



**Universidade Federal do Pará**



**Faculdade de Geologia**



**Instituto de Geociências**

## **TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**RACHEL JERUSA ALVES DE AZEVEDO BEZERRA**

**DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO ÓTICO E SISTEMA DE INFORMAÇÃO  
GEOGRÁFICA APLICADOS EM APOIO AO MAPEAMENTO GEOLÓGICO DE  
TERRENO SEDIMENTAR: REGIÃO DE FILADÉLFIA-TO, OESTE DA BACIA DO  
PARNAÍBA.**

**GEOCIÊNCIAS**  
U F P A

**BELÉM-PARÁ**

**MARÇO-2013**

**RACHEL JERUSA ALVES DE AZEVEDO BEZERRA**

**DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO ÓTICO E SISTEMA DE INFORMAÇÃO  
GEOGRÁFICA APLICADOS EM APOIO AO MAPEAMENTO GEOLÓGICO DE  
TERRENO SEDIMENTAR: REGIÃO DE FILADÉLFIA-TO, OESTE DA BACIA DO  
PARNAÍBA.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Faculdade de Geologia do Instituto de  
Geociências da Universidade Federal do Pará  
– UFPA, em cumprimento às exigências para  
obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Arnaldo Queiroz da  
Silva.

Belém

2013

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFPA

---

B574d Bezerra, Rachel Jerusa Alves de Azevedo

Dados de sensoriamento remoto ótico e sistema de informação geográfica aplicados em apoio ao mapeamento geológico de terreno sedimentar: região de Filadélfia-TO, Oeste da Bacia do Parnaíba / Rachel Jerusa Alves de Azevedo Bezerra; Orientador: Arnaldo Queiroz da Silva – 2013

77 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação em geologia) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Faculdade de Geologia, Belém, 2013.

1. Sensoriamento remoto. 2. SIG. 3. Análise faciológica. 4. Bacia do Parnaíba. I. Silva, Arnaldo Queiroz da, *orient.* II. Universidade Federal do Pará. III. Título.

CDD 22<sup>a</sup> ed.: 621.3678

---

RACHEL JERUSA ALVES DE AZEVEDO BEZERRA


DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO ÓTICO E SISTEMA DE INFORMAÇÃO  
GEOGRÁFICA APLICADOS EM APOIO AO MAPEAMENTO GEOLÓGICO DE  
TERRENO SEDIMENTAR: REGIÃO DE FILADÉLFIA-TO, OESTE DA BACIA DO  
PARNAÍBA.

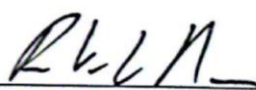
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Faculdade de Geologia do Instituto de  
Geociências da Universidade Federal do Pará  
– UFPA, em cumprimento às exigências para  
obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

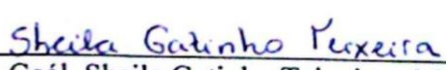
Data de aprovação:     /     /

Conceito:

Banca Examinadora:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Arnaldo Queiroz da Silva– Orientador  
Doutor em Geologia  
Universidade Federal do Pará

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Roberto Vizeu Lima Pinheiro - Membro  
Doutor em Geologia  
Universidade Federal do Pará

  
\_\_\_\_\_  
Geól. Sheila Gatinho Teixeira - Membro  
Doutora em Geologia  
Serviço Geológico do Brasil - CPRM

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela força dada força ao logo do curso de Geologia, pela paciência e dedicação na realização deste trabalho e por tudo que tem feito na minha vida.

Aos meus pais Isaac e Zeneide pelo amor, dedicação e assistência em todos os momentos da minha vida. Ao meu irmão Isaac Salém, por ter feito mestrado em Geologia e pelas discussões sobre este trabalho.

A Universidade Federal do Pará (UFPA) pela infraestrutura disponível.

A viagem de campo realizada pela disciplina Mapeamento Geológico I, coordenada pelo Prof. Dr. Afonso César Rodrigues Nogueira, no período de 06 a 13 de junho de 2012.

As equipes de mapeamento I, II, III, IV, VI, VII, VIII e IX pelos dados fornecidos.

Ao meu orientador, professor Dr. Arnaldo de Queiroz da Silva pela oportunidade, confiança, paciência e apoio na elaboração deste trabalho.

Ao Laboratório de Análise de Imagens do Trópico Úmido (LAIT) pela infraestrutura.

Ao geólogo Paulo Alves e ao amigo Almir que sempre me ajudaram na utilização dos *softwares*.

Ao. Dr José Bandeira, Dr Joelson Soares, Latino, Isaac Rudnitzki pelas contribuições e correções deste trabalho.

Aos amigos Parago (Rafael), Luísa (Melzinha), Carlos (Cora), Bruninha, Pop (Paulo), Juvenal e Haline por todos esses anos juntos, vocês são realmente muito legais. A minha querida turma de 2008 pelos momentos descontração ao longo do curso e principalmente nas viagens de campo.

Enfim, a todas as pessoas que direta ou indiretamente, contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

“Ao Senhor pertence a terra e tudo o que nela se contém, o mundo e os que nele habitam. Fundo-a ele sobre os mares e sobre as correntes a estabeleceu.”

Salmos 24:1, 2

## RESUMO

Este trabalho visa demonstrar as potencialidades e limitações de alguns produtos de sensoriamento remoto (Landsat ETM+, Quickbird e Modelo Digital de Elevação - SRTM) aplicados ao mapeamento geológico em escala de semi-detalle (1:25000) de uma área próxima ao município de Filadélfia-TO. O uso destas ferramentas e a organização de dados em um sistema de informação geográfica mostraram-se importantes na obtenção de informações geológicas prévias da área. As imagens do sensor Landsat ETM+ tiveram as bandas multiespectrais (30 m) fusionadas com banda pan (15 m). Neste produto foi aplicada a técnica de análise por principais componentes (APC). Todas essas imagens foram analisadas individualmente em tons de cinza ou combinações RGB. As imagens do sensor QuickBird obtidas através de captura de tela da plataforma Google Earth, foram ortorretificadas e mosaicadas para a geração de um produto que recobrisse toda a área de estudo. Este produto foi importante na obtenção do mapa de logística e refinamento da extração dos elementos texturais de drenagem e relevo. O Modelo Digital de Elevação (MDE) foi reprojetoado para UTM, datum WGS84 e reamostrado para 30m. O relevo sombreado gerado a partir do MDE foi analisado em tons de cinza ou com paleta de cores *Atlas Shader*, este produto auxiliou na extração da drenagem. Os recursos de visualização e edição vetorial do SIG combinados com a qualidade dos dados de sensoriamento remoto foram determinantes para obter-se um produto cartográfico de semi-detalle. A fotointerpretação baseada na abordagem de análise sistemática (SOARES; FIORI, 1976 e VENEZIANI; ANJO, 1982) mostrou-se de fácil implementação e foi fundamental para boa qualidade dos mapas pré-campos que facilitaram sobremaneira a validação de campo. A integração dos elementos de drenagem, relevo e tonalidade obtidos na fotoanálise possibilitou a subdivisão de 7 unidades geológicas fotointerpretadas. Os elementos referentes à análise de drenagem foram os que mais contribuíram para a subdivisão das unidades, uma vez que a frequência textural deste elemento é inversamente proporcional à permeabilidade dos tipos litológicos superficiais. O estudo faciológico em afloramentos permitiu a individualização de 8 litofácies agrupadas em 5 associações de fácies (AF). Na Formação Pedra de Fogo foram identificadas as associações Lacustre (AF1), *Sabkha* continental (AF2) e Campo de dunas (AF3). Na Formação Motuca foi descrita apenas a AF Lacustre (AF4) e na Formação Sambaíba a AF Campo de dunas (AF5). A alternância, forte interdigitação dos paleoambientes, erosão diferenciada e eventos tectônicos, contribuem para a dificuldade do mapeamento geológico por paleoambientes.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto. SIG.. Análise faciológica. Bacia do Parnaíba

## ABSTRACT

This study investigated the potential uses and limitations of using optical images (Landsat ETM+, Quickbird) and Digital Elevation Model (SRTM) for geological mapping at semi-detail scale (1:25000) in the Region of Filadélfia, Tocantins State. The remote sensing data and photointerpretation products were organized into a geographic information system GIS, to obtain and organize previous geological information of the studied area. The Landsat ETM+ images had their multispectral bands (30 m) merged with the panchromatic band (15 m). Further, the principal components analysis (PCA) was applied to this product. All the studied images were individually analyzed in grayscales and RGB combinations. The QuickBird images were obtained by taking screenshots of the Google Earth platform, which were later orthorectified and combined into a mosaic covering the entire study area. This product was used to produce the logistic map and to extract the detailed drainage network. The Digital Elevation Model (DEM) was reprojected to UTM, WGS84 datum and resampled to 30m. A shaded relief map was generated from the DEM and analyzed using the grayscale or color palette *Atlas Shader*, which assisted to the extraction of the drainage network. The visualization capabilities of the GIS and vectorial edition combined with the quality of remote sensing data were important to produce a cartographic product at the scale of 1:25000. The photo interpretation activity was based on the Systematic Analysis Method of Soares and Fiori, 1976; Veneziani and Anjos, 1982. This method was efficient and easy to use, allowing producing reliable maps, which greatly facilitated the field validation. The integration of elements of drainage, relief and tone obtained by photo analysis allowed the subdivision of 7 photo interpretation geological units. The elements of the analysis drainage were the most relevant to the subdivision of the units, since the textural frequency of these elements is inversely proportional to the permeability of the outcropping rocks. A total of 8 sedimentary facies were identified at the studied outcrops. They were grouped into 5 facies associations (FA). The Pedra de Fogo Formation shows lacustrine associations (FA1), inland sabkhas deposits (FA2) and eolian dunes (FA3). The Motuca Formation displays only FA lacustrine (FA4) and the FA Sambaíba Formation includes eolian dunes (FA5). The alternation, strong interdigitation of paleoenvironments, tectonic events and erosion, comprise difficulting factors for the geological mapping for paleoenvironments.

Keywords: Remote sensing. GIS. Facies analysis. Parnaíba Basin.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Localização da área de estudo, próximo ao município de Araguaína e Filadélfia. .	14
Figura 2 - Localização e principais limites da Bacia do Parnaíba.....	16
Figura 3 - Carta estratigráfica simplificada da Bacia do Parnaíba, com destaque para as formações Pedra de Fogo, Motuca e Sambaíba. ....	20
Figura 4 - Fluxograma dos métodos que foram empregados neste trabalho.....	25
Figura 5 - Imagem resultante da fusão das bandas multiespectrais em composição R-1G-2B-3 (resolução 30m) e banda pan (resolução 15m). ....	26
Figura 6 - A) Espaço de cores RGB; e B) Espaço IHS. ....	27
Figura 7 - Esquema da transformação IHS-RGB. Adaptado de D'Iorio, Harris, 1997.....	27
Figura 8 - Imagens geradas pela análise de principais componentes, como entrada a imagem Landsat ETM+ (órbita-222, ponto-65).....	28
Figura 9 – Composições coloridas entre as bandas multiespectrais do sensor Landsat ETM+. A) Composições coloridas RGB entre as bandas R-3G-2B-1; B) Composição coloridas RGB entre as bandas R-5G-4B-3; C) Composição colorida RGB com a primeira, segunda e terceira principal componente, respectivamente. ....	29
Figura 10 - Mosaico de imagens QuickBird, obtidas pela captura de tela na plataforma digital Google Earth. ....	30
Figura 11 – Imagens SRTM da área de estudo. A) Relevo sombreado com valores 135° e 45° para os ângulos azimutal e de elevação; B) Imagem hipsométrica da área de estudo. ....	31
Figura 12 - Categorização dos elementos texturais de drenagem e relevo empregados na análise das propriedades das formas. ....	34
Figura 13 - Fluxograma dos constituintes da interpretação dos elementos texturais da imagem. ....	36
Figura 14 - Modelo esquemático das etapas de análise de fácies.....	37
Figura 15 - Mapa da rede de drenagens da área de estudo.....	39
Figura 16 - Estrutura hierárquica da geomorfologia. ....	41
Figura 17 - Identificação de feições geomorfológicas na área de estudo, sobrepostas à imagem ETM+ do satélite Landsat, composição R-5G-4B-3.....	44
Figura 18 - Modelados de relevo identificados na área de estudo. A) Formas tabulares de topo plano e vertentes de elevada declividade, com depósitos coluvionares presentes em sua base. B) Em primeiro plano, modelado de pediplano degradado desnudado (Pgu), com superfície irregular em nível topográfico mais baixo. Ao fundo, formas tabulares com topo plano. C) Planícies e terraços (Aptf) formados por acumulação arenosa nas margens cursos de água, com rochas aflorante no leito. ....	46
Figura 19 - Rede de drenagem da área de estudo. ....	47
Figura 20 - Feições lineares de drenagens, obtidas através da rede de drenagem.....	48
Figura 21 - Mapa de zonas homólogas.....	49
Figura 22 - Quebras topográficas, classificadas em quebras positivas (verde) e negativas (marrom), obtidas através das imagens SRTM e QuickBird. ....	50
Figura 23 - Mapa de zonas homólogas de relevo, obtidas através do mapa de rede e feições lineares. ....	51
Figura 24 - Mapa integrado de lineamento de drenagem (em azul), quebras positivas (em verde) e quebras negativas (em marrom). ....	52
Figura 25 - Mapa de unidades geológicas fotointerpretadas, obtido a partir da análise dos mapas de zonas homólogas de relevo e drenagem.....	53
Figura 26 – Mapa de lineamento e diagrama de roseta dos lineamentos drenagem. ....	54
Figura 27 - Fácies da Formação Pedra de Fogo. A) Concreções de sílex de aproximadamente 10 cm em arenito finos. B) Tronco silicificado de aproximadamente 7 cm em camada de pelito vermelho.....	56

- Figura 28 - Fácies e associações de fácies Lacustre da Formação Pedra de Fogo. A) Visão geral da AF1, com intercalação de pelito com laminação plano-paralela a ondulada (Ppo) e arenito fino com laminação ondulada a planar (Aop). As camadas arenosas são identificadas por apresentarem relevo positivo no perfil; B) Fácies Ppo de coloração cinza esbranquiçado a avermelhado; C) Vista em planta de gretas de contração na fácies Ppo; D) Detalhe do tronco silicificado na fácies Ppo, disposto horizontalmente ao acamamento com estrutura fisiológica vegetal preservada. E) Vista de afloramento da AF1, com intercalação das fácies Ppo e Aop, o aumento da espessura da fácies arenosa, está relacionada possivelmente a maior competência de transporte sedimentar relativo aos rios efêmeros; F) Camada de 30 cm da fácies Aom, notar laminações onduladas...61
- Figura 29 - Fácies e associação de fácies *Sabkha* Continental da Formação Pedra de Fogo. A) Intercalação de fácies arenitos com moldes evaporíticos (Ame) e pelito com laminação plano-paralela a ondulada (Ppo). B) Detalhe de molde evaporítico silicificado do tipo *popcorn*, encontrado nos arenitos. ....62
- Figura 30 - Fácies e associação de fácies Campo de Dunas da Formação Pedra de Fogo. A) Aspecto geral da AF4. Arenito com estratificação cruzada de médio e pequeno porte. B) Detalhe dos sets de pequeno porte, com estratificação cruzada tangencial e truncamentos erosivos. ....63
- Figura 31 - Modelo deposicional proposto para a Formação Pedra de Fogo. ....64
- Figura 32 - Fácies e Associação de fácies Lacustre da Formação Motuca. A) Fácies pelito com laminação plano-paralela a ondulada (Ppo), com camadas diferenciadas nas cores branco e vermelho; B) Pacote de gipso, localizada em antiga mina da Fazenda Vão Grande. C) Fácies Gn, contendo nódulos irregulares de gipsita (textura *chickenwire*) de coloração esbranquiçada e diâmetros variáveis. D) Fácies Gl, com lâminas onduladas de gipsita de cor esbranquiçada, associada gipsita de textura fibrosa de coloração cinza escuro. ....65
- Figura 33 - Modelo deposicional proposto para Formação Motuca. Em períodos mais áridos os lagos contraíam-se e tornaram-se supersaturados, o que permitia a precipitação de evaporitos. Modificado de Abrantes Júnior (2013). ....65
- Figura 34 - Fácies e Associação de fácies Campo de Dunas da Formação Sambaíba. A) Afloramento da AF5, localizado na encosta de formas de relevo tabulares, onde é possível visualizar os sets de estratificações cruzadas de grande porte. B) Detalhe dos *foresets* da estratificação cruzada de grande porte (Ac2); C) Estratificação plano-paralela em arenito de cor alaranjada. D) Detalhe de arenitos bem arredondados e selecionados, mostrando bimodalidade dos grãos. ....67
- Figura 35 - Modelo deposicional para a Formação Sambaíba. ....67
- Figura 36 - Formação Motuca. A) Imagem SRTM mostrando a distribuição espacial da Formação Motuca, ocorrendo entre cotas de aproximadamente 220 a 360m. B) Vista de afloramento típico da Formação Motuca sempre associados a pequenos morros ou localizados na porção basal de formas de relevo com topos tabulares, tendo sua exposição encoberta por sedimentos coluvionares. ....70
- Figura 37 - Mapa geológico fotointerpretado (à esquerda) e mapa geológico final (à direita). ....70

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Características espectrais das bandas do sensor Landsat ETM+ .....	23
Tabela 2 - Propriedade dos elementos texturais de drenagem .....	33
Tabela 3 - Tabela das propriedades texturais de relevo .....	33
Tabela 4 - Propriedades das formas .....	35
Tabela 5- Descrição das zonas homólogas de drenagem.....	49
Tabela 6 - Descrição das características que definem as zonas homólogas de relevo.....	51
Tabela 7- Cor associada e descrição das unidades geológicas fotointerpretadas. ....	53
Tabela 8 - Fácies sedimentares descritas na área mapeada, sendo discriminadas litologias, estruturas e processos responsáveis pela formação destas.....	59
Tabela 9 - Associações de Fácies referentes às formações Pedra de Fogo, Motuca e Sambaíba .....	68

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	13
1.1	APRESENTAÇÃO.....	13
1.2	OBJETIVOS .....	14
1.3	LOCALIZAÇÃO E ACESSO .....	14
2	CONTEXTO GEOLÓGICO .....	15
2.1	ASPECTOS GERAIS.....	15
2.2	LITOESTRATIGRAFIA.....	16
2.2.1	Sequência Siluriana .....	16
2.2.2	Sequência Mesodevoniana-Eocarbonífera .....	17
2.2.3	Sequência Neocarbonífera-Eotriássica.....	17
2.2.4	Sequência Jurássica .....	20
2.2.5	Sequência Cretácea .....	21
3	MATERIAL E MÉTODOS .....	22
3.1	MATERIAL .....	22
3.2	MÉTODOS.....	24
3.2.1	Etapas de trabalho .....	24
3.2.2	Processamento digital das imagens .....	25
3.2.3	Métodos aplicados à interpretação do mapa fotolitológico.....	31
3.2.4	Sistema de informação geográfica .....	36
3.2.5	Análise de fácies.....	36
4	ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DAS IMAGENS.....	38
4.1	DESCRIÇÃO FISIOGRÁFICA DA ÁREA .....	38
4.1.1	Hidrografia .....	38
4.1.2	Vegetação .....	39
4.1.3	Geomorfologia .....	40
4.2	INTERPRETAÇÃO GEOLÓGICA DAS IMAGENS.....	46
4.2.1	Drenagem .....	47
4.2.2	Integração dos elementos da fotoanálise .....	52
4.2.3	Análise estrutural dos elementos da fotointerpretação.....	54
5	ANÁLISE DE FÁCIES .....	55
5.1	ASPECTOS GERAIS.....	55
5.2	DESCRIÇÃO DE FÁCIES .....	56
5.2.1	Arenito com estratificação cruzada de pequeno porte (Ac1) .....	56
5.2.2	Arenito com estratificação cruzada de médio a grande porte (Ac2) .....	57
5.2.3	Arenito fino com laminação ondulada a planar (Aop).....	57
5.2.4	Arenito com estratificação plano-paralela (App).....	57

5.2.5 Arenito com moldes evaporíticos (Ame) .....	58
5.2.6 Gipso nodular (Gn).....	58
5.2.7 Gipso laminado (Gl).....	58
5.2.8 Pelito com laminação plano-paralela a ondulada (Ppo).....	59
5.3 ASSOCIAÇÃO DE FÁCIES (AF).....	60
5.3.1 Formação Pedra de Fogo.....	60
5.3.2 Formação Motuca.....	64
5.3.3 Formação Sambaíba .....	66
5.4 MAPA GEOLÓGICO .....	68
5.4.1 Formação Pedra de Fogo.....	69
5.4.2 Formação Motuca.....	69
5.4.3 Formação Sambaíba .....	70
6 CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS .....	71

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 APRESENTAÇÃO

O avanço tecnológico favoreceu o desenvolvimento do sensoriamento remoto como ferramenta para se observar extensas áreas da superfície terrestre. O aumento do uso desta tecnologia deve-se a revolução nos meios de se observar a Terra em uma escala global periodicamente. Além da rapidez de monitoração dos fenômenos dinâmicos e das mudanças das feições terrestres (MENESES; ALMEIDA, 2012). O Sensoriamento Remoto pode ser entendido como um conjunto de técnicas que permite a obtenção de informações dos objetos que compõem a superfície terrestre sem a necessidade de contato direto com os mesmos (MORAES, 2002).

O uso dos dados obtidos por sensores remotos são inúmeros e aplicáveis a diversas áreas do conhecimento. Na Geologia, a utilização do sensoriamento remoto, a aerogeofísica e outros métodos de captura e processamento digital de imagens tornam-se cada vez mais necessários e úteis para substanciar e expandir as informações geológicas de campo.

O propósito deste trabalho é demonstrar as potencialidades e limitações de alguns produtos de sensoriamento remoto, aplicados em apoio ao mapeamento geológico de uma área da bacia do Parnaíba. Foram utilizadas imagens óticas dos sensores Landsat ETM+ e Quickbird além do Modelo Digital de Elevação (MDE) gerado pela missão SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*). O uso combinado de técnicas de identificação e análise de fácies permitiu ainda refinar o conhecimento geológico da área de estudo tendo como produto final um mapa geológico de semi-detalhe na escala de 1:25.000.

A geologia da área de estudo é constituída pelas formações Pedra de Fogo (siltitos, folhelho, arenitos, calcários e evaporitos intercalados), Motuca (siltitos, folhelhos, arenitos e evaporitos) e Sambaíba (arenitos eólicos), pertencentes ao Grupo Balsas (CAPUTO et al., 2005). Neste trabalho procurou-se estabelecer uma metodologia para a representação espacial dos paleoambientes deposicionais das formações supracitadas que ocorrem nas proximidades do município de Filadélfia, TO. O trabalho não objetivou unicamente confecção de mapa geológico, mas também a criação de um banco de dados georreferenciado com informações referentes à área alvo.

## 1.2 OBJETIVOS

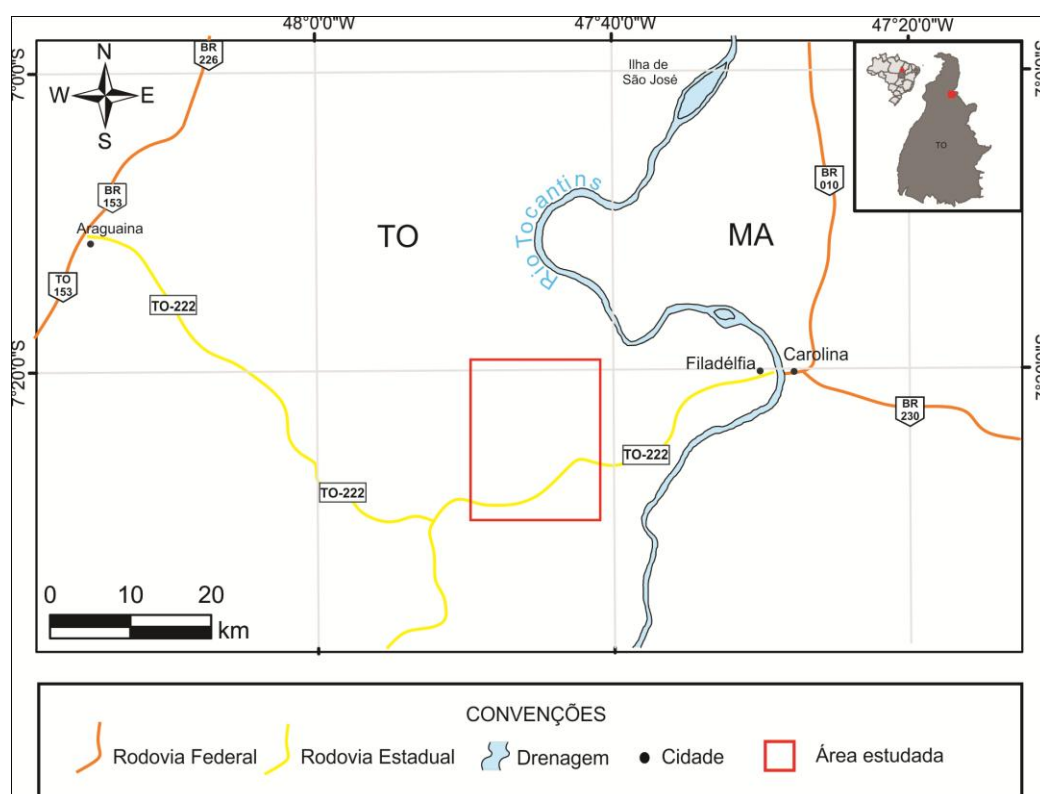
O presente trabalho tem como principal objetivo a demonstração das potencialidades e limitações dos produtos de sensoriamento remoto (imagens óticas e MDE) utilizados para o mapeamento de um terreno sedimentar. A finalidade é estabelecer uma metodologia para o mapeamento e discriminação de rochas sedimentares usando técnicas de sensoriamento remoto e sistema de informação geográfica (SIG) com apoio nas técnicas de análise de fácies.

Como objetivo secundário, buscou-se aprimorar o conhecimento geológico da área de estudo a partir do reconhecimento em campo e representação cartográfica dos paleoambientes associados à sedimentação das formações Pedra de Fogo, Motuca e Sambaíba.

## 1.3 LOCALIZAÇÃO E ACESSO

A área de estudo compreende uma área 320 km<sup>2</sup> localizada a nordeste do Estado do Tocantins, próxima à sede do município de Filadélfia, distante 440 km da capital Palmas. O acesso principal à área de estudo é feito pela rodovia TO-222 que liga os municípios de Araguaína e Filadélfia (Figura 1). A área de estudo está inserida na Folha Babaçulândia (SB-23-Y-C-I) entre as coordenadas 7°19'00" e 7°30'00" de latitude S, 47°40'30" e 47°49'30" de longitude O.

