeamento.

Tabela 2: Perfis de solo descritos na área de estudo

| Perfil | Abrev. | Classificação |
|--------|--------|--|
| 35 | Cxa | <u>CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico típico A moderado hiperdistrófico</u> |
| 150 | CXa | <u>CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico típico A moderado hiperdistrófico</u> |
| 86 | CXa | <u>CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico típico A moderado plântico moderadamente drenado</u> |
| 42 | CXa | <u>CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico típico A moderado hiperdistrófico</u> |
| 65 | CXa | <u>CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico típico A moderado moderadamente drenado</u> |
| 40 | CXal | <u>CAMBISSOLO HÁPLICO Alítico A moderado plântico imperfeitamente drenado</u> |
| 178 | CXal | <u>CAMBISSOLO HÁPLICO Alítico argilúvico A moderado hiperdistrófico</u> |
| 91 | CXal | <u>CAMBISSOLO HÁPLICO Alítico gleissólico A moderado imperfeitamente drenado</u> |
| 80 | CXal | <u>CAMBISSOLO HÁPLICO Alítico típico A fraco plântico</u> |
| 54 | CXal | <u>CAMBISSOLO HÁPLICO Alítico típico A moderado hiperdistrófico</u> |
| 118 | CXal | <u>CAMBISSOLO HÁPLICO Alítico típico A moderado hiperdistrófico</u> |
| 119 | CXal | <u>CAMBISSOLO HÁPLICO Alítico típico A moderado hiperdistrófico</u> |
| 127 | CXal | <u>CAMBISSOLO HÁPLICO Alítico típico A moderado hiperdistrófico</u> |
| 129 | CXal | <u>CAMBISSOLO HÁPLICO Alítico típico A moderado hiperdistrófico</u> |
| 130 | CXal | <u>CAMBISSOLO HÁPLICO Alítico típico A moderado hiperdistrófico</u> |
| 135 | CXal | <u>CAMBISSOLO HÁPLICO Alítico típico A moderado hiperdistrófico</u> |
| 148 | CXal | <u>CAMBISSOLO HÁPLICO Alítico típico A moderado hiperdistrófico</u> |
| 151 | CXal | <u>CAMBISSOLO HÁPLICO Alítico típico A moderado hiperdistrófico</u> |
| 152 | CXal | <u>CAMBISSOLO HÁPLICO Alítico típico A moderado hiperdistrófico</u> |
| 157 | CXal | <u>CAMBISSOLO HÁPLICO Alítico típico A moderado hiperdistrófico</u> |
| 70 | CXal | <u>CAMBISSOLO HÁPLICO Alítico típico A moderado imperfeitamente drenado</u> |
| 139 | CXal | <u>CAMBISSOLO HÁPLICO Alítico típico A moderado imperfeitamente drenado</u> |
| 169 | CXal | <u>CAMBISSOLO HÁPLICO Alítico típico A moderado imperfeitamente drenado</u> |
| 98 | CXal | <u>CAMBISSOLO HÁPLICO Alítico típico A moderado moderadamente drenado</u> |
| 105 | CXal | <u>CAMBISSOLO HÁPLICO Alítico típico A moderado moderadamente drenado</u> |
| 47 | CXal | <u>CAMBISSOLO HÁPLICO Alítico típico A moderado plântico</u> |
| 66 | CXal | <u>CAMBISSOLO HÁPLICO Alítico típico A moderado plântico</u> |
| 95 | CXal | <u>CAMBISSOLO HÁPLICO Alítico típico A moderado plântico</u> |
| 72 | CXal | <u>CAMBISSOLO HÁPLICO Alítico típico A moderado plântico imperfeitamente drenado</u> |
| 75 | CXal | <u>CAMBISSOLO HÁPLICO Alítico típico A moderado plântico imperfeitamente drenado</u> |
| 37 | CXal | <u>CAMBISSOLO HÁPLICO Alítico típico A moderado hiperdistrófico</u> |
| 125 | CXbd | <u>CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico A fraco álico</u> |

| | | |
|-----|------|---|
| 123 | CXbd | <u>CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico A mod. moderadam. dren. text. franco arenosa</u> |
| 61 | CXbd | <u>CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico plntico A moderado álico</u> |
| 34 | CXbd | <u>CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico A moderado álico</u> |
| 172 | CXbd | <u>CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico A moderado álico</u> |
| 182 | CXbd | <u>CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico A moderado álico</u> |
| 55 | CXbd | <u>CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico A moderado álico</u> |
| 60 | CXbd | <u>CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico A moderado álico</u> |
| 78 | CXbd | <u>CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico A moderado álico</u> |
| 153 | CXbd | <u>CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico A moderado álico</u> |
| 50 | CXbd | <u>CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico A moderado imperfeitamente drenado</u> |
| 170 | CXbd | <u>CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico A moderado moderadamente drenado</u> |
| 103 | CXbd | <u>CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico A moderado moderadamente drenado álico</u> |
| 144 | CXbd | <u>CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico A mod. moderadam. drenado textura franca</u> |
| 124 | CXbd | <u>CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico A mod. moderadam. dren. textura franco arenosa</u> |
| 114 | CXbd | <u>CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico A moderado muito mal drenado</u> |
| 39 | CXvd | <u>CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Distrófico típico A moderado muito mal drenado hiperdistrófico</u> |
| 162 | CYvd | <u>CAMBISSOLO FLÚVICO Ta Distrófico gleissólico A moderado</u> |
| 68 | ESKg | <u>ESPODOSSOLO FERRIHUMILÚVICO Hidromórfico dúrico</u> |
| 97 | ESKo | <u>ESPODOSSOLO HUMILÚVICO Órtico típico A moderado textura média</u> |
| 51 | GXvd | <u>GLEISSOLO HÁPLICO Ta Distrófico neofluvisólico A moderado</u> |
| 56 | GXvd | <u>GLEISSOLO HÁPLICO Ta Distrófico típico A moderado</u> |
| 57A | GXvd | <u>GLEISSOLO HÁPLICO Ta Distrófico típico A moderado</u> |
| 140 | PAa | <u>ARGISSOLO AMARELO Alumínico típico A moderado moderadamente drenado</u> |
| 141 | PAa | <u>ARGISSOLO AMARELO Alumínico típico A moderado moderadamente drenado</u> |
| 181 | PAal | <u>ARGISSOLO AMARELO Alítico plntico A moderado imperfeitamente drenado</u> |
| 49 | PAal | <u>ARGISSOLO AMARELO Alítico plntico A moderado moderadamente drenado</u> |
| 77 | PAal | <u>ARGISSOLO AMARELO Alítico típico A moderado hiperdistrófico</u> |
| 83 | PAal | <u>ARGISSOLO AMARELO Alítico típico A moderado hiperdistrófico</u> |
| 93 | PAal | <u>ARGISSOLO AMARELO Alítico típico A moderado imperfeitamente drenado</u> |
| 116 | PAal | <u>ARGISSOLO AMARELO Alítico típico A moderado imperfeitamente drenado</u> |
| 174 | PAal | <u>ARGISSOLO AMARELO Alítico típico A moderado imperfeitamente drenado</u> |
| 48 | PAal | <u>ARGISSOLO AMARELO Alítico típico A moderado moderadamente drenado</u> |
| 183 | PAal | <u>ARGISSOLO AMARELO Alítico típico A moderado moderadamente drenado</u> |
| 180 | PAal | <u>ARGISSOLO AMARELO Alítico típico álico A moderado</u> |
| 90 | PACd | <u>ARGISSOLO ACINZENTADO Distrófico típico A moderado álico imperfeitamente drenado</u> |
| 164 | PACd | <u>ARGISSOLO ACINZENTADO Distrófico típico A moderado álico mal drenado</u> |
| 165 | PACd | <u>ARGISSOLO ACINZENTADO Distrófico típico A moderado álico mal drenado</u> |
| 173 | PAd | <u>ARGISSOLO AMARELO Distrófico plntico A moderado moderadamente drenado</u> |
| 67 | PAd | <u>ARGISSOLO AMARELO Distrófico plntico A moderado álico</u> |
| 43 | PAd | <u>ARGISSOLO AMARELO Distrófico plntico A moderado imperfeitamente drenado</u> |
| 69 | PAd | <u>ARGISSOLO AMARELO Distrófico típico A moderado álico</u> |
| 84 | PAd | <u>ARGISSOLO AMARELO Distrófico típico A moderado álico</u> |
| 99 | PAd | <u>ARGISSOLO AMARELO Distrófico típico A moderado álico</u> |
| 101 | PAd | <u>ARGISSOLO AMARELO Distrófico típico A moderado álico</u> |
| 102 | PAd | <u>ARGISSOLO AMARELO Distrófico típico A moderado álico</u> |
| 167 | PAd | <u>ARGISSOLO AMARELO Distrófico típico A moderado álico</u> |
| 63 | PAd | <u>ARGISSOLO AMARELO Distrófico típico A moderado álico</u> |
| 132 | PAd | <u>ARGISSOLO AMARELO Distrófico típico A moderado álico</u> |
| 110 | PAd | <u>ARGISSOLO AMARELO Distrófico típico A moderado álico imperfeitamente drenado</u> |
| 131 | PAd | <u>ARGISSOLO AMARELO Distrófico típico A moderado álico moderadamente drenado</u> |
| 175 | PAd | <u>ARGISSOLO AMARELO Distrófico típico A moderado álico moderadamente drenado</u> |
| 171 | PAd | <u>ARGISSOLO AMARELO Distrófico típico A moderado imperfeitamente drenado</u> |
| 57B | PAd | <u>ARGISSOLO AMARELO Distrófico típico A moderado imperfeitamente drenado</u> |

| | | |
|------|-------|--|
| 79 | PAd | <u>ARGISSOLO AMARELO Distrófico típico A moderado imperfeitamente drenado</u> |
| 143 | PAd | <u>ARGISSOLO AMARELO Distrófico típico A moderado moderadamente drenado</u> |
| 163 | PAd | <u>ARGISSOLO AMARELO Distrófico típico A moderado moderadamente drenado</u> |
| 133 | PVAa | <u>ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Alumínico típico A moderado hiperdistrófico</u> |
| 106 | PVAa | <u>ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Alumínico A moderado moderadamente drenado</u> |
| 158 | PVAa | <u>ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Alumínico plíntico A moderado</u> |
| 73 | PVAa | <u>ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Alumínico plíntico A mod. imperfeitamente drenado</u> |
| 161 | PVAa | <u>ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Alumínico típico A moderado</u> |
| 81 | PVAal | <u>ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Alítico A moderado imperfeitamente drenado</u> |
| 100 | PVAal | <u>ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Alítico A moderado imperfeitamente drenado</u> |
| 74 | PVAal | <u>ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Alítico plíntico A moderado hiperdistrófico</u> |
| 179 | PVAal | <u>ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Alítico plíntico A moderado moderadamente drenado</u> |
| 134 | PVAal | <u>ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Alítico plíntico A moderado moderadamente drenado</u> |
| 33 | PVAal | <u>ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Alítico plíntico concrecionário A mod. imperf..drenado</u> |
| 31 | PVAal | <u>ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Alítico típico A moderado hiperdistrófico</u> |
| 136 | PVAal | <u>ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Alítico típico A moderado hiperdistrófico</u> |
| 137 | PVAal | <u>ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Alítico típico A moderado hiperdistrófico</u> |
| 138 | PVAal | <u>ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Alítico típico A moderado hiperdistrófico</u> |
| 166 | PVAal | <u>ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Alítico típico A moderado imperfeitamente drenado</u> |
| 177 | PVAal | <u>ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Alítico típico A moderado imperfeitamente drenado</u> |
| 87 | PVAal | <u>ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Alítico típico A moderado moderadamente drenado</u> |
| 168 | PVAal | <u>ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Alítico típico A moderado moderadamente drenado</u> |
| 85 | PVAd | <u>ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico plíntico A moderado moderadam. drenado</u> |
| 58 | PVAd | <u>ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico A moderado álico</u> |
| 59 | PVAd | <u>ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico A moderado álico</u> |
| 108 | PVAd | <u>ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico A moderado hiperdistrófico</u> |
| 118A | PVAd | <u>ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico A moderado imperfeitamente drenado</u> |
| 41 | PVAd | <u>ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico A moderado moderadamente drenado</u> |
| 94 | PVal | <u>ARGISSOLO VERMELHO Alítico típico A moderado imperfeitamente drenado</u> |
| 96 | PVal | <u>ARGISSOLO VERMELHO Alítico típico A moderado imperfeitamente drenado</u> |
| 113 | RQo | <u>NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Órtico típico A moderado mesodistrófico</u> |
| 45 | RYbd | <u>NEOSSOLO FLÚVICO Tb Distrófico típico A moderado extremamente drenado</u> |
| 88 | RYq | <u>NEOSSOLO FLÚVICO Psamítico típico A moderado eutrófico</u> |
| 89 | SXd | <u>PLANOSSOLO HÁPLICO Distrófico arênico A moderado imperfeitamente drenado</u> |

3.4 Validação da Carta Pedológica Convencional

Para a execução da validação, foram planejados 100 pontos amostrais distribuídos na área mapeada (aproximadamente 30% do total de pontos observados no levantamento convencional). No entanto, durante as atividades de campo, alguns pontos não puderam ser acessados por restrições da empresa gestora da área. Desses 100 pontos previstos, visitou-se 66 (aproximadamente 20% do total de pontos observados no levantamento convencional) (Figura 22). A amostragem de validação atendeu às seguintes restrições inerentes à área de estudo, quais sejam:

a) que contemplassem as áreas não visitadas durante o levantamento convencional. As regiões visitadas foram selecionadas de forma a incluir as que não tivessem sido visitadas em um bom nível de intensidade durante as campanhas de levantamento pedológico;

b) que estivessem próximas às vias de acesso e acessíveis. Esse critério já havia sido utilizado durante as campanhas de levantamento pedológico, onde buscou-se explorar ao máximo a cobertura ampla da área, utilizando-se da malha rodoviária. Ao chegar aos locais

planejados, a equipe deixou o veículo de apoio e adentrou a floresta percorrendo entre 40 e 100m na direção perpendicular à via de acesso;

c) Que não estivessem em zonas de transição entre UM's. Dada a complexidade dos solos da região, locais facilmente identificáveis em campo, como zonas de transição entre UM's, foram evitados, pois, como se sabe, o limite entre UM's não é linear e abrupto como os modelos cartográficos adotados atualmente mostram.

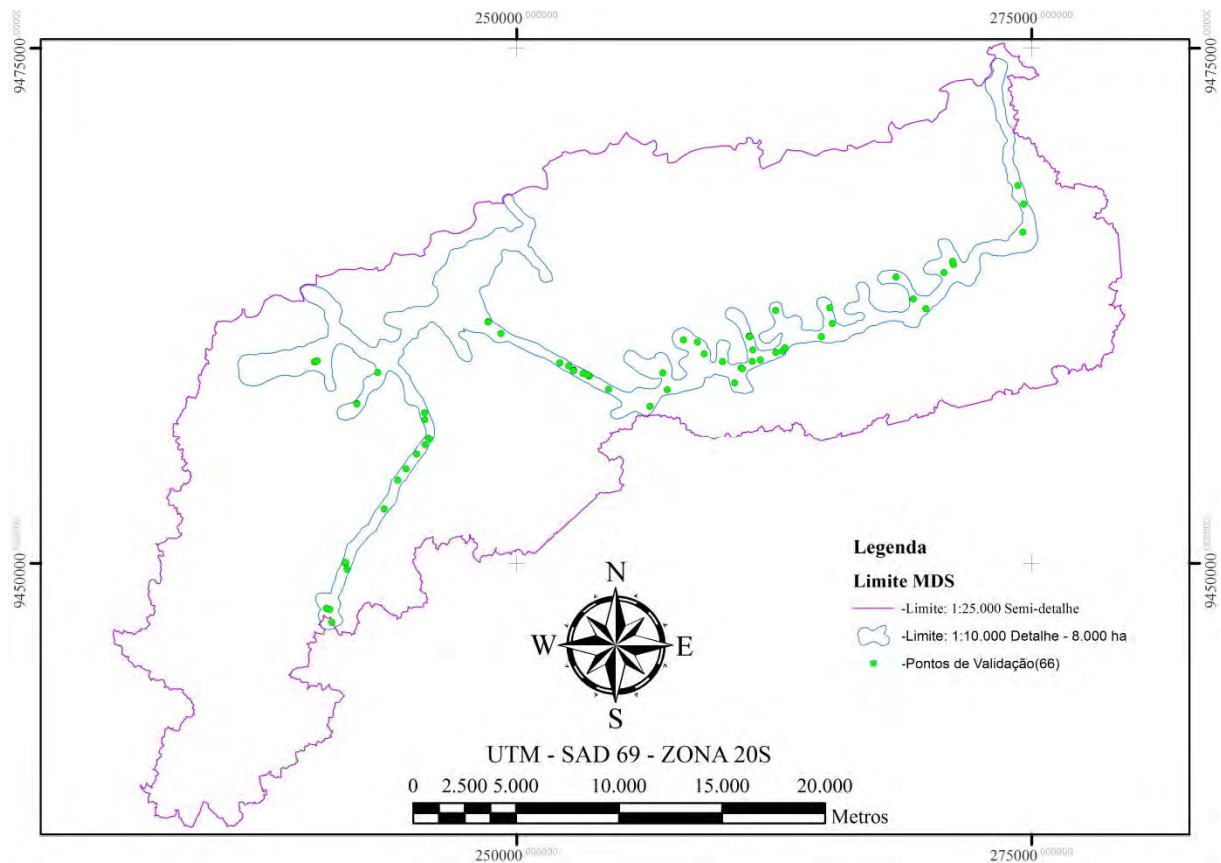


Figura 22: Pontos amostrados na campanha de validação.

Durante a campanha de validação, foram descritos 8 perfis incompletos e executadas 58 tradagens, totalizando 66 pontos de observação de solos. Em cada local visitado, comparou-se a classificação do solo observado com a da unidade de mapeamento predita, sendo cada ponto interpretado até o quinto nível taxonômico segundo EMBRAPA (2006). Para avaliar a acurácia da carta pedológica original, foi considerado acerto a coincidência de classificação do ponto observado com a classificação do perfil representativo da unidade de mapeamento predita. Coincidências de classificação entre o ponto observado e inclusões das unidades de mapeamento foram consideradas incongruências (ROSSITER, 2011). Caso as observações concordantes com inclusões previstas em uma UM fossem consideradas como acertos, em função da complexidade de ocorrência das classes de solo na área e do agrupamento descrito nessa UM, fatalmente não teriam sido encontradas discordâncias entre o predito e o observado.

A importância da checagem de campo é destacada por Ippoliti et al. (2005), de modo não só a observar variações não evidentes no material cartográfico, mas também a promover ajustes, onde necessário.

3.5 Agregação da Legenda da Carta Convencional para o MDS

Em função da grande complexidade da variabilidade espacial dos solos da área mapeada, a legenda da carta convencional detalhada de solos foi reagrupada (Figura 23) de acordo com os seguintes critérios: a) semelhança de ambientes de ocorrência (Figura 24) e b) características intrínsecas dos solos descritos como estratégia para o mapeamento digital dos solos (MDS). Além da simplificação da legenda, a escala das cartas foi reduzida de 1:10.000 (MCS) para 1:25.000 (MDS).

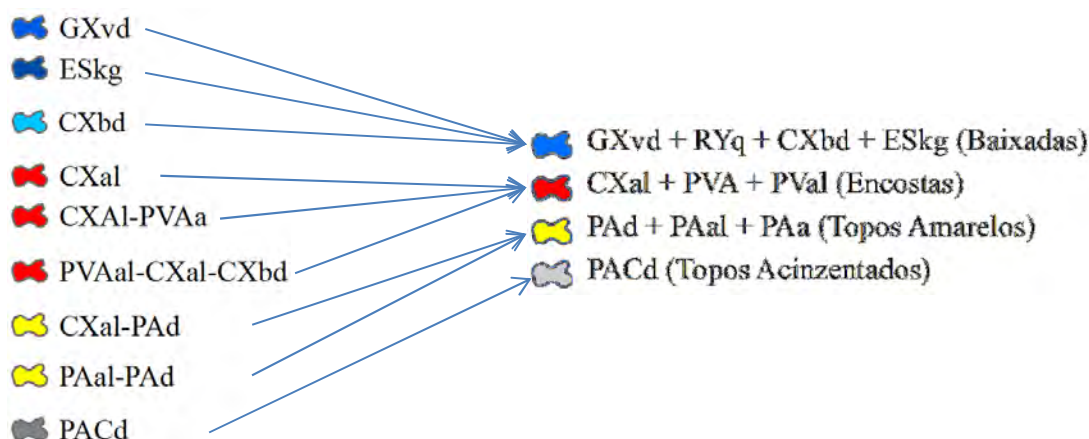


Figura 23: Esquema de simplificação das legendas da Carta Pedológica Convencional

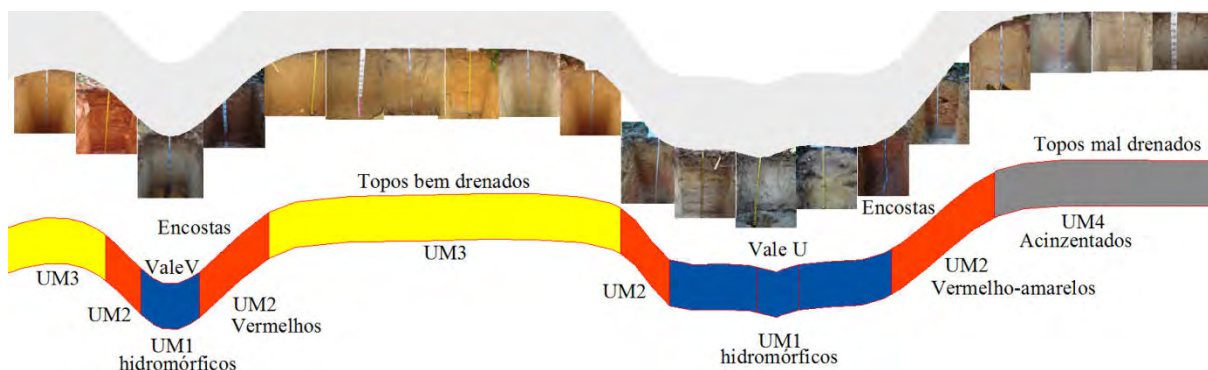


Figura 24: Topossequência esquemática com fotos dos perfis ocupando suas posições na paisagem em perfil (as cores são correspondentes às cores da legenda da Figura 23).

3.6 Descrição das Unidades de Mapeamento para o MDS

Nos itens seguintes, são apresentados detalhamentos dos critérios de ambientes geomórficos e pedológicos utilizados para a agregação das unidades de mapeamento.

a) Unidade de Mapeamento 1: GXvd + RYq + CXbd + ESkg

Essa unidade de mapeamento compreende as regiões de vales em forma de “U” e “V” tendo como característica principal os solos de baixadas aluvio-coluvionares. A principal característica destes solos é a má drenagem nas estações chuvosas e a presença frequente de colorações acinzentadas decorrentes de redução de ferro e acúmulo de materiais orgânicos.

Nessas regiões ocorrem as seguintes classes de solos (perfis completos): 6 CXbd, 4 GXvd, 2 RYq, 1 RYbd, 1 ESkg, 1 CYvd e 1 CXvd. Também foram encontrados alguns perfis considerados como inclusões: 4 PAd, 2 PAal, 1 PVal e 1 CXal. A explicação para a

ocorrência dessas inclusões é o entulhamento dos vales com variações pontuais no relevo e que não são mapeáveis na escala de trabalho.

Quanto às tradagens, foram encontrados 19 pontos de observação similares à RY e 17 similares à GX. Como inclusões, foram encontrados 1 similar à PA e 1 similar à PVA.

b) Unidade de Mapeamento 2: CXal + PVA + PVal

Essa unidade de mapeamento compreende as encostas declivosas e, por isso, bem drenadas da área mapeada. Seus solos apresentam predominantemente coloração vermelho-amarelo e vermelho, típica de oxidação de ferro devido aos repetidos ciclos de umedecimento e secagem. Microvariações no relevo local favorecem a manutenção da umidade no perfil, dificultando a oxidação de ferro e apresentando, assim, colorações amareladas.

Os seguintes perfis de solo foram descritos e coletados: 18 CXal, 15 PVAal, 5 PVAd, 3 PVAA, 3 CXa, 1 PVal. Como inclusões foram, encontrados 9 CXbd, 6 PAd e 1 PAal.

Foram observados, ainda, locais similares às seguintes classes de solo: 34 PVA e 7 PV. E, como inclusões, foram encontrados: 44 PA, 4 GX e 1 RY.

c) Unidade de Mapeamento 3: PAd + PAal + PAa

Compreende as regiões de topos de elevação, dissecados ou não, sempre com drenagem moderada, com solos predominantemente amarelos. A condição de boa hidratação, sem que haja, contudo, má drenagem do perfil do solo nesta região reduz os ciclos de umedecimento e secagem, impedindo a oxidação ou redução do ferro.

São perfis típicos desta unidade de mapeamento: 11 PAd, 6 PAal e 3 PAa. Como inclusões, as seguintes classes foram encontradas: 7 CXal, 2 CXa, 1 CXbd, 1 PVAA e 1 RQo.

Nas campanhas de campo para execução de tradagens, foram descritos os seguintes locais similares às classes: 91 PA. Como inclusões, as seguintes tradagens similares às classes: 2 PAC, 2 PVA e 1 PV.

d) Unidade de Mapeamento 4: PACd

São regiões de planaltos imperfeitamente drenados que ocorrem nas cabeceiras das microbacias hidrográficas da área mapeada, com solos acinzentados e sujeitos a encharcamento na estação chuvosa, o que favorece a anaerobiose, redução de ferro e hidromorfismo. Os solos destacam-se pelos altos teores de silte ao longo do perfil. Sempre que nessas regiões o microrelevo local possui boas condições de drenagem, verifica-se a ocorrência de solos amarelados ou vermelho-amarelos quando a declividade aumenta.

Perfis típicos descritos: 7 PACd, 1 EKO e 1 SXd. Com inclusão de: 1 PAal.

Tradagens similares às seguintes classes: 29 PACd. Com inclusão de 4 PA.

3.7 Ajuste da Carta Pedológica Convencional Simplificada

A campanha de levantamento de campo para validação permitiu conhecer a exatidão global da Carta Pedológica Convencional Original e também executar ajustamento da Carta Convencional de Solos Simplificada. O ajustamento consistiu em análise e retificação de regiões onde foram observados erros de classificação, para que pudessem coincidir com a verdade de campo.

Mesmo não sendo conhecida a nova exatidão para esta carta pedológica simplificada, assume-se que a exatidão é superior àquela encontrada para a carta pedológica convencional

não ajustada, uma vez que foram corrigidos os principais erros encontrados na campanha de validação.

3.8 Banco de Dados Digital e Programas Utilizados

Todos os dados compilados ou levantados em campo foram analisados e organizados em editores de planilhas eletrônicas e de texto. As tabelas geradas e os dados geoespaciais existentes foram armazenados e organizados em um banco de dados geográfico no Sistema de Informação Geográfica ArcGIS 9.3 da Esri e todas as análises multivariadas foram executadas no programa estatístico The SAS System for Windows 9.0.

3.9 Modelagem do Terreno e Relação Solo-Relevo

A parametrização da morfologia do relevo por meio de SIG é o processo de extração de atributos quantitativos da topografia de um MDT (HENGL, 2003). É designada como análise do terreno (*terrain analysis*), geomorfologia quantitativa (*quantitative geomorphology*) ou modelagem digital do terreno (*digital terrain modelling*). A geomorfometria (*geomorphometry*) descreve de forma quantitativa as formas da superfície da Terra (MUÑOZ, 2009), por meio de equações aplicadas a modelos numéricos de representação altimétrica, os MDTs, que derivam os atributos. Para Wood (1996), a parametrização do relevo refere-se à representação quantitativa das características morfológicas da paisagem descritas de forma contínua.

Os atributos derivados de MDT são compreendidos como atributos topográficos (MOORE *et al*, 1991; MOORE *et al.*, 1993; WILSON e GALLANT, 2000; CHAGAS, 2006), do terreno (TEN CATEN *et al.*, 2009) ou de relevo (IPPOLITI *et al.*, 2005; SIRTOLI *et al.*, 2008a), também são denominados na literatura como variáveis geomorfométricas (BISPO *et al.*, 2009; MUÑOZ, 2009) ou morfométricas (HERMUCHE *et al.*, 2002). Esses atributos podem ser parametrizados a partir de variáveis, tais como altitude, declividade, aspecto, diferentes curvaturas, área contribuição, índice topográfico de umidade, etc (McBRATNEY *et al.*, 2003).

A Figura 25 representa o fluxograma de obtenção dos atributos do relevo utilizados neste estudo.

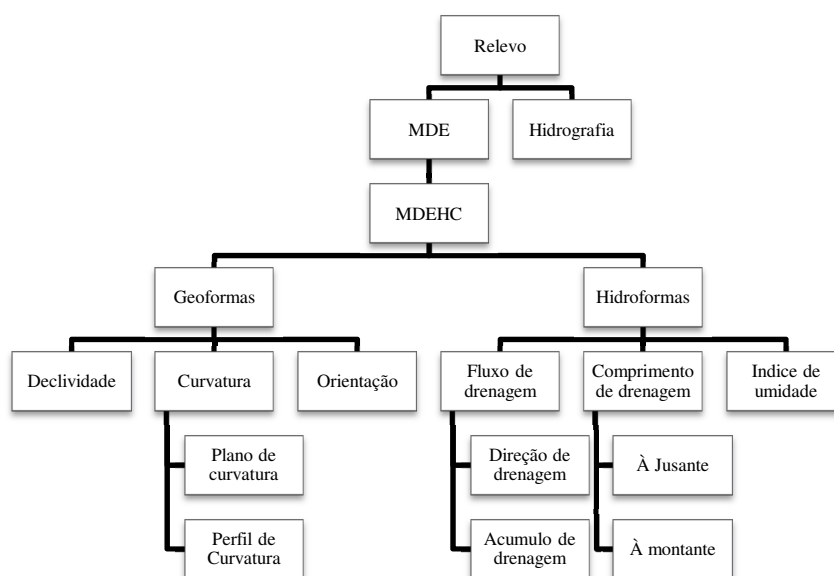


Figura 25: Fluxograma lógico de obtenção das covariáveis predictoras derivadas do MDE.

O Modelo Digital de Elevação de Terreno (MDE) é uma representação espacial da superfície a partir de pontos que descrevem a elevação de uma grade de pontos a intervalos regulares ou irregulares (MONTGOMERY, 2003). Essa variável é entendida por Valeriano (2003) como uma derivação de ordem zero do MDT.

De posse das curvas de nível, hidrografia e limites de sub-bacias (escala 1:5.000 e resolução 1m) em formato “.dxf”, foi possível gerar o MDE. A rede de drenagem da base cartográfica foi orientada (das nascentes aos exutórios) para permitir a confecção do MDE Hidrológicamente Consistente (MDEHC) (Figura 26). O MDEHC considera o sentido de escoamento das águas no momento da interpolação das altitudes (curvas de nível), portanto esse modelo é isento de depressões espúrias e outros erros que podem gerar erros em cadeia no momento da classificação “pixel a pixel”. Dessa forma, fica assegurado que o escoamento superficial originado a partir de qualquer ponto da bacia hidrográfica convergirá para um curso hidrográfico e este, para a respectiva foz. O MDEHC é fundamental para a geração de MDT's mais consistentes para as diversas covariáveis utilizadas. A Figura 27 ilustra o MDE (com inconsistências) à esquerda e o MDEHC (devidamente corrigido) à direita.

Os valores de altitude encontrados na área variam de 46 a 84m (Figura 26), sendo que os menores valores são observados na região nordeste da área, mais especificamente às margens do Rio Urucu. Já os valores mais elevados podem ser verificados no sudoeste da área de estudo. Toda a região ao sul da área de estudo apresenta valores de altitude mais elevados em relação à região norte, que é caracterizada pela ocorrência dos exutórios dos diversos igarapés, tributários do Rio Urucu. Cada exutório de bacia hidrográfica da área de estudo apresenta os menores valores de elevação.

