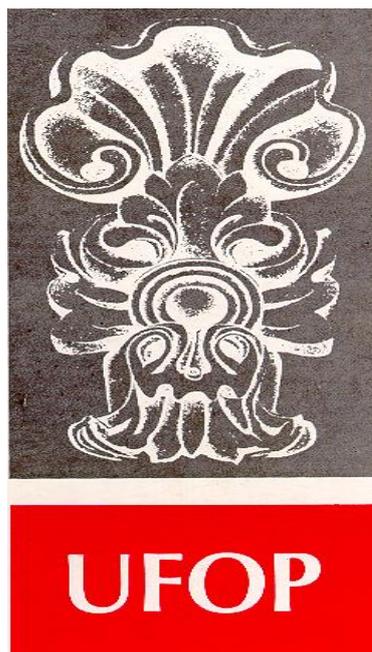


**ARQUITETURA DE CONHECIMENTOS PARA A GESTÃO
AMBIENTAL DA MINERAÇÃO DE FERRO EM CARAJÁS:
ESTUDO DE CASO DEPÓSITO N1**



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

Reitor

João Luiz Martins

Vice-Reitor

Antenor Barbosa Júnior

Pró-Reitor de Pesquisa e Pós-Graduação

Tanus Jorge Nagem

ESCOLA DE MINAS

Diretor

José Geraldo Arantes de Azevedo

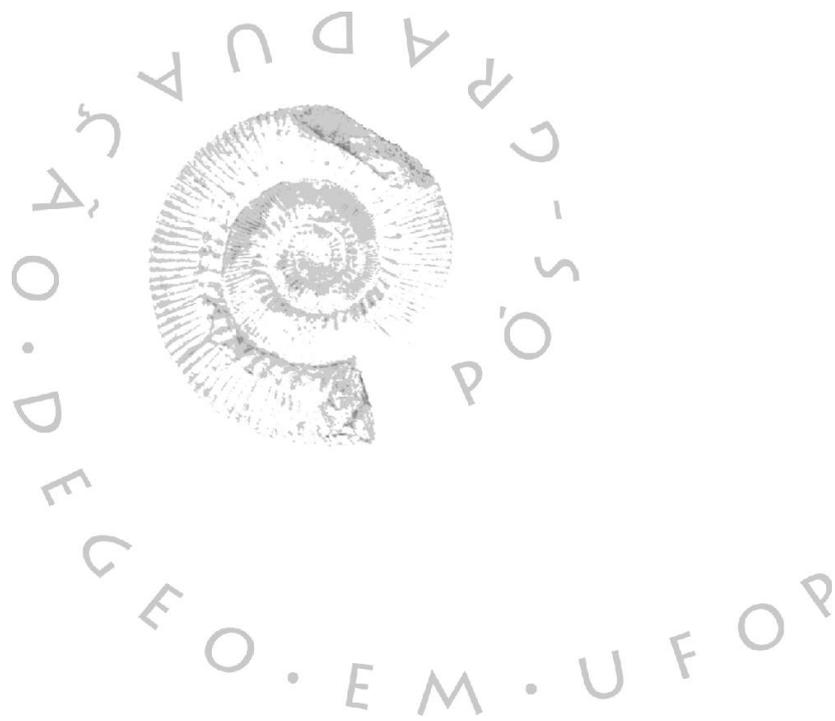
Vice-Diretor

Wilson Trigueiro de Souza

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

Chefe

Issamu Endo



EVOLUÇÃO CRUSTAL E RECURSOS NATURAIS

CONTRIBUIÇÕES ÀS CIÊNCIAS DA TERRA – VOL. 28

TESE DE DOUTORADO

Nº 47

**ARQUITETURA DE CONHECIMENTOS PARA A GESTÃO
AMBIENTAL DA MINERAÇÃO DE FERRO EM CARAJÁS:
ESTUDO DE CASO DEPÓSITO N1**

Maria Carolina de Moraes

Orientador

Luís de Almeida Prado Bacellar

Co-orientador

Paulo Pereira Martins Junior

Co-orientador

Waldir Renato Paradella

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais do
Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto
como requisito parcial à obtenção do Título de Doutora em Ciências Naturais, Área de Concentração:
Geologia Ambiental e Conservação de Recursos Naturais

OURO PRETO

2012

Universidade Federal de Ouro Preto – <http://www.ufop.br>
Escola de Minas - <http://www.em.ufop.br>
Departamento de Geologia - <http://www.degeo.ufop.br/>
Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais
Campus Morro do Cruzeiro s/n - Bauxita
35.400-000 Ouro Preto, Minas Gerais
Tel. (31) 3559-1600, Fax: (31) 3559-1606
e-mail: pgrad@degeo.ufop.br

Os direitos de tradução e reprodução reservados.

Nenhuma parte desta publicação poderá ser gravada, armazenada em sistemas eletrônicos, fotocopiada ou reproduzida por meios mecânicos ou eletrônicos ou utilizada sem a observância das normas de direito autoral.

ISSN 85-230-0108-6

Depósito Legal na Biblioteca Nacional

Edição 1ª

Catálogo elaborado pela Biblioteca Prof. Luciano Jacques de Moraes do
Sistema de Bibliotecas e Informação - SISBIN - Universidade Federal de Ouro Preto

M827a Moraes, Maria Carolina de.
Arquitetura de conhecimento para a gestão ambiental da mineração de ferro em
Carajás [manuscrito] : estudo de caso depósito N1 / Maria Carolina de Moraes – 2012.

xx, 238 f.: il. color.; grafs.; tabs.; mapas.
(Contribuições às ciências da terra, Série D.v.28, n. 47)
ISSN: 85-230-0108-6

Orientador: Prof. Dr. Luís de Almeida Prado Bacellar.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas.
Departamento de Geologia. Programa de Pós-Graduação em Evolução
Crustal e Recursos Naturais.

Área de concentração: Geologia Ambiental e Conservação de Recursos Naturais.

1. Arquitetura da informação - Teses. 2. Gestão do conhecimento - Teses. 3. Ferro
- Minas e mineração - Teses. 4. Sensoriamento remoto - Teses. 5. Gestão ambiental -
Teses. I. Universidade Federal de Ouro Preto. II. Título.

CDU: 622.341(811.5):005.94

Catálogo: <http://www.sisbin.ufop.br>

Ao meu Pai Edson de Souza Morais (*in memoriam*)

Quanta saudade!

“O correr da vida embrulha tudo.
A vida é assim: esquenta e esfria, aperta e daí afrouxa,
sossega e depois desinquieta.
O que ela quer da gente é coragem”

João Guimarães Rosa

Agradecimentos

A todos que compartilharam comigo a realização desta etapa; pelo apoio, pela paciência, pela ajuda nos momentos de dificuldade e pela alegria nos momentos de realizações.

Ao Dr. Luís de Almeida Prado Bacellar, pela contribuição de grande valia na pesquisa.

Ao Dr. Paulo Pereira Martins Junior, pela generosidade com que me acolheu; pelos diálogos de alto nível sobre a tese e a vida, que resultaram em uma convivência extremamente enriquecedora para minha pessoa.

Ao Dr. Waldir Renato Paradella, pelo aprendizado, pela oportunidade de trabalhar em Carajás com os dados do SIPAM e todo apoio durante os trabalhos de campo.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) pelo apoio de transporte nos trabalhos de campo.

Ao Dr. Paulo Veneziani (*in memoriam*) pela convivência enriquecedora e apoio nos trabalhos de campo.

À VALE, na pessoa do Geólogo Lambertus C. Schardt, pela infra-estrutura de campo e ao Givanildo, pelo apoio de campo durante a realização das sondagens.

Ao Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA - Flona Carajás), nas pessoas de Viviane Lasmar Pacheco Monte e Fabiano Gumier Costa, pelo apoio durante a realização dos trabalhos de campo.

Ao Museu Paraense Emílio Goeldi, pelo envio de material bibliográfico.

A Elisabete Quatrini Vieira, da Biblioteca do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), pela prestatividade e Marli Rosana Gonçalves, pelo apoio nas referências bibliográficas.

Aos colegas que estiveram comigo na Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais (CETEC), pelo apoio e convivência enriquecedora e harmoniosa; Douglas Jano, João Álvaro, Vítor Vieira de Vasconcelos e Cláudio Diniz.

Aos colegas do INPE, Cleber Gonzales de Oliveira e Arnaldo de Queiroz pelo apoio com as imagens ópticas e de radar.

A Cleunice Amorim dos Reis, pela paciência, pelo apoio e tudo mais.

Aos Amigos Zé Nelson e Maria Efigênia, pelo grande apoio durante o tempo em estive em Ouro Preto.

As “Super Poderosas” do Geoprocessamento e Amigas em Belo Horizonte; Eliane Voll, Karin Voll e Fernanda Amaral.

Aos colegas da UFOP que estiveram comigo em Ouro Preto; Maria Inês, Fernanda Martinelli, Josefa, Marco, Flávio, Aline, Daniela e Adriana.

Ao pessoal do IGA em Belo Horizonte, em especial ao enorme apoio de Aliane Baeta, e à força de Lincoln Diniz, Maria Elizabeth Oliveira Torres e Clésio Martins de Araújo.

Ao Luiz Otávio Sabato, Coordenador da Base Territorial de Minas Gerais (SBT-MG) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

Ao CNPq, pela bolsa que possibilitou o desenvolvimento desta pesquisa.

Sumário

Agradecimentos.....	ix
Sumário	xi
Lista de Figuras.....	xiii
Lista de Tabelas	xv
Lista de Abreviaturas	xvi
Resumo	xix
Abstract.....	xx
CAPÍTULO 1.....	1
INTRODUÇÃO.....	1
1.1 TEMA.....	1
1.2 - PROBLEMAS ABORDADOS.....	5
1.3 – OBJETIVO GERAL	6
1.4 – ESTRUTURA DA TESE.....	7
1.5– ÁREA DE ESTUDO.....	7
1.5.1– GEOMORFOLOGIA.....	8
1.5.2– VEGETAÇÃO.....	13
1.5.3– SOLO.....	16
1.5.4– CLIMA.....	18
1.5.5– GEOLOGIA REGIONAL.....	19
1.5.5.1 Arcabouço geotectônico	20
1.5.5.2 Unidades litoestratigráficas	24
1.5.5.2.1 – Embasamento	24
1.5.5.2.1.1 - Ortogranulito Chicrim-Cateté	24
1.5.5.2.1.2 - Complexo Xingu	24
1.5.5.2.1.3 - Diopsídio Norito Pium.....	25
1.5.5.2.2 - Greenstone Belts	25
1.5.5.2.3 – Granitos de Alto K	27
1.5.5.2.4 – Magmatismo Máfico-Ultramáfico.....	27
1.5.5.2.5– Cobertura Sedimentar	27
1.5.5.2.6– Magmatismo Félsico Intracontinental	27
1.5.5.3 – Geologia Estrutural	28
1.5.5.4 Geologia de.....	31
1.5.5.5 Mineralização de ferro da Província Mineral Carajás.....	34
1.6– MATERIAIS E MÉTODOS.....	36
1.6.1– Materiais	37
1.6.2– Métodos.....	40
1.6.2.1 – Processamento de imagens de sensoriamento remoto.....	41
1.6.2.3 – Investigações de campo.....	47

1.6.2.4– O sistema sisORCI® — Tema Mineração / Meio Ambiente/ Carajás.....	48
1.7– CONCEITOS, PRINCÍPIOS E ARQUITETURA DO CONHECIMENTO.....	55
1.7.1– Aspectos Legais.....	56
1.7.1.1– Legislação Mineral.....	56
1.7.1.2 – Legislação Ambiental.....	59
1.7.1.3 – Legislação Ambiental estadual	66
1.7.2– Alterações do meio físico por atividades de mineração.....	68
1.7.3– Sensoriamento Remoto Passivo e Ativo – Princípios e Configurações de Imageamento...	72
1.7.3.1– Introdução.....	72
1.7.3.2 – Fontes de energia e princípios de radiação	73
1.7.3.3 – Grandezas radiométricas	76
1.7.3.4– Sistemas multiespectrais de imageamento	79
1.7.3.4.1- Introdução	79
1.7.3.4.2 – Características das imagens multiespectrais	82
1.7.3.4.3 – Comportamento espectral da vegetação	84
1.7.3.5– Sistema de Radar Imageador	87
1.7.3.5.1 - Introdução.....	87
1.7.3.5.2– Parâmetros do sensor.....	89
1.7.3.5.2.1 – Resolução e Ângulo de Incidência	89
1.7.3.5.2.2 – Frequência.....	91
1.7.3.5.2.3 Polarização.....	93
1.7.3.5.3– Parâmetros do alvo.....	94
1.7.3.5.3.1 – Tonalidade.....	94
1.7.3.5.3.2 - Textura.....	96
1.7.3.5.3.3 - Rugosidade Superficial.....	98
1.7.4– Aplicações geoambientais de sensoriamento remoto multiespectral e radar.	99
1.7.5– Arquitetura de Conhecimentos	107
CAPÍTULO 2.....	117
ARTIGOS	117
2.1 Informações geoambientais derivadas de imagens de radar (R99B/SIPAM) e ópticas (LANDSAT/TM5) em jazimento de minério de ferro em Carajás	117
2.2 Mapping iron-mineralised laterite environments based on textural attributes from MAPSAR image simulation – SAR R99B (SIVAM/SIPAM) in the Amazon region.....	129
2.3 Multi scale approach using remote sensing images to characterize the iron deposit N1 influence areas in Carajás Mineral Province (Brazilian Amazon)	148
2.4 Knowledge Architecture for environmental planning of iron ore open pit mine in Carajás Mineral Province (Brazilian Amazon)	170
CAPÍTULO 3.....	197
CONCLUSÕES.....	197
Referências.....	203
Anexos	214

Lista de Figuras

Figura 1.1- Localização e infraestrutura viária na região do Depósito de N1 no contexto da Flona Carajás. Fonte: org. Morais (2011).....	8
Figura 1.2– Localização do Depósito de N1. Fonte: org. Morais (2011).....	8
Figura 1.3– Mapa Geomorfológico – Carajás (PA). (Fonte: Projeto RADAM Folha SB.22 Araguaia e parte da Folha SC.22 Tocantins e MDE SRTM/NASA; modificado pela autora).	9
Figura 1.4 – Aspectos morfológicos do Depósito de N1. (Fonte: imagem de radar aerotransportada, Banda L, SAR - R99B – composição colorida R-hh, G-hv, B-vv, Org. Morais, 2011).....	10
Figura 1. 5 – Variação altimétrica do platô N1 obtida de Modelo Digital de Elevação. Fonte: org. Morais, 2011.....	11
Figura 1. 6 – Vista de uma superfície com depressão fechada e ocorrência de lago coberto por vegetação. (Ponto 37 – Anexo 1).....	12
Figura 1. 7– Caverna desenvolvida na encosta do platô (ponto 8 – Anexo 1).	12
Figura 1.8- Seção esquemática dos platôs da Serra Norte (Serra dos Carajás) com padrões de fratura e feições pseudocársticas. Fonte: Maurity e Kotschoubey (1994a, p.355).	13
Figura 1. 9 – Mapa Fitoecológico - Carajás (PA). (Fonte: Projeto RADAM Folha SB.22 Araguaia e parte da Folha SC.22 Tocantins e MDE SRTM/NASA, modificado Morais 2011).....	14
Figura 1. 10 – Aspecto da vegetação de campos rupestres e floresta de montana ao fundo em N1 (Ponto 16 – Anexo 1).	15
Figura 1.11- Perfil esquemático do relevo sobre mina de ferro na Serra Norte, Carajás. Fonte: Joly (1970) in Silva <i>et al.</i> (1986, p.190).....	15
Figura 1.12 – Variação da vegetação de campos rupestres em relação ao relevo (ponto 38 – Anexo 1), ano 2005.	16
Figura 1.13 – Mapa de Solos - Carajás (PA). (Fonte: Projeto RADAM Folha SB.22 Araguaia e parte da Folha SC.22 Tocantins e MDE SRTM/NASA, modificado pela autora).	17
Figura 1.14 – Vegetação de floresta (ao fundo) desenvolvida em solos sobre o platô em N1 (Ponto 29 – Anexo 1).....	18
Figura 1.15 – Detalhe de solo com vegetação de floresta em encosta do platô (Ponto 21 – Anexo 1).	18
Figura 1.16 – Médias pluviométricas mensais para o ano de 2005 em Carajás (Fonte: ANA – estação 650002).	19
Figura 1.17 – Províncias tectônicas do Norte do Brasil. Fonte: Modificado de Santos (2003).	22
Figura 1.18 – Províncias tectônicas do Pará, com Domínio Carajás em destaque. Fonte: Vasquez & Rosa-Costa (2008).	23
Figura 1.19 - Mapa geológico da Província Mineral de Carajás. Fonte: (Vasquez & Rosa-Costa, 2008).	29
Figura 1.20- Mapas Geológico de Cobertura Superficial de N1. Fonte: Resende & Barbosa (1972). ...	33
Figura 1.21 – Tipos de crostas: A) Hematita, B) Canga de minério, C) Canga e D) Canga Química. Fonte: org. Morais (2012)	33
Figura 1.22 – Aeronave R99-B e sensores a bordo. Fonte: http://www.sipam.gov.br/ (acesso em junho de 2011).....	38
Figura 1.23 – Fluxograma da integração da imagem óptica com as imagens de radar.	42
Figura 1 24 – Exemplo de posicionamento de <i>pixels</i> com janela 3 × 3. Fonte: Fonte: Haralick et al. (1973).	44
Figura 1 25 – Fluxograma do processamento das imagens de radar para análise textural.	45

Figura 1.26 – Fluxograma do processamento dos dados de alta resolução espacial, ortofotografias e MDE.	47
Figura 1.27 – Placa quadriculada para medida da rugosidade superficial. Fonte: org. Morais (2011)..	48
Figura 1.28 – Esquema de ligações entre Rodas no organograma ORCI. Org. Morais, 2011.	51
Figura 1.29 - Fases de aquisição e análise de dados de sensoriamento remoto (Fonte: modificado de Lillesand e Kiefer, 2000).....	73
Figura 1.30- Onda eletromagnética com os campos elétricos e magnéticos perpendiculares entre si. As ondas deslocam-se à velocidade da luz ($3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$) (Fonte: Jensen, 2009).	74
Figura 1.31- Distribuição da REM de acordo com o comprimento de onda e frequência.	75
Figura 1.32- Grandezas radiométricas (Fonte: Steffen, 1995).	78
Figura 1.33 - Caminhos da radiação eletromagnética e sua interação com um alvo. Fonte: Novo (2008).....	79
Figura 1.34 – Configuração básica de um sistema de varredura multiespectral. Fonte: Novo (2008). .	80
Figura 1.35 – IFOV (<i>Instantaneous Field of View</i>). Fonte: Novo (2008).....	82
Figura 1.36 – Representação de uma imagem e valores de níveis de cinza associados. Fonte: Jensen (2009).....	83
Figura 1.37 – Seção transversal de uma folha mostrando os possíveis caminhos da luz incidente. Fonte: Novo (2008).....	85
Figura 1.38 – Assinatura espectral típica de uma folha verde. Fonte: Novo (2008).....	86
Figura 1.39 – Princípio da transmissão e recepção do eco do radar. Fonte: Arhen (1995).....	87
Figura 1.40 - Espectro eletromagnético mostrando as bandas da região de microondas. (Fonte: Dallemand <i>et al.</i> , 1993).....	88
Figura 1.41 - Janelas de transmissão atmosférica para a região de microondas do espectro eletromagnético. Fonte: Curlander e Mc Donough (1991).	88
Figura 1.42 - Geometria do imageamento de radar. Fonte: Dallemand <i>et al.</i> (1993).	89
Figura 1.43 – Resolução em alcance e resolução em azimute do radar. Fonte: Ahern (1995).	90
Figura 1.44 – Geometria dos elementos de visada no radar imageador. Fonte: Lowman <i>et al.</i> (1987). 91	
Figura 1.45 – Comprimentos de onda do radar. Fonte: Ahern (1995).....	92
Figura 1.46 - Esquema da interação de frequências disponíveis em sistemas de radar com os estratos da cobertura vegetal e solo seco. Banda X (3 cm), Banda C (6 cm) e Banda L (23 cm). Fonte: NASA (1988).....	92
Figura 1.47 – Polarização hh e vv de um radar. Fonte: Ahern (1995).	93
Figura 1.48 – Curvas típicas de retro-espalhamento para superfícies lisas, moderadamente rugosas e muito rugosas. Fonte: NASA (1988).	99
Figura 1.49 – Modelo da dinâmica da criação do conhecimento, com base no conhecimento explícito e tácito. Fonte: Nonaka & Takeuchi (1997).....	113
Figura 1.50 – Modelo de arquitetura clássica para sistema especialista. Fonte: Harmon & King (1988)	115

Lista de Tabelas

Tabela 1.1– Materiais utilizados.....	37
Tabela 1.2– Especificações do SAR-R99B.	38
Tabela 1.3– Aplicações do satélite LANDSAT/TM5 de acordo com os intervalos espectrais. Fonte: www.inpe.br (acesso em junho de 2011)	39
Tabela 1.4– Modalidades Sub-modalidades do sisORCI Tema Mineração/ Meio Ambiente/ Carajás ..	54
Tabela 1.5– Relações entre as Tonalidades das Rodas de Conteúdo e os fenômenos abordados no sisORCI - Tema Mineração/ Meio Ambiente/ Carajás. Fonte: org. Moraes (2011),.....	55
Tabela 1.6- Documentos exigidos no licenciamento ambiental para o setor mineral, conforme resoluções CONAMA 009 e 010/90.	63

Lista de Abreviaturas

ACP	Análise por Componentes Principais
AIA	Avaliação de Impacto Ambiental
AMZA	Amazônia Mineração S.A.
ANA	Agência Nacional de Águas
AVHRR	<i>Advanced Very High Resolution Radiometer</i>
BIF	Banded iron formations
CENSIPAM	Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia
CETEC	Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais
CMM	Companhia Meridional de Mineração
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
CVRD	Companhia Vale do Rio Doce
DF	<i>Discriminant Factor</i>
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DSG	Divisão de Serviço Geográfico
EIA	Estudo de Impacto Ambiental
GLDV	<i>Grey-Level Difference Vector</i>
HD	Hematita Dura
HM	Hematita Mole-Macia
HRV-SPOT	<i>High Resolution Visible - Satellite Pour l'Observation de la Terre</i>
HSD	Hematita Semi-Dura
HSS	Hiperespectral Scanner System
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
IFOV	<i>Instantaneous Field of View</i>
IHS	<i>Intensity, Hue, Saturation</i>
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IOCG	<i>Iron Oxide-Copper-Gold Deposits</i>
JERS	<i>Japanese Earth Resources Satellite</i>
LA	Licenciamento Ambiental
LANDSAT	Land Remote Sensing Satellite
LI	Licença de Instalação
LO	Licença de Operação
LP	Licença Prévia
MAPSAR	<i>Multi-Application Purpose SAR</i>
MCNC	Matriz de Co-ocorrência dos Níveis de Cinza
MDE	Modelo Digital de Elevação
MMA	Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal
MSS	<i>Multispectral Scanner System</i>
OIS	<i>Optical Infrared Sensor</i>
ORCI	Organograma de Rodas de Correlações e Impacto

PAE	Plano de Aproveitamento Econômico
PALSAR	<i>Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar</i>
PCA	Plano de Controle Ambiental
PFC	Projeto Ferro Carajás
RADAR	<i>Radio Detection And Ranging</i>
RADARSAT	<i>Radar Satellite</i>
RAL	Relatório Anual de Lavra
RCA	Relatório de Controle Ambiental
REM	Revista da Escola de Minas
REM	Radiação Eletromagnética
RGB	<i>Red, Geen, Blue</i>
RIMA	Relatório de Impacto Ambiental
RMS	<i>Root Mean Square</i>
SAR	<i>Synthetic Aperture Radar</i>
SAREX	<i>South American Radar Experiment</i>
SEICOM	Secretaria de Estado, Indústria, Comércio e Mineração
SIG	Sistema de Informações Geo-referenciadas
SIPAM	Sistema de Proteção da Amazônia
SIR-C	<i>Spaceborne Imaging Radar</i>
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
TM	Thematic Mapper
USS	<i>United States Stell</i>
ZEE	Zoneamento Ecológico-Econômico

Resumo

Com o volume alto e crescente de informações obtidas a partir de Estudos de Impacto Ambiental, deve-se que ter muita cautela para que o impacto inevitável das atividades de mineração seja minimizado. O reconhecimento de áreas de influência e a caracterização das regiões afetadas pelo impacto ambiental são fundamentais no contexto da instalação de uma mineração de ferro a céu aberto na Amazônia brasileira. Em projetos de mineração localizados em áreas de floresta tropical, estas questões tornam-se ainda mais relevantes quando se considera todos os aspectos envolvidos, desde aqueles relacionados com o meio físico até as partes interessadas envolvidas no processo. Neste contexto, um sistema de arquitetura de conhecimento, chamado sisORCI Tema Mineração / Meio Ambiente / Carajás, é apresentado com a função principal de agregar todos os tipos de correlações de interesse entre as questões ambientais e legais relacionadas com o planejamento ambiental no estágio de implementação da mina de ferro a céu aberto. A tecnologia do sensoriamento remoto foi utilizada nesta pesquisa, com o uso de fotografias aéreas de imagens ópticas e de radar, com resoluções espaciais distintas. O conjunto de informações extraídas dessas imagens foi armazenado na arquitetura de conhecimentos proposta, com os conhecimentos respectivos aos temas abordados, a formalização dos mesmos, a relações e os impactos entre os temas discutidos. Os resultados mostraram que a determinação de áreas influência estão diretamente relacionados à região afetada em determinada escala de observação. No depósito N1 e as zonas circundantes, esta informação pode ser verificada em escalas de 1:10.000 e 1:100.000, onde cada escala foi capaz de fornecer informações distintas sobre as condições ambientais. As imagens de radar em banda L podem ser utilizadas como uma ferramenta prática para um mapeamento preliminar e como um guia de verificação em campo. Elas foram sensíveis às pequenas áreas de vegetação e o retroespalhamento de superfície foi afetado pelo terreno abaixo desta vegetação. Para o depósito N1, as relações entre as questões que foram consideradas frágeis, como a vegetação, tornaram-se explícitas por meio de processos que permitiram a extração máximo de informações possíveis por meio de imagens de sensoriamento remoto e sua interação com outros dados. Estes relacionamentos podem levar a processos mais amplos de análises de engenharia para a execução de serviços de infraestrutura, que envolvem a supressão de vegetação e aspectos geotécnicos, por exemplo, que proporcionam agilidade para tomada de decisão. O sistema sisORCI Meio Ambiente-Mineração/ Carajás é uma ferramenta tecnológica inovadora em fase de implementação, pelo qual o estudo de impactos ambientais para depósito N1 pode ser beneficiado por dados estruturados em uma arquitetura de conhecimentos, que contemple questões ambientais, jurídicas e econômicas de uma forma que é sintetizado, ampla, integrada e incremental. Considerando a atual estrutura de estudos de impacto ambiental, realizados em um determinado espaço e tempo, o sisORCI Meio Ambiente Mineração / Carajás também pode contribuir com o acompanhamento e monitoramento dos impactos causados pela mineração, quando detectado por ele.

Abstract

With the high and increasing volume of information obtained from Environmental Impact Studies, there to be very careful so that the inevitable impact of mining activities is minimized. The recognition of areas of influence and the characterization of regions affected by environmental impact are crucial in the context of the installation of an iron ore pit mining in the Brazilian Amazon. In mining projects located in areas of tropical rainforest, these issues become even more relevant when considering all aspects involved, from those related to the physical until all stakeholders engaged in the process. In this context, a system of Knowledge Architecture, called sisORCI Theme Mining/Environment/Carajás, is presented with main function to aggregate all types of correlations of interest between the environmental and legal issues related to the environmental planning of the mine that were suitable at the stage of implementation of iron ore open pit mine in Brazilian Amazon. Remote sensing technology is utilized in this study; in particular, the use of ortho-aerial photograph, optical and radar images, with distinct spatial resolution. The set of informations extracted from these images were stored in the proposed architecture of knowledge, with the formalization of the concepts related to themes discussed, relationships and impacts among the subjects discussed. The results showed that the spread of particular areas of influence are directly related to what is being affected. In the N1 deposit and the surrounding areas, this information could be verified with two test areas, with scales of 1:10.000 and 1:100.000. The radar images at L band can be used as a practical tool for a preliminary mapping, and as a guide for field-based verification. It was very sensitive to small-scale areas of vegetation and the surface backscatter was affected by the terrain below this vegetation. For the N1 deposit, the relationships between the issues that are considered fragile, such as vegetation, became explicit by means of processes that permitted the maximum extraction of possible information for this issue by means of remote sensing images and their interaction with other data. These relationships can lead to broader engineering analysis processes for the implementation of infrastructure services that involve the elimination of vegetation and geotechnical aspects, for example, that provide agility for decision-making. The perception that this influenced area affects diverse issues along various scales, allows for a holistic vision of environmental impacts that can affect the area. The sisORCI Theme Mining/Environment/Carajás system is an innovative technological tool in the stage of implementation, by which the study of environmental impacts for Deposit N1 can be benefited by data architecting that contemplates environmental, legal and economic issues in a form that is synthesized, broad, integrated and incremental. Considering the present structure of environmental impact studies using extense documents and static thematic maps, performed in a determined space and time, the sisORCI Theme Mining/Environment/Carajás can also contribute with the accompanying and monitoring of the impacts caused by mining when detected by it.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 TEMA

A implantação e a operação de uma mineração de ferro a céu aberto acarretam profundas modificações ao meio ambiente, afetando substancialmente estruturas relacionadas aos meios físico e biológico. Na Província Mineral de Carajás, o tratamento das questões ambientais relacionadas à mineração tende a ser mais rigoroso, em função da fragilidade do ambiente amazônico onde se encontram os depósitos de ferro e da legislação ambiental vigente necessária ao licenciamento ambiental. A região apresenta cobertura de floresta equatorial com clareiras, que são interrupções da vegetação densa por campos rupestres, indicativos da ocorrência de mineralização ferrífera.

Em agosto de 1967, as jazidas de ferro em Carajás foram descobertas por geólogos da Campanha Meridional de Mineração, subsidiária da *United States Steel*. Da descoberta à exploração, muitos fatos ocorreram até que em 1970, deu-se a criação da Amazônia Mineração S.A. (AMZA), com 51% de capital pertencente à Companhia Vale do Rio Doce (CVRD) e 49% a *United States Steel*. Em 1977, esta última desinteressou-se pela exploração e vendeu sua participação à AMZA, que intensificou os levantamentos geológicos e comprovou que Carajás tratava-se de uma das mais expressivas concentrações de minerais da Terra, com ocorrências de ferro, manganês, cobre, bauxita, níquel, estanho, ouro, zinco, tungstênio e calcário (Santos, 1986).

Em 1981, deu-se a implantação do Projeto Ferro Carajás (PFC), caracterizado por uma ampla estrutura de beneficiamento, transporte e embarque de minério de ferro, que correspondiam a instalações de grande porte em plena floresta, como mina, usina de beneficiamento, ferrovia, estradas, núcleos urbanos e habitacionais e porto. Estas atividades referem-se especificamente à mina N4E na Serra Norte, em processo de lavra desde o ano em que foram feitas as pesquisas de campo. Na implantação do PFC, foram feitos Estudos de Impacto Ambiental e o Plano de Proteção de Áreas Degradadas (Santos, 1984). A delimitação da área de influência do projeto e a definição dos impactos diretos e indiretos foi uma das primeiras dificuldades encontradas e por isto foi considerada a análise dos impactos na Amazônia Oriental e a partir daí determinaram como estes seriam influenciados pelo PFC (Margulis, 1990).

De fato, estas questões não poderiam ser negligenciadas em projeto desta envergadura, posto que as alterações ambientais causadas pelas atividades de mineração vão desde os estágios iniciais da pesquisa mineral até a desativação do empreendimento, aumentando progressivamente de uma fase à outra (IBRAM, 1992; Fornasari *et al.*, 1992). Para enumerar os impactos ambientais da mineração, há que se levar em consideração a extensão e os tipos dos impactos, distintos e dependentes das

características físico-químicas dos depósitos minerais, do tamanho da jazida, do tipo de processamento mineral adotado e do ambiente (natural e econômico) onde se desenvolve a atividade mineral (Cavalcanti, 1996). Em alguns casos, os impactos persistem após o fechamento da mina, cujo exemplo mais grave é a geração de drenagens ácidas oriundas de depósitos de rejeitos e estéreis de minerais sulfetados (Prado Filho, 2001).

Estudos sobre as alterações no meio físico decorrentes de obras de engenharia têm-se intensificado a partir da promulgação da Resolução 01/86, de 21 de janeiro de 1986, Art. 2º do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), que regulamenta a obrigatoriedade de realização prévia do Estudo de Impacto Ambiental (EIA) na implantação, na operação e na ampliação de projetos relacionados a obras de engenharia capazes de causar significativas modificações no meio ambiente. No caso específico da mineração, o licenciamento ambiental foi regulamentado pela Resolução CONAMA 009/90 e Resolução 010/90, ambas de 6 de dezembro de 1990. A concessão da Portaria de Lavra pelo DNPM para uma jazida está condicionada à obtenção da Licença de Instalação (LI) do projeto, que é dada com a aprovação do EIA/RIMA, quando são identificados os impactos negativos e positivos do empreendimento e apresentadas as propostas de mitigação e compensação dos impactos ambientais negativos do empreendimento, por meio do Plano de Controle Ambiental (PCA).

O MMA (Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal), por meio do PROJETO BRA/94/016 “Formulação e implementação de políticas públicas compatíveis com os princípios do desenvolvimento sustentável - diretrizes ambientais para o setor mineral”, de 1997, sugere em uma de suas diretrizes “a incorporação de tecnologias que permitam o maior aproveitamento dos recursos minerais e a geração do menor impacto ambiental”. Em outra diretriz, ressalta “o apoio ao desenvolvimento tecnológico e a divulgação de tecnologias ambientalmente compatíveis também é fator importante neste processo”. Em outro trecho do documento, o destaque ao uso de novas tecnologias é evidenciado como tema prioritário para uma política ambiental, no trecho “o desenvolvimento tecnológico, especialmente no que se refere à reabilitação de áreas degradadas e de reciclagem de minerais, é tema prioritário em uma política ambiental para o setor”.

Em muitos projetos que envolvem estudos sobre o meio físico no Brasil, a dificuldade inicial consiste na ausência ou existência precária, quando desatualizada, de dados básicos imprescindíveis, tais como, bases planialtimétricas, mapas geomorfológicos, geológicos, pedológicos, de vegetação e outros em escala de detalhe ou semi-detalhe. Na Amazônia brasileira, estas dificuldades tornam-se mais complexas; com mapas em escalas muito pequenas e áreas ainda sequer mapeadas. Ainda assim, empreendimentos notáveis como o Projeto RADAM BRASIL realizado na década de 70, que pode ser considerado um marco histórico no mapeamento de vários temas de todo território nacional e no imageamento de radar aerotransportado, consiste de um acervo valioso que é utilizado até hoje em muitas pesquisas. De lá pra cá, pouco progresso na área da cartografia básica brasileira pode ser notado, mesmo com o grande avanço tecnológico do sensoriamento remoto e da cartografia digital.

Com o advento de satélites com altas resoluções espacial e espectral, a tecnologia sensoriamento remoto emerge como uma ferramenta, cujas potencialidades carecem constantes avaliações, tanto em aplicações geológicas quanto ambientais, especialmente na região Amazônica. Pesquisas realizadas na Província Mineral de Carajás, com o uso do sensoriamento remoto passivo e principalmente ativo, integrados a dados geofísicos (magnetometria e gamaespectrometria) já demonstraram que esta tecnologia favorece a identificação de litologias e estruturas em mapeamentos litoestruturais (Paradella *et al*, 1997). Em outra linha de pesquisa, o uso de imagens de radar aerotransportadas adquiridas na banda C, demonstra a viabilidade na identificação de crostas lateríticas mineralizadas em ferro no depósito N1 (Carajás), por meio do uso de atributos texturais extraídos das imagens de radar (Morais, Moraes & Paradella, 2002). Embora nestes últimos estudos, as imagens sejam aerotransportadas e multipolarizadas, o uso de outras multifrequências de imageamento é o ideal, principalmente em ambientes de florestas tropicais; dada a versatilidade dos sensores de radar. No entanto, o alto custo destas imagens inviabiliza estas abordagens e os trabalhos que enfocam aplicações com várias bandas, especialmente X, C, L e P, em ambientes de floresta tropical, são raros na literatura (Van der Sanden & Hoekman, 1999).