Figura 1 - Localização da área de estudo, próximo ao município de Araguaína e Filadélfia.



## 2 CONTEXTO GEOLÓGICO

### 2.1 ASPECTOS GERAIS

A Bacia do Parnaíba está localizada na parte leste da plataforma Sul-America, porção nordeste do Brasil e noroeste da Província Borborema. Abrange parte dos estados do Piauí, Maranhão, Tocantins, Pará, Ceará e Bahia (GÓES; FEIJÓ, 1994). Possui uma extensão territorial de aproximadamente 600.000 Km<sup>2</sup>, com espessura das rochas no depocentro de 3500m (VAZ et al., 2007).

A Bacia do Parnaíba desenvolveu-se diretamente sobre um substrato composto principalmente por rochas metamórficas de idade não mais antiga que 1600 Ma (Mesoproterozóico) (GOÉS et al., 1992 apud GÓES; FEIJÓ, 1994). A subsidência inicial da Bacia pode estar ligada às deformações e eventos térmicos fini- e pós-orogênicos do Ciclo Brasileiro ou ao Estádio de transição da plataforma, utilizando-se a terminologia de Almeida e Carneiro (2004 apud VAZ et al. 2007), onde se instalaram *grábens*. Os limites da Bacia do Parnaíba com o embasamento, segundo Santos e Carvalho (2009), são definidos ao norte com o Cráton de São Luís; a oeste pelo Cráton do Amazonas, Faixa de Dobramentos Paraguaia-Araguaia e pelo Maciço de Goiás; ao sul o limite é feito com a Faixa de Dobramentos Brasília, e a leste pelo Cráton de São Francisco e pela Faixa de Dobramento Nordeste (Figura 2).

O quadro tectônico da Bacia do Parnaíba foi configurado pelos lineamentos: Picos-Santa Inês (NW-SE), Tocantins-Araguaia (N-S) e o lineamento Transbrasiliano que compreende uma zona de falha (NE-SW), sendo esta última unidade morfotectônica a mais proeminente na bacia (VAZ et al., 2007).

As sequências sedimentares depositadas possuem natureza predominantemente siliciclásticas, ocorrendo também calcário, anidrita e sílex, além de diabásio e basalto (GÓES; FEIJÓ, 1994).

Figura 2 - Localização e principais limites da Bacia do Parnaíba.



Fonte: Modificado de Santos e Carvalho (2009).

## 2.2 LITOESTRATIGRAFIA

O preenchimento litoestratigráfico da Bacia do Parnaíba sistematizado por Vaz et al. (2007) define cinco superseqüências denominadas de: Siluriana, Mesodevoniana-Eocarbonífera, Neocarbonífera-Eotriássica, Jurássica e Cretácea. Os limites das seqüências foram essencialmente controlados pela eustasia que induziu ciclos transgressivos-regressivos do nível do mar ao longo do tempo geológico.

### 2.2.1 Sequência Siluriana

Esta seqüência constitui um ciclo transgressivo-regressivo completo. A unidade litoestratigráfica que ocorre em toda a extensão da bacia corresponde ao Grupo Serra Grande. A sedimentação desta unidade se deu em uma grande variedade de ambientes, de glacial proximal e glacio-fluvial, a leques ou frentes deltaicos (CAPUTO, 1984 apud VAZ, 2007). O Grupo Serra Grande é subdividido em três formações: Ipú, Tianguá e Jaicós. A Formação Ipú é constituída por arenitos médios a grossos, raramente siltito, folhelho e diamectito. A sedimentação foi dada em uma grande variedade de ambientes, de glacial proximal e glacio-fluvial, a leques ou frentes deltaicos (CAPUTO, 1984). A Formação Tianguá é constituída de

folhelhos cinza, siltito e arenitos muito micáceo. A sedimentação foi dada em ambiente nerítico. Por fim, a Formação Jaicós é constituída de arenito médio a grosso e em menor proporção pelitos, esta formação foi depositada em sistemas fluviais entrelaçados. (GOÉS; FEIJÓ, 1994).

### 2.2.2 Sequência Mesodevoniana-Eocarbonífera

Esta sequência teve seus estratos depositados discordantemente sobre a Sequência Siluriana. É composta pelo Grupo Canindé, que subdividi-se em quatro formações: Itaim, Pimenteira, Cabeças e Longá. A Formação Itaim é constituída de arenitos finos a médios subarredondados, bem selecionados e com alta esfericidade (VAZ et al., 2007). Goés e Feijó, 1994 estabelecem para a sedimentação desta formação, ambientes deltáicos e plataformais, dominados por correntes de marés e tempestades. A Formação Pimenteiras designa folhelhos cinza-esverdeados, bioturbados e intercalados com siltito e arenito, a formação constitui a mais importante ingressão marinha da bacia, sendo sua sedimentação dada em um ambiente plataformal raso dominado por tempestade. A Formação Cabeças é constituída por arenito cinza-claro a branco, com grãos médios a grossos, intercalados a lâminas de siltito, folhelhos, diamictitos e tilitos (VAZ et al., 2007). O ambiente de sedimentação é plataformal nerítico sob a ação predominantemente de correntes induzidas por marés e também um ambiente fluvial estuariano (GOÉS; FEIJÓ, 1994). A Formação Longá é representada por folhelhos cinza-escuros pretos, homogêneos ou bem laminados e bioturbados. Na sua porção média têm-se arenitos e siltitos cinza-claros laminados. Goés e Feijó (1994) interpretam para essa formação um ambiente plataformal dominado por tempestade. A Formação Poti é composta por arenito cinza esbranquiçado, intercalado e interlaminado por folhelho e siltito, depositados em deltas e planícies de maré sob a influência de tempestades.

### 2.2.3 Sequência Neocarbonífera-Eotriássica

Esta sequência é representada pelo Grupo Balsas, que apresenta-se sobreposto discordantemente ao Grupo Canindé. O Grupo Balsas subdivide-se em quatro formações: Piauí, Pedra de Fogo, Motuca, Sambaíba (Figura 3).

A Formação Piauí denomina arenitos cinza esbranquiçado comumente com granulometria fina a média, bem selecionado, conglomerados, folhelho vermelho e calcário esbranquiçados. Estes litotipos foram depositados em um ambiente continental e litorâneo, em condições de aridez, afirmam Goés e Feijó (1994).

A Formação Pedra de Fogo denominada primeiramente por Plummer (1948) possui idade Eopermiana (GOÉS; FEIJÓ, 1994). É constituída litologicamente por uma sucessão de arenitos, folhelhos, calcários e principalmente sílex (*chert*), com restos de madeiras fossilizadas que afloram nas margens do riacho homônimo. O sílex ocorre sob as mais variadas formas, desde horizontes estromatolíticos inteiramente silicificados até nódulos concrecionários milimétricos a centimétricos denominados informalmente de “bolachas” (FARIA JR., 1979). A Formação ocorre aflorante na região centro-leste, centro-oeste e centro-sul da bacia, tendo ampla distribuição nos estados do Piauí e Maranhão. Faria Jr. e Truckenbrodt (1980), em estudo feito sobre a formação, afirmam que esta ocorre em superfície com espessura média de 100m. Os autores dividem a Formação Pedra de Fogo em três membros, que variam de espessura e litologia de acordo com a situação geográfica: Sílex Basal, Médio e Superior ou “Trisidela”.

O membro Sílex Basal, com espessura média de 29 m, é litologicamente constituído por uma fácies de siltito e folhelhos, cinza, marrons e arroxeados, intercalados com bancos dolomíticos com algumas concreções silicosas pretas e cor de caramelo. O Membro Médio compreende arenitos e/ou siltitos, algumas vezes carbonáticos, situados sotopostos às camadas ricas em sílex da sequência inferior, e que se estende até as intercalações de folhelhos com sílex contendo brechas intraformacionais. A sequência superior, Trisidela, possui espessura média de 40m, constitui-se principalmente por bancos dolomíticos, cinza, intercalados com siltitos, folhelhos carbonáticos e/ou margas, cinza esverdeados a verdes são também característicos as concreções, nódulos e os níveis de sílex. A base desta Unidade é formada por intercalações laminares de folhelhos cinza esverdeados escuros com camadas milimétricas e descontínuas lateralmente, (gretas de contração) de sílex, nas quais ocorrem as brechas intraformacionais. O topo é caracterizado pelo abundante conteúdo de restos fósseis, níveis peletoidais e/ou silicificados, bem como madeiras silicificadas, geralmente pertencentes ao gênero *Psaronius*.

O ambiente deposicional da Formação Pedra de Fogo foi objeto de estudo de diversos autores, segundo Faria Jr. (1979), trata-se de um ambiente marinho raso a restrito, tipo epicontinental, variando de transicional deltáico a nerítico. Para Góes e Feijó (1994) a deposição desta unidade foi dado em um ambiente nerítico raso a litorâneo com planícies de *sabkha*, sob eventuais influências de tempestades. Santos e Carvalho (2009) em estudo realizado, identificam uma regressão na base, com ambiente desértico avançando sobre planícies costeiras. Vaz et al. (2007) ressaltam que no período da sequência Neocarbonífera-

Eotriássica, o depocentro da Bacia do Parnaíba, deslocava-se para oeste resultando em uma sedimentação de domínio continental, sendo as influências das variações estáticas refletidas nas mudanças do nível de base das águas interiores. Sobre o conteúdo fossilífero Santos e Carvalho (2009) afirmam que o topo da formação foi marcado por eventos transgressivos que possibilitaram uma sedimentação pelítica relacionados a ambientes subaquáticos. Este clima quente e úmido que atuou neste período favoreceu expansão da flora e fauna da região. Após esse intervalo o clima voltou a ser quente e árido e as madeiras foram preservadas por permineralização.

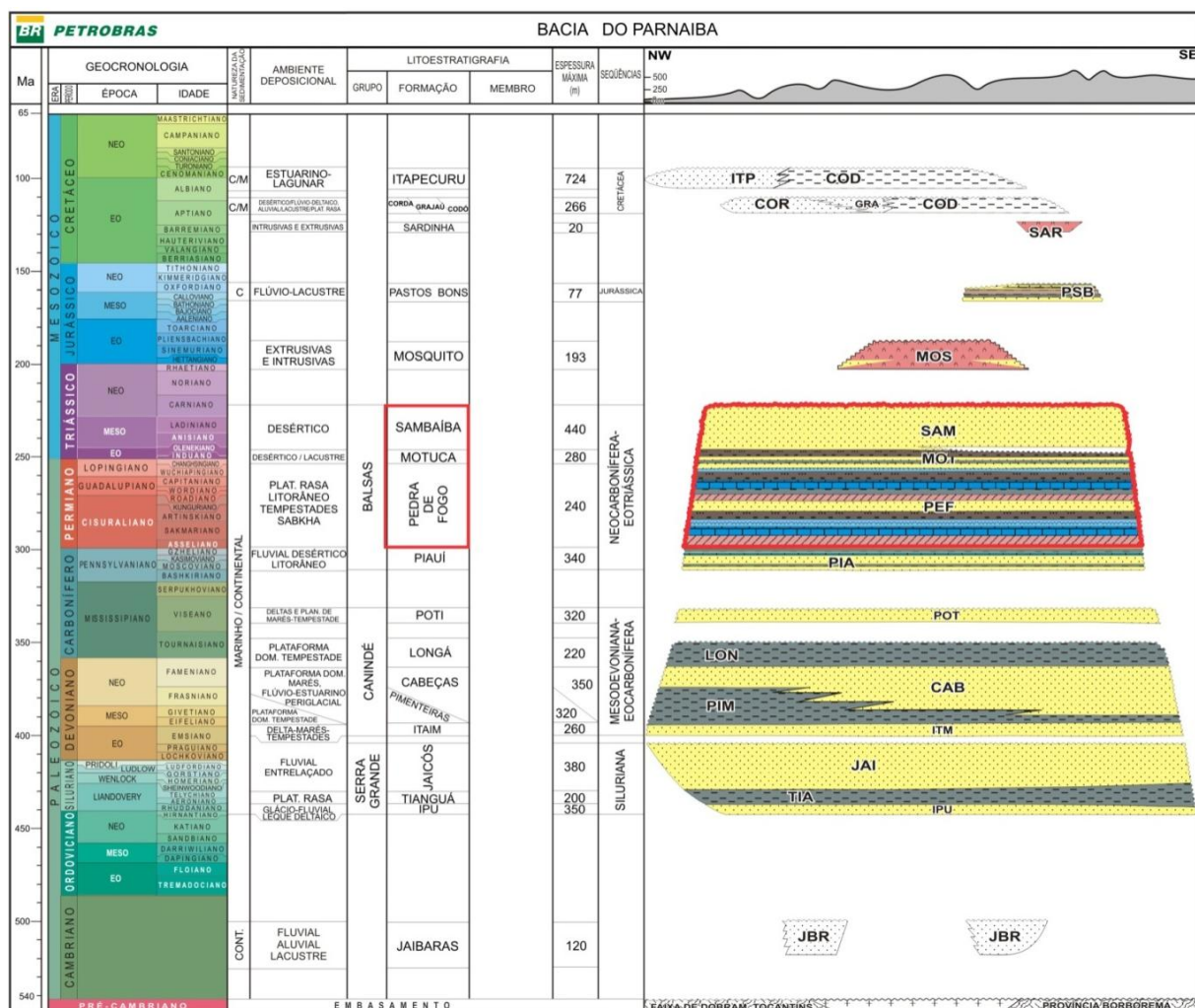
O depocentro da bacia continuou a deslocar-se para o centro, ocasionando predomínio da sedimentação subaérea. Episódios regressivos perduraram e intervalos de deposição transgressivos tornam-se mais limitados. O aumento da umidade e a consequente elevação do nível do lençol freático precedeu a instalação do sistema lacustre da Formação Motuca (VAZ et al., 2007). A Formação Motuca foi depositada no Neopermiano segundo Goés e Feijó (1994) e foi denominada primeiramente por Plummer et al. (1948) à folhelhos avermelhados, com lentes de carbonatos e anidrita aflorantes na fazenda Motuca no Maranhão, os litotipos recobrem corcordantemente a Formação Pedra de fogo. Goés e Feijó (1994) registraram espessura máxima em subsuperfície de 280 m. A sequência é constituída na base por arenitos finos a médios, róseos a esbranquiçados com grão subarredondado a esféricos, foscos, friáveis. No topo apresenta folhelhos e siltitos arenosos vermelhos, com fraturas preenchidas pela aragonita, calcita e barita e níveis de sílica (LIMA; LEITE, 1978).

O ambiente deposicional da Formação Motuca era continental desértico, controlado por sistemas lacutres (GOÉS; FEIJÓ, 1994). Segundo Santos e Carvalho (2009) a Formação Motuca, esteve sob condições climáticas quentes e áridas acentuadas e sua sedimentação foi típica de ambientes de cursos fluviais periódicos, eólicos, lagos salgados (*sabkhas*), *red beds* e evaporitos.

Estratigraficamente acima da Formação Motuca depositou-se a Formação Sambaíba. Plummer et al. (1948) denominou Formação Sambaíba para arenitos que constituem mesetas observadas nas cercanias da cidade homônima. A ausência de fósseis impede as datações bioestratigráfica, o que dificultou o posicionamento estratigráfico da formação, sendo atribuída idade Eotriássica (GOÉS; FEIJÓ, 1994).

A Formação Sambaíba corresponde ao final da desertificação da bacia, sendo constituída litologicamente por arenitos vermelhos a cor-de-rosa, creme-claro/esbranquiçado, em geral finos a médios, subangulosos a subarredondados. As dunas com estratificação cruzada de grande porte, além de conter diversas feições típicas de sedimentos eólicos caracterizam rochas de um sistema desértico, com contribuição fluvial (VAZ et al., 2007).

Figura 3 - Carta estratigráfica simplificada da Bacia do Parnaíba, com destaque para as formações Pedra de Fogo, Motuca e Sambaíba.



Fonte: Modificado de Vaz et al. (2007).

## 2.2.4 Sequência Jurássica

Vaz et al. (2007) afirmam que a deposição desta sequência foi resultante da subsidência da bacia causada pelo peso das rochas básicas Mosquito e dos estratos então existentes. É representada pela Formação Pastos Bons constituída litologicamente por silito e folhelhos/argilito verde e castanho-avermelhado, com grãos de quartzo inclusos. Depositada

em paleodepressões continentais, lacustrinas, com alguma contribuição fluvial, em clima semi-árido a árido.

#### 2.2.5 Sequência Cretácea

Esta sequência sobrepõe-se discordantemente à sequência jurássica, sendo constituída pelas formações: Codó, Corda, Grajaú e Itapecuru. A Formação Corda é litologicamente constituída por arenito cinza-esbranquiçado a avermelhado, com grãos finos a grossos, por vezes apresenta bimodalidade dos grãos e raros níveis de sílex. O ambiente responsável pela deposição desta unidade é continental desértico controlado por processos eólicos e sujeitos à ação esporádica de processos semelhantes a correntes de turbidez. Formação Grajaú denomina arenito esbranquiçado, fino a conglomerático, ocorrendo interligados aos folhelhos betuminosos, calcário e anidritas da Formação Codó (GOÉS; FEIJÓ, 1994). Rossetti et al. (2001b) declaram que estas unidades foram depositadas em um ambiente marinho raso, lacustre e flúvio-deltáico. A Formação Itapecuru é composta por arenitos variegados finos e friáveis, com estruturas diversas que indicam sedimentação dada em um ambiente litorâneo.

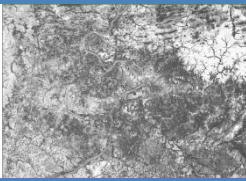
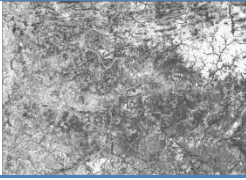
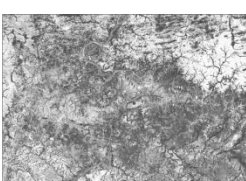


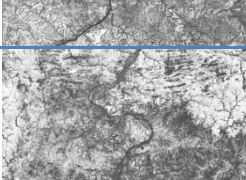
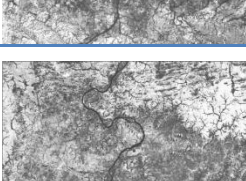
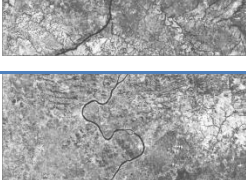
### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 MATERIAL

Neste trabalho foram utilizadas imagens geradas pelos sensores ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*) a bordo do satélite Landsat 7, QuickBird e o Modelo Digital de Elevação (MDE) obtido pela missão SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*).

As imagens do sensor Landsat-7 ETM (órbita-222, ponto-65) foram obtidas gratuitamente de Global Land Cover Facility (2012) via *download*. Estas imagens estão no formato GEOCOVER, ortorretificada na projeção UTM (*Universal Transverse Mercator*) datum WGS 84, obtida em 06 de junho de 2000. Os produtos GEOCOVER são ortorretificados com precisão estimada de 50 m (Tucker et al., 2004) dada pelo Erro Quadrático Médio (RMSE - *Root Mean Square Error*) de pontos de controle no terreno (GCP's - *Ground Control Points*). A Tabela 1 apresenta as características espectrais e as resoluções espaciais das bandas geradas pelo sensor ETM+, bem como suas principais aplicações.

Tabela 1- Características espectrais das bandas do sensor Landsat ETM+.

Banda	Imagem	Resolução espectral	Faixa ( $\mu\text{m}$ )	Característica
1		30m	Visível 0,45 - 0,52	Grande penetração em corpos de água. Sofre absorção pela clorofila e pigmentos fotossintéticos auxiliares. Apresenta sensibilidade a plumas de fumaça de queimadas ou atividade industrial. Pode apresentar atenuação pela atmosfera.
2		30m	Visível 0,52 - 0,60	Boa penetração em corpos de água e sensível a presença de sedimentos em suspensão. Mapeamento de vegetação e qualidade de água.
3		30m	Visível 0,63 - 0,69	Absorção da clorofila, possível diferenciação de espécies vegetais, áreas urbanas, uso do solo, agricultura. Permite o mapeamento da drenagem através da visualização da mata galeria e entalhe dos cursos dos rios em regiões com pouca cobertura vegetal.
4		30m	Infravermelho próximo 0,76-0,90	Os corpos de água absorvem muita energia nesta banda e ficam escuros. A vegetação verde, densa e uniforme, reflete muita energia nesta banda, aparecendo bem clara nas imagens. Permite o uso no mapeamento geomorfológico, geológico, área de queimadas, agricultura e vegetação.
5		30m	Infravermelho médio 1,55 - 1,75	Apresenta sensibilidade ao teor de umidade das plantas, servindo para observar estresse na vegetação, causado por desequilíbrio hídrico.
6		60m	Infravermelho termal 10,4 - 12,5	Apresenta sensibilidade aos fenômenos relativos aos contrastes térmicos, servindo para detectar propriedades termais de rochas, solos, vegetação e água.
7		30m	Infravermelho médio 2,08 - 2,35	Apresenta sensibilidade à morfologia do terreno, permitindo obter informações sobre Geomorfologia, Solos e Geologia. Esta banda serve para identificar minerais com íons hidroxilas. Potencialmente favorável à discriminação de produtos de alteração hidrotermal
8		15m	Pancromática 0,52-0,90	Permite boa separabilidade dos alvos de interesse tanto em área rural como urbana.

As imagens QuickBird, adquirida pela DigitalGlobe no ano de 2003, foram utilizadas via a plataforma virtual *Google Earth*, disponível para *download* em *Google Earth* (2013). O recurso utilizado foi a captura de tela, obtendo-se assim uma composição RGB das bandas

espectrais originais do sensor. Após a captura, as imagens foram georreferenciadas no *software* ArcGIS utilizando-se a própria plataforma Google Earth como referência espacial.

Os dados do MDE da missão SRTM foram obtidos gratuitamente de Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI) em formato GeoTiff, em coordenadas geográficas, *datum* WGS84. A resolução espacial das imagens é de 90 m e precisão vertical de 12 m (90% de confiança) (OLIVEIRA; PARADELLA, 2008).

Como dados complementares, utilizou-se mapas planialtimétricos, arquivos vetoriais e temáticos estruturados em sistemas de informação geográfica (SIG), no formato ESRI shapefile da folha Babaçulândia (SB-23-Y-C-I) em escala 1:100000. Estes dados estão disponíveis no site da Secretaria de Planejamento do Estado de Tocantins (SEPLAN).

## 3.2 MÉTODOS

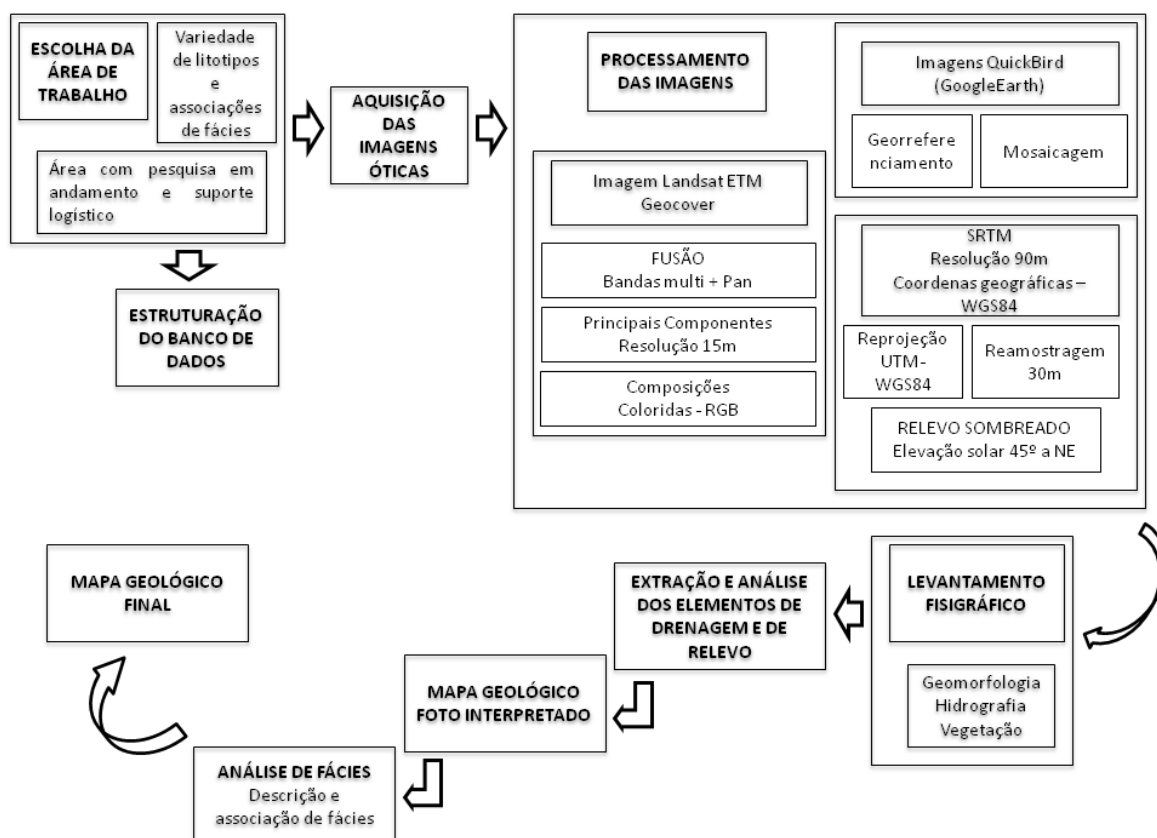
### 3.2.1 Etapas de trabalho

Para a elaboração deste trabalho foram necessárias à execução das seguintes etapas (Figura 4):

- Escolha da área geográfica de estudo
- Estruturação de um banco de dados com informações da área de estudo: cartas planialtimétricas e produtos vetoriais da folha Babuculândia.
- Aquisição das imagens óticas e Modelo Digital de Elevação disponível para a área.
- Processamento das imagens dos sensores Landsat ETM+: Fusão das bandas multi+pan, técnicas de Análise por Principais Componentes, combinações de bandas em composições coloridas RGB.
- Processamento das imagens QuickBird: captura das imagens, georrefenciamento utilizando dados obtidos da plataforma *Google Earth*, mosaicagem das imagens georrefenciadas.
- Processamento dos dados do MDE: Reprojeção, reamostragem e geração de imagens de relevo sombreado.
- Levantamento fisiográfico da área: geomorfologia, vegetação e hidrografia.
- Extração e análise dos elementos de drenagem e relevo das imagens
- Elaboração de um mapa geológico fotointerpretado.
- Trabalho de campo para análise de fácies das formações da área de estudo
- Elaboração de um mapa geológico final

- Contribuição com dados e novas informações geológicas para a área mapeada.
- Considerações sobre as potencialidades e limitações da metodologia aplicada ao mapeamento em escala de semidetalhe 1:25000

Figura 4 - Fluxograma dos métodos que foram empregados neste trabalho.