Contrastes de cor mostram claramente os vales dos grandes igarapés que drenam a área de estudo, denotando a importância desta variável para o mapeamento dos solos hidromórficos aluviais da região. Embora seja possível correlacionar as regiões mais elevadas aos solos hidromórficos, das cabeceiras das bacias hidrográficas (PACd), ao isolar os maiores valores, em sobreposição à carta Área de Referência (AR), percebe-se que, devido à pequena amplitude relativa à área estudada, ocorrem, também associados a este intervalo de classe, solos com características de topos dissecados (PA) com melhores condições de drenagem. De forma análoga ao observado em relação à unidade de mapeamento PA, verifica-se certa correlação de ocorrência de solos associados às encostas (solos vermelhos e vermelho-amarélos) com regiões de elevação intermediárias.

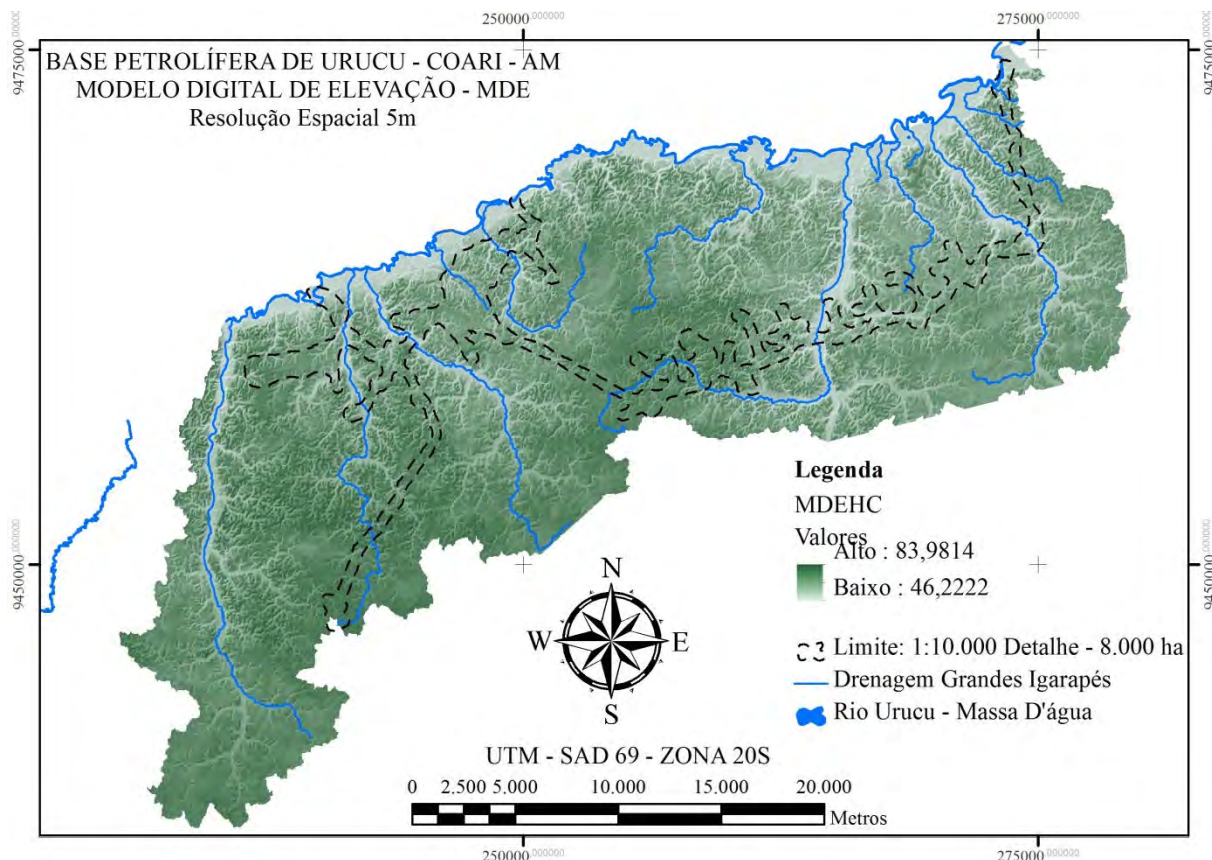


Figura 26: Modelo digital de elevação de terreno hidrológicamente consistente (MDEHC).

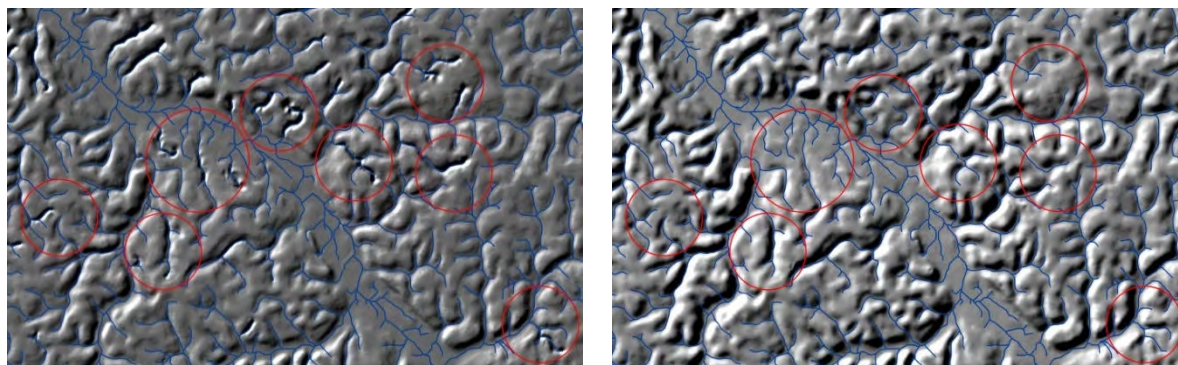


Figura 27: MDE e MDEHC em um trecho da área estudada.

3.10 Mapas Temáticos Derivados do MDEHC

As variáveis morfométricas do relevo (preditoras) que foram obtidas diretamente do MDEHC são classificadas como variáveis primárias. Nesta categoria, estão enquadradas as variáveis: **altitude, declividade, curvatura, curvatura planar, curvatura em perfil, comprimento de fluxo à montante, comprimento de fluxo à jusante, fluxo acumulado, direção de fluxo e orientação de vertentes**. A partir da análise conjunta das variáveis primárias, é possível obter as variáveis secundárias, como **índice topográfico de umidade, índice de transporte de sedimentos e corrente de máximo fluxo** (MOORE et al., 1993). Os índices secundários podem ser derivados empiricamente ou por meio de equações simplificadas descrevendo processos físicos.

A utilização das variáveis morfométricas são importantes na modelagem matemática dos ecossistemas (RAMOS et al., 2003). Segundo Chagas (2006), os atributos elevação,

declividade e orientação de vertentes têm sido mais efetivamente utilizados em levantamentos pedológicos. São descritos e apresentados abaixo os principais atributos topográficos, adotados como variáveis do MDE, para análises da relação solo-relevo e predição das unidades de mapeamento.

3.10.1 Geformas

a) Modelo de declividades

O modelo de declividades é definido como um plano tangente à superfície, ou seja, correspondente à inclinação da superfície do terreno em relação ao plano horizontal, expresso como a mudança de elevação sobre certa distância (BURROUGH, 1986), ou, de forma mais simples, é a primeira derivada da altitude (WILSON & GALLANT, 2000). A declividade constitui um importante instrumento para levantamentos de solos ao considerarmos a distribuição do relevo e a paisagem regional (RESENDE, 1995), e influencia diretamente o fluxo de água, o modelado geomorfológico e o processo de formação do solo.

Essa variável tem sido considerada como um dos mais importantes atributos topográficos primários na identificação de unidades de solos (HERMUCHE *et al.*, 2003; IPPOLITI *et al.*, 2005; CHAGAS, 2006; SIRTOLI, 2008; SIRTOLI *et al.*, 2008b; MUÑOZ, 2009 e CRIVELENTI, 2009). Normalmente é calculada em graus ou porcentagem.

Neste modelo (Figura 28), as declividades variaram de 0°, nas áreas planas, até 28°, nas áreas mais íngremes (ou 0 a 37%). Assim, verifica-se o grande potencial desta variável para auxiliar na predição dos solos associados às encostas (vermelhos e vermelho-amarelos) que ocorrem nas regiões de média e alta declividade (amarelo e vermelho no modelo de declividades apresentado). Nessas áreas, é comum a ocorrência de petroplintita. As regiões de baixa declividade, que aparecem em verde no modelo, se correlacionam bem com os solos associados aos topos de elevação (PA e PV+PVA) e com os vales em formato de U que ocorrem nas planícies fluviais dos principais igarapés que drenam a área. Nessas áreas, é possível verificar a ocorrência de depósitos aluviais recentes e depósitos coluvionares.

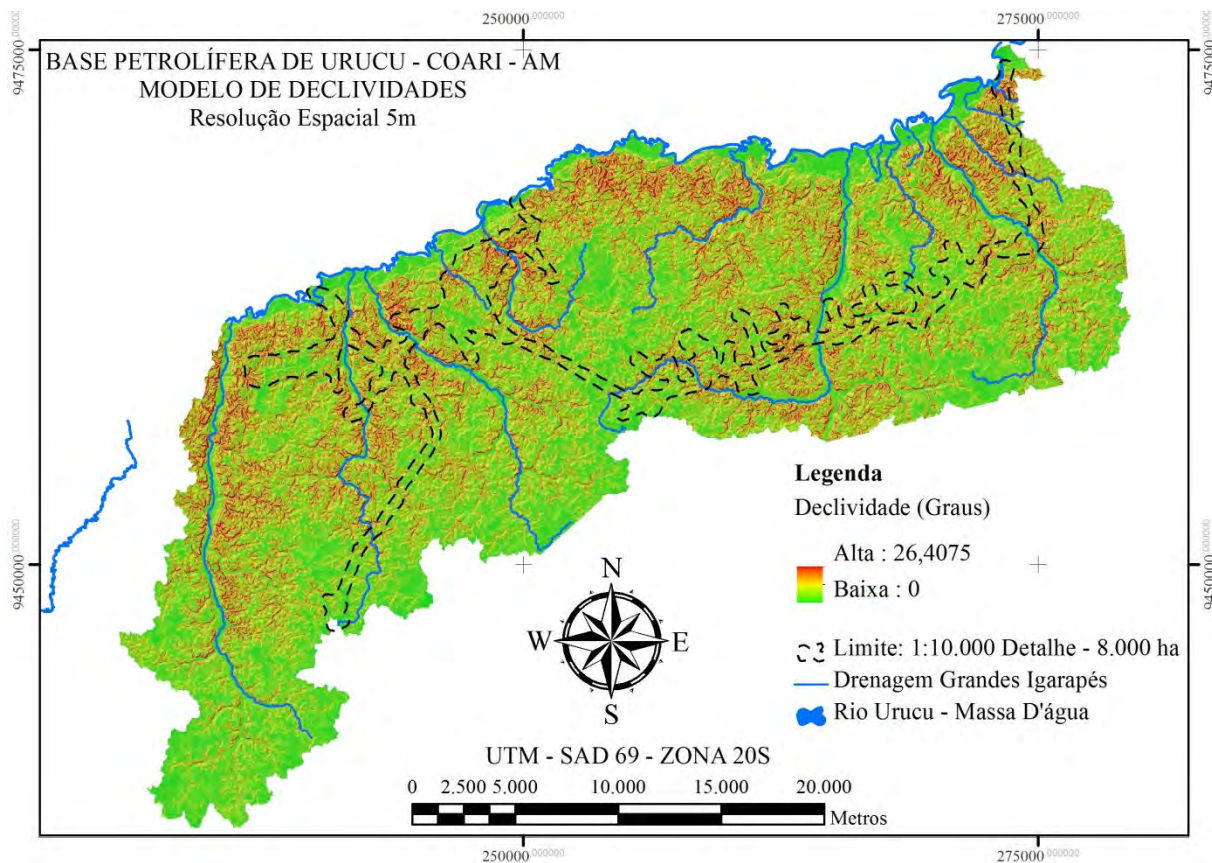


Figura 28: Modelo de declividades.

b) Modelos de Curvaturas

A curvatura do terreno é a segunda derivada da altitude. O plano e o perfil de curvatura representam as formas do relevo, sendo importantes atributos na distinção de unidades geomorfológicas (CHAGAS, 2006 e SIRTOLI *et al.*, 2008a), também nomeados na literatura como curvatura vertical e horizontal (VALERIANO, 2003; VALERIANO e CARVALHO JÚNIOR, 2003 e MUÑOZ, 2009) ou curvatura em perfil e planar (CRIVELENTI, 2009), ou ainda curvatura no perfil e no plano (MENDIONDO *et al.*, 1998). A curvatura em perfil refere-se ao caráter convexo, côncavo ou retilíneo da vertente, quando analisado em perfil (VALERIANO, 2003) e a curvatura planar refere-se ao caráter divergente, convergente e planar dos fluxos de matéria (taxas de erosão e deposição) sobre o terreno quando analisado em projeção horizontal (MOORE *et al.*, 1991 e VALERIANO e CARVALHO JÚNIOR, 2003). Teoricamente, segundo Valeriano (2003), as vertentes retilíneas e planares possuem valor de curvatura nulo; as vertentes côncavas e convergentes, valor positivo; e as convexas e divergentes, valor negativo (VALERIANO e CARVALHO JÚNIOR, 2003).

Estudos de compartimentação da topografia apontam a curvatura como uma das variáveis de alto poder de identificação de unidades homogêneas de relevo (DOORNKAMP & KING, 1971) e ela está associada aos processos de migração e acúmulo de água, minerais e matéria orgânica no solo, através da superfície, proporcionada pela gravidade (VALERIANO, 2003).

A curvatura da vertente tende a influenciar grandemente na distribuição dos solos por meio das interações de processos pedológicos, hidrológicos e geomórficos que se processam (PENNOCK *et al.*, 1987). Portanto, a aplicação desse atributo topográfico permite avaliar a

distribuição dos solos na paisagem, uma vez que o movimento e a distribuição de água ao longo das vertentes são as principais razões para diferenças nos solos (HALL, 1983).

Na área de estudo, o modelo de curvatura planar (Figura 29) indica a predominância de superfícies divergentes (divergência das linhas de fluxo). Essas superfícies estão fortemente associadas à ocorrência de solos de topo de elevação (PA e PAC). As superfícies classificadas como planas predominam nos vales em formato de U (grandes igarapés e rio Urucu) e em grande parte dos solos acinzentados de altitude (PAC), ambas com ocorrência de hidromorfismo. Já as superfícies classificadas como convergentes (convergência das linhas de fluxo) possibilitam a identificação dos vales em forma de V, que predominam nas regiões dissecadas dos tributários dos grandes igarapés da área de estudo.

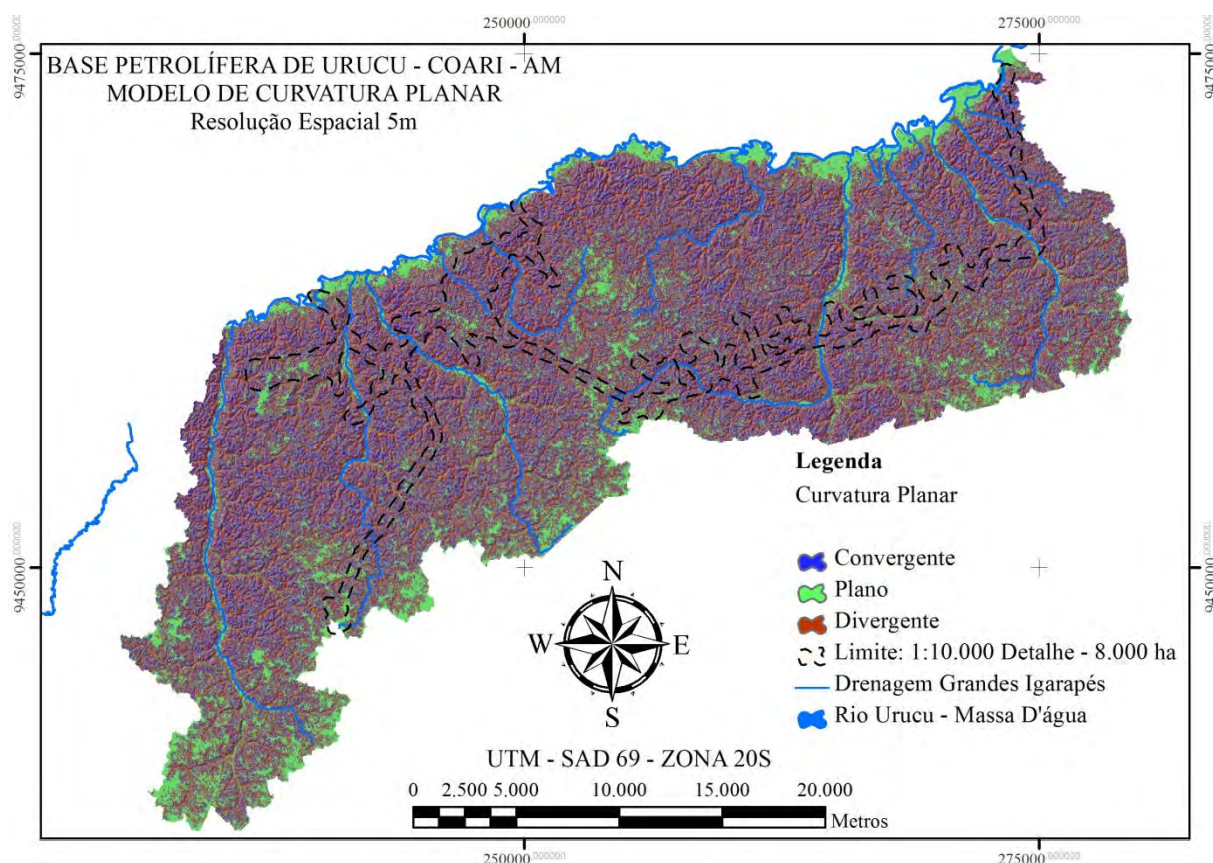


Figura 29: Modelo de Curvatura Planar.

De forma semelhante ao modelo de curvatura planar, é apresentado o modelo de curvatura em perfil (Figura 30), que pode ser associado, de maneira análoga, às mesmas unidades de mapeamento. Porém, a curvatura em perfil permitiu maior poder discriminatório para os solos de topo de elevação, permitindo facilmente a distinção entre os solos bem drenados (superfícies convexas) e os ambientes imperfeitamente drenados (superfícies planas). Os vales em formato de V também são identificados com maior facilidade por meio das superfícies côncavas identificadas no modelo. Porém, os vales em formato de U, assim como no modelo planar, ocorrem em superfícies retilíneas, sendo, portanto, difícil o mapeamento pedológico utilizando apenas a variável curvatura. Os dois tipos de vale são indistintos por esses critérios.

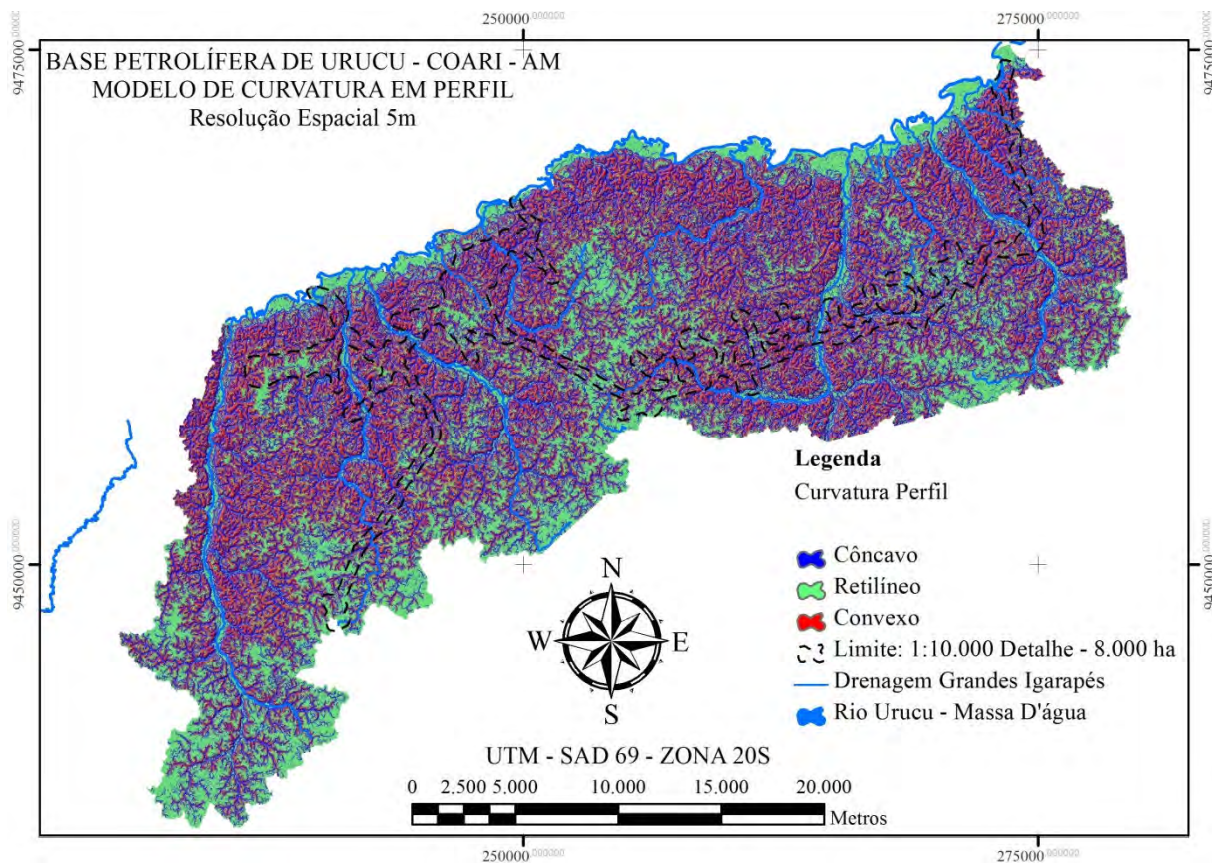


Figura 30: Modelo de Curvatura em Perfil.

A ferramenta curvatura disponível no software ArcGiS, da extensão de Análises Espaciais, na caixa de ferramentas Superfície, permite, além da criação do perfil de curvatura e o plano de curvatura, a criação de um modelo de curvatura composta (Figura 31), que associa as curvaturas em perfil e planar em um único modelo, permitindo assim a análise conjunta das curvaturas. A sobreposição dos modelos de curvatura com a carta AR permitiu boa correlação solo-relevo entre esses modelos. Assim, ambos os modelos foram utilizados como variáveis preditoras das UM's por funções discriminantes e classificação em árvore.

Os solos que apresentaram relação mais evidente com os modelos de curvatura foram os hidromórficos e os de topo de elevação bem drenados (PA), sendo os primeiros associados às superfícies convergentes e côncavas nos ambientes de vales em formato de V, e as superfícies planares e retilíneas, associadas aos vales em formato de U (GXvd e ESKg) e cabeceiras hidrogenéticas das bacias (PAC).

Solos vermelhos e vermelho-amarelos, associados às vertentes mais declivosas, não apresentaram clara relação visual com os modelos de curvatura, porém análises estatísticas multivariadas foram aplicadas a todas as variáveis buscando os melhores preditores para as UM's.

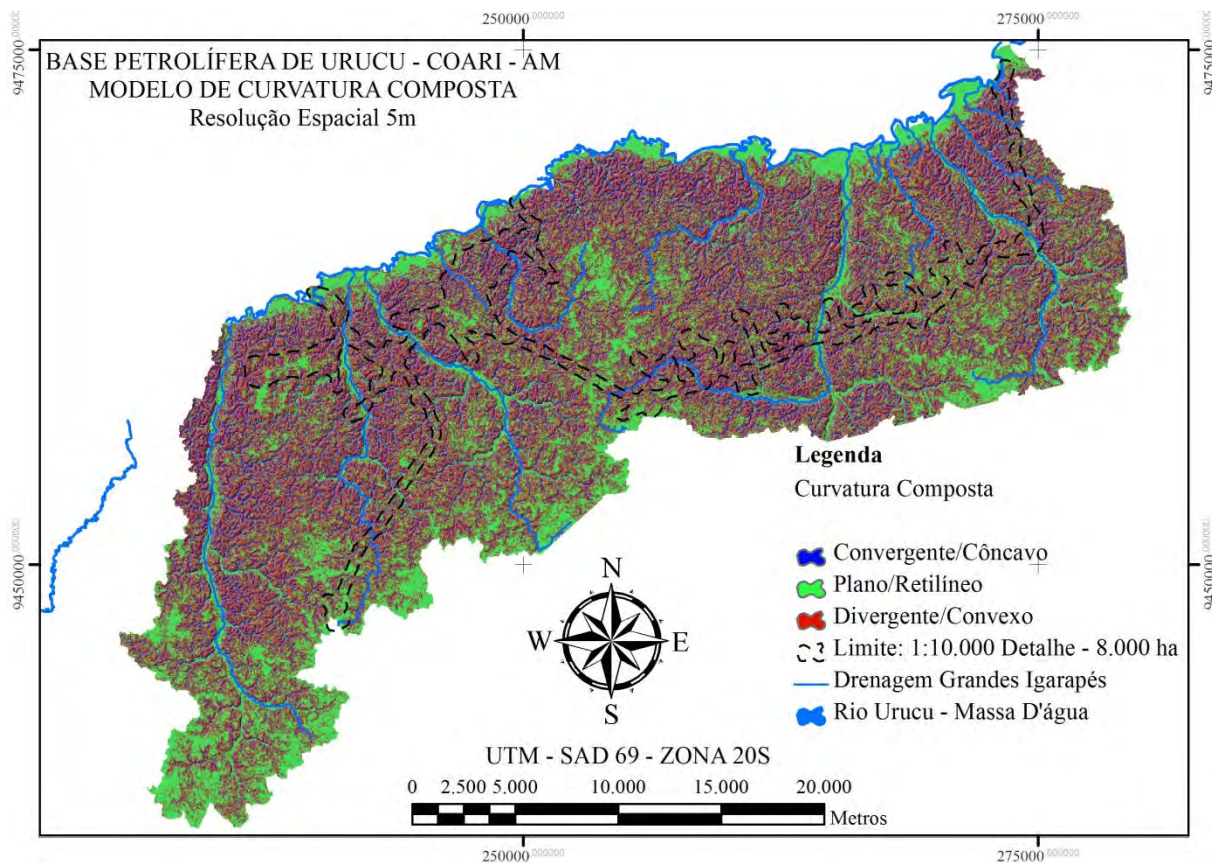


Figura 31: Modelo de Curvatura Composta.

c) Faces de Exposição

As faces de exposição do terreno (aspecto) indicam a orientação das faces do terreno em relação aos pontos cardeais e permitem analisar, entre outros, a quantidade de horas de luz solar incidente, e exposição a ventos predominantes. Esses fatores influenciam a evapotranspiração e o decorrente balanço hídrico (VALERIANO, 2003). A orientação da face de exposição pode influenciar indiretamente o atributo cor do solo em função da dinâmica de umedecimento e secagem do solo.

Não foram observadas correlações visuais significativas entre as faces de exposição (Figura 32) e as UM's consideradas neste trabalho. A mesma consideração é válida para a variável direção de fluxo, que considera os fluxos superficiais de forma conjunta com as faces de exposição. Dada a grande semelhança entre estes dois modelos, o segundo foi suprimido de apresentação neste trabalho, embora ambos tenham sido utilizados nas análises multivariadas. Em análises exploratórias, foram encontradas correlações positivas entre aspecto, direção de fluxo e os atributos cor do solo e teor de silte no horizonte B dos solos da área de estudo.

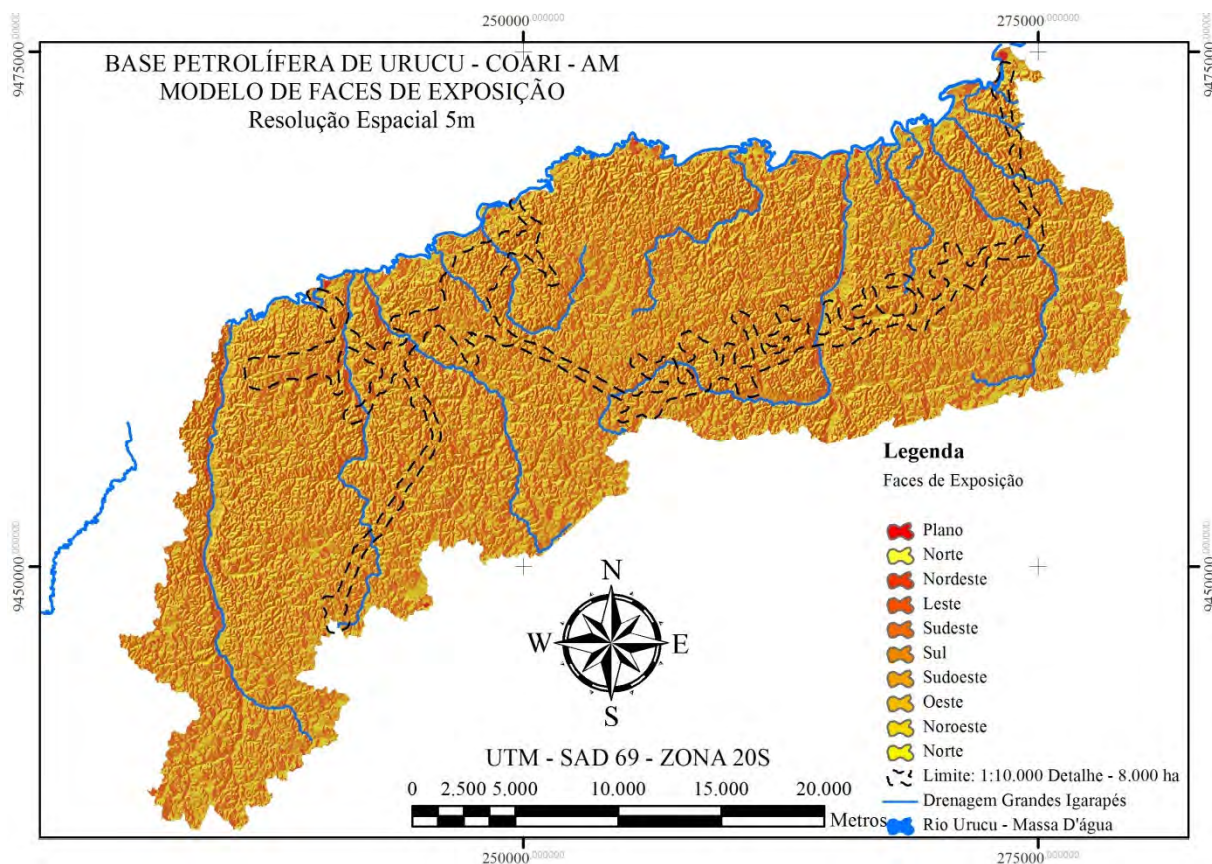


Figura 32: Modelo de Faces de Exposição.

3.10.2 Hidroformas

a) Modelo de Fluxo Acumulado

Para Daniels e Hammer (1992), dentre os processos sobre as vertentes, o que mais afeta as propriedades do solo é a quantidade, fluxo e distribuição sazonal da água. Esses autores afirmam que os fluxos de água, superficial e subsuperficial, ao longo da vertente, são os principais geradores de variabilidade espacial dos solos. Nesse sentido, havendo mudança de fluxos, as propriedades dos solos mudam e, por consequência as respectivas classes de solos.

O modelo de fluxo acumulado (Figura 33) permitiu boa correlação visual dos fundos de vales em formato de V e os topos de elevação dissecados que ocorrem ao longo da área de estudo. Por outro lado, não permite boa identificação dos fundos de vale em formato U, nem dos topos imperfeitamente drenados, sendo necessária a combinação com outras variáveis.