No Brasil, o início das operações dos radares imageadores em banda L (polarimétrico) e X-hh (interferométrico) do SIPAM (Sistema de Proteção da Amazônia) amplia as possibilidades de uso destes sensores em aplicações geológicas e ambientais na Amazônia brasileira; com muitos recursos minerais sub-explorados devido à dificuldade de acesso e aos altos custos envolvidos em campanhas de campo. Além disso, as dificuldades decorrentes da freqüente cobertura de nuvens dificultam o uso de imagens ópticas, o que não ocorre com os sensores que operam nas microondas. O principal sensor do SIPAM é um radar de abertura sintética (R99B), que permite no modo de mapeamento, gerar imagens com até 3 metros de resolução, nas bandas X e L, independentemente das condições atmosféricas adversas. Na banda L, mapeará as propriedades de polarização da radiação eletromagnética pela superfície (imageamento polarimétrico) e na banda X, o SAR será capaz de adquirir imagens simultâneas de uma mesma área, a fim de serem usadas no mapeamento do relevo por meio de técnicas de interferometria.

Todos estes avanços abrem novas perspectivas para a obtenção de dados geológicos e ambientais na Amazônia em escala de detalhe. A identificação das alterações provocadas por empreendimentos de mineração, no curso da dinâmica dos processos que a caracterizam em um determinado contexto, está relacionada também à aplicação do conhecimento geológico aos problemas ambientais. A necessidade de pesquisas prévias das intervenções que estes processos podem acarretar ao meio físico é imprescindível para saber as condições superficiais de um jazimento e seu entorno, de forma a explorá-los de forma sustentável, embora os recursos minerais sejam finitos. A definição das áreas de influência, ou seja, a identificação e a caracterização das regiões passíveis de sofrerem

determinado impacto ambiental tornam-se cruciais no contexto da instalação de uma atividade de mineração a céu aberto.

Neste contexto, o gestor ambiental, com um alto e crescente volume de informação em mãos, frequentemente obtidos para elaboração de EIA/RIMA, há que ser muito criterioso, para que o inevitável impacto das atividades de mineração seja o menor possível. Mapas topográficos e temáticos, imagens de satélite, análises geoquímicas, levantamentos da fauna e da flora e outras, poderia ser organizado de tal forma a facilitar a tomada de decisões no âmbito da gestão ambiental. Com isto, torna-se notável a carência de um sistema que leve a isto, que esteja além de um Sistema de Informações Geográficas, mas que permita ao usuário decidir onde instalar determinada atividade em uma mineração.

As questões ambientais envolvidas na atividade da mineração devem ser tratadas de forma conjunta, procurando identificar a relação entre os impactos diretos e indiretos. Em empreendimentos de mineração localizados em áreas ambientalmente frágeis, como na Amazônia Brasileira, estas questões tornam-se mais relevantes ainda ao considerar todos os aspectos envolvidos, desde aqueles relacionados ao meio físico aqueles que envolvem valores culturais de comunidades indígenas afetadas. O planejamento ambiental deve ser feito de modo criterioso, avaliado e planejado em termos amplos e não compartimentado.

Todos os aspectos abordados demonstram que o gerenciamento do conhecimento de áreas críticas de exploração mineral em ambientes frágeis é composto de muitas variáveis. A gestão ambiental na mineração é complexa em seus contextos ambientais, econômicos e sociais, que se inter-relacionam entre si por conceitos, práticas propostas e soluções viáveis para uma exploração sustentável. Neste contexto, os sistemas de conhecimento são indicados para soluções que dependem da avaliação de um número grande de variáveis as quais podem assumir valores distintos e mutáveis. Eles permitem extrair o conhecimento de suas diferentes fontes (humana, outros sistemas, livros, mapas, etc.) tornando-o independente das pessoas, organizá-lo, distribuí-lo e multiplicá-lo.

Schreiber *et al.* (2000) argumenta que os benefícios para as organizações que utilizam sistemas de conhecimento se dão em diferentes áreas, destacando-se, entre outros, a) a preservação do conhecimento organizacional: captura da perícia, organização do conhecimento disperso, reutilização do conhecimento; b) a disseminação do conhecimento organizacional: possibilidade de utilização do conhecimento longe de suas fontes, padronização das soluções aplicadas em qualquer ponto da organização e c) a qualidade da decisão: aumento de qualidade das decisões, com possibilidade de trabalhar em cenários com incertezas.

A construção de sistemas de conhecimento precisa ser baseada em uma arquitetura especial para serem desenvolvidos devido a suas particularidades. Normalmente, os EIA são documentos extensos, com um caráter descritivo e uma conotação de cumprimento da legislação necessária à

concessão da licença ambiental. Os aspectos ecológicos e econômicos envolvidos em uma atividade de mineração devem ser integrados visando à busca pela ecoeficiência de forma contínua. Isto pode ser atingido por meio de um processo de inovação tecnológica de sistema de arquitetura denominado sisORCI (2008a), utilizado nesta pesquisa para Mineração / Meio Ambiente – Carajás. Nesta aplicação, a função principal é de organizar o conhecimento relativo aos temas ambientais, especialmente os causadores de maior impacto no meio físico, biótico, e legais de forma a contribuir com os estudos de impacto ambiental em um depósito de ferro a ser lavrado a céu aberto em ambiente de floresta amazônica (Carajás-PA). Os resultados desta pesquisa, apresentados em forma de artigos, evidenciam que a arquitetura de conhecimentos proposta fornece melhor suporte para determinar as relações e impactos envolvidos na gestão ambiental da mineração de forma a prover subsídios para auxílio em decisões em engenharia, bem como dar suporte em projetos de monitoramento.

1.2 - PROBLEMAS ABORDADOS

A definição de limites para uma ou mais áreas de influência não é apenas uma definição euclidiana, isto é, um espaço, em torno de um empreendimento qualquer. Trata-se de definir uma área de influência que em seu contexto é diferente seja para água subterrânea, águas superficiais, segurança civil, processos erosivos, impacto sobre a vegetação e outros temas. Assim a influência ganha, em suas verdadeiras dimensões, a devida relevância no que diz respeito aos diversos sistemas naturais, sociais, portanto, culturais que estejam associados ao entorno e as seguintes questões se tornam pertinentes, segundo Martins Junior *et al.* (2008c):

1. “Quais são as áreas de influência para os seguintes aspectos: água subterrânea, águas superficiais, paisagem, vegetação, unidades de conservação, áreas indígenas, áreas urbanizadas, áreas agrícolas, áreas florestais naturais e/ou cultivadas, e outros aspectos?”
2. Se houver emissão de efluentes, pode-se comprovar se o sistema hídrico, rios ou barragens, efetuam depuração dos rejeitos dentro dos limites legais e a que distâncias do empreendimento?
3. Quais os impactos geoquímicos, químicos e físico-químicos que ocorrem na zona em torno do empreendimento (área diretamente afetada), até uma possível zona onde ocorra depuração efetiva?
4. Existe impacto cumulativo de metais pesados e substâncias tóxicas na cadeia trófica?
5. Existe população dependente de atividade econômica e alimentar ligada à cadeia trófica da localidade sob impacto?”

Neste contexto, destaca-se o sensoriamento remoto e qual poderia ser a sua contribuição neste cenário, dado o advento de sensores com alta resolução espacial e espectral, que permitem escalas de

trabalho cada vez maiores e melhor possibilidade de discriminação, respectivamente. Assim, outras questões são pertinentes:

1. Sensores ópticos e de radar podem ser integrados para extração de informações geoambientais?
2. Os sensores de radar são capazes de detectar parâmetros relacionados a mineralização de ferro e a vegetação?
3. As características espectrais dos sensores ópticos podem contribuir com informações referentes a vegetação de forma a diferenciar biomas e ecossistemas distintos na Amazônia?
4. Como integrar aspectos geoambientais com aspectos bióticos para tomar decisão de onde desmatar, onde dispor os rejeitos, os estéreis, onde construir estradas?

1.3 – OBJETIVO GERAL

A pesquisa baseia-se na concepção de uma Arquitetura de Conhecimento em área mineralizada em ferro em Carajás (PA), por meio do sistema sisORCI (Martins Jr., 2008), de forma a fornecer subsídios para melhor entendimento dos impactos envolvidos na gestão da lavra e conservação dos recursos naturais em sistemas florestais úmidos, com o suporte do uso de imagens de sensoriamento remoto (ópticas e de radar) e que possa ser aplicada em áreas com contexto geoambiental semelhante.

1.3.1 – Objetivos específicos

Os seguintes objetivos específicos são pertinentes:

- a) conceituar e caracterizar as zonas de influência na jazida de N1 e adjacências, isto é, as regiões passíveis de determinados impactos;
- b) avaliar as imagens de radar na Banda L-hh, L-vv e L-hv e ópticas como instrumento de cartografia em áreas mineráveis na Amazônia, visando explorar ao máximo os potenciais de informações geo-ambientais e de minerais ferrosos;
- c) agregar os principais tipos de correlações reconhecíveis, nesta fase da pesquisa, de interesse entre os temas ambientais e legais relacionados ao planejamento ambiental desta mineração;
- d) agregar os principais tipos de conhecimento da tipologia geoambiental da área;
- e) Organizar o conhecimento de forma operacional e incremental de mineração de ferro a céu aberto em Carajás com base em um sistema de arquitetura de conhecimentos, onde seja possível: criar caminhos lógicos e operacionais para as questões em quaisquer dos diversos níveis de complexidade e auxiliar a decisão gerencial.

1.4 – ESTRUTURA DA TESE

A tese encontra-se estruturada na modalidade de integração de artigos científicos, de acordo com os padrões do regulamento geral do programa de pós-graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais do Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, de 14 de abril de 2010. De acordo com o artigo 98, item III deste regulamento a tese contém; o capítulo da Introdução; com o tema pesquisado, os problemas abordados, os objetivos, a localização da área, a descrição dos materiais e métodos utilizados e a revisão bibliográfica. Em seguida, são apresentados quatro artigos científicos, formatados nos padrões das revistas onde foram publicados, dos quais três encontram-se publicados e um submetido. O capítulo da Conclusão finaliza a tese, seguido das referências bibliográficas e dos anexos. Os artigos listados abaixo estão em ordem cronológica de publicação e submissão, com os respectivos endereços:

2009 - Informações geoambientais derivadas de imagens de radar (R99B/SIPAM) e ópticas (LANDSAT/TM5) em jazimento de minério de ferro em Carajás. Revista da Escola de Minas (REM)

http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-44672009000200003

2011 - Mapping iron-mineralized laterite environments based on textural attributes from MAPSAR image simulation – SAR-R99B (SIVAM/SIPAM) in the Amazon Region. Revista Brasileira de Geofísica.

http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-261X2011000100007&lng=en&nrm=iso

2011 – Multi-scale approach using remote sensing images to characterize the iron deposit n1 influence areas in Carajás Mineral Province (Brazilian Amazon). Environmental Earth Sciences

<http://www.springerlink.com/content/0686x803426x3208/>

2012 - Knowledge Architecture for environmental planning of iron ore open pit mine in Carajás Mineral Province (Brazilian Amazon). Journal of Environmental Management - submetido

1.5– ÁREA DE ESTUDO

O depósito de ferro N1 compreende um dos depósitos de ferro da Serra Norte, situado na Serra dos Carajás, inserida entre os paralelos $6^{\circ} 06' 71''$ e $5^{\circ} 59' 73''$, de latitude sul e meridianos $50^{\circ} 15' 95''$ e $50^{\circ} 19' 4,11''$ de longitude oeste, situada no Sudeste do Estado do Pará (Figura 1.1). A região conta com boa infraestrutura viária e está situada dentro dos limites de unidade de conservação de uso sustentável denominada Floresta Nacional de Carajás (Flona Carajás) com área de 393.331 há, onde se encontra em operação as minas de ferro (N4W) e a de manganês (Azul). O Depósito de N1 possui uma área aproximada de 24km^2 e representa a primeira grande clareira natural escolhida como local do

primeiro acampamento dos projetos de pesquisa geológica nessa Província geológica (Resende e Barbosa, 1972), dado o contraste da vegetação de campos rupestres com a floresta (Figura 1.2).

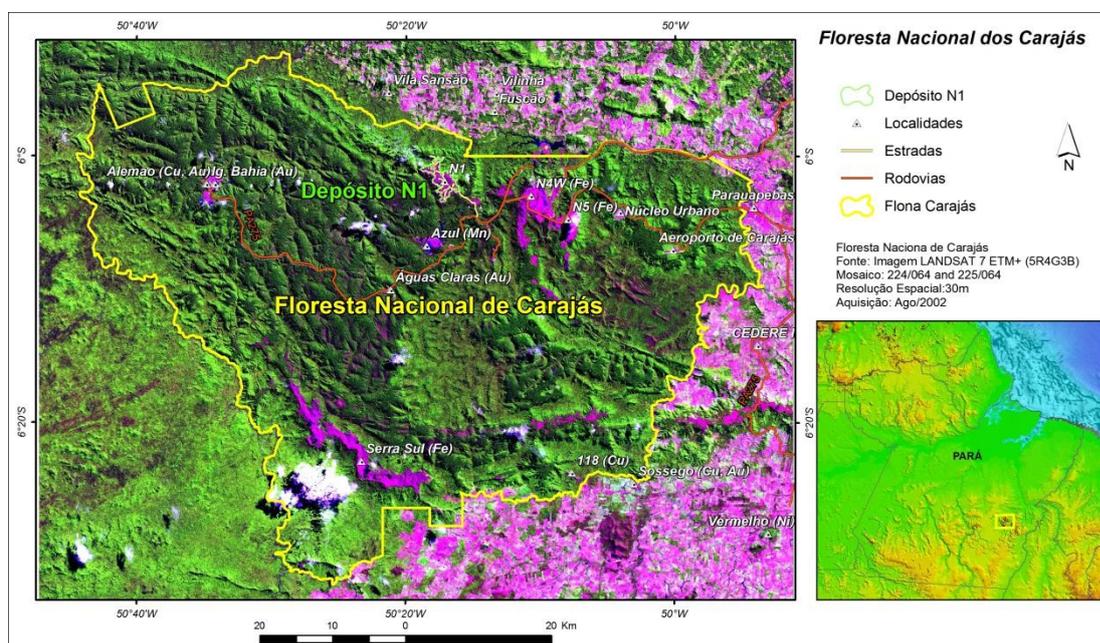


Figura 1.1- Localização e infraestrutura viária na região do Depósito de N1 no contexto da Flona Carajás. Fonte: org. Morais (2011)

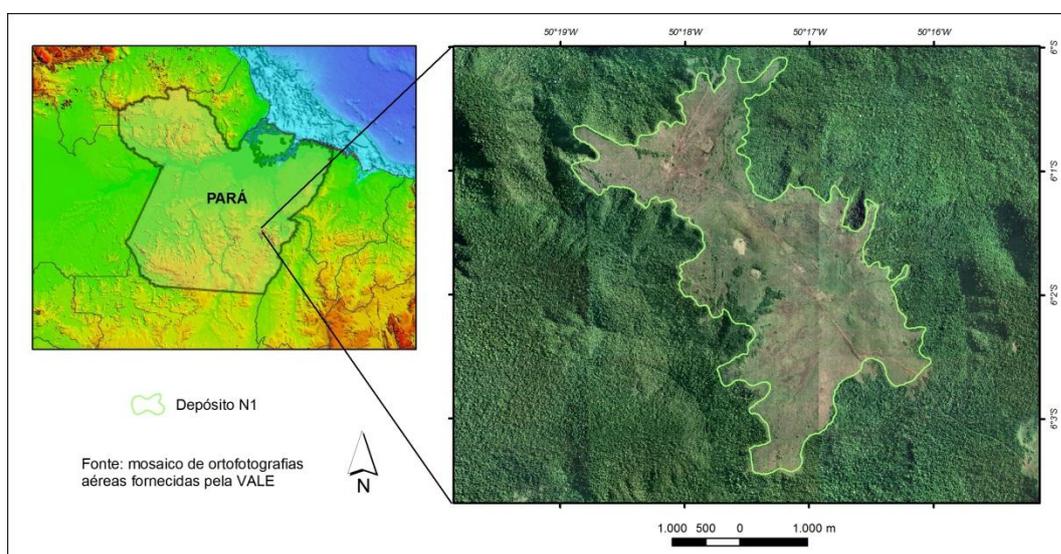


Figura 1.2- Localização do Depósito de N1. Fonte: org. Morais (2011)

1.5.1- GEOMORFOLOGIA

O depósito de ferro N1 encontra-se inserido no domínio centro-norte do Planalto Dissecado do Sul do Pará, que é caracterizado por maciços residuais de topo aplainado e conjuntos de cristas e picos interpenetrados por faixas de terrenos rebaixados (Boaventura, 1974). Neste domínio, o relevo é

marcado por serras com altitudes médias de 700m, onde se situam as serras Norte e Sul; chegando a 900m na Serra dos Carajás.

O conjunto de formas tabulares, denominado Serra dos Carajás (Figura 1.3), encontra-se parcialmente capeado por carapaça ferruginosa interpretada como depósito de cobertura de um pediplano de idade pliocênica. A Serra dos Carajás é sustentada por um conjunto de rochas pré-cambrianas dobradas e falhadas, com sinclinais suspensos em trechos da Serra Norte e Serra Sul. Estas feições são marcadas pela elevada presença de vales encaixados. Nas porções mais altas da serra, dispõem-se as superfícies tabulares erosivas (Estb), onde se encontram as coberturas lateríticas.

Em N1, os aspectos geomorfológicos marcantes são, de acordo com Resende e Barbosa (1972): vales cobertos pela mata virgem; serras alongadas e íngremes e chapadas ou mesas onde ocorrem as crostas lateríticas (Figura 1.4). As chapadas são as feições dominantes, erguidas acima da floresta densa com pequena variação altimétrica (Figura 1.5) e encostas íngremes cujas feições reconhecidas em campo são:

- a) áreas predominantemente planas, alongadas e situadas mais ou menos ao mesmo nível;
- b) espigões alongados de perfis convexos, esculpido em minério de ferro, orientados longitudinalmente e erguidos acima da superfície alongada;
- c) ocorrência de lagos e brejos temporários ou perenes nas áreas planas.

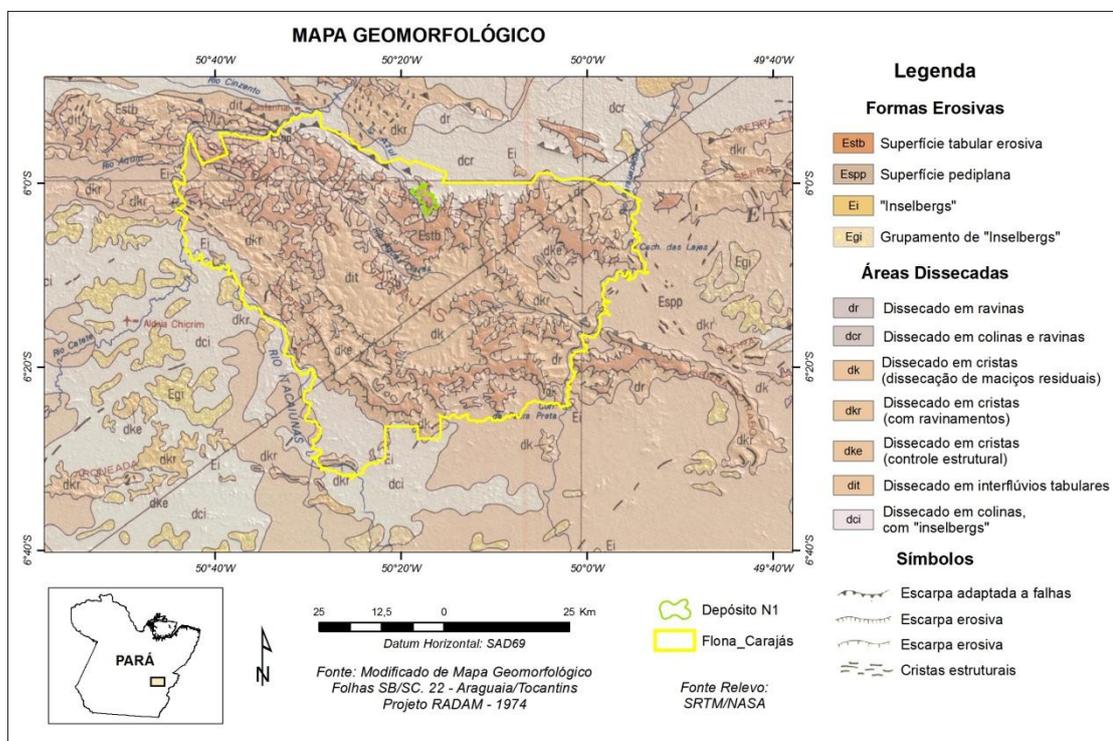


Figura 1.3– Mapa Geomorfológico – Carajás (PA). (Fonte: Projeto RADAM Folha SB.22 Araguaia e parte da Folha SC.22 Tocantins e MDE SRTM/NASA; modificado pela autora).

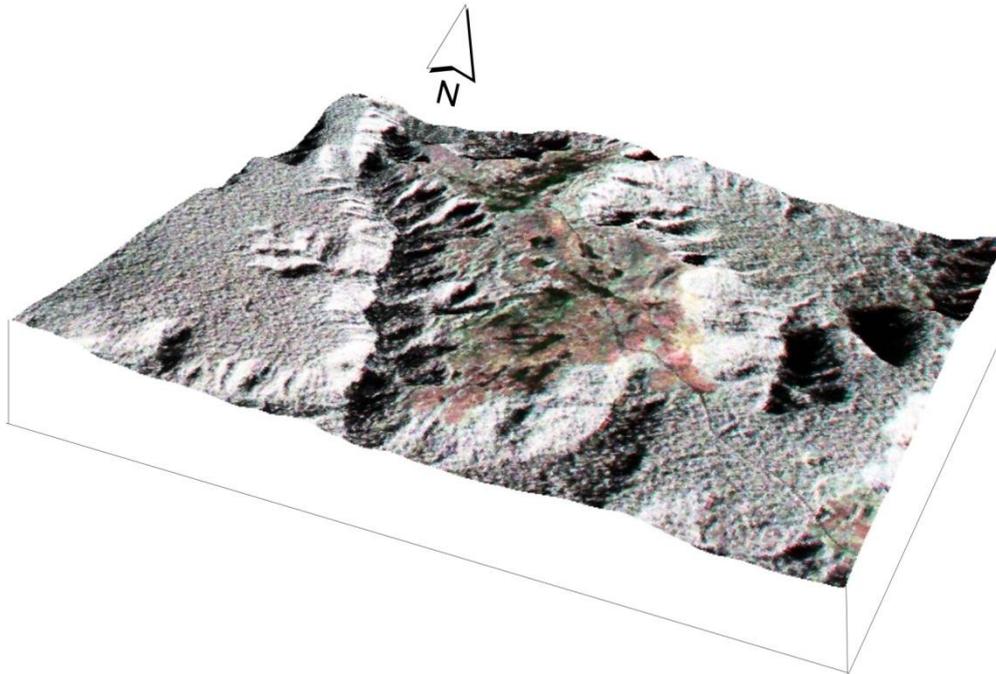


Figura 1.4 – Aspectos morfológicos do Depósito de N1. (Fonte: imagem de radar aerotransportada, Banda L, SAR - R99B – composição colorida R-hh, G-hv, B-vv, Org. Morais, 2011).

A ocorrência destes lagos restringe-se às áreas com substrato formado por crostas ferruginosas, com formas subcircular (Figura 1.6), alongada ou elíptica. A profundidade é pequena (unidades de metros), ocupando pequenas áreas. A vegetação de campos rupestres ocorre às suas margens e na estação seca, ficam cobertos por vegetação de gramíneas.

Na Serra Sul, estudos sedimentológicos realizados nos lagos sobre as crostas lateríticas revelam importantes registros paleoclimáticos na Amazônia (Sieddine *et al.* 2001). Os autores identificaram períodos de seca ocorridas por volta de 60 e 45 mil anos e entre 23 e 11 mil anos. As características geomorfológicas do platô, situado em altitude de 700-900m, indicam que os lagos não são influenciados pela dinâmica fluvial da Amazônia. Eles apresentam reduzidas bacias de drenagem, compostos essencialmente de materiais lateríticos, e baixa taxa de sedimentação, com registros de espessura pequena de sedimentos em um intervalo de tempo relativamente pequeno. Estudos sedimentológicos realizados na Lagoa Grande na Serra Norte, dão conta de eventos cíclicos e alternados de clima úmido e seco, durante a sedimentação da mesma no Pleistoceno Superior, indicando que as condições climáticas úmidas prevaleceram sobre as áridas Costa *et al.* (2005).

Outras feições presentes nos platôs da Serra dos Carajás são as cavernas desenvolvidas em condições atípicas (lateritas) e que por esta razão despertam interesse quanto a sua origem e as associações mineralógicas neoformadas em seu interior (Maurity e Kotschoubey, 1994a, 1994b). Em N1, estas cavernas são descritas como formas pseudocársticas, caracterizando-as por depressões

subcirculares e inúmeras cavidades subterrâneas localizadas nas bordas do platô (Figura 1.7). Segundo os autores, a formação destas feições está associada ao rebaixamento do nível de base, provavelmente resultante do tectonismo epeirogenético, que pode ter afetado toda região no Terciário Superior e/ou Quaternário.

Maurity e Kotschoubey (1994a) relacionam a evolução dessas formas com a geração de zonas de baixa densidade, através da eluviação química e da degradação da parte inferior, abaixo da crosta. A erosão física é mais atuante nas bordas do platô, com o aumento dos fluxos aquosos em regime vadoso, e remove o material menos coeso, gerando as cavernas que podem atingir até 100m de extensão. Os lagos dolinoformes também estão associados ao abatimento da crosta laterítica, provocado pela fragilidade e instabilidade da zona de baixa densidade e a presença provável de cavidades subterrâneas. A Figura 1.8 exemplifica estas feições nos platôs lateríticos em Carajás.

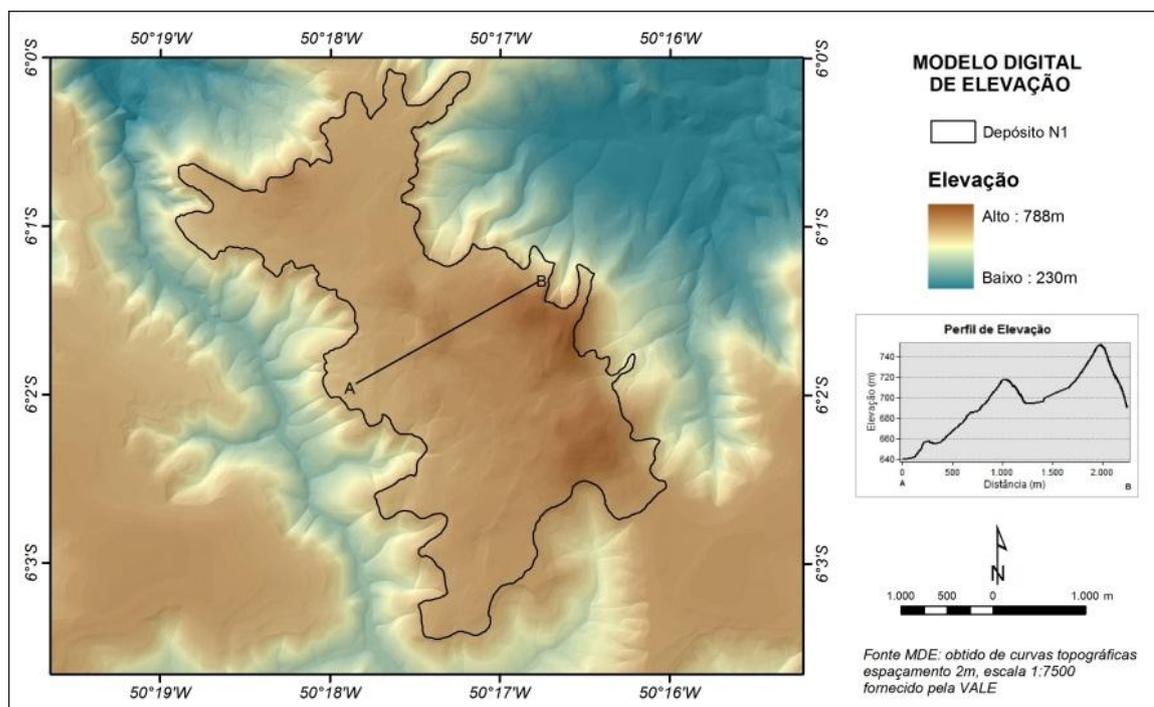


Figura 1. 5 – Variação altimétrica do platô N1 obtida de Modelo Digital de Elevação. Fonte: org. Moraes, 2011.



Figura 1. 6 – Vista de uma superfície com depressão fechada e ocorrência de lago coberto por vegetação. (Ponto 37 – Anexo 1)



Figura 1. 7– Caverna desenvolvida na encosta do platô (ponto 8 – Anexo 1).

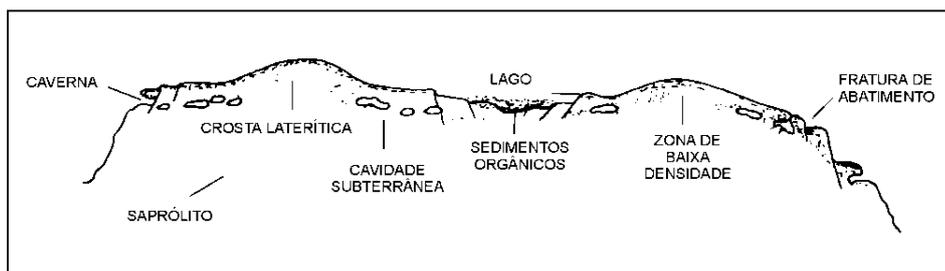


Figura 1.8- Seção esquemática dos platôs da Serra Norte (Serra dos Carajás) com padrões de fratura e feições pseudocársticas. Fonte: Maurity e Kotschoubey (1994a, p.355).

1.5.2– VEGETAÇÃO

O levantamento florístico realizado pelo Projeto RADAM é um dos mais abrangentes realizados na região de Carajás, apesar da carência de detalhamentos decorrente da escala pequena. Segundo Veloso *et al.* (1974), a cobertura vegetal da Serra Norte foi agrupada em dois ecossistemas: floretal e arbustivo. O ecossistema floretal ocupa a maior parte da região mais elevada na Serra Norte, com o ecossistema esclerófilo arbustiva nas cimeiras dos relevos residuais rochosos ou sub-rochosos (Figura 1.9). A vegetação de floresta é classificada como densa, sinônimo de floresta ombrófila tropical, com climas quentes e superúmidos, com acentuada diminuição das chuvas em determinadas épocas do ano (IBGE, 2006). No entorno do Depósito N1, ocorrem dois ecossistemas de floresta densa mapeados por Veloso *et al.* (1974): Floresta Ombrófila Montana e Floresta Ombrófila Submontana. O primeiro é caracterizado pela formação alta das montanhas, composta por árvores emergentes, bem distribuídas, com mais de 30m de altura. O segundo grupo corresponde às formações das áreas dissecadas, com relevo aplainado, de baixa altura, com cobertura vegetal bem variada e baixa, com 10 a 15m de altura.

A vegetação tipo esclerófilo arbustiva, descrita com aspecto fisionômico lembra a vegetação do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais, é típica de formações existentes em áreas de zona intertropical, caracterizada pelos autores como vegetação baixa, pequenos arbustos sobre as cangas (IBGE, 1992). Estudos mais detalhados da vegetação de Carajás a denominam de “vegetação de canga” (Silva *et al.*, 1986; Silva & Rosa, 1990; Silva, 1992; Silva *et al.*, 1996) ou campo rupestre (Joly, 1970 in Silva *et al.* 1986), esta última denominação adotada nesta pesquisa. A área de floresta predomina sobre vegetação de campos rupestres, que se destacam por clareiras naturais circundadas pela floresta (Figura 1.10) (Salomão *et al.*, 1988). As áreas de floresta correspondem às matas abertas, ralas, ricas em cipós e palmeiras com forte penetração de luz no seu interior, e as matas mais fechadas, sombrias, com biomassa densa (Secco & Mesquita, 1983 in Silva *et al.* 1986). A vegetação apresenta uma fisionomia variável (Paradella *et al.*, 1994). No interior da mata, a floresta é aberta, a presença de cipós e palmeiras não é abundante, a penetração de luz é razoável e o sub-bosque é ralo. Na medida

em que se aproxima das margens em rumo aos campos rupestres de N3 e N4, a vegetação é mais baixa, com maior presença de cipós e intensidade de luz; sub-bosque mais denso.

Nos platôs, onde ocorrem as crostas ferruginosas, como em N1, a vegetação do tipo campo rupestre é constituída predominantemente por herbáceas e arbustivas, com pouco desenvolvimento do tipo semi-arbóreo (Silva *et al.* 1986). A fisionomia dos campos rupestres difere em função da estação climática. Na estação chuvosa (novembro a abril) estes ficam cobertos por uma vegetação verde, com muitas espécies floridas. Há trechos em que esta vegetação se torna escassa, permitindo a exposição das formações ferríferas. Muitos lagos encontram-se encobertos por vegetação do tipo *Typha sp*, conhecida popularmente como taboa, onde também há extensas exposições das crostas nos períodos de seca.

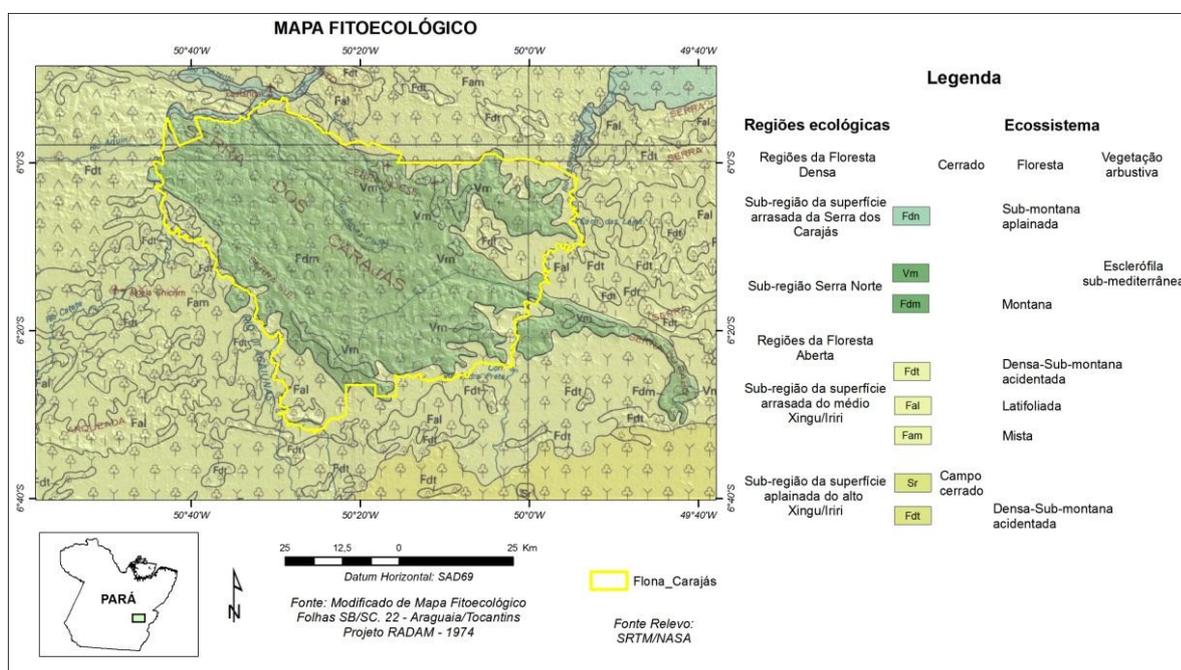


Figura 1. 9 – Mapa Fitoecológico - Carajás (PA). (Fonte: Projeto RADAM Folha SB.22 Araguaia e parte da Folha SC.22 Tocantins e MDE SRTM/NASA, modificado Moraes 2011).



Figura 1.10 – Aspecto da vegetação de campos rupestres e floresta de montana ao fundo em N1 (Ponto 16 – Anexo 1).

No topo dos morros, onde há muitos afloramentos rochosos, a camada de solo é praticamente inexistente e as espécies desenvolvidas são de porte reduzido. Isto se deve ao pequeno acúmulo de matéria orgânica nas fendas das rochas ou entre elas, levando à formação de tapetes de gramíneas sobre as cangas. Nas descidas das encostas, ocorre certo acúmulo de solo e de matéria orgânica, permitindo o desenvolvimento de espécies de porte maior. Na base dos morros, a flora atinge seu máximo desenvolvimento (Silva *et al.*, 1986). As Figuras 1.11 e 1.12 ilustram estes tipos de vegetação controlados por suas respectivas variações altimétricas.