### 3.2.2 Processamento digital das imagens

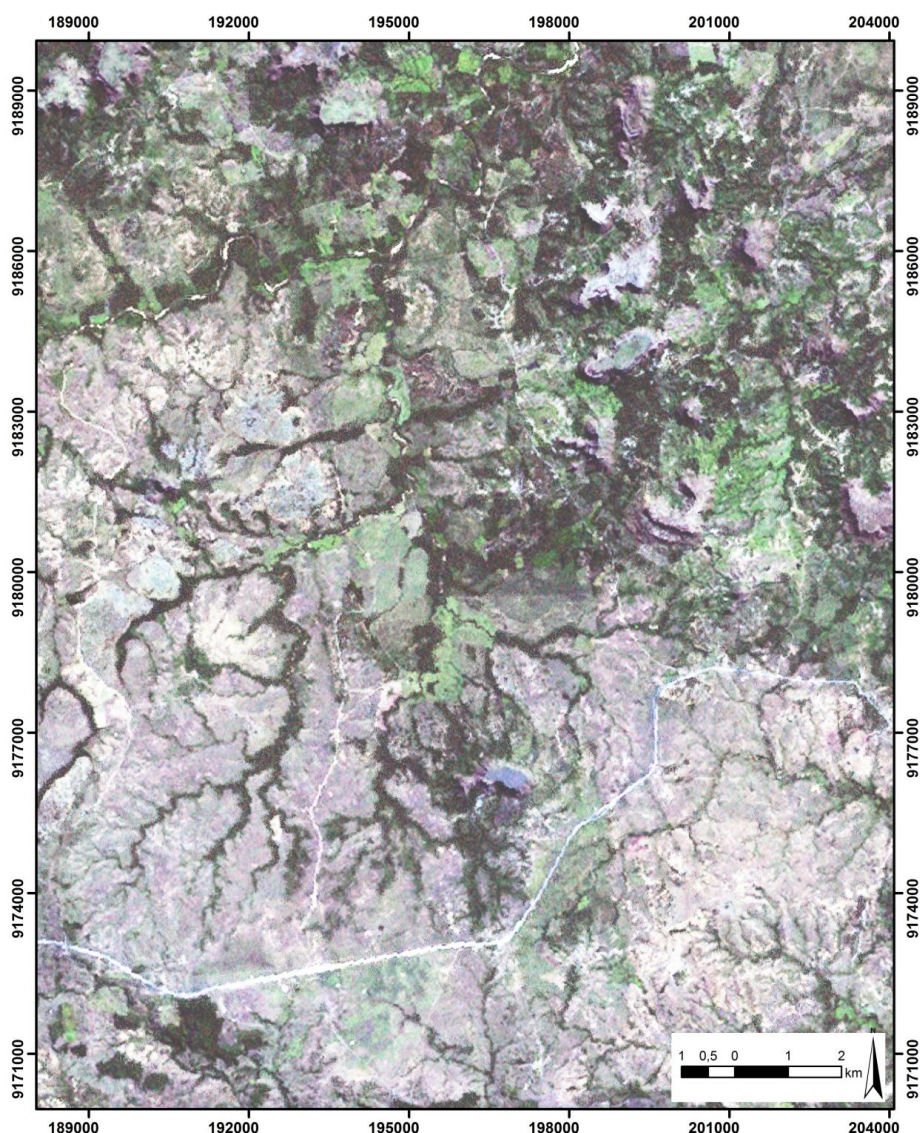
Para a realização do mapeamento geológico foram utilizados produtos do sensoriamento remoto disponíveis gratuitamente para a área. Posteriormente estas imagens foram processadas utilizando PCI Geomatics 2012, Global Mapper 12 e ArcGIS 10.0.

Crósta (1993) afirma que o processamento digital de imagens visa melhorar o realce visual de certas feições do terreno para o analista, além de fornecer subsídios à interpretação gerando produtos que possam ser posteriormente submetidos a outros processamentos e classificações. No presente trabalho, as imagens foram processadas para a obtenção de produtos que favorecessem a extração de feições de drenagem e relevo.

#### 3.2.2.1 Imagens Landsat ETM+

Um dos processamentos aplicados às imagens Landsat consistiu no fusionamento das bandas multiespectrais de resolução espacial 30 m, com a banda pancromática de 15 m de resolução. A fusão de bandas permite combinar as informações espectrais das bandas multiespectrais com a melhor resolução espacial da banda pan (Figura 5). Parte desse processamento foi realizado no *software* FOCUS/PCI Geomatics v.10.3

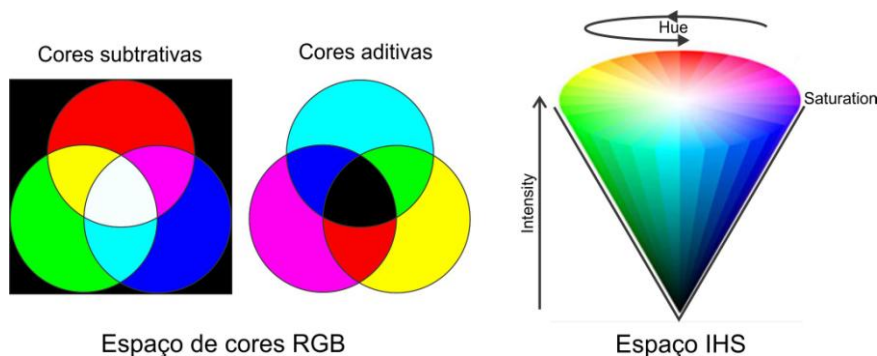
Figura 5 - Imagem resultante da fusão das bandas multiespectrais em composição R-1G-2B-3 (resolução 30m) e banda pan (resolução 15m).



A fusão foi realizada, utilizando-se a técnica de transformação no espaço das cores IHS-RGB (Harris et al., 1990; Chaves et al., 1991). O conceito teórico dessa técnica é combinar as informações espectrais em uma composição RGB com a melhor resolução espacial do canal monocromático (pan). Isso se faz pela projeção do espaço de cores RGB para o espaço IHS em que as cores são definidas por seu brilho (Intensity - intensidade), cor

definida pelo comprimento de onda (Hue - matiz) e pureza de cor, ou seja, o percentual de cor branca misturada a matiz (Saturation - saturação) (Figura 6).

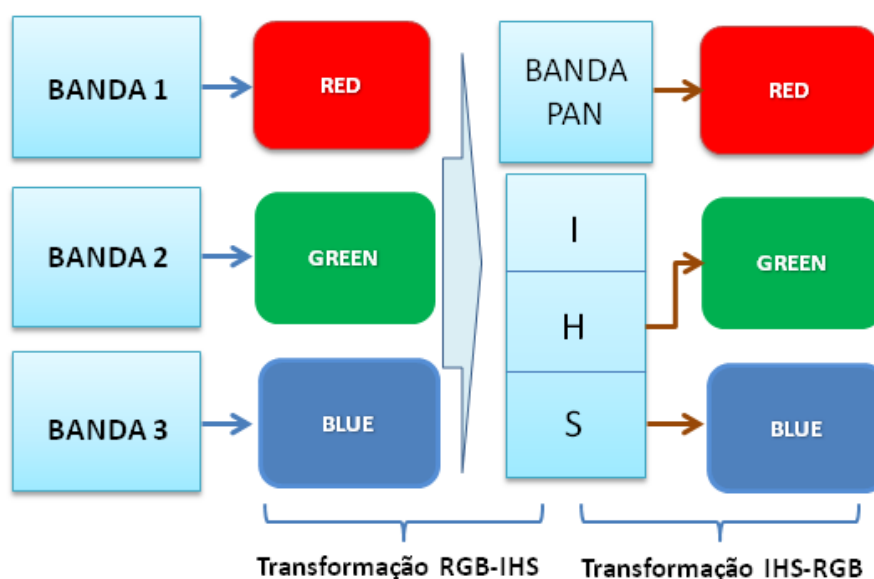
Figura 6 - A) Espaço de cores RGB; e B) Espaço IHS.



Fonte: Modificado de Araujo, 2008.

Um dos resultados dessa transformação é isolar toda informação de brilho no eixo Intensidade, enquanto que as informações espectrais (cores originais) da cena são concentradas nos eixos Matiz e Saturação. A fusão se processa substituindo o canal Intensidade pela banda pan na transformação inversa do espaço de cores IHS para o espaço RGB. Essa técnica tem sido amplamente empregada na fusão de dados de radar com óptico (PARADELLA et al., 1997), óptico com geofísica (TERUYA et al., 2008). A técnica é processada em dois estágios conforme ilustra a Figura 7.

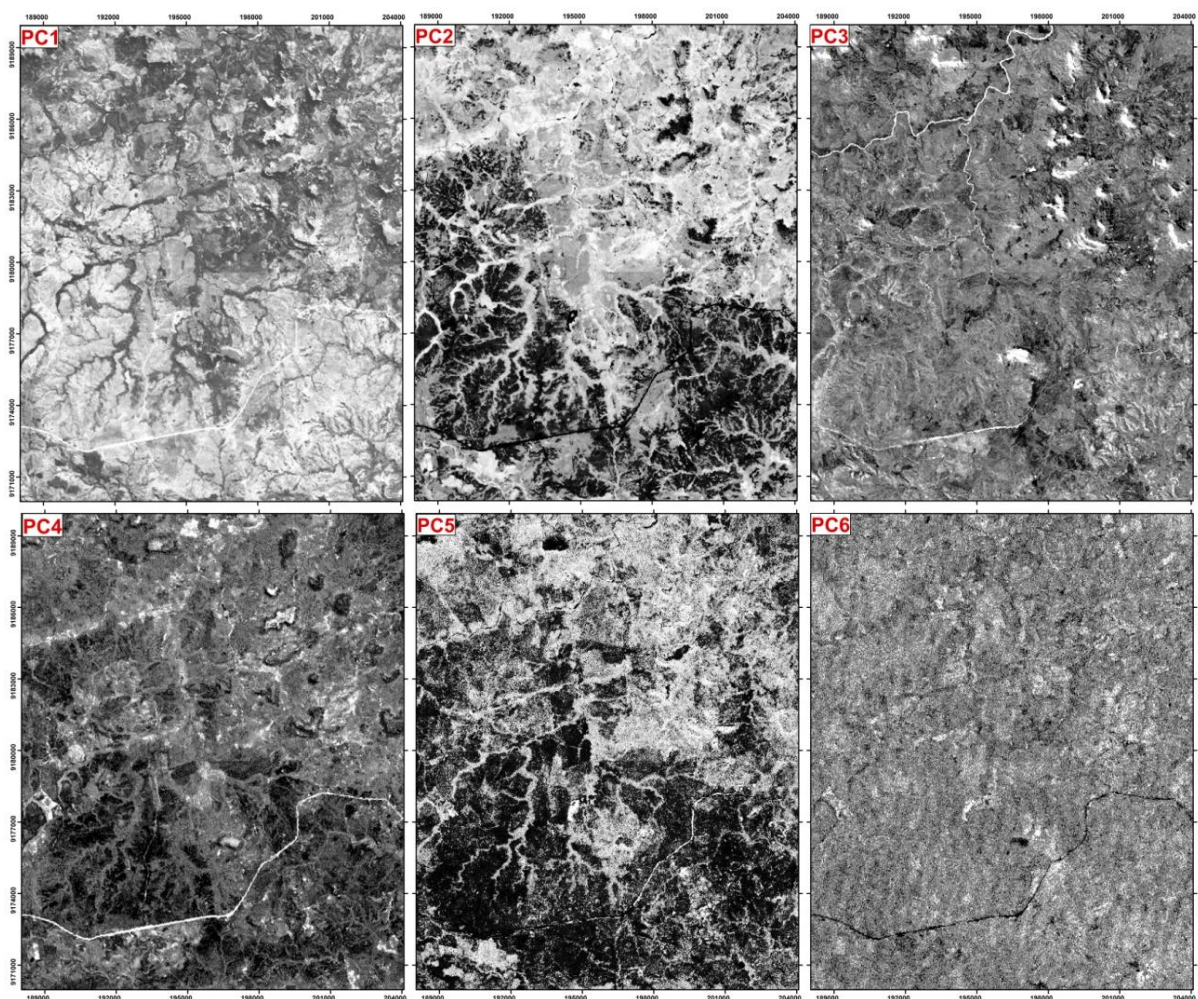
Figura 7 - Esquema da transformação IHS-RGB. Adaptado de D'Iorio, Harris, 1997.



Outra técnica utilizada foi a Análise por Principais Componentes (APC). Trata-se de uma técnica de realce que redistribui a informação das bandas originais, ou seja, a

transformação resulta em um novo conjunto de imagens (componentes principais) onde cada valor de *pixel* é uma combinação linear dos valores originais (Crósta, 1992; Mather, 1999). O número de componentes principais é igual ao número de imagens utilizadas e são ordenadas de acordo com o decréscimo da variância de nível de cinza. De um modo geral, a primeira componente principal irá conter a informação que é comum a todas as imagens originais analisadas, a segunda componente conterá a feição espectral mais significativa do conjunto, e assim por diante, com informações espectrais cada vez menos significantes à medida que se aumenta a ordem das demais componentes. Na Figura 8 são mostradas as imagens resultantes da técnica de análise por principais componentes.

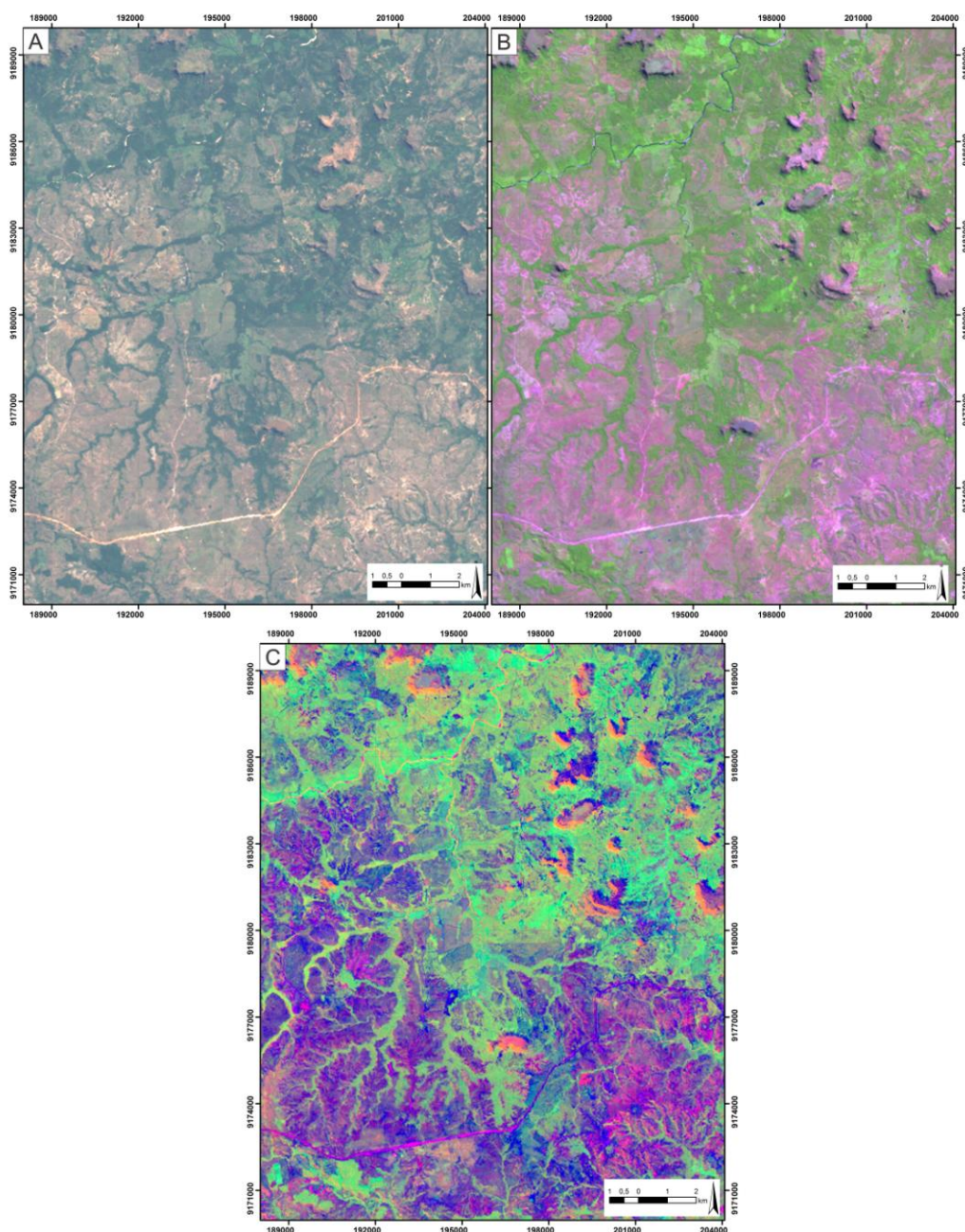
Figura 8 - Imagens geradas pela análise de principais componentes, como entrada a imagem Landsat ETM+ (órbita-222, ponto-65).



A análise visual das imagens do Landsat ETM+ foi feita através da combinação das bandas multiespectrais, utilizando-se ferramentas do *software* Arcgis 10.0. A combinação de bandas envolve a associação de bandas espectrais aos canais de cores vermelho (*Red*), verde (*Green*) e azul (*Blue*) - RGB o que possibilita compor imagens em falsas cores que

diferenciam alguns materiais da superfície com base na variação de cor. Esta técnica permite realçar uma feição particular do terreno ou aspectos da cobertura da área de interesse. Uma vantagem significativa de imagens multiespectrais é a capacidade de detectar variações entre materiais da superfície pela combinação das faixas espectrais (ABOELKHAIR; WATANABE, 2001). As imagens geradas por principais componentes foram também analisadas em composições RGB. Na Figura 9 são demonstradas algumas composições coloridas testadas, para as imagens do sensor Landsat ETM+.

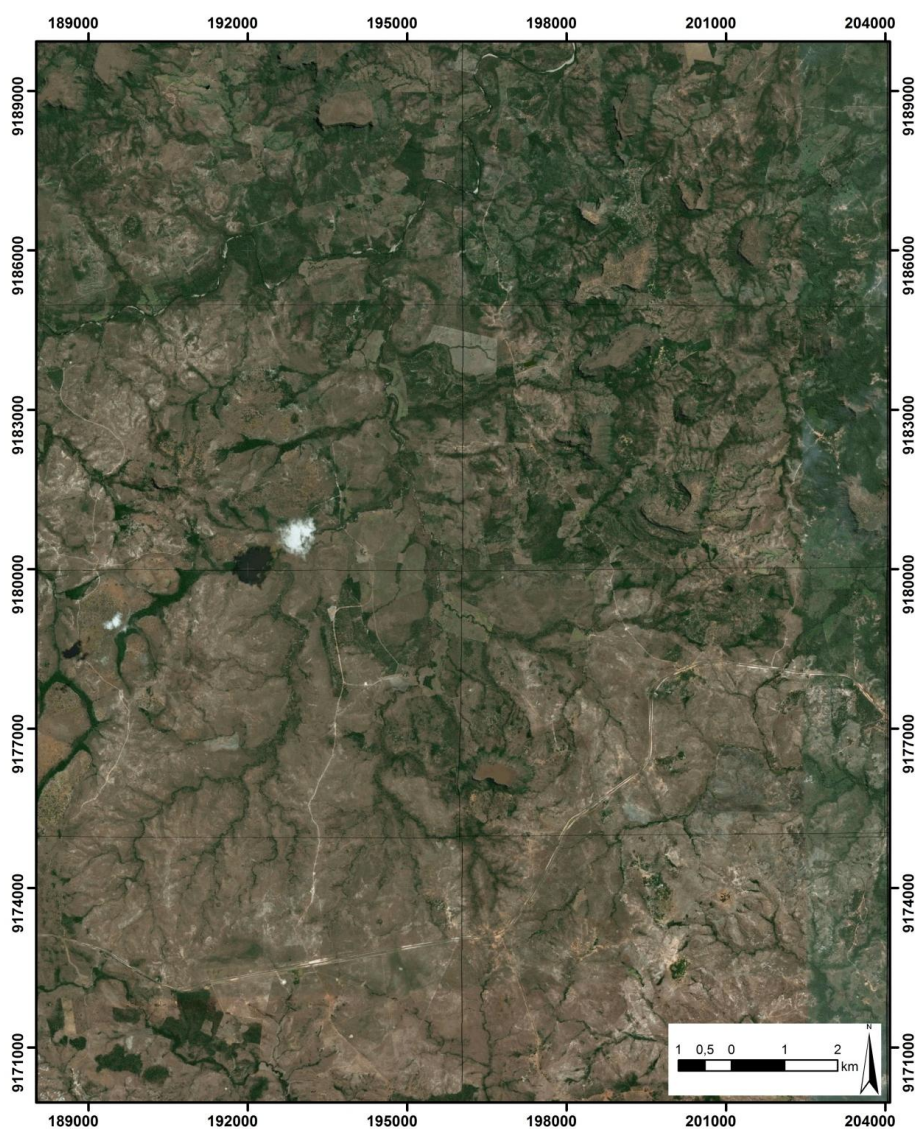
Figura 9 – Composições coloridas entre as bandas multiespectrais do sensor Landsat ETM+. A) Composições coloridas RGB entre as bandas R-3G-2B-1; B) Composição coloridas RGB entre as bandas R-5G-4B-3; C) Composição colorida RGB com a primeira, segunda e terceira principal componente, respectivamente.



### 3.2.2.2 Imagens QuickBird

As imagens do sensor QuickBird foram obtidas através da plataforma *Google Earth*, em formato JPEG. No ArcGIS foi realizado a ortorretificação das imagens obtidas utilizando como dados de referência as coordenadas de pontos notáveis obtidas no próprio *Google Earth*. Em seguida as imagens foram mosaicadas empregando a ferramenta *Mosaic To New Raster* (Figura 10).

Figura 10 - Mosaico de imagens QuickBird, obtidas pela captura de tela na plataforma digital *Google Earth*.



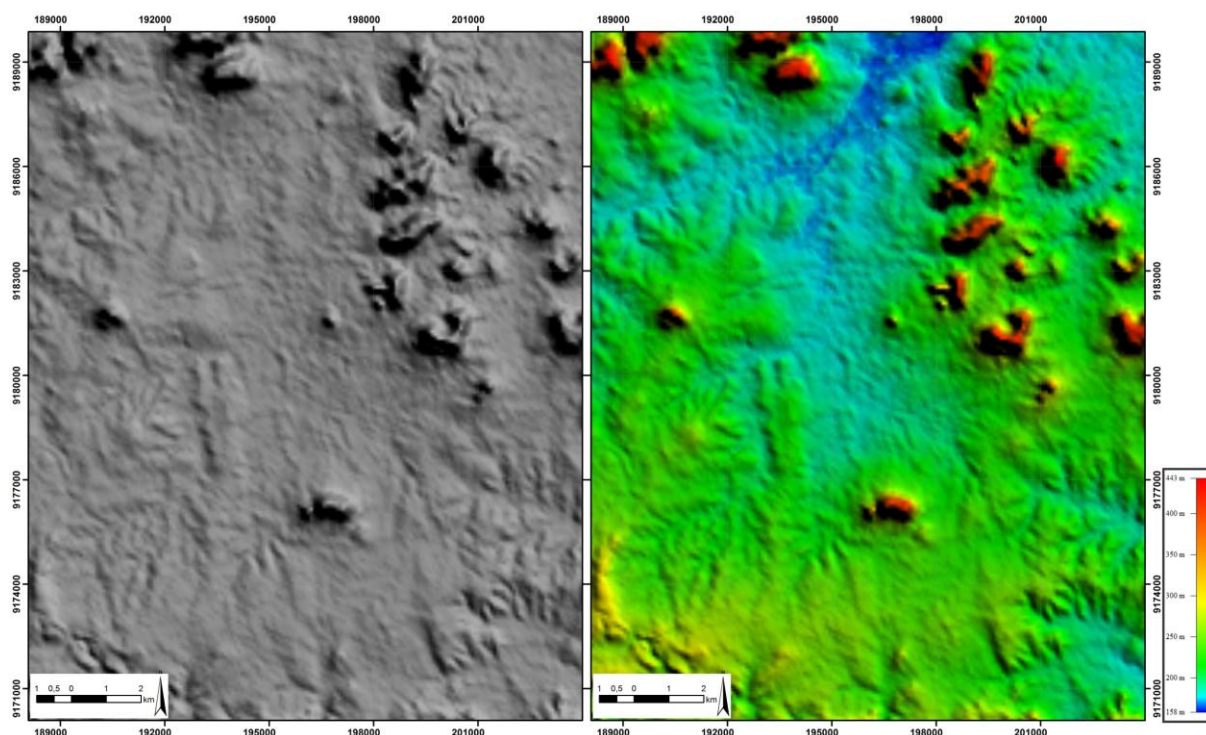
Estas imagens foram utilizadas por serem atuais e disporem de melhor resolução espacial (resolução nominal de 0,61m no formato pancromático e 2,5m no formato multiespectral) (DIGITALGLOBE, 2013). Este tipo de dado favoreceu a extração detalhada

dos elementos de drenagem e relevo (quebras positivas e negativas), dados essenciais no processo de fotointerpretação.

### 3.2.2.3 Modelo Digital de Elevação

Os dados da missão SRTM foram processados no *software Global Mapper*. A imagem foi reprojeta para projeção UTM, datum WGS84 e em seguida reamostrada para 30 m. Esse produto foi então utilizado para geração da imagem relevo sombreado adotando-se os valores  $345^\circ$  e  $45^\circ$  para os ângulos azimutal e de elevação, respectivamente, para melhorar a percepção espacial das formas de relevo, alongadas em NE-SW. Para facilitar a visualização de informações altimétricas, foi utilizada a paleta de cores Atlas Shader do *software Global Mapper* (Figura 11). Outro produto gerado com a utilização do Modelo Digital de Elevação foram as curvas de nível equidistantes 20m.

Figura 11 – Imagens SRTM da área de estudo. A) Relevo sombreado com valores  $135^\circ$  e  $45^\circ$  para os ângulos azimutal e de elevação; B) Imagem hipsométrica da área de estudo.