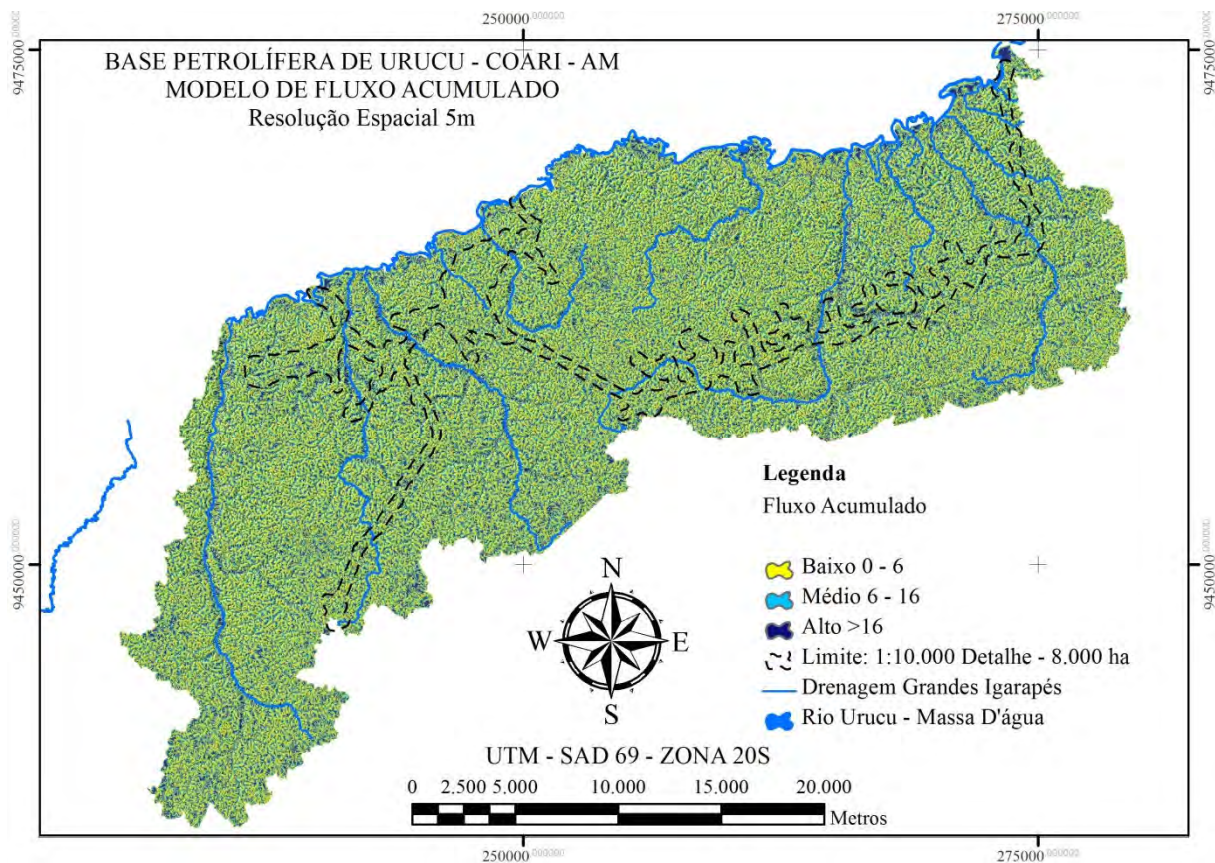


Figura 33: Modelo de Fluxo Acumulado.

b) Índice topográfico de umidade

O índice topográfico de umidade (ITU) ou índice topográfico combinado ou índice de umidade é definido como uma função da declividade e da área de contribuição, por unidade de largura ortogonal à direção do fluxo (CHAGAS, 2006). É usado para caracterizar a distribuição espacial de zonas de saturação superficial e conteúdo de água nas paisagens, demonstrando os efeitos do relevo na localização e tamanho das áreas de acumulação de água. Esse índice foi desenvolvido para o estudo de catenas em áreas declivosas, já que, em áreas planas, os valores de acumulação serão sempre muito elevados e, neste caso, o índice não será uma variável confiável. Moore et al. (1993) verificaram, em estudo realizado em uma topossequência no Colorado, que o ITU correlacionou-se altamente com muitos dos atributos dos solos medidos, tais como espessura do horizonte A, pH, teor de matéria orgânica, teor de fósforo extraível e teor de silte e areia.

O ITU é obtido conforme apresentado na equação abaixo:

Equação 4:

$$ITC = \ln (A_s) \tan \beta$$

onde A_s é a área de contribuição (fluxo acumulado + 1) * tamanho da célula do grid em m^2 e β é a declividade expressa em radianos.

Esse índice prevê saturação quando a área de contribuição é grande, geralmente em segmentos convergentes de paisagens, onde o ângulo de inclinação é pequeno, predominantemente na base de vertentes côncavas, com variação da transmissividade do solo pequena em solos não muito profundos. Assim, com sua aplicação, obtêm-se zonas de

concentração de água na paisagem (WILSON e GALLANT, 2000). O índice representa também o aparecimento potencial de caminhos preferenciais da água devido aos gradientes de umidade no perfil do solo (MENDIONDO et al., 1998).

No Brasil, sua aplicação na identificação de unidades de solos já foi realizada por Chagas (2006), Sirtoli (2008), Sirtoli et al. (2008b) e Cáten et al. (2009).

Na carta ITU obtida (Figura 34), os intervalos de classes foram arbitrados com base nas características topográficas locais, apresentando, assim, subjetividade de separação, uma vez que os valores obtidos são índices adimensionais. Para efeito de apresentação, utilizou-se então as regiões bem drenadas (amarelo), com baixo ITU; as regiões imperfeitamente drenadas (ciano), com moderado ITU; e por fim, as zonas permanentemente estagnadas (azul), com alto ITU.

A elaboração do ITU permite forte correlação entre as classes de índice médio e alto e os solos hidromórficos, sendo necessária a combinação de variáveis para a separação dos fundos de vales (CX+GX+SX) e as zonas hidrogenéticas que ocorrem nas cabeceiras das bacias hidrográficas da área (PAC). Por outro lado, as regiões de baixo índice topográfico são fortemente correlacionadas com os solos bem drenados de topo de elevação (PA) e os solos de encostas (PVA e PV). De forma análoga às regiões imperfeitamente drenadas, são necessárias combinações de variáveis (análise multivariada ou regras de classificação) para a correta separação destes ambientes.

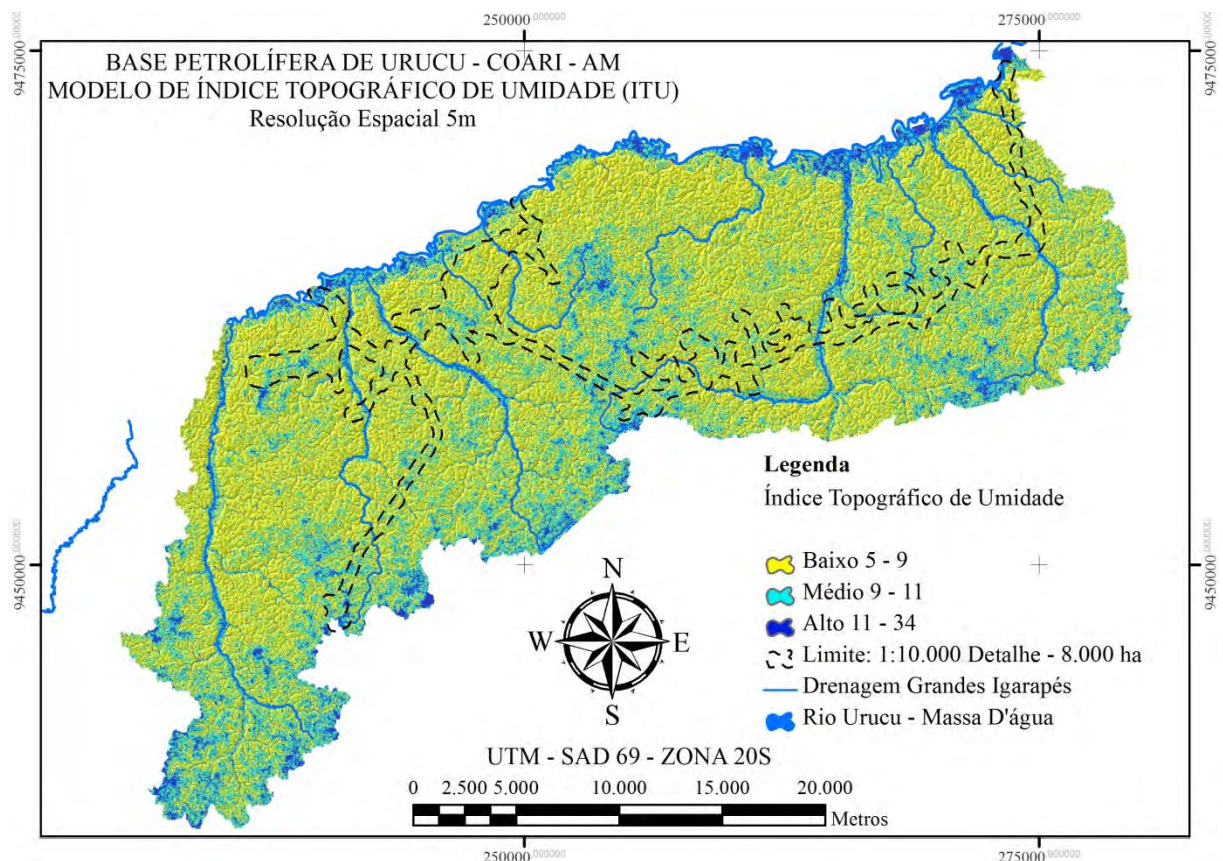


Figura 34: Índice topográfico de umidade.

c) Comprimento de drenagem
Drenagem à montante

A carta de drenagem à montante (Figura 35) é produto do cálculo do comprimento da rede de drenagem à montante de cada pixel do modelo. A título de exemplo, uma célula situada em um fundo de vale, terá sempre longo comprimento de rede de drenagem a sua montante. Já uma célula situada no ponto mais alto de uma elevação terá comprimento de drenagem de valor zero (curto). Assim como outras variáveis já apresentadas, representa muito bem as relações entre o solo e a paisagem que ocorrem na área. Essa variável permite, embora com certo nível de “ruído” ou efeito “sal e pimenta”, a distinção entre os ambientes de topo de elevação, encostas e vales em formato de V.

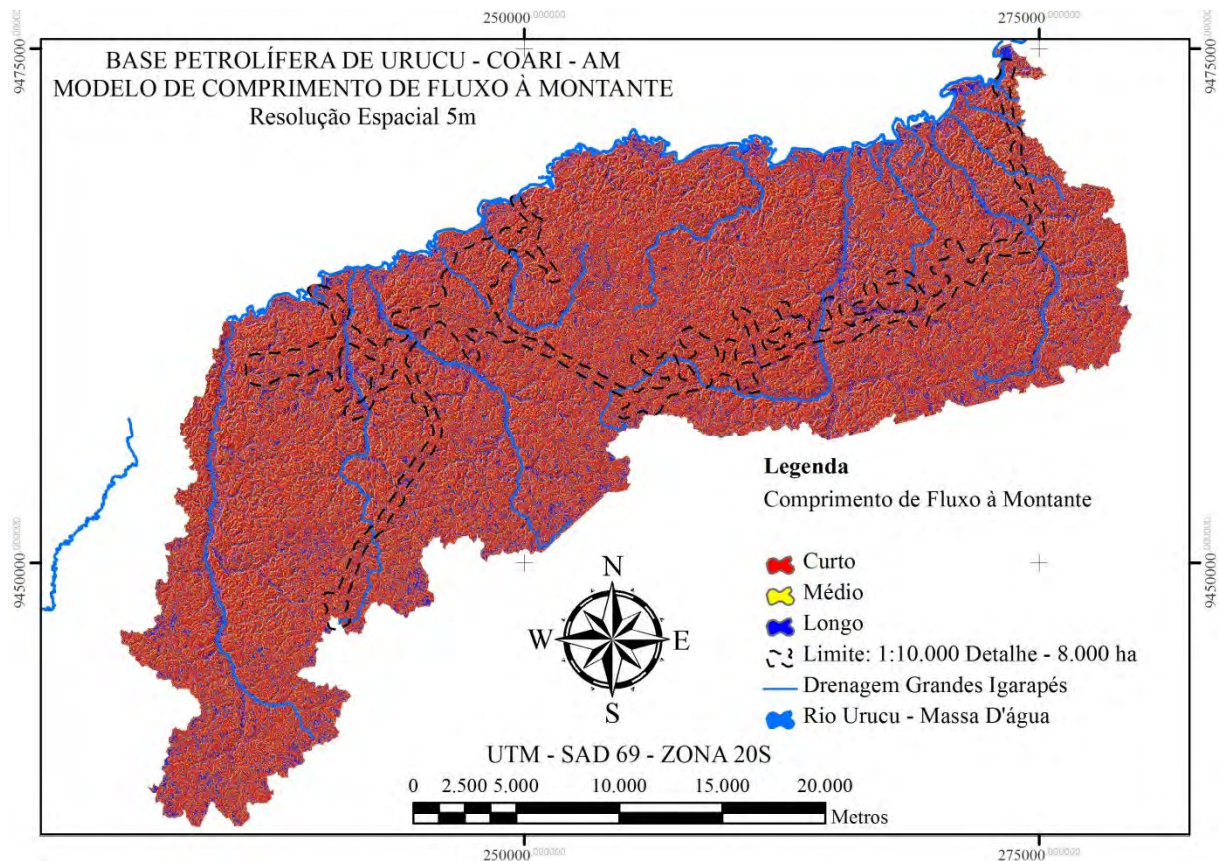


Figura 35: Comprimento de drenagem à montante.

Drenagem à jusante

A variável Comprimento de Drenagem à jusante (Figura 36) é o resultado do processamento computacional, do comprimento da rede de drenagem, a partir de cada célula do modelo até o exutório natural da bacia hidrográfica que a contém. Essa variável é frequentemente utilizada para o cálculo do tempo de concentração em bacias hidrográficas. Assim, a célula de maior cota e maior distância do exutório da bacia apresentará o comprimento mais longo desta bacia. Essa variável foi tão importante para o mapeamento digital dos solos da área de estudo, que condicionou o traçado dos limites da área mapeada, às bacias hidrográficas, com rede de drenagem conectada, orientada e ligada aos respectivos exutórios.

Mesmo sabendo que o ITU permite a identificação de áreas com drenagem impedida, tal variável não permite boa separação entre os solos de fundo de vale e de topos de elevação. As regiões de recarga ou zonas hidrogenéticas das bacias foram identificadas neste modelo, o que permitiu a delimitação das zonas de ocorrência dos PAC's. Das 11 variáveis utilizadas para o estabelecimento das relações solo-paisagem, o comprimento de fluxo à jusante foi a

terceira mais importante preditora, em todas as análises executadas. Somente os modelos de declividade e altitude superaram este modelo em termos de poder discriminante para as UM's.

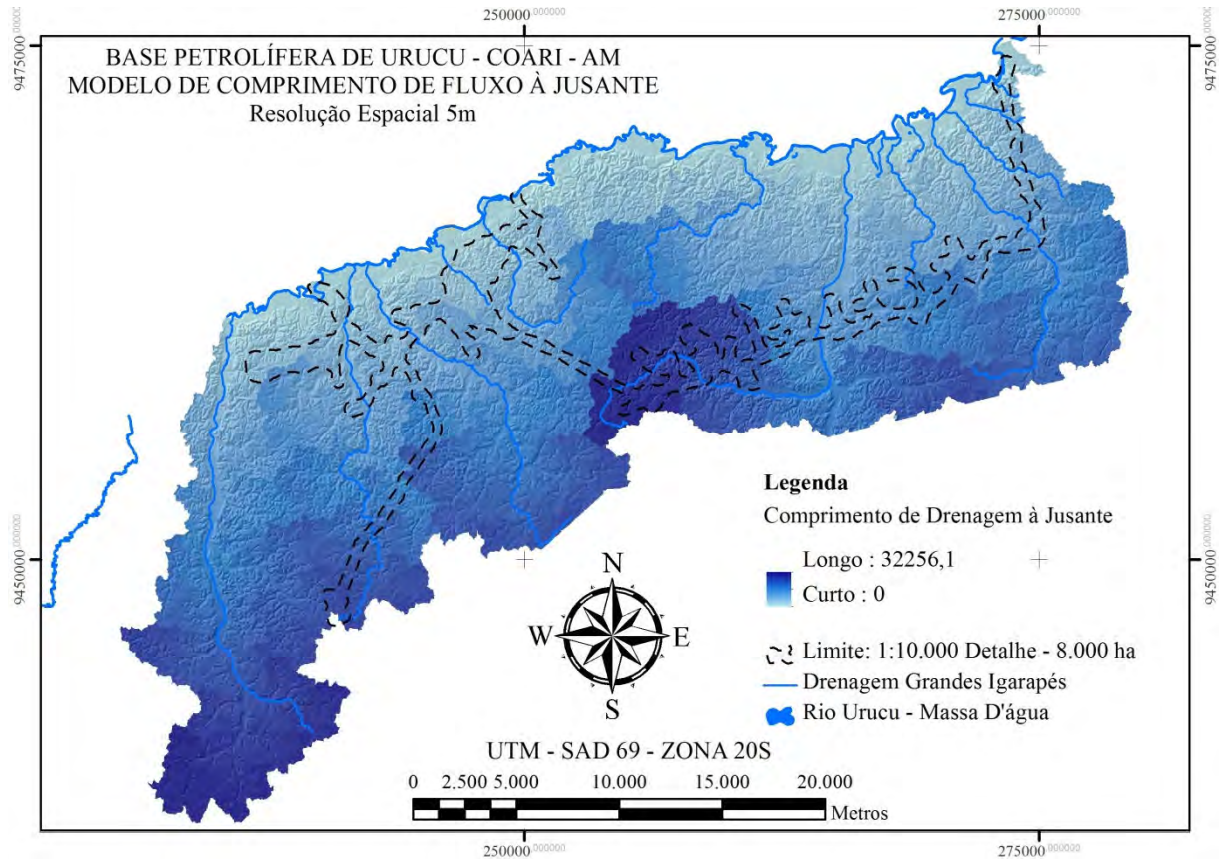


Figura 36: Comprimento de drenagem à jusante.

3.11 Mapeamento Digital de Solos por Técnicas de Área de Referência

As técnicas de mapeamento digital de solos (MDS) testadas, utilizaram funções discriminantes lineares (FDL) e diferenciam-se basicamente quanto ao método de obtenção dos pontos de treinamento dos modelos (Figura 37). Sob os pontos de treinamento, foram extraídos os valores dos atributos do relevo que permitiram a predição das UM's.

O primeiro método de mapeamento digital, aqui denominado de MDS 1, consistiu em o pedólogo conhecedor da área escolher pontos de treinamento para o modelo. Baseado no seu conhecimento da relação entre superfície topográfica e solos (modelo mental), alocou pontos na carta planialtimétrica, que estariam associados a cada uma das 4 unidades de mapeamento. Em seguida, sob estes pontos, extraíram-se valores dos atributos do relevo a serem avaliados como preditores das unidades de mapeamento.

O segundo método de mapeamento digital, aqui denominado MDS2, consistiu em extrair os mesmos atributos do relevo, no entanto a partir de 75% dos pontos observados durante as campanhas de levantamento convencional de solos (modelo baseado em observações de campo).

O terceiro método de mapeamento digital, aqui denominado MDS3, consistiu do estabelecimento de uma árvore de classificação que analisou as variáveis preditoras de acordo

com critérios estabelecidos pelo pedólogo, baseado em sobreposição de variáveis com a carta Área de Referência.

O quarto e último método de mapeamento digital utilizado, aqui denominado MDS4, consistiu no sorteio de pontos de treinamento sobre a carta Área de Referência. Sob cada ponto de treinamento foram extraídos os valores para cada variável, com posterior desenvolvimento de modelo preditor das UM's em análise.

A Figura 37 apresenta de forma esquemática os passos e técnicas utilizados para a obtenção dos principais produtos objetivados e desenvolvidos neste trabalho.

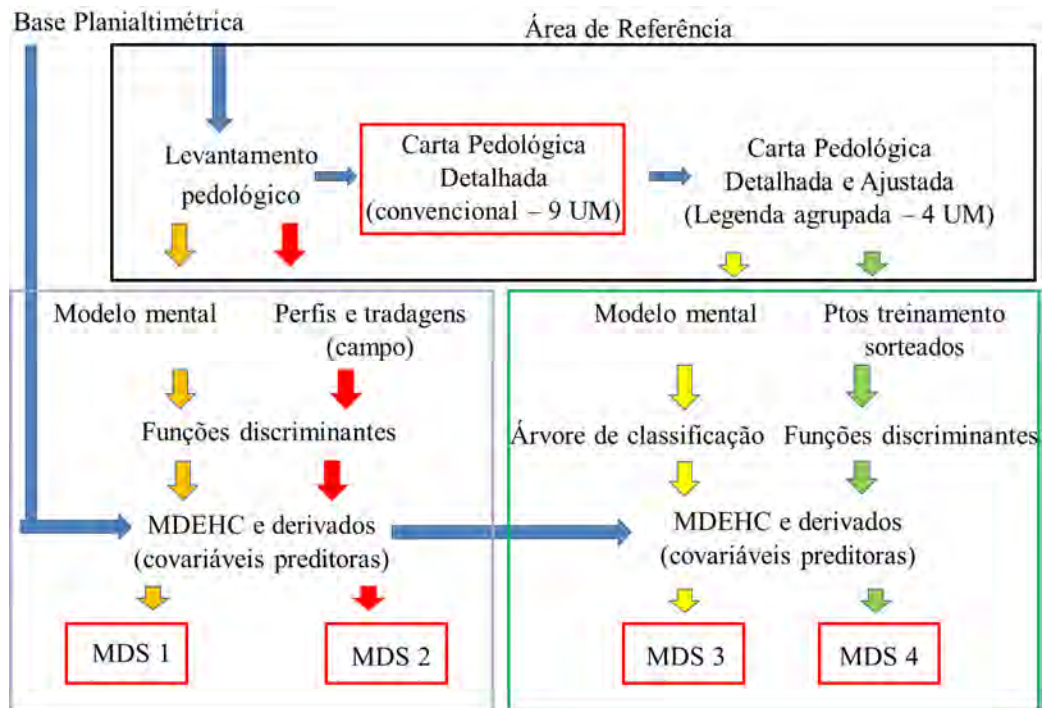


Figura 37: Fluxograma metodológico para o MDS.

Abaixo são descritos os procedimentos, ferramentas e critérios utilizados para a execução das cartas digitais de solo.

3.11.1 MDS 1: Funções discriminantes em pontos indicados pelo pedólogo

Obtenção dos pontos preditores para o MDS

No software ArcGIS (Esri), o pedólogo ativou as camadas MDEHC, curvas de nível e drenagem, e criou uma nova camada denominada “pontos especialista”. Nessa nova camada, 843 pontos (Figura 38) foram indicados ao longo da área mapeada convencionalmente. Em cada ponto escolhido, o pedólogo atribuiu a provável unidade de mapeamento esperada, segundo seu modelo conceitual, de modo que fossem capturados os padrões típicos associados a cada UM. Assim, a densidade dos pontos indicados foi de 1 ponto a cada 9,09 ha. Em cada ponto foram extraídos os valores de cada uma das 11 variáveis (Figura 25) envolvidas, com o auxílio da ferramenta Extract Multi Values to Points, da caixa de ferramentas Extraction, do módulo Spatial Analyst tools, do software ArcGIS. A tabela contendo as coordenadas de cada ponto, sua provável UM e os valores para as variáveis geomorfométricas utilizadas foi exportada em forma de planilha eletrônica por meio da ferramenta Export Data to, da caixa de ferramentas Table Operations do módulo XTools Pro, do software ArcGIS 9.3.

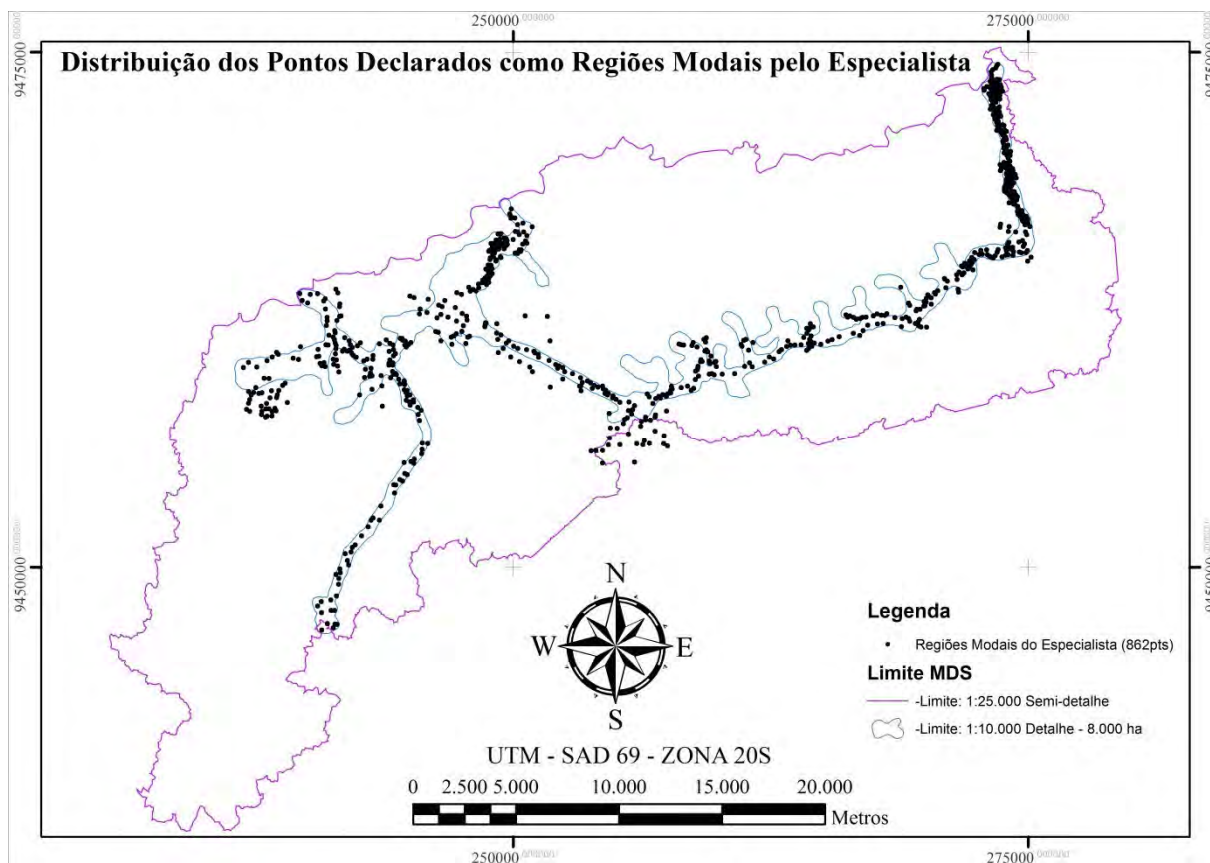


Figura 38: Disposição e densidade do grid indicado pelo pedólogo.

Seleção de Covariáveis Predictoras

O banco de dados, contendo o número da observação, nome da UM identificada e os respectivos valores de atributos do relevo foi analisado no programa The SAS System, utilizando o módulo StepDisc, com o método Stepwise. Os parâmetros do teste são apresentados na Tabela 3. Em um nível de significância de 5% e buscando discriminar 4 unidades de mapeamento, foram selecionadas as variáveis com maior poder discriminante, (Tabela 4).

Tabela 3: Parâmetros do teste Stepdisc para a seleção de variáveis

| O método de seleção de variáveis é STEPWISE | | | |
|---|-----|------------------------------------|------|
| Observações | 843 | Variável (s) na análise | 11 |
| Níveis de Classe | 4 | Variável (s) será incluído | 0 |
| | | Nível de significância para entrar | 0,05 |
| | | Nível de significância para ficar | 0,05 |

Tabela 4: Resumo do teste Stepdisc para a seleção de variáveis

| Covariável | Parcial R-Square | Valor F | Pr> F | Wilks ' Lambda | Pr < Lambda | Méd. Squar. Canonic.Corr. | Pr> ASCC |
|-----------------|---------------------|----------|--------|-------------------|----------------|------------------------------|-------------|
| Declividade | 0,7958 | 1.090,06 | <.0001 | 0.20417688 | <.0001 | 0.26527437 | <.0001 |
| Altitude | 0,6398 | 496,18 | <.0001 | 0.07354249 | <.0001 | 0.47723005 | <.0001 |
| Comp.Dren.Juz. | 0,4852 | 262,97 | <.0001 | 0.03785895 | <.0001 | 0.63727121 | <.0001 |
| ITU | 0,1069 | 33,35 | <.0001 | 0.03381226 | <.0001 | 0.65245819 | <.0001 |
| Curvatura | 0,0377 | 10,91 | <.0001 | 0.03253675 | <.0001 | 0.65771246 | <.0001 |
| Comp.Dren.Mont. | 0,0299 | 8,58 | <.0001 | 0.03156229 | <.0001 | 0.65996950 | <.0001 |
| FluxoAcumulado | 0,0761 | 22,88 | <.0001 | 0.02915907 | <.0001 | 0.66625024 | <.0001 |
| CurvaturaPerfil | 0,0186 | 5,26 | 0,0013 | 0.02861612 | <.0001 | 0.66748396 | <.0001 |

Desenvolvimento do Classificador Estatístico

O classificador estatístico foi desenvolvido utilizando-se a análise discriminante que, segundo KHATTREE & NAIK (2000), é uma técnica da estatística multivariada que estuda a separação de objetos de uma população em duas ou mais classes.

As funções discriminantes foram obtidas com base em um modelo multivariado com pressuposição de normalidade das populações. A probabilidade a *posteriori* (isto é, a probabilidade condicional de que, dado que o objeto X seja conhecido, o mesmo pertença a classe i) foi estimada por meio da função discriminante, conforme mostrado a seguir:

Equação 5

$$D_i^2(X) = -\frac{1}{2} \ln |S_i| - \frac{1}{2} (X - \bar{X}_i)' S_i^{-1} (X - \bar{X}_i) + 2 \ln p_i$$

em que,

- $D_i^2(X)$ = probabilidade condicional de que, dado que o objeto X ser conhecido, o mesmo pertença à classe i;
- X = vetor de características do objeto a ser classificado;
- \bar{X}_i = estimativa do vetor de médias da classe i;
- S_i = estimativa da matriz de covariância da classe i;
- p_i = probabilidade a *priori* de ocorrência da classe i.

No programa The SAS System, através do módulo ProcDiscrim, foram geradas quatro funções discriminantes, sendo uma para cada UM, e assumiu-se uma probabilidade a *priori* igual para as observações de cada classe, sendo o vetor desconhecido alocado na classe que apresentou o maior valor de $D_i^2(X)$.

Através de teste de homogeneidade de matrizes de covariância (qui-quadrado) para as UM's, que indicou igualdade das matrizes, com significância ao nível de 10%, optou-se pela utilização da matriz comum de covariância sendo, portanto, adotadas funções discriminantes lineares (FDL), que são menos complexas e mais robustas que as quadráticas. As funções discriminantes quadráticas utilizam matrizes individuais para cada UM (VARELLA, 2004).

O desenvolvimento das FDL's foi efetuado utilizando-se os 843 pontos indicados pelo pedólogo. Imediatamente após o desenvolvimento da FDL, o programa classifica esta mesma população (de treinamento) e apresenta uma matriz de confusão preliminar (poder discriminante).

3.11.2 MDS 2: Funções discriminantes em pontos de observação de solo

Obtenção dos pontos preditores para o MDS

Nesse método, utilizou-se a população de observações de campo, com 382 pontos (perfis completos, incompletos e tradagens) obtidos durante o levantamento convencional (Figura 39). Deste total, 288 pontos (75%) foram sorteados para treinamento da FDL e 96 pontos (25%) foram separados para posterior validação das cartas digitais de solo (amostras de teste).