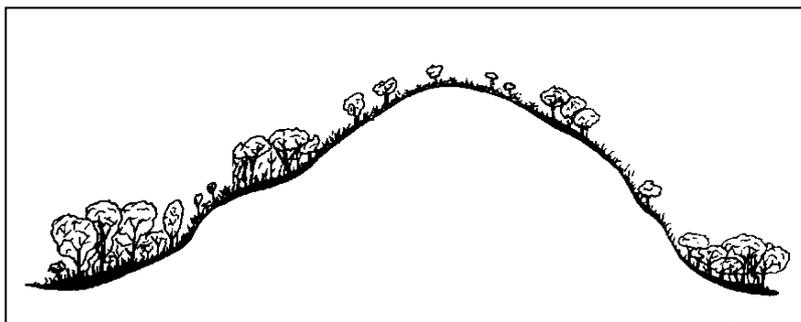


Figura 1.11- Perfil esquemático do relevo sobre mina de ferro na Serra Norte, Carajás. Fonte: Joly (1970) in Silva *et al.* (1986, p.190).



Figura 1.12 – Variação da vegetação de campos rupestres em relação ao relevo (ponto 38 – Anexo 1), ano 2005.

As características deste tipo de vegetação, com reduzida extensão geográfica e fragilidade do bioma, estimularam os outros tipos de estudos botânicos da região de Carajás, além da identificação de espécimes. Investigações visando detecção de metais pesados (Fe, Mn, Cu, Ni, Cr e Pb) em tecido vegetal no Depósito de ferro N3, na Serra Norte, foram realizados em área de ocorrência da canga hematítica e níveis acima do normal de Fe, Ni e Cr foram detectados em todas as espécies analisadas (Silva, 1992). Como que este tipo de vegetação cresce diretamente sobre as jazidas minerais de ferro, supõe-se que o fator seletivo mais crítico seja a alta concentração de metais pesados, juntamente com a pobreza de nutrientes e a baixa capacidade de retenção de água. Estes fatores parecem exercer pressão ambiental, provocando uma seleção natural muito rigorosa. Segundo Silva (1992), a capacidade que muitas plantas possuem de acumular níveis anormais de metais em seus tecidos acarretam modificações estruturais e funcionais nas mesmas, caracterizando-as como indicadoras de jazidas minerais e, em muitos casos, formando comunidades vegetais que apresentam relação com o substrato. Por esta razão, a detecção de tais espécies vegetais apresenta grande importância também como subsídio à recuperação de áreas degradadas pela mineração e na bioprospecção de jazidas.

1.5.3– SOLO

No entorno do Depósito N1 ocorrem dois tipos de solos, segundo Rosatelli *et al.* (1974), a unidade de mapeamento designada como LV9 e unidade PB4 (Figura 1.13). A unidade LV9 é descrita por relevo variando de suave a ondulado, com material originário proveniente de arenitos, itabiritos e canga da Serra dos Carajás. Os solos desta unidade apresentam textura argilosa, ocasionalmente com concreções, profundos, medianamente profundos e rasos, estrutura maciça e indiscriminada, bem drenados e fertilidade natural baixa. A unidade PB4 ocorre em regiões com relevo ondulado, moderadamente dissecados, originados da decomposição de granitos. São solos

medianamente profundos, bem drenados, ácidos, com textura argilosa e estrutura em blocos ou maciça com aspecto de fraça pequena granular.

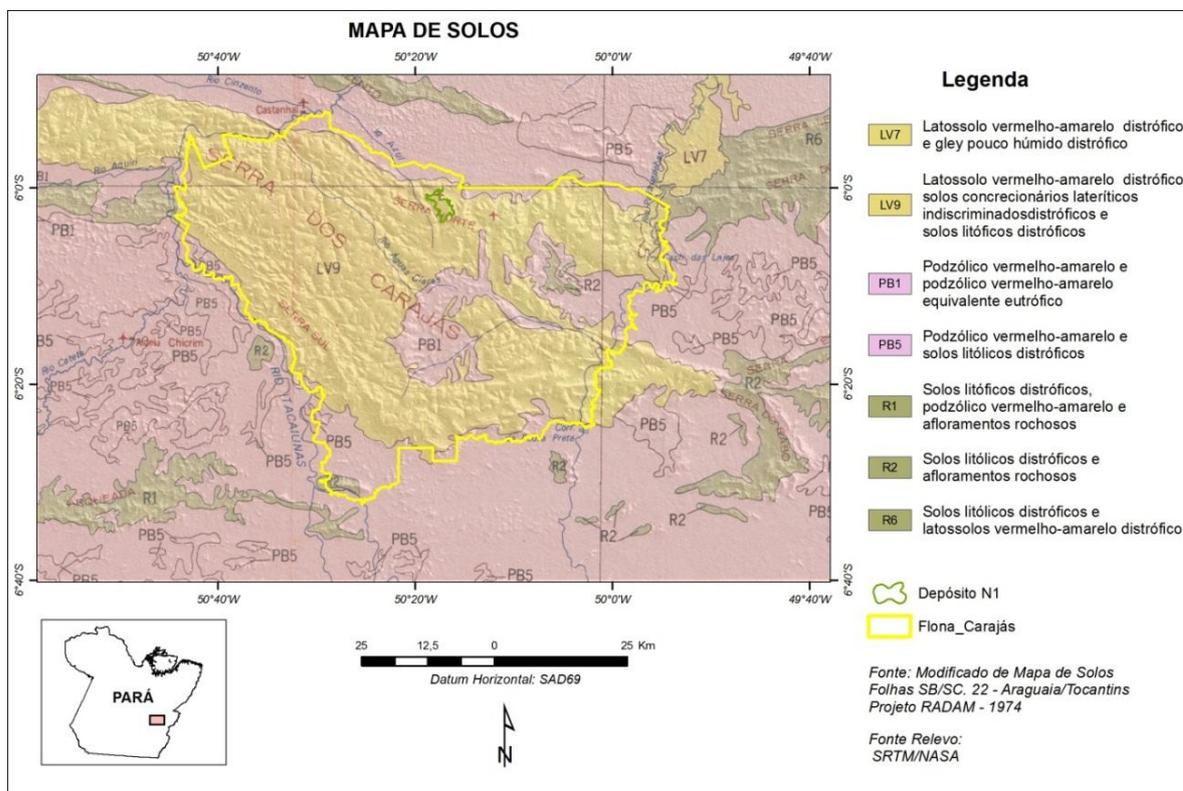


Figura 1.13 – Mapa de Solos - Carajás (PA). (Fonte: Projeto RADAM Folha SB.22 Araguaia e parte da Folha SC.22 Tocantins e MDE SRTM/NASA, modificado pela autora).

No Depósito N1, a ocorrência de solos lateríticos, associados a rochas vulcânicas intemperizadas, onde se desenvolve a vegetação de floresta pluvial densa (Figura 1.14). Nas encostas íngremes do plateau, ocorrem solos típicos de colúvio, com fragmentos de canga de dimensões centimétricas variadas (Figura 1.15).



Figura 1.14 – Vegetação de floresta (ao fundo) desenvolvida em solos sobre o platô em N1 (Ponto 29 – Anexo 1).

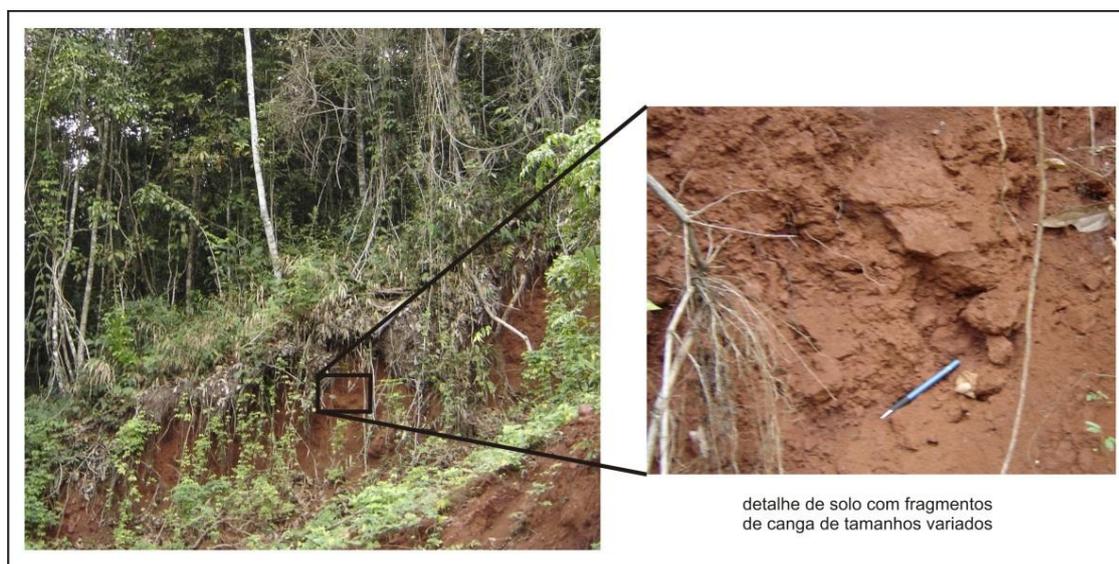


Figura 1.15 – Detalhe de solo com vegetação de floresta em encosta do platô (Ponto 21 – Anexo 1).

1.5.4– CLIMA

O clima é Equatorial, super-úmido tipo Am, na transição para tipo Aw segundo a classificação de Köppen (IBGE, 2011), com temperaturas médias oscilando entre 19^o e 31^o, caracterizado por duas estações distintas, uma seca (inverno) de maio a outubro e outra úmida (verão)

de novembro a abril, com períodos torrenciais bastante intensos. As médias pluviométricas variam entre 2.000 a 2.500 mm/ano.

As umidades relativas variam de 69% (julho) a 85% (janeiro, fevereiro e abril), com uma média ao longo do período de 79%. A média da umidade relativa mínima registrada na estação 650002 no período de 1982 a 1998 foi de 48% (julho) e a média da máxima em torno de 98% (coincidente com o período chuvoso). Assim, a região pode ser caracterizada como úmida, com índice médio anual superior a 75% e apenas dois meses com média em torno de 70% (IBAMA, 2003).

A região amazônica foi afetada pela forte seca que ocorreu no período de novembro de 2004 ao final de 2005 (Marengo *et al.*, 2007), considerada anômala para os padrões da região. Este evento coincidiu com a época da coleta das imagens de radar em julho de 2005, e com a campanha de campo realizada em setembro de 2005. A figura 1.16 ilustra as médias pluviométricas para o ano de 2005.

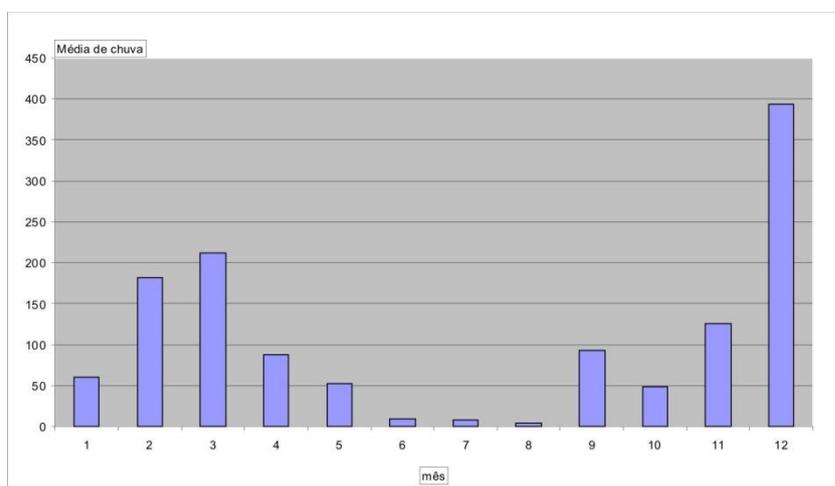


Figura 1.16 – Médias pluviométricas mensais para o ano de 2005 em Carajás (Fonte: ANA – estação 650002).

1.5.5– GEOLOGIA REGIONAL

A Província Mineral de Carajás é uma das mais importantes províncias minerais do mundo, com depósitos expressivos de produção e potencial crescentes para Fe, Mn, Cu, Au, Ni, U, Ag, Pd, Pt, Os, entre outros (Lobato *et al.*, 2005). Entre estes, destacam-se os depósitos de ferro das serras Norte (N1 a N9), Sul (S1 a S45) e Leste (SL1 a SL3); os depósitos da classe óxido de Fe-Cu-Au: Salobo, Pojuca, Alemão, Igarapé Bahia, Cristalino, Sossego, Alvo 118, Gameleira; Manganês Azul e níquel do Vermelho.

Diversos trabalhos de cunho estratigráfico regional, como as sínteses elaboradas por DOCEGEO (1988), Hirata *et al.* (1982) e Araújo & Maia (1991) e tectônico, como os trabalhos de Almeida (1978), Hasui & Haraly (1985), Hasui *et al.* (1984), Araújo *et al.* (1988), Pinheiro & Holdsworth (2000) e outros destacam-se na literatura. Ainda assim, diversos problemas dificultam o

entendimento da geologia da região. Estes problemas se refletem na prospecção mineral e estão relacionados aos fatores tais como; (i) mais de 80% da região possui poucos e escassos afloramentos, com o agravante de estarem cobertos pela densa floresta tropical, (ii) mapeamentos de detalhe são baseados essencialmente nos aspectos litológicos localizados nas áreas mineralizadas, o que resulta na criação de um conjunto de diferentes nomenclaturas estratigráficas (Lindenmayer *et al.*, 2001). Além destes, o fator que tem levado às controvérsias é a intensa alteração hidrotermal das rochas vulcânicas da área, relacionada à intrusão de diversos granitoides, que as tornaram enriquecidas em elementos incompatíveis, com mobilização de álcalis e sílica.

A cartografia geológica mais recente sobre a região de Carajás abrange uma revisão de estudos estratigráficos, geocronológicos e recursos minerais e foi apresentada em 2008 pelo Serviço Geológico do Brasil CPRM (Vasquez & Rosa-Costa, 2008). Nesta cartografia, o Mapa Geológico e de Recursos Minerais do Pará é apresentado em forma um Sistema de Informações Geográficas (SIG), na escala 1:1.000.000, composto, entre outros, pelas bases geológica, estrutural, tectônica, de recursos minerais, geofísica, geocronológica, paleontológica, hidrográfica e planimétrica.

Deste modo, os aspectos geológicos da Província Mineral Carajás são descritos a seguir; incluindo o arcabouço geotectônico, as principais unidades litoestratigráficas da área, o arcabouço estrutural e a mineralização de ferro. As alterações estratigráficas propostas na cartografia supracitada são mencionadas, com enfoque no Grupo Grão Pará, no qual está inserido o Depósito de N1, pertencente ao Domínio Carajás.

1.5.5.1 Arcabouço geotectônico

O Cráton Amazônico é uma das maiores áreas pré-cambrianas do mundo e uma das principais unidades geotectônicas da América do Sul. A Província Mineral de Carajás, localizada na borda sul-oriental do Cráton Amazônico, representa a porção crustal mais antiga e melhor preservada, com ocorrência de um núcleo granito-*greenstone* envolvido por cinturões de gnaisses migmatizados e faixas supracrustais associadas, com direções EW, NE-SW e NW-SE (Almeida, 1978). Na subdivisão do cráton Amazônico em províncias geotectônicas, destacam-se os modelos geofísico-estrutural, proposto por Hasui & Haralyi (1985) e Hasui *et al.* (1984) e o geocronológico, proposto por Amaral (1974).

A estruturação tectônica da Amazônia oriental proposta por Hasui & Haralyi (1985) e Hasui *et al.* (1984) com dados geofísicos gravimétricos e magnetométricos, associados à informação geológica disponível na época, propõe a estruturação antiga da Amazônia oriental como articulação de blocos crustais denominados Belém, Araguacema, Juruena e Porangatu. As bordas dos blocos são definidas por anomalias gravimétricas positivas, por domínios magnéticos fortemente perturbados e por linearização das unidades rochosas. Nos núcleos dos blocos ocorrem granitoides e seqüências vulcanossedimentares, tipo *greenstone-belts*, caracterizados por domínios magnéticos pouco

perturbados e isentos de anomalias gravimétricas. São individualizados os cinturões Araguaia, Itacaiúnas e alto Tapajós (Hasui *et al.* 1984) nas bordas do bloco Araguacema, e no seu núcleo o terreno granito-*greenstone* do sul do Pará. Amaral (1974) subdividiu o cráton em três províncias geocronológicas, com base em centenas de datações utilizando os métodos K-Ar e Rb-Sr: Amazônia Oriental, Amazônia Central e Amazônia Ocidental.

Modelos mais recentes reinterpretaram as províncias do cráton Amazônico com base em datações geocronológicas utilizando os métodos Sm-Nd e U-Pb SHRIMP propõem uma compartimentação tectônica na qual o cráton amazônico é resultante de sucessivos episódios de acreção crustal durante o Paleo e o Meso-Proterozóico, em volta de um núcleo mais antigo, estabilizado no final do Arqueano (Santos, 2003). Nesta proposta, o cráton é dividido em sete províncias tectônicas (Figura 1.17) ou geocronológicas: Carajás (3000 – 2500 Ma), Transamazonas (2260 – 1990 Ma), Tapajós – Parima (2030 – 1860 Ma), Amazônia – Central (1900 – 1860 Ma), Rondônia – Juruena (1850 – 1540 Ma), Rio Negro (1820 – 1520 Ma) e Sunsás (1450 – 1000 Ma).

A Província Carajás representa a porção crustal mais antiga e melhor preservada do Cráton Amazônico, caracterizada por uma estruturação WNW–ESE e aparente ausência de rochas geradas durante o ciclo Transamazônico (2,26 -1,86 Ga). Santos (2003), com base em revisão da geologia da Província Mineral de Carajás com e em dados geocronológicos, utilizando os métodos Sm-Nd e U-Pb SHRIMP, propõe a denominação de domínio Rio Maria (DRM) para a porção Sul da província e Domínio Carajás (DCJ) para a porção Norte (Figura 1.18).

O domínio Rio Maria é caracterizado por uma crosta juvenil mesoarqueana (3,05-2,85 Ga) e constituído sequências vulcanossedimentares tipo granitoide-*greenstone*, representando uma série de orogêneses acrescionais. As sequências vulcanossedimentares são agrupadas no Supergrupo Andorinhas (DOCEGEO, 1988), cuja constituição da base para o topo, é de rochas metavulcânicas máficas e ultramáficas (incluindo metakomatiítos) com intercalações de metapelito, BIF e metachert (Grupo Babaçu), que gradam para metavulcânicas félsicas a intermediárias intercaladas com metapelitos e metapsamitos (Grupo Lagoa Seca).

O domínio Carajás é uma região de crosta continental essencialmente neoarqueano, caracterizado por sequências metavulcano-sedimentares e granitoides gerados principalmente no intervalo entre 2,76-2,55 Ga. Abrange a Serra dos Carajás e adjacências, sendo limitado a leste pela Faixa Araguaia e a oeste por rochas vulcânicas e sedimentares do Supergrupo Uatumã e da Formação Gorotire (Domínio Rio Maria), respectivamente. Sua estruturação principal é WNW, sendo constituído por rochas metamórficas de fácies anfíbolito a granulito (Santos 2003), mais velhas que 2.8 Ga (complexos Pium e Xingu), e sequências metavulcanossedimentares de fácies xisto verde e granitoides de 2.76 a 2.56 Ga. As principais unidades litoestratigráficas do domínio Carajás são descritas a seguir com ênfase no Grupo Grão Pará, que hospeda o Depósito de ferro N1.

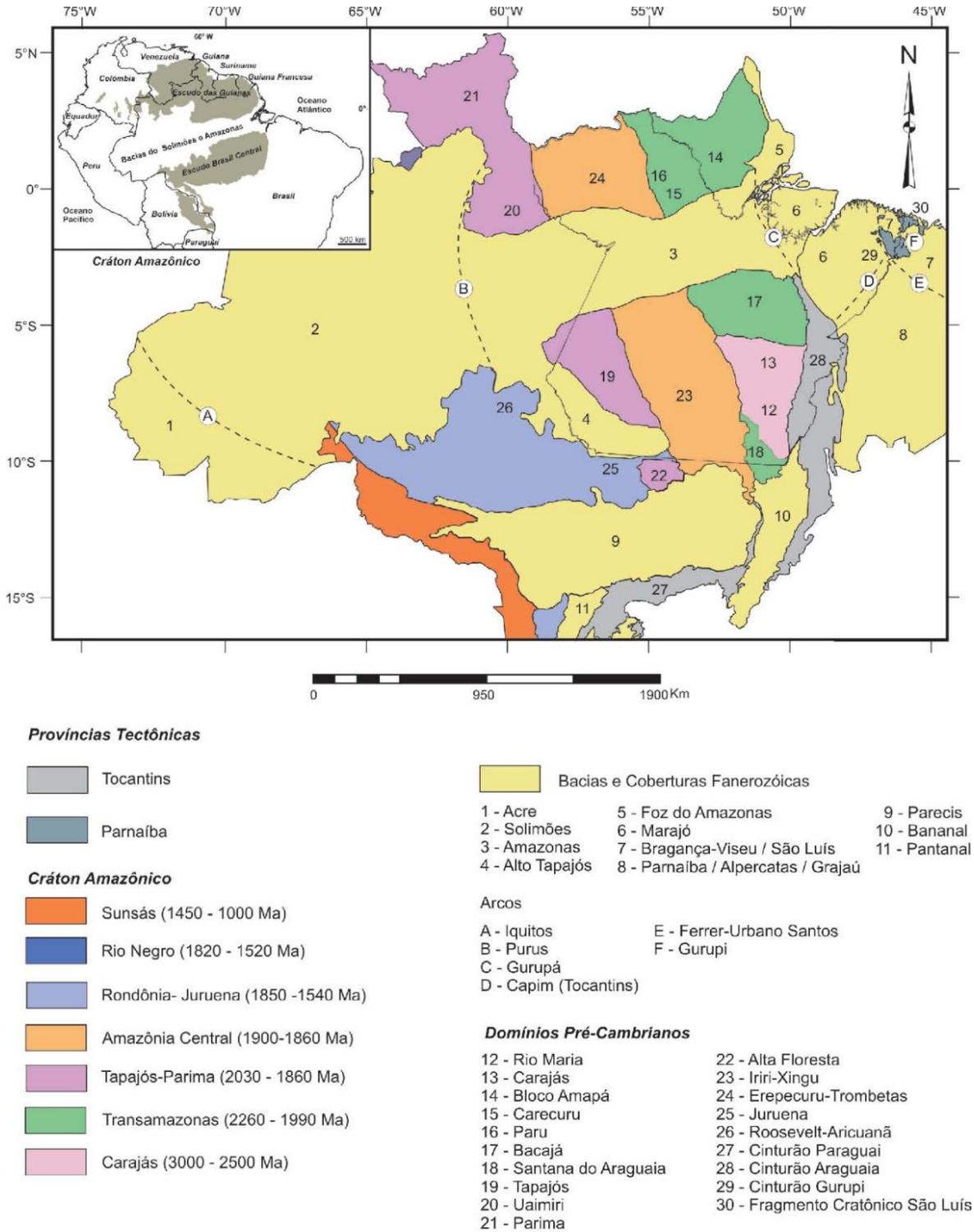


Figura 1.17 – Províncias tectônicas do Norte do Brasil. Fonte: Modificado de Santos (2003).

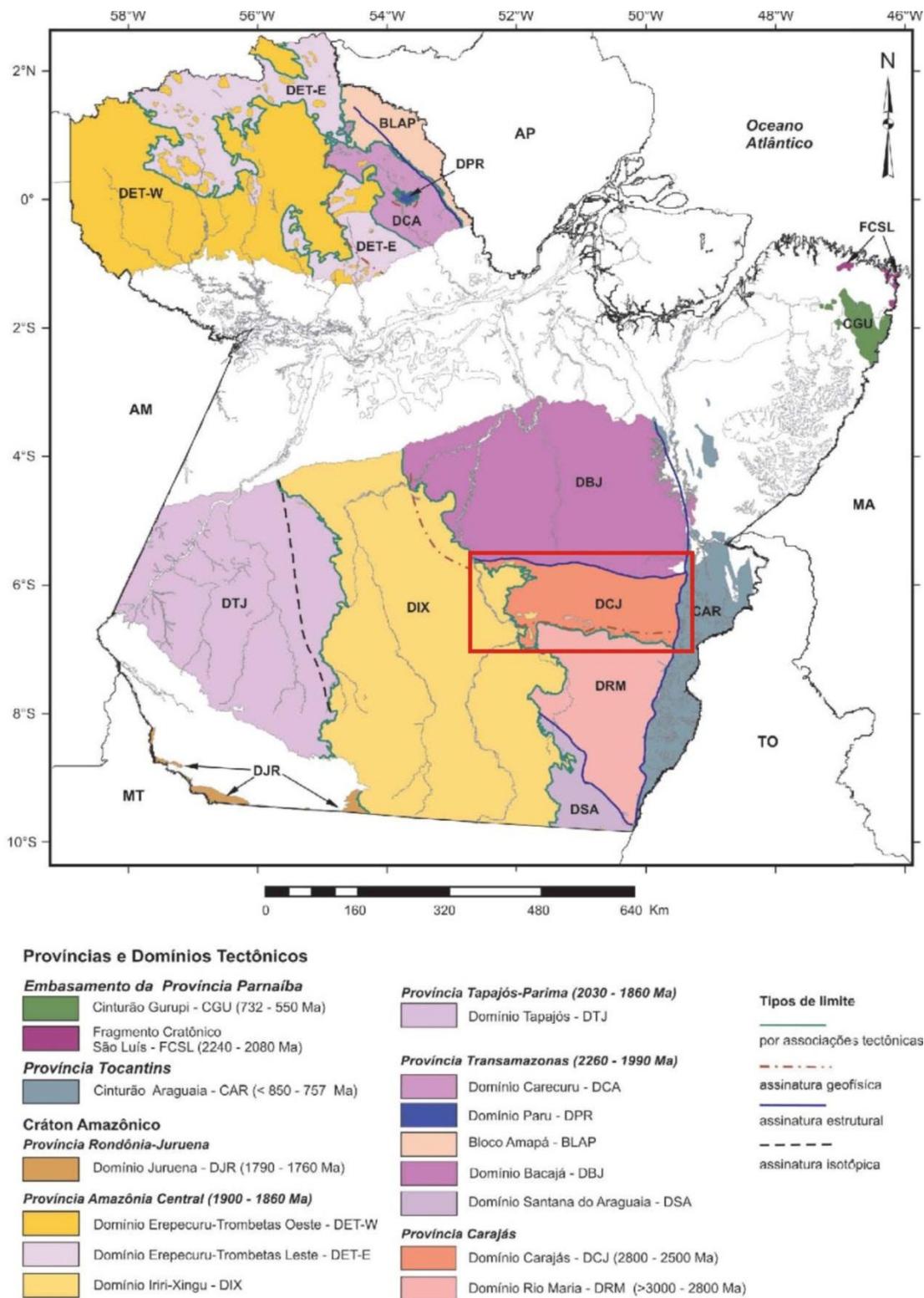


Figura 1.18 – Províncias tectônicas do Pará, com Domínio Carajás em destaque. Fonte: Vasquez & Rosa-Costa (2008).

1.5.5.2 Unidades litoestratigráficas

1.5.5.2.1 – Embasamento

1.5.5.2.1.1 - Ortogranulito Chicrim-Cateté

Esta unidade, anteriormente denominada Complexo Pium, que aflora como corpos alongados de direção E-W paralelos à foliação regional (DOCEGEO, 1988), era tida como rochas de alto grau metamórfico, como granulitos máficos e félsicos, charnockitos e enderbitos, de origem magmática e/ou vulcanossedimentar (Araújo & Maia 1991). Por meio de estudos recentes, foi constatado que as rochas aflorantes ao longo do rio Pium não eram granulitos máficos, mas sim, rochas ígneas gabróicas Ricci (2006), definidas como a unidade Diopsídio Norito Pium (Vasquez & Rosa-Costa, 2008). Nessa região, o termo Ortogranulito Chicrim-Cateté (seção-tipo no rio homônimo) passa a ser considerado como o único embasamento granulítico do Domínio Carajás. A nova unidade definida é constituída por ortogranulitos charnockíticos a enderbíticos e pequenos corpos de granulitos máficos associados. As texturas metamórficas mais comuns são do tipo granoblástica interlobada equigranular, nos tipos félsicos, e poligonal nos máficos. Em termos geocronológicos, ainda não foram obtidas idades confiáveis na área-tipo Chicrim-Cateté. Pidgeon *et al.* (2000) dataram por U-Pb SHRIMP em zircão, um gnaisse enderbítico na área tipo Pium, obtendo uma idade de 3002 ± 14 Ma para o protólito ígneo, assim como uma idade de 2859 ± 9 Ma, obtida nas bordas de zircões, e interpretada como a do metamorfismo granulítico. Esta rocha datada é considerada como um possível xenólito do Ortogranulito Chicrim-Cateté, hospedado nas rochas gabróicas do Diopsídio Norito Pium e em função disso, essas referidas idades são atreladas à unidade Ortogranulito Chicrim-Cateté.

1.5.5.2.1.2 - Complexo Xingu

Na concepção original de (Silva *et al.* 1974), o Complexo Xingu incluía corpos gnáissico-migmatíticos, diversos tipos de granulitos e granitoides, além de rochas supracrustais, que se estendia desde o rio Xingu, no Domínio Bacajá, até o Sudeste do Pará, no Domínio Rio Maria. É considerado pela maioria dos autores como o embasamento regional das sequências metavulcanossedimentares (Costa *et al.* 1995). Todavia, o avanço da cartografia geológica vem provocando a diferenciação do Complexo Xingu em novas unidades geológicas. Nos domínios Bacajá e Santana do Araguaia, novos dados Pb-Pb, U-Pb e Sm-Nd (Macambira *et al.* 2002) e trabalhos de mapeamento realizados em Vasquez & Rosa-Costa (2008) propiciaram a individualização de novas unidades e o Complexo Xingu, restrito ao Domínio Carajás, passa a incorporar somente o embasamento mesoarqueano, composto por ortognaisses e migmatitos associados, fortemente bimodais (ricos em ortoanfibolitos), que foram embasamento ou encaixantes das sequências de *greenstone belts* e granitoides neoarqueanos do Domínio Carajás. Idades de 2.85 Ga (U-Pb em zircão) são interpretadas como relacionadas ao último evento de migmatização que afetou a região (Machado *et al.* 1991).

1.5.5.2.1.3 - Diopsídio Norito Pium

Nova unidade (restrita às cercanias do rio homônimo) representada por um corpo batolítico, alongado na direção regional E-W, caracterizada por rochas gabroicas diversas (noritos, gabronoritos, hornblenda gabronoritos e hornblenda gabros), maciças a foliadas, incluindo as variedades ricas em quartzo (Vasquez & Rosa-Costa, 2008). O caráter ígneo é respaldado pelos frequentes intercrescimentos entre clinopiroxênio e ortopiroxênio, bem como piroxênios com maclamento primário. A presença de diopsídio, de hornblenda titanífera, castanho esverdeada, e de titano-biotita avermelhada caracteriza o ambiente crustal profundo de cristalização deste corpo. Segundo os autores, a idade desses gabros é ainda incerta. Pidgeon *et al.* (2000) estabeleceram numa rocha metamórfica de composição enderbítica da área-tipo Pium, uma idade de cristalização magmática de 3002 ± 14 Ma, através do método U-Pb SHRIMP em zircão, e outra do metamorfismo granulítico de 2859 ± 9 Ma, obtida nas bordas do mineral.

1.5.5.2.2 - Greenstone Belts

A Serra dos Carajás é constituída de dois conjuntos rochosos maiores, sendo um conjunto metavulcanossedimentar e outro metassedimentar, que compõem o Supergrupo Itacaiúnas (DOCEGEO 1988). O Supergrupo Itacaiúnas agrupa os grupos Igarapé Bahia, e Grão Pará na porção sul, em fácies metamórfica xisto verde, e grupos Igarapé Salobo e Igarapé Pojuca em fácies metamórfica anfibolito na porção Norte da Província. Estes grupos foram assim caracterizados em função da posição geográfica dos depósitos homônimos, descritas em igarapés que cortam a região. O Grupo Buritirama é englobado no Supergrupo Itacaiúnas DOCEGEO (1988). O Grupo Rio Novo foi descrito inicialmente por Hirata *et al.* (1982) como a seqüência metavulcano-sedimentar que aflora na região de Serra Pelada, extremo Nordeste do Domínio Carajás. Após novos estudos, Araújo e Maia (1991), sugeriram a possibilidade de se tratar de um terreno granito-*greenstone*, caracterizado uma seqüência supracrustal de natureza vulcanossedimentar, metamorfisada em fácies xisto-verde, contendo formações ferríferas, xistos, anfibolitos, rochas máficas e ultramáficas.

Ainda não há consenso sobre a posição estratigráfica dos grupos Grão Pará, Igarapé Salobo, Igarapé Pojuca e Igarapé Bahia. Dados geocronológicos indicam a existência de dois eventos vulcanossedimentares principais (Santos, 2003), o mais antigo gerado por volta de 2,76 Ga (grupos Grão Pará e Igarapé Salobo) e o mais novo entre 2,73 e 2,75 Ga (grupos Pojuca e Igarapé Bahia). Cristais de zircão contidos em anfibolitos do Grupo Igarapé Pojuca foram datados em 2.732 ± 3 Ma (U-Pb) Machado *et al.* (1991), esse valor sugere que o Grupo Igarapé Pojuca é entre 22 e 35 Ma mais jovem que os grupos Grão Pará e Igarapé Salobo. Uma seqüência de sedimentos psamo-pelíticos, contendo grauvacas, arenitos, siltitos e conglomerados recobrem o Grupo Grão Pará, definida por Araújo & Maia (1991) como Formação Águas Claras.

Essas sequências foram heterogeneamente afetadas por diversos processos geológicos (deformação, alteração hidrotermal, metamorfismo regional e/ou de contato) que dificultam a compreensão da evolução geológica das mesmas (DOCEGEO 1988). Associações toleífticas geradas em ambientes de rift continental ou arcos vulcânicos (Gibbs *et al.* 1986, Docegeo 1988, Silva *et al.* 2005) ou cálcio-alcálicas geradas em arcos magmáticos têm sido propostas para estas sequências (Meirelles e Dardenne 1991, Lindenmayer & Fyfe, 1992, Lobato *et al.* 2005). Em nova proposta, Zucchetti (2007) propõe um modelo que abrange as duas assinaturas, em que os metabasaltos do Grupo Grão-Pará possuem características geoquímicas de arco continental, extravasado sobre crosta continental atenuada em ambiente de retroarco.

O Grupo Grão-Pará (Beisiegel *et al.* 1973) é formado por rochas vulcânicas máficas a félsicas com intercalações de formações ferríferas e rochas clásticas (DOCEGEO 1988) se destaca por apresentar os expressivos depósitos de ferro de Carajás, incluindo o Depósito N1. O grau metamórfico é de fácies xisto verde baixo a muito baixo (Meireles *et al.* 1984). Em relação ao ambiente tectônico, alguns autores admitem a evolução ligada a ambiente de rift continental (Gibbs, *et al.*, 1986), DOCEGEO (1988). Já Zucchetti (2007) aponta que os metabasaltos têm afinidade magmática cálcio-alcálica, características geoquímicas de arco continental e assinatura de zona de subducção.

O Grupo Grão-Pará é subdividido em quatro formações, da base para o topo:

a) Formação Parauapebas (Meireles *et al.*, 1984): é representada pelas rochas máficas verdes hidrotermalmente alteradas (*greenstones*), com de basaltos, traquiandesitos e, em menor quantidade, riolitos, contribuições piroclásticas de natureza básica a intermediária. Resende & Barbosa (1972) descrevem a preservação de estruturas vulcânicas típicas, observadas nestas sequências, em galerias e testemunhos de sondagem em locais onde a deformação não é muito intensa.

b) Formação Carajás (Resende & Barbosa, 1972): ocorre acima da unidade anterior, constituída principalmente por formação ferrífera; geradora de todos os corpos de minério enriquecido da Serra dos Carajás. Caracteriza-se por rochas laminadas, constituídas de quartzo, martita e secundariamente, magnetita. Diques e soleiras de rochas máficas cortam esta unidade, e principalmente o minério de ferro exposto, em várias galerias e furos de sondagem. Ocorrem também numerosas intercalações lateríticas nos corpos de minério de algumas áreas, interpretadas por analogia, como soleiras de rocha máfica.

c) Sequência Paleovulcânica Superior (Gibbs *et al.*, 1986): esta unidade apresenta controvérsias em relação aos litotipos que a compõem, sendo caracterizado como constituída por tufos, siltitos tufáceos, filitos, cherts, grauvacas e, subordinadamente, derrames máficos. Outros autores discordam dela como unidade pertencente ao Grupo Grão Pará (Meirelles, 1986, Lindenmayer *et al.*, 2001), considerando que as relações de topo e base das rochas vulcânicas com os jaspilitos como de caráter estrutural. Teixeira *et al.* (1997) considera somente as formações Parauapebas e Carajás como

pertencentes ao Grupo Grão Pará; e correlacionam a seqüência vulcanossedimentar superior ao Grupo Igarapé Bahia, posicionada acima do Grupo Grão Pará.