### 3.2.3 Métodos aplicados à interpretação do mapa fotolitológico

Uma vez processados os dados de sensoriamento remoto, foi empregado o método de análise lógico e sistemático de fotointerpretação proposto por Soares e Fiori (1976), para identificação das feições encontradas na imagem, elaboração de mapas temáticos (mapa de

drenagem, mapa de relevo) e por fim interpretação e determinação do significado geológico, constatados através de dados de campo.

No método de análise lógica o primeiro passo é ter conhecimento das técnicas e processos de obtenção das imagens, informações estas descritas anteriormente (resolução espacial, áreas de cobertura, bandas espectrais, ângulos de incidência do azimute de iluminação e etc). O trabalho de fotointerpretação efetivo foi dividido em três fases: identificação, análise e interpretação das feições da imagem.

#### 3.2.3.1 Identificação dos elementos da imagem

Na etapa de interpretação geológica é essencial a identificação dos elementos naturais da paisagem, sobretudo de relevo e drenagem, que definem a morfologia do terreno. Pode-se também identificar estes elementos com base na tonalidade e cor, que em muitos casos estão relacionadas a importantes feições da paisagem, naturais ou não.

#### 3.2.3.2 Análise dos Elementos de Imagem

Nesta etapa a disposição e ordenamento dos elementos identificados na imagem foram analisados. O menor elemento de imagem, identificável e passível de repetição, é denominado de elemento textural. Para melhor entendimento do método, é importante compreender os conceitos de textura, estrutura e forma.

A textura é o padrão de arranjo dos elementos texturais e é definida pela disposição das menores feições que conservam sua identidade na escala da fotografia ou imagem. A textura de uma imagem é dada, portanto, pelo arranjo dos elementos texturais. A estrutura de uma imagem define o padrão de organização relacionado à disposição espacial ordenada ou não dos elementos texturais, segundo os mais variados padrões (retilíneos, curvilíneos, com formas geométricas ou não). A forma, por sua vez, define o espaço onde um conjunto de elementos texturais de relevo e drenagem apresentam mesmas propriedades. A Figura 12 mostra os parâmetros avaliados na fotointerpretação bem como suas categorizações.

Para a análise da rede de drenagem, as propriedades mais importantes a serem analisadas são descritas resumidamente a seguir (Tabela 2):

Tabela 2 - Propriedade dos elementos texturais de drenagem

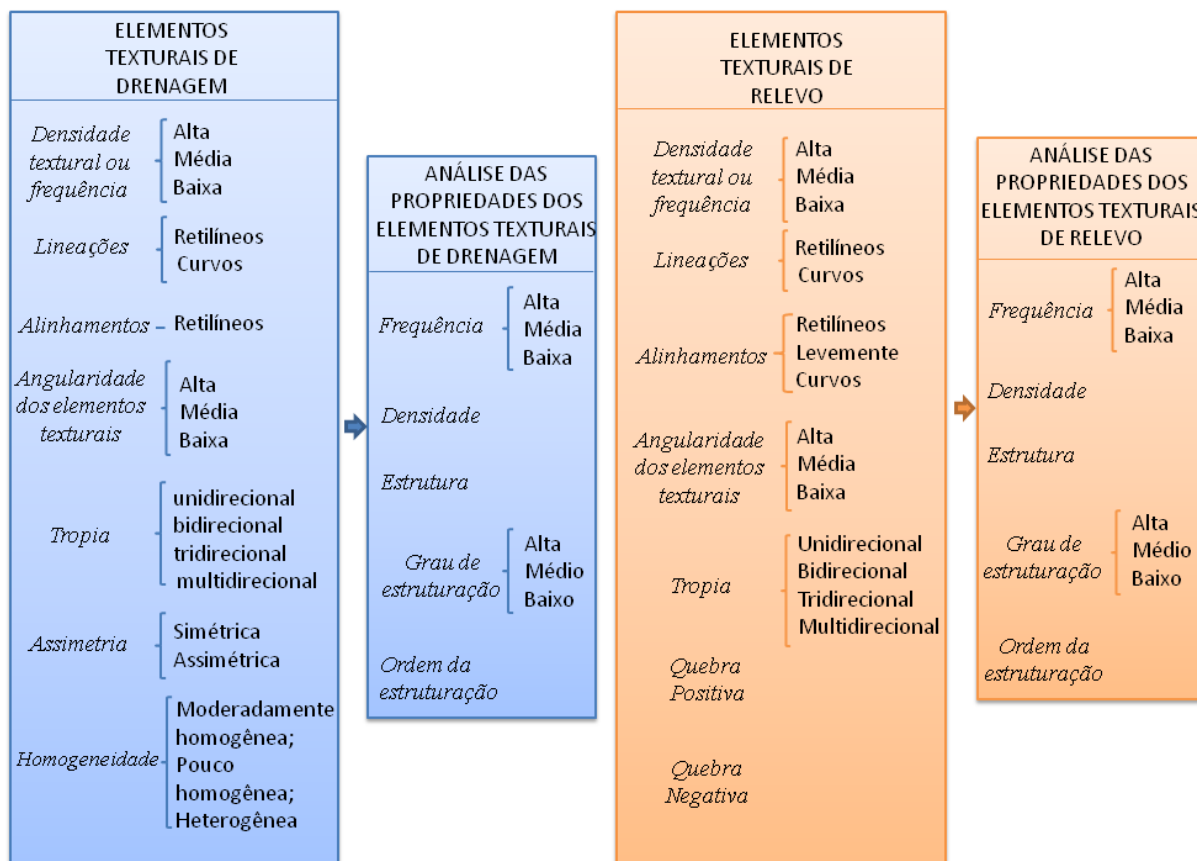
Propriedades dos elementos texturais de drenagem	
<i>Densidade textural</i>	É definida como a razão entre o número de elementos texturais de drenagem por unidade de área.
<i>Lineações</i>	São elementos texturais de drenagem fortemente estruturados, retilíneos ou curvos.
<i>Lineamentos</i>	São definidos pela disposição geométrica, alinhada e fortemente estruturada das feições lineares de drenagem.
<i>Angularidade</i>	É definida em termos dos ângulos e confluência dos elementos texturais de drenagem podendo ser alta (em torno de 180°), média (em torno de 90°) e baixa (ângulos agudos).
<i>Tropia</i>	É a propriedade dos elementos de drenagem se desenvolveu segundo uma direção preferencial.
<i>Assimetria</i>	É caracterizada pela presença de elementos com tamanho ou estrutura sistematicamente diferentes, de um lado e de outro, do elemento maior.
<i>Homogeneidade</i>	Descreve o quanto as propriedades texturais de drenagem são constantes na área analisada.

Os elementos de relevo apresentam-se diferentemente da drenagem, pois sua análise é definida tridimensionalmente. São identificadas feições positivas ou negativas, contínuas e homogêneas, delimitadas por rupturas de declive e identificáveis na imagem. As propriedades para esta análise estão representadas na tabela 3:

Tabela 3 - Tabela das propriedades texturais de relevo.

Propriedades dos elementos texturais de relevo	
<i>Densidade textural</i>	Constitui uma avaliação da quantidade de microfeições do relevo por unidade de área.
<i>Lineações</i>	São pequenas feições lineares, pouco salientes no relevo, fortemente estruturadas, retilíneas ou curvas.
<i>Lineamentos</i>	Constituem uma feição bastante saliente no relevo, com disposição retilínea ou levemente curva, e forte estruturação dos elementos de relevo.
<i>Tropia</i>	Refere-se às orientações das feições lineares de relevo em uma ou mais direções. A sua classificação segue os mesmos padrões descritos para a drenagem.
<i>Quebra positiva</i>	É uma forma saliente no relevo originado pela disposição estruturada de rupturas de declive convexas para cima. Constituem as cristas do relevo podendo ser abruptas ou suaves.
<i>Quebra negativa</i>	Constitui uma forma rebaixada no relevo, formada pela disposição estruturada das rupturas de declive com a concavidade voltada para cima.

Figura 12 - Categorização dos elementos texturais de drenagem e relevo empregados na análise das propriedades das formas.



Uma vez analisados os elementos texturais de drenagem e relevo, definem-se as formas. Estas podem ser analisadas a partir de propriedades comuns e ajudaram na construção do conceito de zonas homólogas. Na Tabela 4, são apresentadas essas propriedades de acordo com a organização apresentada por Veneziani e Anjos (1982):

Tabela 4 - Propriedades das formas.

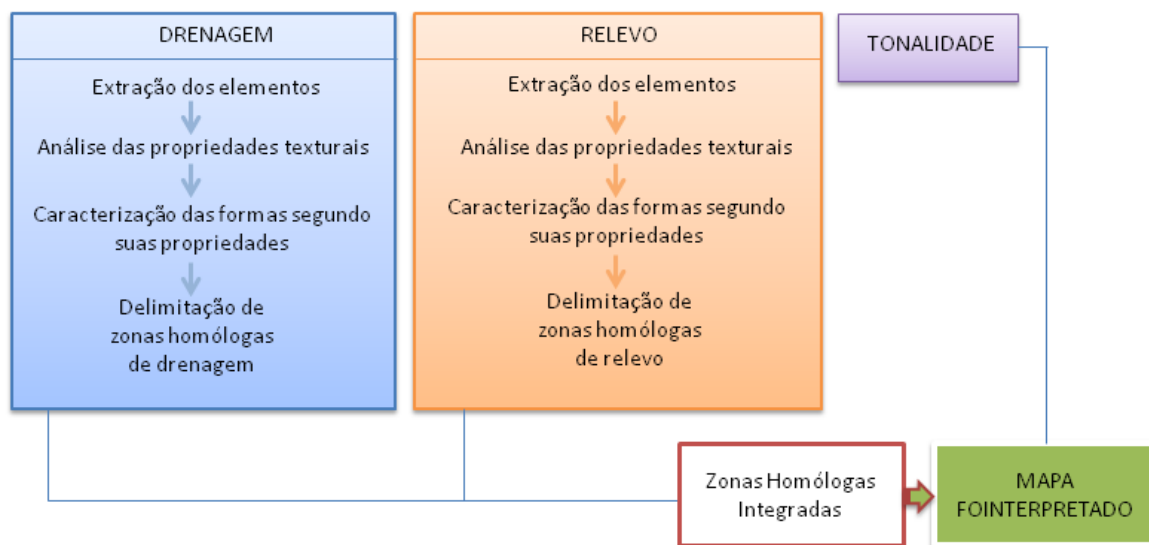
Propriedades das formas	
Propriedades qualitativas dos elementos texturais	É a propriedade que classifica o elemento textural sob análise, podendo ser, por exemplo, de drenagem, relevo, vegetação e etc.
Densidade de textura	É uma propriedade quantitativa que pode ser considerada como uma avaliação relativa. Diz respeito à quantidade de elementos texturais distinguíveis por área imageada.
Estruturas	É uma propriedade qualitativa e refere-se à organização dos elementos texturais no espaço
Grau de estruturação	É uma propriedade quantitativa e está relacionada com a lei de organização dos elementos texturais. Assim, quando a lei de ordenação dos elementos texturais é mal definida, a forma é fracamente estruturada. Já quando os elementos possuem uma disposição regularmente ordenada, a forma é fortemente estruturada.
Ordem de estruturação	É uma propriedade quantitativa e está relacionada com a complexidade de organização dos elementos texturais. Quanto maior é a ordem, mais evidente é a existência de um fator geológico condicionar a forma.

### 3.2.3.3 Interpretação dos elementos texturais

Esta última etapa visa à compreensão e atribuição do significado geológico as propriedades analisadas no tópico anterior, definindo um padrão fotogeológico as unidades mapeadas. A interpretação fotogeológica é baseada nas variações texturais e estruturais do relevo e da drenagem que, portanto, constituem as propriedades fundamentais na análise da imagem, pois permitem separar feições com significados diferentes ou associar feições com o mesmo significado (SOARES; FIORI, 1976). Essa associação é possível, pois as propriedades texturais e estruturais, que definem as formas de relevo e de drenagem são controladas, principalmente, por fatores litológicos, deformacionais e morfogenéticos (RABELLO, 2007).

O produto final da análise e da interpretação dos elementos da uma imagem é a definição de um mapa fotointerpretado para a área alvo. Estas informações devem ser verificadas em campo para por fim ter-se o mapa geológico (Figura 13).

Figura 13 - Fluxograma dos constituintes da interpretação dos elementos texturais da imagem.



### 3.2.4 Sistema de informação geográfica

Burrough e McDonnell (1998) definem um SIG como um conjunto poderoso de ferramentas para coletar, armazenar, restaurar, transformar e mostrar dados espaciais de um mundo real para um propósito particular. Os autores ressaltam também a possibilidade de experimentar combinações com diferentes representações gráficas para a melhor caracterização dos elementos estudados, além da facilidade na produção de mapas e sua atualização quando os dados estão em formato digital. Câmara (1995) distingue o SIG de outros sistemas de informação pela sua capacidade de reunir grandes quantidades de dados convencionais de expressão espacial, estruturando-os e integrando-os adequadamente, tornando-o uma ferramenta essencial para a manipulação das informações geográficas.

Em vista disso, o SIG será utilizado para integrar informações extraídas do sensoriamento remoto, bem como de dados auxiliares, que posteriormente serão necessários para a geração de novas informações em forma de mapas.

### 3.2.5 Análise de fácies

No presente trabalho a classificação de fácies foi realizada através da descrição macroscópica de afloramentos, seguindo o modelamento de fácies proposto por Walker (1992) e Dalrymple (2010), que envolve as seguintes etapas (Figura 14):

- Individualização e descrição de fácies, bem como caracterizar a composição, a geometria, as texturas, as estruturas sedimentares;



## 4 ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DAS IMAGENS

### 4.1 DESCRIÇÃO FISIOGRÁFICA DA ÁREA

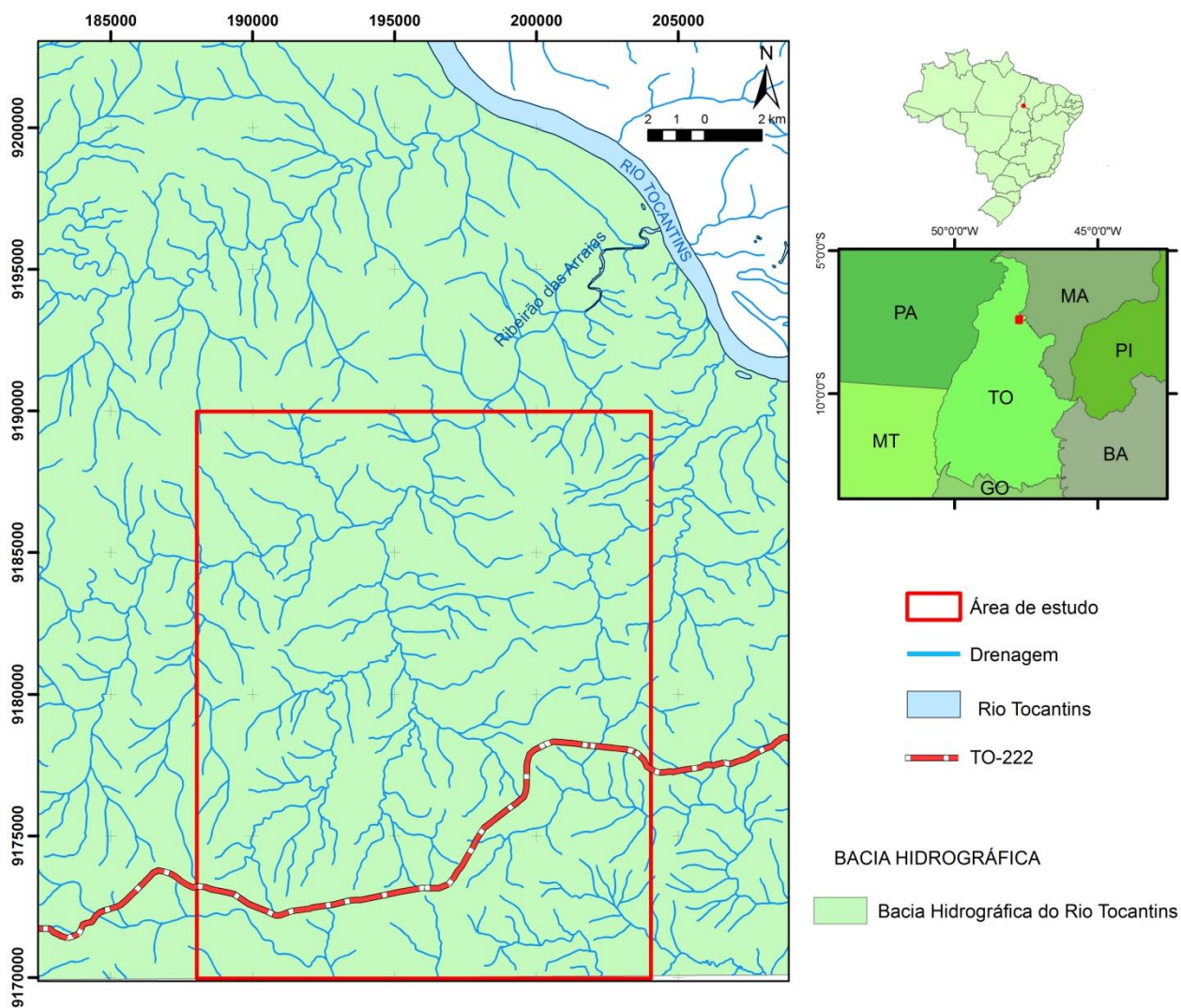
Uma análise cuidadosa dos elementos que compõe a paisagem (geomorfologia, hidrografia e vegetação) pode fornecer informações indiretas sobre disposição espacial das unidades litológicas que auxiliaram o mapeamento geológico.

#### 4.1.1 Hidrografia

A área de estudo faz parte da Bacia Hidrográfica Araguaia-Tocantins, sub-bacia Tocantins. Seu principal curso d'água é o Ribeirão das Arraias, uma drenagem perene que cruza a área na porção superior e é um dos tributários da margem esquerda do rio Tocantins (Figura 15).

Na área de estudo, os cursos de água são na grande maioria intermitentes. Possuem tropia multidirecional, sinuosidade mista e padrão dentrítico.

Figura 15 - Mapa da rede de drenagens da área de estudo.



Fonte: (SEPLAN, 2012)

#### 4.1.2 Vegetação

A área de estudo insere-se na região das savanas conhecida como Savana Brasileira ou Cerrado. O cerrado é considerado a savana mais rica em diversidade do mundo, típica de zona tropical, com vegetação de fisionomia e flora próprias que abrangem aproximadamente 23% do território brasileiro (RIBEIRO; WALTER, 1998).

Na área estudada o cerrado é subdividido nos seguintes tipos: cerradão, campo cerrado e parque. Foram discriminadas ainda matas ciliares, de galeria e vegetação produzidas por ações antrópicas.

- Cerradão - é uma fisionomia florestal com dossel em torno de 8 a 15m que não é associada a cursos d'água. É formado por espécies típicas de cerrado e também por

espécies de mata. Geralmente ocorre em solos mais profundos e bem drenados, com fertilidade de baixa a média.

- Cerrado (sentido restrito) - caracteriza-se pela presença de árvores baixas, inclinadas, tortuosas, com ramificações irregulares, retorcidas e geralmente com evidências de queimadas.
- Parque - é caracterizada por diferentes espécies fitofissionômicas, sendo constituída por várias formações herbáceas da zona neotropical intercaladas por pequenas plantas lenhosas até arbóreas, serpenteadas por Matas Ciliares.
- Mata de galeria e ciliar - Apresentam uma vegetação sempre verde, localizada em terrenos comumente drenados, sempre associados a cursos d'água. A mata de galeria se diferencia das matas ciliares por estarem associadas a rios de pequeno porte, onde a floresta adjacente forma uma galeria, ou seja, as copas das árvores em cada margem se encontram.
- Áreas antrópicas - Estão representadas pela pecuária intensiva e lavouras anuais. As pastagens estão tanto nas regiões de mata quanto de cerrado. Grande parte da área de estudo apresenta paisagem modificada por uso e ocupação do solo.

#### 4.1.3 Geomorfologia

A classificação geomorfológica da área seguiu a proposta do manual técnico de Geomorfologia (2009) elaborado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

A taxonômia dos elementos de relevo foi agrupada hierarquicamente de forma decrescente de grandeza segundo a nomenclatura: Domínios Morfoestruturais, Regiões Geomorfológicas, Unidades Geomorfológicas, Modelados e Formas de Relevo Simbolizadas (Figura 16). Para a individualização dos conjuntos de feições, cuja unidade básica é o modelado, são considerados como parâmetros, fatores causais de natureza estrutural, litológica, pedológica, climática e morfodinâmica. Estes são responsáveis pela evolução das formas de relevo e pela composição da paisagem no tempo geológico (IBGE, 2009).

Figura 16 - Estrutura hierárquica da geomorfologia.



Fonte: Modificado de IBGE (2009).

Mapas geomorfológicos e relatórios produzidos pela Secretaria do Planejamento e Meio Ambiente (SEPLAN) do Governo do Estado do Tocantins serviram de base para a descrição deste item.

#### 4.1.3.1 Domínios Morfoestruturais

Os domínios morfoestruturais ocorrem em escala regional considerando em sua classificação o arcabouço geológico marcado pela natureza das rochas e suas tectônicas. No decorrer de longos períodos, os efeitos climáticos geram amplos conjuntos de relevos com características próprias, que guardam entre si relações comuns com a estrutura geológica da qual se formaram.

A área de estudo enquadra-se no Domínio Morfoestrutural das Bacias e Coberturas Sedimentares Fanerozóicas. Neste sentido, a Bacia do Parnaíba evoluiu sobre substrato composto principalmente por rochas metamórficas de idade de 1600 Ma (Mesoproterozóico) (GOÉS et al., 1992), onde se depositaram sequências sedimentares de natureza predominantemente siliciclástica, ocorrendo também calcário, anidrita e sílex, além de diabásio e basalto (GÓES; FEIJÓ, 1994).

#### 4.1.3.2 Regiões Geomorfológicas

As regiões geomorfológicas possuem características semelhantes, resultantes da atuação de fatores convergentes em sua evolução. São considerados na identificação deste

segundo nível hierárquico, fatores climáticos, distribuição espacial e sua localização geográfica.

Para a área de estudo, Nascimento et al., 2002 propuseram três regiões geomorfológicas: Depressões do Araguaia-Tocantins, Planaltos do Tocantins. Para o IBGE (1993) essas regiões correspondem às unidades de relevo Chapadões e Depressões Residuais do Meio Norte do Tocantins.

#### 4.1.3.3 Unidades Geomorfológicas

Este terceiro táxon corresponde a um conjunto de modelados gerados por uma evolução comum. Esta associação de formas de relevo pode ou não estar no mesmo nível altimétrico, porém apresentam características fisionômicas semelhantes. Tais características podem ser explicadas por fatores paleoclimáticos, litológicos e estruturais. Neste nível taxonômico o entendimento do comportamento da drenagem, seus padrões e anomalias são importantes para avaliar a relação entre ambientes climáticos e os condicionantes litológicos e tectônicos.

Na área estudada as regiões geomorfológicas foram subdivididas nas unidades Depressão do Tocantins e Patamares do Médio Tocantins, onde ocorrem respectivamente os modelados de dissecação e aplanamento (TOCANTINS, 2003).

Os Patamares do Médio Tocantins estão relacionados às formações Motuca e Sambaíba e são correspondentes às superfícies planas em níveis altimétricos diferentes e interrompidas por escarpas erosivas. Esta unidade é dividida em dois níveis altimétricos: patamar inferior entre 200 e 400m e o nível superior com cotas acima de 400m. O patamar superior equivale aos topos dessas serras e morros.

A Depressão do Tocantins é uma superfície de aplainamento degradada devido à mudança do sistema morfogenético que contempla uma rede de drenagem dendrítica/subdendrítica. É também caracterizada por ser mais estável aos processos erosivos e conter mais baixas altitudes topográficas (< 200m), em relação às demais unidades geomorfológicas da área estando implantada sobre as formações Motuca e Pedra de Fogo.

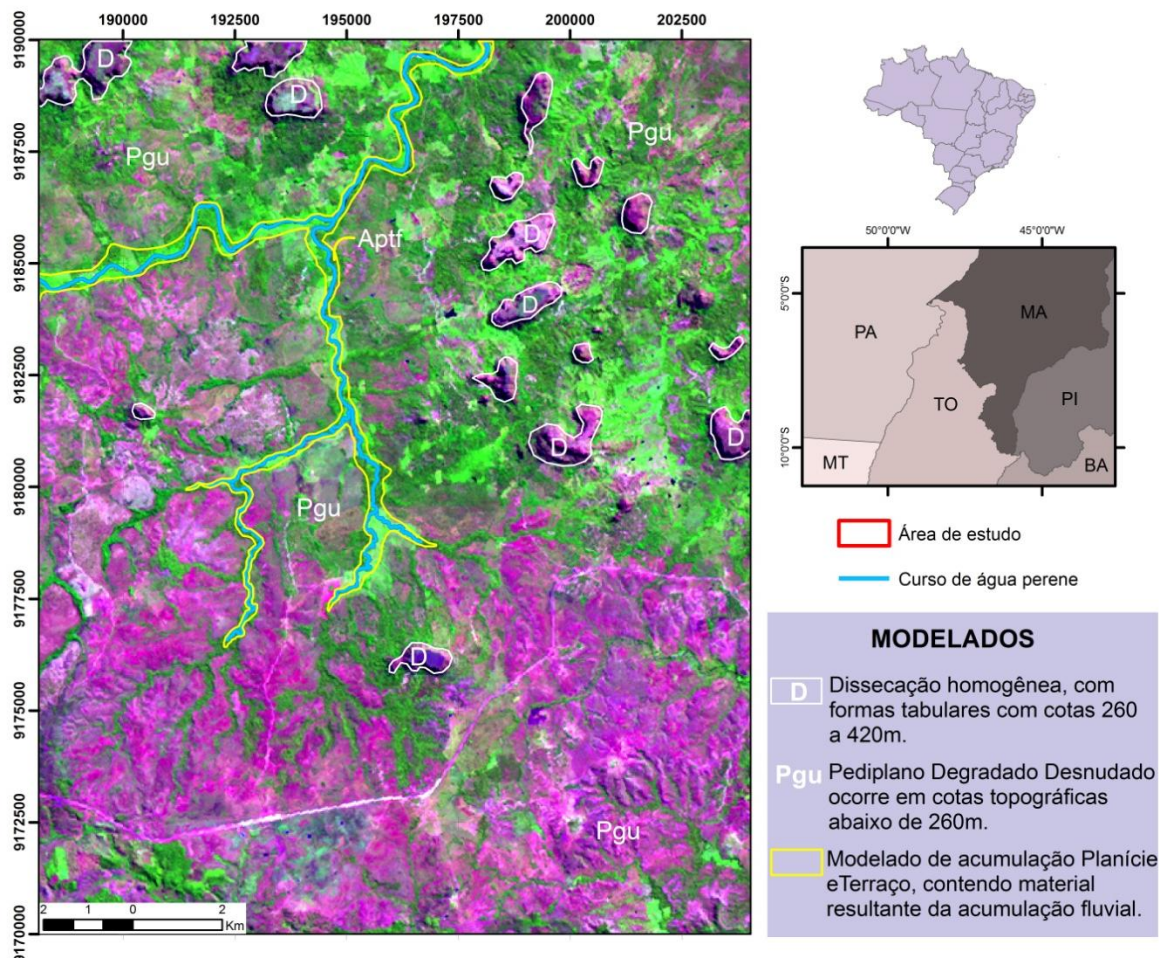
#### 4.1.3.4 Modelados

Os modelados são unidades básicas representadas por manchas ou polígonos formados por grupos de formas de relevo de mesmo padrão contidos no interior das unidades geomorfológicas. A similaridade das formas é produto de uma gênese comum e processos morfogenéticos atuantes. Segundo a metodologia definida foram identificados três tipos de modelados na área de estudo: dissecação, aplanamento e acumulação.