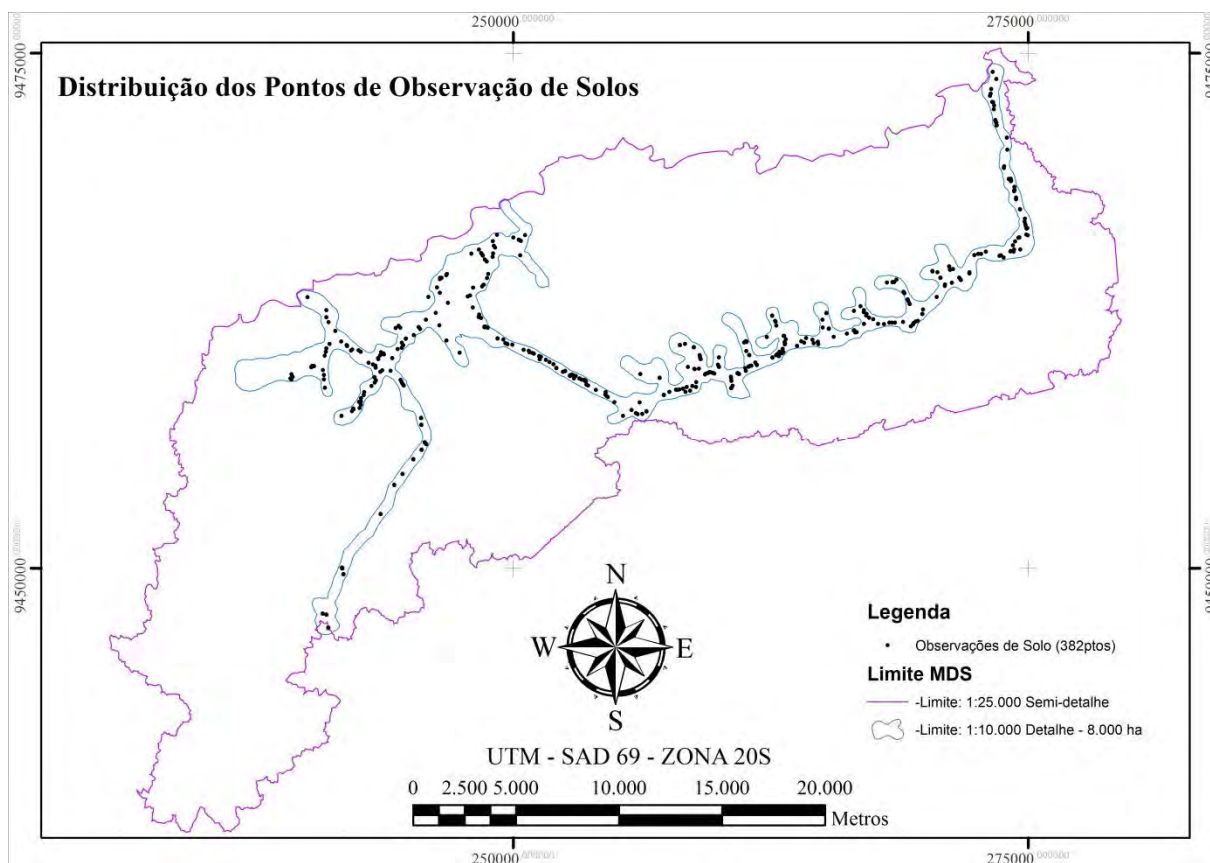


Figura 39: Disposição e densidade do grid de observação de classes no campo.

Seleção de Covariáveis Preditoras

O banco de dados, contendo o número da observação, nome da UM identificada e os respectivos valores de atributos do relevo, foi analisado no programa The SAS System, utilizando o módulo StepDisc, com o método Stepwise. Os parâmetros do teste são apresentados na Tabela 5. Em um nível de significância de 5% e buscando discriminar 4 unidades de mapeamento, foram selecionadas as variáveis com maior poder discriminante, (Tabela 6).

Tabela 5: Parâmetros do teste Stepdisc para a seleção de variáveis

| O método de seleção de variáveis é STEPWISE | | | |
|---|-----|------------------------------------|------|
| Observações | 288 | Variável (s) na Análise | 11 |
| Níveis de Classe | 4 | Variável (s) será incluído | 0 |
| | | Nível de significância para Entrar | 0.05 |
| | | Nível de significância para ficar | 0.05 |

Tabela 6: Resumo do teste Stepdisc para a seleção de variáveis

| Covariável | Parcial R-Square | Valor F | Pr> F | Wilks ' Lambda | Pr < Lambda | Méd. Squar. Canonic.Corr. | Pr> ASCC |
|--------------------|---------------------|---------|---------|-------------------|----------------|------------------------------|-------------|
| Declividade | 0,6893 | 210,02 | <0,0001 | 0.31069905 | <0,0001 | 0.22976698 | <0,0001 |
| Altitude | 0,4821 | 87,82 | <0,0001 | 0.16090535 | <0,0001 | 0.38812939 | <0,0001 |
| Comp.Dren.Jusante | 0,2308 | 28.21 | <0,0001 | 0.12376460 | <0,0001 | 0.46265540 | <0,0001 |
| ITU | 0,0972 | 10.08 | <0,0001 | 0.11173932 | <0,0001 | 0.48283706 | <0,0001 |
| Comp.Dren.Montante | 0,0407 | 3.96 | 0,0086 | 0.10718935 | <0,0001 | 0.49266213 | <0,0001 |

Desenvolvimento do Classificador Estatístico

O classificador estatístico foi desenvolvido por método idêntico ao descrito e utilizado no MDS1.

3.11.3 MDS 3: Árvores de decisão em carta área de referência

Foram analisados os padrões geomórfico-pedológicos da carta utilizada como AR e todos os planos de informação disponíveis (covariáveis preditoras) e estes foram comparados às unidades de mapeamento da AR. Para que fosse possível a comparação, foram analisadas as curvas de distribuição de frequência dos parâmetros morfométricos. Essa análise, baseada em análise estatística univariada e comparativa com a carta AR, permitiu o conhecimento de quais covariáveis disponíveis, suas combinações e intervalos de classes poderiam descrever cada UM. A escolha dos intervalos entre as classes foi feita de modo arbitrário, semelhante aos critérios de Valeriano e Carvalho Júnior (2003), que determinaram com base na apreciação visual dos mapas resultantes, de modo que a distribuição territorial das classes apresentasse um indicador diferenciado entre os tipos de relevo descritos (Figura 25) e a análise das Tabelas 7 a 11.

Tabela 7: Análise estatística simples das observações de campo

| Estatística univariada - Observações de campo | | | | |
|---|-----|----------|-----------|-----------|
| Variável | N | Média | Variância | Desv.Pad. |
| Altitude | 384 | 67,20869 | 43,78599 | 6,6171 |
| DirecFlux | 384 | 33,16406 | 1720 | 41,4684 |
| FluxAcum | 384 | 293,9766 | 10129569 | 3183 |
| CompMon | 384 | 59,11652 | 27287 | 1.651.865 |
| CompJuz | 384 | 11571 | 51596418 | 7183 |
| ITU | 384 | 8,39557 | 3,09912 | 1,7604 |
| DeclivGr | 384 | 3,67901 | 10,49504 | 3,2396 |
| Curvatura | 384 | 0,03298 | 0,18699 | 0,4324 |
| CurvPlan | 384 | 0,03917 | 0,02674 | 0,1635 |
| CurvPerf | 384 | 0,00619 | 0,12523 | 0,3539 |
| Aspecto | 384 | 175,4438 | 11444 | 1.069.761 |

Tabela 8: Análise estatística simples nas observações da UM1

| Estatística univariada - UM1 | | | | |
|------------------------------|----|----------|-----------|-----------|
| Variável | N | Média | Variância | Desv.Pad. |
| Altitude | 62 | 60,1241 | 54,27841 | 7,3674 |
| DirecFlux | 62 | 35,98387 | 1671 | 40,8807 |
| FluxAcum | 62 | 1740 | 61029301 | 7812 |
| CompMon | 62 | 162,4256 | 148706 | 3.856.246 |
| CompJuz | 62 | 11706 | 55034855 | 7419 |
| ITU | 62 | 10,10111 | 5,37995 | 2,3195 |
| DeclivGr | 62 | 1,58781 | 1,4476 | 1,2032 |
| Curvatura | 62 | -0,28659 | 0,21309 | 0,4616 |
| CurvPlan | 62 | -0,0443 | 0,0192 | 0,1386 |
| CurvPerf | 62 | 0,24229 | 0,1528 | 0,3909 |
| Aspecto | 62 | 177,0595 | 13127 | 1.145.735 |

Tabela 9: Análise estatística simples nas observações da UM2

| Estatística univariada - UM2 | | | | |
|------------------------------|-----|----------|-----------|-----------|
| Variável | N | Média | Variância | Desv.Pad. |
| Altitude | 151 | 65,35635 | 25,01009 | 5,001 |
| DirecFlux | 151 | 32,29801 | 1805 | 42,4826 |
| FluxAcum | 151 | 23,15232 | 12690 | 1126502 |
| CompMon | 151 | 49,90168 | 2072 | 46 |
| CompJuz | 151 | 9720 | 39008090 | 6246 |
| ITU | 151 | 7,46719 | 1,39625 | 1,1816 |
| DeclivGr | 151 | 6,88941 | 7,71526 | 2,7776 |
| Curvatura | 151 | 0,04954 | 0,27912 | 0,5283 |
| CurvPlan | 151 | 0,06684 | 0,04421 | 0,2103 |
| CurvPerf | 151 | 0,01731 | 0,19241 | 0,4386 |
| Aspecto | 151 | 168,9406 | 10994 | 1.048.516 |

Tabela 10: Análise estatística simples nas observações da UM3

| Estatística univariada - UM3 | | | | |
|------------------------------|-----|----------|-----------|-----------|
| Variável | N | Média | Variância | Desv.Pad. |
| Altitude | 128 | 69,74169 | 10,7872 | 3,2844 |
| DirecFlux | 128 | 35,45313 | 1883 | 43,3963 |
| FluxAcum | 128 | 5,75 | 72,01575 | 8,4862 |
| CompMon | 128 | 28,48294 | 1210 | 35 |
| CompJuz | 128 | 9979 | 26781279 | 5175 |
| ITU | 128 | 8,32083 | 1,55615 | 1,2475 |
| DeclivGr | 128 | 1,85156 | 1,21942 | 1,1043 |
| Curvatura | 128 | 0,15876 | 0,06033 | 0,2456 |
| CurvPlan | 128 | 0,05234 | 0,01334 | 0,1155 |
| CurvPerf | 128 | -0,10641 | 0,03399 | 0,1844 |
| Aspecto | 128 | 175,0079 | 11190 | 1.057.834 |

Tabela 11: Análise estatística simples nas observações da UM4

| Estatística univariada - UM4 | | | | |
|------------------------------|----|----------|-----------|-----------|
| Variável | N | Média | Variância | Desv.Pad. |
| Altitude | 43 | 76,38831 | 6,25991 | 2,502 |
| DirecFlux | 43 | 25,32558 | 1021 | 31,9477 |
| FluxAcum | 43 | 17,44186 | 5109 | 71,4794 |
| CompMon | 43 | 33,70664 | 2207 | 47 |
| CompJuz | 43 | 22614 | 25376044 | 5037 |
| ITU | 43 | 9,41902 | 2,273 | 1,5076 |
| DeclivGr | 43 | 0,86034 | 0,5381 | 0,7336 |
| Curvatura | 43 | 0,06123 | 0,01561 | 0,1249 |
| CurvPlan | 43 | 0,02311 | 0,00391 | 0,0625 |
| CurvPerf | 43 | -0,03811 | 0,00675 | 0,0821 |
| Aspecto | 43 | 197,2489 | 11548 | 1.074.610 |

Foi então desenvolvido um algoritmo capaz de classificar os pixels da área em uma das quatro unidades de mapeamento consideradas. A expressão matemática algébrica de mapas foi implementada no Software ArcGIS 9.3 (Esri) com a extensão Spatial Analyst através da ferramenta Raster Calculation, da caixa de ferramentas Map Algebra. O algoritmo desenvolvido funciona por relação condicional, onde as unidades de mapeamento foram analisadas de forma sequencial e excludente. A ordem das UM's e seus respectivos parâmetros de classificação é declarada abaixo:

- 1° UM2 Encostas Critérios: Declividades > 3,5°;
- 2° UM1a Vales V Critérios: Curvaturas < -0.052253907;
- 3° UM1b Vales U Critérios: Declividades < 1,7° e Altitudes < 60m;
- 4° UM4 Topos mal drenados Critérios: Distância de drenagem a jusante > 1.500m e ITU > 8;
- 5° UM3 Topos bem drenados Critérios: Todos os pixels restantes.

Como se pode observar, a unidade de mapeamento correspondente aos vales foi mapeada em duas etapas, uma vez que compreendem ambientes geomórficos muito distintos. Após esta etapa de classificação, os “vales em formato de V e vales em formato de U” foram unificados na unidade de mapeamento correspondente aos vales, por meio da ferramenta Reclassify da caixa de ferramentas Reclass, pertencente ao módulo de Análises Espaciais do software ArcGIS 9.3. Nessa metodologia, a ordem de entrada das UM's no algoritmo foi importante, sendo obtida com um número finito de tentativas, até a obtenção de resultado coerente com a AR.

O produto da árvore de classificação descrita acima foi a carta híbrida de solos onde cada pixel foi classificado em uma das 4 UM's consideradas.

3.11.4 MDS 4: Funções discriminantes em carta área de referência

Para a aplicação das FDL com técnicas de AR, inicialmente foi necessária a criação do conjunto de pontos a serem analisados por estatística multivariada. Foi utilizada então a ferramenta Create Random Points, da caixa de ferramentas Feature Class, do software ArcGIS 9.3 para o sorteio de 2.000 pontos aleatórios sobre a AR (Figura 40). Em cada ponto desta grade, foi extraído o valor do pixel de cada covariável preditora, disponível em uma tabela de

atributos. A ferramenta utilizada foi Extract Multi Values to Points, da caixa de ferramentas Extraction, do módulo Spatial Analyst, do software ArcGIS.

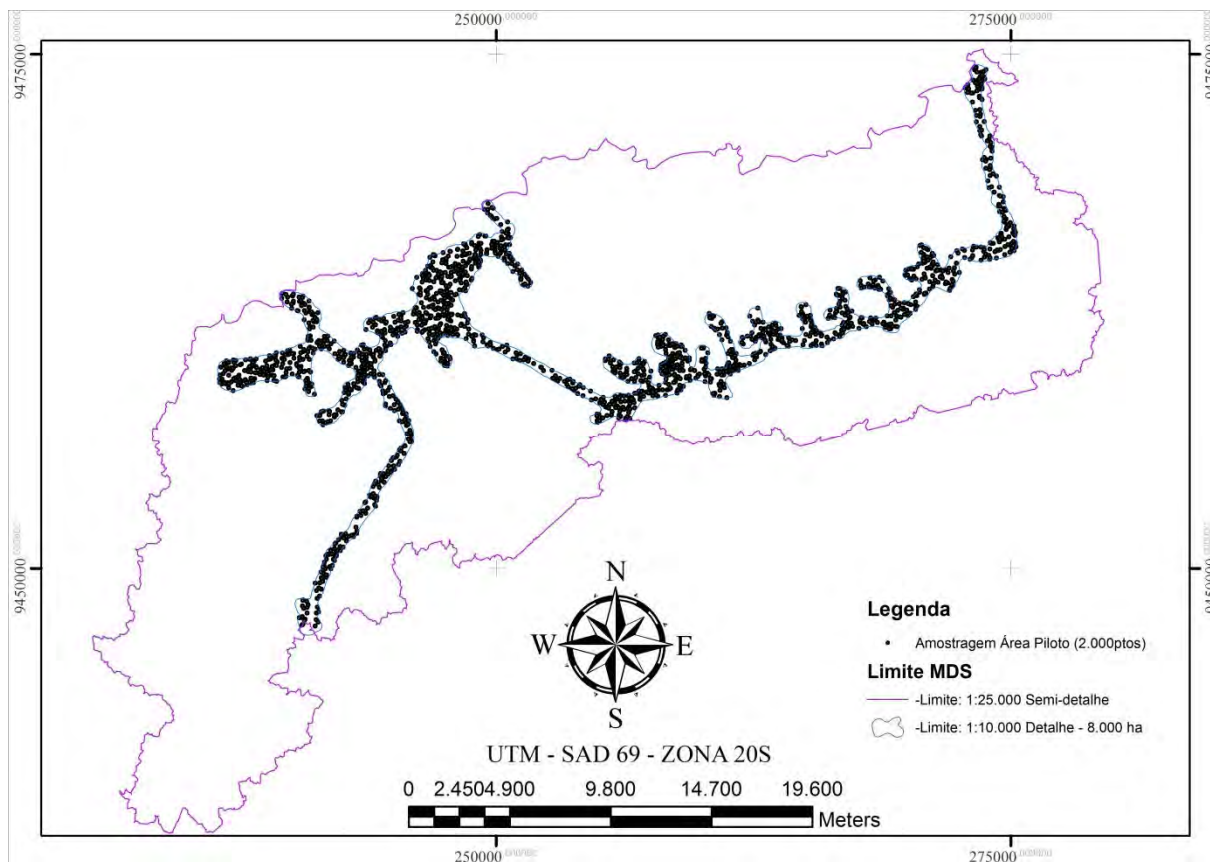


Figura 40: Conjunto de 2000 pontos sorteados e analisados sobre área de referência.

O banco de dados, contendo o número da observação, nome da UM identificada e os respectivos valores de atributos do relevo foi analisado no programa The SAS System, utilizando o módulo StepDisc, com o método Stepwise. Os parâmetros do teste são apresentados na Tabela 12. Em um nível de significância de 5% e buscando discriminar 4 unidades de mapeamento, foram selecionadas as variáveis com maior poder discriminante, (Tabela 13).

Tabela 12: Parâmetros do teste Stepdisc para a seleção de variáveis

| O método de seleção de variáveis é STEPWISE | | | |
|---|------|------------------------------------|------|
| Observações | 1978 | Variável (s) na análise | 11 |
| Níveis de Classe | 4 | Variável (s) será incluído | 0 |
| | | Nível de significância para entrar | 0,05 |
| | | Nível de significância para ficar | 0,05 |

Tabela 13: Resumo do teste Stepdisc para a seleção de variáveis

| Passo | Introduzido | Etiqueta | Parcial | Valor F | Pr> F | Wilks ' | Pr < | Méd.Squar. | Pr> |
|-------|-------------|----------|----------|---------|--------|------------|--------|-------------|--------|
| | | | R-Square | | | Lambda | Lambda | Canon.Corr. | ASCC |
| 1 | Altitude | Altitude | 0,463 | 567,25 | <.0001 | 0.53703270 | <.0001 | 0.15432243 | <.0001 |
| 2 | DeclivGr | DeclivGr | 0,3152 | 302,73 | <.0001 | 0.36775209 | <.0001 | 0.25936127 | <.0001 |
| 3 | CompJuz | CompJuz | 0,2826 | 258,97 | <.0001 | 0.26381612 | <.0001 | 0.35200930 | <.0001 |
| 4 | CurvPerf | CurvPerf | 0,0431 | 29,56 | <.0001 | 0.25245819 | <.0001 | 0.36024356 | <.0001 |
| 5 | ITU | ITU | 0,0304 | 20,57 | <.0001 | 0.24479052 | <.0001 | 0.36618543 | <.0001 |
| 6 | CurvPlan | CurvPlan | 0,0134 | 8,92 | <.0001 | 0.24150923 | <.0001 | 0.36919217 | <.0001 |

Desenvolvimento do Classificador Estatístico

O classificador estatístico foi desenvolvido por método idêntico ao descrito e utilizado no MDS1.

3.12 Geração das Cartas Digitais no SIG

Para o MDS1, MDS2 e MDS4, as FDL geradas foram implementadas no software ArcGIS 9.3 (Esri) por meio da ferramenta Raster Calculation, da caixa de ferramentas Map Algebra do módulo Spatial Analyst. Foram implementadas assim as funções discriminantes no SIG, gerando então quatro índices (probabilidades de ocorrência), sendo um para cada UM em cada MDS.

A alocação final de cada UM pixel a pixel foi implementada através da ferramenta “Highest Position” do módulo Spatial Analyst do software ArcGis 9.3. Essa ferramenta analisa um número finito de cartas em formato raster, retornando como valor final aquele cujo índice de probabilidade de ocorrência é maior. Dessa forma, cada pixel da área foi alocado na UM cujo valor foi o maior dos 4 mapas índice. O produto desta classificação foi a carta digital de solos (MDS1, MDS2 e MDS4).

O MDS3 foi obtido diretamente por meio do algoritmo de classificação em árvore implementado no programa ArcGis 9.3, por meio da ferramenta Raster Calculation, que faz parte da extensão de Análises Espaciais do programa.

Apenas para apresentação final, todas as cartas pedológicas digitais foram submetidas à passagem de filtros de maioria, que eliminam o excesso de ruídos (efeito sal e pimenta), os filtros foram aplicados em cada carta diversas vezes até que não fossem mais observadas melhorias visuais. Em média, cada carta foi submetida a 6 passadas de filtro.

Como a escala da base planialtimétrica utilizada foi grande (1:5.000), a modelagem numérica do terreno foi desenvolvida com boa resolução espacial (5m), a escala da carta AR também grande (1:10.000) e a escala final de publicação dos MDS foi pequena (menor) (1:25.000) proporcionalmente, optou-se pela não adoção de critérios cartográficos de área mínima mapeável. Essa decisão permitiu a manutenção de polígonos pequenos que seriam eliminados dos mapas, sendo porém efetivamente existentes em nível de campo. Foi, portanto, considerada satisfatória a passagem de filtro de maioria para a eliminação de regiões espúrias.

3.13 Validação das Cartas Digitais

Em função da enorme dificuldade de acesso, recursos, tempo e deslocamento para regiões distantes das áreas desmatadas, inerentes a BOGPM, não puderam ser feitas campanhas de campo específicas para a validação das cartas digitais. Assim, para cumprir esta etapa, foi reservado um conjunto de observações de solo. O método de avaliação da acurácia

das cartas pedológicas foi a utilização da matriz de confusão, que permitiu a análise de erros globais e por UM, exatidão global e índice kappa. O conjunto de pontos utilizados para a validação dessas quatro cartas corresponde a 25% das observações de solo (96 pontos), obtidas no levantamento pedológico convencional. Esses pontos não foram utilizados nos procedimentos preditores descritos neste estudo.

A construção da matriz de confusão das cartas digitais obtidas por função discriminante (MDS1, MDS2 e MDS4) se deu de maneira automática em etapa sequencial à execução do modelo preditor (função discriminante). A planilha com o conjunto de pontos de validação (25% dos dados) foi indicada separadamente da planilha de treinamento (75% dos dados). Já a construção da matriz de confusão da carta MDS3 se deu de forma manual, conforme procedimento detalhado no item revisão da literatura.

Como as funções discriminantes validam a classificação imediatamente após sua discriminação (cartas MDS1, MDS2 e MDS4), a carta MDS3 foi igualmente validada imediatamente após a sua classificação em árvore. A aplicação de filtros de maioria foi, portanto, executada após os procedimentos de validação, apenas com objetivo de melhorar a apresentação dos mapas digitais (eliminação de ruídos).

3.14 Confecção do MDS em Escala 1:50.000 para todo o Polígono da BOGPM

Visando verificar a possibilidade de expansão do modelo conceitual desenvolvido neste estudo para todo o polígono da BOGPM, foi utilizado o método que apresentou os resultados mais satisfatórios. Esse modelo foi adaptado e aplicado para a área total da área de estudos, que corresponde a aproximadamente 116.000 ha. O motivo principal deste grande polígono não ter sido utilizado como limite para a confecção das cartas MDS 1, 2 3 e 4 foi a necessidade da utilização de covariáveis preditoras dependentes de modelagem hidrologicamente consistente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Mapeamento Pedológico Convencional Detalhado

4.1.1 Unidades de mapeamento da carta pedológica convencional

No trabalho de mapeamento convencional dos solos da BOGPM, foram distinguidas 9 unidades de mapeamento (UM's), conforme Tabela 14. Dentre as nove UM's, cinco são unidades simples e quatro referem-se a complexos de solos. Os complexos encontrados refletem o quão intrincada é a distribuição espacial dos solos de algumas regiões.

Tabela 14: Unidades de mapeamento encontradas no BOGPM

| Unidade de mapeamento (UM) | Área (Km²) | Área (ha) | % |
|---|------------------------------|------------------|--------------|
| UM1 – Unidade Simples (GXvd) | 0.917 | 91.7 | 1.2 |
| UM2 - Unidade Simples (ESKg) | 0.110 | 11.0 | 0.1 |
| UM3 – Unidade Simples (CXbd) | 15.290 | 1529.0 | 19.2 |
| UM4 – Complexo (PVAal - CXal - CXbd) | 17.039 | 1703.9 | 21.4 |
| UM5 - Unidade Simples (CXal₁) | 14.917 | 1491.7 | 18.7 |
| UM6 - Complexo (CXal – PVAa) | 2.979 | 297.9 | 3.7 |
| UM7 - Complexo (CXal – PAd) | 10.731 | 1073.1 | 13.5 |
| UM8 - Complexo (PAal – PAd) | 13.949 | 1394.9 | 17.5 |
| UM9 - Unidade Simples (PACd) | 3.733 | 373.3 | 4.7 |
| Área total mapeada | 79.665 | 7966.5 | 100.0 |

Como o modelo mental utilizado para a confecção desta carta foi baseado na relação solo-paisagem, as diversas UM's ocupam regiões geomórficas específicas e, em alguns casos, como UM1 e UM2, o ambiente é o mesmo, variando apenas quanto à região hidrofórfica e/ou à bacia hidrográfica de ocorrência. Algumas UM's têm características bem semelhantes quanto ao ambiente de ocorrência e atributos físicos e morfológicos dos solos que as compõem, ficando, porém, separadas em UM's diferentes em função dos critérios do Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (EMBRAPA, 2013). Este é o caso da UM7 e UM8, UM6 e UM4, UM1 e UM2. A descrição detalhada de cada unidade de mapeamento, seus componentes, critérios de agrupamento e região de ocorrência é apresentada no item apêndice.

4.1.2 Carta pedológica convencional

A carta pedológica convencional foi elaborada e impressa em papel de grande formato (A1), na escala 1:10.000 (Figura 42) sendo portanto necessária a articulação de diversas cartas conforme indica a Figura 41.

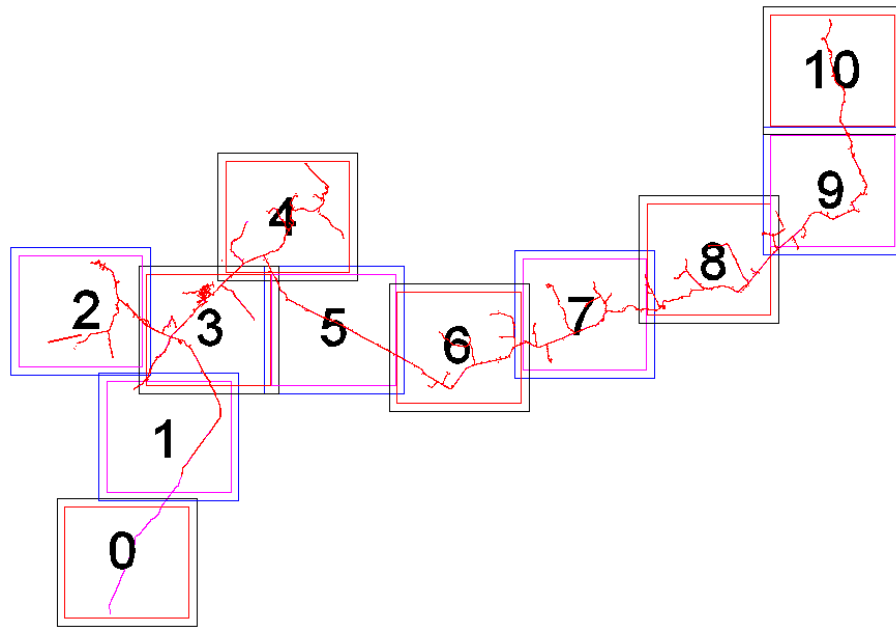


Figura 41: Articulação de impressão da carta pedológica convencional

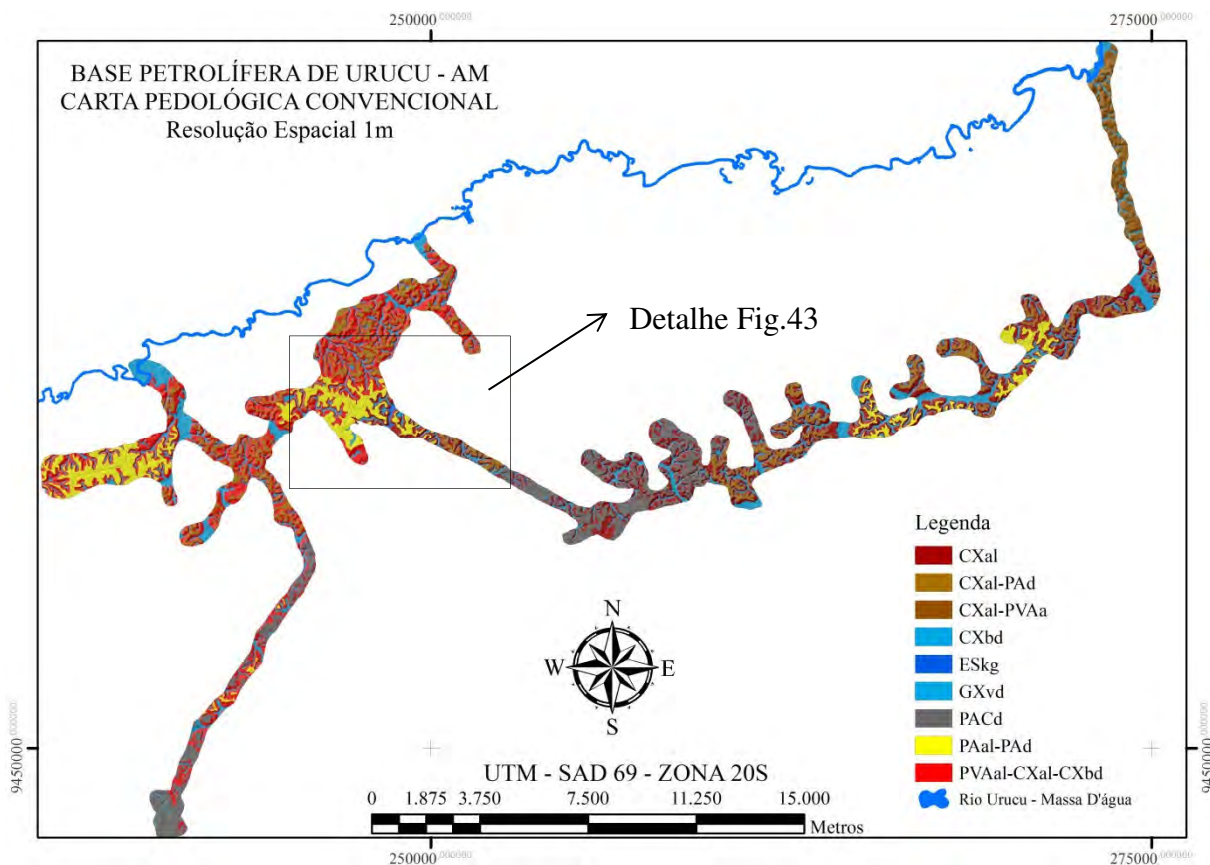


Figura 42: Carta pedológica convencional.