1.5.5.2.3 – Granitos de Alto K

Contemporâneo à formação dos *greenstone belts* Neoarqueanos, foi gerado um intenso magmatismo granítico subalcalino tipo A e cálcio-alcálico, de posicionamento sintectônico, em 2,76-2,73 Ga, designados de Complexo Granítico Estrela (Barros, *et al.* 2001), granitos Plaquê (Araújo *et al.*, 1988), Planalto (Huhn *et al.*, 1988), Serra do Rabo (Sardinha, 2002) e Igarapé Gelado (Barbosa, 2004), além do Diorito Cristalino (Huhn *et al.*, 1988), os quais constituem a associação dos Granitos de Alto K Neoarqueanos. À exceção do Granito Planalto, os demais se apresentam alongados segundo a direção E-W. Outros corpos incluídos nesta associação são de granitos foliados, tardios, de 2,57-2,56 Ga, conhecido como Granito Velho Salobo (Lindenmayer & Fyfe 1992) (2,57 Ga) de assinatura moderadamente alcalina. Descrições mais detalhadas destes granitos encontram-se em Vasquez & Rosa-Costa (2008).

1.5.5.2.4 – Magmatismo Máfico-Ultramáfico

O Complexo Luanga (DOCEGEO, 1988), localizado nas proximidades da Serra Pelada, é constituído por rochas máficas-ultramáficas que truncam as supracrustais do Supergrupo Itacaiúnas. A composição se dá principalmente por dunitos, peridotitos, noritos e gabros, deformados e metamorfisados em condições de baixo a médio grau. A idade de 2.76 Ga é entendida como a de sua colocação, obtida por Machado *et al.* (1991) em cristais de zircão. A Suíte Intrusiva Cateté (2,38 Ga) marca o início do Paleoproterozóico no Domínio Carajás e é representado pela expressiva formação de corpos máficoultramáficos acamadados.

1.5.5.2.5– Cobertura Sedimentar

Nogueira *et al.* (1995) individualizam a Formação Águas Claras em duas unidades litoestratigráficas com contato gradacional. O Membro Inferior é constituído por siltitos, pelitos e arenitos muito finos subordinados, com estruturas tipo laminação plano-paralela, estratificação cruzada *hummocky*, marcas onduladas e de sobrecarga, distribuídos em sete litofácies, relacionadas a uma plataforma marinha influenciada por tempestades. O Membro Superior é constituído por arenitos finos a grossos e subordinados, ortoconglomerados e pelitos com estratificação do tipo plano-paralela, cruzada acanalada, *hummocky* e tabular, que constituem 14 litofácies, interpretadas como depósitos litorâneos (parte inferior) e fluviais entrelaçados (parte superior).

1.5.5.2.6– Magmatismo Félsico Intracontinental

A Suíte Intrusiva Serra dos Carajás (1,88-1,87 Ga) representa a associação das Suítes Plutônicas Alcalinas Intracontinentais no Domínio Carajás. Dall'Agnol *et al.* (2005) propuseram a

Suíte Granítica Serra dos Carajás para englobar corpos graníticos com características geoquímicas de granitos tipo-A, aqui representados pelos granitos Serra dos Carajás, Cigano, Pojuca e Rio Branco.

Os magmas geradores desta suíte, segundo Dall’Agnol *et al.* (2005), são provavelmente rochas quartzo-feldspáticas. Os corpos graníticos formaram-se em 1,88 Ga (Tallarico *et al.* 2004, 2005), num regime tectônico extensional interpretado por Dall’Agnol *et al.* (2005) como relacionado a um evento continental que marcou o início da quebra do continente paleoproterozóico formado no final do Ciclo Transamazonas. Estes corpos intrudem rochas do embasamento, das seqüências metavulcano-sedimentares, granitoides e rochas sedimentares arqueanas. Apresentam diâmetro/comprimento maior variando entre 7 e 22 km, e possuem formas geralmente elípticas, com o Granito Serra dos Carajás possuindo leve orientação para nordeste. Em termos de assinatura aerogeofísica, nos mapas aerogamaespectométricos são marcados por anomalias radiométricas expressivas. As unidades descritas anteriormente encontram-se dispostas no mapa da figura 1.19.

1.5.5.3 – Geologia Estrutural

A estruturação geral do Domínio Carajás é marcada por feixes de estruturas E-W e WNW-ESE, formando o Cinturão de Cisalhamento Itacaiúnas, implantado desde o Mesoarqueano (Araújo & Maia 1991). Reativações regionais rúpteis no Neoarqueano desenvolveram os sistemas transcorrentes Carajás e Cinzento, com movimentação transcorrente e cinemática predominante sinistral, de caráter rúptil-dúctil, na porção Norte (Pinheiro & Holdsworth, 2000), enquanto a porção Sul é controlada por um sistema compressivo, com leques imbricados de cavalgamentos oblíquos dúcteis (Araújo & Maia 1991, Costa *et al.* 1995). Formas sigmoidais formam a mais proeminente feição destes sistemas transcorrentes. A estruturação das rochas ao longo do Sistema Transcorrente Carajás foi originalmente reconhecida como um sinclínório com eixo caindo para E e W, cortado longitudinalmente pela Falha Carajás (Meiros *et al.* 1984).

Segundo Pinheiro & Holdsworth (2000) a deformação associada à falha Carajás ocorre em níveis crustais relativamente rasos (< 5 km), e sua orientação seria controlada pela trama dúctil das rochas do embasamento. O domínio setentrional da falha contém corpos de minério de ferro dobrados, falhados e rotacionados na Serra Norte. Várias ramificações lítricas do tipo *splay* de orientação aproximada N-S controlam o posicionamento desses corpos. O domínio meridional na região da Serra Sul inclui corpos de minério com mergulho para norte.

Com relação à evolução tectonoestratigráfica da Província Mineral de Carajás, destacam-se os modelos propostos por Araújo & Maia (1991), Pinheiro & Holdsworth (2000). Embora existam diversas divergências entre estes autores, as propostas são bastante semelhantes, com uma evolução marcada por sistemas de falhas transcorrentes onde predominaram movimentações oblíquas, ora transtensivas ora transpressivas.

MAPA LITOESTRUTURAL - PROVÍNCIA MINERAL DE CARAJÁS

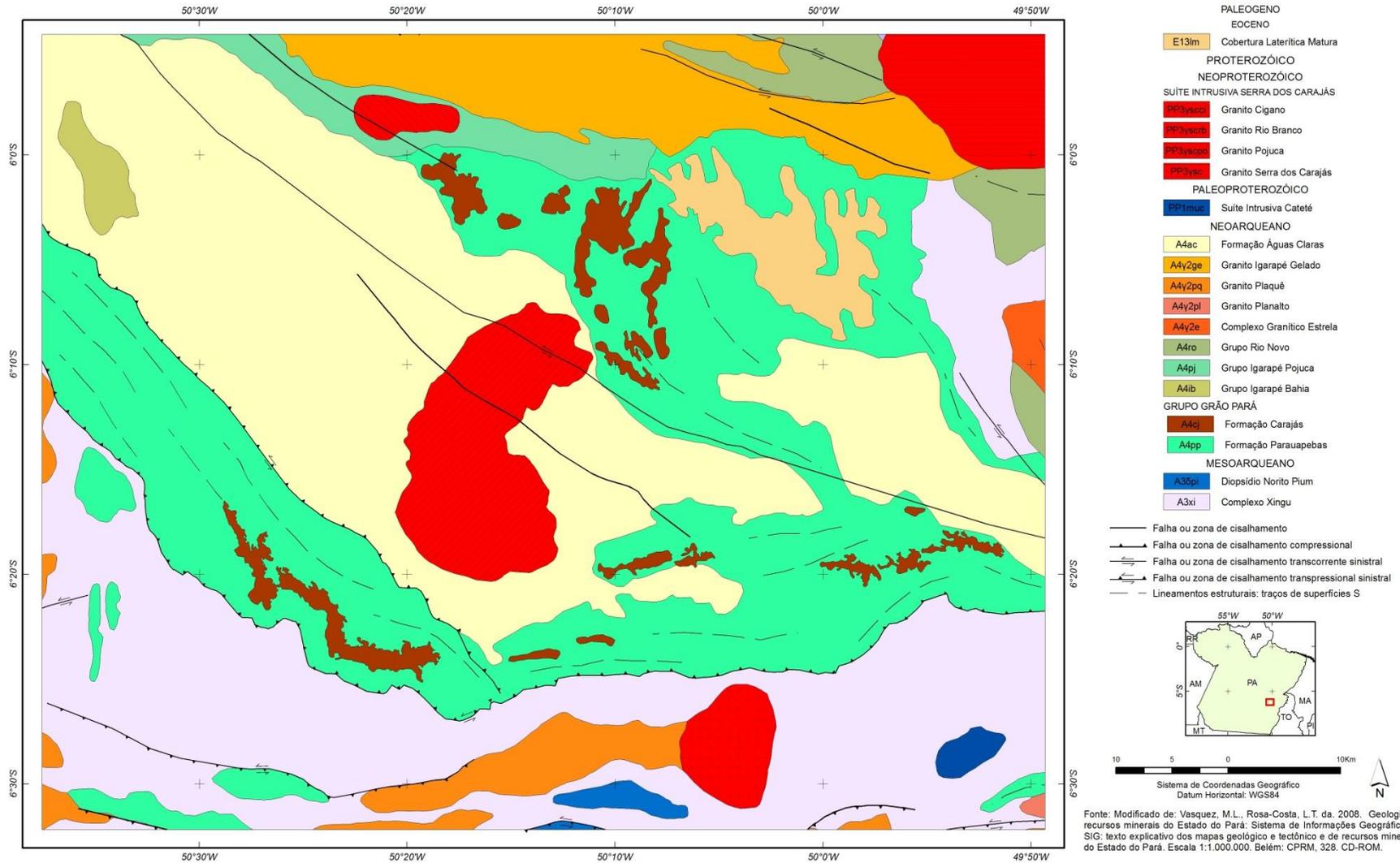


Figura 1.19 - Mapa geológico da Província Mineral de Carajás. Fonte: (Vasquez & Rosa-Costa, 2008).

Araújo & Maia (1991), sugerem um modelo tectônico em flor positiva, desenvolvido por transpressão, onde o embasamento seria formado por rochas granulíticas do Complexo Xingu (2.8 Ga, U/Pb em zircão, Machado *et al.* 1991), além de granitos estratóides (Suite Granítica Plaque) e o Gnaiss Estrela (2.5 Ga, Rb/Sr, Barros 1991). De acordo com o modelo proposto, esses conjuntos litológicos teriam sido envolvidos em um episódio transtensivo destal arqueano responsável pelo desenvolvimento de bacias isoladas controladas pela geometria anastomosada dos lineamentos principais. Cada bacia seria preenchida por depósitos vulcânicos e/ou sedimentares de forma independente. Na bacia de Carajás, em particular, teriam sido depositadas as rochas dos grupos Grão Pará e Igarapé Pojuca e da Formação Rio Fresco, anteriormente descritas em DOCEGEO (1988). Ao longo do Sistema Transcorrente Cinzento teriam se instalado rochas vulcânicas e rochas sedimentares elásticas, bem como formações ferríferas, associadas ao Grupo Igarapé Salobo.

Pinheiro (1997) propõe um modelo baseado a uma evolução litoestratigráfica ligada à vários episódios de reativação e representados pelas principais *fabrics* dúcteis das rochas do embasamento. A região apresenta evidências de um episódio inicial de natureza sinistral ductil (geração de *fabric* milonítico nas rochas do embasamento), seguida por, no mínimo, três episódios posteriores de deformações rúpteis, responsáveis pelo desenvolvimento das principais feições estruturais e tectônicas observadas em imagens orbitais. Estes lineamentos estruturais maiores incluem o Sistema Cinzento de Transcorrência e a Falha de Carajás. O primeiro episódio de deformação rúptil foi de natureza destal e teria sido o responsável pelo desenvolvimento da estrutura sigmoidal observada na região de Carajás, preservando parte das seqüências vulcano-sedimentares. Um evento tardio, de natureza transpressional e sinistral, seria o responsável pela inversão tectônica, afetando as rochas ao longo da Falha de Carajás. Eventos menores e posteriores estariam relacionados com a reativação observada no Sistema da Falha de Carajás. A intrusão do Granito Central estaria relacionada com esforços regionais extensionais.

Veneziani *et al.* (2004) propõem um modelo tectonoestratigráfico de evolução para a Província Mineral de Carajás com base em imagens de sensoriamento remoto, dados aerogeofísicos e trabalhos de campo. As principais fases de deformação ao longo do Cinturão Itacaiúnas propostas pelos autores são:

(i) Tanspressiva Sinistral, com direção principal WNW-ESE e vergência de NE para SW e o desenvolvimento de zonas de cisalhamento dúcteis, que afetou os granitoides Plaquê e as rochas dos Igarapé Pojuca e Igarapé Salobo;

(ii) Transpressiva Oblíqua, orientada em torno de WNW-ESSE e vergência de NNW para SSE, com desenvolvimento de zonas de cisalhamento dúcteis a rúpteis-dúcteis, que afetou as rochas dos Grupos Rio Novo e Grão Pará;

(iii) Transpressiva rúptil, com direção principal orientada em torno de N70W e vergência de NE para SW, atuante nas rochas do Granito Central e granitos anorogênicos.

Rosière *et al.* (2006) apresentaram uma nova proposta de evolução geológica para a região de Carajás. Segundo os autores as características geométricas e cinemáticas das estruturas tectônicas na Província de Carajás indicam uma evolução associada a um encurtamento regional (compressão), de direção aproximadamente NE-SW. O primeiro evento principal que afetou a região é associado a uma tectônica compressiva oblíqua. Esse evento foi responsável por dobramento com sistema de eixo com caimento moderado para WNW das diferentes seqüências vulcanossedimentares na província, que originalmente teriam uma estruturação (*strike*) NE-SW. Um segundo evento deformacional é caracterizado por uma tectônica transcorrente, registrado em diversas fraturas, falhas, lineamentos regionais de orientação E-W e em uma clivagem discordante ao bandamento composicional nas rochas metassedimentares, e do bandamento ígneo nos plútons. Este evento é consequência da acomodação da deformação por cisalhamento puro do primeiro evento por escape lateral. Esse tectonismo seria responsável pelos fortes contrastes no grau metamórfico em escala local a subregional, e poderia corresponder à tectônica transcorrente definida por Pinheiro & Holdsworth (1997). Durante os dois eventos, possivelmente resultados de uma deformação progressiva, as seqüências vulcanossedimentares experimentaram deformação regional em condições dúcteis-rúpteis a rúpteis, com exceção das proximidades dos granitos sintectônicos ou dos domos estruturais, onde a temperatura relativamente mais elevada permitiu o desenvolvimento de estruturas dúcteis.

1.5.5.4 Geologia de detalhe e de superfície

A seqüência químico-vulcânica denominada Grupo Grão Pará (Beisiegel *et al.*, 1973), destaca-se por hospedar os depósitos de ferro da Serra dos Carajás, incluindo a jazida de N1. As rochas associadas a esta seqüência são divididas em três unidades (Figura 1.20), originalmente descritas como:

Seqüência Paleovulcânica Inferior – representada por rochas vulcânicas máficas, hidrotermalmente alteradas e com feições primárias preservadas, tais como amígdalas e textura intergranular. As estruturas primárias sugerem a ocorrência de vários derrames e contribuições piroclásticas, que formam um corpo estratiforme em contato concordante com a Formação Carajás acima.

Formação Carajás – formada por formações ferríferas bandadas e seus produtos de alteração, ocorre na forma tabular entre as rochas máficas. Quando observados, quase todos os contatos estratigráficos são concordantes. A Formação Carajás tem espessura média de 200-250 m na Serra Norte e acima de 300 m na Serra Sul e é cortada por diques e soleiras de rochas máficas.

Seqüência Paleovulcânica Superior – formada por rochas vulcânicas básicas semelhantes àquelas da Seqüência Paleovulcânica Inferior, das quais se diferencia por intercalações lenticulares de formação ferrífera.

Resende & Barbosa (1972) consideram o material da superfície em N1 como canga, isto é, material limonítico, pobre em fragmentos detríticos, com ocorrência escassa de blocos de itabirito e hematita. E em função dos efeitos mecânicos e químicos do intemperismo, apresentam um mapa das coberturas superficiais com três tipos de canga: estrutural, química e de minério (Figura 1.20), cujas características são:

a) Canga: muitas vezes designada de canga estrutural, trata-se de uma canga formada *in situ*, onde os blocos envolvidos por limonita resultam da penetração desta ao longo de planos estruturais, com presença ocasional de dobras (Figura 1.21-C). Não há ocorrência de quartzo visível, sendo muito confundida com a categoria de minério designada de hematita semi-dura. A vegetação associada é do tipo arbustiva.

b) Canga de minério: esta canga ocorre adjacente aos minérios de ferro *in situ*, nos flancos de colinas como um bom indicador de localização dos corpos de minério. É formada por blocos de minério constituídos por hematita e em menor proporção especularita, com dimensões milimétricas a centimétricas, rolados e posteriormente cimentados por óxidos hidratados de ferro, precipitados quimicamente e com pouco material argiloso (Figura 1.21-B).

c) Canga química: designada de canga no mapa da Figura 3.11, a qual ocorre nas áreas mais baixas e próximas às bordas do platô, associada à vegetação de gramíneas. Uma característica marcante desta canga é a nítida diminuição de ferro na forma de fragmentos de hematita e ocorrência de pisólitos de dimensões milimétricas (Figura 1.21-D), com cimento constituído por goethita ou limonita, de aspecto vítreo a terroso.

Além destes tipos de canga, ocorre em N1, minério de ferro propriamente dito, sob a forma de hematita semi-dura (HSD), (Figura 1.21-A), conforme classificação dos tipos de minério encontrados nas jazidas da Serra dos Carajás, descrita em Resende & Barbosa (1972). A HSD, designada como hematita no mapa da Figura 1.20, caracteriza-se pela ocorrência nos topos sobressalentes dos morros, associada à vegetação de gramíneas, dispostos no relevo plano ondulado dos platôs da Serra dos Carajás. Sua composição é influenciada pela posição, geralmente superficial ou quase superficial. Em superfície, é marcada por um bandamento mineralógico constituído por: a) palhetas microscópicas de especularita e cristais maiores de martita com inclusões de magnetita ou de um mineral da série martita-maghemita, b) goethita fibrosa e limonita terrosa amarela, que podem predominar nas partes mais superficiais dos corpos de minério. Em subsuperfície, ocorre logo abaixo de uma crosta de canga, mas em profundidade, geralmente cede lugar a outros tipos de minério.

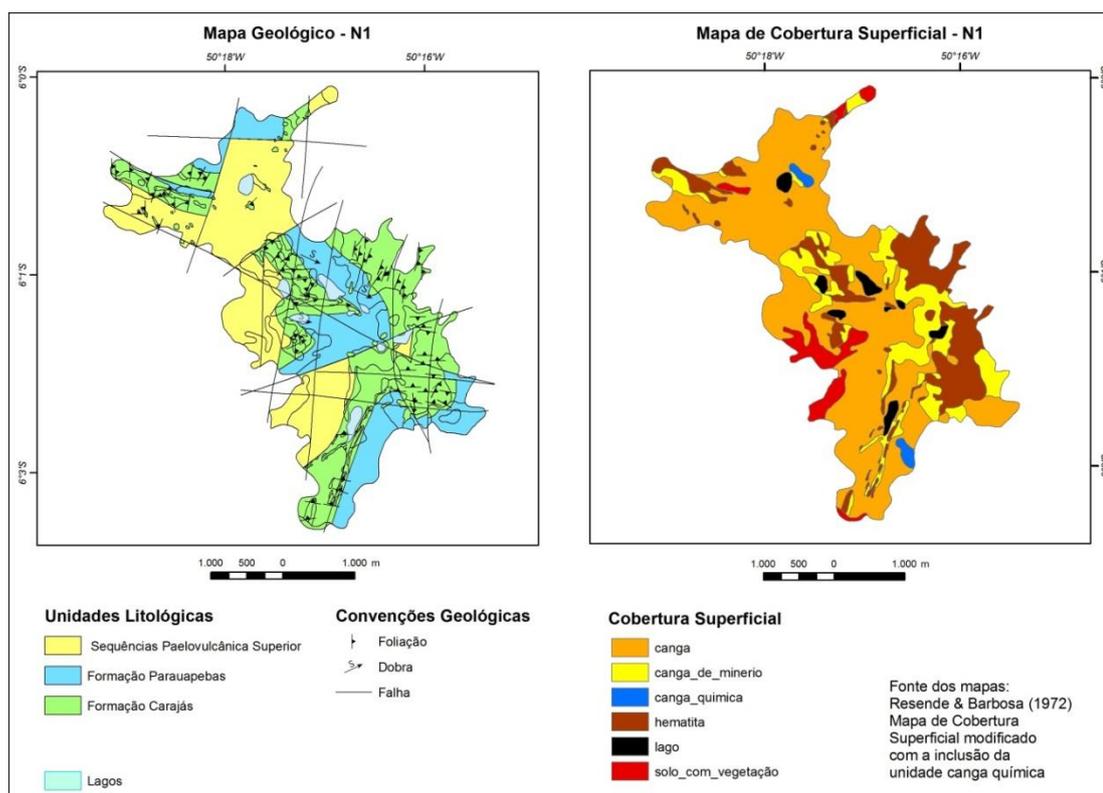


Figura 1.20- Mapas Geológico de Cobertura Superficial de N1. Fonte: Resende & Barbosa (1972).

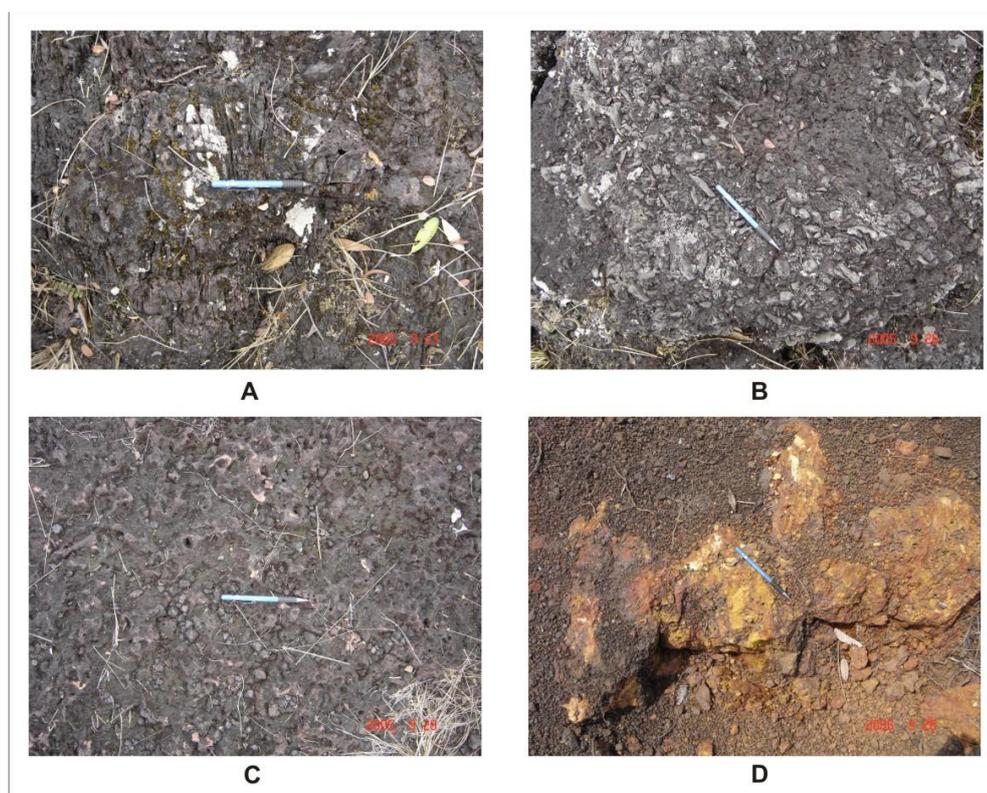


Figura 1.21 – Tipos de crostas: A) Hematita, B) Canga de minério, C) Canga e D) Canga Química. Fonte: org. Moraes (2012)

Em relação às dobras e fraturas encontradas nas formações ferríferas, e frequentemente observadas na canga estrutural, Pinheiro (1997), em estudo realizado em N4, ressalta que estas feições não são originadas de eventos tectônicos formados durante a milonitização e o metamorfismo. Isto se sustenta com o bandamento primário original citado pelo autor e também com os estudos metamórficos das formações ferríferas, que sugerem na maior parte, fácies de xisto verde de grau mais baixo destas rochas, se os efeitos de alteração hidrotermal são ignorados. Além disso, texturas de recristalização dinâmicas pervasivas, típicas de milonitos, não são observadas em lâminas delgadas. Segundo o autor, a maior parte das deformações que afetam as formações ferríferas podem ser atribuídas a um único episódio de dobramentos rúptil-dúctil em todas as escalas.

Em outra proposta de mapeamento superficial em N1, apresentada por Araújo (1994), descreve a cobertura superficial de N1 como crostas lateríticas, dividindo-as em: estratificada, pisolítica e cavernosa, além de solo. Esta subdivisão corresponde, respectivamente, às cangas estrutural, química e de minério referentes ao trabalho de Resende & Barbosa (1972). Segundo Araújo (1994), estas crostas são constituídas predominantemente por hematita e goethita, apresentam propriedades texturais (mineralógicas) distintas e estão associadas às formações ferríferas da Formação Parauapebas do Grupo Grão Pará.

Araújo (1994), em trabalho realizado nas crostas e nos solos lateríticos da Amazônia Oriental, visando um estudo da dispersão multielementar destes tipos de materiais, caracteriza os aspectos mineralógicos e geoquímicos de N1. Os resultados obtidos pelo autor mostram que as crostas são fundamentalmente constituídas de SiO_2 (77,19 %) e de Al_2O_3 (12,53 %). A crosta estratificada é a mais rica em Fe_2O_3 (82,79 % em peso), mas com baixos teores de Al_2O_3 (7,66 % em peso), de SiO_2 (0,76 % em peso) e de TiO_2 (1,16 % em peso). As crostas cavernosa e pisolítica apresentam composições químicas semelhantes, com teores de Al_2O_3 mais elevados na cavernosa.

Com base nas diferenças texturais, mineralógicas e químicas entre os três tipos de crosta, o autor supracitado ressalta que elas originaram de rochas químico-mineralógicas parcialmente diferentes entre si. Além disso, observa que as crostas cavernosa e pisolítica devem ter se originado de rochas-mãe mais aluminosas ou dos fácies aluminossilicatados das formações ferríferas. Analisa ainda que as texturas cavernosa e pisolítica expressam uma maior troca e percolação de soluções em função da lixiviação química favorecida pela presença de materiais mais solúveis das rochas pré-existentes.

1.5.5.5 Mineralização de ferro da Província Mineral Carajás

Os depósitos de minério de ferro da Serra dos Carajás foram descobertos em agosto de 1967 por geólogos da Companhia Meridional de Mineração (CMM), uma subsidiária da companhia *United States Steel* (USS). Em 1970 foi iniciado um intenso programa de pesquisa mineral em dezoito áreas requeridas pela CVRD e CMM, comprovando a existência de grandes reservas de minério de ferro de alto teor na região da Serra dos Carajás, cujos mapeamentos em escala de detalhe foram realizados por

Resende &Barbosa (1972). Os estudos de viabilidade econômica levaram à escolha da jazida N4 para início de lavra, sendo os trabalhos de pesquisas posteriores concentrados nesse local. Em setembro de 1974 a Amazônia Mineração S/A (AMSA), empresa criada através de uma *joint venture* entre a CVRD e a CMM, obteve os direitos minerários das áreas e em 1977 a CVRD adquiriu as ações pertencentes à USS, tornando-se a única detentora dos direitos de pesquisa e exploração da área.

Os depósitos de ferro da Formação Carajás estão entre os maiores do mundo, com reservas de 17,3 bilhões de toneladas e com teor > 64% de ferro (Lobato *et al.* 2005). Estudos detalhados sobre a caracterização do minério de ferro em Carajás são escassos, destacando-se Guedes *et al.* (2002), Macambira & Schrank (2002), Lobato *et al.* (2005), Rosière *et al.* (2006). Segundo estes autores, as principais formações ferríferas bandadas são jaspelitos e, secundariamente, formação ferrífera com bandas alternadas de óxidos de ferro e chert.

Na Serra Norte, os depósitos correspondem a nove corpos (N1 a N9) com espessura aproximada de 250 a 300 metros e comprimento variando de centenas de metros a dezenas de quilômetros. O minério hematítico ocorre como corpos friáveis de formato tabular a lenticular e irregular que envolve lentes de corpos de minério duro, ambos inclusos em jaspilito. A ocorrência de diques e *sills* de rocha máfica (diabásio) é comum, com espessura de até algumas dezenas de centímetros, intercalados no minério. Os minérios de alto teor podem ser do tipo hematita mole-macia (HM) e do tipo duro e compacto (HD).

Os minérios tipo HD possuem teor maior que 64% de ferro, apresentam forma tabular e lenticular com espessura de até 50 m, em contato abrupto e gradacional, com rocha máfica da base. Pode apresentar bandamento original do jaspilito preservado, definido por níveis compactos alternado por níveis porosos ou brechados (Rosière *et al.*, 2006). Esses minérios também podem ser maciços, com trama original totalmente destruída, compostos por agregados de cristais de hematita. Os minérios de alto teor do tipo mole-macio-HM, caracterizam-se por teores médios de 64%, com ocorrência comumente bandados, localmente exibindo planos de laminação primária. Podem alcançar até 350 m de espessura e conter os seguintes contaminantes: alumínio, manganês e fósforo.

Em relação à gênese, Tolbert *et al.* (1971) sustentam que o minério de ferro formou-se pela lixiviação da sílica das formações ferríferas por águas meteóricas, que resultou no enriquecimento residual dos óxidos de ferro e na formação dos atuais corpos de minério. Beisiegel *et al.* (1973) propõem uma origem hipogênica para a hematita compacta com substituição metassomática do quartzo, baseados na associação de lentes de hematita compacta com diques de rocha básica, sugerindo que a ação magmática forneceu calor ao processo metassomático; nas áreas com controle estrutural, onde a deformação foi mais intensa, o calor necessário teria resultado de deformação tectônica. Para os minérios friáveis, os autores propõem o enriquecimento supergênico. Uma origem

supergênica também é defendida por Dardenne e Schobbenhaus (2001), para os quais o minério formou-se pela atuação dos mecanismos de alteração laterítica que provocaram dessilicificação (lixiviação supergênica da sílica) dos jaspilitos e uma concentração residual da hematita.

Para Guedes *et al.* (2002), a gênese do minério está associada à dolomitização hidrotermal com desenvolvimento contemporâneo de magnetita. A precipitação de dolomita e outros carbonatos teria substituído o *chert* original e produzido minérios dolomíticos; os corpos relativamente pequenos de minério compacto sendo, provavelmente, o produto final da remoção do *chert* da formação ferrífera. Um intenso intemperismo tropical posterior promoveu a lixiviação de carbonato tanto da formação ferrífera quanto do minério, resultando no desenvolvimento do minério friável a partir da concentração residual de hematita. Um segundo estágio de dolomitização, sob maiores pressões de fluido, teria precipitado os carbonatos em veios e produziu a formação localizada de brechas.

Segundo Klein & Ladeira (2002), a presença de anomalias positivas de Eu nas formações ferríferas de Carajás são interpretadas como resultantes da entrada de fluidos hidrotermais suboceânicos, considerados a fonte de ferro e SiO₂. Para Lobato *et al.* (2005), a mineralização de ferro se desenvolveu no Paleoproterozóico sobre rochas exumadas da seqüência metavulcanossedimentar arqueana. A configuração estrutural arqueana aumentou a permeabilidade das rochas, permitindo o fluxo de fluido mineralizador em ferro e o desenvolvimento diferenciado de corpos de alto teor.

Zucchetti (2007) propõe modelo caracterizado por um sistema hidrotermal ígneo, relativamente raso com composição um único fluido mineralizador em ferro, predominantemente rico em H₂O-Fe-CO₂, relativamente redutor e mais quente que as rochas encaixantes. O fluido continha espécies como S±U±Au e interagiu com as rochas encaixantes ao longo de canais de fluxo de fluido em regime de deformação rúptil-dúctil, em condições crustais epitermais. Segundo a autora, os depósitos de ferro de Carajás poderiam representar um membro de baixa temperatura do sistema hidrotermal óxidos de ferro-cobre-ouro (*iron oxide-copper-gold deposits-IOCG*) da província, envolvendo fluidos de origem ígnea, como também, possivelmente, de origem meteórica.

1.6– MATERIAIS E MÉTODOS

Os procedimentos metodológicos utilizados durante a pesquisa são descritos a seguir juntamente com os materiais utilizados. A abordagem das questões ambientais em Carajás, especialmente a fragilidade dos biomas floresta e campos rupestres, aliados à disponibilidade de produtos de sensores remotos de alta e média resolução espacial, com 0,423m e 30m respectivamente, multitemporais, forneceram condições favoráveis para as investigações que subsidiaram a arquitetura de conhecimentos proposta para o depósito de ferro em N1 na fase de implementação de mina a céu aberto. Investigações de campo foram imprescindíveis para validação das informações extraídas das imagens de satélite. A complexidade dos temas envolvidos e suas

relações ficam evidentes na arquitetura proposta, cuja ênfase direciona-se aos biomas mencionados anteriormente.

1.6.1– Materiais

Os materiais utilizados na pesquisa encontram-se sintetizados na Tabela 1.1. As imagens de radar, ópticas e a fotografia aérea utilizadas encontram-se no Anexo 1. A abordagem multisensor e multiresolução permitiu a extração de informações distintas, de forma a ampliar ao máximo a possibilidade de relacionamento entre os temas enfocados na arquitetura. Escalas de semi-detulhe e de detalhe foram imprescindíveis para o tratamento da área de influência em sua abrangência temática.

As imagens de radar provêm do sensor aerotransportado SAR-R99B do SIPAM (Sistema de Proteção da Amazônia), disponibilizado por meio de projeto de pesquisa do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). O CENSIPAM (Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia) dispõe de um estrutura que conta com dados obtidos de quatro sensores aerotransportados à bordo das aeronaves R99-B e R95-B que operam nas faixas de microondas, visível e infravermelho (Figura 1.22). Os sensores a bordo das aeronaves são: o SAR (*Synthetic Aperture Radar*); o hiperespectral HSS (Hiperespectral Scanner System), o multiespectral MSS (*Multiespectral Scanner System*) e o infravermelho OIS (*Optical Infrared Sensor*).

Tabela 1.1– Materiais utilizados.

Dado	Resolução espacial (m)	Aquisição	Bandas
Ortofotografias aéreas	0,423	Jul - 03	3
Landsat/TM5	30 x 30	Ago - 02	1,2,3,4,5,e 7
SAR-R99B	11 x 11	Jun - 05	L
MDE detalhe	1 x 1	Fev - 04	1
MDE - SRTM/NASA	90 x 90	Fev - 02	1

Nesta pesquisa, foram utilizados os dados do SAR-R99B, cujas especificações encontram-se na tabela 1.2. A resolução espacial original das imagens de radar foi degradada de 3 para 11m e as faixas de vôo obtidas sobre Carajás foram mosaicadas, processamentos estes realizados no CENSIPAM. O objetivo desta missão foi simular um radar orbital, o MAPSAR (*Multi-Application Purpose SAR*) em fase de concepção entre Brasil e Alemanha, e avaliar a sua viabilidade em aplicações geológicas na Amazônia. Os sobrevôos realizados em Carajás em banda L foram uma iniciativa conjunta do INPE, IG/UNICAMP e FEMA (MT) e com o apoio da VALE. Mais detalhes

sobre a missão e suas aplicações podem ser encontrados em Schröder *et al.* (2005), Paradella *et al.* (2006), e Mura *et al.* (2009).