Os modelados de dissecação são definidos pela forma dos topos e densidade da drenagem, sendo discriminados em dissecados estruturais, homogêneos e em ravinas. Os modelados de aplanamento são identificados quanto ao seu estado atual de conservação e degradação, induzidos por eventos erosivos atuantes após a sua elaboração. Por último, os modelados de acumulação são diferenciados em fluviais, lacustres, marinhos, lagunares, eólicos e de gênese mista, resultantes de processos diversos (IBGE, 2009).

Na área de estudo foram individualizados modelados de dissecação homogênea, modelados de aplanamento do tipo pediplano degradado desnudado e modelados de acumulação do tipo planície e terraço (Figura 17). Estes tipos serão detalhados a seguir:

Figura 17 - Identificação de feições geomorfológicas na área de estudo, sobrepostas à imagem ETM+ do satélite Landsat, composição R-5G-4B-3.



### ➤ Dissecação Homogênea – D

O modelado de dissecação homogênea é definido por formas tabulares de topos planos, por vezes ondulados, que delineiam rampas suavemente inclinadas delimitadas por vertentes de elevada declividade (Figura 18A). A rede de drenagem implantada neste modelado é de baixa densidade e padrão dentrítico, não indicando um controle estrutural marcante.

As formas tabulares ocorrem isoladas e concentradas na porção superior da área, possuem altitude de aproximadamente 80m e representam aproximadamente 4% da área total. O aspecto deste modelado sugere que o relevo foi submetido a processos de pediplanação, sendo a dissecação homogênea resultante do entalhamento por drenagem incipiente. A evolução do processo ao longo do tempo gerou grupos de mesas, representadas pelas formas residuais tabulares isoladas.

➤ Pediplano Degradado Desnudado – Pgu

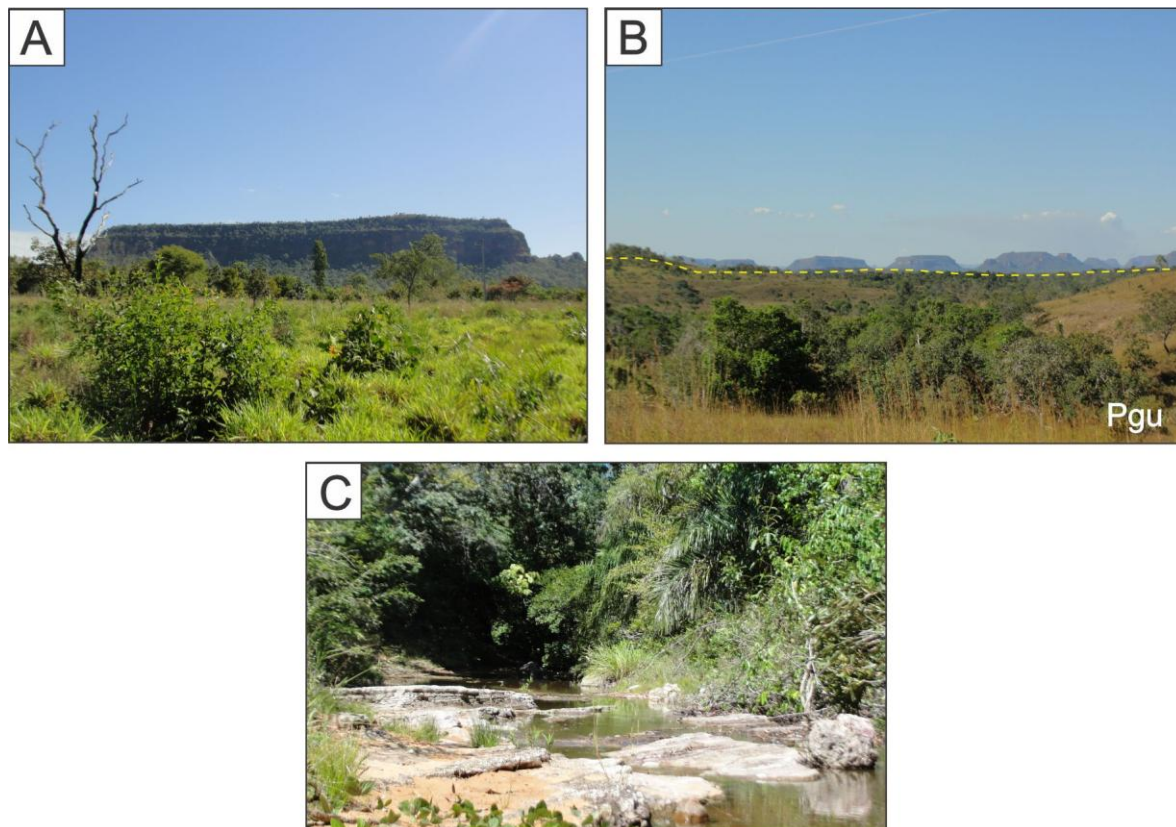
Este modelado de aplanamento constitui a superfície mais arrasada da área, parcialmente conservada, separada por escarpas de outros modelados de dissecação ou de aplanamento (Figura 18B).

A superfície desnudada corresponde 94% da área total ocorrendo em cotas topográficas abaixo de 260m. Este pediplano desnudado foi formado pela exumação de camadas ou coberturas subjacentes por processos erosivos, devido à mudança do sistema morfogenético (IBGE, 2009). Entende-se por sistema morfogenético o conjunto de combinações de processos elementares responsáveis pela modelagem do relevo em uma porção do espaço submetida aos mesmos agentes de erosão, atuando com modalidades idênticas (COQUE, 1977).

➤ Planície e Terraço – Aptf

Correspondem a 2% da área total, são áreas planas resultantes de acumulação fluviais, periodicamente alagadas, comportando meandros abandonados e acumulações arenosas. Ocorrem adjacentes aos cursos de água, contendo material retrabalhado de granulometria variando de fino a grosso (Figura 18C).

Figura 18 - Modelados de relevo identificados na área de estudo. A) Formas tabulares de topo plano e vertentes de elevada declividade, com depósitos coluvionares presentes em sua base. B) Em primeiro plano, modelado de pediplano degradado desnudado (Pgu), com superfície irregular em nível topográfico mais baixo. Ao fundo, formas tabulares com topo plano. C) Planícies e terraços (Aptf) formados por acumulação arenosa nas margens cursos de água, com rochas aflorante no leito.



#### 4.2 INTERPRETAÇÃO GEOLÓGICA DAS IMAGENS

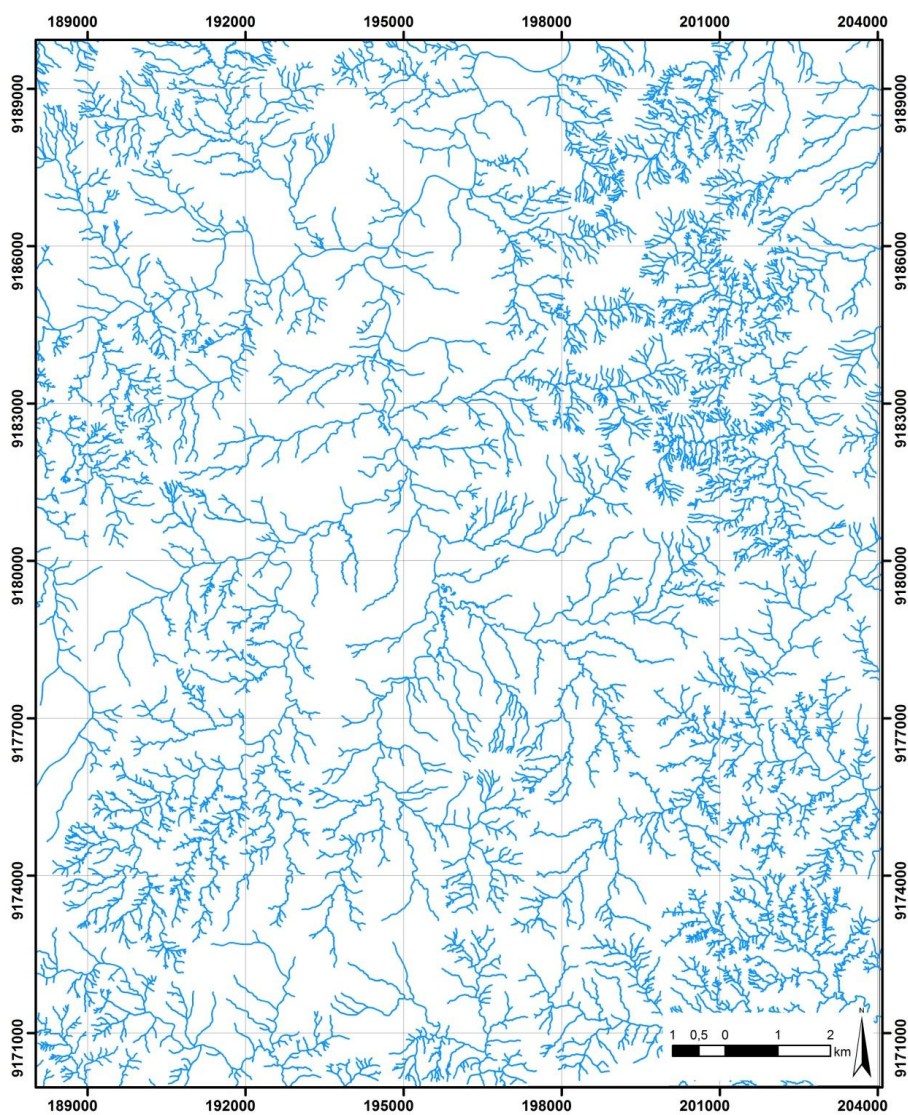
A interpretação geológica das imagens baseada na metodologia de Soares e Fiori (1976), permitiu a identificação de rede drenagem, lineações e lineamentos que posteriormente foram agrupadas em zonas homólogas de acordo com o padrão de determinadas características. O mesmo tratamento foi dado para os elementos de relevo, com extração de quebras positivas e negativas que foram separadas em zonas homólogas. A análise textural da tonalidade foi adotada como um critério auxiliar na delimitação das zonas homólogas de relevo e drenagem de acordo com a abordagem proposta por Veneziani e Anjos (1982).

As informações obtidas nesta fase do trabalho foram organizadas em um SIG utilizando o *software* ARCGIS.

#### 4.2.1 Drenagem

Para a extração dos elementos de drenagem foi utilizado primeiramente o MDE, através da análise visual, foram estabelecidos os principais cursos de água e direção do fluxo de escoamento. O adensamento da rede de drenagem foi feito utilizando as imagens QuickBird, devido a sua alta resolução espectral. O reconhecimento dos elementos de drenagem foi feito através da identificação de sulcos no terreno gerado pela erosão causada pelo fluxo de água superficial (*runoff*) além da observação de matas galerias e ciliares. Desta forma, foi possível a confecção de um mapa de rede de drenagem mostrado na Figura 19.

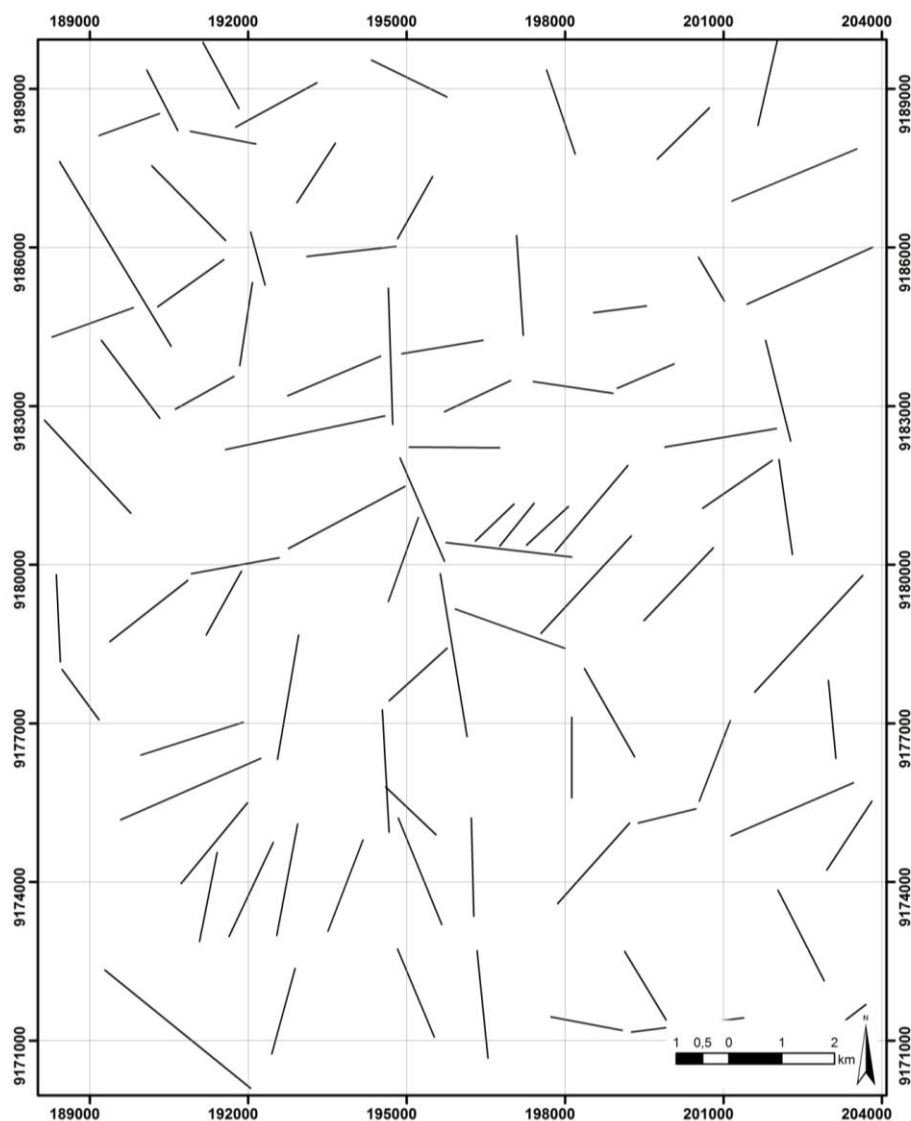
Figura 19 - Rede de drenagem da área de estudo.



A partir do mapa de drenagem foram obtidas feições lineares retilíneas ou curvilíneas definidas como lineamentos (Figura 20). Os lineamentos são definidos como feições lineares

simples ou compostas, alinhadas e de extensão bastante expressiva por isso mapeáveis, presumivelmente refletindo um controle estrutural de subsuperfície.

Figura 20 - Feições lineares de drenagens, obtidas através da rede de drenagem.



A análise conjunta dos mapas produzidos referente à drenagem permitiu a confecção do mapa de zonas homólogas (ZHD) (Figura 21). Foram individualizadas quatro zonas homólogas, descrita na Tabela 5.

Figura 21 - Mapa de zonas homogêneas.

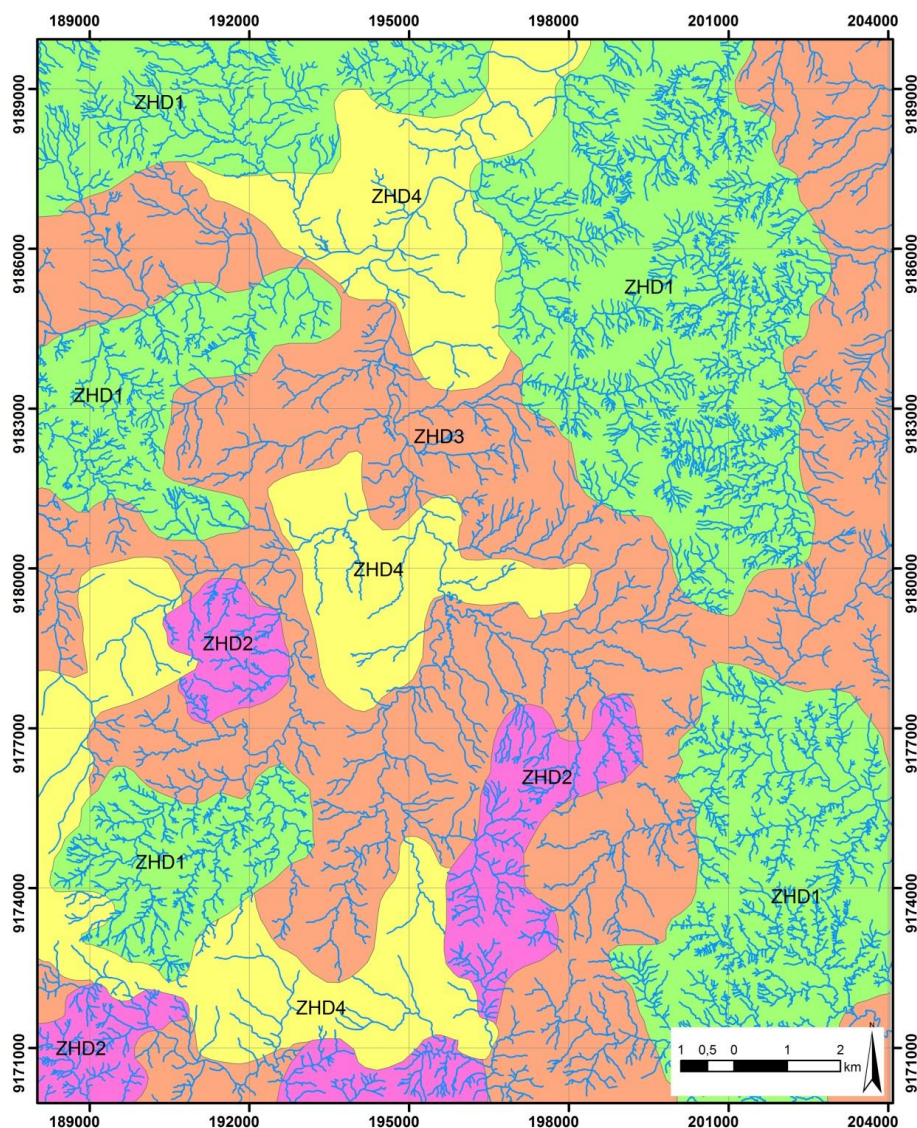


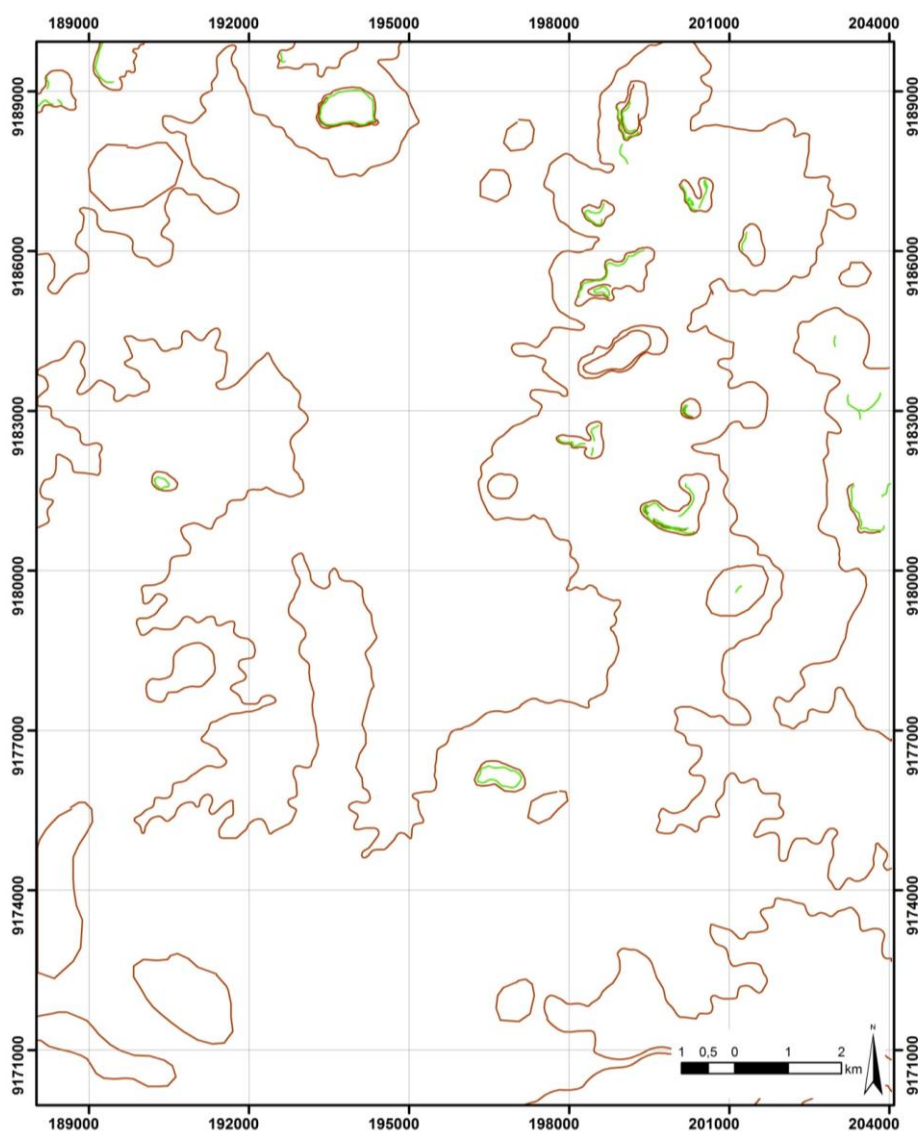
Tabela 5- Descrição das zonas homogêneas de drenagem

Zona Homóloga de drenagem (ZHD)	Identificação	Descrição
	ZHD1	Densidade alta com sinuosidade mista, angularidade baixa, tropia multidirecional e assimetria fraca. Formas anômalas em arco e cotovelo.
	ZHD2	Densidade alta a média com sinuosidade mista, angularidade baixa, tropia multidirecional e assimetria fraca. Formas anômalas em arco e cotovelo.
	ZHD3	Densidade média com sinuosidade mista, angularidade baixa, tropia multidirecional e assimetria fraca. Formas anômalas em arco e cotovelo.
ZHD4	Densidade baixa com sinuosidade mista, angularidade baixa, tropia multidirecional e assimetria fraca. Formas anômalas em arco, cotovelo e meando abandonado.	

#### 4.2.2 Relevo

O relevo da área de estudo apresenta-se pouco movimentado. A identificação de quebras positivas e negativas gerou um mapa de quebras topográficas, representado na Figura 22.

Figura 22 - Quebras topográficas, classificadas em quebras positivas (verde) e negativas (marrom), obtidas através das imagens SRTM e QuickBird.



As quebras positivas do relevo são facilmente delineadas na porção sul e noroeste da área, devido à maior concentração de formas de relevo tabulares com vertentes de elevada declividade. Nesta porção as quebras negativas não são observadas com tanta clareza devido a acumulações de depósitos coluvionares no sopé dos morros, no entanto, podem ser inferidas considerando que estas localizam-se próximas as quebras positivas, delineando um traçado contínuo e paralelo.

Devido à natureza sedimentar e pouca movimentação tectônica do relevo da área, não foram identificadas feições lineares expressivas de relevo. A delimitação em zonas homólogas foi feita com base no mapa de quebras positivas e negativas balizadas pelas cotas topográficas. Foram delimitadas três zonas homólogas de relevo (ZHR), representadas no mapa da Figura 23 e detalhadas na Tabela 6.

Figura 23 - Mapa de zonas homólogas de relevo, obtidas através do mapa de rede e feições lineares.