A escala da base cartográfica utilizada (1:5.000) permitiu boa distinção dos ambientes de ocorrência das UM's, sendo possível distinguir nitidamente 5 ambientes geomórficos bem distintos entre si, são eles: 1) grandes vales de fundo plano e em formato de U (em perfil, Figura 24), formando grandes planícies aluvio-coluvionares dos igarapés que drenam a região, onde predominam grupos distintos de solos hidromórficos e outros bem drenados quando há condições topográficas favoráveis dentro deste ambiente (ESkg e GXvd); 2) vales encaixados

em formato de V (em perfil, Figura 24), canais naturais de drenagem dos tributários dos grandes igarapés, onde ocorrem predominantemente os cambissolos hidromórficos (CXbd); 3) encostas declivosas das vertentes, com predomínio de solos avermelhados e bem drenados (PVAal+CXal+PVAa); 4) topos dissecados ou aplainados (pediplanos) com moderadas a boas condições de drenagem, onde predominam os solos de coloração amarela (PAal+PAad e CXal+PAad); e 5) topos aplainados (pediplanos) com más ou imperfeitas condições de drenagem, onde ocorrem os solos hidromórficos (PACd). A Figura 43 ilustra bem essa distinção de ambientes.

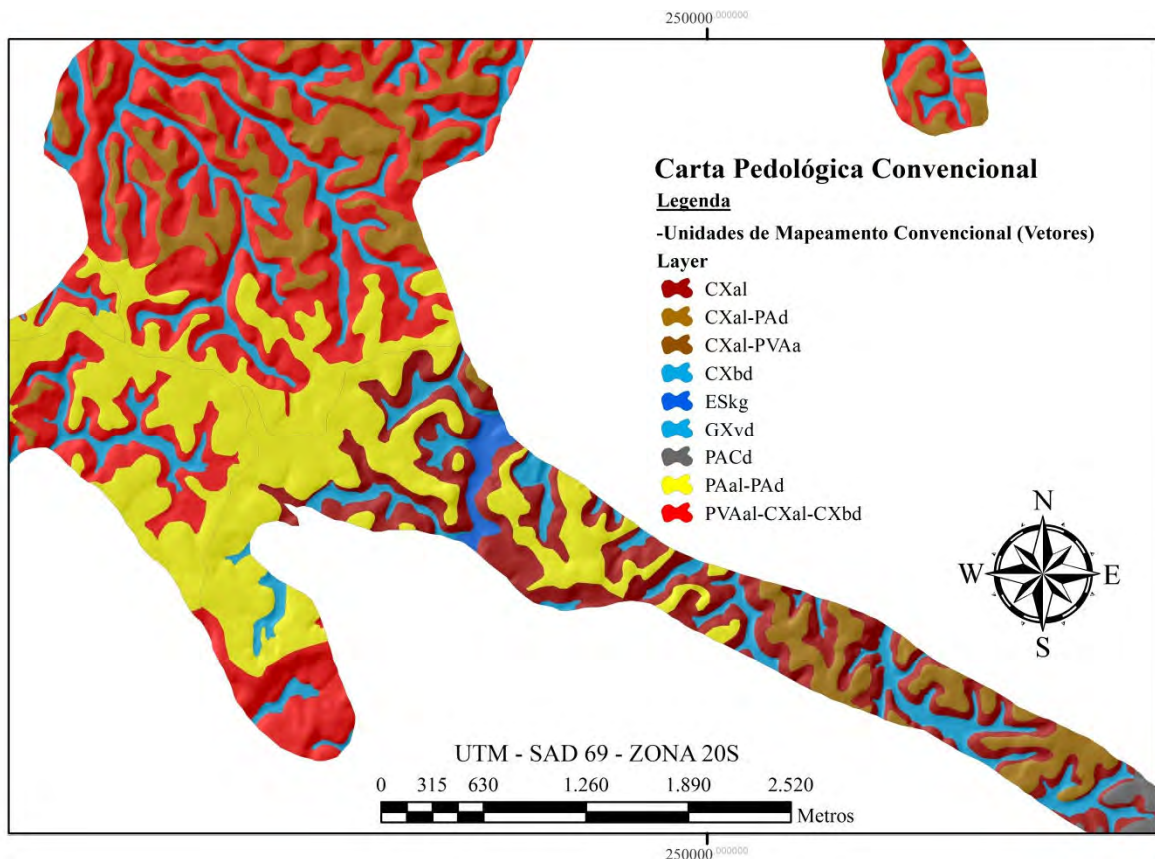


Figura 43: Detalhe da carta pedológica convencional

O mapeamento convencional de solos, elaborado para permitir o planejamento, uso e recuperação da área, por ter sido executado em um polígono envolvente à região antropizada, permitiu discretizar em nível de detalhe a relação solo paisagem da área de estudo. Cabe lembrar, que o mapa foi elaborado ao longo de toda região com acesso possível (8.000ha) a partir da malha viária existente no local e que todas as demais regiões do grande polígono da BOGPM (116.000 ha) estão sob a densa floresta tropical amazônica.

4.1.3 Validação da carta pedológica convencional

Na Tabela 15 são apresentados os resultados da comparação entre a classificação observada no campo e a predita na carta convencional (matriz de confusão).

Observa-se que a margem de erro (13,64%) da validação da carta pedológica foi aceitável, e que o índice kappa 0,81 pode ser considerado excelente conforme Lands e Koch (1977) e Fonseca (2000), refletindo boa correlação entre a predição convencional e o que se pode observar no campo. Também é evidente que, embora tenham sido considerados erros, as

discordâncias entre predito e observado se deram por conta das inclusões nas unidades de mapeamento.

Tabela 15: Matriz de confusão da Validação da Carta Pedológica Convencional Original

| UM | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | Total |
|----------|---------------|---------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| | 100,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 1 | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 |
| | 0,00 | 100,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 2 | 0 | 0 | 13 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 16 |
| | 0,00 | 0,00 | 81,25 | 25,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 6,25 | 100,00 |
| 3 | 0 | 0 | 4 | 23 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 29 |
| | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 79,31 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11 | 0 | 0 | 11 |
| | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 | 0,00 | 100,00 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 | 100,00 |
| | 1 | 5 | 17 | 30 | 2 | 2 | 11 | 0 | 1 | 66 |
| | 1,41 | 7,04 | 23,94 | 42,25 | 2,82 | 2,82 | 15,49 | 0,00 | 1,41 | 100 |
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | Total |
| Erros | 0,00 | 0,00 | 18,75 | 20,69 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 13,64 |
| Exatidão | 100,00 | 100,00 | 81,25 | 79,31 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 86,36 |

Índice kappa: 0,813

Onde: 0=PVAal+CXal+CXbd, 1=CXbd, 2=CXal+PAAd, 3=PACd, 4=GXvd, 5=ESkg, 6=PAal+PAAd, 7=CXal e 8=CXAl+PVAA.

Essa carta foi posteriormente refinada para que entrasse em conformidade com as observações feitas durante a campanha de validação.

A carta pedológica convencional (Figura 44) validada e ajustada, teve sua legenda (e polígonos) agrupada para que contivesse o mesmo número de unidades de mapeamento (UM) da carta pedológica digital a ser executada. Embora a acurácia desta nova carta (ajustada) não seja conhecida, pode-se presumir, que é superior à que foi validada ($k \geq 0,81$) e, portanto, foi utilizada como área de referência (AR). Foram, então, desenvolvidas e aplicadas técnicas baseadas em AR para os MDS deste trabalho.

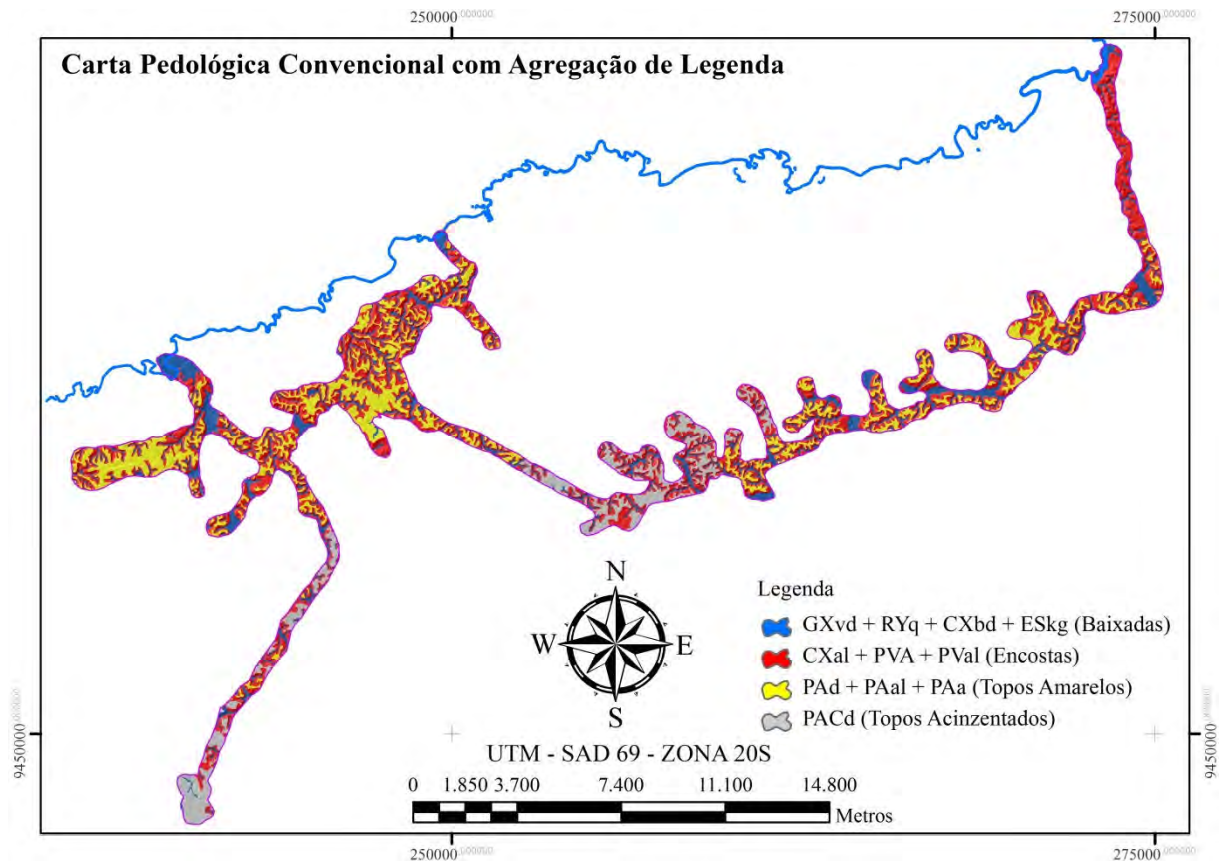


Figura 44: Carta Área de Referência ajustada e com legenda simplificada.

Dos cinco ambientes geomórficos utilizados para mapear as 9 UM's da carta convencional, com o agrupamento das UM's como forma de simplificação dos procedimentos para o MDS, dois foram agrupados (vales U e vales V) conforme os critérios empregados. Principalmente quanto ao atributo cor, as UM's distribuídas sobre o mapa refletem bem o modelo conceitual capaz de descrever a variabilidade dos solos. A UM1 (vales) recebeu a cor azul para que não houvesse confusão com os solos acinzentados da UM4, pois ambas descrevem solos hidromórficos em ambientes imperfeitamente drenados.

4.1.4 Validação da carta pedológica área de referência

A Carta Pedológica Área de Referência foi validada considerando o conjunto de 66 pontos de observações de solo que corresponde à campanha de validação de solos. A matriz de confusão (Tabela 16) e o resumo das exatidões e erros (Tabela 17) são apresentados a seguir.

Tabela 16: Matriz de confusão da validação da Carta Pedológica Área de Referência

| UM | UM1 | UM 2 | UM 3 | UM 4 | Total |
|-------|--------------|---------------|--------------|--------------|---------------|
| UM 1 | 8 | 0 | 1 | 0 | 9 |
| | 88,89 | 0,00 | 11,11 | 0,00 | 100,00 |
| UM 2 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| | 0,00 | 100,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| UM 3 | 0 | 0 | 26 | 1 | 27 |
| | 0,00 | 0,00 | 96,30 | 3,70 | 100,00 |
| UM 4 | 0 | 0 | 3 | 26 | 29 |
| | 0,00 | 0,00 | 10,34 | 89,66 | 100,00 |
| Total | 19 | 35 | 33 | 9 | 66 |
| | 28,79 | 53,03 | 50,00 | 13,64 | 100,00 |

Tabela 17: Quadro resumo dos erros e exatidões globais

| | 1 | 2 | 3 | 4 | Total |
|-----------------|--------------|---------------|--------------|--------------|--------------|
| Erros | 11,11 | 0,00 | 3,70 | 10,34 | 7,58 |
| Exatidão Global | 88,89 | 100,00 | 96,30 | 89,66 | 92,42 |

Índice kappa:0,877

Os erros verificados, mesmo após o ajustamento da carta pedológica, são aceitáveis, justificados e esperados em função de se ter considerado como acerto a coincidência da observação de validação com o perfil representativo da classe. Caso fossem consideradas as possibilidades de inclusão em cada unidade de mapeamento, teríamos uma matriz de confusão com 100% de acerto.

4.2 Mapeamento Digital de Solos por Técnicas de Área de Referência

Os resultados abaixo foram obtidos a partir das variáveis disponíveis e de fácil obtenção. Entretanto, em estudos futuros, a utilização de planos de informação oriundos de outros fatores de formação dos solos e/ou atributos do solo no procedimento de discriminação e classificação das UM's é perfeitamente possível, seguindo a mesma metodologia em qualquer dos modelos preditores aqui utilizados.

4.2.1 Análise multivariada

As funções discriminantes foram geradas utilizando como preditores, os indicados pelo teste de seleção de covariáveis. São apresentadas a seguir, as funções discriminantes geradas para cada UM e para cada MDS. A função de cada UM foi implementada no SIG e gerou o índice de probabilidades de ocorrência desta classe.

A matriz de confusão na etapa de treinamento também é apresentada a seguir e serviu de parâmetro indicador para o prosseguimento das análises, pois indica a capacidade preliminar de predição das funções discriminantes geradas.

MDS 1: Funções Discriminantes Aplicadas em Pontos de Treinamento indicados pelo Pedólogo.

A Tabela 18 mostra as funções discriminantes geradas para o MDS1, com destaque em negrito para as covariáveis com maior poder discriminante nesta função. A função ajustada permitiu a execução de um teste preliminar, que analisa os erros e acertos (Tabela 19) dentro do conjunto de pontos de treinamento, por validação cruzada. O resumo dos erros e exatidões globais (da etapa de treinamento) é apresentado na Tabela 20.

Tabela 18: Função discriminante linear

| Variável | UM1 | UM2 | UM3 | UM4 |
|---------------------------------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|
| Constante | -167,74492 | -177,54 | -212,02 | -227,3 |
| Declividade | 2,58842 | 4,6917 | 2,40471 | 2,79728 |
| Altitude | 3,22123 | 3,45644 | 3,96104 | 3,87115 |
| Comprimento drenagem à jusante | -0,00122 | -0,0011 | -0,0015 | -0,0008 |
| ITU | 17,59408 | 15,7541 | 17,6091 | 18,6833 |
| Curvatura | 33,07938 | 29,7146 | 36,2012 | 34,6993 |
| Comprimento drenagem à montante | -0,30834 | -0,2859 | -0,3325 | -0,3509 |
| Fluxo acumulado | 0,00995 | 0,00939 | 0,01103 | 0,01167 |
| Curvatura em Perfil | 37,26743 | 28,223 | 36,281 | 36,7313 |

Tabela 19: Matriz de confusão da etapa de treinamento do modelo por Validação Cruzada
Número de Observações e Porcentagem classificados em UM

| UM | UM1 | UM2 | UM3 | UM4 | Total |
|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------------|
| UM1 | 198 | 1 | 17 | 14 | 230 |
| | 86,09 | 0,43 | 7,39 | 6,09 | 100 |
| UM2 | 6 | 264 | 6 | 3 | 279 |
| | 2,15 | 94,62 | 2,15 | 1,08 | 100 |
| UM3 | 4 | 0 | 228 | 1 | 233 |
| | 1,72 | 0 | 97,85 | 0,43 | 100 |
| UM4 | 0 | 0 | 3 | 98 | 101 |
| | 0 | 0 | 2,97 | 97,03 | 100 |
| Total | 208 | 265 | 254 | 116 | 843 |
| | 24,67 | 31,44 | 30,13 | 13,76 | 100 |

Tabela 20: Quadro resumo dos erros e exatidões globais da etapa de treinamento do modelo

| UM | UM1 | UM2 | UM3 | UM4 | Total |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|--------------|
| Erros | 13,91 | 5,38 | 2,15 | 2,97 | 6,11 |
| Exatidão Global | 86,09 | 94,62 | 97,85 | 97,03 | 93,89 |

Índice kappa: 0,910

MDS 2: Funções Discriminantes Aplicadas em Pontos de Treinamento de Observação de Solo

A Tabela 21 mostra as funções discriminantes geradas para o MDS2, com destaque em negrito para as covariáveis com maior poder discriminante nesta função. A função ajustada, permitiu a execução de um teste preliminar, que analisa os erros e acertos (Tabela 22) dentro do conjunto de pontos de treinamento, por validação cruzada. O resumo dos erros e exatidões globais (da etapa de treinamento) é apresentado na Tabela 23.

Tabela 21: Função discriminante linear

| Variável | UM1 | UM2 | UM3 | UM4 |
|---------------------------------------|-----------------|-----------------|----------------|-------------------|
| Constante | -154,9578 | -181,415 | -182,8202 | -204,67828 |
| Declividade | 4,45111 | 6,05538 | 4,31106 | 4,34035 |
| Altitude | 3,48844 | 3,8935 | 4,09238 | 4,2189 |
| Comprimento drenagem à jusante | -0,00107 | -0,00122 | -0,0013 | -0,0009996 |
| ITU | 11,52345 | 11,09227 | 10,62285 | 11,51229 |
| Comprimento drenagem à montante | -0,06131 | -0,0631 | -0,06139 | -0,06789 |

Tabela 22: Matriz de confusão da etapa de treinamento do modelo por Validação Cruzada
Número de Observações e Porcentagem classificados em UM

| UM | UM1 | UM2 | UM3 | UM4 | Total |
|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------------|
| UM1 | 39 | 1 | 3 | 4 | 47 |
| | 82,98 | 2,13 | 6,38 | 8,51 | 100 |
| UM2 | 5 | 93 | 13 | 2 | 113 |
| | 4,42 | 82,3 | 11,5 | 1,77 | 100 |
| UM3 | 4 | 0 | 81 | 11 | 96 |
| | 4,17 | 0 | 84,38 | 11,46 | 100 |
| UM4 | 0 | 0 | 3 | 29 | 32 |
| | 0 | 0 | 9,38 | 90,63 | 100 |
| Total | 48 | 94 | 100 | 46 | 288 |
| | 16,67 | 32,64 | 34,72 | 15,97 | 100 |

Tabela 23: Quadro resumo dos erros e exatidões globais da etapa de treinamento do modelo

| UM | UM1 | UM2 | UM3 | UM4 | Total |
|-----------------|-------|------|-------|-------|--------------|
| Taxa | 17,02 | 17,7 | 15,63 | 9,38 | 14,93 |
| Exatidão Global | 82,98 | 82,3 | 84,38 | 90,63 | 85,07 |

Índice kappa 0,775

MDS 4: Funções Discriminantes aplicadas em pontos de treinamento sorteados sobre a Carta Pedológica da Área de Referência

A Tabela 24 mostra as funções discriminantes geradas para o MDS4, com destaque em negrito para as covariáveis com maior poder discriminante nesta função. A função ajustada permitiu a execução de um teste preliminar, que analisa os erros e acertos (Tabela 25) dentro do conjunto de pontos de treinamento, por validação cruzada. O resumo dos erros e exatidões globais (da etapa de treinamento) é apresentado na Tabela 26.

Tabela 24: Função Linear Discriminante

| Variável | UM1 | UM2 | UM3 | UM4 |
|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|-------------------|
| Constante | -122,611 | -144,944 | -151,5579 | -161,04514 |
| DeclivGr | 2,59774 | 3,01077 | 2,36068 | 2,48046 |
| Altitude | 3,18999 | 3,58126 | 3,75535 | 3,77572 |
| CompJuz | -0,00097 | -0,0011 | -0,00126 | -0,0009173 |
| ITU | 5,96994 | 5,65003 | 5,45749 | 5,73987 |
| CompMon | -0,00822 | -0,00809 | -0,00797 | -0,00837 |

Tabela 25: Matriz de confusão da etapa de treinamento do modelo por Validação Cruzada

| Número de Observações e Porcentagem classificados em Um | | | | | |
|---|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| UM | UM1 | UM2 | UM3 | UM4 | Total |
| UM1 | 331 | 37 | 19 | 40 | 427 |
| | 77,52 | 8,67 | 4,45 | 9,37 | 100 |
| UM2 | 97 | 474 | 177 | 118 | 866 |
| | 11,2 | 54,73 | 20,44 | 13,63 | 100 |
| UM3 | 11 | 34 | 396 | 27 | 468 |
| | 2,35 | 7,26 | 84,62 | 5,77 | 100 |
| UM4 | 1 | 3 | 23 | 190 | 217 |
| | 0,46 | 1,38 | 10,6 | 87,56 | 100 |
| Total | 440 | 548 | 615 | 375 | 1978 |
| | 22,24 | 27,7 | 31,09 | 18,96 | 100 |

Tabela 26: Quadro resumo dos erros e exatidões globais da etapa de treinamento do modelo

| UM | UM1 | UM2 | UM3 | UM4 | Total |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|--------------|
| Erros | 22,48 | 45,27 | 15,38 | 12,44 | 23,89 |
| Exatidão Global | 77,52 | 54,73 | 84,62 | 87,56 | 76,11 |

Índice kappa 0,597

A análise das matrizes de confusão dos MDS na fase de ajuste do modelo, por validação cruzada, mostra que os resultados podem ser considerados coerentes e satisfatórios para a separação, classificação e mapeamento das unidades de mapeamento em estudo.

MDS 3: Árvores de classificação a partir de Padrões Geomórfico-pedológicos extraídos da Carta Pedológica da Área de Referência.

4.2.2 Algoritmo de classificação em árvore

É apresentada abaixo uma versão decodificada das regras de classificação implementadas no SIG:

Expressão 1

Se Declividade > 3,5, então UM2, se não: Se Curvatura < -0.052253907, então UM1a, se não: Se Declividade < 1.7 e Altitude < 60, então UM1b, se não: Se ITU > 8 e Distância de Drenagem à jusante > 15000, então UM4, se não, UM3

4.2.3 Cartas pedológicas digitais

As cartas pedológicas digitais são apresentadas a seguir, com limite correspondente ao polígono referente às áreas hidrologicamente consistentes (bacias hidrográficas), com área total mapeada em torno de 73.000 ha (Figura 12).

MDS 1: Funções Discriminantes Aplicadas em Pontos de Treinamento indicados pelo Pedólogo.

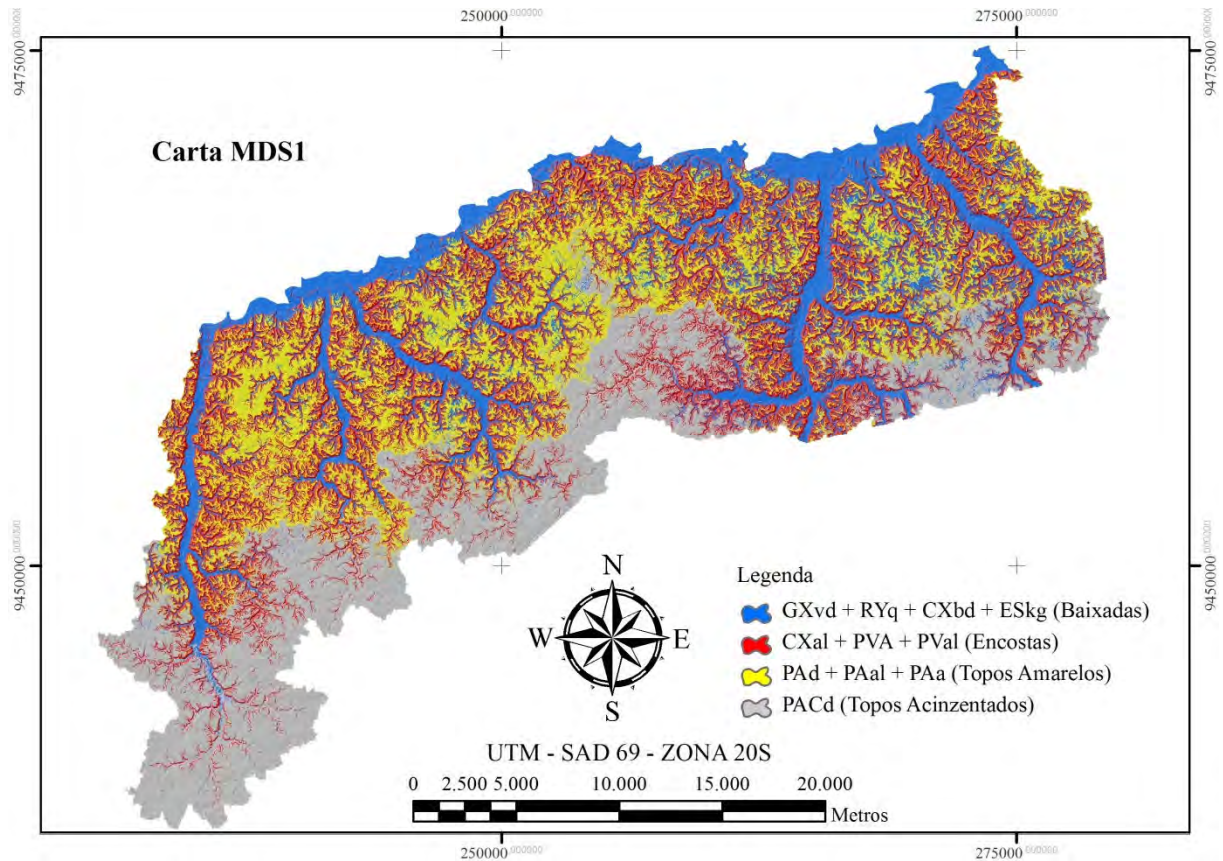


Figura 45: Carta pedológica digital MDS1.

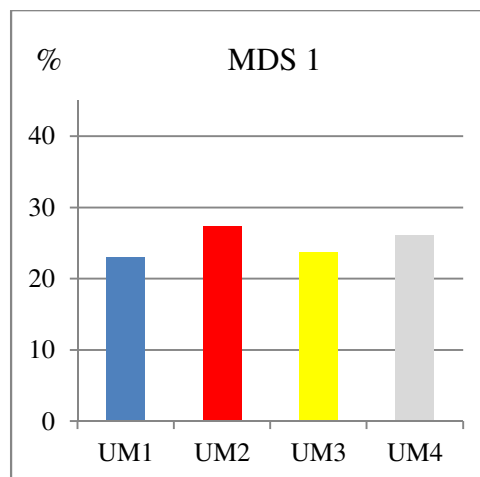


Figura 46: Distribuição das UM (%) na Carta pedológica digital MDS1.

A análise visual da carta MDS1 (Figuras 45 e 46) mostra que as regiões (ambientes) de cada unidade de mapeamento são visualmente separadas, com limites entre UM bem

distintos e com uma distribuição de áreas de cada unidade coerentes com o modelo conceitual estabelecido pelo pedólogo. Independente da validação, é possível observar que a utilização desta técnica permitiu a confecção de cartas pedológicas com boa tradução do entendimento do pedólogo, sendo capaz de gerar mapas preliminares de grandes áreas utilizando ferramentas digitais com um tempo de confecção menor e mais preciso que técnicas de mapeamento convencionais.

MDS 2: Funções Discriminantes Aplicadas em Pontos de Treinamento de Observação de Solo.

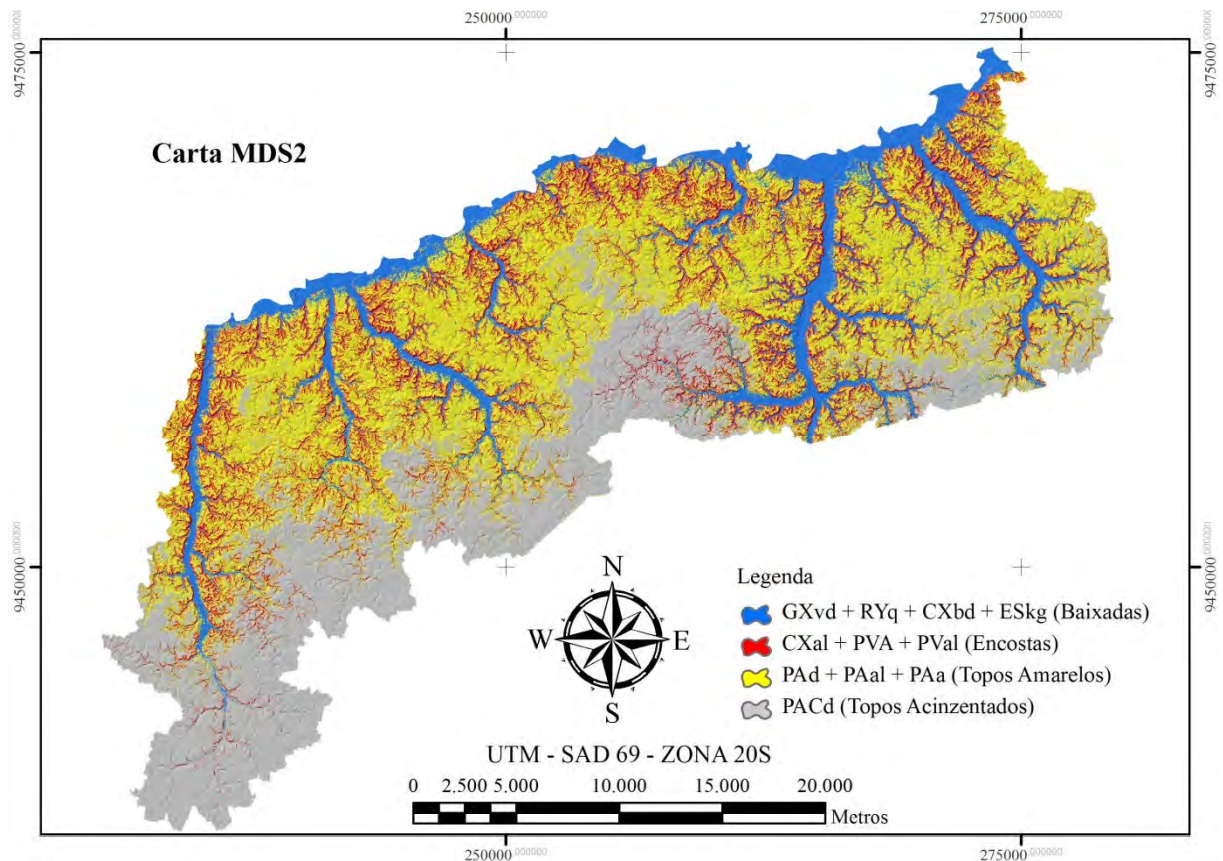


Figura 47: Carta pedológica digital MDS2.

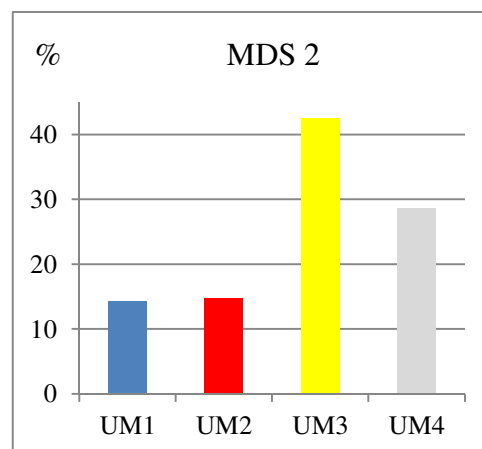


Figura 48: Distribuição das UM (%) na Carta pedológica digital MDS2.