Em relação ao dado óptico, uma cena LANDSAT/TM5 (órbita/ponto: 224/064), disponibilizada pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, foi utilizada de forma a fornecer as informações geoambientais de caráter regional. O sensor TM5 utilizado possui sete bandas, numeradas de 1 a 7, das quais foram utilizadas as bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7 com resolução espacial de 30 m, dada a grande aplicabilidade destas para alvos naturais e antropizados (Tabela 1.3). Com uma resolução temporal de 16 dias, cada cena possui uma área de abrangência de 185 x 185 km.

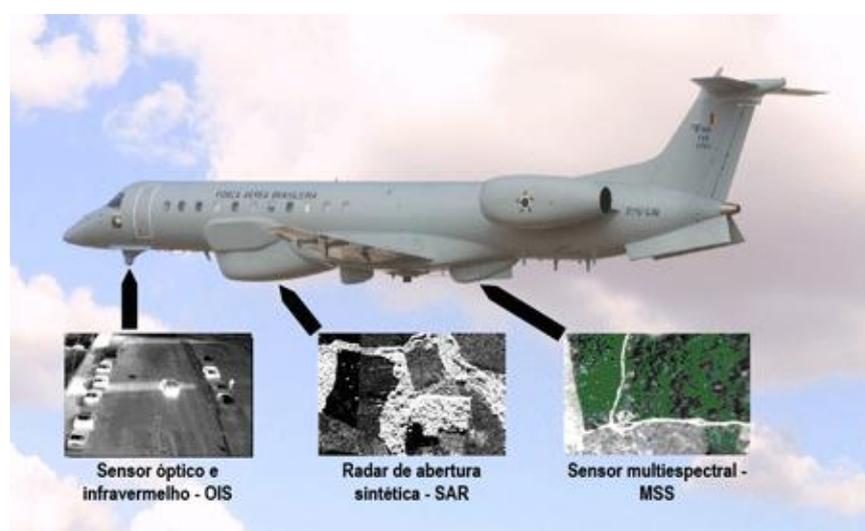


Figura 1.22 – Aeronave R99-B e sensores a bordo. Fonte: <http://www.sipam.gov.br/> (acesso em junho de 2011).

Tabela 1.2– Especificações do SAR-R99B.

Parâmetro	Especificação
Plataforma	EMB -145
Banda	L
Polarização	hh, hv, vv
Data de Aquisição	Junho 2005
Ângulo de Incidência	48/53°
Resolução Espacial	3 x 3m
Quantização	8-bits
Azimute de visada	282°
Largura da faixa	10 a 60Km

Tabela 1.3– Aplicações do satélite LANDSAT/TM5 de acordo com os intervalos espectrais. Fonte: www.inpe.br (acesso em junho de 2011)

Banda	Intervalo espectral (µm)	Principais características e aplicações das bandas TM do LANDSAT 5
1	0,45 - 0,52	Apresenta grande penetração em corpos de água, com elevada transparência, permitindo estudos batimétricos. Sofre absorção pela clorofila e pigmentos fotossintéticos auxiliares (carotenóides). Apresenta sensibilidade a plumas de fumaça oriundas de queimadas ou atividade industrial. Pode apresentar atenuação pela atmosfera.
2	0,52 - 0,60	Apresenta grande sensibilidade à presença de sedimentos em suspensão, possibilitando sua análise em termos de quantidade e qualidade. Boa penetração em corpos de água.
3	0,63 - 0,69	A vegetação verde, densa e uniforme, apresenta grande absorção, ficando escura, permitindo bom contraste entre as áreas ocupadas com vegetação (ex.: solo exposto, estradas e áreas urbanas). Apresenta bom contraste entre diferentes tipos de cobertura vegetal (ex.: campo, cerrado e floresta). Permite análise da variação litológica em regiões com pouca cobertura vegetal. Permite o mapeamento da drenagem através da visualização da mata galeria e entalhe dos cursos dos rios em regiões com pouca cobertura vegetal. É a banda mais utilizada para delimitar a mancha urbana, incluindo identificação de novos loteamentos. Permite a identificação de áreas agrícolas.
4	0,76 - 0,90	Os corpos de água absorvem muita energia nesta banda e ficam escuros, permitindo o mapeamento da rede de drenagem e delineamento de corpos de água. A vegetação verde, densa e uniforme, reflete muita energia nesta banda, aparecendo bem clara nas imagens. Apresenta sensibilidade à rugosidade da copa das florestas (dossel florestal). Apresenta sensibilidade à morfologia do terreno, permitindo a obtenção de informações sobre Geomorfologia, Solos e Geologia. Serve para análise e mapeamento de feições geológicas e estruturais. Serve para separar e mapear áreas ocupadas com pinus e eucalipto. Serve para mapear áreas ocupadas com vegetação que foram queimadas. Permite a visualização de áreas ocupadas com macrófitas aquáticas (ex.: aguapé). Permite a identificação de áreas agrícolas.
5	1,55 - 1,75	Apresenta sensibilidade ao teor de umidade das plantas, servindo para observar estresse na vegetação, causado por desequilíbrio hídrico. Esta banda sofre perturbações em caso de ocorrer excesso de chuva antes da obtenção da cena pelo satélite.
6	1,55 - 1,75	Apresenta sensibilidade aos fenômenos relativos aos contrastes térmicos, servindo para detectar propriedades termais de rochas, solos, vegetação e água.
7	1,55 - 1,75	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.

Informações de altimetria obtidas do Modelo Digital de Elevação (MDE) do levantamento SRTM/NASA foram utilizados para a ortoretificação desta imagem. A acurácia destes modelos foi comprovada em comparações entre modelos SRTM e modelos obtidos por meio de cartas 1:100.000 editadas pela Divisão de Serviço Geográfico (DSG). Os resultados mostraram que os modelos SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) apresentaram melhores resultados altimétricos que os obtidos das cartas. O uso dos modelos SRTM na Amazônia, para áreas com baixa variação de altitude, é pertinente, visando aplicações cartográficas e temáticas, em detrimento ao uso de modelos obtidos a partir de cartas topográficas na escala de 1:100.000 (Santos *et al.*, 2005). Para o relevo montanhoso de

Carajás, Oliveira *et al.* (2008) também encontraram resultados satisfatórios sobre a precisão altimétrica do MDE/SRTM, com padrão classe A para escala 1:100.000.

Curvas topográficas em escala de detalhe e ortofotografias aéreas, fornecidas pela VALE, também foram utilizadas respectivamente para geração de um MDE e do mapa de declividade, com resolução espacial de 1m.

1.6.2– Métodos

Os procedimentos metodológicos desta pesquisa abrangem os seguintes tópicos: revisão bibliográfica, processamento de imagens de sensoriamento remoto, investigações de campo, elaboração da arquitetura de conhecimentos para o depósito de ferro em N1 na fase de implementação de mina a céu aberto.

O processamento digital efetuado nas imagens de radar e ópticas divide-se em três etapas. Na primeira constam os processamentos referentes à integração da imagem LANDSAT/TM5 com as imagens de radar. Estes dados permitiram a extração de informações geoambientais em N1 e seu entorno em escala de semi-detalle (1:100.000) referentes ao uso do solo, tipos de vegetação e suas relações e estados de conservação e preservação. Os processamentos referentes exclusivamente às imagens de radar referem-se à segunda etapa da metodologia, das quais foram extraídas informações referentes às unidades lateríticas em N1 em escala de 1:25.000, suas relações com a vegetação de campos rupestres com as imagens de radar obtidas da banda L. Os dados de detalhe, ortofotografias e modelo digital de elevação forneceram informações em escala 1:10.000 e foram processados na terceira etapa.

A etapa de campo compreendeu o levantamento das características de rugosidade superficial das crostas lateríticas em N1 para a banda-L e o registro das condições de preservação e conservação das áreas de interesse em N1 e seu entorno.

As informações obtidas nas etapas anteriores forneceram suporte para elaboração da arquitetura de conhecimentos proposta para N1 relativa aos aspectos mais impactantes em uma abertura de mina a céu aberto, ou seja, os biomas floresta e campos rupestres. O modelo proposto enfocou as relações entre estes dois temas com outros relacionados, de forma a (i) subsidiar o entendimento dos impactos ambientais em um modelo conceitual inovador de área de influência (Martins Jr., *et al.*, 2008) (ii) fornecer melhor suporte para determinar as relações e impactos envolvidos na gestão ambiental da mineração de forma a prover subsídios para auxílio em decisões em engenharia, bem como dar suporte em projetos de monitoramento (iii) informação x diferentes escalas.

1.6.2.1 – Processamento de imagens de sensoriamento remoto

A integração da imagem óptica com a imagem de radar foi realizada na etapa inicial do processamento das imagens. Na imagem LANDSAT/TM5 foram realizadas a ortorretificação, a Análise por Componentes Principais (ACP) e a integração via IHS/RGB (Mather, 1987). Esta etapa foi realizada com a utilização das imagens de radar do mosaico do SAR-R99B (hh, hv e vv), processadas com a correção radiométrica e a reamostragem de pixel. Todos os processamentos realizados nas imagens ópticas e de radar foram conduzidos através do *software* Geomatica PCI, versão 10.1.3 (PCI, 2011).

Em relação ao Modelo de Elevação do Terreno (MDE) obtido do levantamento SRTM (<http://srtm.usgs.gov/index.php>, acesso em junho de 2007) as inconsistências apresentadas, tais como valores negativos e ausência de informação, foram corrigidas e substituídas por valores consistentes interpolados com base na média de valores de níveis de cinza adjacentes. Posteriormente, uma reamostragem do tamanho do pixel foi realizada, de 90 para 30m, de forma a compatibilizar com a resolução espacial do LANDSAT/TM de 30m. O MDE final foi utilizado, juntamente com pontos de controle de campo, na ortorretificação da imagem LANDSAT/TM5.

Na Análise por Componentes Principais (ACP), utilizaram-se as bandas 1,2,3,4,5 e 7 do LANDSAT/TM, de forma a se obter dois conjuntos; o conjunto das bandas 1,2 e 3 e o conjunto das bandas 5 e 7, eliminando assim toda informação redundante nestas faixas. As bandas TM 1, 2 e 3 tendem a exibir elevada correlação, função dos processos de absorção de energia em pigmentos; as bandas 5 e 7 tendem a apresentar uma maior redundância de informação, controladas espectralmente por absorções vinculadas ao teor de água do tecido foliar. Finalmente, a banda 4 foi utilizada separadamente, por ser útil na determinação do conteúdo da biomassa e no delineamento de corpos d'água (Lillesand e Kiefer, 2000).

A integração de dados de sensoriamento remoto distintos via IHS-RGB tem sido amplamente utilizada para mapeamentos geológicos. Trabalhos de integração de imagens de radar com imagens ópticas e dados auxiliares (geológicos, geofísicos, geoquímicos, etc.) são pioneiros na Província Mineral de Carajás, destacando-se, entre outros, Paradella *et al.* (2000) e Paradella *et al.* (2001).

A figura 1.23 ilustra o processo de integração utilizado com as imagens de radar e as imagens ópticas, onde foram usados como canais de entrada (RGB/IHS): a banda 4 (1), a componente principal 1 (CP-1) das bandas TM 5, 7 (2) e a (CP-1 das bandas TM 1,2 e 3 (3). Na transformação reversa (IHS-RGB) houve a substituição das imagens de SAR-R99B, nas polarizações hh, hv, vh e vv, na intensidade, com a manutenção dos canais de matiz e a saturação por meio de um modelo hexacôneo (Mather, 1987). Este modelo trata-se de uma representação das cores por meio de coordenadas cilíndricas de um hexacôneo. Os matizes são representados por uma posição angular ao longo do topo

do hexacone. A saturação é dada pela distância do eixo vertical à superfície lateral do hexacone e a intensidade é representada pela distância vertical da base ao topo do hexacone. Isto resultou em quatro produtos distintos, a depender da imagem SAR-R99B e sua respectiva polarização.

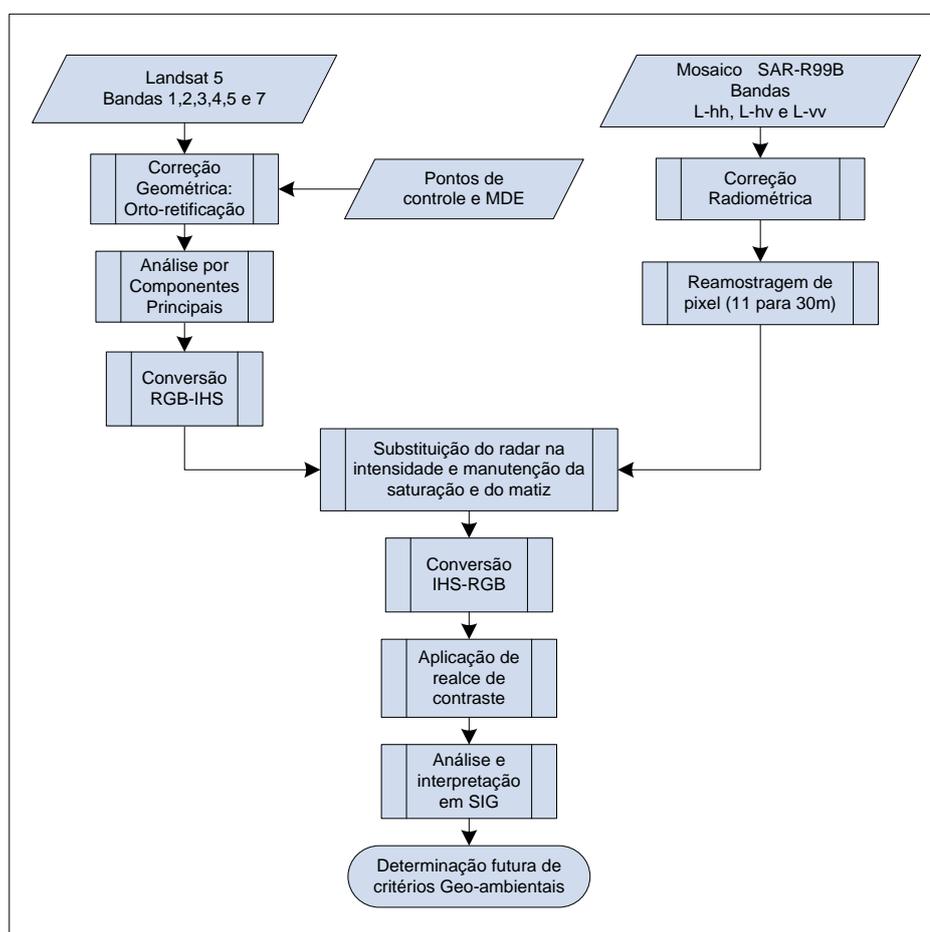


Figura 1.23 – Fluxograma da integração da imagem óptica com as imagens de radar.

As imagens de radar SAR-R99B (L-hh, L-hv e L-vv) substituídas na intensidade foram previamente submetidas à correção radiométrica, com filtragem para atenuação do *speckle*. O filtro *Enhanced Frost*, janela 3 x 3, foi aplicado às três cenas, com as polarizações hh, hv e vv. Em seguida, estas imagens tiveram o pixel reamostrado de 11 para 30m para serem integradas com as imagens ópticas. Esta degradação na resolução espacial dos dados de radar deve-se ao compromisso entre a escala de trabalho ideal para a finalidade desejada e a possibilidade de ortorretificação apenas da imagem óptica.

Os resultados das integrações das imagens ópticas com as imagens de radar foram três produtos integrados, correspondentes às polarizações hh, hv e vv. Estes produtos foram submetidos a um contraste linear e posteriormente analisados e interpretados em um Sistema de Informações Georreferenciadas (SIG), para posterior aplicação em estudos sobre critérios para gestão geo-ambiental do

depósito de N1 e entorno. Para tanto, buscou-se adaptar a metodologia aplicada na Bacia do Rio Paracatu por Martins Jr. *et al.* (2006b), para a área em questão, de forma a compor uma arquitetura de conhecimento para o depósito em vias de ser lavrado, que possa ser aplicado em áreas com contexto geo-ambiental semelhante. Desta forma, foram analisadas as áreas de vegetação de floresta e campos rupestres, as áreas desmatadas, as áreas de mineração e a relação de todas estas variáveis com os aspectos fisiográficos que os produtos de sensoriamento remoto permitiram vislumbrar.

Em relação às imagens de radar, utilizou-se a abordagem estatística para análises de textura de imagens de sensoriamento remoto, devido ao fato de que as imagens possuem texturas estocásticas e a textura é mais facilmente modelada. Este enfoque abrange funções de auto-correlação, transformações ópticas, transformações digitais, quantificação de textura na borda de elementos estruturais, probabilidades de co-ocorrência dos níveis de cinza e modelos auto-regressivos. Estas técnicas são descritas com detalhes em Haralick (1979).

O método de análises de textura em imagens de sensoriamento remoto foi proposto por Haralick *et al.* (1973) utiliza estatísticas da Matriz de Co-ocorrência dos Níveis de Cinza (MCNC) de uma imagem. Também chamadas medidas de segunda ordem, elas descrevem a distribuição dos níveis de cinza de uma região da imagem e apresentam a relação espacial entre os *pixels*. Cada elemento $P(i,j)_{\Delta_x,\Delta_y}$ da matriz de co-ocorrência representa a frequência com que um *pixel* com nível de cinza i e outro com nível de cinza j ocorrem na imagem separados por uma distância de Δ_x colunas e Δ_y linhas.

A MCNC é baseada na suposição de que a informação textural está contida na relação espacial média ou global dos níveis de cinza da imagem. A informação textural pode ser especificada usando matrizes de dependência espacial dos níveis de cinza computados em vários ângulos (0° , 45° , 90° e 135°) e distâncias. Considerando uma imagem retangular com N_x *pixels* na direção horizontal, N_y *pixels* na direção vertical e a quantização espectral em N_g níveis de cinza; denomina-se $L_x = \{1,2,\dots, N_x\}$ o domínio espacial horizontal, $L_y = \{1,2,\dots, N_y\}$, o domínio espacial vertical e $G = \{1,2,\dots, N_g\}$ o conjunto de N_g níveis de cinza quantizados. $L_y \times L_x$ é o conjunto de *pixels* da imagem ordenado pela linha e pela coluna designada. A imagem I pode ser representada como uma função que designa um nível de cinza no G para cada *pixel*. Sua informação textural é caracterizada pela matriz de frequência relativa $p(i, j, d, \theta)$, cujos dois *pixels*, um com nível de cinza i e outro com j são separados pela distância d e por uma relação angular θ na imagem (Figura 1.24). As células 1 e 5 são vizinhas com 0° em relação à célula central, 2 e 6, vizinhas com 135° ; 3 e 7, vizinhas com 90° e 4 e 8 vizinhas com 45° em relação à célula central. A matriz de frequência de dependência espacial de níveis de cinza é uma função da relação angular e da relação de distância entre os dois *pixels*.

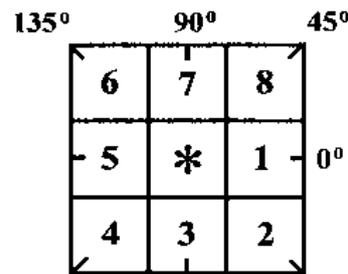


Figura 1 24 – Exemplo de posicionamento de *pixels* com janela 3×3 . Fonte: Haralick et al. (1973).

Com base na MCNC, Haralick *et al.* (1973) propõem 14 medidas de textura e cada medida derivada desta matriz pode ser usada para criar uma nova imagem de textura, que pode ser incorporada à informação espectral dos dados de satélite, em classificação digital de imagens de sensoriamento remoto. As técnicas de análise de textura baseadas em estatísticas de segunda ordem são muito utilizadas em diversas áreas das geociências, especialmente na caracterização do uso do solo e na discriminação de tipos distintos de florestas. Muitos autores utilizam combinações de várias medidas, visando o incremento dos resultados nos processos de classificação. Detalhes sobre as formulações matemáticas das medidas podem ser encontradas em Baraldi e Parmiggiani (1995).

A investigação foi baseada em descritores de textura extraídos da MCNC, a partir dos mosaicos de radar SAR-R99B (L-hh, hv e vv) usados como entrada para um sistema de classificação não-supervisionada ISOSEG (Mather, 1987), cujos procedimentos encontram-se sintetizados no fluxograma da Figura 1.25. Alguns destes parâmetros são relacionados com medidas de primeira ordem, tais como, contraste e variância, com significado claro textural (pixel taxa de repetição par, detecção de frequências espaciais, etc), enquanto que outros parâmetros conter informações textural associado a mais de um específico significado textural (Baraldi e Parmiggiani, 1995). Não foram aplicados filtros para atenuação de *speckle* nas imagens de forma a manter a textura original de cenas SAR para a preservação da textura original das cenas.

Em seguida, amostras representativas de nove classes foram escolhidas, com base em observações de campo e da superfície mapeada: C1 solo com vegetação, C2 solo (efeitos antropogênicos), C3 canga química, C4 canga, C5 canga de minério (com sombra), C6 canga, C7 hematita (com sombra), C8 hematita e C9 lago. A inclusão de algumas classes com sombra foi necessária uma vez que foram efeitos de sombra nas imagens de radar foram pronunciados. Com base nessas amostras, medidas de segunda ordem derivadas da GLCM (média, homogeneidade, contraste, dissimilaridade, entropia, energia, correlação) e de Vetor Diferença dos Níveis de Cinza-GLDV (energia, entropia, quer dizer, contraste) foram analisadas. As medidas de segunda ordem foram computados com nove configurações de distância (d), ou seja, $(-2,0)$, $(-2,1)$, $(-2,2)$, $(-1,2)$, $(0,2)$, $(1,2)$, $(2,2)$, $(2,1)$ e $(2,0)$. A partir destas configurações, 82 medidas foram obtidas, o que tornou impraticável usar um número tão grande de configurações na classificação. Deste modo, a seleção textura medida

foi baseada na regra de decisão denominada Fator Discriminante que avalia a separabilidade entre as classes que detalhes do método podem ser encontradas em (Rennó *et al.*, 1998). Assim, para duas classes hipotéticas A e B, e uma medida k textura, o fator discriminante foi calculado de acordo com a variação entre e dentro destas classes, dada pela equação seguinte;

$$DF_{AB,k} = \frac{n_A \cdot \sum_{i=1}^{n_A} (X_{Ai,k} - \bar{X}_{B,k})^2 + n_B \cdot \sum_{i=1}^{n_B} (X_{Bi,k} - \bar{X}_{A,k})^2}{n_A \cdot \sum_{i=1}^{n_A} (X_{Ai,k} - \bar{X}_{A,k})^2 + n_B \cdot \sum_{i=1}^{n_B} (X_{Bi,k} - \bar{X}_{B,k})^2}$$

onde $X_{\omega i,k}$ é a amostra i da classe ω para a medida K, $\bar{X}_{\omega,k}$ é o valor médio da medida k classe ω , e n_{ω} é o número de amostras da classe ω .

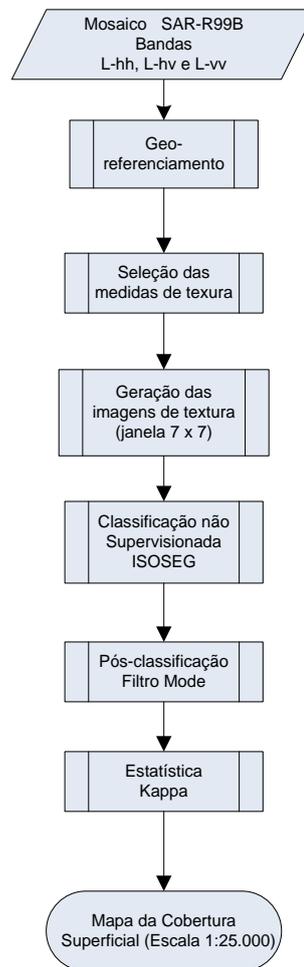


Figura 1 25 – Fluxograma do processamento das imagens de radar para análise textural.

De acordo com a equação acima, a medida da textura escolhida para as classes A e B em separado é aquele que seleciona o valor mais alto de DF_{AB} para todos k, indicando a melhor separação

para essas classes. Para o DF_{AB} , os valores de k perto de um denota que há confusão entre as classes A e B para a textura medida K . Assim, para cada par de nove classes em N1, o melhor conjunto de medidas foram selecionados pelos critérios acima descritos, usando apenas DF alto, que deu um bom desempenho para a classificação.

O passo seguinte foi gerar os canais de textura para as imagens selecionadas. Para um melhor controle dos níveis de cinza, os canais textural foram processadas com 32-bits. Foram utilizadas janelas de tamanho 7×7 de *pixels*, a fim de manter a sensibilidade das medidas de textura para os mais pequenos detalhes das metas, reduzindo simultaneamente os efeitos de ruído. Um classificador não supervisionado Isoclus (Mather, 1987) foi utilizado para a classificação, que foram baseadas nas melhores conjuntos de medidas de textura para cada isolado polarização (hh, hv e vv) e combinado (hh e hv, hh e vv, hv e vv, hh, hv, e vv). A fim de refinar os resultados, uma pós-classificação algoritmo de filtro de moda também foi aplicado.

Os resultados da classificação foram analisados através de uma matriz de confusão para estimar a quantidade de *pixels* corretamente e incorretamente classificados para cada classe. O método utilizado para avaliar sua precisão foi o coeficiente de concordância *Kappa* (Foody, 1992), dado pela equação seguinte, que foi avaliada através de amostras extraídas do Mapa de Cobertura Superficial. Em cada mapa classificado, 48 pontos foram alocados aleatoriamente para duas classes: hematita e não hematita.

O teste estatístico utilizado para avaliar as diferenças significativas entre as duas classificações é dada pela seguinte equação. Todos os testes para a diferença significativa entre os resultados da classificação foram realizadas em um nível de confiança de 95%. A este nível, dois resultados podem ser considerados significativamente diferentes se $> 1,96$ (Benson e DeGloria, 1985).

$$\Delta \hat{k} = \frac{|\hat{k}_1 - \hat{k}_2|}{\sqrt{\sigma_{\infty}^2[\hat{k}_1] + \sigma_{\infty}^2[\hat{k}_2]}}$$

Onde \hat{k} é kappa e $\sigma_{\infty}^2[\hat{k}]$ é a variância kappa.

As ortofotografias aéreas adquiridas sobre o depósito N1 foram georeferenciadas e mosaicadas de forma a permitir a extração de informações relevantes, como as condições de preservação da vegetação de campos rupestres e da floresta no entorno do depósito. Os resultados obtidos foram integrados em um Sistema de Informações Georeferenciadas, juntamente com o Modelo Digital de Elevação e Mapa de Declividade, de onde foram feitas as análises das informações relativas às condições ambientais em escala de detalhe. O fluxograma da Figura 1.26 sintetiza estes procedimentos.

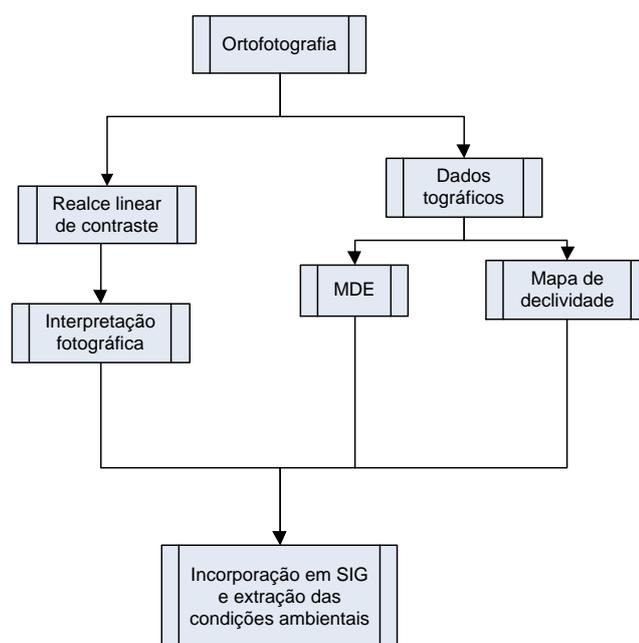


Figura 1.26 – Fluxograma do processamento dos dados de alta resolução espacial, ortofotografias e MDE.

1.6.2.3 – Investigações de campo

A rugosidade superficial é um parâmetro-alvo muito importante que influencia o desempenho da classificação textural. Em imagens de radar, a rugosidade da superfície refere-se ao micro-relevo que pode modular o retroespalhamento em terreno plano. A rugosidade varia de acordo com o comprimento de onda do radar, o ângulo de incidência, e com a topografia. A rugosidade relaciona-se intimamente com o substrato geológico subjacente e também pode ser causada por processos de intemperismo, pela composição do solo, ou associações de vegetação (Werle, 1988). Em abordagem semelhante em N1, medidas de rugosidade relativas à banda-C permitiram a discriminação das crostas lateríticas em rugosas, lisas e intermediárias, correlacionando-as com as unidades mapeadas (Morais *et al.*, 2002).

Em N1, a avaliação da rugosidade para a banda-L foi feita com base em 73 locais representativos das principais classes (Mapa de Pontos – Anexo 2), em campanha de campo realizada entre 22-09-2005 a 29-09-2005. A rugosidade superficial é geralmente difícil de medir com precisão no campo, mas as medições *in situ* foram consideradas uma primeira aproximação para categorizar as crostas lateríticas como lisas, intermediárias ou rugosas. Os valores de altura de cada unidade foram obtidos, em valores RMS (*Root Mean Square*), através da inserção de uma placa fina na superfície, com dimensão de 120 x 40cm (Figura 1.27), a qual foi fotografada de forma a retratar o perfil de rugosidade de cada unidade para posterior digitalização do mesmo. As distorções provocadas pela inclinação da placa no terreno foram corrigidas através de um algoritmo feito em “*Interactive Data*

Language” (<http://www.exelisvis.com/language/en-us/products/services/idl.aspx>, acesso em maio de 2012). Com esse algoritmo, foi possível também o cálculo dos desvios padrões obtidos (rms) para cada perfil, que foram posteriormente utilizados para os cálculos das rugosidades, com base nos critérios mencionados no Peake e Oliver (1971).



Figura 1.27 – Placa quadriculada para medida da rugosidade superficial. Fonte: org. Moraes (2011).

Em outra etapa da investigação de campo, foram visitados pontos no entorno de N1, apenas em áreas autorizadas pela VALE, por questões de segurança. Apesar do acesso limitado, os pontos visitados foram suficientes à validação do processamento realizado na integração das imagens LANDSAT/TM5 e de radar e assim as correlações puderam ser feitas às áreas não visitadas.

1.6.2.4– O sistema sisORCI® — Tema Mineração / Meio Ambiente/ Carajás

O Sistema sisORCI (sistema de Organogramas de Rodas de Correlações e Impactos) é um sistema de arquitetura de conhecimentos. Foi inicialmente concebido em parte em um projeto desenvolvido de 2003 a 2006 no CETEC, intitulado “Conservação de Recurso Hídrico no Âmbito da Gestão Ambiental e Agrícola de Bacia Hidrográfica”, financiado por um convênio entre as instituições: Ministério da Ciência e Tecnologia / FINEP / Fundo Setorial CT-Hidro 2002 / Fundação CETEC (www.cetec.br/chra, acesso em maio de 2012).

Os objetivos deste projeto foram os de estabelecimento de procedimentos técnicos e metodológicos para gestão integrada de bacia hidrográfica com uso intensivo de agricultura irrigada em domínio de savana (Cerrado): priorizando a conservação do recurso hídrico; focalizando a água

como recurso natural limitado e como insumo estratégico; baseando-se em critérios ambientais e de decisão (Martins Jr, 2008a). A identificação e caracterização das zonas de recarga de aquíferos foi enfatizada, a fim de estabelecer normas legislativas e de gestão, além de práticas de conservação e de uso; as trocas de energia, massa e bio-informação nas bacias e ecossistemas foram avaliadas, visando a conservação, o uso agrícola e o controle das relações terra / água com o uso da análise exergética.

O organograma das rodas de relações e de impactos (Organograma ORCI) vem sendo implementado em inter-relação com o Sistema de Informações Geo-ambientais SIBase que ao ter suas informações geoprocessadas denomina-se Sistema de Informação Gea – SIGea, articulável com o Sistema de Auxílio à Decisão SisDec AGRO-HYDROS com base em inteligência computacional (Martins Jr. 2006b, 2008a). Este sistema envolve: (i) conceitos epistemológicos precisos, definidos com respeito às ciências concernidas; (ii) uma geometria de conveniência que permite uma visão da forma das relações; (iii) espaço para modelar os processos, tanto de modo legal, quanto quantitativo representados nos eixos conectivos do sistema geométrico de representações de organogramas ORCI.

De acordo com (Martins Jr, 2008a), a concepção das rodas de correlações e de impactos diz respeito a representações de relações entre conceitos de diversas ordens, ações de todas as ordens, interações institucionais, das relações que possam unir no planejamento um programa de ações, bem como outros temas. As rodas podem agregar em si mesmas: as formas tecnológicas; os modelos e sucessos do desenvolvimento tecnológico; as políticas as mais diversas; os agentes econômicos; os ecossistemas e suas partes em interação; os processos geológicos; os processos ecológicos; o clima e processos climáticos; a tecnologia de informação científica; as unidades ambientais; os usos da terra; as propriedades rurais; os métodos de gestão de bacia e formas administrativas de fazê-lo, e muitos outros aspectos.

As ideias axiais de planejamento ambiental também são contempladas sob o binômio ecologia-economia; como também sob os binômios macroeconomia / ecologia, microeconomia / ecologia e sob o quadrinômio ecologia-energia-economia-ética (Martins Jr, 2008a). Os dois binômios e o quadrinômio devem ser articulados para que a perspectiva do planejamento possa emergir sem que se cometam omissões expressivas ou que se cometa qualquer tipo de antinomia seja cognitiva seja ontológica, que devem ser corrigidas tão logo sejam percebidas.

As rodas e os vetores que as acompanham conectando-as apresentam uma série de virtudes de representações cognitivas notáveis, a saber:

1 - cada roda pode representar um conceito epistemológico, ou metodológico, ou gerencial, ou educacional, ou tecnológico e ainda muitos outros, conforme surjam as questões referentes aos temas em planejamento;

2 - as rodas devem ser organizadas em categorias definidas aqui como principais, satélites, gerenciais, tecnológicas, educacionais, epistemológicas, especialistas, etc. que são estruturadas de modo conveniente à questão em foco;

3 - cada roda e todas elas devem ser representadas com tamanhos, cores próprias conforme a categoria e preenchidas com letras diferentes a elas atribuíveis em função do que se classificou no item 1;

4 - todas as rodas devem ser conectadas por eixos de diferentes tipos semióticos, representando conceitos: ecológicos, estruturas na Natureza, conceitos econômicos, conceitos administrativos, modelos matemáticos, modelos de gestão, modelos de educação formal e/ou informal, modelos de marketing, teorias matemático-econômicas, modelos de gestão pública, modelos de reflorestamento, de Permacultura, modelos para ecovilas, procedimentos sobre plantações, a legislação, e outros tantos temas conforme a complexidade do assunto em questão.

O Sistema sisORCI é concebido como um instrumento de arquitetura de conhecimento, que constitui a base para aplicações posteriores em inteligência artificial para repostas futuras de um sistema de tomada de decisão. O sisORCI foi desenvolvido para quaisquer contextos de conhecimentos, embora inicialmente tenha sido concebido para usar em temas relacionados à gestão em Ecologia, Energia e Economia para o planejamento de bacias hidrográficas, propriedades rurais e produção em apoio aos comitês de bacias hidrográficas (Martins Jr., 2006b, 2008a). A interdisciplinaridade e a multidisciplinaridade que lhe são inerentes permitem uma adaptação para um novo sistema relacionado aos temas de Mineração/ Meio Ambiente/ Carajás. Este deve contemplar conhecimentos relacionados exclusivamente aos aspectos geo-ambientais, econômicos e ecológicos, suas relações, interações e ações que visem dar suporte aos estudos de impacto ambiental referentes ao planejamento ambiental na indústria da mineração.

Os impactos ficam evidentes nas representações de relações entre os temas e as diversas Rodas entre elas. Estas relações servem para todas as ordens de questões, interações institucionais, das relações que possam unir ao planejamento um programa de ações, bem como muitos outros temas.

De acordo com Martins Jr. & Oliveira (2004), as rodas apresentam uma série de representações cognitivas, a saber:

1) cada Roda só pode representar um único conceito conforme surjam as questões referentes aos temas em planejamento;

2) as Rodas devem ser organizadas em categorias definidas como principais ligadas por Rodas ditas satélites e estruturadas de modo conveniente à questão em foco, sem hierarquia;

3) as Rodas devem ser representadas com cores próprias conforme as categorias cognitivas a elas atribuíveis.