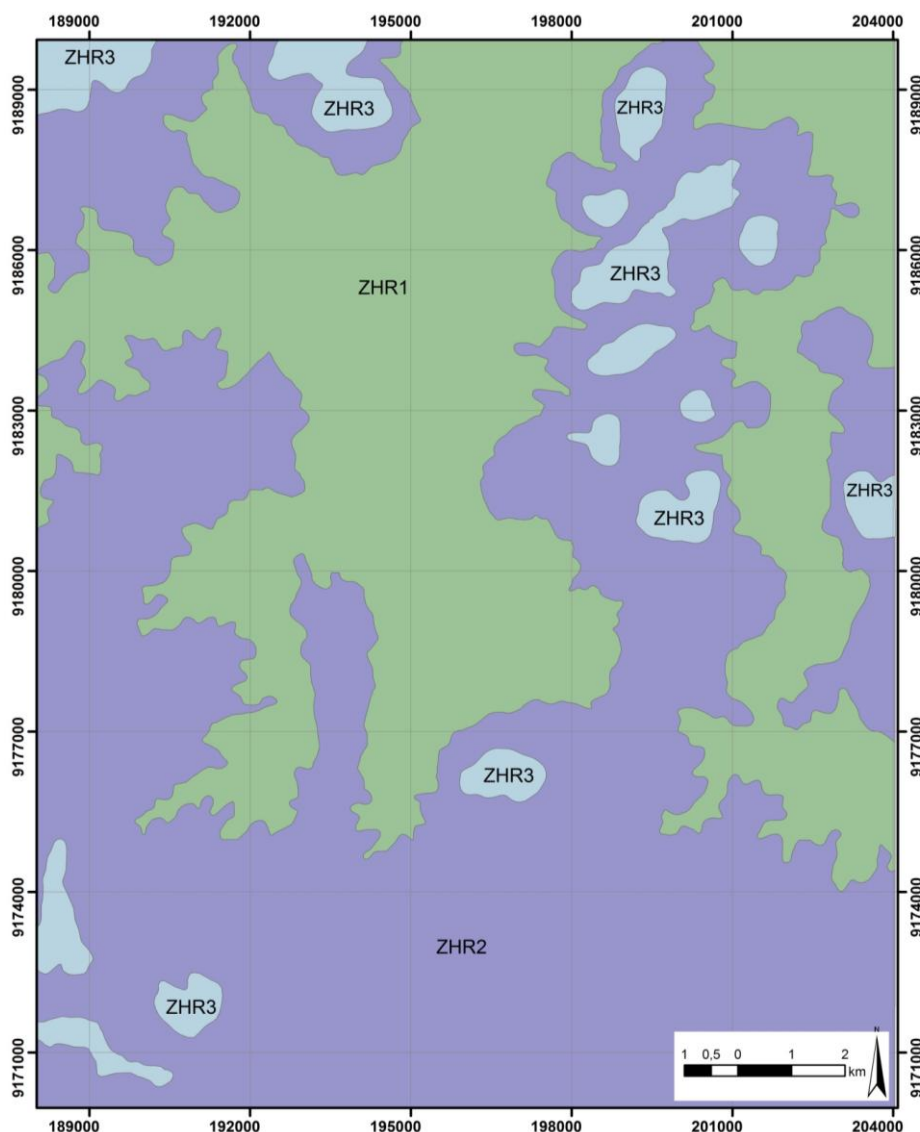


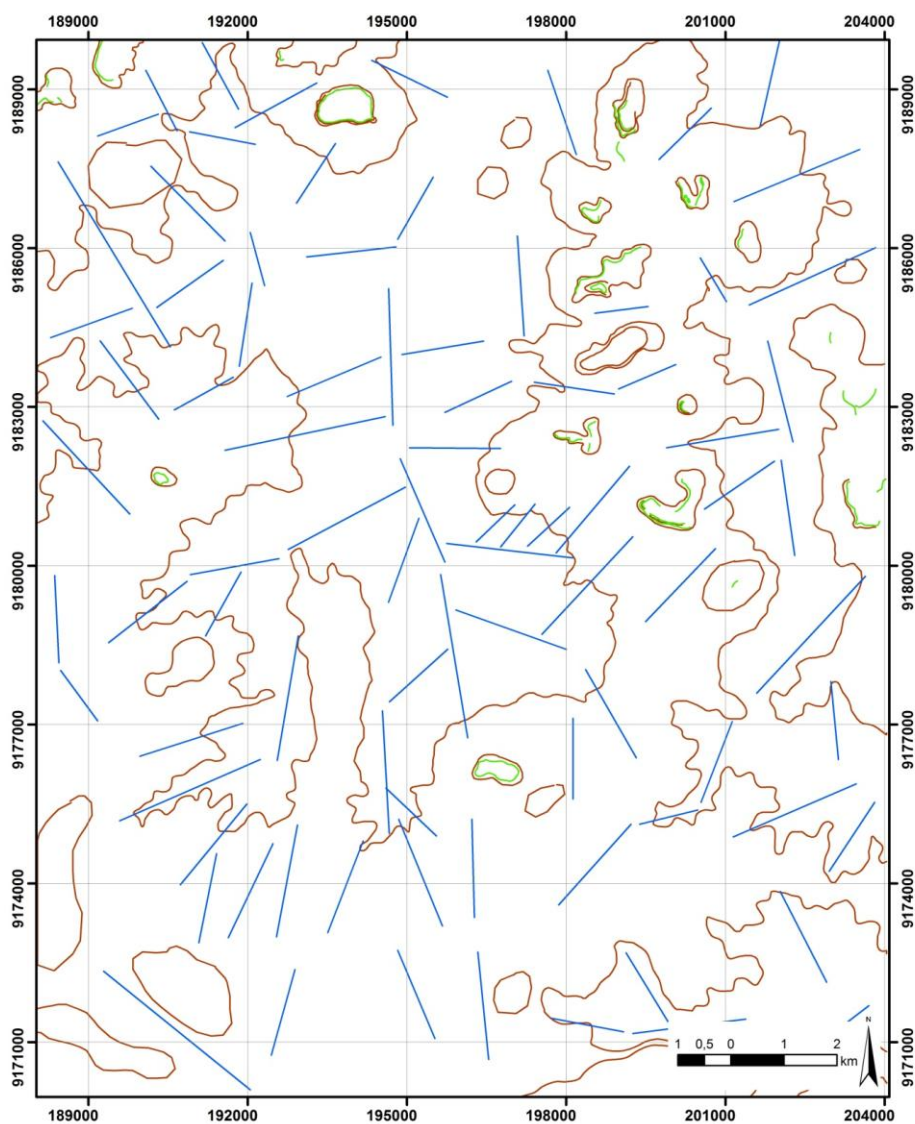
Tabela 6 - Descrição das características que definem as zonas homólogas de relevo.

Zona Homóloga de drenagem (ZHD)	Identificação	Descrição
	ZHR1	Delimitada pelas quebra negativa localizada abaixo da cota topográfica de 200m.
	ZHR2	Definida pelas quebras negativas entre as cotas topográficas de 200m em 280
	ZHR3	Delimitada pelas quebras negativa, localizada acima da cota topográfica de 280m.

### 4.2.3 Integração dos elementos da fotoanálise

A integração das feições lineares de drenagem e quebras topográficas está representada na Figura 24.

Figura 24 - Mapa integrado de lineamento de drenagem (em azul), quebras positivas (em verde) e quebras negativas (em marrom).



A análise conjunta de todas as informações relativas aos mapas de zonas homólogas de drenagem e relevo, bem como observações feitas com base nas imagens, permitiu a delimitação de 7 unidades geológicas fotointerpretadas (UGF), apresentado na figura 25. Na tabela 12 estão sumariadas as descrições de cada uma das zonas

Figura 25 - Mapa de unidades geológicas fotointerpretadas, obtido a partir da análise dos mapas de zonas homólogas de relevo e drenagem.

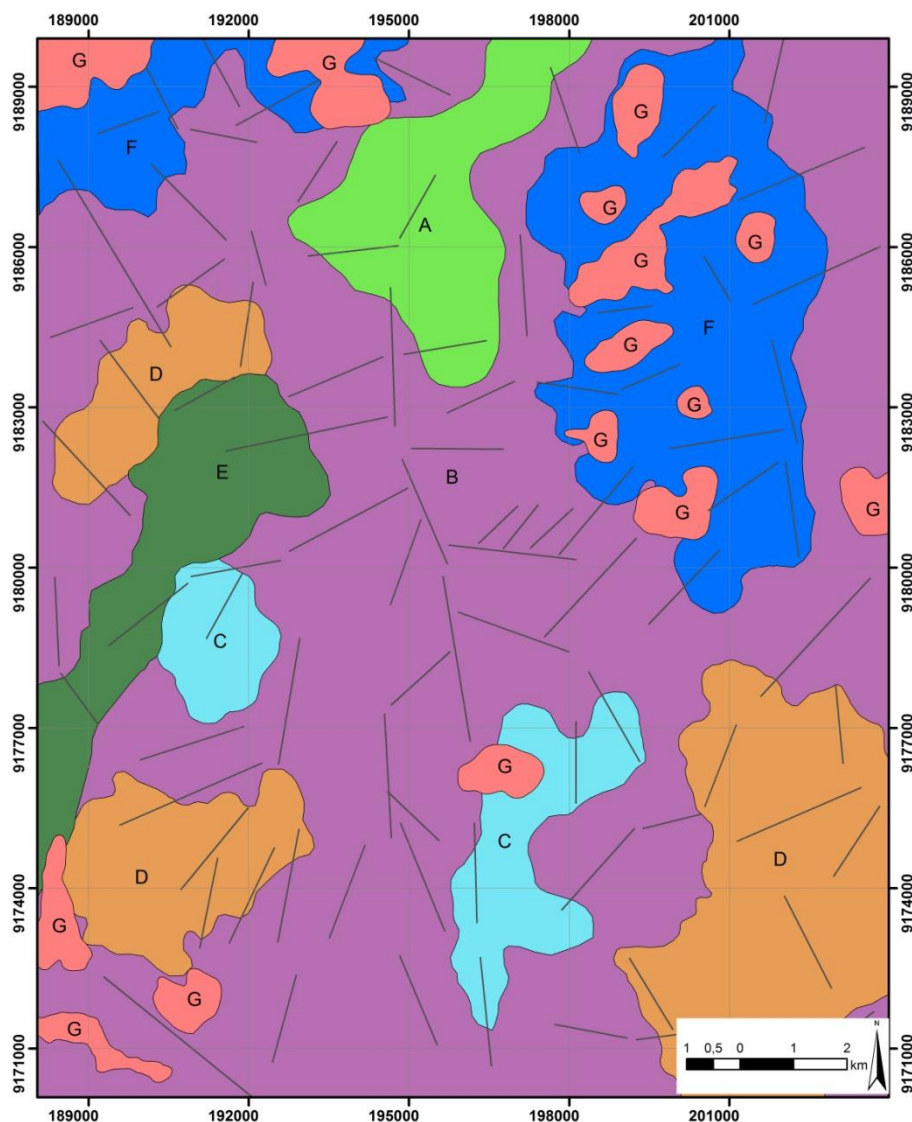


Tabela 7- Cor associada e descrição das unidades geológicas fotointerpretadas.

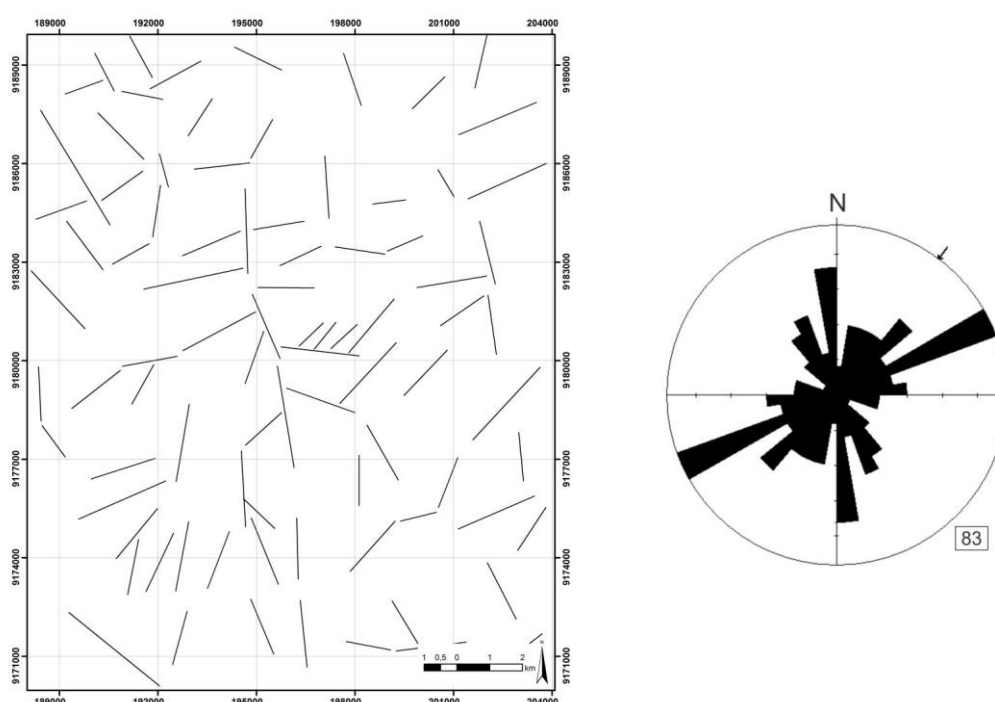
Cor associada	Descrição
A	UGF situada em uma porção da ZHR1, porém definida pela ZHD4.
B	Recobre grande parte da área mapeada, redesenhada da ZHD3.
C	UGF definida pela ZHD2, com frequência textural variando de alta a média.
D	UGF situada em uma porção da ZHR2, definida pela ZHD1. Apresenta aspecto esbranquiçado nas imagens QuickBird.
E	UGF definida pela ZHD4, com limite redesenhado para acompanhar o aspecto amarelado visível nas imagens QuickBird.
F	UGF pertencente a ZHR2 e definida pela ZHD1.
G	UGF definida pela ZHR3

#### 4.2.4 Análise estrutural dos elementos da fotointerpretação

O registro das atividades tectônicas que atuaram e atuam na área de estudo foi interpretado através da análise das direções das feições lineares de drenagem, por meio de diagramas de rosetas. Foram medidas 83 direções dos elementos de drenagem.

O diagrama de roseta referente à análise da rede de drenagem indica duas direções preferenciais: em maior concentração para NE-SW e outra para N-S. (Figura 26).

Figura 26 – Mapa de lineamento e diagrama de roseta dos lineamentos drenagem.



O comportamento estrutural observado na área revela influência de eventos tectônicos na escala regional atuantes na Bacia do Parnaíba.

Ocorrendo com maior frequência os lineamentos com direção preferencial NE-SW podem estar relacionado à atividade tectônica referente ao Lineamento Transbrasiliiano. Segundo Cunha (1986) este lineamento é marcado por falhas orientadas na direção NE-SW, que cortam rochas paleozóicas e mesozóicas do embasamento e mantém-se ativo desde a sua instalação até a época presente.

As feições lineares extraídas da rede de drenagem com direção preferencial N-S, tem seu comportamento estrutural influenciado pelo Lineamento Tocantins-Araguaia, que cruza a Bacia do Parnaíba na porção oeste (KEGEL,1965).

## 5 ANÁLISE DE FÁCIES

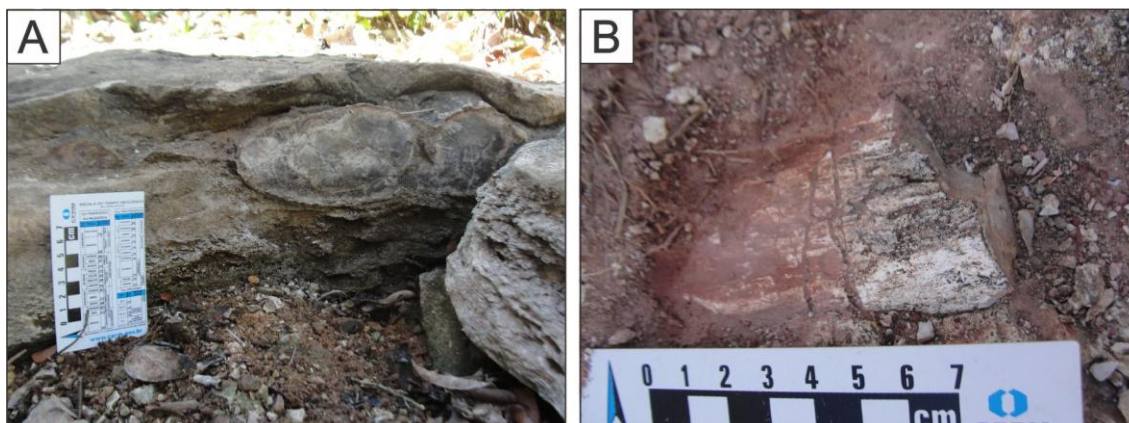
### 5.1 ASPECTOS GERAIS

As sucessões estratigráficas estudadas pertencem às formações Pedra de Fogo, Motuca e Sambaíba constituintes do Grupo Balsas (GOÉS; FEIJÓ, 1994). Exposições dessas rochas são encontradas em afloramentos do tipo corte de estrada, leitos e margens de rio, frentes de lavra e afloramentos naturais expostos na encosta de morros. O grupo Balsas na área de estudo apresenta sucessão sedimentar com espessura de aproximadamente 320 m, estimado a partir da diferença de curvas de nível.

As fácies da Formação Pedra de Fogo são pelíticas e subordinadamente arenosas. Os pelitos apresentam coloração cinza esverdeado a avermelhado, com estruturas predominantemente onduladas a plano-pararelas. É comum a presença de estruturas de ressecamento do tipo gretas de contração no topo dessas camadas (Figura 28C). As fácies arenosas são compostas por arenitos esbranquiçados, em sua maioria com granulometria fina ocorrendo intercalados às fácies pelíticas, em ciclos granocrescentes e granodecrescentes ascendentes. Arenitos bem selecionados e arredondados, de granulometria fina a média e grãos com aspecto fosco também ocorrem, porém em exposições de pequena extensão lateral. Camadas intensamente silicificadas e/ou com concreções de sílex, ocorrem tanto nos pelitos quanto nos arenitos (Figura 27A).

O registro fossilífero encontrado na Formação Pedra de Fogo é dado principalmente por fragmentos de troncos silicificados, que ocorrem nas camadas de pelitos. Por conta dos processos de intemperismo e erosão são comuns em toda a área depósitos coluvionares contendo fragmentos deste material vegetal silicificado (Figura 27B).

Figura 27 - Fácies da Formação Pedra de Fogo. A) Concreções de sílex de aproximadamente 10 cm em arenito finos. B) Tronco silicificado de aproximadamente 7 cm em camada de pelito vermelho.



A Formação Motuca é representada predominantemente por fácies pelíticas de coloração avermelhada com estruturas plano-paralelas a ondulada (Figura 32A). Subordinadamente ocorrem camadas de arenitos de coloração avermelhada intercalados aos pelitos e também fácies evaporíticas constituída por camadas espessas de gipsita de textura nodular, laminada e gipsita fibrosa. (Figura 32C e D).

As fácies da Formação Sambaíba são essencialmente arenosas de granulometria fina a média, coloração creme-alaranjada a avermelhada, com estratificação cruzada de médio e grande porte e subordinadamente estratificação plano-paralela (Figura 34).

A partir do estudo das litologias e de suas estruturas primárias, bem como suas inter-relações, foram identificadas e individualizadas 8 fácies sedimentares (Tabela 8). O modelamento destas permitiu a interpretação de paleoambiente deposicional segundo o modelo proposto por Walker (1992).

## 5.2 DESCRIÇÃO DE FÁCIES

### 5.2.1 Arenito com estratificação cruzada de pequeno porte (Ac1)

Esta fácies ocorre nos depósitos da Formação Pedra de Fogo. É constituída por arenitos de coloração cinza-esbranquiçado a alaranjado, com grãos finos a médios, bem selecionados e arredondados, de alta esfericidade e de aspecto fosco. As camadas desta fácies apresentam estratificação cruzada com base tangencial formando *sets* de pequeno porte, de até 30 cm de espessura, com adelgaçamento ascendente e migração preferencial dos *forsets* para SE (Figura

30B). Estes apresentam ângulo de inclinação variando entre 15° a 32° no topo. Os *topsets* são planos a ligeiramente ondulados.

O processo sedimentar responsável pela formação desta foi dado pela migração de dunas eólicas assimétricas 2D, de pequeno a médio porte, produzidas pela saltação e suspensão de grãos em condições subaéreas.

### 5.2.2 Arenito com estratificação cruzada de médio a grande porte (Ac2)

Esta fácies é composta por arenitos de coloração creme-alaranjado a avermelhado, com grãos finos a médios, bem selecionados e arredondados, de alta esfericidade e aspecto fosco. Os *sets* apresentam estratificação cruzada de médio e grande porte, com espessuras que variam de 0,5 a 15m (Figura 34B), migração preferencial para NW-SW.

Esta fácies originou-se de processos relacionados à migração de dunas eólicas 2D de médio a grande porte, produzidas pela saltação e suspensão de grãos em condições subaéreas.

### 5.2.3 Arenito fino com laminação ondulada a planar (Aop)

Esta fácies é constituída por arenitos de cor creme-esbranquiçado de granulometria fina a média, grãos moderadamente selecionados e laminações onduladas gradando lateralmente para laminação plano-paralela. Por vezes, não foram observadas estruturas nestes arenitos, caracterizando assim um acamamento maciço (Figura 28F). Esta fácies ocorre nas sucessões sedimentares da formação Pedra de Fogo, comumente intercalada a fácies Ppo. As camadas possuem geometria tabular com espessuras centimétricas variando de 5 a 30 cm e extensão lateral de dezenas de metros.

Esta fácies foi formada em ambiente subaquoso, em regime de fluxo inferior através da migração de marcas onduladas produzidas por ondas. As estruturas do acamamento maciço podem ter sido obliteradas por bioturbação ou ausência de variação granulométrica.

### 5.2.4 Arenito com estratificação plano-paralela (App)

Esta fácies ocorre em depósitos das formações Pedra de Fogo e Sambaíba. É constituída por arenito fino de coloração creme-alaranjada a avermelhado, com grãos bem selecionados e arredondados de aspecto fosco. Esta fácies apresenta-se em camadas com geometria tabular,

exibindo estratificação plano-paralela ou de baixo ângulo, comumente associada às fácies Ac1 e Ac2 (Figura 30A).

O processo responsável pela formação desta fácies se deu em ambiente subaéreo, pela migração de formas de leito relacionadas ao transporte eólico.

#### 5.2.5 Arenito com moldes evaporíticos (Ame)

Fácies constituída por arenitos finos a médio de coloração creme, moderadamente selecionados, variando de subangulosos a arredondados. Os moldes evaporíticos encontrados neste arenito encontram-se silicificados e são do tipo *popcorn*. As camadas onde esta fácies ocorre possuem geometria tabular e são lateralmente contínuas (Figura 29A).

Os moldes evaporíticos foram formados em um ambiente que permitiu a cristalização e precipitação química de sais. Posteriormente houve substituição dos evaporitos por sílica por processos de silicificação sindeposicionais e eodiagenéticos.

#### 5.2.6 Gipso nodular (Gn)

Camada de gipsita com 3 m de espessura, contendo nódulos irregulares de gipsita (textura *chickenwire*) de coloração esbranquiçada e diâmetros variáveis de até 2 cm (Figura 32C). Por vezes esta fácies apresenta-se limitada por lâminas de gipso fibroso e pelito.

A formação desta fácies ocorre em zonas porosas contendo água supersaturada em sulfato, através do crescimento e coalescências de nódulos evaporíticos.

#### 5.2.7 Gipso laminado (Gl)

Está fácies é formada por camadas de gipsita lateralmente contínuas, com espessuras variando de milímetros a centímetros. Associado a esta fácies podem ocorrer lâminas onduladas de gipsita de cor esbranquiçada e textura fibrosa, gipsita de coloração cinza escura (Figura 32D).

O processo responsável pela formação desta fácies é a precipitação química de sulfato em ambiente subaquoso supersaturada em sulfato, influenciados por variações sazonais da salmoura.

### 5.2.8 Pelito com laminação plano-paralela a ondulada (Ppo)

Está fácies é constituída por pelito com laminação plano-paralela a levemente ondulada, de coloração cinza-esverdeado a avermelhado, apresenta geometria tabular e grande extensão lateral, podendo alcançar dezenas de metros (Figura 28 B e 32A). Esta fácies ocorre em depósitos das formações Pedra de Fogo e Motuca. As camadas possuem espessuras variáveis de poucos centímetros a até 2m. Esta fácies apresenta-se comumente intercalada à fácies Aop. Fragmentos de troncos silicificados com estrutura fisiológica vegetal preservada, dispostos horizontalmente ao acamamento (Figura 28 D) e concreções de sílex ocorrem nesta fácies.

Está fácies foi gerada em ambiente de baixa energia, onde predominavam processos de suspensão eventualmente este ambiente era submetido a regime de fluxo inferior, onde se formavam marcas onduladas. Os troncos silicificados com estrutura fisiológica vegetal bem preservada indicam que o processo de silicificação ocorreu antes da sua degradação e a ocorrência de concreções de sílex é resultante de processos diagenéticos de concentração química.

Tabela 8 - Fácies sedimentares descritas na área mapeada, sendo discriminadas litologias, estruturas e processos responsáveis pela formação destas.

Fácies	Litologia	Estrutura Sedimentar	Processos
Ppo	Pelito	Laminação plano-paralela a ondulada	Deposição em ambiente de baixa energia dominado por suspensão e decantação
Aop	Arenito	Laminação ondulada a plano-paralela	Deposição por suspensão em ambiente de baixa energia em regime de fluxo inferior e migração de marcas onduladas produzidas por ondas.
App	Arenito	Estratificação plano-paralela ou de baixo ângulo	Migração de formas de leito planas a levemente onduladas, em ambiente subaéreo.
Ac1	Arenito	Estratificação cruzada de pequeno porte	Migração de dunas eólicas 2D de pequeno porte, para SE, produzidas pela saltação e suspensão de grãos em condições subaéreas.
Ac2	Arenito	Estratificação cruzada de médio e grande porte	Migração de dunas eólicas 2D de médio a grande porte para NW-SW. Produzidas pela saltação e suspensão de grãos em condições subaéreas.
Ame	Arenitos	Com moldes evaporíticos silicificados	Precipitação química em águas calmas e salinas. Posterior silicificação sindeposicional a eodiagenética.
Gn	Gipso	Gipso nodular	Crescimento e coalescência de nódulos evaporíticos em poros contendo água supersaturada em sulfato na zona capilar.
Gf	Gipso	Gipso laminado	Precipitação química de sulfato, em água calmas e salinas, influenciadas por variações sazonais.

### 5.3 ASSOCIAÇÃO DE FÁCIES (AF)

Na área mapeada foram identificadas 8 fácies agrupadas em 5 associações de fácies (Tabela 9). Na Formação Pedra de Fogo foram identificadas as associações de fácies lacustre, campo de dunas e *sabkha* continental. Na Formação Motuca foi identificada a associação de fácies lacustre, e na Formação Sambaíba a associação de fácies campo de dunas.