Essa técnica de mapeamento digital permitiu o mapeamento da região, com discriminação visualmente coerente com os pontos analisados em campo. Como a metodologia para a construção desta carta foi semelhante à utilizada para o MDS1, diferindo apenas na origem dos pontos de treinamento, chega-se à conclusão de que, independente da forma de obtenção da amostra de treinamento, as funções discriminantes são capazes de prever as UM's de uma área conforme o entendimento do pedólogo. Porém, análises mostraram que as cartas e os gráficos de distribuição de frequência não foram iguais, com destaque para o predomínio de solos amarelos (UM3) na carta MDS2 (Figuras 47 e 48).

Para regiões vizinhas com os mesmos fatores de formação do solo, essas cartas indicam a possibilidade de classificação em nível preliminar da região, com intervenção mínima do pedólogo quanto à classificação. Porém foi necessário o agrupamento das observações de solo em unidades de mapeamento para que fosse possível a análise dos pontos por FDL. Fica evidente, portanto, que a figura do especialista com conhecimento da área em estudo tem papel fundamental na condução do MDS.

Outro aspecto notável é a maior expressão territorial dos solos da UM2 na carta MDS1, em comparação à MDS2, provavelmente reflexo do modelo conceitual elaborado pelo pedólogo, que associa esta unidade de mapeamento mais intensamente às encostas declivosas do que o efetivamente encontrado nos pontos de observação do levantamento pedológico.

Em futuros trabalhos, é recomendável a exploração da utilização dos dois conjuntos de pontos (indicados pelo pedólogo e os obtidos em campo) para o mapeamento da área. Acredita-se também na possibilidade de indicação, pelo pedólogo, de pontos mais próximos das zonas de transição de solos.

A análise visual da carta MDS3 (Figuras 49 e 50), assim como nas cartas MDS1 e 2, mostra que as regiões (ambientes) de cada unidade de mapeamento são visualmente separadas, com limites entre UM's bem distintos e com uma distribuição de áreas de cada unidade coerentes com o modelo conceitual estabelecido pelo pedólogo. Independente da validação, é possível observar que a utilização desta técnica permitiu a confecção de cartas pedológicas com boa tradução do entendimento do pedólogo, sendo capaz de gerar mapas preliminares de grandes áreas utilizando ferramentas digitais com um tempo de confecção menor e mais preciso que técnicas de mapeamento convencionais.

MDS 3: Árvores de classificação a partir de Padrões Geomórfico-pedológicos extraídos da Carta Pedológica da Área de Referência.

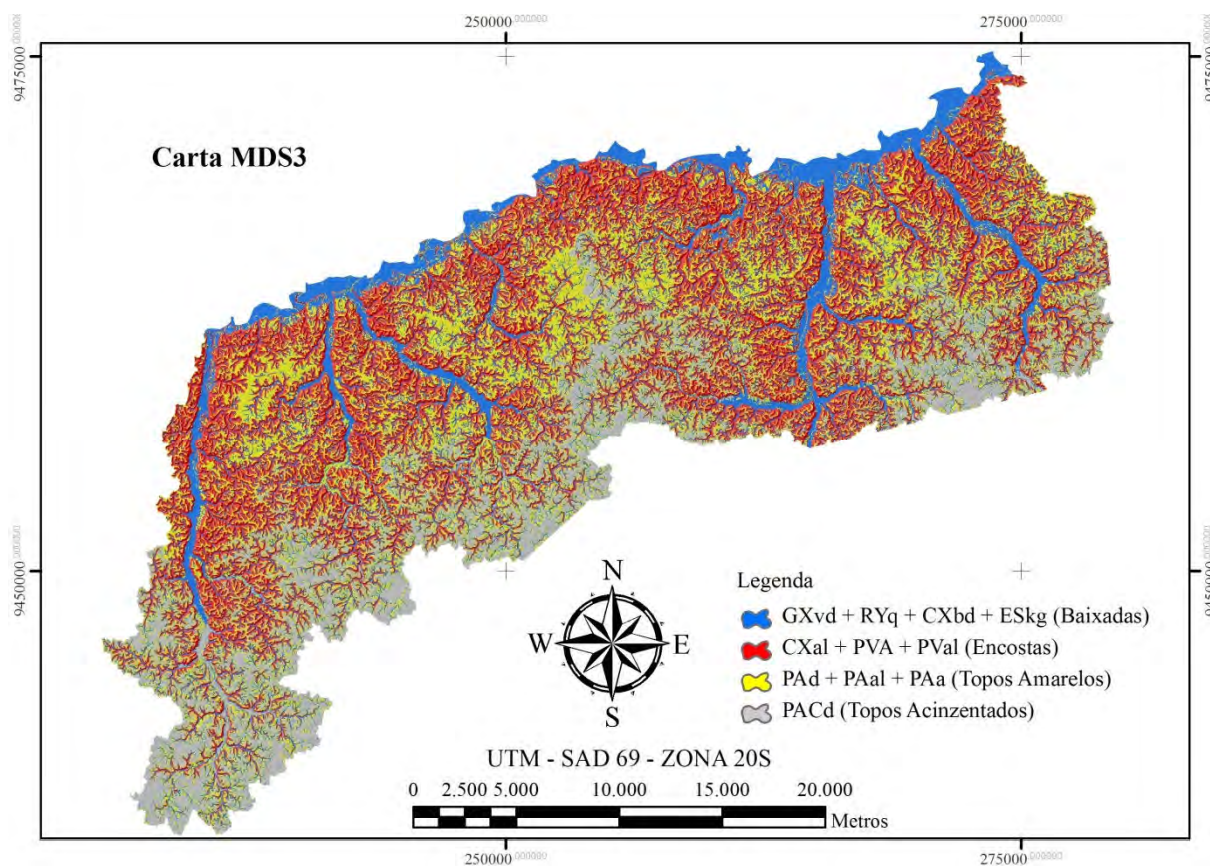


Figura 49: Carta pedológica digital MDS3.

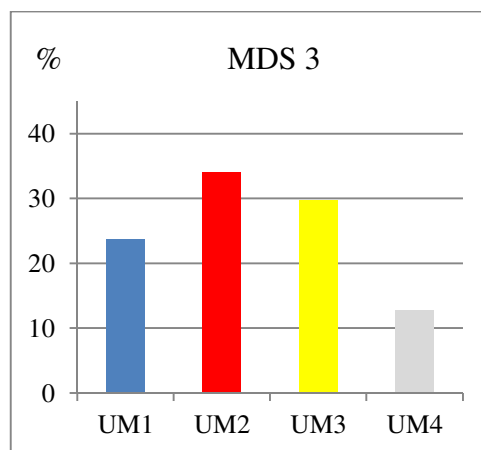


Figura 50: Distribuição das UM's (%) na Carta pedológica digital MDS3.

Fica evidente, porém, o considerável aumento da ocorrência de solos avermelhados (UM2) em detrimento sobretudo da UM4, sendo, das três cartas apresentadas, aquela com aspecto avermelhado mais intenso. Como a metodologia é baseada no conhecimento do especialista, assim como pode ser observado na apresentação da carta MDS1, fica evidente que o modelo conceitual do pedólogo (seja pela indicação-predição de pontos de treinamento, seja pelo estabelecimento de regras de classificação baseadas na carta AR) amplifica a área de ocorrência dos solos da UM2.

MDS 4: Funções Discriminantes aplicadas em pontos de treinamento sorteados sobre a Carta Pedológica da Área de Referência

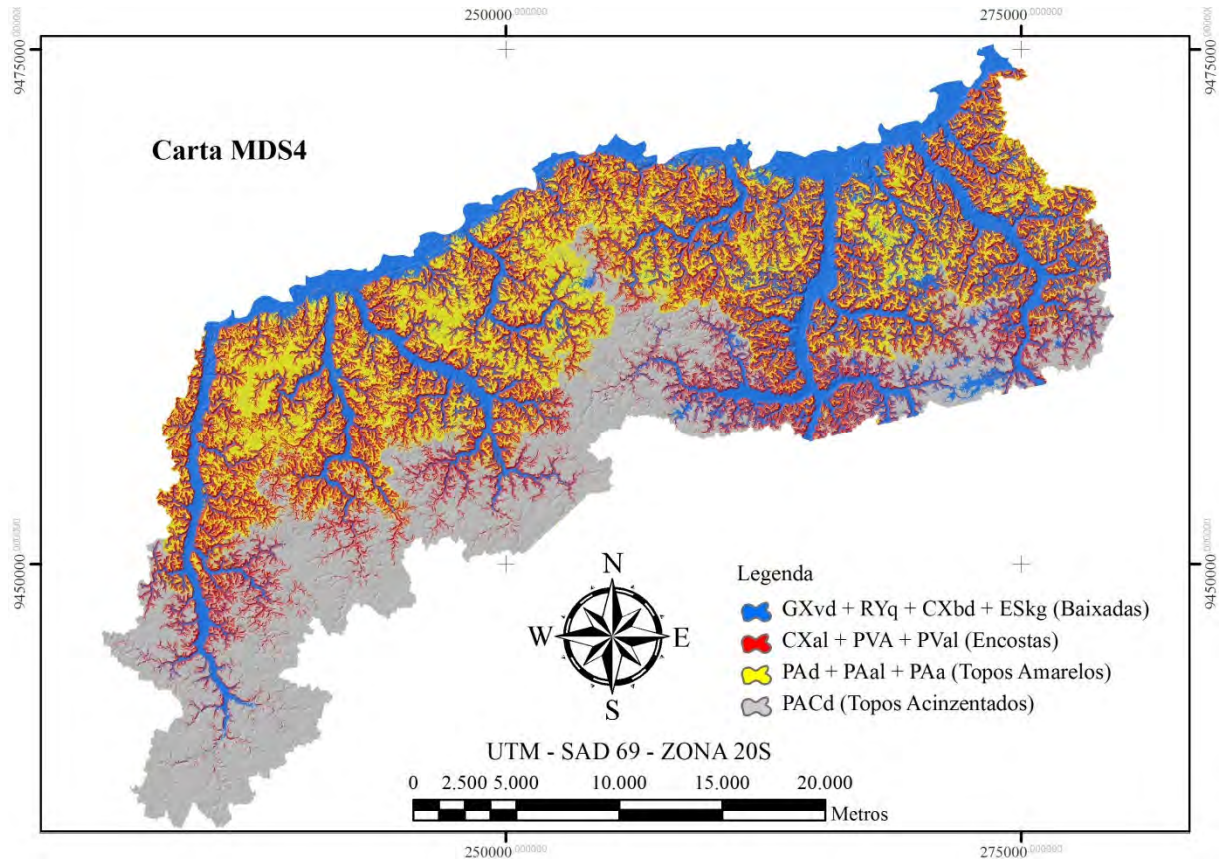


Figura 51: Carta pedológica digital MDS4.

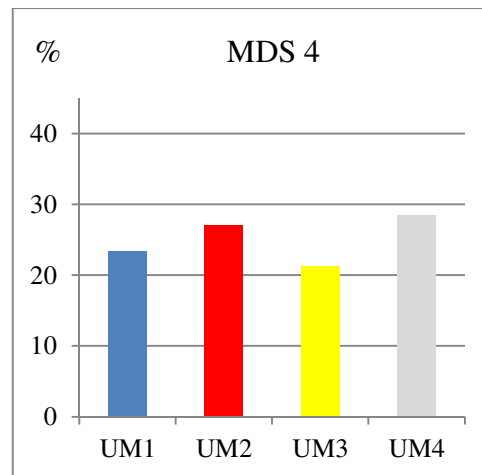


Figura 52: Distribuição das UM's (%) na Carta pedológica digital MDS4

As mesmas considerações e observações feitas para as demais cartas digitais são válidas para a MDS4 (Figura 51). Embora a área mapeada com UM2 não seja tão intensa quanto na MDS3, continua refletindo mais fortemente o modelo conceitual do pedólogo em detrimento do que mostra a carta MDS2, onde apenas o agrupamento das classes em UM's foi feito, sendo o resultado reflexo puro dos dados obtidos em campo.

Nesta carta, assim como na MDS1, embora com uma variação pouco maior, verificam-se diferenças inferiores a 10% na expressão territorial das UM's (Figura 52).

4.2.4 Análise comparativa das cartas pedológicas digitais

São apresentados, a seguir (Figuras 53 a 57), a carta AR e os 4 MDS gerados, com nível de detalhamento (zoom aproximado) maior e em sobreposição à AR. O trecho escolhido para apresentação foi selecionado de forma a apresentar as 4 UM's para que possam ser analisados mais detalhes quanto à capacidade das metodologias utilizadas em melhor representar a distribuição espacial das UM's conforme a AR.

A Figura 53 ilustra a carta AR, com seu polígono limite, sobreposta a um modelo de sombras (relevo sombreado) da área mapeada digitalmente. A análise visual desta carta permite a conclusão de que as 4 UM's ocupam ambientes geomórficos bem distintos e refletem de forma coerente o modelo conceitual elaborado e descrito neste trabalho. Em princípio, espera-se que as 4 cartas pedológicas digitais possam reproduzir este modelo conceitual, ora através do conhecimento tácito do pedólogo (MDS1 e MDS2), ora através da extração de informações diretamente da carta AR (MDS3 e MDS4).

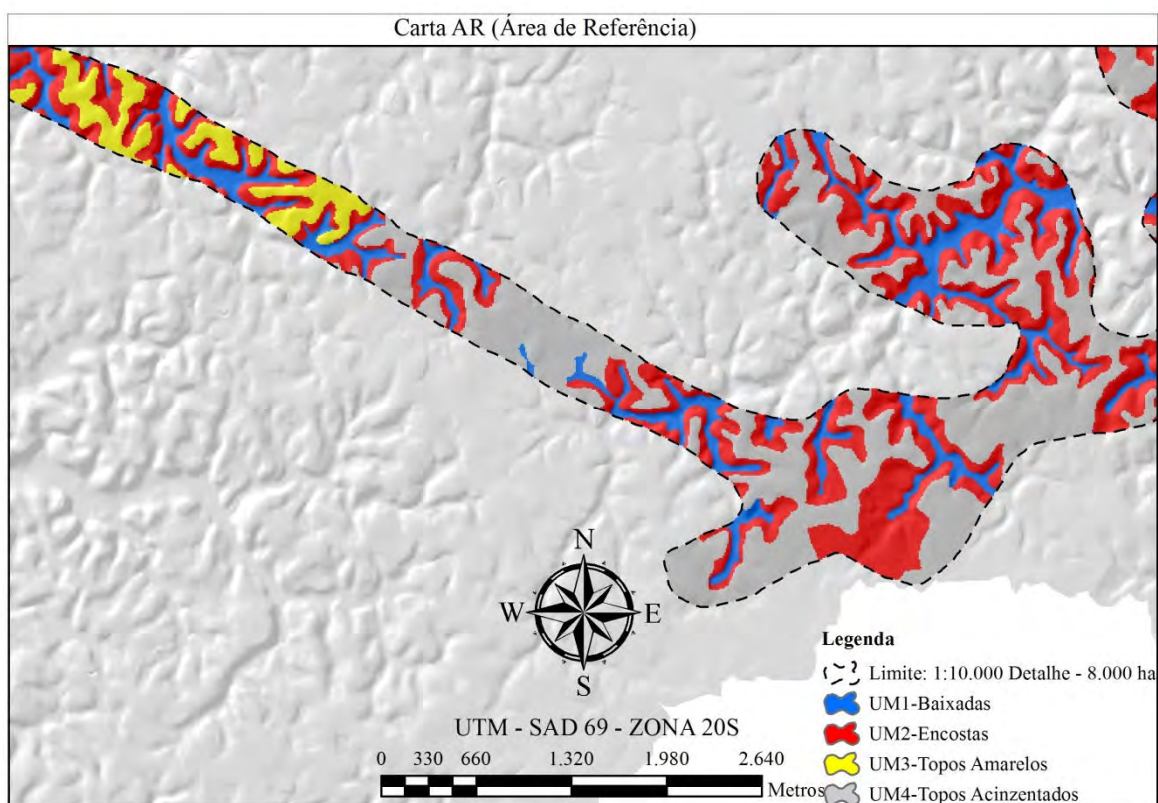


Figura 53: Carta AR em detalhe.

Analisando as cartas pedológicas digitais em detalhe, sem considerar até este momento a validação da classificação, pode-se facilmente verificar que as cartas MDS3 (Figura 56) e MDS4 (Figura 57) apresentam melhor correlação visual com a carta AR. Embora as cartas MDS1 (Figura 54) e MDS2 (Figura 55) também tenham separado as UM's, de maneira geral, estas não apresentam os mesmos níveis de concordância. Também chama a atenção a impressão de aumento da frequência de solos avermelhados na seguinte ordem: MDS2, MDS1, MDS4 e MDS3, sendo o primeiro (MDS2) nitidamente mais amarelo.

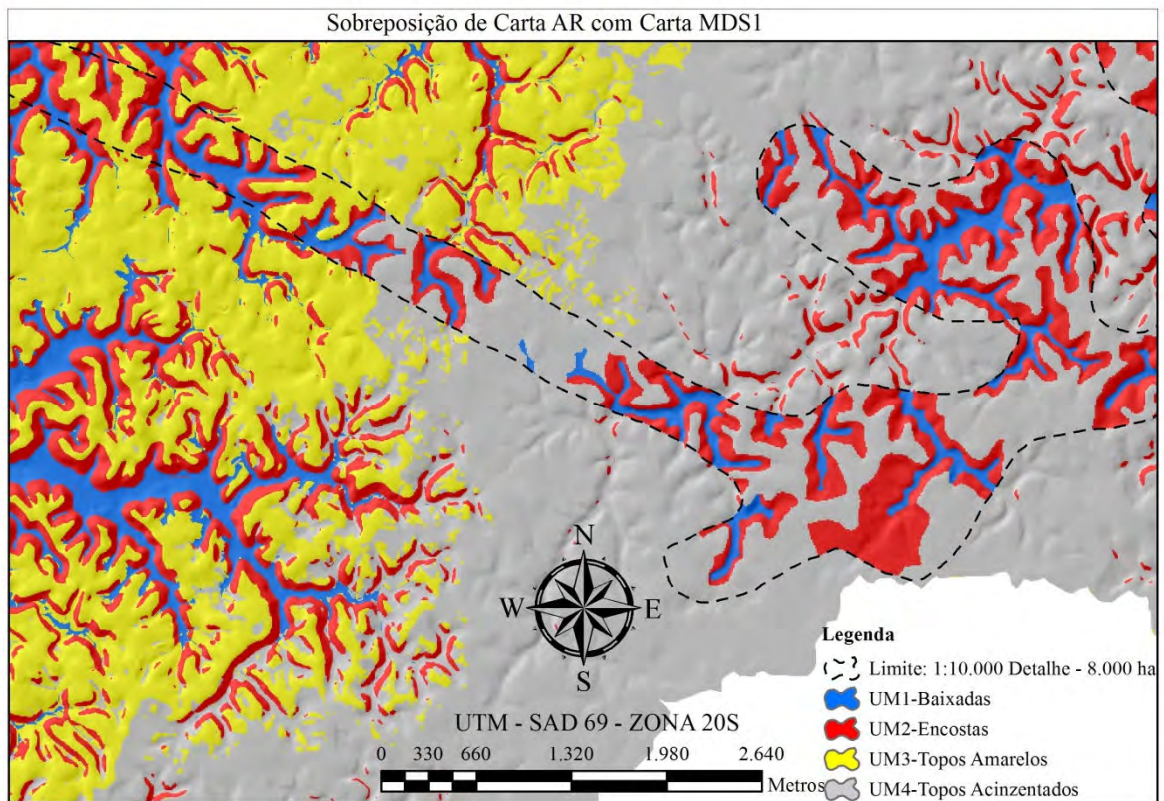


Figura 54: Sobreposição da Carta AR com a Carta MDS1.

As maiores discrepâncias, tanto entre os MDS como entre MDS e AR, são observadas para a UM1, que, como já foi descrita, é composta basicamente por vales em formato de V e vales em formato de U. Os vales em formato de U foram visualmente melhor mapeados nas cartas MDS3 e MDS4, com desempenho considerado apenas razoável para as cartas MDS2 e MDS3. Quanto aos vales em formato de V, percebe-se claramente que a única carta em que este ambiente foi mapeado com boa correlação visual com a carta AR foi a MDS3.

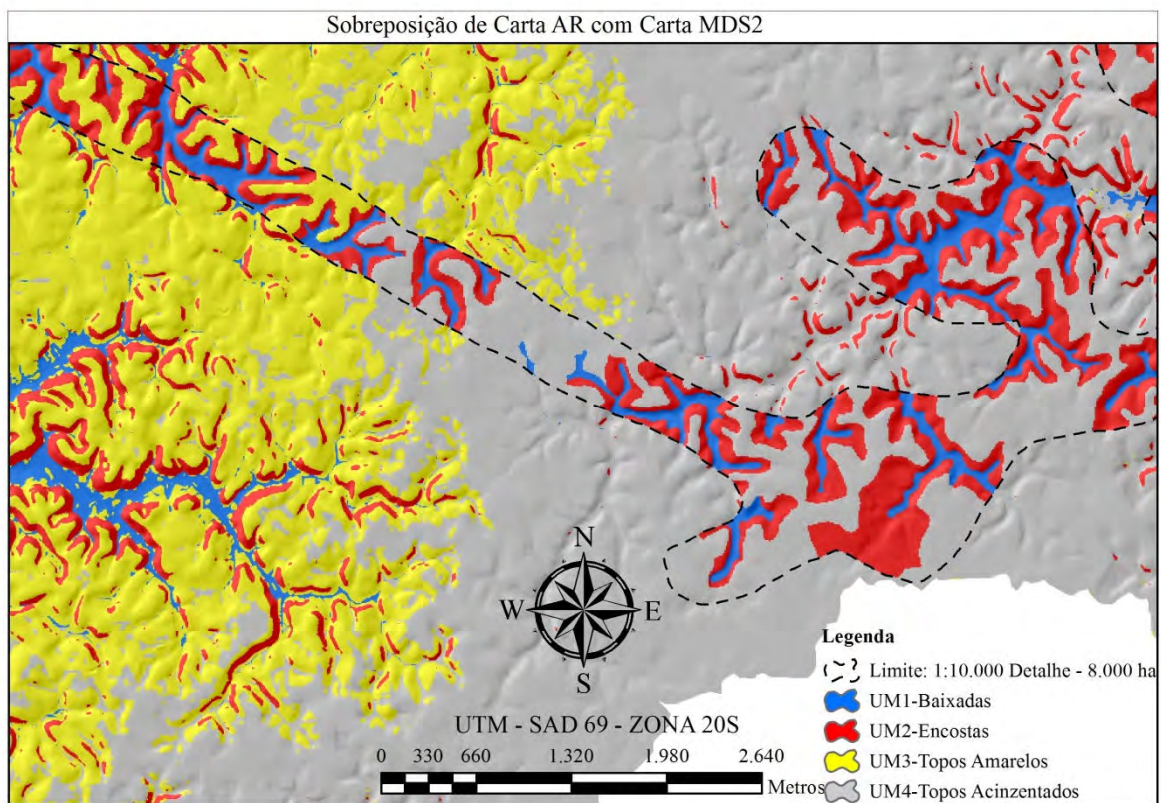


Figura 55: Sobreposição da Carta AR com a Carta MDS2.

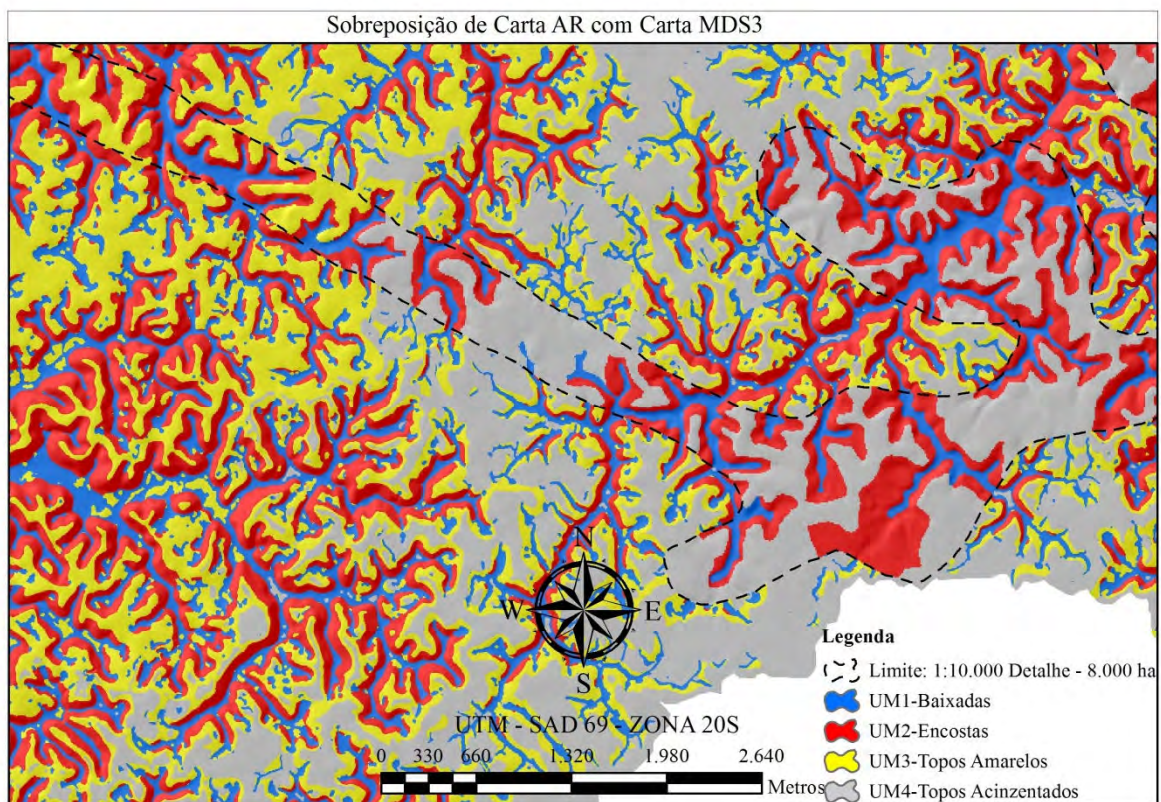


Figura 56: Sobreposição da Carta AR com a Carta MDS3.

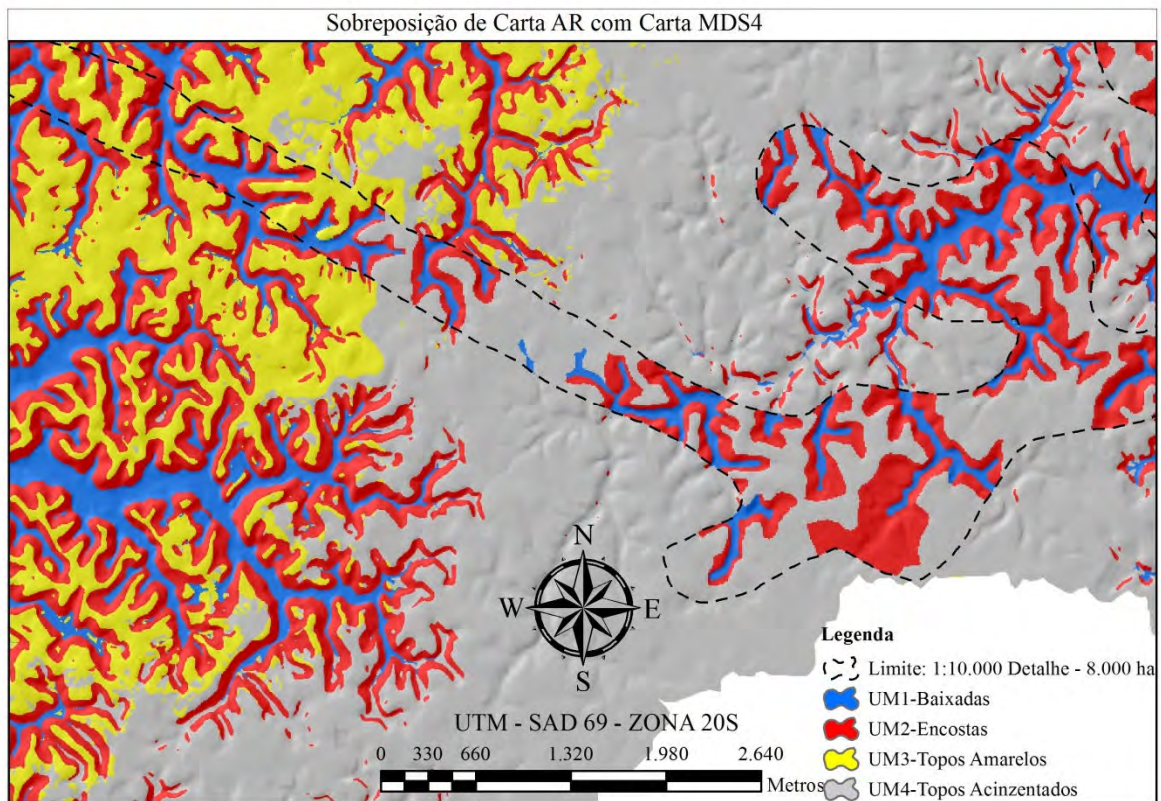


Figura 57: Sobreposição da Carta AR com a Carta MDS4.

A Figura 58 ilustra os histogramas das cartas, porém apresenta os dados agrupados por carta MDS. As maiores variações de percentual de ocorrência foram a UM2 e UM3 (aproximadamente 20%), seguidas de UM4 (aproximadamente 15%) e, por fim, a UM1, que teve variação em torno de 10%. Esses resultados corroboram a análise visual das cartas digitais e reforçam que apenas a exatidão global é insuficiente para a análise da acurácia dos mapas.

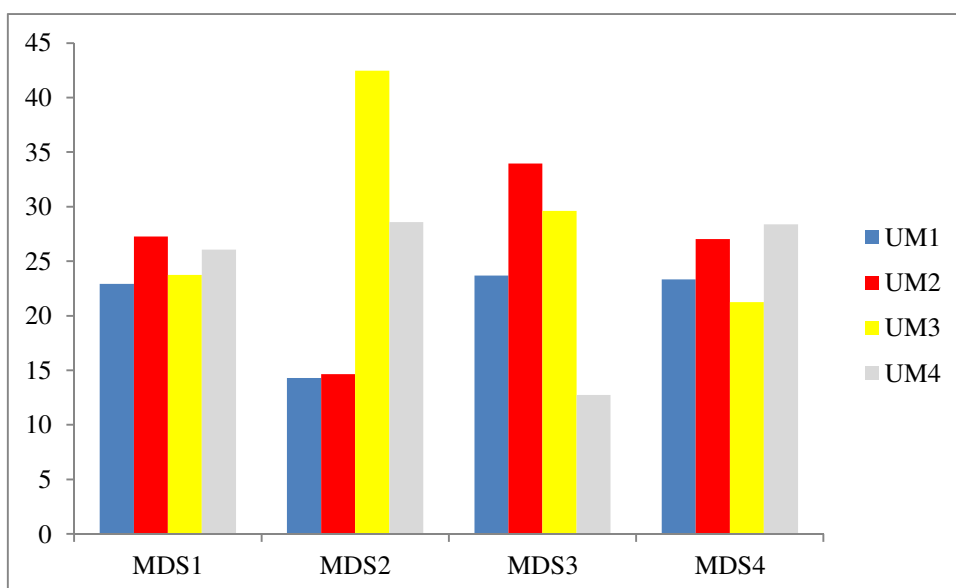


Figura 58: Planimetria (%) das cartas pedológicas digitais.

Pode-se observar que a carta MDS1 apresentou áreas de ocorrência proporcionalmente mais parecidas quanto à distribuição das 4 unidades de mapeamento, enquanto na carta MDS2 verifica-se o amplo predomínio da UM3. O motivo dessas diferenças provavelmente se deu em função do número de pontos utilizados para o ajuste dos modelos e também de uma melhor frequência de distribuição das observações na grade de pontos indicada pelo pedólogo.