A organização das Rodas no espaço representacional deve obedecer a uma geometria que atenda: (a) a lógica de conexões; (b) a uma distribuição no espaço representacional no qual se evite ao máximo cruzamento de eixos conectivos, ainda que seja legítimo e/ou necessário as vezes cruzá-los e (c) a uma condição de harmonia na representação (Figura 1.28).

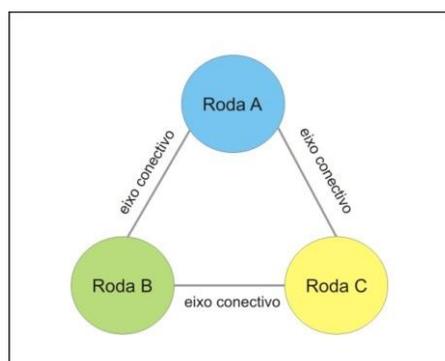


Figura 1 28 – Esquema de ligações entre Rodas no organograma ORCI. Org. Moraes, 2011.

Os temas desta pesquisa são iniciados com o quadrinômio Mineração Carajás/ Ecologia-economia/ Investimento/ Trabalho, procurando-se recobrir os aspectos críticos do sistema de mineração/ambiente em Carajás, que sejam pelo menos os mais evidentes. Deste modo, foram escolhidos temas próprios para abordar a questão do planejamento ambiental das atividades dessa mineração em uma bacia hidrográfica na Região Amazônica, com os conhecimentos atuais e as recomendações incrementais para seu aumento. Os temas pertencentes à mesma categoria são agregados e representados nas Rodas de relações e impactos com cores distintas dos temas de outras categorias. A partir destes temas centrais das Rodas, foram adicionados os eixos conectivos de forma a construir o organograma ORCI.

Os eixos conectivos dentro do sisORCI, Tema Mineração/ Meio Ambiente/ Carajás, são acionados como programação orientada a objetos (Martins Jr, 2008a), onde se possa visualizar os tipos de conexão(ões) que liga(m) duas Rodas de relações ou impactos. “Os eixos conectivos agregam trajetos possíveis que sejam diretos e lógicos, isto é, articulados de modo consequente com os conceitos envolvidos e que seguem diversos tipos de relações de impactos, dado que qualquer ação ou atividade terá necessariamente algum tipo de impacto sobre outra ação ou sobre sistemas (Martins Jr. & Ferreira, 2009)”. Os eixos conectivos devem ser representados separadamente por tipo de conexão lógica entre as Rodas. As conexões entre Rodas podem ser diretas ou indiretas e funcionam a semelhança de uma rede neural.

Quanto aos conceitos Mineração /Meio Ambiente/ Carajás, muitos eixos devem conter informações sobre os processos/procedimentos entre duas Rodas e conhecimentos específicos da área a ser minerada. A organização deste tipo de eixo tem muitas possibilidades, tantas quantas sejam derivadas, desde conexão com bases de dados brutos (imagens de satélites, dados cartográficos básicos) até produtos agregados (mapas temáticos, modelos prospectivos, etc.). Assim, enumeram-se exemplos de alguns conjuntos de conceitos que podem ocupar o espaço topológico representado nos eixos conectivos, conforme Martins Jr. & Ferreira (2009) descreveram:

(1) Estruturas na Natureza: representado por meio de cartas temáticas diversas, os aspectos conectivos referentes às estruturas dos ecossistemas e das atividades e estruturas antrópicas;

(2) Conceitos econômicos: conceitos econômicos podem ser representados, bem como os fatores econômicos envolvendo aspectos de micro e macroeconomia, ecologia – economia;

(3) Conceitos da engenharia: conceitos que representam normas técnicas de construção de obras de logística e infra-estrutura, bem como dados e informações técnicas disponíveis;

(4) Modelos matemáticos: podem-se agregar modelos estatísticos, técnicas de processamento digital de imagens, modelos geológicos entre outros;

(5) Modelos de gestão: diversos modelos de gestão ambiental, certificação ISO e outros temas, os quais envolvem entidades públicas, empresas privadas prestadoras de serviços e relações entre empresas;

(6) Modelos de reflorestamento: obedece às técnicas de reflorestamento, de desenvolvimento arbóreo, desenvolvimento genético, seleção de variedades, manutenção de hortos e produção de mudas, aos projetos executivos de reflorestamento, sob os mais vários objetivos;

(7) Modelos de Pesquisa Mineral: modelo fundamental em todo o projeto de exploração mineral, com conceitos que abrangem questões geológicas, modelagens geológicas, processos de direito mineral, ambiental e viabilidades econômicas para abertura da mina e

(8) Modelos para legislação: toda a legislação mineral e ambiental podem ser representadas nos eixos conectivos próprios para tal; em especial os procedimentos e exigências científicas para que a legislação seja cumprida deve estar também representado nos eixos conectivos respectivos.

No sistema sisORCI - Tema Mineração/ Meio Ambiente/ Carajás, todo o conhecimento é organizado em contexto. Isto é notável nas relações entre os temas das várias Rodas, entre aquelas que são localizadas na vizinhança umas das outras e aquelas que são mais distantes. Em ambos os casos pode haver conexões diretas via eixos, conexões múltiplas via eixos conectivos e conexões indiretas do tipo de uma Roda a outra e dessa outra, a outra.

Os eixos conectivos têm uma estrutura geral, única e abrangente, utilizável em cada situação de modo específico, obedecendo aos conceitos de modalidades cósmicas de Dooyeweerd (1958), por se apresentarem como excelente descrição e com articulação de inter-relações adequadas. No sisORCI - Tema Mineração/ Meio Ambiente/ Carajás, o eixo conectivo enquadra as modalidades que o usuário escolher, mas todas as modalidades tem espaço previsto no eixo conectivo padrão, por construção. Sub-modalidades devem ser inseridas posteriormente em cada campo de cada modalidade (e.g: Sub-modalidade Física quântica na Modalidade Física).

A noção de modalidades é dada pela noção de significado, ou seja, cada coisa do Universo compartilha significado a outras, e recebe dessas outras os seus próprios significados. Estes podem ser de diversos tipos tanto físicos, bióticos, semânticos e ainda outros mais de acordo com os aspectos de cada modalidade (Martins Jr., 2000). Assim, pode-se dizer que tudo é relevante em sua modalidade própria e cada relacionamento que esteja ocorrendo possui um significado que está relacionado ao contexto analisado. As modalidades e sub-modalidades identificáveis para o sisORCI Tema Mineração/ Meio Ambiente/ Carajás, a serem implementadas no sistema seguem descritas na tabela 1.4:

De posse desses elementos conceituais bem como de outros, no desenvolvimento do organograma geral (ORCI), foram executadas as seguintes etapas:

- 1 – Elaboração de listas com os temas abordados no contexto mineração/meio ambiente;
- 2 – Organização dos temas na forma de Rodas de Conteúdo (com um texto explicativo para cada roda);
- 3 – Estabelecimento de uma estrutura espacial e de conexão axial entre as Rodas.
- 4 – Designação das tonalidades das Rodas de conteúdo, partindo dos organogramas ORCI já existentes, e adaptando aos agrupamentos fenomenológicos de cada Roda (Tabela 1.5) e
- 5 – Adequações semióticas finais.

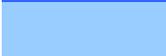
As modalidades do sisORCI Tema Mineração/ Meio Ambiente/ Carajás foram criadas com base nos dados disponíveis da área (cartografia básica, mapas temáticos, imagens de satélite, etc.), em consultas a diversas fontes bibliográficas (trabalhos referentes a Carajás, legislação mineral e ambiental, etc.) e em discussões com a equipe multidisciplinar envolvida no projeto “Projeto Gestão de Zonas de Recarga de Aquíferos Partilhadas” (GZRP) entre as Bacias de Paracatu, São Marcos e Alto Paranaíba (Martins Jr et. al., 2008a, 2008b, Vasconcelos *et al.* 2011). Deste modo, as modalidades e sub-modalidades identificáveis implementadas no sisORCI Tema Mineração/ Meio Ambiente/ Carajás, seguem descritas na tabela 1.5.

Tabela 1.4– Modalidades Sub-modalidades do sisORCI Tema Mineração/ Meio Ambiente/ Carajás

Modalidades	Sub-modalidades
Numérica	Rugosidade Superficial* Topografia* Drenagem Litologia Vegetação*
Espacial (extensão contínua)	Mapas Cobertura Superficial* Geológico* Uso da Terra* Relevo* Ferrovias Portos Estradas
Cinemática (movimento)	Logística Disposição de minérios Disposição de rejeitos Disposição de estéreis Jazidas e minas Cartografia associada
Física (energia e matéria)	Hidrologia Bacia hidrográfica Água Água oceânica (portos) Aqüífero Superficial Aqüífero Subterrâneo Drenagem Química da Água
Biótica	Mapas de vegetação (ecossistemas)* Unidades de Conservação (ecossistemas)
Psico-sensível	Não considerada
Lógica / Analítica	Geoprocessamento Sensoriamento Remoto Passivo* Sensoriamento Remoto Ativo* Modelo Digital de Elevação* Cartografia Digital* Bases de conceitos* Definições em geral* Logística enquanto lógica do planejamento e transportes Populações indígenas locais
Histórica	Arqueologia
Social	Não considerada
Econômica	Pesquisa Mineral Modelamentos de jazidas Administração econômica Legislação Federal (Constituição Federal, Códigos, Leis regulamentadoras)*
Jurídica	Legislação Ambiental* Normas Técnicas (ABNT)

* temas tratados, (Fonte: org Morais, 2011)

Tabela 1.5– Relações entre as Tonalidades das Rodas de Conteúdo e os fenômenos abordados no sisORCI - Tema Mineração/ Meio Ambiente/ Carajás. Fonte: org. Moraes (2011),

Cores	Fenômenos Relacionados
	Sistemas Ecológicos-Econômicos
	Sistemas Econômicos
	Sistemas Produtivos
	Sistemas Mineração/ Meio Ambiente
	Processos relacionados à pesquisa mineral
	Sistemas Hídricos
	Processos hídricos dinâmicos
	Processos geomorfológicos-geotécnicos
	Rochas
	Vegetação
	Sistemas de infraestrutura logísticos
	Sistemas tecnológicos
	Processos minerários
	Sistemas legislativos

1.7– CONCEITOS, PRINCÍPIOS E ARQUITETURA DO CONHECIMENTO

Neste item, encontra-se a revisão bibliográfica dos temas abordados na arquitetura de conhecimentos. A consulta à bibliografia relacionada aos aspectos geológicos e geoambientais da área; aos aspectos legais, federais e estaduais relacionados à concessão de lavra e obtenção do licenciamento ambiental e aos fundamentos dos produtos de sensoriamento remoto utilizados foram fundamentais para a concepção da arquitetura de conhecimentos proposta para a implantação de uma mina de ferro a céu aberto em N1 Carajás.

A revisão da literatura geológica e geoambiental possibilitaram o reconhecimento das unidades lateríticas em campo e suas relações com o relevo e a vegetação. Estas relações foram fundamentais aos processamentos das imagens de satélite, no que se refere ao caráter local de mapeamento das crostas lateríticas e a validação da rugosidade superficial das crostas. Além disso, foi possível o reconhecimento de alvos geoambientais em escala de semi-detilhe e a correlação destes com as imagens integradas.

O caráter informativo dos dados levantados possibilitou o entendimento dos impactos mais proeminentes em uma mina a céu aberto em ambiente de floresta e campo rupestre e suas relações impactantes. Ainda assim, o grande número de variáveis que integram o sistema que puderam ser relacionadas, possibilitou a proposta de um modelo de arquitetura de conhecimentos, uma inovação tecnológica de caráter integrador, sintetizado e incremental.

1.7.1– Aspectos Legais

Os aspectos legais abordados aqui estão relacionados à legislação mineral e ambiental, nível federal e estadual relacionados às atividades de mineração. As bases para consultas podem ser encontradas em páginas do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) <http://www.dnpm.gov.br/conteudo.asp?IDSecao=67>, http://www.dnpm-pe.gov.br/Legisla/cm_00.php, do Ministério do Meio Ambiente MMA <http://www.mma.gov.br/sitio/index.php?ido=legislacao.index&tipo=0>.

1.7.1.1– Legislação Mineral

Vigente desde 1988, o regime estabelecido pela Constituição da República Federativa do Brasil para o aproveitamento de substâncias minerais está baseado no princípio do domínio da União sobre os recursos minerais, conforme dispõe o artigo 20 inciso IX, que reza:

“ Art. 20 - São bens da União:

IX - os recursos minerais, inclusive os do subsolo;”

Compete ao DNPM - Departamento Nacional da Produção Mineral, órgão da estrutura do Ministério de Minas e Energia, conferir aos mineradores as autorizações e concessões para a pesquisa mineral e para a exploração de bens minerais, de acordo com o caput e parágrafo 1º do artigo 176 da Constituição Federal, que rezam:

“Art. 176 - As jazidas, em lavra ou não, e demais recursos minerais e os potenciais de energia hidráulica constituem propriedade distinta da do solo, para efeito de exploração ou aproveitamento, e pertencem à União, garantida ao concessionário a propriedade do produto da lavra.

§ 1º - A pesquisa e a lavra de recursos minerais e o aproveitamento dos potenciais a que se refere o “caput” deste artigo somente poderão ser efetuados mediante autorização ou concessão da União, no interesse nacional, por brasileiros ou empresa constituída sob as leis brasileiras e que tenha sua sede e administração no país, na forma da lei, que estabelecerá as condições específicas quando essas atividades se desenvolverem em faixa de fronteira ou terras indígenas.”

Diante do exposto na legislação, o subsolo e todos os bens minerais nele contidos são de propriedade da União e não do detentor da posse do solo (superficiário). O Código de Mineração também regulamenta e assegura ao proprietário do solo onde se situa a jazida o direito de participação

nos resultados da lavra. A exploração de uma jazida só pode ser feita por empresa constituída no Brasil e aqui sediada e administrada, e quando atender ao interesse nacional, sendo que este atendimento é atestado automaticamente pela concessão da portaria de lavra.

O sistema de concessão mineral adotado no Brasil está baseado, principalmente, no Código de Mineração, criado pelo Decreto 62.934, de 2 de julho de 1968. Este Regulamento dispõe sobre os direitos relativos às substâncias minerais ou fósseis, que formam os recursos minerais do Brasil, o regime de sua exploração e aproveitamento, e a fiscalização, pelo Governo Federal, da pesquisa, da lavra e de outros aspectos da indústria mineral. De acordo com o Código de Mineração, entende-se por lavra o conjunto de operações coordenadas objetivando o aproveitamento industrial da jazida, a começar da extração das substâncias minerais úteis que contiver até o seu beneficiamento.

A autorização de pesquisa ou a concessão de lavra é conferida, exclusivamente, a brasileiro ou a pessoa jurídica organizada no País, autorizada a funcionar como empresa de mineração. Constitui direito de prioridade a precedência de entrada no DNPM - Departamento Nacional da Produção Mineral do requerimento de autorização de pesquisa em área considerada livre, ou de concessão de lavra de jazida declarada em disponibilidade.

O Alvará de Pesquisa será publicado no Diário Oficial da União e transcrito no livro próprio do DNPM. À mesma pessoa física ou jurídica não serão concedidos mais de 5 (cinco) títulos de autorização de pesquisa de jazidas da mesma classe. A aprovação ou o arquivamento do Relatório Final de Pesquisa pelo DNPM importará na declaração oficial de que a área está convenientemente pesquisada. O titular da autorização de pesquisa, uma vez aprovado o Relatório, terá 1 (um) ano para requerer a concessão de lavra.

Somente empreendimentos individuais ou pessoas jurídicas autorizadas a funcionar como empresa de mineração podem se habilitar à concessão de lavra, sem restrições quanto ao número de concessões que podem ser outorgadas à mesma pessoa jurídica. O requerimento de concessão de lavra será dirigido ao Ministro das Minas e Energia, instruído com a toda documentação exigida, descrita a seguir:

- a definição gráfica da área pretendida, delimitada por figura geométrica formada, obrigatoriamente, por segmentos de retas com orientação Norte-Sul e Leste-Oeste verdadeiros, com 2 (dois) de seus vértices, ou excepcionalmente 1 (um), amarrado a ponto fixo e inconfundível do terreno;
- o Plano de Aproveitamento Econômico (PAE) da jazida, firmado por profissional legalmente habilitado, e
- a prova de disponibilidade dos fundos necessários à execução do plano de aproveitamento e operação da mina.

O PAE da jazida constará de memorial explicativo e dos projetos ou anteprojetos, com respectivos cronogramas, referentes:

- ao método de mineração a ser adotado, bem como referência à escala de produção prevista inicialmente e à sua projeção;
- à iluminação, ventilação, transporte, sinalização e segurança do trabalho, quando se tratar de lavra subterrânea;
- ao transporte na superfície e ao beneficiamento e aglomeração do minério;
- às instalações de energia, de abastecimento de água e condicionamento de ar;
- à higiene da mina e dos respectivos trabalhos;
- às moradias e suas condições de habitabilidade e segurança, para todos os que residem no local da mineração;
- aos processos de controle e monitoramento de impactos ambientais.

A concessão de lavra terá como título uma Portaria de Lavra, publicado no Diário Oficial da União e transcrito em livro próprio do DNPM. O titular da concessão de lavra fica sujeito a iniciar os trabalhos dentro do prazo de 6 (seis) meses, contados da data da publicação do Decreto de Concessão, e somente poderá lavar a jazida de acordo com o Plano de Aproveitamento Econômico (PAE) aprovado pelo DNPM. O descobrimento de qualquer outra substância mineral não incluída no decreto de concessão deverá ser informada, obrigatoriamente, ao DNPM. Os trabalhos de mineração deverão ser realizados com estrita observância das Normas Regulamentares de Mineração.

A direção dos trabalhos de lavra deve ser confiada a técnico legalmente habilitado ao exercício da profissão, atendendo ao disposto no Decreto que regulamenta o Código de Mineração e em outras normas minerárias em vigor. O concessionário deverá apresentar ao DNPM, nos primeiros 6 (seis) meses de cada ano, o Relatório Anual de Lavra (RAL) das atividades do ano anterior.

Considera-se ambiciosa a lavra conduzida sem observância do PAE pré-estabelecido ou efetuada de modo a dificultar ou impossibilitar o ulterior aproveitamento econômico da jazida, ficando sujeito o concessionário a sanções que podem variar da advertência à caducidade da concessão. Neste caso, a mina poderá ser declarada em disponibilidade, sem direito a indenização.

A propriedade onde se localiza a jazida, bem como aquelas propriedades limítrofes ou vizinhas, para efeito de pesquisa e lavra, ficam sujeitas a servidão de solo e subsolo. Tais servidões serão constituídas, por exemplo, para permitir a construção de oficinas, instalações, obras acessórias e moradias, abertura de vias de transporte e de linhas de transmissão de energia elétrica ou de comunicação, captação, adução e escoamento de águas, e estruturas para disposição de estéril e rejeitos.

As servidões serão constituídas mediante indenização prévia (amigável ou judicial) do valor do terreno ocupado e dos prejuízos resultantes dessa ocupação, e os trabalhos de pesquisa ou lavra não poderão ser iniciados antes dessa indenização ser paga ou depositada em juízo. O DNPM poderá promover vistoria "in loco", para constatar a real necessidade do estabelecimento da servidão para os trabalhos de pesquisa ou lavra, e/ou sua conveniência técnica e econômica.

1.7.1.2 – Legislação Ambiental

Os principais artigos da Constituição Federal, que constituem o arcabouço constitucional para as questões de meio ambiente no Setor Mineral, encontram-se descritos a seguir. Ressalta-se que uma ampla legislação, incluindo as regulamentações e Resoluções do CONAMA, com origem anterior a Constituição de 1988, além dos instrumentos estaduais e municipais equivalentes, também constitui o arcabouço legal complementar ao determinado na Constituição. Além destas, há o Código Florestal - Lei no 4.771, de 1965, define Áreas de Preservação Permanente, permitindo o desmate das mesmas somente em casos de utilidade pública, nos quais se enquadra a extração mineral.

Os principais artigos da Constituição Federal de 1988 relacionados às questões de meio ambiente no Setor Mineral:

- Art. 20, em seu inciso IX, define que são bens da União "os recursos minerais, inclusive os do subsolo";
- Art. 21, em seu inciso XXV, dispõe sobre a competência da União em "estabelecer as áreas e as condições para o exercício da atividade de garimpagem, em forma associativa";
- Art. 22, em seu inciso XII, estabelece que compete privativamente a União legislar sobre "jazidas, minas, outros recursos minerais e metalurgia";
- Art. 23, em seu inciso XI estabelece que é competência comum da União, dos estados, do Distrito Federal e dos municípios "registrar, acompanhar e fiscalizar as concessões de direitos de pesquisa e exploração de recursos hídricos e minerais em seus territórios". O Parágrafo único deste art. determina que "lei complementar fixará normas para a cooperação entre a União e os estados, o Distrito Federal e os municípios, tendo em vista o equilíbrio do desenvolvimento e do bem-estar em âmbito nacional".
- Art. 174, § 3o, estabelece que "O Estado favorecerá a organização da atividade garimpeira em cooperativas, levando em conta a proteção do meio ambiente e a promoção econômico-social dos garimpeiros", determinando no § 4o que "As cooperativas a que se refere o parágrafo anterior terão prioridade na autorização ou concessão para pesquisa e lavra dos recursos e jazidas de minerais garimpáveis, nas áreas onde estejam atuando e naquelas fixadas de acordo com o art. 21, inciso XXV, na forma da lei".

- Art. 176 estabelece que "As jazidas, em lavra ou não, e demais recursos minerais e os potenciais de energia hidráulica constituem propriedade distinta da do solo, para efeito de exploração ou aproveitamento, e pertencem a União, garantida ao concessionário a propriedade do produto da lavra". Os parágrafos 1º a 4º deste art. definem como se dá a concessão para pesquisa e aproveitamento destes recursos, e como é dada a participação do proprietário do solo nos resultados deste aproveitamento.
- Art. 225, Capítulo do Meio Ambiente, estabelece que "Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial a sadia qualidade de vida, impondo-se ao poder público e a coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações". No § 1º, inciso IV, este art. incumbe ao poder público "exigir, na forma da lei, para instalação de obra ou atividade potencialmente degradadora do meio ambiente, estudo prévio de impacto ambiental, a que se dará publicidade". No § 2º determina-se que "Aquele que explorar recursos minerais fica obrigado a recuperar o meio ambiente degradado, de acordo com solução técnica exigida pelo órgão público competente, na forma da lei".
- Art. 231, § 7, estabelece que "Não se aplica às terras indígenas o disposto no art.174, parágrafos 3º e 4º" (referente ao garimpo, já descrito anteriormente).

A **Lei no 6.938**, de 31 de agosto de 1981, que estabeleceu a Política Nacional de Meio Ambiente instituiu os mecanismos para o licenciamento ambiental no Brasil, constituindo-se um dos marcos principais da legislação ambiental no país. Dentre os instrumentos instituídos por esta Lei, destacam-se o zoneamento ambiental, a Avaliação de Impacto Ambiental (AIA) e o Licenciamento Ambiental (LA). A partir da regulamentação desta Lei, pelo **Decreto Nº 88351** de 1º de julho de 1983, foram estabelecidas as condições para a realização dos Estudos de Impacto Ambiental (EIA) e o respectivo Relatório de Impacto Ambiental - RIMA para empreendimentos relacionados à exploração de recursos naturais considerados potencialmente poluidores ou passíveis de causarem degradação ambiental. Este decreto também regulamentou o funcionamento e a estruturação do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA).

Na legislação brasileira, as funções de identificação, previsão e interpretação de impactos ambientais, devem ser desempenhadas EIA, enquanto a função de comunicação, particularmente a de comunicação com o público, deve ser desempenhada pelo RIMA. A AIA por sua vez, trata-se de procedimento inserido no âmbito de uma política ambiental, e pode ser definida como um conjunto de procedimentos que são: (i) a determinação da necessidade de uma dada iniciativa ser submetida à AIA; (ii) o estabelecimento de termos de referência para a condução de um estudo específico; (iii) a elaboração de um estudo de caráter técnico denominado EIA; (iv) a preparação de um documento de comunicação denominado RIMA; (v) mecanismos formais de participação do público, como a

audiência pública; (vi) procedimentos de análise técnica e de revisão dos estudos apresentados, (vii) um procedimento formal de tomada de decisão e (viii) acompanhamento e monitoramento (Sánchez, 2008).

Deste modo, a AIA é entendida como uma atividade de caráter técnico-científico com o objetivo de identificar, prever e interpretar as consequências sobre o meio ambiente de uma dada ação humana, como na mineração, por exemplo. A AIA possui ainda a função de comunicar as conclusões dos estudos técnicos ao proponente do projeto, às autoridades encarregadas da tomada de decisões e ao público em geral. A AIA é comumente associada como um instrumento de planejamento, ou seja, como um instrumento de prevenção do dano ambiental e como um procedimento definido no âmbito das políticas públicas, associada ao licenciamento ambiental (Sánchez, 2008). Estas duas dimensões da AIA são indissociáveis e visam à análise da viabilidade ambiental de um projeto, plano ou programa.

Já o EIA/RIMA constitui o principal instrumento de referência para o processo de tomada de decisão mencionado anteriormente da AIA e para a obtenção da licença ambiental. Os estudos devem ser feitos antes da implementação do empreendimento de modo a apresentar um diagnóstico completo dos meios físico, biológico e sócio-econômico, identificar e analisar todos os impactos significativos do projeto e suas alternativas; propor medidas mitigadoras dos impactos e elaborar um plano de controle e monitoramento, além de outras ações definidas pelo órgão licenciador, através do Termo de Referência – TR (Sánchez, 2008). O autor sustenta que as qualidades do EIA/RIMA e da decisão tomada pelo órgão licenciador estão diretamente relacionadas a um planejamento criterioso e à preparação cuidadosa do TR.

A **Lei no 6.938** permitiu ainda que algumas definições fossem feitas no sentido de compreender os conceitos principais relacionados às questões ambientais, que pela sua abrangência podem levar a considerações variadas. Para se evitar interpretações equivocadas, adotam-se então os termos definidos pela própria legislação, especificamente os que constam no art. 3º da Lei, o termo “meio ambiente” é definido como sendo “o conjunto de condições, leis, influências e interações de ordem física, química e biológica, que permite, abriga e rege a vida em todas as suas formas” (item I) e o termo “recursos ambientais” é definido como “a atmosfera, as águas interiores, superficiais e subterrâneas, os estuários, o mar territorial, o solo, o subsolo e os elementos da biosfera” (item V).

Posteriormente à promulgação desta lei, a Resolução CONAMA 001/86 surge como outro importante marco na legislação ambiental no Brasil. Esta resolução determina que o licenciamento das atividades modificadoras do meio ambiente está vinculado à elaboração de um Estudo de Impacto Ambiental. Estas atividades, listadas no art. 2º desta resolução são definidas segundo critérios relativos à tipologia e/ou tamanho do projeto ou às prováveis consequências ambientais e ao interesse ambiental

das áreas. As atividades relacionadas à extração e beneficiamento de minerais estão incluídas nesta lista.

Anteriormente a esta resolução, alguns empreendimentos no Brasil tiveram seus estudos ambientais executados, como por exemplo, as usinas hidrelétricas de Sobradinho (BA) e Tucuruí (PA) e o terminal porto-ferroviário Ponta da Madeira (MA). Este último foi construído para o escoamento do minério de ferro de Carajás, na década de 80, início das explorações de ferro na região. Concebido no “Projeto Ferro Carajás – Relatório de Impactos Ambientais – Volume I” (Santos, 1984), os estudos de impacto ambiental não se restringiram apenas à região do porto e da ferrovia, mas também à área da mina de ferro. Estudos sobre as condições do solo, da vegetação, dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos, das condições atmosféricas e dos aspectos sócio-culturais e antrópicos encontram-se descritos neste relatório, que se aproxima de um RIMA, embora na época de sua elaboração não houvesse ainda exigências legais para sua execução.

Com o avanço da legislação ambiental no país, o art. 2º da Resolução CONAMA 001 de 23 de janeiro de 1986 estabelece que as atividades de mineração, entre outras, dependem da elaboração do EIA/RIMA, pois são causadoras de impacto ambiental. E este termo passa então a ser definido, através da mesma resolução, como “qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente afetam:

- I. a saúde, a segurança e o bem-estar da população;
- II. as atividades sociais e econômicas;
- III. a biota;
- IV. as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente;
- V. a qualidade dos recursos ambientais.”

A extração mineral, como várias outras atividades antrópicas, é potencialmente degradadora do ambiente. Em atendimento ao dispositivo constitucional Art. 225, § 2º, foi instituído o Decreto no. 97.632 de 10 de abril de 1989, que exigia de todos os empreendimentos de extração mineral em operação no país a apresentação de um PRAD - Plano de Recuperação de Áreas Degradadas, em um prazo máximo de 180 dias. Este decreto estabeleceu também que, para novos empreendimentos do gênero, o PRAD devia ser apresentado durante o processo de licenciamento ambiental.

O licenciamento ambiental específico para as atividades de extração mineral foi estabelecido pela Resolução CONAMA 009 de 1990, e Resolução CONAMA 010 de 1990 diferencia o processo para os minerais de Classe II. A Resolução no 009 de 1990, prevê, também, o licenciamento ambiental da pesquisa mineral quando houver Guia de Utilização, que é uma autorização expedida pelo DNPM,

permitindo a extração de uma certa quantidade do mineral durante a pesquisa, visando a realização de testes piloto ou mesmo venda para testes de mercado.

Estas resoluções estabeleceram as normas e os procedimentos de licenciamento ambiental para o setor, destacando-se: “O empreendimento cujo objetivo é a exploração (produção e comercialização) de minerais das classes I, III, IV, V, VI, VII, VIII, IX, sujeitos ao regime de concessão, deve apresentar o EIA e seu respectivo RIMA, acompanhado do Plano de Aproveitamento Econômico da jazida – PAE, na fase de Licença Prévia (LP), que é simultânea à fase de requerimento de concessão de lavra ao DNPM (Departamento Nacional de Produção Mineral). A fase de exploração, ou seja, de pesquisa prévia/prospecção, não está sujeita ao licenciamento ambiental, com exceção da pesquisa que fizer uso de guia de utilização com produção de minério.”

Dessa forma, são apresentados seguir as etapas e os procedimentos necessários, segundo as Resoluções CONAMA 009 e 010/90, cujas respectivas documentações são apresentadas na Tabela 1.6.

Tabela 1.6- Documentos exigidos no licenciamento ambiental para o setor mineral, conforme resoluções CONAMA 009 e 010/90.

LICENÇA	DOCUMENTOS - RES009/90	DOCUMENTO - RES010/90
PRÉVIA (LP)	- Requerimento da LP	- Requerimento da LP
	- Publicação do pedido de LP	- Publicação do pedido de LP
	- Certidão pref. municipal	- EIA/RIMA, ou se dispensado,
	- EIA/RIMA	RCA (Relatório de Controle Ambiental)
DE INSTALAÇÃO (LI)	- Requerimento LI	- Requerimento LI
	- Publicação do pedido de LI	- Publicação do pedido de LI
	- Cópia da publicação da LP	- Cópia da publicação da LP
	- Aprovação do PAE pelo DNPM	- Licença da prefeitura municipal
	- PCA (Plano de Controle ambiental)	- PCA (Plano de controle ambiental)
DE OPERAÇÃO (LO)	- Licença de desmatamento	- Licença de desmatamento
	- Requerimento da LO	- Requerimento da LO
	- Publicação do pedido de LO	- Publicação do pedido de LO
	- Cópia da publicação da LI	- Cópia da publicação da LI
	- Portaria de Lavra (DNPM)	- Registro de licença (DNPM)

A Licença Prévia (LP), correspondente a fase de planejamento, análise de viabilidade e projeto básico do empreendimento. Para sua obtenção, dentre outros documentos, é necessária a apresentação

do EIA/RIMA e de uma certidão da prefeitura municipal, declarando que as características e a localização do empreendimento estão de acordo com as leis e regulamentos administrativos. No caso específico dos minerais de Classe II (de uso direto na construção civil), a Resolução 010 de 1990 permite a dispensa de EIA/RIMA, a critério dos órgãos competentes, que neste caso é substituído pelo RCA (Relatório de Controle Ambiental);

A Licença de Instalação (LI) corresponde à fase de projeto executivo e de instalação do empreendimento. Para sua concessão, é necessária a apresentação de um PCA (Plano de Controle Ambiental), que contemple, na forma de projetos executivos, as proposições conceituais de controle e reabilitação ambiental do EIA/RIMA. Nesta etapa, é necessária a apresentação da licença para desmate (se for o caso) e, para os minerais concedidos no sistema de Portaria de Lavra, de cópia da aprovação do PAE (Plano de Aproveitamento Econômico) pelo DNPM;

A Licença de Operação (LO) é concedida mediante comprovação da implantação dos sistemas projetados no PCA e apresentação de cópia da portaria de lavra ou do registro do licenciamento no DNPM (para Classe II). Esta etapa do licenciamento corresponde a etapa de implantação final, operação e desativação do empreendimento.

O licenciamento ambiental não inclui automaticamente o licenciamento de desmate, que é solicitado em paralelo ao órgão competente. Para áreas de preservação permanente (definidas pelo Código Florestal, Lei no 4.771, de 1965), a licença de desmate é solicitada ao IBAMA, e para as demais é de competência do órgão estadual de florestas (quando existente) ou da Superintendência do IBAMA.

A fiscalização do cumprimento dos condicionamentos estabelecidos no licenciamento cabe a cada órgão envolvido, dentro de sua competência e participação no processo. Adicionalmente, o poder judiciário exerce influência sobre o controle dos impactos ambientais gerados pelos empreendimentos, por meio das curadorias de meio ambiente, que tem o poder de instalação de ações civis públicas (Lei no 7.347 de 1985).

O licenciamento ambiental é realizado atualmente pelos Estados, com o nível federal atuando supletivamente em casos especiais (empreendimentos envolvendo mais de um estado, áreas sob jurisdição federal, etc.). Um fator que muito interfere no processo atual de licenciamento e controle é a indefinição ou a sobreposição de competências. Em muitos estados, vários órgãos têm competências sobrepostas e muitas vezes não trabalham de maneira articulada, sendo necessário que o interessado percorra cada um deles para a obtenção das licenças específicas.

Em Carajás, o decreto Nº 2.486, de 2 de fevereiro de 1998, cria a Floresta Nacional de Carajás, no Estado do Pará, e dá outras providências. O Artigo estabelece assim: “Art . 1º Fica criada, no Estado do Pará, a Floresta Nacional de Carajás, com área de 411.948,87 ha (quatrocentos e onze mil

novecentos e quarenta e oito hectares e oitenta e sete centésimos de hectares), que passa a integrar a estrutura do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA, autarquia federal vinculada ao Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal, em igualdade com as demais florestas nacionais...” “Parágrafo único. Consideradas as peculiaridades geológicas da área da Floresta Nacional de Carajás, incluem-se dentre seus objetivos de manejo a pesquisa, a lavra, o beneficiamento, o transporte e a comercialização de recursos minerais”.

No que diz respeito ao licenciamento ambiental, o Art . 7º estabelece que “Para fins de licenciamento ambiental das atividades de mineração e a infra-estrutura a elas associada, na Floresta Nacional de Carajás, caberá ao IBAMA a aprovação dos aspectos de caráter estratégico de uso das unidades de conservação, conforme plano de manejo, elaborado nos termos do art. 6º, delegando, por meio de convênio que celebrará com o organismo de licenciamento ambiental do Estado do Pará, competência para a expedição, renovação e fiscalização das licenças ambientais específicas, na forma da legislação vigente.” No Art . 6º, consta que “A CVRD, como detentora das informações técnicas da área, implementadora e operadora das atividades econômicas existentes e beneficiária das licenças ambientais pertinentes, formulará, em conjunto com o IBAMA, que o aprovará, o plano de manejo da Floresta Nacional de Carajás, no prazo máximo de um ano, a contar da data da publicação deste Decreto.” Deste modo, a concessão do licenciamento ambiental para mineração em Carajás é obtida pelo IBAMA.