#### 5.3.1 Formação Pedra de Fogo

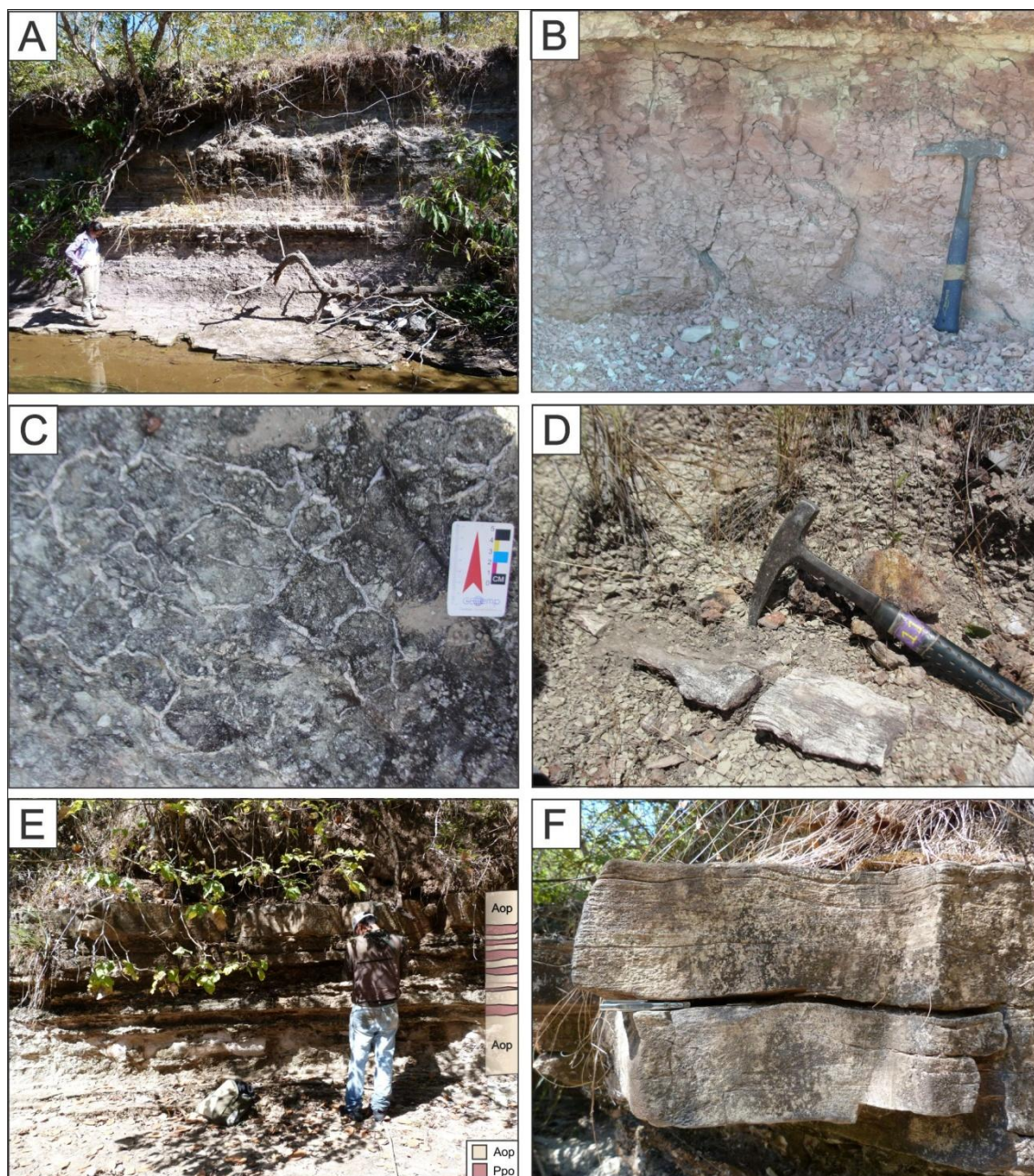
##### 5.3.1.1 Associação de fácies 1 (AF1) - Lacustre

Esta associação apresenta espessura aproximada de 20 m, constituída pelas fácies pelito com laminação plano-paralela a ondulada (Ppo) e arenito fino com laminação ondulada a planar (Aop) configurando ciclos granocrescentes ascendentes (Figura 28 A).

Esta associação de fácies reflete um ambiente de baixa energia com predomínio de sedimentação por decantação que possibilitaram a deposição da fácies pelítica. Nesta associação são encontrados troncos fossilizados em posição horizontal, que sugere um transporte *post-mortem* por fluxos de baixa energia (Figura 28D). Gretas de contração, geradas por ressecamento são comumente encontradas nesta associação (Figura 28C), indicando que este ambiente foi influenciado por variações sazonais e exposição subaérea.

O ambiente sugerido para esta associação é lacustre de baixa energia dominada por suspensão e deposição de finos. A sedimentação pelítica era eventualmente interrompida por influxos de material arenoso (Aop) (Figura 28F), possivelmente relacionado a rios efêmeros (*wadis*) (Figura 28E). Esta atividade fluvial ocorre de forma abrupta e esporádica e pode transportar sedimentos de várias classes granulométricas (DELLA FÁVERA, 2001; STEAR, 1985). A granulometria fina da fácies Ao, nos afloramentos estudados, pode ser explicado devido à tendência que eventos de inundação, em seu estágio final, formarem ciclos caracterizados pela progressiva diminuição do tamanho dos grãos e pela ocorrência de estruturas geradas em condições de regime de fluxo inferior (MIALL, 1977; STEAR, 1985).

Figura 28 - Fácies e associações de fácies Lacustre da Formação Pedra de Fogo. A) Visão geral da AF1, com intercalação de pelito com laminação plano-paralela a ondulada (Ppo) e arenito fino com laminação ondulada a planar (Aop). As camadas arenosas são identificadas por apresentarem relevo positivo no perfil; B) Fácies Ppo de coloração cinza esbranquiçado a avermelhado; C) Vista em planta de gretas de contração na fácies Ppo; D) Detalhe do tronco silicificado na fácies Ppo, disposto horizontalmente ao acamamento com estrutura fisiológica vegetal preservada. E) Vista de afloramento da AF1, com intercalação das fácies Ppo e Aop, o aumento da espessura da fácies arenosa, está relacionada possivelmente a maior competência de transporte sedimentar relativo aos rios efêmeros; F) Camada de 30 cm da fácies Aom, notar laminações onduladas.



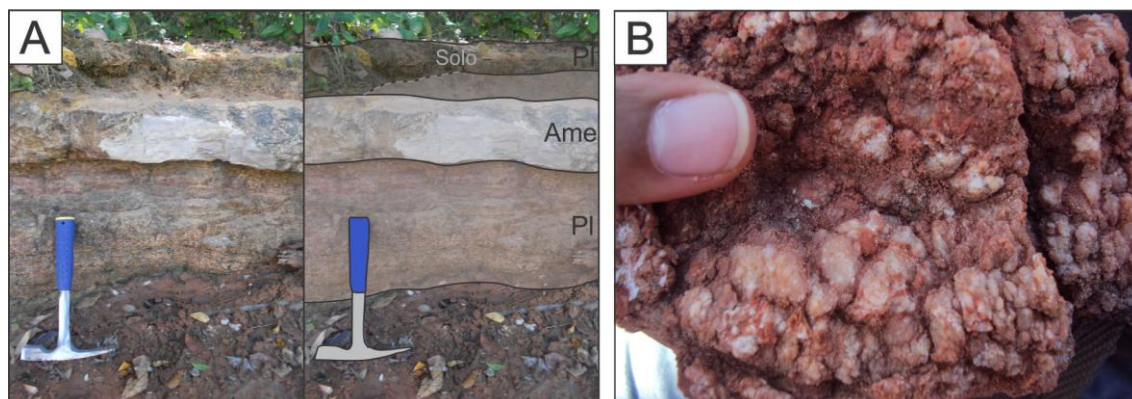
### 5.3.1.2 Associação de Fácies 2 (AF2) – Sabkha Continental

Associação constituída pela intercalação das fácies arenitos com moldes evaporíticos (Ame), pelito com laminação plano-paralela a ondulada (Ppo) e arenito fino com laminação ondulada a planar (Aop), apresentando-se em ciclos granocrescentes ascendentes.

Os moldes evaporíticos silicificados, apresentam estrutura evaporíticas remanescentes do tipo *popcorn* (Figura 29B). A ocorrência destas estruturas nos arenitos marca a diminuição da lamina d'água e exposição do substrato. Periodicamente este ambiente árido era substituído por um ambiente mais úmido, que possibilitava o espessamento da lâmina d'água que favorecia a deposição de material pelítico (LOWENSTEINS; HARDIE, 1985 apud NICHOLS, 2009) (Figura 29A).

Esta associação reflete um ambiente subaquoso de baixa energia, hiperalcalino com elevada salinidade e associado a altas taxas de evaporação. Em períodos mais úmidos predominavam processos de suspensão e decantação de material fino (silte e argila), porém com o aumento da aridez ocorriam oscilações do nível do lago e eventuais exposições das margens, possibilitando a formação de gretas de contração e depósitos evaporíticos. Tais processos configuram um ambiente de *sabkha* continental ou *playa lake* (BRIERE, 2000). Esta sedimentação era eventualmente interrompida por influxos de terrígenos (fácies Am) carregados possivelmente por rios efêmeros.

Figura 29 - Fácies e associação de fácies *Sabkha* Continental da Formação Pedra de Fogo. A) Intercalação de fácies arenitos com moldes evaporíticos (Ame) e pelito com laminação plano-paralela a ondulada (Ppo). B) Detalhe de molde evaporítico silicificado do tipo *popcorn*, encontrado nos arenitos.



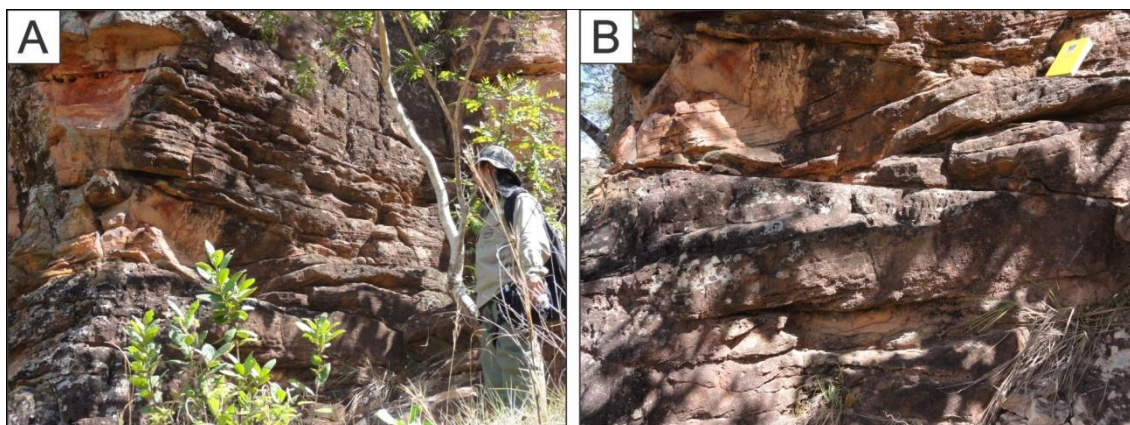
### 5.3.1.3 Associação de Fácies 3 (AF3) – Campo de dunas

Esta associação não apresenta grande continuidade lateral, possuindo espessura inferida através de cotas topográficas, de aproximadamente 20 m. É caracterizada pelas fácies arenito com estratificação cruzada tangencial de pequeno a médio porte (Ac1) e subordinadamente arenito com estratificação plano-paralelo ou de baixo ângulo (App) (Figura 30A). As camadas da fácies Ac1 formam *sets* de estratificação cruzada tabular de pequeno porte de até 30 cm de espessura (Figura 30B), com adelgaçamento ascendente e migração preferencial dos *forsets* para SE.

Os grãos da AF3 apresentam bom grau de seleção e arredondamento, esta característica é atribuída ao transporte eólico devido sua alta competência seletiva. É importante observar também a monotonia faciológica e bimodalidade dos grãos, típica de depósitos eólicos.

Esta associação sugere um ambiente eólico, onde a fácies Ac1 foi gerada pela construção e migração dunas subaéreas 2D de pequeno a médio porte (POSAMENTIER e WALKER, 2006) sendo limitada no topo e na base por depósitos de interdunas, representado pela fácies Ap.

Figura 30 - Fácies e associação de fácies Campo de Dunas da Formação Pedra de Fogo. A) Aspecto geral da AF4. Arenito com estratificação cruzada de médio e pequeno porte. B) Detalhe dos sets de pequeno porte, com estratificação cruzada tangencial e truncamentos erosivos.



#### *Modelo deposicional*

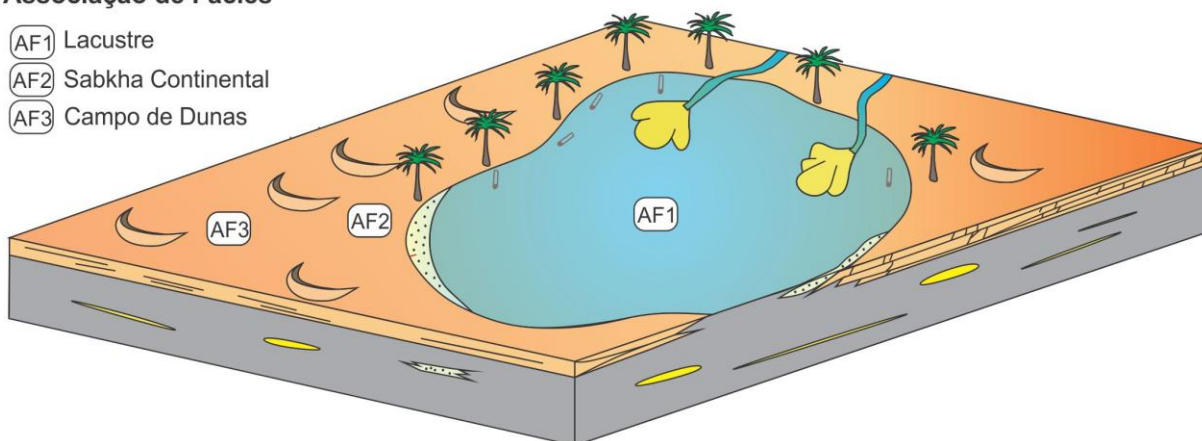
A análise de fácies mostrou que o paleoambiente Lacustre (AF1) é a associação fácies dominante na Formação Pedra de Fogo (Figura 31). A deposição de pelitos nesta associação era eventualmente interrompida por eventos energéticos que depositavam arenitos. A presença de material vegetal fossilizado indica proliferação de vegetais nas margens do lago,

possivelmente favorecida pelo aumento de umidade. A mudança deste sistema para um clima secos e áridos possibilitava a instalação de planícies salinas nas margens e precipitação de evaporitos (AF2). A associação de fácies campo de dunas (AF3) sugere que este ambiente se implantou de forma subordinada ao sistema lacustre principal.

Figura 31 - Modelo deposicional proposto para a Formação Pedra de Fogo.

#### Associação de Fácies

- (AF1) Lacustre
- (AF2) Sabkha Continental
- (AF3) Campo de Dunas



### 5.3.2 Formação Motuca

#### 5.3.2.1 Associação de fácies (AF4) - Lacustre

Esta associação ocorre sobrejacente à Formação Pedra de Fogo, sendo representada pela fácies e pelito com laminação plano-paralela a ondulada (Ppo) (Figura 32A), arenito fino com laminação ondulada a planar (Aop), gipso nodular (Gn) e gipso fibroso (Gf).

A AF4 reflete um ambiente lacustre raso de baixa energia dominado por processos de decantação. Este sistema foi provavelmente, influenciado por variações climáticas, onde em períodos mais áridos quando o suprimento de água tornou-se menor que a taxa de evaporação, os lagos contraíram-se e tornaram-se supersaturados, permitindo o aparecimento de estruturas formadas por processos de evaporação (NICHOLS, 2009). Neste contexto ocorreu a precipitação de químicos de sulfatos de gipso e anidrita (Figura 32B). Eventos diagenéticos posteriores condicionaram modificações na estrutura original desses evaporitos, gerando gipso com textura *chickenwire* (Gn) (Figura 32C) isolados e/ou intercalados com gipso laminado (Figura 32D) como estudados por Tucker (1991). Eventualmente neste ambiente lacustre ocorriam influxos de terrígenos (fácies Am) proveniente das margens.

Na área a Formação Motuca é representada por apenas uma associação de fácies (AF4), o modelo deposicional proposto para área está representado na Figura 33.

Figura 32 - Fácies e Associação de fácies Lacustre da Formação Motuca. A) Fácies pelito com laminação plano-paralela a ondulada (Ppo), com camadas diferenciadas nas cores branco e vermelho; B) Pacote de gipso, localizada em antiga mina da Fazenda Vão Grande. C) Fácies Gn, contendo nódulos irregulares de gipsita (textura *chickenwire*) de coloração esbranquiçada e diâmetros variáveis. D) Fácies Gl, com lâminas onduladas de gipsita de cor esbranquiçada, associada gipsita de textura fibrosa de coloração cinza escuro.

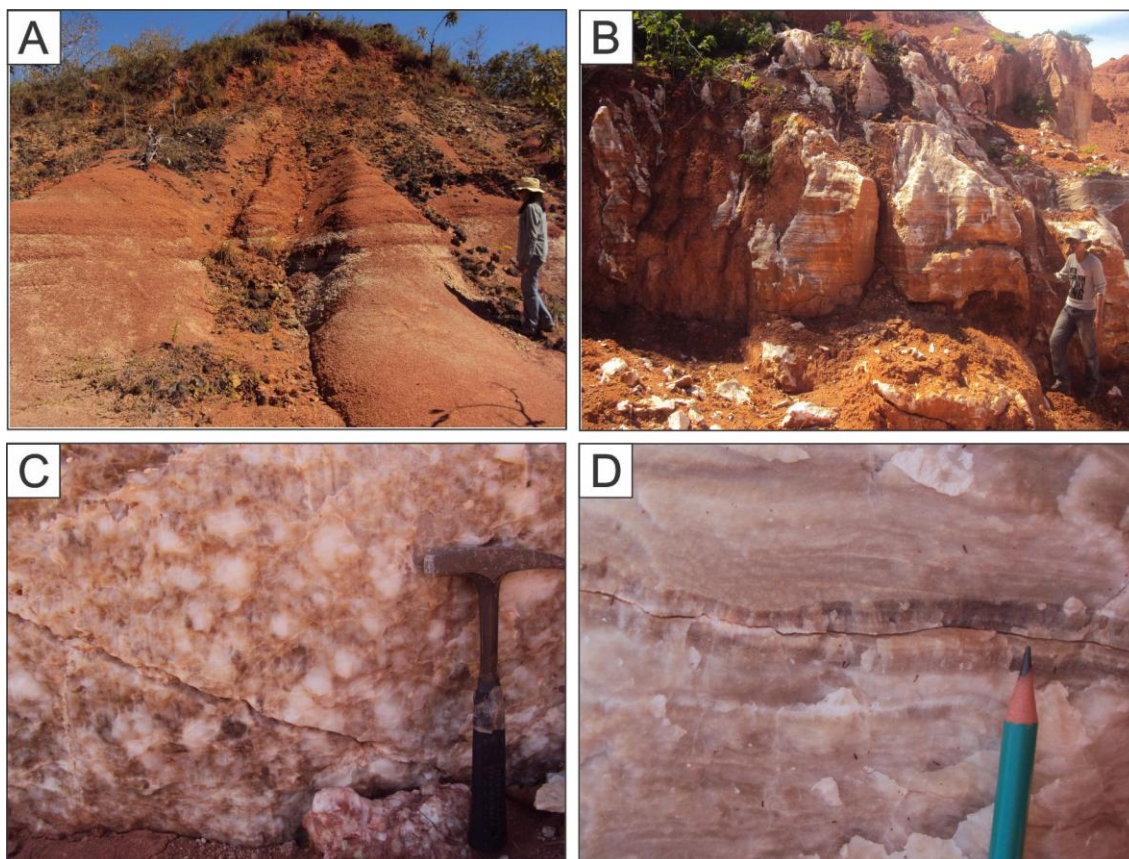
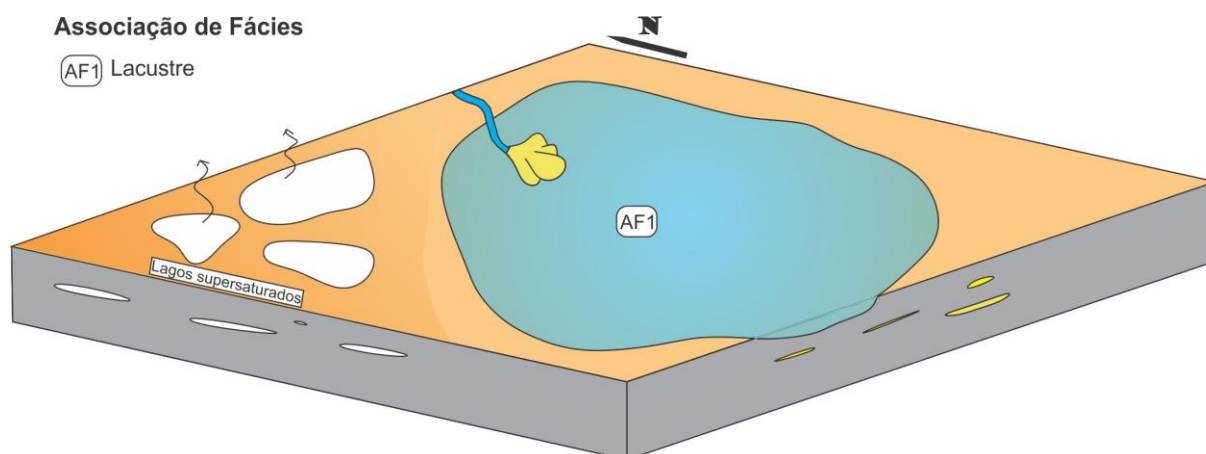


Figura 33 - Modelo deposicional proposto para Formação Motuca. Em períodos mais áridos os lagos contraíam-se e tornaram-se supersaturados, o que permitia a precipitação de evaporitos. Modificado de Abrantes Júnior (2013)



### 5.3.3 Formação Sambaíba

#### 5.3.3.1 Associação de fácies 5 (AF5) – Campo de dunas

Esta associação é composta pelas fácies arenito com estratificação cruzada de grande porte (Ac2) (Figura 34B) e arenito com estratificação plano-paralelo ou de baixo ângulo (App) (Figura 34C).

Os arenitos apresentam granulometria fina a média, grãos foscos bem selecionados e bem arredondados (Figura 34D). Os *cosets* da fácies At formam estratificações cruzadas tabular de média a grande porte com espessuras de até 3 m e migração preferencial para NW-SW.

A associação representa um paleoambiente eólico com depósitos formados pela migração de campo de dunas por processos de tração e saltação. O desmoronamento de grãos na face frontal da duna gera estratos cruzados (fácies Ac2). Esta fácies é truncada por camadas com estratificação plano-paralela ou de baixo ângulo (fácies App) que constitui depósitos de interdunas, gerados pela migração de *wind ripples* nas depressões entre dunas eólicas (PYE; TSOAR, 2009).

Na área de estudo a Formação Sambaíba é representada apenas pela associação de fácies Campo de dunas (AF5), apresentada no modelo deposicional por extensas planícies arenosas como mostrado na Figura 35.

Figura 34 - Fácies e Associação de fácies Campo de Dunas da Formação Sambaíba. A) Afloramento da AF5, localizado na encosta de formas de relevo tabulares, onde é possível visualizar os sets de estratificações cruzadas de grande porte. B) Detalhe dos *foresets* da estratificação cruzada de grande porte (Ac2); C) Estratificação plano-paralela em arenito de cor alaranjada. D) Detalhe de arenitos bem arredondados e selecionados, mostrando bimodalidade dos grãos.

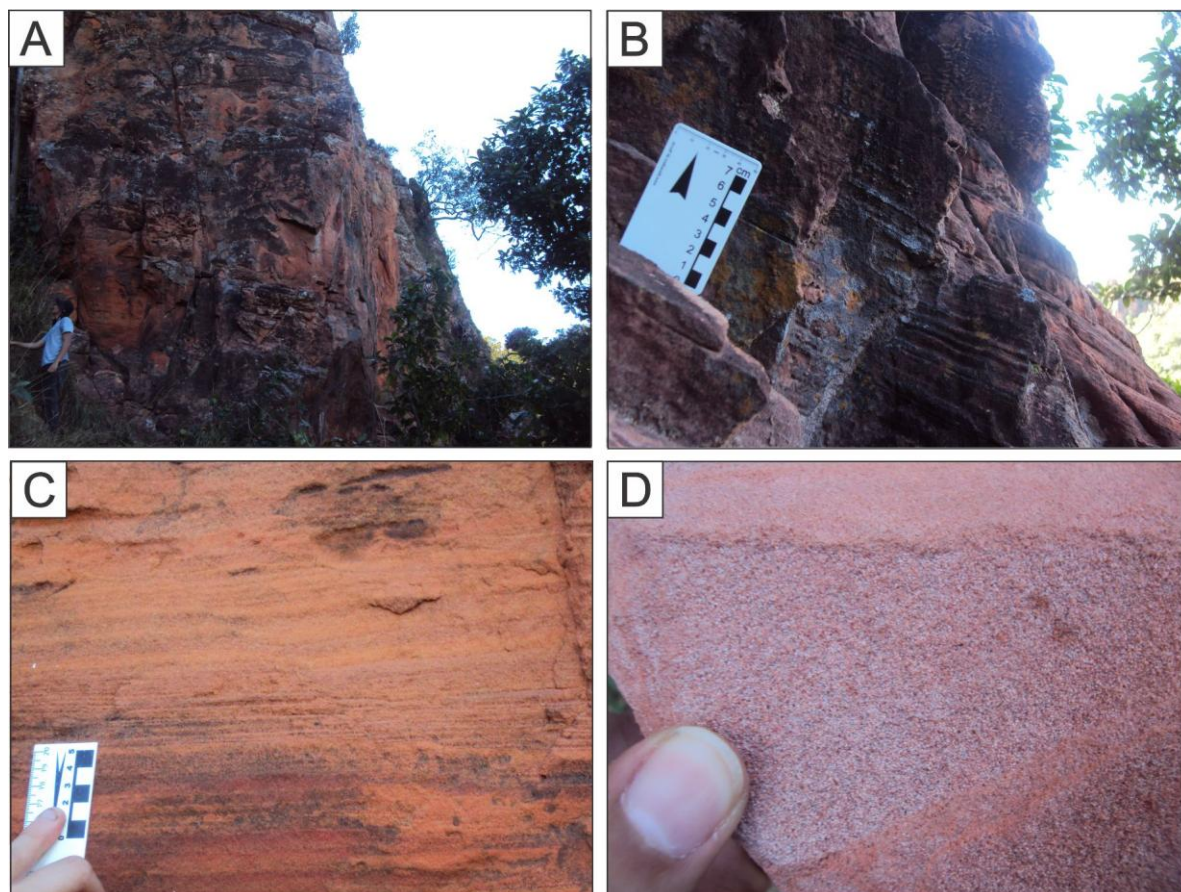
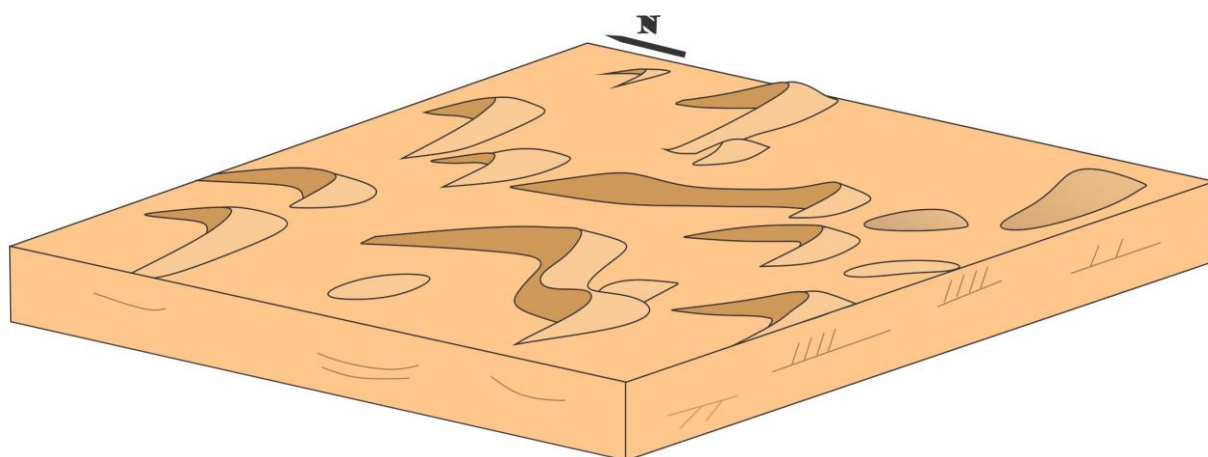


Figura 35 - Modelo deposicional para a Formação Sambaíba.