4.2.5 Validação das cartas pedológicas digitais

As Tabelas 27 e 28 apresentam a matriz de confusão da validação da carta MDS 1 com exatidão global de 74,6% e Índice Kappa de 0,679, valor considerado muito bom conforme Lands e Koch (1977) e Fonseca (2000). Pode-se verificar também que os maiores erros utilizando esta técnica estão na confusão de classificação de classe UM1 (Vales) com as demais classes. A má classificação se deu tanto pela ocorrência de erros de omissão (subestimação) como de comissão (superestimação). Outro aspecto que pode explicar estes erros é uma possível baixa representatividade dos vales em formato de V na área mapeada, esse aspecto pode ter sido limitante para o mapeamento adequado por FD. Verifica-se também que a maior exatidão obtida nesta carta se deu na UM3 com um erro de classificação de aproximadamente 16%.

Tabela 27: Validação da Carta MDS1.

| Número de Observações e Porcentagem classificados em UM | | | | | |
|---|--------------|--------------|--------------|--------------|------------|
| UM | UM1 | UM2 | UM3 | UM4 | Total |
| UM1 | 8 | 0 | 2 | 5 | 15 |
| | 53,33 | 0,00 | 13,33 | 33,33 | 100 |
| UM2 | 7 | 30 | 1 | 0 | 38 |
| | 18,42 | 78,95 | 2,63 | 0,00 | 100 |
| UM3 | 4 | 1 | 27 | 0 | 32 |
| | 12,50 | 3,13 | 84,38 | 0,00 | 100 |
| UM4 | 0 | 0 | 2 | 9 | 11 |
| | 0,00 | 0,00 | 18,18 | 81,82 | 100 |
| Total | 19 | 31 | 32 | 14 | 96 |
| | 19,79 | 32,29 | 33,33 | 14,58 | 100 |

Tabela 28: Resumo dos erros/exatidão da Carta MDS1.

| UM | UM1 | UM2 | UM3 | UM4 | Total |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|--------------|
| Erros | 46,67 | 21,05 | 15,63 | 18,18 | 25,38 |
| Exatidão Global | 53,33 | 78,95 | 84,37 | 81,82 | 74,62 |

Índice Kappa: 0,679

As Tabelas 29 e 30 apresentam a matriz de confusão da validação da carta MDS2 com exatidão global de 78,53% e Índice Kappa de 0,705, valor considerado muito bom conforme Lands e Koch (1977) e Fonseca (2000). Pode-se verificar também que os maiores erros de classificação utilizando esta técnica ocorreram na UM1 onde pouco mais de 50% da predição foi errônea, sendo que houve tanto erros de omissão como de comissão. Outro aspecto que merece destaque é a acurácia de classificação com 100% de acerto na UM4 (Argissolos acinzentados) com o uso desta técnica. Esses resultados indicam vantagens da aplicação desta metodologia em situações onde, por exemplo, a utilidade principal do MDS está na identificação da UM4. Também merece destaque a boa exatidão obtida na UM3, que, embora

tenha apresentado maior amplitude mapeada em relação aos demais MDS, mostrou bom desempenho individualmente.

Tabela 29: Validação da Carta MDS2

| Número de Observações e Porcentagem classificados em UM | | | | | |
|---|--------------|--------------|--------------|--------------|------------|
| UM | UM1 | UM2 | UM3 | UM4 | Total |
| UM1 | 7 | 0 | 4 | 4 | 15 |
| | 46,67 | 0 | 26,67 | 26,67 | 100 |
| UM2 | 4 | 28 | 6 | 0 | 38 |
| | 10,53 | 73,68 | 15,79 | 0 | 100 |
| UM3 | 2 | 0 | 30 | 0 | 32 |
| | 6,25 | 0 | 93,75 | 0 | 100 |
| UM4 | 0 | 0 | 0 | 11 | 11 |
| | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 |
| Total | 13 | 28 | 40 | 15 | 96 |
| | 13,54 | 29,17 | 41,67 | 15,63 | 100 |

Tabela 30: Resumo dos erros/exatidão da Carta MDS2.

| UM | UM1 | UM2 | UM3 | UM4 | Total |
|-----------------|-------|-------|-------|-----|--------------|
| Erros | 53,33 | 26,32 | 6,25 | 0 | 21,47 |
| Exatidão Global | 46,67 | 73,68 | 93,75 | 100 | 78,53 |

Índice Kappa: 0,705

As Tabelas 31 e 32 apresentam a matriz de confusão da validação da carta MDS3 com exatidão global de 89% e Índice Kappa de 0,85, valor considerado excelente conforme Lands e Koch (1977) e Fonseca (2000). Esses resultados são ligeiramente superiores aos encontrados por SKIDMORE et al. (1996), que, mapeando cinco UM's sob floresta utilizando técnicas de classificação em árvore em SIG, encontraram valores de EG em torno de 70%. Pode-se verificar também que os maiores erros utilizando esta técnica estão na confusão de classificação da classe UM4 (PACd), devido exclusivamente a erros de omissão (subestimação) da UM. Esse erro, porém, é aceitável se comparado aos percentuais de erros encontrados nos demais MDS. A UM1, que nas demais cartas digitais elaboradas apresentou os maiores erros, foi a melhor classificada, com exatidão global de 93%. Essa vantagem pode ser atribuída a interação e experiência do pedólogo na mineração de covariáveis preditoras capazes de representar corretamente os vales em formato de V, o que pareceu ser uma limitação do uso de funções discriminantes na área estudada. Ainda assim, dos 6 erros de classificação desta UM, 5 foram de comissão, indicando ligeira superestimativa desta classe. ZHOU et al. (2004) usaram regras geradas por árvores de classificação em um modelo solo-relevo para comparar com um classificador Bayesiano em uma área na província de Zheijiang, na China. Ao replicar as regras obtidas do mapa existente, os autores obtiveram uma exatidão global de 81,3% para a árvore de classificação e de 79,3% para o método de classificação Bayesiano, mas a árvore de classificação obteve exatidão alta em todas as classes individuais enquanto o segundo subestimou algumas classes.

Tabela 31: Validação da Carta MDS3
Número de Observações e Porcentagem classificados em UM

| UM | UM1 | UM2 | UM3 | UM4 | Total |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| UM1 | 14 | 0 | 1 | 0 | 15 |
| | 93,33 | 0,00 | 6,67 | 0,00 | 100,00 |
| UM2 | 3 | 34 | 1 | 0 | 38 |
| | 7,89 | 89,47 | 2,63 | 0,00 | 100,00 |
| UM3 | 2 | 1 | 29 | 0 | 32 |
| | 6,25 | 3,13 | 90,63 | 0,00 | 100,00 |
| UM4 | 0 | 0 | 2 | 9 | 11 |
| | 0,00 | 0,00 | 18,18 | 81,82 | 100,00 |
| Total | 19 | 35 | 33 | 9 | 96 |
| | 19,79 | 36,46 | 34,38 | 9,38 | 100,00 |

Tabela 32: Resumo dos erros/exatidão da Carta MDS3.

| UM | UM1 | UM2 | UM3 | UM4 | Total |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|--------------|
| Erros | 6,67 | 10,53 | 9,38 | 18,18 | 11,19 |
| Exatidão Global | 93,33 | 89,47 | 90,62 | 81,82 | 88,81 |

Índice Kappa: 0,851

As Tabelas 33 e 34 apresentam a matriz de confusão da validação da carta MDS4 com exatidão global de 79% e Índice Kappa de 0,71, valor considerado muito bom conforme Lands e Koch (1977) e Fonseca (2000). Esse valor de exatidão corrobora os resultados encontrados por ILLES et al. (2011), utilizando FD para a predição de UM's sob áreas de cultivo de florestas, onde encontraram valores de exatidão em torno de 71%. Pode-se verificar também que os maiores erros de classificação utilizando esta técnica ocorreram na UM1, onde em torno de 47% da predição foi errônea. Outro aspecto que merece destaque é a acurácia de classificação com 100% de acerto na UM dos Argissolos acinzentados com o uso de FDL. Tais resultados indicam vantagens da aplicação desta metodologia em situações onde, por exemplo, a utilidade principal do MDS está na identificação da UM4. Por outro lado, assim como na carta MDS1 e MDS2, as FDL's mostraram-se pouco eficazes para a predição dos vales em formato de V. Os resultados encontrados por ILLES et al. (2011) também mostram desempenho variável das funções discriminante na predição das UM's.

Tabela 33: Validação da Carta MDS 4

| UM | UM1 | UM2 | UM3 | UM4 | Total |
|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------------|
| UM1 | 8 | 0 | 1 | 6 | 15 |
| | 53,33 | 0,00 | 6,67 | 40 | 100 |
| UM2 | 5 | 31 | 2 | 0 | 38 |
| | 13,16 | 81,58 | 5,26 | 0,00 | 100 |
| UM3 | 3 | 1 | 26 | 2 | 32 |
| | 9,38 | 3,13 | 81,25 | 6,25 | 100 |
| UM4 | 0 | 0 | 0 | 11 | 11 |
| | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100 | 100 |
| Total | 16 | 32 | 29 | 19 | 96 |
| | 16,67 | 33,33 | 30,21 | 19,79 | 100 |

Tabela 34: Resumo dos erros/exatidão da Carta MDS4.

| UM | UM1 | UM2 | UM3 | UM4 | Total |
|-----------------|-------|-------|-------|-----|--------------|
| Erros | 46,67 | 18,42 | 18,75 | 0 | 20,96 |
| Exatidão Global | 53,33 | 81,58 | 81,25 | 100 | 79,04 |

Índice Kappa: 0,710

4.2.6 Análise comparativa da validação das cartas pedológicas digitais

A Tabela 35 permite a comparação da acurácia entre as cartas MDS1 e MDS2. Embora a carta MDS1 tenha apresentado maiores valores de exatidão global na etapa de treinamento e ajuste do modelo, houve uma inversão na fase de validação, com a carta MDS2 apresentando acurácia ligeiramente maior.

Quanto aos erros, ficam evidentes as mesmas taxas de erro de classificação da UM1 nas duas cartas e também menores taxas para as UM4 e 3. Esses resultados são semelhantes aos encontrados por ILLES et al. (2011), que concluíram ser necessária uma proporção consideravelmente maior de pontos de treinamento para a predição de UM's com menores expressões territoriais.

Tabela 35: Comparativo da classificação na fase de treinamento do modelo e na validação para os MDS.

| Treinamento do Modelo | Kappa | Exat. Global | Erro Global | ErroUM1 | ErroUM2 | ErroUM3 | ErroUM4 |
|-----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|
| MDS1 | 0,910 | 94,47 | 5,53 | 12,61 | 5,38 | 2,15 | 1,98 |
| MDS2 | 0,775 | 85,07 | 14,93 | 17,02 | 17,7 | 15,63 | 9,38 |
| MDS4 | 0,597 | 76,11 | 23,89 | 22,48 | 45,27 | 15,38 | 12,44 |
| Validação (PTV25%) | Kappa | Exat. Global | Erro Global | ErroUM1 | ErroUM2 | ErroUM3 | ErroUM4 |
| MDS1 | 0,679 | 74,62 | 25,38 | 46,67 | 21,05 | 15,63 | 18,18 |
| MDS2 | 0,705 | 78,53 | 21,47 | 53,33 | 26,32 | 6,25 | 0,00 |
| MDS3 | 0,851 | 88,81 | 11,19 | 6,67 | 10,53 | 9,38 | 18,81 |
| MDS4 | 0,710 | 79,04 | 20,96 | 46,67 | 18,42 | 18,75 | 0,00 |

A Figura 59 representa um resumo dos métodos e resultados obtidos no desenvolvimento deste estudo. Sua análise deixa clara a utilização de duas técnicas baseadas apenas no levantamento pedológico (pontos determinados pelo pedólogo ou observações de campo) para MDS1 e MDS2 e a utilização de duas técnicas baseadas na carta pedológica AR (sistema especialista de classificação em árvore e sorteio de pontos de treinamento sobre AR) para o MDS3 e MDS4. A exatidão e índice kappa para as cartas MDS3 e MDS4 foram ligeiramente melhores quando comparadas às MDS1 e MDS2.

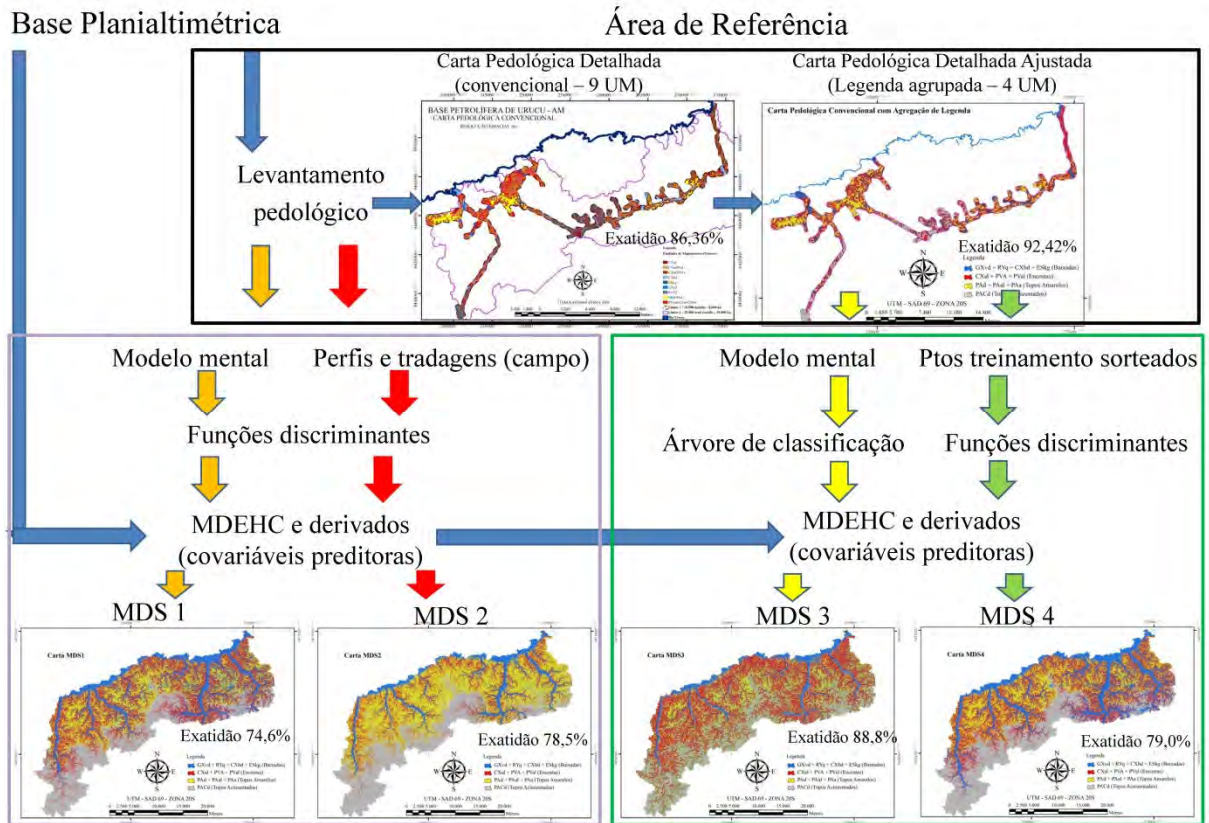


Figura 59: Fluxograma esquemático resumo dos produtos obtidos.

A Figura 60 ilustra o MDS do bloco (polígono envolvente) da BOGPM, em escala 1:50.000 preparado com adaptação da metodologia desenvolvida e aplicada para o mapeamento da carta MDS3. Esta escolha se deu em função dos melhores resultados obtidos (árvore de classificação em um sistema especialista). Embora não tenha sido validada, pode-se observar certa coerência com os MDS1, MDS2, MDS3 e MDS4. Não foram executadas, mas poderiam perfeitamente ser aplicadas funções discriminantes treinadas utilizando qualquer carta semi-detalhada (1:25.000) para o estabelecimento de funções discriminantes capazes de descrever os solos em todo o polígono mapeado. A diferença seria a ausência das covariáveis predictoras dependentes de modelos hidrológicamente consistentes para sua concepção.

A consideração feita no parágrafo anterior deixa evidente uma limitação quanto às metodologias utilizadas, pois, para o mapeamento digital com a acurácia obtida no MDS1, MDS2, MDS3 e MDS4, é extremamente importante a utilização de modelos numéricos de terreno hidrológicamente consistentes, que, para tal, dependem de uma rede de drenagem interconectada, com orientação no sentido nascente-exutório e com identificação exata dos exutórios de cada bacia considerada. É notório que a seleção de covariáveis com o método stepdisc apenas indica as variáveis com maior poder discriminante, ficando a critério do

especialista a decisão final de quais variáveis efetivamente serão utilizadas para as funções discriminantes. Dessa forma, é possível gerar funções discriminantes utilizando outras combinações de covariáveis, porém não sem prejuízos em termos de poder discriminante em função da não utilização de covariáveis com forte influência na distribuição das UM's.

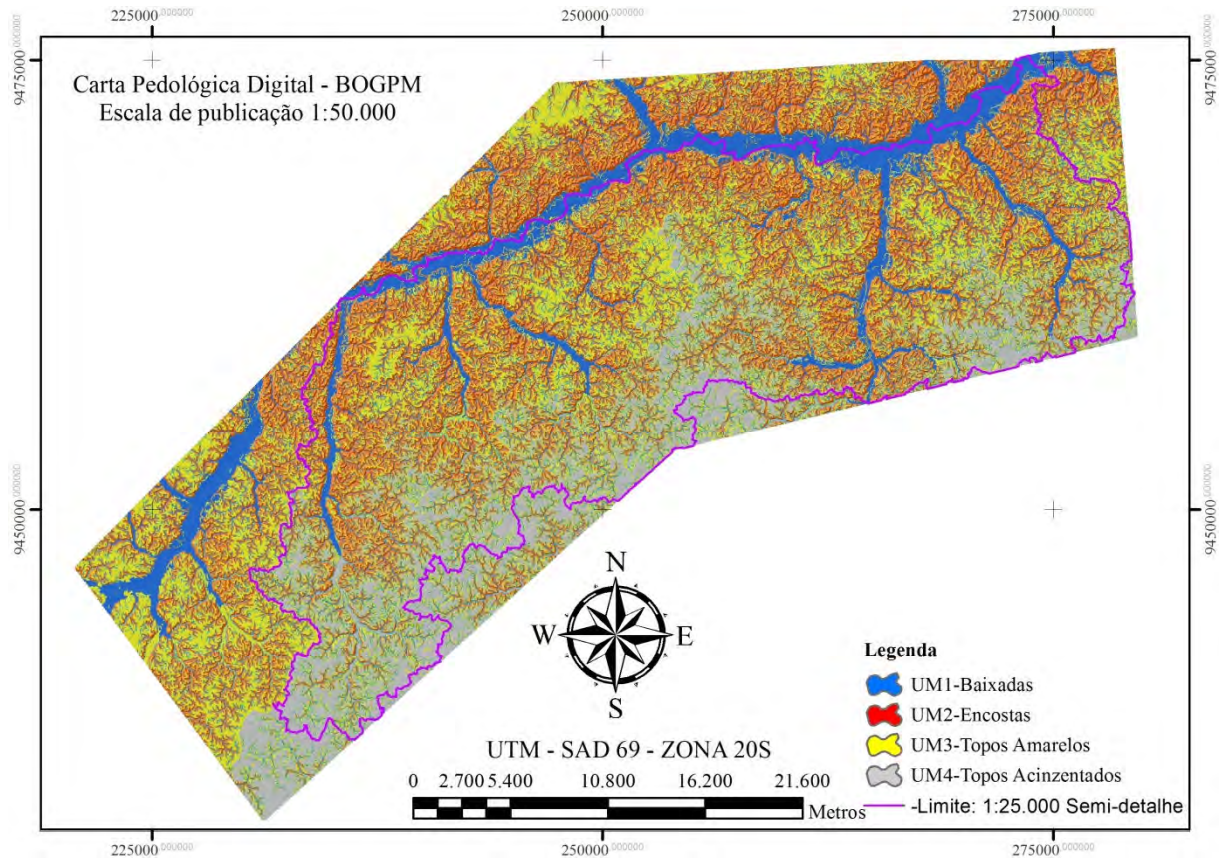


Figura 60: Carta Pedológica Digital do bloco da BOGPM, escala 1:50.000 e área de 116.000 ha.

Especificamente, a covariável comprimento de drenagem à jusante foi a terceira variável mais importante para o MDS1, 2 e 4, onde representou aproximadamente 30% do poder discriminante. Essa covariável também foi fundamental para a separação das UM3 e UM4 na carta MDS3.

Na confecção da carta, a covariável comprimento de drenagem à jusante, dependente de modelo hidrológico, foi substituída por um raster criado por álgebra de mapas em ambiente ArcGIS 9.3 que atribuiu valor 1 a todos os pixels com valor acima de 1.500 m para a covariável comprimento de drenagem à jusante e também todas as regiões contíguas e análogas (correlação visual do pedólogo) às cabeceiras imperfeitamente drenadas das bacias hidrográficas.

Como este MDS não pode ser validado, a não ser que a operação fosse feita com os mesmos pontos de teste utilizados para a validação das cartas MDS1, MDS2, MDS3 e MDS4, o que fatalmente levaria aos mesmos resultados obtidos na validação da carta MDS3, pode-se considerar esta carta como um MDS preliminar a ser publicado em escala 1:50.000, que pode e deve ser validado no futuro, com incursões a algumas clareiras remotas existentes na floresta, a bordo de helicóptero ou por via fluvial a bordo de voadeiras, com incursões na mata. Como tal validação não foi parte dos objetivos deste estudo, foi adaptada e aplicada apenas a metodologia utilizada no MDS3.

4.2.7 Análise geral de custos para elaboração cartas pedológicas

As operações de levantamento e mapeamento detalhado convencional dos solos tiveram a duração aproximada de 16 meses, sendo 9 meses de levantamento, análise e classificação, 4 meses de operações de mapeamento (escritório) e 3 meses de validação. O investimento para o MCS (8.000ha) foi de aproximadamente R\$600.000,00 (R\$75,00/ha mapeado) com forte exposição da equipe a intempéries e riscos ambientais locais. Todos estes fatores explicam a falta de investimento em mapas pedológicos atualmente. O MDS na escala 1:25.000 (73.000 ha) foi executado em 12 meses de trabalho, com um investimento aproximado de R\$200.000,00, que, somado ao custo do MCS, perfaz um total de R\$800.000,00 (R\$11,00/ha mapeado). Se a mesma análise for aplicada à área de todo bloco da BOGPM (116.000ha), cujo mapeamento (expansão do mapa MDS3 para a área total) durou 2 meses (R\$20.000), chega-se à relação de R\$7,00/ha mapeado. É importante destacar que os valores apresentados para o MDS do bloco da BOGPM não consideraram o custo adicional de campanhas de campo para validação do mesmo.

Essa análise, sugere que a utilização de áreas de referência para posterior desenvolvimento de algoritmos em MDS reduz o custo de produção das cartas em aproximadamente 10 vezes. Diante desta constatação, o grande desafio é utilizar as poucas informações detalhadas existentes para o mapeamento digital preliminar de grandes áreas em regiões com fatores de formação semelhantes.

5 CONCLUSÕES

a - Com base na carta pedológica convencional e as covariáveis derivadas do modelo digital de terreno, foi possível utilizar o método da área de referência para a predição automática e supervisionada dos solos da Base de Operações Geólogo Pedro de Moura.

b - As metodologias utilizadas mostraram-se úteis, para o mapeamento digital de solos da área estudada, com boa acurácia, independente dos modelos utilizados no desenvolvimento. Os resultados sugerem que os procedimentos executados são promissores, podendo ser testados e aplicados para a predição de solos em outras áreas da formação Solimões, em escalas de 1:25.000 ou menores.

c - O classificador desenvolvido com base em árvore de classificação em um sistema especialista apresentou maior acurácia de classificação do que os classificadores desenvolvidos com base em funções discriminantes.

d - Tomando por base a necessidade do estabelecimento das unidades de mapeamento dos solos da área de estudo, continua sendo essencial, para a execução do mapeamento digital de solos, a presença do pedólogo com conhecimentos sobre a área e campanhas de campo, para investigação e validação da carta digital. Esse processo envolve certa subjetividade, implícita no processo de composição das UM's e no estabelecimento do modelo conceitual das relações solo-paisagem.

e - Embora as acurácias das cartas digitais MDS2 e MDS4 não tenham sido as maiores, foram satisfatórias. Assim, os resultados demonstram que é possível extrair regras de mapeamento a partir de áreas de referência, sem a intervenção direta do pedólogo (apenas supervisão), permitindo a automatização do processo.

f - Embora a área de referência utilizada seja bastante representativa da região da formação Solimões, ainda não se podem utilizar diretamente os algoritmos desenvolvidos nesse estudo para mapear áreas mais distantes do bloco. Isso se deve ao fato de que cada região apresentará valores específicos das covariáveis do relevo, conseqüentemente os resultados da aplicação dos algoritmos podem não corresponder à classificação esperada. Portanto, o conhecimento aqui gerado deve ser adaptado para cada local novo a ser mapeado na Formação Solimões.

g - Para a confecção de mapas preliminares, recomenda-se a aplicação das técnicas baseadas no conhecimento do pedólogo (MDS1 e/ou MDS3) adaptada às condições locais. Em seguida, com os pontos de observação de solos no local a ser mapeado, a técnica utilizada nos MDS2 e/ou MDS4 poderá ser aplicada para a elaboração da carta de solos definitiva da região. A mesma consideração é válida para eventuais detalhamentos (aumento da escala) da carta existente para a área.

h - A análise de custos de mapeamento desenvolvida neste trabalho mostrou grande vantagem da utilização de mapeamento digital de solos com técnicas de área de referência, se comparada aos custos do MCS.

i - As funções discriminantes foram capazes de prever a distribuição dos solos da Formação Solimões, independente da forma de obtenção da amostra de treinamento, sendo, porém, necessária a utilização de um número maior de pontos de treinamento para a discriminação de unidades de mapeamento com menores expressões territoriais.

j - O uso da exatidão global e índice Kappa nem sempre é suficiente para análise de acurácia dos mapas, sendo recomendável a consideração dos erros em cada unidade de mapeamento, de acordo com a finalidade do trabalho.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARATA, C. F. & CAPUTO, M. V. Geologia do petróleo da bacia do solimões. O “estado da arte”. 4º PDPETRO, Campinas, SP. 21-24 out. 2007
- BISPO, P. C.; VALERIANO, M. M.; KUPLICH, T. M. Variáveis geomorfométricas locais e sua relação com a vegetação da região do interflúvio Madeira-Purus (AM-RO). *Acta Amazonica*, v. 39, n. 01, p-81-90, 2009.
- BIRKELAND, P.W. Soils and geomorphology. New York: Oxford University Press, 1984. 430 p.
- BOCKHEIM, J.G.; GENNADIYEV, A.N.; HAMMER, R.D.; TANDARICH, J.P. Historical development of key concepts in pedology. *Geoderma*, v.24, p. 23-36, 2005.
- BRASIL. Departamento Nacional da Produção Mineral. Projeto RADAMBRASIL. Folha SB. 20 Purus: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro, 1978. 561p.,+ mapas. (Levantamento de Recursos Naturais, 17).
- BREIMAN, L.; FRIEDMAN, J. H.; OLSHEN, R. A.; STONE, R. A. **Classification and regression trees (CART)**. Belmont, CA: Wadsworth International, 1984. 358p.
- BRIGGS, D. J. & SHISHIRA, E. K. **Soil variability in geomorphologically defined survey units in the Albudeite area of Murcia Province**, Spain. In: Jungerius, P.D. 76 (ed.). Soils and geomorphology (Catena supplement no 6). Braunschweig: Catena Verlag, 1985. cap. 2, p.69-84.
- BRUS, D.J.; KEMPEN, B.; HEUVELINK, G.B.M. Sampling for validation of digital soil maps. *European Journal of Soil Science*, v. 62, n. 3, p. 1365-2389, 2011.
- BUSSAB, W.O; MORETTIN, P.A. Estatística Básica. Editora Atual. Quarta edição. São Paulo. 1981.
- BURROUGH, P.A.; BECKETT, P.H.T.; JARVIS, M.G. The relation between cost and utility in soil survey. *Journal of Soil Science* 22, 368–81. 1971.
- BURROUGH, P. A. **Principles of geographical information systems of land resources assesment**. Francis & Taylor, 1986. 185p.
- CAMPOS, M. C. C.; CARDOZO, N. P.; MARQUES JÚNIOR, J. Modelos de paisagem e sua utilização em levantamentos pedológicos. *Revista de Biologia e Ciências da Terra*, v.06, n.01, p.104-114, 2006.
- CARVALHO JÚNIOR, W.; FERNANDES FILHO, E.I.; VIEIRA, C.A.O.; CHAGAS, C.S. Geomorphometric attributes used to soil-landscapes supervised classification of mountainous areas. In: 2nd Global Workshop on Digital Soil Mapping. 4-7 July, 2006, Rio de Janeiro: Embrapa Solos. Anais. CD-Rom.
- CHAGAS, C. da S. **Mapeamento digital de solos por correlação ambiental e redes neurais em uma bacia hidrográfica no domínio de mar de morros**. 223 f. Tese (Doutorado em solos e nutrição de plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.
- COELHO, R. M. LEPSCH, I. F.; MENK, J.R. F. Relações solo-relevo em uma encosta com transição arenito-basalto em Jaú (SP). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.18, p. 125-137, 1994.

- CONGALTON, R.G. & MEAD, R. A. A quantitative method to test for consistency and correctness in photointerpretation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v.49, p.69-79, 1983.
- CONGALTON, R.G. A comparison of five sampling schemes used in assessing the accuracy of land cover/land use maps derived from remotely sensed data. Blacksburg, Virginia Polytechnic Institute and State University. 1984. 146 p. (Tese PhD.)
- CRIVELENTI, R.C. Mineração de dados para inferência da relação solo-paisagem em mapeamentos digitais de solos. Dissertação. Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical. Campinas: Instituto Agrônômico, 2009. 107 p.
- DANIELS, R.B.; GAMBLE, E.F.; CADY, J.G. The relation between geomorphology and soil morphology and genesis. *Adv. Agron.* v. 23, p. 51-87, 1971.
- DANIELS, R.B. & HAMMER, R.D. *Soil geomorphology*. New York, John Wiley & Sons Inc, 1992. 236p.
- DALRYMPLE, J. B.; BLONG, R. J.; CONACHER, A. J. A hypothetical nine unit landsurface model. *Zeitschrift Für Geomorphologie*, v. 12, p. 60-76, 1968.
- DIKAU, R. The application of a digital relief model to landform analysis in geomorphology. In: RAPER, J. (Ed.). **Three dimensional applications in geographic information systems**. New York: Taylor and Francis, p.51-77, 1989.
- DOORNKAMP, J.C.; KING, C.A.M. *Numerical analysis in geomorphology: An introduction*. London: Edward Arnold Ltd, 1971. 372p.1
- DOKOUCHAEV V.V. **Le Chernozem Russe**. St. Pétersburg, 1883.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Procedimentos Normativos de Levantamentos Pedológicos**. Brasília, 1995. 116p.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 412p. 1999.
- EMBRAPA, *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 3ª edição, revisada e ampliada – Brasília, DF. 315 p., 2013.
- FISHER, R.A. The use of multiple measurements in taxonomic problems. *Annals of Eugenics*, v.7, p.179-188, 1936.
- FONSECA, L.M.G. *Processamento digital de imagens*. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2000. 105p. (Relatório técnico).
- FAVROT J.C., Pour une approche raisonnée du drainage agricole en France. La méthode des secteurs de référence. *C.R. Acad. Agric.*, 716-723. 1981.
- GALLANT, J. C. & WILSON, J. P. Primary topographic attributes. In: WILSON, J. P. & GALLANT, J. C. (Eds.). *Terrain Analysis: Principles and applications*. New York: John Wiley, p.51-85, 2000.
- GESSLER, P.E.; MOORE, I.D.; MCKENZIE, N.J.; RYAN, P.J. Soil-landscape modeling and spatial prediction of soil attributes. Special issue: Integrating GIS and environmental modeling. *International Journal of Geographical Information Systems*, London, v.9, n.4, p.421-432, 1995.

GONG, P. & HOWARTH, P. Frequency-Based Contextual Classification and Gray-Level Vector Reduction for Land-Use Identification, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Washington, v.58, n.4, p.425, 1992.