O Art. 36. estabelece que “Nos casos de licenciamento ambiental de empreendimentos de significativo impacto ambiental, assim considerado pelo órgão ambiental competente, com fundamento em estudo de impacto ambiental e respectivo relatório - EIA/RIMA, o empreendedor é obrigado a apoiar a implantação e manutenção de unidade de conservação do Grupo de Proteção Integral, de acordo com o disposto neste artigo e no regulamento desta Lei.” E de acordo com o § 1º “O montante de recursos a ser destinado pelo empreendedor para esta finalidade não pode ser inferior a meio por cento dos custos totais previstos para a implantação do empreendimento, sendo o percentual fixado pelo órgão ambiental licenciador, de acordo com o grau de impacto ambiental causado pelo empreendimento.”

A definição de compensação ambiental contará, portanto, com o subsídio de estudos técnicos a serem elaborados quando do licenciamento ambiental, e atenderá os dispositivos legais relacionados ao tema, a saber:

- Decreto nº 4.340, de 22 de agosto de 2002, que regulamenta diversos artigos da Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000, que dispõe sobre o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza - SNUC, e dá outras providências.

- Resolução CONAMA 371/2006, de 05/04/2006 - Estabelece diretrizes aos órgãos ambientais para o cálculo, cobrança, aplicação, aprovação e controle de gastos de recursos advindos de compensação ambiental, conforme a Lei no 9.985, de 18 de julho de 2000, que institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza - SNUC e dá outras providências;
- Resolução CONAMA 010/1987, de 03/12/1987 - Dispõe sobre o ressarcimento de danos ambientais causados por obras de grande porte".

O Decreto 4.340 determina que, para os fins de fixação da compensação ambiental, o órgão ambiental licenciador estabelecerá o grau de impacto a partir dos estudos ambientais realizados quando do processo de licenciamento ambiental, sendo considerados os impactos negativos, não mitigáveis e passíveis de riscos que possam comprometer a qualidade de vida de uma região ou causar danos aos recursos naturais.

Os percentuais dos custos totais do empreendimento serão fixados, gradualmente, a partir de meio por cento dos custos totais previstos para a implantação do empreendimento, considerando-se a amplitude dos impactos gerados. Como até o presente momento não se chegou a um critério técnico aplicável para avaliação da amplitude dos impactos e, conseqüentemente para o estabelecimento de uma gradação para o percentual de compensação, este valor está congelado, na esfera federal, em 0,5% dos custos totais do empreendimento, cabendo ao empreendedor apontar e justificar esses custos no EIA. A aplicação dos recursos da compensação ambiental será definida pelo IBAMA, mas deverá contemplar unidades de conservação, existentes ou a serem criadas, para atender a seguinte ordem de prioridades:

- I - regularização fundiária e demarcação das terras;
- II - elaboração, revisão ou implantação de plano de manejo;
- III - aquisição de bens e serviços necessários à implantação, gestão, monitoramento e proteção da unidade, compreendendo sua área de amortecimento;
- IV - desenvolvimento de estudos necessários à criação de nova unidade de conservação; e
- V - desenvolvimento de pesquisas necessárias para o manejo da unidade de conservação e área de amortecimento.

1.7.1.3 – Legislação Ambiental estadual

Muitos estados têm utilizado o Zoneamento Ecológico-Econômico (ZEE) como instrumento e definição de zonas destinadas a determinados fins, respeitando a sustentabilidade em todas as atividades. A implementação do ZEE pode contribuir para simplificar o EIA e ser um instrumento importante para o empreendedor na gestão ambiental. Ao ter as informações ambientais prévias

disponibilizadas, a decisão passa a ser respaldada pelos fatores ambientais identificados, antecipando assim procedimentos que não contribuam com a sustentabilidade (Oliveira, 2004).

Embora só concebido em 2005, o ZEE do Pará já era contemplado pela legislação do Estado. Na Constituição do Estado do Pará de 05 de outubro de 1989, Capítulo VI – Do Meio Ambiente, Art. 254 – consta que “O poder público estadual realizará o Zoneamento Ecológico-Econômico do estado, de modo a compatibilizar o desenvolvimento com a preservação e a conservação do meio ambiente, bem como promoverá o levantamento e o monitoramento periódico da área geográfica estadual, de acordo com as tendências e desenvolvimento científico e tecnológico, de modo que o ZEE seja sempre atualizado, garantindo a conservação das amostras representativas dos ecossistemas.”

Na evolução da legislação relacionada às questões ambientais, é criado o Conselho Estadual do Meio Ambiente, pela Lei Nº 5610 de 20 de novembro de 1990, que passa a constituir o órgão estadual responsável pela política do meio ambiente.

Um importante avanço é a Lei Nº 5630 de 20 de dezembro de 1990, em seu art. 1º estabelece que “As normas para a preservação e proteção dos corpos aquáticos, principalmente as nascentes, inclusive os ‘olhos d’água’, deverão ser asseguradas através do plantio ou manutenção de mata ciliar, cuja largura mínima será estabelecida na Legislação Florestal Brasileira, podendo o órgão de controle ambiental do Estado fixar larguras maiores, se o exame do caso assim o recomendar.” O art. 2º trata da disposição de resíduos e estabelece que “ Os resíduos líquidos e/ou sólidos provenientes de atividades industriais, comerciais, agropecuárias, domésticas, públicas, recreativas e outras exercidas no Estado só poderão ser lançados em águas interiores ou costeiras, superficiais ou subterrâneas, desde que atendam os padrões estabelecidos e não alterem a qualidade das mesmas.”

Em relação à mineração, a Lei Nº 5.793 de 04 de janeiro de 1994 define a Política Minerária e Hídrica do Estado do Pará, seus objetivos, diretrizes, instrumentos e dá outras providências. Através da Lei Nº 5.807 de 24 de janeiro de 1994, é criado o Conselho de Política Minerária e Hídrica do Estado do Pará, vinculado à Secretaria de Estado, Indústria, Comércio e Mineração (SEICOM), em cujo Art. 1º, parágrafo único, estabelece que “o conselho consultivo de política mineraria do Estado do Pará tem como objetivo o acompanhamento, a avaliação, o controle e fiscalização de toda e qualquer atividade relacionada à mineração e ao aproveitamento de recursos hídricos em território paraense.” Essas duas leis denotam, como mencionado anteriormente, o foco com os recursos hídricos relacionados às atividades de mineração do estado paraense.

A Lei Complementar Nº 018 de 24 de janeiro de 1994 instituiu em seu art. 1º o “Programa Especial de Mineração do Pará”. No seu Art. 4º, inciso VIII, o conceito de áreas de influência já é abordado, onde fica especificado “o levantamento das necessidades infra-estruturais e sociais nas áreas de influência dos projetos minerais e priorização do atendimento em conjunto com organismos

Estaduais das demandas elencadas.” A questão das áreas degradadas por garimpeiros é manifestada no Art. 4º, inciso IX, onde consta a “recuperação das áreas degradadas por garimpeiros e a orientação dos mesmos com transferência de tecnologia para evitar poluição ambiental.”

A Lei Nº 5817 de 10 de fevereiro de 1994 altera o art. 3º da Lei Nº 4.946 de 18 de dezembro de 1980, acrescentando ao mesmo a função da Secretaria de Estado Indústria, Comércio e Mineração a alínea "j" de “executar as funções de registro, acompanhamento e fiscalização das concessões de direitos de pesquisa e exploração de recursos hídricos e minerais existentes no Estado do Pará.”

Um marco na legislação ambiental do Pará é a Lei Nº 5887 de 09 de maio de 1995, que cria a Política Estadual do Meio Ambiente, na qual é manifestada a intenção de desenvolvimento tecnológico de forma sustentável. Destacam-se no Capítulo II, art. 3º, os objetivos III e VII, que são respectivamente “estabelecer critérios e padrões de qualidade para o uso e manejo dos recursos ambientais, adequando-os continuamente às inovações tecnológicas e às alterações decorrentes de ação antrópica ou natural” e “promover o desenvolvimento de pesquisas e a geração e difusão de tecnologias regionais orientadas para o uso racional de recursos ambientais.”

Outro avanço significativo se deu com a Lei Nº 6506 de 2 de dezembro de 2002, que instituiu os princípios da proposta do ZEE do Estado do Pará. O Macrozoneamento Ecológico-Econômico do Estado do Pará foi instituído pela Lei Nº 6745 de 6 de maio de 2005. O art. 2º, estabelece o objetivo de “compatibilizar a utilização de recursos naturais com a preservação e a conservação do meio ambiente, bem como realizar o levantamento e o monitoramento periódico da área geográfica estadual de acordo com as tendências e desenvolvimento científico e tecnológico, garantindo a conservação das amostras representativas dos ecossistemas do território estadual.” O art. 3º § 2º estabelece que “O uso das terras, águas, ecossistemas, biodiversidade, sítios arqueológicos, cavidades naturais e estruturas geológicas que constituem o território estadual fica sujeito às disposições estabelecidas nesta Lei e na legislação em vigor.” Por este macrozoneamento, a área territorial do Pará fica dividida em quatro grandes zonas, definidas segundo os dados atuais de degradação ou preservação da qualidade ambiental e à intensidade do uso e exploração de recursos naturais. No art. 5º, consta que “a zona destinada à consolidação das atividades produtivas deverá incluir as áreas antropizadas ou que apresentam degradação da qualidade ambiental e será objeto de zoneamento ecológico-econômico em escala de detalhe, a ser realizado de acordo com prioridades definidas pelo Poder Executivo, observada a legislação aplicável.”

1.7.2– Alterações do meio físico por atividades de mineração

Em 2007, o Brasil continuou a ocupar posição de liderança na produção global de *commodities* do minério de ferro, a segunda, depois da China (DNPM, 2010). Com a crescente demanda de minério de ferro, novas áreas de extração são necessárias e o impacto ambiental nestas áreas devem ser

estudados de forma crítica, levando-se em conta a legislação ambiental brasileira. A Província Mineral de Carajás, localizada na fronteira oriental da Amazônia, é uma das províncias minerais mais importantes do mundo, com uma predominância de produção de ferro e os potenciais enormes para Mn, Cu, Au, Ni, U, Ag, Pd, Pt, com potencial para outros (Lobato *et al.* 2005). Em Carajás, um complexo de mineração a céu aberto de cinco minas, cercadas por densa floresta, com o N4E designações, N4W, N5E, N5W e N5EN, são responsáveis pela produção de segunda maior mineradora de ferro no Brasil, com 85,5 milhões de toneladas produzidas em 2008 (DNPM, 2010).

A mineração é uma atividade que provoca profundas alterações ao meio ambiente, distintas e dependentes das características físico-químicas dos depósitos minerais, do tamanho da jazida, do tipo de tecnologia empregado na extração e beneficiamento do minério e do ambiente (natural e econômico) onde se desenvolve a atividade mineral (Cavalcanti, 1996). A qualificação dos impactos provocados está relacionada a cada um destes aspectos e a generalização destes é mera aproximação. Além disso, considerando a dinâmica ambiental e o desenvolvimento da atividade em suas várias fases, da implantação à desativação, os impactos podem ser acentuados ou minimizados.

De acordo com Fornasari *et al.* (1992), um empreendimento de mineração envolve três fases, as quais são:

1) Implantação da atividade:

a) Pesquisa Mineral: tem o objetivo de determinar as reservas minerais disponíveis para efetuar o estudo sobre a viabilidade técnico-econômica do aproveitamento;

b) Abertura de vias e acessos;

c) Instalação de equipamentos: visa às operações de desmonte, beneficiamento e transporte.

2) Funcionamento da atividade:

a) Decapeamento: remoção das camadas estéreis sobrejacentes ao corpo mineralizado para expô-lo;

b) Desmonte: desagregação ou fragmentação do corpo de minério para a sua remoção, podendo ser de três tipos; hidráulico, mecânico e com explosivos;

c) Transporte interno de minério e rejeito: compreende os processos de transferências do material de desmonte, decapeamento e rejeito entre as unidades e setores internos da mineração; por meio de caminhões, esteiras rolantes, dutos, canais, vagonetes, teleféricos e outros;

d) Beneficiamento: conjunto de processos ao qual é submetido o minério extraído de modo a regularizar o tamanho dos fragmentos, remover minerais associados sem valor econômico e aumentar a pureza ou o teor;

e) Disposição de rejeitos: entende-se por rejeito de mineração tanto os resíduos derivados dos processos de beneficiamento do minério, como aqueles provenientes diretamente da lavra, isto é, o estéril e o minério de baixo teor;

f) Estocagem do produto: compreende o armazenamento do produto e a estocagem do minério de baixo teor;

g) Carregamento e transporte do produto: expedição do produto ou transferência dos silos aos pátios de estoque;

h) Operações auxiliares: construção e manutenção de barragens, funcionamento das oficinas de manutenção, dos lavadores de equipamentos e dos depósitos de sucatas e outras.

3) Desativação: última fase da atividade da mineração, associada à restauração, reabilitação ou recuperação da área minerada. A reabilitação compreende a destinação do local a uma outra forma de uso e ocupação do solo ou outra atividade de reutilização da área (lazer, residencial, comercial, industrial e outras). A recuperação é a alteração do local de modo que as condições ambientais se aproximem das condições anteriores à intervenção, uma vez que a restauração é tarefa praticamente impossível, dado o montante de material extraído durante o período de realização de lavra.

De um modo geral, quase todas as atividades que envolvem a mineração há processos que mobilizam grandes quantidades de terra ou escavações, removem extensas áreas de cobertura vegetal e afetam os cursos d'água (Fornasari *et al.*, 1992). Levando-se em conta estes aspectos, podem-se ter: desmatamento e remoção da cobertura vegetal, ocupação de áreas férteis; alteração de superfícies topográficas e da paisagem; instabilização de encostas; exposição de áreas aos fenômenos de dinâmica superficial, como erosão e assoreamento; indução de movimentos de massa.

Os recursos hídricos são afetados com modificação dos cursos d'água, aumento da turbidez e da quantidade de solos em suspensão em corpos hídricos receptores; assoreamento e contaminação por produtos químicos dos corpos hídricos; interferência no lençol freático com rebaixamento ou elevação do nível de base local; mudanças na dinâmica e movimentação de águas subterrâneas; inundações por construção e operação de barragens de rejeitos. A atmosfera também sofre interferências em função dos processos de desmonte e o uso de explosivos, que podem acarretar aumento da emissão de gases e partículas em suspensão no ar; aumento do nível de ruídos; lançamento de fragmentos rochosos à distância; propagação de ondas e vibrações; afugentamento de espécies da fauna, etc.

Estas alterações estão, na maior parte das ocorrências relacionadas ao meio físico, que por sua vez pode ser definido como o conjunto do ambiente caracterizado pela interação de componentes predominantemente abióticos, que podem ser materiais terrestres (solos, rochas, água, ar) e tipos naturais de energia (gravitacional, solar, energia interna da Terra e outras), incluindo suas modificações decorrentes da ação biológica e humana (Fornasari *et al.*, 1992). Considerando o meio

físico como um sistema, isto é, sujeito as interferências internas e externas, há que se buscar a interrelação entre os diversos fenômenos que nele se processam. As formas de relevo, por exemplo, são processos morfogênicos resultantes da interação entre fatores litológicos, estruturais, tectônicos e climáticos.

Os processos do meio físico são definidos como os processos do meio ambiente que decorrem de interações com componentes abióticos predominantemente, sob uma óptica de dinamismo que se dá por meio de fenômenos e ações que mudam em função de diversos fatores, inclusive suas interações com os meios biológico, sócio-econômico e cultural. Já os processos tecnológicos são aqueles que envolvem a implantação, o funcionamento e a desativação de um determinado empreendimento de engenharia, que necessita de técnicas específicas e ações antrópicas que induzem e condicionam fluxos energéticos (Fornasari *et. al.*, 1992).

O impacto visual gerado pelo setor mineral, que é grande e muitas vezes confundido simbolicamente (porque é de fácil verificação e até mesmo constatação), como “o impacto”, particularmente nas minas e atividades extrativas a céu aberto (Barreto, 2001). Este impacto torna-se acentuado, não propriamente pelas causas objetivas que o provoca, mas pelas subjetivas, as psicológicas, sobre as pessoas e instituições, governamentais e não-governamentais, nacionais e estrangeiras. A relevância desse tipo de impacto está relacionada à sua localização, ou seja, à sua distância ou proximidade das áreas não urbanas. E este ganha importância uma vez que grande parte das minerações se localiza em áreas praticamente virgens em termos de ocupação física pelo homem, tornando-o mais “visível” e podendo trazer a urbanização futura dessa área, com todas as suas conseqüências ambientais.

Embora a mineração tenha essa conotação de atividade não sustentável, é possível o desenvolvimento da atividade dentro do conceito de sustentabilidade do recurso mineral. A exploração de áreas com status ambiental especial, como Amazônia, Pantanal, áreas de preservação permanente e outras pode ser feita dentro da visão de sustentabilidade ambiental. Restrições ambientais podem tornar certos depósitos minerais indisponíveis e a avaliação da utilização ou não do recurso deve ser feita com base em critérios bem definidos e quantificados quando possível (IBRAM, 1992).

Villas Boas (*et al.* 2005) sustentam que a sustentabilidade é dependente do contexto e o que é aceitável e apropriado depende da localização e do contexto econômico e cultural. Do mesmo modo, indicadores que visem o acompanhamento e o progresso em direção às metas de desenvolvimento sustentável devem ser escolhidos de acordo com a situação específica. De acordo com os autores, indicadores de desenvolvimento sustentável, indicadores de sustentabilidade são chamados de índices holísticos, acordados em um dado contexto social. Os acordos sobre indicadores técnicos, como aqueles que as emissões de relatório ou níveis de produção, são mais facilmente alcançados do que o

acordo sobre os indicadores da condição do sistema, no que diz respeito à equidade social e a saúde do ecossistema.

Os indicadores de desenvolvimento sustentável visam a melhor compreensão das informações e índices do complexo mineral para as partes interessadas, isto é, os tomadores de decisão e de uso público (Villas Boas *et al.*(2005). Estes indicadores devem ser úteis como análise, fundamentação, comunicação, planejamento e ferramentas de avaliação de desempenho, além de serem práticos para ajudarem as pessoas a compreender as complexidades associadas com os recursos minerais, as decisões de gestão política, a interligação de sistemas físicos e ambientais e a facilitar a inevitável gestão de políticas conflitantes. Uma síntese dos indicadores de sustentabilidade para a indústria mineral pode ser vista em Villas Boas (2009).

Os indicadores de desenvolvimento sustentável foram construídos segundo processos de consulta pública para conceituá-los e construí-los, levando-se em conta:

1. o ramo particular da indústria (metais, minerais industriais, minerais de energia);
2. o ambiente que as operações são conduzidas (floresta tropical, deserto de clima temperado);
3. aspectos econômicos do país no qual as operações são desenvolvidas;
4. a existência, ou não, de mecanismos de pressão social na região ou país onde a indústria está localizada;
5. a existência, ou não, de infra-estrutura na região ou país onde a indústria está localizada

Um aspecto importante destes indicadores é escala em que ele é aplicável, pois as condições do sistema variam de acordo com escalas espaciais e a escala de interesse também. Um exemplo é se a mineração é importante para o PIB do País, então os indicadores nacionais são necessários. Se a mineração é importante apenas localmente, então indicadores locais são mais apropriados.

1.7.3– Sensoriamento Remoto Passivo e Ativo – Princípios e Configurações de Imageamento

1.7.3.1– Introdução

O sensoriamento remoto é a ciência e a arte de aquisição de informação de um objeto, área ou fenômeno através da análise de dados adquiridos por instrumentos que não estão em contato com o objeto, área ou fenômeno em investigação (Lillesand & Kiefer, 2000). Por esta definição ampla e generalista, atividades como a geofísica, a astronomia, a astrofísica e outras também poderiam ser consideradas como atividades de sensoriamento remoto. Ao considerar os instrumentos de coleta, que são vários e podem variar desde equipamentos manuais a plataformas orbitais, com coletas feitas no campo (*in situ*) ou a uma distância remota do objeto, parece mais apropriado caracterizar o sensoriamento remoto em relação ao registro das propriedades de alvos em relação à energia refletida

ou emitida por eles. Neste contexto, o sensoriamento remoto é “o registro das informações das regiões do ultravioleta, visível, infravermelho e microondas do espectro eletromagnético, sem contato, por meio de instrumentos tais como câmeras, escâneres, lasers, dispositivos lineares e/ou matriciais localizados em plataformas tais como aeronaves ou satélites, e a análise da informação adquirida por meio visual ou processamento digital de imagens” (Jensen, 2009).

Os processos e elementos da aquisição de dados de sensoriamento remoto podem ser sintetizados em aquisição de dados e análise de dados (Figura 1.29). Os elementos da aquisição são: a fonte de energia (i), a propagação da energia através da atmosfera (ii), a interação da energia com as feições superficiais terrestres (iii), a retransmissão da energia através da atmosfera (iv), sensores aerotransportados e/ou orbitais (v), representação analógica ou digital das imagens geradas pelo sensor (vi). Na análise dos dados, encontram-se os processos que envolvem a interpretação e o processamento digital das imagens (vii), os produtos obtidos da extração de informações das imagens, que podem ser apresentados em Sistemas de Informações Geográficas (SIG), agrupados por temas (viii), de modo que os usuários tenham subsídios para tomadas de decisões em seus processos.

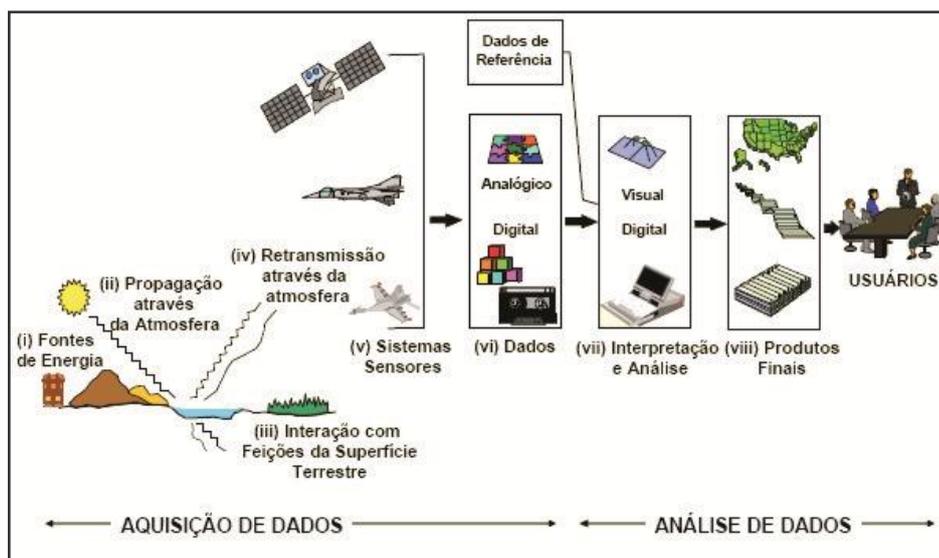


Figura 1.29 - Fases de aquisição e análise de dados de sensoriamento remoto (Fonte: modificado de Lillesand e Kiefer, 2000).

1.7.3.2 – Fontes de energia e princípios de radiação

A fonte de energia, chamada Radiação Eletromagnética (REM), para o caso da aplicação das técnicas de sensoriamento remoto no estudo dos recursos naturais, é o Sol (pode ser também a Terra para os sensores passivos de micro-ondas e termais, podem ser antenas de micro-ondas para os sistemas radares). A REM propaga-se à velocidade da luz no vácuo e sua interação com o meio físico

pode ser explicada através de dois modelos: o modelo corpuscular (ou quântico) e o ondulatório. No primeiro, a REM é concebida como o resultado da emissão de pequenos pulsos de energia, enquanto que no segundo, a REM se propaga na forma de ondas formadas pela oscilação dos campos elétrico e magnético. A figura 1.30 apresenta um esquema da representação dos campos elétrico e magnético e as oscilações mencionadas, onde os dois vetores são ortogonais entre si e ambos são perpendiculares à direção de deslocamento da onda.

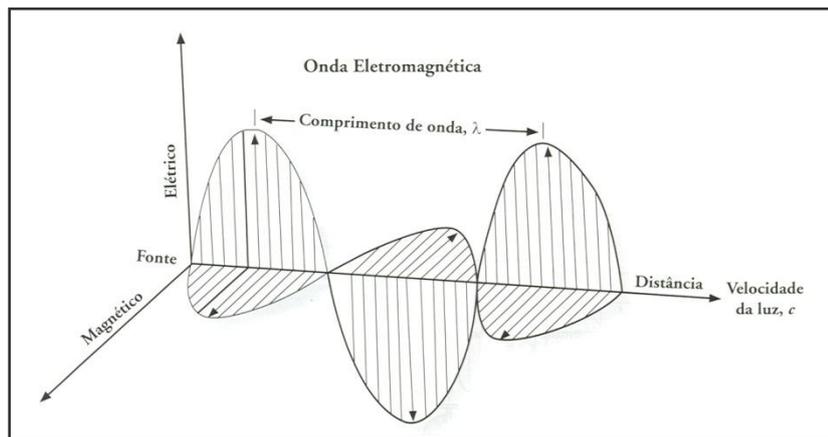


Figura 1.30- Onda eletromagnética com os campos elétricos e magnéticos perpendiculares entre si. As ondas deslocam-se à velocidade da luz ($3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$) (Fonte: Jensen, 2009).

No modelo corpuscular, a REM interage com a matéria e pode ser emitida, absorvida ou propagada em pequenas parcelas de energia chamadas quanta (plural de quantum) ou fótons. A quantidade de energia contida em cada fóton de um fluxo de REM é diretamente proporcional à frequência e inversamente proporcional ao comprimento de onda a ele associado, dada por:

$$E = h.f = h.c/\lambda;$$

onde:

E: energia de um quantum (Joules, J)

h: constante de Planck ($6,624 \cdot 10^{-34}$ Joule/s)

c: velocidade da luz ($\approx 300.000 \text{ Km/s}$)

λ : comprimento de onda, μm

f: frequência, Hz

A relação inversa entre a energia e o comprimento de onda é importante para o sensoriamento remoto dada a dificuldade de detectar a energia em comprimentos de onda maiores, como no infravermelho termal, do que em comprimentos de onda menores, como no visível (Novo, 2008).

No modelo ondulatório, a REM se propaga para todo o espaço, na forma de ondas, a uma velocidade de 300.000 km/s , com os campos elétrico e magnético ortogonais entre si e

perpendicularmente em relação à direção da propagação da onda. Neste modelo, a REM pode ser caracterizada pelo seu comprimento de onda e frequência, que se relacionam com a velocidade de propagação por:

$$C = \lambda \cdot f \text{ ou } f = C/\lambda$$

onde:

C: velocidade da luz (300.000 Km/s)

λ : comprimento de onda, μm

f: frequência, Hz

Em sensoriamento remoto, é comum caracterizar as ondas eletromagnéticas pela sua localização no espectro eletromagnético (Figura 1.31), que é dividido em faixas que representam regiões com características peculiares em termos dos mecanismos físicos de detecção desta energia ou dos processos físicos geradores de energia em cada faixa. Apesar dos limites de cada faixa espectral não serem bem definidos, destacam-se as seguintes regiões:

- **Raios Gama:** radiação de alta energia geralmente emitida por materiais radioativos e muito utilizada em radioterapia e radiografia industrial. Não há, em princípio, limite superior para a frequência das radiações gama, embora ainda seja encontrada uma faixa superior de frequência conhecida como raios cósmicos.

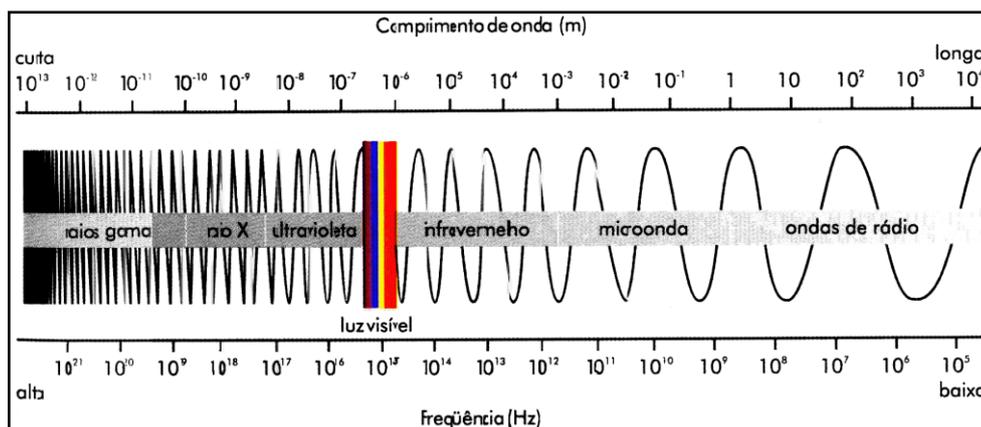


Figura 1.31- Distribuição da REM de acordo com o comprimento de onda e frequência.

A faixa espectral que vai de 0,3 a 15 μm é a mais utilizada em sensoriamento remoto e é conhecida por espectro óptico, dado que nela os componentes ópticos de reflexão e refração, tais como, lentes, espelhos e prismas e outros são utilizados para coletar e reorientar a radiação. A

faixa das microondas também tem sido muito utilizada em sensoriamento remoto, especialmente em áreas com condições atmosféricas adversas, por meio dos sensores radar (*radio detection and ranging*), que sofrem pouca atenuação atmosférica, propiciando aquisição de imagens com a presença de nuvens ou brumas.

1.7.3.3 – Grandezas radiométricas

A aplicação das técnicas de sensoriamento remoto no estudo dos recursos naturais envolve a elucidação de como ocorrem os processos de reflexão e emissão da radiação eletromagnética pelos objetos terrestres (Steffen, 1995). Para quantificar as causas e os efeitos intrínsecos a estes processos, no espectro óptico, utiliza-se conjunto de técnicas denominadas grandezas radiométricas. A quantidade de energia radiante deve ser avaliada em função de seu contexto espacial, espectral, e temporal. Dessa forma, as principais grandezas radiométricas são:

- Energia radiante(Q): grandeza radiométrica fundamental que indica a quantidade de energia associada à um fluxo de radiação e é medida em joules (J);
- Fluxo radiante(Φ): quantidade de energia radiante, por unidade de tempo, que flui de uma posição no espaço, dada em J/s ou Watt (W):

$$\Phi = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

- Irradiância(E): densidade superficial do fluxo que irradia uma superfície, dada em W/m²:

$$E = \frac{\Delta \Phi}{\Delta A}$$

- Lei do coseno da Irradiância: se um fluxo de radiação unidirecional incide perpendicularmente sobre uma amostra de superfície plana, a sua intersecção com o plano da superfície determina a área irradiada. Mas se a direção do fluxo for inclinada, a área da intersecção aumenta enquanto o fluxo permanece constante. Neste caso, o valor da irradiância diminui, pois o fluxo se distribui por uma área maior, dado por:

$$E_{\Theta} = E_0 \cdot \cos \Theta$$

- Excitância(M): densidade superficial do fluxo refletido ou emitido por uma superfície, dada em W/m²:

$$M = \frac{\Delta \Phi}{\Delta A}$$

A diferença entre a irradiância e a excitância é o sentido de propagação do fluxo radiante

Intensidade Radiante (I): uma fonte pontual irradia energia para todo espaço. Uma pequena superfície (ΔA), situada a uma certa distância da fonte, define esta uma direção e um ângulo sólido (cônico) como mostra a figura 3.5c. Denomina-se intensidade radiante da fonte, na direção considerada, a razão entre o fluxo que se propaga no ângulo sólido e o valor deste, dada em W/esterradianos (sr), por:

$$I = \frac{\Delta \phi}{\Delta \omega}$$

O ângulo sólido medido em esterradianos é definido pela razão entre a área amostral que intercepta uma superfície esférica e o raio desta, dado por:

$$\omega = \frac{\Delta a}{r^2}$$

- Radiância (L): ou intensidade radiante média dos pontos que constituem uma amostra de superfície refletora ou emissora, pode ser dada pela intensidade radiante da amostra (como se esta fosse pontual) e a sua área, projetada na direção da medição, em W/m²sr:

$$L = \frac{\Delta \Phi}{\Delta \omega \cdot \Delta A \cos \theta}$$

Quando a radiância de uma amostra de superfície é constante em qualquer direção que seja observada, amostra é denominada lambertiana ou difusor perfeito. A figura 1.32 sintetiza as grandezas radiométricas e suas relações geométricas em relação à REM.

Considerando os pontos que constituem a amostra da superfície, a radiância dessa amostra numa dada direção é a soma das radiâncias dos elementos de área que a constituem. Como a radiância depende da intensidade do fluxo que se propaga em cada direção, um sensor capaz de medir esse fluxo pode ser calibrado para fornecer a radiância média da área amostral contida no seu campo de visada, caracterizando o aspecto espacial; expresso pela resolução espacial do sensor, a qual é definida como a menor área da qual o sensor é capaz de registrar a REM.

O contexto temporal refere-se ao período de tempo compreendido entre duas medidas de radiância sobre uma mesma superfície do terreno, que expressa a resolução temporal da plataforma que carrega o sensor. Diz-se que um sensor possui maiores resoluções temporais, quanto menores forem os períodos de tempo entre coletas de dados (Steffen, 1995).

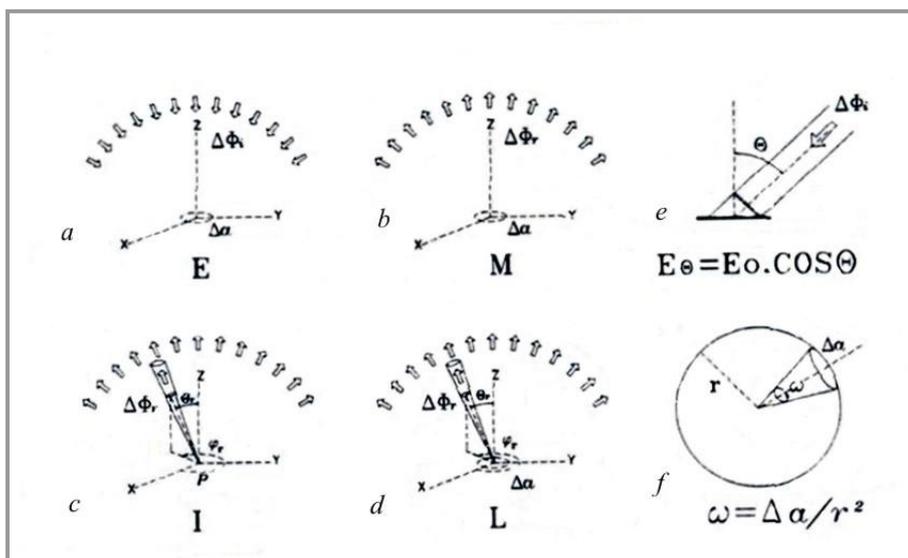


Figura 1.32- Grandezas radiométricas (Fonte: Steffen, 1995).

Além dos aspectos espacial e temporal, a radiância medida por um sensor pode ser determinada para um intervalo específico de comprimentos de onda; o que caracteriza o aspecto espectral. A radiância é dependente da intensidade do fluxo radiante que atinge o objeto (irradiância) e quanto maior for essa intensidade, maior também será aquela referente ao fluxo que deixa o objeto, e conseqüentemente, maior será a radiância, caso o corpo não absorva toda energia incidente. Esta interação entre a REM e o objeto é expressa pela reflectância, que representa uma relação entre a radiância refletida de um dado objeto pela irradiância. Embora seja a radiância a grandeza efetivamente medida pelo sensor, a reflectância representa as propriedades intrínsecas dos objetos em refletir a REM sobre eles incidente e é expressa em porcentagem, possuindo assim um caráter relativo. Assim, a composição espectral do fluxo que deixa a superfície sofre alterações que são dependentes das características físico-químicas dos objetos.

Na interação da REM com os objetos, tem-se então que quando um fluxo de energia irradia um objeto, três fenômenos ocorrem: parte do fluxo é refletido; parte penetra no objeto, sendo progressivamente absorvido e parte consegue atravessá-lo, emergindo novamente para o espaço (Figura 1.33). Pela lei da conservação da energia, tem-se:

Energia incidente (E_i) = Energia refletida (E_r) + Energia absorvida (E_a) + Energia transmitida (E_t)

$$\text{reflectância}(\rho) + \text{absortância}(\alpha) + \text{transmitância}(\tau) = 1$$

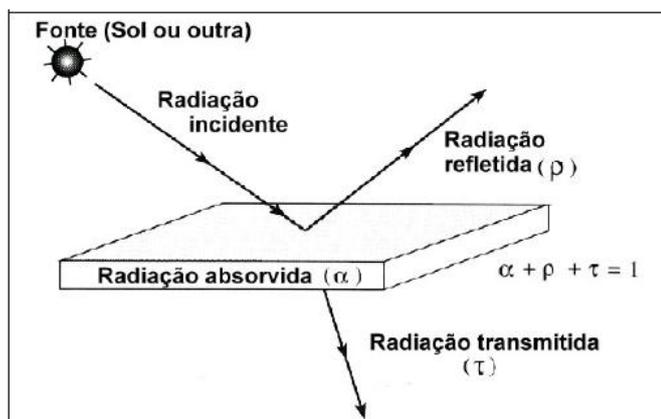


Figura 1.33 - Caminhos da radiação eletromagnética e sua interação com um alvo. Fonte: Novo (2008).