A Tabela 9 apresenta de forma sistemática as associações de fácies interpretadas para as rochas das formações Pedra de Fogo, Motuca e Sambaíba que afloram na área de estudo.

Tabela 9 - Associações de Fácies referentes às formações Pedra de Fogo, Motuca e Sambaíba.

Formação	Descrição	Fácies	Associação de Fácies (AF)
SAMBAÍBA	Arenitos finos a médios, bem selecionados, grãos foscos, com estratificação cruzada tabular, subordinadamente plano-paralelo ou de baixo ângulo, com <i>sets</i> de médio a grande porte.	Ac2 e App	<b>Campo de dunas (AF5)</b>
MOTUCA	Pelito laminado e arenito maciço de coloração avermelhadas, associadas a camadas de gipso com textura <i>chickenwire</i> e gipso laminado, subordinadamente fibroso.	Ppo, Aop, Gn e Gl	<b>Lacustre (AF4)</b>
PEDRA DE FOGO	Arenitos finos a médios, bem selecionados, grãos foscos, com estratificação cruzada tabular, subordinadamente plano-paralelo ou de baixo ângulo, com <i>sets</i> de pequeno a médio porte.	Ac1, App	<b>Campo de Dunas (AF 3)</b>
	Arenito fino a médio com moldes evaporíticos do tipo <i>popcorn</i> . Subordinadamente pelitos maciços avermelhados.	Ppo, Aop e Ame	<b>Sabkha Continental (AF2)</b>
	Intercalação de pelitos laminados e arenitos finos maciços ou levemente ondulados. Ocorrem troncos silicificados na fácies Pp e gretas de contração subaéreas.	Ppo e Aop	<b>Lacustre (AF1)</b>

#### 5.4 MAPA GEOLÓGICO

As unidades fotointerpretadas obtidas na etapa pré-campo, através do processamento e fotointerpretação das imagens óticas foram verificados na etapa de campo. Nesta etapa, os afloramentos das formações Pedra de Fogo, Motuca e Sambaíba tiveram suas fácies descritas e classificadas quanto ao ambiente deposicional responsável pela sua formação (associação de fácies).

A representação espacial das associações de fácies identificadas na área foi estabelecida por meio da análise conjunta das unidades fotointerpretadas e informações levantadas em campo. O mapa geológico proposto para a área é apresentado no Anexo 1.

#### 5.4.1 Formação Pedra de Fogo

A formação Pedra de Fogo constitui a unidade que aflora na base da sequência estratigráfica da área. Possui a maior extensão espacial, perfazendo 91% da área total. Nesta unidade foram identificadas e mapeadas quatro associações de fácies.

A distribuição espacial da associação de fácies *sabkha* continental (AF2) está associada à unidade fotointerpretada A (Figura 37). Com base nos dados de campo, os limites da unidade fotointerpretada foram redefinidos pelas curvas de nível, ou seja, o nível topográfico médio em que os afloramentos da associação ocorrem (171m).

A associação de fácies lacustre (AF1) possui maior expressão espacial. Correlaciona-se a unidade fotointerpretada B, inserindo-se também as unidades fotointerpretadas C e D (Figura 37).

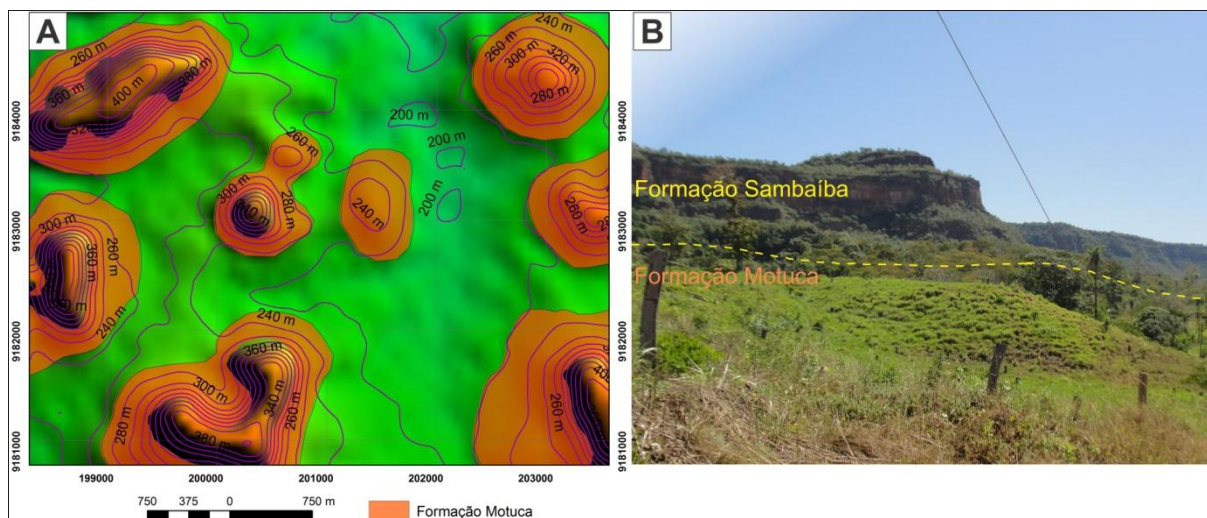
A associação de fácies campo de dunas (AF3) correlaciona-se à unidade fotointerpretada E, definida pela baixa densidade textural dos elementos de drenagem e aspecto amarelado das imagens QuickBird (Figura 37). A composição litológica predominantemente arenosa desta associação controla a implantação de uma drenagem de baixa densidade, haja vista, que a frequência textural é inversamente proporcional à permeabilidade dos tipos litológicos superficiais. Os limites da unidade fotointerpretada E foram redefinidos a partir de dados de campo.

#### 5.4.2 Formação Motuca

Esta unidade representa espacialmente 5% da área total. Posiciona-se estratigraficamente acima da Formação Pedra de Fogo entre as cotas topográficas de aproximadamente 220 e 360m. Na área de estudo somente uma associação de fácies foi identificada e mapeada para esta formação.

A associação de fácies lacustre (AF4) está associada espacialmente à unidade fotointerpretada F (Figura 37). Em campo, foi observado que os afloramentos desta associação ocorriam associados a morros residuais, de altitude em torno de 80m, como também a unidade intermediária nas formas de relevo tabulares mais elevadas (Figura 36).

Figura 36 - Formação Motuca. A) Imagem SRTM mostrando a distribuição espacial da Formação Motuca, ocorrendo entre cotas de aproximadamente 220 a 360m. B) Vista de afloramento típico da Formação Motuca sempre associados a pequenos morros ou localizados na porção basal de formas de relevo com topos tabulares, tendo sua exposição encoberta por sedimentos coluvionares.

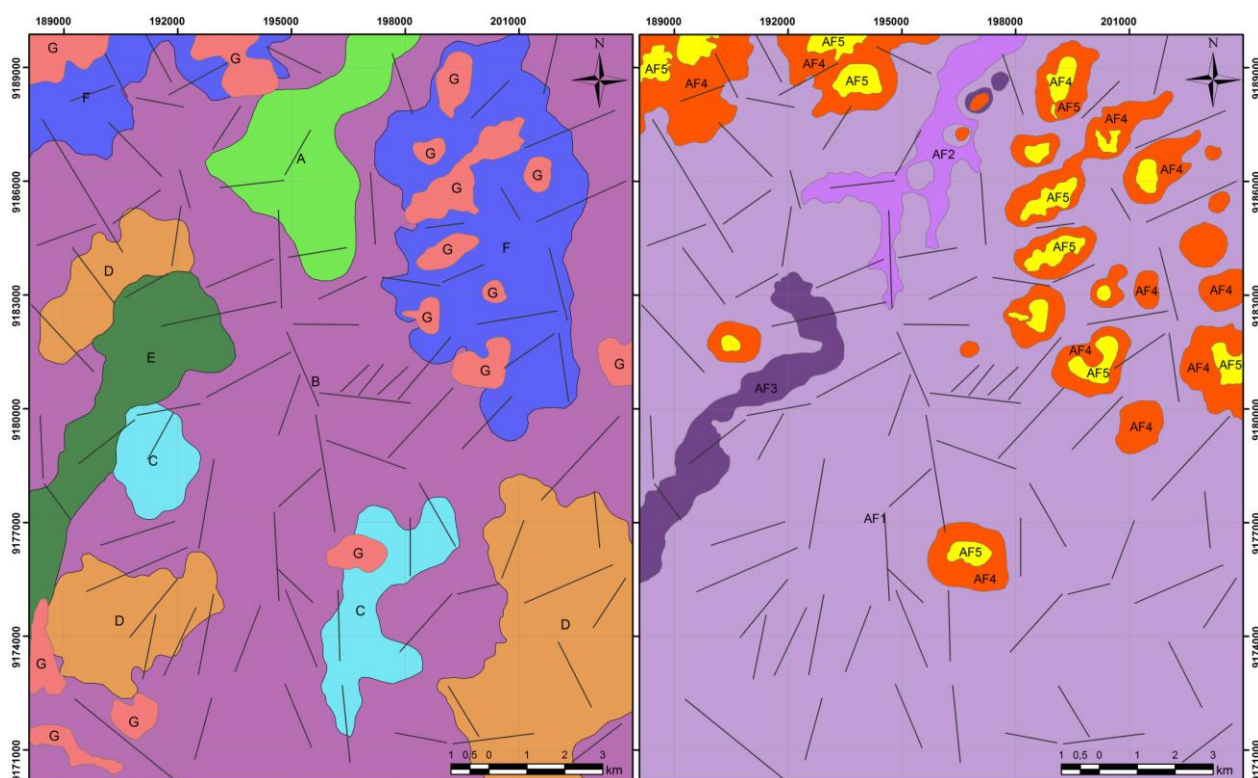


### 5.4.3 Formação Sambaíba

Esta formação constitui a unidade estratigráfica mais elevada da área, ocorrendo em cotas superiores a 360m. Sua exposição em superfície representa 4% da área total mapeada.

A associação de campo de dunas (AF5) apresenta-se associada espacialmente à unidade fotointerpretada G (Figura 37). Em campo, observou-se a estreita relação dessa associação com as formas de relevo com topos tabulares, que ocorrem na área.

Figura 37 - Mapa geológico fotointerpretado (à esquerda) e mapa geológico final (à direita).



## 6 CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS

O uso de ferramentas do sensoriamento remoto mostrou-se importantíssimo para a obtenção de informações geológicas prévias da área de estudo. Diversas técnicas de processamento foram aplicadas sobre as imagens Landsat ETM+, QuickBird e Modelos Digital de Elevação (MDE) da missão SRTM:

- As imagens do sensor Landsat ETM+ tiveram as bandas multiespectrais (30m) fusionadas com banda pan (15m). Neste produto foi aplicada a técnica de análise por principais componentes (APC). Todas essas imagens foram analisadas individualmente em tons de cinza ou combinadas em RGB.
- As imagens do sensor QuickBird, obtidas através de captura de tela da plataforma Google Earth, foram ortoretificadas e em seguida mosaicadas, para a geração de um produto que recobrisse toda a área de estudo.
- O Modelo Digital de Elevação foi reprojetoado para UTM, datum WGS84, e reprojetoado para 30m, este produto foi utilizado para a geração da imagem relevo sombreado, analisado em tons de cinza ou com paleta de cores *Atlas Shader*. Do MDE geraram-se curvas de nível equidistantes 20m.

Os recursos de visualização e edição vetorial do SIG combinados com a qualidade dos dados de sensoriamento remoto foram determinantes para se obter um produto cartográfico de semi detalhe (escala: 1:25.000). A fotointerpretação baseada na abordagem de análise sistemática (SOARES; FIORI, 1976 e VENEZIANI; ANJO, 1982) mostrou-se de fácil implementação e foi fundamental para boa qualidade dos mapas pré-campos o que facilitou sobremaneira a validação de campo.

Para a extração dos elementos de drenagem foi utilizado primeiramente o MDE, através da análise visual, foram estabelecidos os principais cursos de água e direção do fluxo de escoamento. O adensamento da rede de drenagem foi feito utilizando as imagens QuickBird devido a sua alta resolução espacial.

As imagens do sensor Landsat ETM+ foram pouco determinantes para a extração dos elementos de drenagem e relevo. No entanto, a imagem com resolução espacial de 15 m gerado pela fusão das bandas multi+pan e os principais componentes, contribuíram para cosubstanciar a delimitação das unidades fotolitológicas.

A integração dos elementos de drenagem, relevo e tonalidade obtidos na fotoanálise possibilitou a subdivisão de 7 unidades geológicas fotointerpretadas. Os elementos referentes à análise de drenagem foram os que mais contribuíram para a subdivisão das unidades, uma vez que a frequência textural deste elemento é inversamente proporcional à permeabilidade dos tipos litológicos superficiais.

Na etapa de campo, buscou-se comprovar as informações litológicas obtidas pelo sensoriamento através da realização de descrições de afloramentos e análise faciológica dos mesmos. Na elaboração do mapa geológico procurou-se representar a distribuição espacial dos paleoambientes identificados pela análise de fácies.

A análise de fácies dos afloramentos da Formação Pedra de Fogo, Motuca e Sambaíba, permitiu a individualização de 8 litofácies agrupadas em 5 associações de fácies (AF). Na Formação Pedra de Fogo foram identificadas as associações de fácies Lacustre (AF1); Sabkha continental (AF2); Campo de dunas (AF3). Na Formação Motuca foi descrita apenas a AF Lacustre (AF4) e na Formação Sambaíba a AF Campo de dunas (AF5).

A alternância e forte interdigitação dos paleoambientes, erosão diferenciada e eventos tectônicos, são fatores que dificultam o mapeamento geológico por análise de fácies. A representação de algumas unidades fotointerpretadas não se confirmou após levantamento de campo. As unidades C e D foram agrupadas a unidade fotointerpretadas A e correlacionada à associação de fácies Lacustre (AF1). As características que distinguiram as unidades C e D da unidade A foram a densidade textural dos elementos de drenagem variando de alta a média e o aumento sutil dos tons de branco observados na imagem do sensor QuickBird. Essas características podem ter sido influenciadas por variações litológicas (espessamento das camadas de pelito) ou intensificação dos processos de silicificação ou ter sofrido erosão diferenciada.

As associações AF2, AF3, AF4 e AF5 tiveram os limites de suas unidades fotointerpretadas redefinidos levando em consideração o nível topográfico médio que seus afloramentos ocorrem.

## REFERÊNCIAS

- ABOELKHAIR, H.; WATANABE, Y. 2011. **Using remotely sensed multispectral ASTER data for mapping extensive basalt flow around Al Madinah area, Saudi Arabia. Geomatics Technology in the City.** Proceedings: 2011. 10-13 May, 2011 , Jeddah , KSA.Campinas: IG/UNICAMP, 1992. 170 p.
- ABRANTES JÚNIOR, F. R. **Reconstituição paleoambiental do limite Permiano-Triássico da bacia do Parnaíba, região de Loreto (MA).** Trabalho de conclusão de curso – Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Belém. 2011. 76 p.
- ABRANTES JÚNIOR, F. R. **Zona de contato entre as Formações Motuca e Sambaíba, Permo-Triássico da Bacia do Parnaíba, regiões de Filadélfia (TO), Riachão (MA) e Loreto (MA).**Dissertação (Mestrado em Geologia). Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Belém, 2013. 98p.
- ARAUJO, T.P. **Novos Métodos Aplicados ao Processamento Digital de Imagens na Região de Mangaratiba Angra dos Reis-RJ.** 2008. Trabalho Final (Graduação) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2008. 95 f.
- BRIERE, P.R. **Playa, playa lake, sabkha: proposed definitions for old terms.** Journal of Arid Environments, 45, 1–7. 2000.
- BURRUOUGH, P.A.; MDDONNEL, R.A. **Principals of Geographical Information Systems.** Oxford, Oxforduniversity Press. 285p. 1998
- CÂMARA, G. **Modelos, Linguagens e Arquiteturas para Bancos de Dados Geográficos.** São José dos Campos, INPE, Dezembro 1995. Tese de Doutorado em Computação Aplicada. Disponível em <<http://www.dpi.inpe.br/teses/gilberto>>.
- CAPUTO, M.V.; IANNUZZI, R.; FONSECA, V.M.M. **Bacias sedimentares brasileira: Bacia do Parnaíba.** Fundação Paleontológica PHOENIX, v.81, n.7, p.1-6. 2005.
- CAPUTO, M. V. **Stratigraphy, tectonics, paleoclimatology and paleogeography of Northern Basins of Brazil.** 1984. 586 p. Thesis (Doctorate) - University of Califórnia, Santa Bárbara.
- CHAVEZ, P., S. SIDES, and J. ANDERSON. **Comparison of Three Different Methods to Merge Multi-resolution and Multi-Spectral data: Landsat TM and Spot Panchromatic, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing,** 57-3, pp 295-303. 1991.
- CONSORTIUM FOR SPATIAL INFORMATION. **SRTM 90m Digital Elevation Database v 4.1.** Disponível em: <<http://www.cgiar-csi.org/2010/03/108/>> Acessado em: 12/03/2012.
- COQUE, R. **Géomorphologie,** Paris, Armand Colin, 1977.
- CRÓSTA, A. P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto.** São Paulo, 173p. 1992. Tese de Doutorado - Instituto de Geociências, Universidade de Campinas, 1992.
- CRÓSTA, A. P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto.** Instituto de Geociências, Universidade de Campinas. Campinas, 1993. 170p

CUNHA, F. M. B. **Evolução Paleozóica da Sinéclise do Parnaíba e seu Arcabouço Tectônico**. Rio de Janeiro. Instituto de Geociências - UFRJ. Dissertação de Mestrado em Geologia. 1986. 107 p.

DALRYMPLE, R.W.. Interpreting sedimentary successions: facies, facies analysis, and facies models. In: JAMES. N.P. & DALRYMPLE R.W. (eds.). **Facies models**. Local: Geol. Ass. Canada, 2010. v.4, p.3-18.

DELLA FÁVERA, J. C. **Fundamentos de estratigrafia moderna**. Rio de Janeiro: UERJ, 2001. 264 p.

DIGITALGLOBE. **QuickBird**. Disponível em: <<http://www.digitalglobe.com/about-us/content-collection#satellites&quickbird>>. Acesso em: 10 maio 2013.

FARIA JUNIRO, L.E.C. **Estudo sedimentológico da Formação Pedra de Fogo – Permiano - Bacia do Maranhão**. 1979. 57 f. Dissertação de Mestrado, Núcleo de Ciências Geofísicas e Geológica, Universidade Federal do Pará, Belém, 1979.

FARIA JUNIOR, L.E.; TRUCKENBRODT, W. Estratigrafia e petrografia da Formação Pedra de Fogo, Permiano da Bacia do Maranhão. In: CONG. BRAS. GEOL., 31., 1980, Local. **Anais...** Local: SBG, 1980. v. 2, p. 740-754.

GLOBAL LAND COVER FACILITY **Landsat Imagery**. Disponível em: <<http://www.glcf.umd.edu>>. Acesso em 12/03/2012

GOOGLE EARTH. **Google Earth**. Disponível em 01/03/2012

GÓES, A.M. O; FEIJÓ, F.J. Bacia do Parnaíba. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, Rio de Janeiro, v.8, n.1, p. 57-67. 1994.

HARRIS, J; R. MURRAY; T. HIROSE. HIS. Transform for the Integration of Radar Imagery and Other Remotely Sensed Data, Photogrammetric **Engineering and Remote Sensing**. v56, n.12, p 1631-1641. 1990.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Mapa de Unidades do Relevo do Brasil**. Escala 1: 5.000.000. IBGE, Rio de Janeiro. 1993.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual técnico de geomorfologia**, Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. – 2. ed. - Rio de Janeiro : IBGE, 2009. 182 p. – (Manuais técnicos em geociências, ISSN 0103-9598; n. 5).

KEGEL, W. **A Estrutura geológica do Nordeste do Brasil**. Rio de Janeiro: DNPM/DGM. 1965. 47 p. (Boletim 227).

LIMA, E. de A.M.; LEITE, J.F. **Projeto estudo global dos recursos minerais da Bacia Sedimentar do Parnaíba**. Integração geológico-metalogenética. Relatório final da etapa III. Recife, C.P.R.M, 1978. 16 v.

MATHER, P.M. **Computer processing of remotely-sensed images – an introduction**. Midsomer Norton, Wiley, 1999, 292p.

MENESES, P.R.; ALMEIDA, T. **Introdução ao processamento de imagens e sensoriamento remoto**. Brasília, DF: UNB, 2012

MIALL A.D.A **Review of the braided-river deposicional environment**. *Earth Science Review*, 1977. 13(1): 1-62.

MORAIS, Elisabete Caria. de. Capítulo1, **Fundamentos de Sensoriamento Remoto**. São José dos Campos: INPE, 2002, p.7.

NASCIMENTO, M. A. L. S. do; DIAS, R. R.; BORGES, R. S. T. **Geomorfologia**. Folha SB.22-Z-B Xambioá. Estado do Tocantins. Escala 1:250.000. Palmas: Seplan/DZE, 2002. (Zoneamento EcológicoEconômico do Bico do Papagaio. Projeto de Gestão Ambiental Integrada Bico do Papagaio. Séries ZEE - Tocantins).

NICHOLS G.. **Sedimentary and Stratigraphy**. 2º ed., Wiley-Blackwel, 2009. 419p.

PARADELLA, W. R.; BIGNELLI, P. A.; VENEZIANI, P.; PIETSCH, R. W; TOUTIN, T. **Airborne and spaceborne Synthetic Aperture Radar (SAR) integration with Landsat TM and gamma ray spectrometry for geological mapping in a tropical rainforest environment**, the Carajás Mineral Province, Brazil. *International Journal of Remote Sensing*, May. 1997. v. 18, n. 7, p. 1483-1501

PLUMMER, F.B.; PRICE, L.I.; GOMES. F.A. Estados do Maranhão e Piauí. In **Brasil**, Conselho Nacional do Petróleo, Relatório de 1946. Rio de Janeiro, 1948. p. 87 – 134.

POSAMENTIER H.W., WALKER R.G. (eds). **Facies models revisited**. 2006. SEPM - Society for Sedimentary Geology. 532p.

PYE, K.; TSOAR, H. **Aeolian Sand and Sand Dunes**. Second printing with corrections. Springer, Berlin, 2009. 476 pp.

RABELO, T. N. **Avaliação das imagens multipolarizadas de radar em banda L do sensor SAR-R99B (SIVAM-CENSIPAM) em aplicação geológica no Vale do Rio Curuçá, Bahia**. . São José dos Campos, 2007. Dissertação de Mestrado. Instituto Nacional de Pesquisa Tecnológica (INPE). 85p

RIBEIRO, J.F.; WALTER, B.M.T. Fitofisionomias do bioma cerrado. In: **S.M. Sano & S.P.** 1998.

ROSSETTI, D.F.; TRUCKENBRODT, W.; SANTOS JÚNIOR, A.E. Clima do Cretáceo no Meio-norte brasileiro. In: ROSSETTI, D.F, GÓES, A.M.; TRUCKENBRODT, W. (Eds), **O Cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú**. Belém, Museu Goeldi, p. 67-76. 2001b.

Secretaria do Planejamento e da Modernização da Gestão Pública (SEPLAN) . **Bases Vectorias** . Disponível em: <<http://www.seplan.to.gov.br/seplan/br/>>. Acesso em 14/06/2012.

SANTOS, M.E.C. M; CARVALHO, M.S.S. **Paleontologia das bacias do Parnaíba, Grajaú e São Luís**. Rio de Janeiro: CPRM Serviço Geológico do Brasil- DGM/DIPALE, 215 p. 2009.

SOARES, P. C.; FIORI, A.P. **Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia.** *Notícia Geomorfológica*, Campinas, v.16, n.32, p.71-104. 1976.

STEAR, W.M. Comparasion of the bedform distribution and dynamics of modern and ancient flood deposits in the southwestern Karoo region, South Africa. ***Sedimentary Geology***, 45:209-230. 1985.

TERUIYA R. K. et al. **Integrating airborne SAR, Landsat TM and airborne geophysics data for improving geological mapping in the Amazon region: the Cigano granite, Carajás Province, Brazil.** *Inter. Jour. Rem. Sens.* 2008. 29 3957-3974.

TOCANTINS. Secretaria do Planejamento e Meio Ambiente – SEPLAN. **Monumento Natural das Árvores Fossilizadas do Estado do Tocantins e Zona de Amortecimento.** Encarte 3. 2003.

TUCKER M.E. **Sedimentary Petrology: an introduction to the origin of sedimentary rocks.** 2º ed., Blackwell Scientific Publications, 171p. 1991.

VAZ. B. **Bacia do Parnaíba.** *Geoci. Petrobras*, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 253-263, maio/nov. 2007 | 255.

VENEZIANI, P.; ANJOS, C.E. **Metodologia de interpretação de dados de sensoriamento remoto e aplicações em geologia.** São José dos Campos, INPE, 1982. 61p. (INPE-2227-MD/014).

WALKER R.G. Facies, facies models and modern stratigraphic concepts. In: Walker R.G. & James. N.P. (eds.) **Facies Models: Response to Sea Level Change.** Geol. Ass. Canada, p.1-14. 1992.