HALL, G. F. Pedology and geomorphology. In: WILDING, L. P.; SMECK, N. E.; HALL, G. F. (Eds.). *Pedogenesis and soil taxonomy. II. The soil orders. Developments in soil science.* v.11b, p.118-140, New York: Elsevier, 1983.

HARMSWORTH, G.R.; Dymond, J.R.; McLeod M. 1995: Automated mapping of soils in hilly terrain using DTMS: A New Zealand Example. *ITC Journal*, Netherlands, 1995-2, Pp. 87-94.

HENGL, T.; GRUBER, S.; SHRESTHA, D. P. Digital terrain analysis in Ilwis: lecture notes and user guide. Enschede: International Institute for Geo-information Science and Earth Observation – ITC, 2003. 56p.

HERMUCHE, P.M.; GUIMARÃES, R.F.; CARVALHO, A.P.F.; MARTINS, E.S.; FUCKS, S.D. CARVALHO JUNIOR, O.A.; SANTOS, N.B.F.; REATTO, A. Morfometria como suporte para elaboração de mapas pedológicos: I. Bacias hidrográficas assimétricas. Planaltina, DF. Embrapa Cerrados, 2002.

HERMUCHE, P. M.; ANDRADE, A. C.; GUIMARÃES, R. F.; LEAL, CARVALHO JÚNIOR, O. A.; MARTINS, E. S. Compartimentação Geomorfológica em escala regional da bacia do rio Paraná. In: Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, X, 2003, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro : SBGFA, 2003.

HOLSHEIMER, M. & SIEBES, A. Data Mining: the search for knowledge in databases. Disponível por FTP anônimo em ftp.cwi.nl no arquivo /pub/CWIreports/AA/CS-R9406.ps.Z, 1994.

ILLÉS, G.; KOVÁCS, G. & HEIL B.: Comparing and evaluating digital soil mapping methods in a Hungarian 2011. Forest reserve. *Canadian Journal of Soil Science*, 91(4): 615-626.

IPPOLITI-RAMIRO, G. A.; COSTA, L. M.; SCHAEFER, C. E. G. R.; FERNANDES FILHO, E. I.; GAGGERO, M. R. Análise digital do terreno: ferramenta na identificação de pedoformas em microbacia na região de "Mar de Morros" (MG) **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, n.2, p. 269-276, 2005.

JENNY, H. **Factors of soil formation:** a system of quantitative pedology. New York, London: McGraw-Hill, 1941, 281 p.

JOHNSON, R. A. & WICHERN, D. W. Applied multivariate statistical analysis. 4th ed. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice-Hall, 1999, 815 p.

KHATTREE, R. & NAIK, D.N. Multivariate data reduction and discrimination with SAS software. Cary, NC, USA: SAS Institute Inc., 2000. 558 p.

KHOURY JR, J.K. **Desenvolvimento e avaliação de um sistema de visão artificial para classificação de madeira serrada de eucalipto.** 2004. 101 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2004.

KLINGEBIEL, A.A.; HORVATH, E.H.; MOORE, D.G. & REYBOLD, W.U. Use of slope, aspect, and elevation maps derived from digital elevation model data in making soil surveys. In: REYBOLD, W.U. & PETERSEN, G.W. *Soil survey techniques.* Madison, Soil Science Society of America, 1987. p.77-90 (SSSA Special Publication, 20)

- LACHENBRUCH, P. A. & MICKEY, M. R. Estimation of error rates in discriminant analysis. *Technometrics*, v. 10, n. 1, p. 1–11, 1968.
- LAGACHERIE Ph. Formalisation des lois de distribution des sols pour automatiser la cartographie pédologique à partir d'un secteur pris comme référence. Thèse de doctorat, Science du Sol. Université de Montpellier. Montpellier INRA, 175 p. 1992.
- LAGACHERIE, P.; LEGROS, J. P.; BURROUGH, P. A. A soil survey procedure using the knowledge of soil pattern established on a previously mapped reference area. *Geoderma*, v. 65, n. 3-4, p. 283-301, 1995.
- LAGACHERIE, P., & HOLMES, S., Addressing geographical data errors in a classification tree for soil unit prediction. *International Journal of Geographical Information Science*, 11, 183–198. 1997.
- LAGACHERIE, P. & VOLTZ, M. Predicting soil properties over a region using sample information from a mapped reference area and digital elevation data: a conditional probability approach. *Geoderma*. v.97, p. 187–208, 2000.
- LAGACHERIE, P. & McBRATNEY, A. B. Spatial soil information systems and spatial soil inference systems: perspectives for digital soil mapping. In: *Digital Soil Mapping: An Introductory Perspective*. Montpellier and Sydney, p. 1-3, 2007.
- LAGACHERIE, P. Digital Soil Mapping: A State of art. In.: HARTEMINK, A.E.; McBRATNEY, A.; MENDONÇA-SANTOS, M. DE L. (Ed.), *Digital Soil Mapping with Limited Data*. New York: Springer, 2008, p.3-14
- LANDIS, J. R. & KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, v.33, p.159-174, 1977.
- LARK, R. M. Soil–landform relationships at within-field scales: an investigation using continuous classification. ***Geoderma***. Amsterdam, v.92, p. 141–165, 1999.
- LIU, J. & ZHU, A. Mapping with Words: A new approach to automated digital soil survey. *International Journal of Intelligent Systems*, v.24, p.293-311, 2009.
- LOPEZ, L. R. Pedologia quantitativa: espectrometria VIS-NIR-SWIR e mapeamento digital de solos. 2009, Dissertação (Mestrado). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiróz”, Piracicaba, 2009
- MACHADO, M.L. Caracterização de agroecossistemas cafeeiros da zona da mata de Minas Gerais, usando sensoriamento remoto e sistemas de informações geográficas. Dissertação de Mestrado: Universidade Federal de Lavras MG, 2002. 137 p.
- McBRATNEY, A.B; MENDONÇA SANTOS, M.L.; MINASNY, B. On digital soil mapping. *Geoderma*. 117 , 3– 52. 2003.
- McKENZIE, N.J. & AUSTIN, M.P. A quantitative Australian approach to medium and small scale surveys based on soil stratigraphy and environmental correlation. *Geoderma*, v.57, p.329-355, 1993.
- McKENZIE, N. J. & RYAN, P.J. Spatial prediction of soil properties using environmental correlation. *Geoderma* 89 67-94. 1999.
- MacMILLAN, R. A. Experiences with Applied DSM: Protocol, Availability, Quality and Capacity Building. In.: HARTEMINK, A.E.; McBRATNEY, A.; MENDONÇA-SANTOS,

- M. DE L. (Ed.), Digital Soil Mapping with Limited Data. New York: Springer, 2008, p.113-135.
- MENDIONDO, E. M.; COLLISCHONN, W.; BULHÕES MENDES, C. A. Modelos numéricos do terreno e suas aplicações a bacias hidrográficas 2: Obtenção de atributos. In: XVII Congreso Nacional del Agua / II Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur. 1998.
- MENDONÇA-SANTOS, M. L. & SANTOS, H. G. **Mapeamento digital de classes e atributos de solos de métodos, paradigmas e novas técnicas**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA, Rio de Janeiro, Documentos 55, 19p. 2003.
- MONSERUD, R. A. & LEEMANS, R. Comparing global vegetation maps with the Kappa statistic. *Ecological Modelling*, 62, 275-293. 1992.
- MONTGOMERY, D.R. Predicting landscape-scale erosion using digital elevation models. **Comptes Rendus Geoscience**. v. 335, p. 1121-1130, 2003.
- MOORE, I. D.; GRAYSON, R.B.; LADSON, A. R. Digital terrain modeling – a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrology Process*. B.5,n.1,p.3 – 30, 1991.
- MOORE, I.D.; GESSLER, P.E.; NIELSEN, G.A.; PETERSON, G.A. Soil attribute prediction using terrain analysis. *Soil Science Society of American Journal*. v.57, p. 443-452, 1993.
- MULLA, D.J. & MCBRATNEY, A.B. Soil spatial variability. In: SUMMER, M.E. *Handbook of soil science*, New York, p. A321-A351, 1999.
- MUÑOZ, V. A. Análise geomorfométrica de dados SRTM aplicada ao estudo das relações solo-relevo. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009. 112p. (INPE-15796-TDI/1531). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- NIZEYIMANA, E. & BICK, T. J. Soil and soil-landscape relationship in the North Central Region of Rwanda, East-Central Africa. **Soil Science**, v.152, n.03, p.225-236, 1992.
- PARK, S.J. & BURT, T.P. Identification and characterization of pedogeomorphological processes on a hillslope. **Soil Science Society of American Journal**. v.66, p. 1897- 1910, 2002.
- PENNOCK, D. J.; ZEBARTH, B. J.; DE JONG, E. Landform classification and soil distribution in hummocky terrain, Saskatchewan, Canada. **Geoderma**, v.40, p.297-315, 1987.
- PETROBRAS. Centro de Pesquisa da Petrobras (CENPES). **Mapa detalhado de Solos do entorno da malha viária da Província Petrolífera de Urucu/Coari-AM**. Convênio UFRRJ/PETROBRAS/EMBRAPA/INPA/UFAM, 2010.
- RAMOS, V. M. A modelagem matemática no estudo dos movimentos de massa: aplicação de um modelo de previsão de áreas susceptíveis a escorregamentos rasos na área do subúrbio ferroviário de Salvador (BA). 2003. 91p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília, Brasília.
- RIBEIRO, S. R. A.; CENTENO, J. A. S. (a) Clasificación del uso del suelo utilizando redes neurales y el algoritmo MAXVER. **Innovación**, año 14, n.1. p. 55-60. Antofagasta Chile. 2002.
- REGAZZI, A.J. **Análise multivariada**, notas de aula INF 766, Departamento de Informática da Universidade Federal de Viçosa, v.2, 2000.

- RESENDE, M.; CURTI, N.; REZENDE, S.B.D.; CORRÊA, G.F. Pedologia: Base para distinção de ambientes. Viçosa: NEPUT, 1995. 304p.
- ROSSITER, D. G. Digital soil resource inventories: status and prospects. *Soil Use and Management*, v.20, p.296-301, 2004
- ROSSITER, D. G. Assessing the thematic accuracy of area-class soil maps. ITC: Enschede, 2001. Disponível em: <http://www.itc.nl/~rossiter/docs-AccuracySoilMaps_Preprint31Aug2001.pdf> Acesso em: 17 de novembro de 2012
- RUHE, R.V. Geomorphic surfaces and the nature of soils. *Soil Science*, v. 82, p. 441-455, 1956.
- SANTOS, M. **A natureza do espaço: técnica e tempo – razão e emoção**. São Paulo: Edusp, 2002. 384p.
- SANTOS, R.D.; LEMOS, R. C.; SANTOS, H. G.; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C. Manual de descrição e coleta de solo no campo. 5. ed. rev. e ampl. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; Rio de Janeiro: EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 2005. 100p.
- SARMENTO, E. C. Comparação entre quatro algoritmos de aprendizagem de máquina no mapeamento digital de solos no Vale dos Vinhedos, RS, Brasil 2010. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- SAS Institute Inc. **SAS/STAT Software Release 8.0**. Cary, NC: SAS Institute Inc., 1999.
- SILVA, C.C., Mapeamento digital de classes de solo: Aplicação de metodologia na folha Botucatu e validação de campo. Dissertação (Mestrado). Instituto Agrônomo de Campinas, SP, 117 f, 2012.
- SCHOORL, J. M., SONNEVELD, M. P. W., VELDKAMP, A. Three-dimensional landscape process modeling: The effect of DEM resolution. *Earth Surface Processes Landforms*, v.25, n.9, p.1025-1034, 2000.
- SILVA, E. F. Comparação de mapas de solos produzidos em escalas e épocas distintas. 2000. Tese (Doutorado). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- SILVEIRA, C.T. **Ánálise digital do relevo na predição de unidades preliminares de mapeamento de solos: integração de atributos topográficos em sistemas de informações geográficas de redes neurais artificiais**. Curitiba PR, 153f. 2010.
- SKIDMORE, A.K., WATFORD, F., LUCKANANURUG, P., RYAN, P.J. An operational GIS expert system for mapping forest soils. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 62, 501–511, 1996.
- SIRTOLI, A. E. **Mapeamento de solos com auxílio da geologia, atributos do terreno e índices espectrais integrados por redes neurais artificiais**. 2008. 96f. Tese Doutorado em Geologia – Curso de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal do Paraná.
- SIRTOLI, A. E.; SILVEIRA, C. T.; MONTOVANI, L. E.; C. T.; SILVA, C. R.; RIBEIRO, S. R. A. OKA-FIORI, C. Atributos topográficos secundários no mapeamento de pedofomas. *Geociências*, v.21, n.1, p.63-77, 2008a.

- SIRTOLI, A. E.; SILVEIRA, C. T.; MONTOVANI, L. E.; SIRTOLI, A. R. A.; OKA-FIORI, C. Atributos do relevo derivados de modelo digital de elevação e suas relações com solos. *Scientia agraria*, v.9, n.3, p.317-329, 2008b.
- SOUZA, F. T. Predição de escorregamentos das encostas do município do Rio de Janeiro através de técnicas de mineração de dados. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio de Janeiro
- TEN CATEN, A.; DALMOLIN, R. S. D.; RUIZ, L. F. C.; SEBEM, E.; PEREIRA, R. S. P. Mapeamento digital de solos através da aplicação de componentes principais em modelos logísticos. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, RN, 2009. **Anais XIV**. INPE., 2009. p. 7677-7684.
- TEN CATEN, A. Mapeamento digital de solos: metodologias para atender a demanda por informação espacial em solos. 2011. 108f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS. 2011.
- TEN CATEN, A.; DALMOLIN, R.S.D.; PEDRON, F.A.; MENDONÇA-SANTOS, M.L. Extrapolação das relações solo-paisagem a partir de uma área de referência. *Ciência Rural*, v.41, p.812-816, 2011.a
- TERAMOTO, E.R.; LEPSCH, I.F.; VIDAL-TORRADO, P. Relações solo, superfície geomórfica e substrato geológico na microbacia do ribeirão Marins (Piracicaba-SP). **Science Agricola**. v.58, p. 361-371, 2001.
- TROEH, F. R. Landform equations fitted to contour maps. *Soil Science Society American Journal*, v.263, p. 616-27, 1965.
- VALERIANO, M.M. Curvatura vertical de vertentes em microbacias pela análise de modelos digitais de elevação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 7, n. 3, , p. 539-546, 2003.
- VARELLA, C.A.A., Estimativa da produtividade e do estresse nutricional da cultura do milho usando imagens digitais. Tese (doutorado), Universidade Federal de Viçosa – MG. 92f. 2004.
- VIDAL-TORRADO, P. & LEPSCH, I. F. Relações material de origem / solos e pedogênese em uma sequência de solos predominantemente argilosos e latossólicos sobre Psamitos na Depressão Periférica Paulista. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.357-369, 1999.
- WALTER, C., SCHVARTZ, C., CLAUDOT, B., BOUEDO, T., AUROUSSEAU, P., 1997. Synthèse nationale des analyses de terre. II. Descriptions statistique et cartographique de la variabilité des horizons de surface des sols cultivés. *Etude et Gestion des Sols* 3, 205–219.
- WOOD, J. **The geomorphological characterisation of digital elevation models**. Leicester, UK, 1996. 185p. PhD Thesis - University of Leicester. Disponível em: <http://www.soi.city.ac.uk/~jwo/phd>.
- ZHU, A.X. A personal construct-based knowledge acquisition process for natural resource mapping using GIS. *Int. J. Geographic Information Science*. v.13, p.119– 141, 1999.
- ZHU, A.X ; HUDSON, B; BURT, J.; LUBICH, K.; SIMONSON, D. Soil Mapping Using GIS, Expert Knowledge, and Fuzzy Logic. **Soil Science Society of American Journal**. v.65, p. 885-894, 2001..

7 APÊNDICE

Unidades de Mapeamento da Carta pedológica Convencional

No trabalho de mapeamento dos solos da Base de Operações Geólogo Pedro de Moura (BOGPM), foram distinguidas 9 unidades de mapeamento, conforme Tabela abaixo. Dentre as nove classes, 5 são unidades simples e 4 referem-se a complexos de solos. Os complexos encontrados refletem a complexidade da distribuição espacial dos solos da região.

Unidades de mapeamento encontradas no BOGPM

| Unidade de mapeamento (UM) | Área (km ²) | Área (ha) | % |
|--|-------------------------|---------------|--------------|
| UM1 – Unidade Simples (GXvd) | 0.917 | 91.7 | 1.2 |
| UM2 - Unidade Simples (ESKg) | 0.110 | 11.0 | 0.1 |
| UM3 – Unidade Simples (CXbd) | 15.290 | 1529.0 | 19.2 |
| UM4 – Complexo (PVAal - CXal - CXbd) | 17.039 | 1703.9 | 21.4 |
| UM5 - Unidade Simples (CXal ₁) | 14.917 | 1491.7 | 18.7 |
| UM6 - Complexo (CXal – PVAa) | 2.979 | 297.9 | 3.7 |
| UM7 - Complexo (CXal – PAd) | 10.731 | 1073.1 | 13.5 |
| UM8 - Complexo (PAal – PAd) | 13.949 | 1394.9 | 17.5 |
| UM9 - Unidade Simples (PACd) | 3.733 | 373.3 | 4.7 |
| Area total mapeada | 79.665 | 7966.5 | 100.0 |

U.M.1 – Unidade de mapeamento simples GXvd

Unidade de mapeamento simples referente à classe de solo GLEISSOLO HÁPLICO Ta Distrófico típico A moderado (GXvd). Ocorrem inclusões de CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Distrófico típico A moderado muito mal drenado hiperdistrófico (CXvd), NEOSSOLO FLÚVICO Tb Distrófico típico A moderado extremamente drenado (RYbd) e ARGISSOLO AMARELO Distrófico típico A moderado imperfeitamente drenado (PAd).

Descrição do ambiente da unidade de mapeamento GXvd.

Essa unidade de mapeamento se restringe às áreas das calhas dos principais igarapés e terraços no entorno do curso d'água principal. A expressão territorial dessa unidade de mapeamento na área mapeada é relativamente pequena (91.7 ha - 1.2%). Embora seja comum a ocorrência de baixadas e igarapés ao longo da base de Urucu, a maioria desses locais é comumente preenchida com sedimentos trazidos pelos processos erosivos naturais, tornando as baixadas entulhadas. O acúmulo de sedimentos em um ambiente úmido, no entanto, nem sempre é suficiente para a formação de Gleissolos em grandes extensões (sequência de horizontes A-AC-Cg). Essa unidade ocorre na calha dos igarapés Tartaruga, Onça e Tamanduá e também em um grande tributário do igarapé Tartaruga. O principal igarapé onde se encontra tal unidade de mapeamento é o do Córrego da Onça, próximo ao pólo Arara.

As classes de solo referentes aos perfis representativos das inclusões são exemplos de solos que ocorrem ao longo das baixadas de maior vazão onde ocorrem os Gleissolos, e geralmente se desenvolvem em pontos de cota relativamente mais elevada, em pequenos platôs e barrancos ao longo do curso d'água principal. Em função da pequena expressão territorial desses ambientes, associados às baixadas, estas classes não são discretizadas na escala de publicação da carta.

U.M.2 – Unidade de mapeamento simples ESKg

Unidade de mapeamento simples referente à classe de solo ESPODOSSOLO FERRIHUMILÚVICO Hidromórfico dúrico (ESKg). Ocorrem inclusões de GLEISSOLO HÁPLICO Ta Distrófico típico A moderado (GXvd), CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Distrófico típico A moderado muito mal drenado hiperdistrófico (CXvd) e NEOSSOLO FLÚVICO Tb Distrófico típico A moderado extremamente drenado (RYbd).

Descrição do ambiente da unidade de mapeamento ESKg.

Essa unidade de mapeamento se restringe ao entorno do curso d'água principal do Igarapé Tamanduá. O ambiente é caracterizado pelo acúmulo de sedimentos arenosos (areia fina), com presença de sequência de horizontes A-E-EB-Bhs. O horizonte Bhs ocorre na profundidade média de 1,0 metro, formando uma camada adensada com forte cimentação devido à concentração de colóides de natureza orgânica e provavelmente óxidos de ferro e alumínio. Tal camada causa o impedimento da drenagem (Ortstein). A expressão territorial dessa unidade de mapeamento na área mapeada é relativamente pequena (11ha – 0.1%). Embora não tenham sido encontrados, durante a sondagem de campo na região do Igarapé Tamanduá, é provável a ocorrência das classes de solos Gleissolo, Cambissolo, Neossolo e Argissolo Amarelo.

U.M.3 – Unidade de mapeamento simples CXbd

Unidade de mapeamento simples representada por CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico A moderado moderadamente drenado textura média. Inclusão de NEOSSOLO FLÚVICO Psamítico típico A moderado eutrófico (RYq) e ARGISSOLO AMARELO Alítico típico A moderado imperfeitamente drenado (PAal).

Descrição do ambiente da unidade de mapeamento CXbd.

A unidade de mapeamento CXbd ocorre em toda a base de Urucu, associada às áreas de baixada mais assoreadas com sedimentos, e em grande parte do entorno de linhas de drenagem mais encaixada. Engloba as terras com perfis descritos, em sua maioria, em situação de baixada e de terço inferior de encostas com declividade baixa (0-5%). Essa unidade de mapeamento cobre uma área de 1529.0 ha (19.2% da área mapeada). Nesses locais, os sedimentos depositados sob condições de drenagem imperfeita formam predominantemente solos com horizonte B incipiente e de textura média (Franco-arenosa e Franca). A classe de solo CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico A moderado moderadamente drenado textura média é predominante, tendo expressão típica no entorno do Igarapé Tamanduá e no entorno de todas as linhas de drenagem de cursos d'água mais encaixados. A planície aluvial do Igarapé Tamanduá (Lontra e Marta), diferencia-se das planícies dos Igarapés Onça e Veado, por possuírem grau mais avançado de assoreamento e não formarem Gleissolos com expressão territorial possível de ser discretizada na escala de publicação do mapa. Nos pontos de planície aluvial com maior espessura, onde os ciclos de umedecimento e secagem são mais frequentes e avançados, formam-se perfis com horizontes B textural e matizes 7,5YR e 10YR, sendo classificados como ARGISSOLO AMARELO Distrófico típico A moderado imperfeitamente drenado. Nos pontos das planícies aluviais com sedimentos mais arenosos, os perfis apresentam sequência de horizontes A-AC-CA-C, sendo classificado como NEOSSOLO FLÚVICO Psamítico típico A moderado.

U.M.4 – Complexo PVAal - CXal - CXbd

Unidade de mapeamento composta do complexo das classes de solos ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Alítico típico A moderado hiperdistrófico (PVAal - 25%), CAMBISSOLO HÁPLICO Alítico típico A moderado hiperdistrófico (CXal - 20,8%) e CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico A moderado álico (CXbd - 25%). Ocorre a inclusão das classes ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico A moderado álico (PVAd - 12,5%), CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico típico A moderado moderadamente drenado (CXa - 8,3%), ARGISSOLO AMARELO Distrófico típico A moderado álico (PAD - 4,2%) e ARGISSOLO AMARELO Alítico típico A moderado imperfeitamente drenado (PAal - 4,2%).

Descrição do ambiente da unidade de mapeamento.

Essa unidade de mapeamento ocorre nas áreas de encostas com declividade mais acentuada, ao longo de toda área de encostas dos campos de SUC e RUC (entorno da Base, Aeroporto, Porto Urucu, Pólo Arara e próximas ao Porto Hélio). As áreas apresentam declividades entre 6 a 22%, e os perfis estão descritos predominantemente em situação de meia encosta e terço superior de encosta. Os relevos característicos são os ondulados com vales encaixados e entulhados. Os solos apresentam predomínio de cores com matiz 5YR nos horizontes B (inclusive BA). A unidade de mapeamento é composta de uma associação de Argissolos e Cambissolos, uma vez que é comum, sob diferentes situações, a ocorrência de horizontes subsuperficiais diagnósticos B textural (Bt) e B incipiente (Bi), sendo o primeiro mais frequente. Os solos desta unidade de mapeamento são comumente alíticos, distróficos (hiperdistróficos) e bem drenados, diferenciando-se dos solos ocorrentes nos topos das mesmas encostas que apresentam caráter predominantemente alítico ou alumínico. Essa unidade de mapeamento cobre uma área de 1703.9 ha (21,4% da área mapeada). São encontrados nessas unidades de mapeamento as inclusões de PVAd, CXa, PAD e PAal.

U.M.5 – Unidade de mapeamento simples CXal

Unidade de mapeamento simples referente à classe CAMBISSOLO HÁPLICO Alítico típico A moderado hiperdistrófico (CXal). Ocorre a inclusão das classes PVAal, PVAa, PVAd, PVal, PAD, PAa, PAal e RQo.

Descrição do ambiente da unidade de mapeamento CXal.

Essa unidade de mapeamento ocorre nas encostas mais declivosas dos campos de LUC, compreendendo a maior parte das terras no entorno da estrada para Porto Evandro, sobretudo no trecho entre o Igarapés Tamanduá, Lontra e Marta (incluindo o alojamento Papagaio). A unidade de mapeamento é composta de uma associação de Cambissolos e Argissolos, uma vez que é comum, sob diferentes situações, a ocorrência de horizontes subsuperficiais diagnósticos B incipiente (Bi) e B textural (Bt), sendo mais freqüente o primeiro. As áreas com esta unidade de mapeamento apresentam declividade média de 14%, tendo ampla faixa de variação (1-50%), estando os perfis descritos em situação de terço inferior a terço superior de encosta. De forma similar à unidade de mapeamento 4 (UM 4), o relevo característico é o ondulado com vales relativamente mais encaixados e entulhados. Os solos apresentam predomínio de cores com matiz 5YR nos horizontes B (inclusive BA), podendo ser encontrados matizes mais vermelhos (2,5YR-PVd) e mais amarelos (7,5YR - PAD e CXbd). Os solos desta unidade de mapeamento são predominantemente alíticos e bem

drenados. Essa unidade de mapeamento cobre uma área de 1491.7 ha (18,1% da área mapeada).

U.M.6 – Complexo CXal - PVAa

Unidade de mapeamento composta do complexo das classes de solos CAMBISSOLO HÁPLICO Alítico típico A moderado hiperdistrófico (CXal – 50%) e ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Alumínico plúntico A moderado (PVAa 33,3%). Nessa unidade de mapeamento ocorre a inclusão de CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico A moderado álico (CXbd 16,7%).

Descrição do ambiente da unidade de mapeamento CXal - PVAa.

Essa unidade de mapeamento cobre toda área de encostas e topos muito dissecados das microbacias Paca, Macaco e Porto Evandro. A unidade de mapeamento é composta de uma associação de Cambissolos e Argissolos, uma vez que é comum, sob diferentes situações, a ocorrência de horizontes subsuperficiais diagnósticos B incipiente (Bi) e B textural (Bt), sendo mais frequente o primeiro, tornando difícil a discretização das duas classes ao longo das encostas. As áreas com esta unidade de mapeamento apresentam declividade média de 14%, tendo ampla faixa de variação (1-50%), estando os perfis descritos em situação de topo, terço inferior a terço superior de encosta. O relevo forte ondulado e ondulado é característico da região. Os solos apresentam predomínio de cores com matiz 5YR nos horizontes B (inclusive BA), sendo alíticos e alumínicos, sob condições de boa drenagem. Essa unidade de mapeamento cobre uma área de 297.9 ha (3,7% da área mapeada).

U.M.7 – Complexo CXal - PAd

Unidade de mapeamento composta do complexo das classes de solos CAMBISSOLO HÁPLICO Alítico típico A moderado imperfeitamente drenado (CXal – 31,3%) e ARGISSOLO AMARELO Distrófico típico A moderado álico moderadamente drenado (PAd – 25%) . Ocorrem as inclusões das classes ARGISSOLO AMARELO Alítico típico A moderado hiperdistrófico (PAal – 12,5%) , ARGISSOLO AMARELO Alumínico típico A moderado moderadamente drenado (PAA – 12,5%), CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico típico A moderado hiperdistrófico (CXa - 12,5%) e ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Alítico típico A moderado moderadamente drenado (PVAal - 6,2%).

Descrição do ambiente da unidade de mapeamento CXal - PAd.

Essa unidade de mapeamento ocorre amplamente nos topos das colinas mais dissecadas da região do Pólo Arara, Alojamentos Base, Tucano e Vitória Régia, campos de SUC e RUC. A unidade de mapeamento é composta de uma associação de Cambissolos e Argissolos, uma vez que é comum, sob diferentes situações, a ocorrência de horizontes subsuperficiais diagnósticos B incipiente (Bi) e B textural (Bt), sendo mais frequente o primeiro, tornando difícil a discretização das duas classes ao longo das encostas. Os solos apresentam cores com matizes entre 5YR a 10YR, com predomínio dos matizes mais amarelos, sendo esses, predominantemente alíticos e bem drenados.

As áreas com esta unidade de mapeamento apresentam declividade média de 14%, tendo ampla faixa de variação (1-50%), estando os perfis descritos em situação de topo e terço superior de encosta. O relevo plano a suave ondulado é característico. Essa unidade de mapeamento cobre uma área de 1073.1 ha (13.5%).

U.M.8 – Complexo PAal - PAd

Unidade de mapeamento composta do complexo das classes de solos ARGISSOLO AMARELO Alítico típico A moderado moderadamente drenado (PAal – 62,5%) e ARGISSOLO AMARELO Distrófico plúntico A moderado moderadamente drenado (PAd – 37,5%).

Descrição do ambiente da unidade de mapeamento PAal.

A unidade de mapeamento PAd ocorre nas regiões com padrão de relevo plano a suave ondulado dos planaltos aplainados comumente encontrados nas cabeceiras das bacias hidrográficas, com alta densidade de drenagem. A unidade de mapeamento é composta de uma associação de Argissolos, uma vez que é comum, sob diferentes situações, a ocorrência de horizontes subsuperficiais diagnósticos B textural (Bt). Os solos apresentam cores com matizes entre 7,5 a 10YR, sendo estes distróficos e alíticos e com drenagem moderada a imperfeita. As áreas com esta unidade de mapeamento apresentam declividade média de 3 a 5%, estando os perfis descritos em situação de topo a terço inferior de encosta. O relevo plano a suave ondulado é característico. Essa unidade de mapeamento cobre uma área de 1394.9 ha (17,5%).

U.M.9 – Unidade Simples PACd

Unidade de mapeamento referente á classe de solo ARGISSOLO ACINZENTADO Distrófico típico álico A moderado mal drenado (PACd). Ocorre nessa unidade simples as inclusões de ARGISSOLO AMARELO Distrófico típico A moderado álico (PAd), PLANOSSOLO HÁPLICO Arênico A moderado imperfeitamente drenado (SXd) e ESPODOSSOLO HUMILÚVICO Órtico típico A moderado textura média (ESko).

Descrição do ambiente da unidade de mapeamento PACd .

A unidade de mapeamento PACd ocorre nas regiões de planaltos aplainados com elevada densidade de drenagem e baixa declividade (relevo plano). Essa combinação de drenagem e declividade forma regiões com alto índice de umidade e de drenagem relativamente impedida. Essa unidade foi mapeada na região das cabeceiras das microbacias Lontra e Tamanduá, ao longo da estrada para o porto Evandro (campos de LUC). A unidade de mapeamento é composta de uma associação de Argissolos Acinzentados e Amarelos, uma vez que é comum, sob diferentes situações, a ocorrência de horizontes subsuperficiais diagnósticos B textural (Bt). Os solos apresentam, nos horizontes subsuperficiais, cores com matizes 2,5Y, 10B, e 10YR, com valores entre 6 a 8 e croma 1. Os solos são predominantemente mal e imperfeitamente drenados, com baixa saturação de bases (distróficos). As áreas com esta unidade de mapeamento apresentam declividade média de 2%, estando os perfis descritos em situação de topo a baixada. O relevo plano é característico. Essa unidade de mapeamento cobre uma área de 373.3 ha (4.7 %).