1.7.3.4– Sistemas multiespectrais de imageamento

1.7.3.4.1- Introdução

Como visto anteriormente, a REM refletida ou emitida por um determinado objeto contém informações em diversas faixas do espectro eletromagnético, que são muito úteis ao sensoriamento remoto. Os sensores são os dispositivos que respondem à REM, em determinada faixa do espectro eletromagnético, e possuem a capacidade de registrar esta energia e gerar produtos em forma de imagens. Quanto à fonte de energia, os sensores podem ser classificados em ativos e passivos. Os sensores ativos produzem sua própria fonte de energia, a qual interage com os alvos da superfície. Os sensores passivos dependem de uma fonte de energia externa para detectarem a radiação refletida ou emitida pelos objetos da superfície (Novo, 2008) Em relação à maneira de coleta de dados, há dois tipos de sensores: não-imageadores (radiômetros e espectroradiômetros) e imageadores (fotográficos e eletro-ópticos).

Os sensores imageadores eletro-ópticos são descritos a seguir e detalhes sobre especificações técnicas, modos de aquisição de dados relativos aos outros tipos de sensores podem ser vistos em Lillesand e Kiefer (2000) e Novo (2008).

Os sistemas de imageamento eletro-óptico possuem dois componentes básicos: o sistema óptico e o detector. O sistema óptico possui a função de coletor de energia composto por lentes e espelhos, cuja principal função é concentrar a radiação proveniente do objeto sobre um detector. Estes detectores são capazes de transformar a radiação eletromagnética em um sinal elétrico, a qual pode ser transmitida a uma estação remota. A sensibilidade espectral de detectores, geralmente constituídos por ligas metálicas que têm a propriedade de transformar determinados valores de radiância em pulsos

elétricos, está relacionada à resolução espectral. Já a resolução espacial é função do tamanho do elemento de resolução da cena, denominado de *pixel* (*Picture Element*).

Os sensores de imageamento eletro-ópticos podem ser classificados em três categorias quanto ao processo de formação das imagens: sistemas de imageamento de quadro (ou *frame*), sistemas de varredura eletrônica e sistemas de varredura mecânica. Os sistemas de quadro captam a cena toda em uma única operação, enquanto os de varredura captam a imagem num modo *pixel a pixel*. Os sistemas de varredura eletrônica são os mais avançados e utilizam um sistema óptico grande angular através do qual a cena é imageada por meio de um arranjo linear de detectores. Detalhes sobre as configurações destes e outros sensores podem ser vistos em Novo (2008).

Os componentes básicos de um sistema imageador eletro-óptico é mostrada na figura 1.34. De acordo com esta figura, a radiação proveniente de um *pixel* da superfície terrestre passa através de um telescópio que permite focalizar a radiação proveniente de um *pixel* do terreno sobre um espelho giratório, o qual reflete a radiação para um sistema ótico a partir do qual ela é direcionada para uma grade dicrômica com a propriedade de dividir a radiação em dois grandes conjuntos de comprimento de onda: radiação solar refletida e radiação solar emitida. A radiação solar refletida é dividida em seus diferentes comprimentos de onda e detectada e amplificada pelos detetores e pré-amplificadores e a radiação termal por sua vez é direcionada aos detetores e pré-amplificadores. Toda a informação passa por um sistema de controle eletrônico que a direciona para os diferentes sistemas de registro (Novo, 2008).

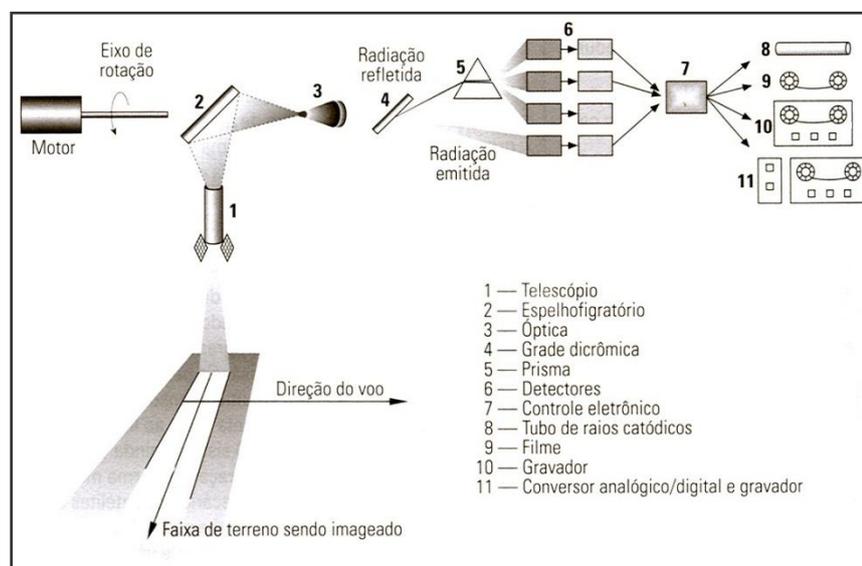


Figura 1 34 – Configuração básica de um sistema de varredura multiespectral. Fonte: Novo (2008).

O tipo e o sistema de registro dependem da tecnologia utilizada. A maioria dos sistemas aerotransportados possuem um tubo de raios catódicos que permite que o operador observe os dados na medida em que são adquiridos. Há os sistemas que possuem também subsistemas de registro analógico dos dados em filmes. Outros sistemas registram os sinais elétricos diretamente em fitas magnéticas, e os mais avançados permitem a conversão dos sinais analógicos em digitais antes de serem armazenados ou transmitidos telemetricamente. Neste caso, uma plataforma orbital envia os dados por telemetria para as estações de recepção na Terra ou indiretamente através de satélites de rastreamento e envio de dados. Feito isto, verifica-se se há necessidade de um pré-processamento radiométrico e/ou geométrico dos dados digitais para que o usuário possa posteriormente interpretar ou utilizar técnicas de processamento digital de imagens.

Em todo momento, o telescópio “enxerga” a energia pelo campo instantâneo de visada do sensor (*Instantaneous Field of View* –IFOV). O IFOV é representado pelo ângulo sólido no qual o detector é sensível à radiação (Figura 1.35). O IFOV representa a porção do terreno projetada sobre o detector e por isto constitui uma variável muito importante do sistema sensor, visto que ele está associado à resolução espacial das imagens geradas. Para uma dada altura de vôo, o IFOV está relacionado diretamente com o tamanho do *pixel* e inversamente com a resolução espacial. Quanto maior o IFOV, maior o tamanho do *pixel* e menor a resolução espacial. O IFOV pode ser utilizado para calcular a resolução espacial da imagem a partir da equação seguinte:

$$D = H.\beta$$

onde:

D: diâmetro do elemento de amostragem no terreno, m

H= altura da plataforma, m

β = IFOV, rd

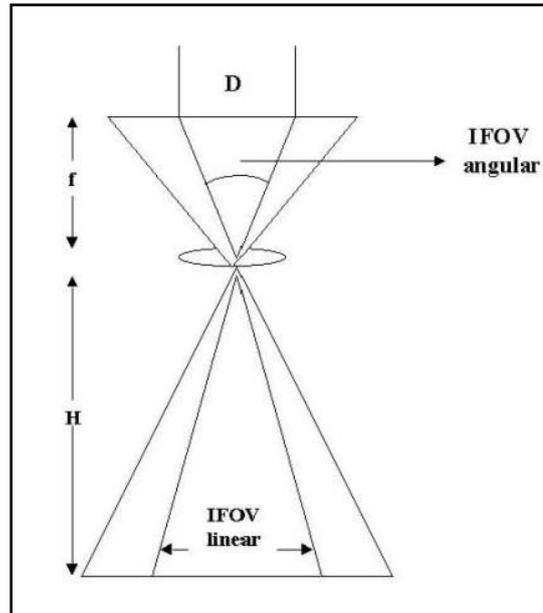


Figura 1.35 – IFOV (*Instantaneous Field of View*). Fonte: Novo (2008).

1.7.3.4.2 – Características das imagens multiespectrais

Os dados digitais obtidos dos sensores remotos são armazenados sob a forma de uma matriz numérica formada por i linhas e j colunas, onde cada valor digital localizado em uma determinada linha e determinada coluna representa um *pixel* (*picture element*) em uma imagem bidimensional, que possui um valor de brilho associado; o nível de cinza ($NC_{i,j}$), conforme visto na figura 1.36. Quanto maior for o *range* dos valores de brilho, mais precisas são as medidas da radiação detectadas pelo sensor e mais informações estão contidas em cada *pixel*. Esta propriedade é denominada de nível de quantização do sensor e a sua capacidade em discriminar diferentes intensidades de sinal, ou número de níveis digitais em que a informação encontra-se registrada, fornece a resolução radiométrica. Assim tem-se que 1 byte = 8 bits e $2^8 = 256$, 16 bits = $2^{16} = 65536$, ou seja, uma imagem quantizada em 8 bits possui 256 valores de níveis de cinza e uma imagem quantizada em 16 bits, 65536 valores de níveis de cinza. Quanto maior a resolução radiométrica, maior a capacidade em discriminação de feições. Para cada banda k adquirida em determinada faixa do espectro eletromagnético, tem-se a imagem multiespectral gerada, onde cada pixel representa a radiância aparente (média) de uma amostra da superfície quantizada de acordo com as características do sensor.

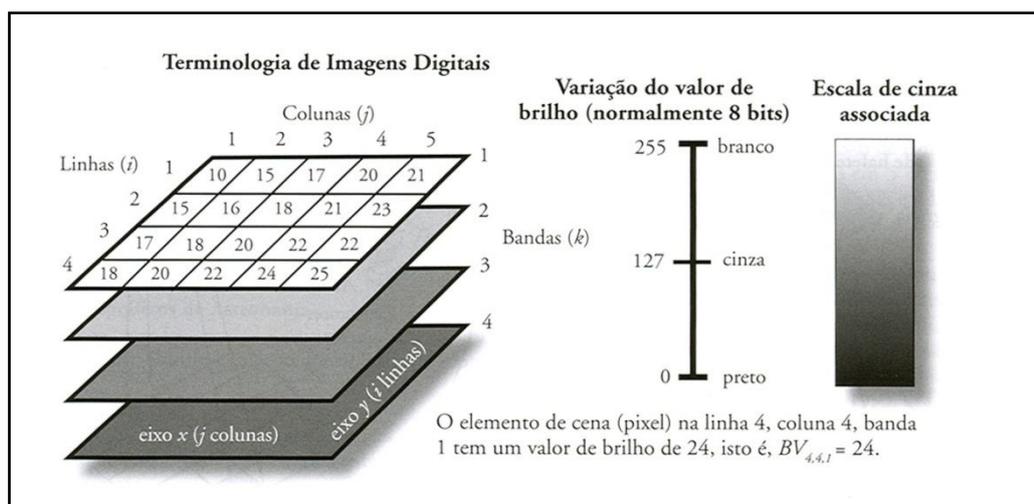


Figura 1 36 – Representação de uma imagem e valores de níveis de cinza associados. Fonte: Jensen (2009).

Como visto anteriormente, a reflectância expressa as propriedades intrínsecas dos objetos em refletir a REM sobre eles incidente e está relacionada com características físico-químicas dos objetos. Para a interpretação de imagens multiespectrais, é fundamental o conhecimento dos padrões das repostas de reflectância de diferentes tipos de materiais, sejam eles, solos, vegetação ou água. A reflectância (ρ) é obtida pela razão espectral (i.e. por comprimento de onda) entre a radiância refletida da superfície do alvo e a irradiância incidente sobre essa superfície, conforme a equação seguinte:

$$\rho = 100 \frac{L}{E}$$

onde:

ρ = reflectância, em porcentagem;

L = intensidade da energia que deixa a amostra W/m^2 ;

E = intensidade da energia incidente, W/m^2 .

Radiometria ou Espectrorradiometria de reflectância é uma técnica que tem a função de medir em diferentes comprimentos de onda a energia eletromagnética refletida da superfície dos alvos e representá-la na forma de um gráfico que se denomina curva de reflectância espectral (Steffen, 1995). Estas medidas podem ser obtidas por três modos: laboratório, campo ou uma plataforma elevada (helicóptero, avião ou satélite). A energia eletromagnética proveniente da fonte, ao interagir com a superfície do alvo por meio de trocas de energia, resultará em absorção, reflexão e/ou transmissão de parte da energia incidente. A quantidade de energia que ocorrerá nesta interação depende das propriedades físicas, químicas e biológicas do objeto e das propriedades externas, como a densidade do alvo, a temperatura da superfície, a atmosfera e o ângulo de iluminação solar.

Em sensoriamento remoto, diferentes tipos de alvos encontram-se presentes em uma cena, os quais os mais importantes são a vegetação, rochas e minerais, solos, água e outros objetos artificiais como estradas pavimentadas e edificações. A depender da interação do alvo com o objeto, a curva de reflectância indica a sua assinatura espectral, ou seja, uma feição individual ou um grupo de feições cujas formas, localizações e intensidade relativas são características de determinado material. A informação intrínseca obtida por meio de sua assinatura espectral, como consequência da composição química e da estrutura de um específico material, é modificada por condições físicas e ambientais. A aparência de uma imagem, considerando a posição do comprimento de onda e as intensidades relativas máximas e mínimas, podem fornecer informações indiretas dos processos modificadores do estado de um alvo específico. Este conhecimento refere-se aos estudos do comportamento espectral de alvos, que abrange desde as formas de aquisição, a interpretação das curvas espectrais, bem como o suporte na interpretação visual e nas técnicas de processamento digital de imagens.

1.7.3.4.3 – Comportamento espectral da vegetação

No estudo da interação da REM com a vegetação, as propriedades espectrais desta são a reflectância, a transmitância e a absortância, sendo que do ponto de vista do sensoriamento remoto a reflectância é a mais importante. O termo comportamento espectral da vegetação é designado para representar as características de reflectância da REM pelas folhas, plantas individuais e conjunto de plantas (dosséis). Os estudos que envolvem a reflectância espectral de dosséis buscam relacionar os níveis de cinza, que definem os padrões existentes em imagens orbitais de diferentes regiões espectrais, às diferentes tipologias vegetais.

As folhas constituem o elemento da vegetação que mais contribuem para o sinal detectado pelos sensores ópticos, sendo que o comportamento espectral de uma folha é função de sua composição química, morfologia e estrutura interna. Os constituintes das folhas que são considerados os mais importantes sob o ponto de vista da interação com a radiação são: celulose (encontrada nas paredes celulares), solutos (íons, moléculas), espaços intercelulares e pigmentos existentes dentro dos cloroplastos (onde se encontra a clorofila, no interior das células vegetais). Como as características das folhas são geneticamente controladas, haverá diferenças no comportamento espectral entre grupos geneticamente distintos.

Levando-se em conta o conceito de reflectância interna numa folha e os conhecimentos do espectro de absorção da clorofila, a trajetória da REM numa folha dar-se-ia ao longo de vários meios, sendo estes compostos pela água, ar e membranas celulares. Além disso, as irregularidade das células dos tecidos foliares, com estruturas orientadas em diversos ângulos, também influenciam na trajetória da REM numa folha.

A figura 1.37 ilustra estas possíveis trajetórias. Pequena quantidade de luz é refletida das células da camada superficial. A maior parte é transmitida para o mesófilo esponjoso, onde os raios

incidem freqüentemente nas paredes celulares, sendo refletidos se os ângulos de incidência forem muito grandes. Dado o grande número de paredes celulares dentro da folha, alguns raios são refletidos de volta, enquanto outros são transmitidos através da folha. Essa reflexão múltipla é um processo aleatório no qual os raios mudam de direção dentro da folha. A espessura da folha também é importante no caminho da REM, pois a transmitância é, em geral, maior do que a reflectância para folha finas e o inverso ocorre com folhas grossas.

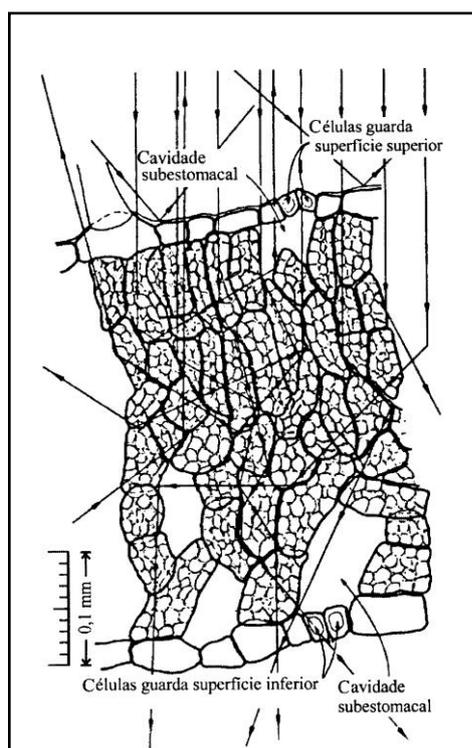


Figura 1 37 – Seção transversal de uma folha mostrando os possíveis caminhos da luz incidente. Fonte: *Gates et al.* (1965).

A assinatura espectral característica de uma folha verde é mostrada na figura 1.38. Pelo gráfico, nota-se que a região compreendida entre 0,4 a 2,6 μ m pode ser dividida em três regiões:

1- Visível (0,4 a 0,7 μ m): os pigmentos existentes nos cloroplastos dominam a assinatura espectral, os quais são: clorofila (65%), carotenos (6%) e xantofilas (29%). Estes percentuais podem variar muito de espécie para a espécie. A energia radiante interage com a estrutura foliar por absorção e espalhamento.

2- Infravermelho próximo (0,7 a 1,3 μ m): existe absorção pequena da radiação e considerável espalhamento interno da folha. A absorção da água é geralmente baixa nessa região e a assinatura

espectral é quase constante. A assinatura espectral das folhas nessa região é o resultado da interação da energia incidente com o mesófilo.

3- Infravermelho médio (1,3 a 2,6 μm): a absorção devido à água límpida predomina na assinatura espectral das folhas. A água absorve na região de 1,3 a 2,0 μm e as faixas ou bandas de absorção são: 1,1; 1,45; 1,95; 2,7 e 6,3 μm .

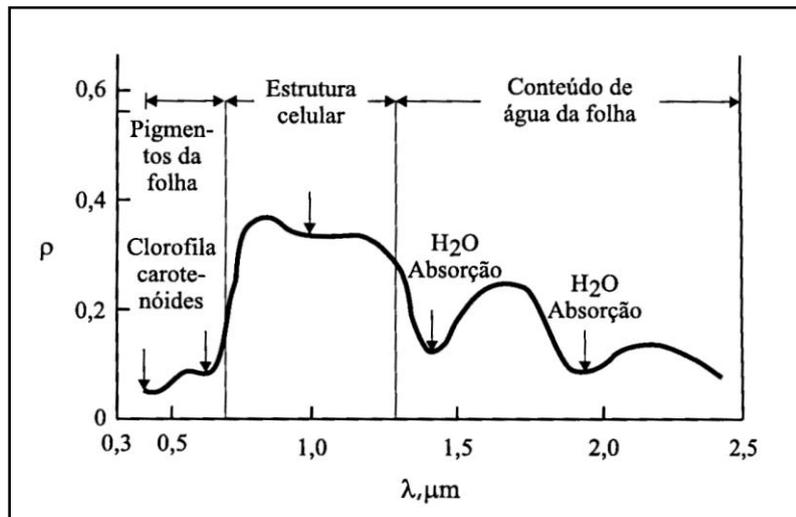


Figura 1.38 – Assinatura espectral típica de uma folha verde. Fonte: Novo (2008).

Algumas outras considerações podem ser feitas em relação ao comportamento espectral da vegetação:

- A transmitância das folhas aumenta com a infiltração de água na região do visível, provavelmente devido ao preenchimento dos espaços intermoleculares pela água, diminuindo as interfaces de reflexão;
- Na região do visível, a reflectância de uma folha decresce com a idade, o que pode ser atribuído ao desenvolvimento da clorofila, que aumenta mais rapidamente nos estágios iniciais do desenvolvimento da folha, aumentando mais lentamente nos estágios subsequentes, até que a coloração verde característica da folha seja atingida;
- A reflectância na região do infravermelho próximo aumenta para folhas mais velhas (após 12 dias) devido ao aumento de espaços intercelulares no mesófilo e a porcentagem de água nas folhas também aumenta com a idade;
- Efeitos de stress causados por insetos, doenças, problemas fisiológicos e condições ambientais adversas alteram a assinatura espectral das folhas. Folhas infestadas por fungos apresentam reflectância maior do que folhas saudáveis na região do visível, devido à perda de clorofila.

1.7.3.5– Sistema de Radar Imageador

1.7.3.5.1 - Introdução

Os sistemas de radar (*Radio Detection And Ranging* – detecção e localização por meio de ondas de rádio) são dispositivos capazes de, através das ondas de radio, detectar alvos indicando sua posição e distância. De acordo com Arhen (1995) um sistema de radar possui três funções primárias; transmite sinais de microondas (rádio) em direção a uma cena, recebe parte de energia retroespalhada e transmitida da cena e registra a intensidade (detecção) e o atraso temporal (indicação da distância) dos sinais de retorno. O radar gera um pulso para cada transmissão que é emitida pela antena e propagada para a cena. Uma fração da energia incidente é refletida de volta ao radar onde é captada pela antena (Figura 1.39).

O radar opera na faixa do espectro eletromagnético, denominada microondas (Figura 1.40) onde as ondas eletromagnéticas sofrem pequena atenuação atmosférica (Figura 1.41), com boa penetração nas nuvens; o que possibilita aquisição de imagens sob intensas condições de nebulosidade. Esta característica assume grande importância em regiões tropicais, onde a presença de nuvens é freqüente, restringindo a utilização de sensores ópticos, que dependem da iluminação solar para a aquisição de imagens.

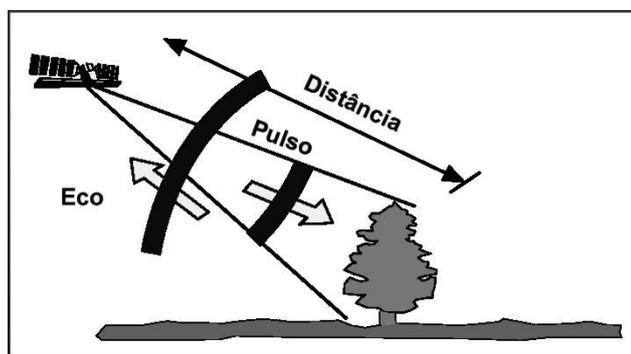


Figura 1.39 – Princípio da transmissão e recepção do eco do radar. Fonte: Arhen (1995).

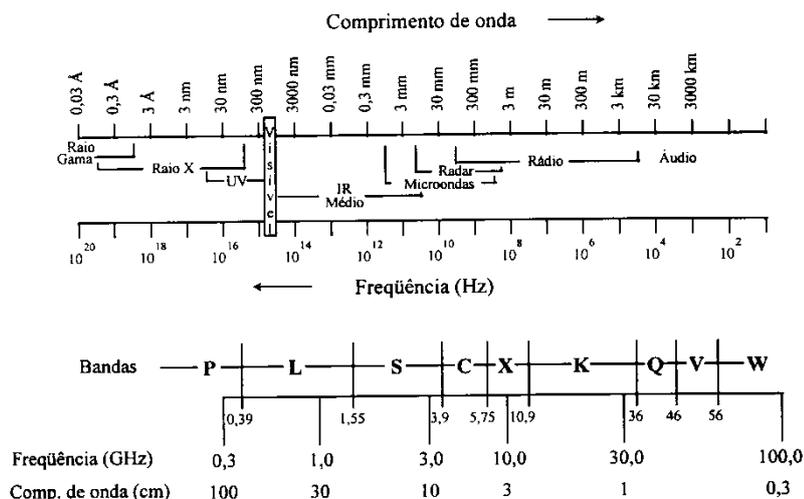


Figura 1.40 - Espectro eletromagnético mostrando as bandas da região de microondas. (Fonte: Dallemand *et al.*, 1993).

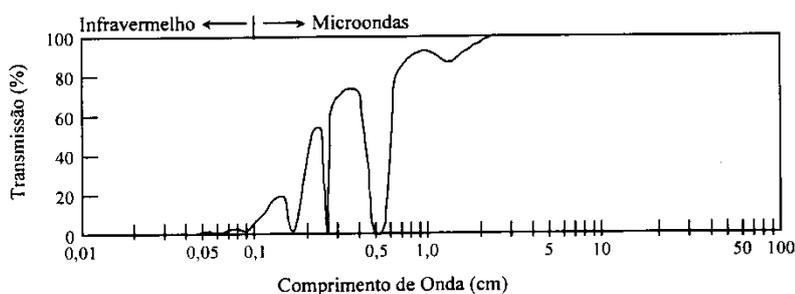


Figura 1.41 - Janelas de transmissão atmosférica para a região de microondas do espectro eletromagnético. Fonte: Curlander e Mc Donough (1991).

A geometria natural de visada de um radar imageador é lateral (Figura 1.42), de forma que a energia é emitida a um ângulo ortogonal à direção de movimento da plataforma. Assim, faixas contínuas da superfície do terreno são formadas através da iluminação paralela e oblíqua à direção do movimento da plataforma e gravadas pelo sistema. A dimensão transversal é denominada alcance (*range*) e a longitudinal, azimute. A extremidade do alcance mais próxima ao nadir denomina-se alcance próximo (*near range*) e a mais distante, alcance distante (*far range*). Em uma imagem de radar, a resolução definida nas dimensões em alcance e azimute.

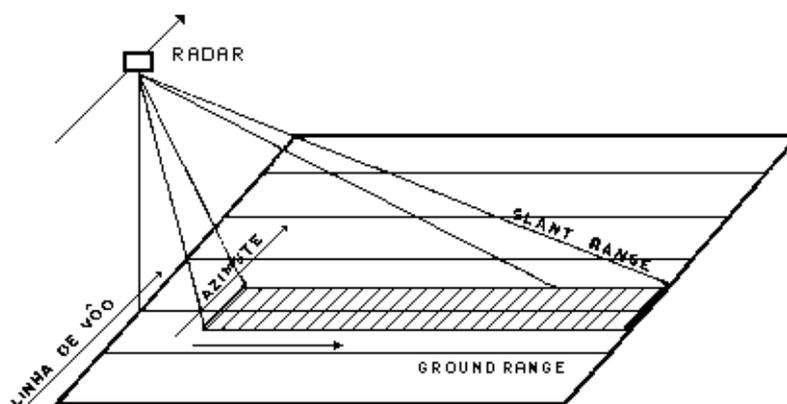


Figura 1.42 - Geometria do imageamento de radar. Fonte: Dallemand *et al.* (1993).

Os radares imageadores são classificados em dois tipos: os de abertura real (RAR *Real Aperture Radar*) e os de abertura sintética (SAR – *Synthetic Aperture Radar*). Os primeiros apresentam resolução espacial em alcance (*range*) controlada pelo pulso da radiação emitida e em azimute pela largura do feixe de iluminação, o qual é limitado pelo tamanho da antena, isto é, só se melhora a resolução em azimute com o aumento da dimensão da antena. Os radares de abertura sintética baseiam-se na melhoria da resolução em azimute através da técnica de compressão de pulsos, sendo estes, normalmente modulados linearmente em frequência. O SAR utiliza a informação de uma seqüência inteira de pulsos ao longo da direção de azimute para produzir uma faixa imageada, diferentemente do RAR que utiliza somente um pulso. O SAR usa o efeito Doppler (baseado no deslocamento da plataforma) e o histórico das mudanças de fase a ele associado para simular uma antena, cujo comprimento é muitas vezes maior do que o da antena real. A resolução em azimute no SAR é independente da largura do pulso transmitido e é aproximadamente igual à metade do tamanho físico da antena (Ulaby, 1982).

1.7.3.5.2– Parâmetros do sensor

1.7.3.5.2.1 – Resolução e Ângulo de Incidência

O conceito de resolução espacial em um radar de visada lateral deve ser considerado segundo as dimensões de alcance e azimute. A resolução de alcance de um SAR está limitada à construção do radar e do processador. O que controla a resolução em alcance é o comprimento do pulso radiado, pulsos mais curtos resultam em uma resolução “maior”. Ele determina a distância na qual dois objetos devem estar separados de modo a serem detectados. A resolução em azimute é determinada pela largura do feixe de microondas radiado, o qual é função da dimensão física da antena, ou sua abertura. Para que dois alvos sejam discriminados na imagem, devem estar separados em azimute por uma distância superior à largura do feixe no solo (Figura 1.43).

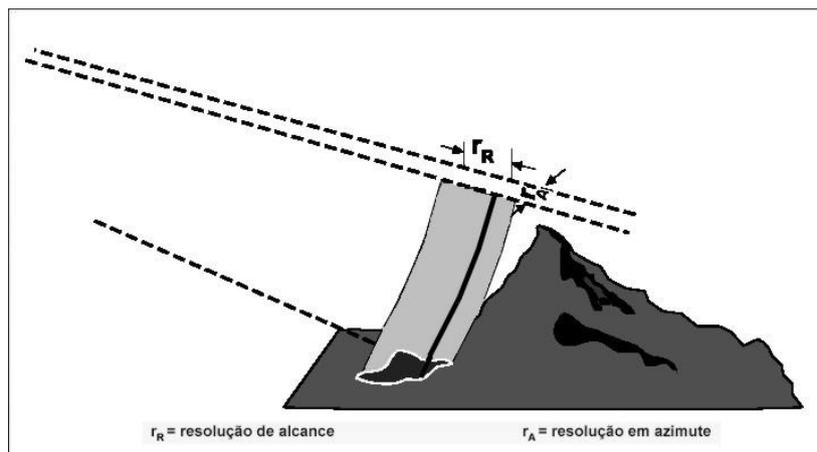


Figura 1.43 – Resolução em alcance e resolução em azimute do radar. Fonte: Ahern (1995).

Os principais parâmetros angulares associados à geometria de visada lateral de um SAR são mostrados na figura 1.44. Define-se o ângulo de incidência como a normal entre o alvo e a superfície. O ângulo de depressão é medido no sensor e corresponde ao ângulo entre o traço do plano horizontal e o feixe de radar da antena para a superfície. O ângulo de visada é o complemento do ângulo de depressão. O ângulo de incidência é medido no alvo (terreno) e quando a superfície é horizontal, ele é o complemento do ângulo de depressão e igual ao ângulo de visada. Para uma superfície inclinada (situações reais) esta relação complementar não se aplica. O azimute de visada ou direção de visada é definido como o ângulo entre o norte geográfico e a direção de apontamento do feixe de iluminação do radar, isto é, perpendicular à direção de movimento da plataforma (traçado da órbita).

O controle do ângulo de incidência é fundamental para o realce topográfico. Em uma imagem, o realce de estruturas menores é função do ângulo de incidência. Normalmente, terrenos planos requerem baixos ângulos de incidência para a maximização de variações topográficas. Já os relevos acidentados são realçados sob ângulos de incidência elevados, produzindo, por outro lado, sombreamentos intensos, que acarretam perda de informação de outros alvos presentes na cena.

Os efeitos de processos geológicos de longa e de curta duração na superfície terrestre são expressos como variações maiores de natureza composicional entre tipos de rochas (diferenças litológicas) como também, através de variações mais sutis dentro das variações litológicas (fácies sedimentares, estruturas sedimentares, fases ígneas, alteração hidrotermal, etc.), de produtos do intemperismo e solos e finalmente, das diferenças na configuração geomórfica da superfície. O mapeamento litológico potencialmente pode fornecer informação crucial para aplicações geológicas, particularmente no levantamento de recursos naturais não renováveis (Werle, 1988).

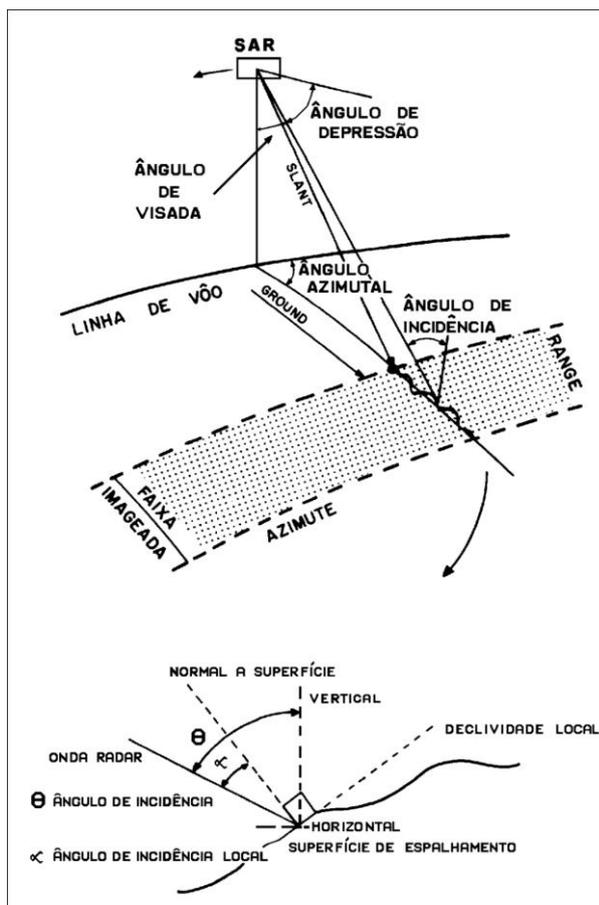


Figura 1.44 – Geometria dos elementos de visada no radar imageador. Fonte: Lowman *et al.* (1987).

1.7.3.5.2.2 – Frequência

Como visto anteriormente, os sistemas de radares operam na faixa das microondas do espectro eletromagnético, e a maioria funciona entre 0,5 e 75cm. Nestes intervalos, as bandas têm sido referenciadas por letras para facilitar a identificação, conforme mostrado na figura 1.45. A capacidade de penetração através das nuvens ou de uma camada superficial de um alvo aumenta com comprimentos de onda maiores. Os radares que operam em comprimentos de onda superiores a 4cm não são afetados pelas condições atmosféricas como nuvens, brumas.

Em relação às rochas e aos seus produtos de alteração, a maioria das superfícies de rochas aparece rugosa (micro-topografia) para comprimentos de ondas mais curtos (bandas X e C) e tende a favorecer estudos de desertificação e de ambientes sedimentares (NASA, 1988). Por outro lado, para bandas de maior comprimento (L e P), ocorre maior penetração na superfície de alteração de rochas e solos, sensíveis ao intemperismo em ambientes mais áridos, ou maior penetração na cobertura vegetal, o que pode favorecer abordagens geobotânicas.

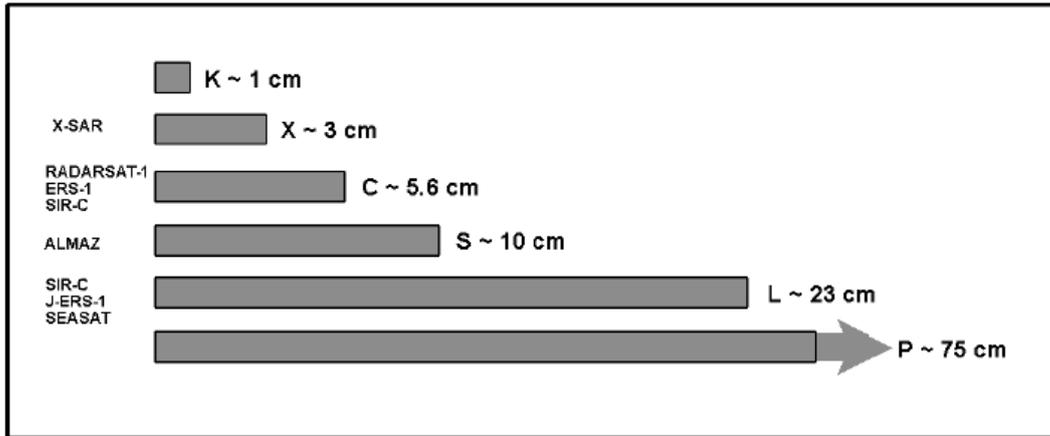


Figura 1.45 – Comprimentos de onda do radar. Fonte: Ahern (1995)

O ideal é que aplicações com SAR ocorram com a maior variedade de frequências, já que os dosséis são normalmente compostos de uma grande gama de dimensões de espalhadores ou difusores (folhas, ramos, caules, troncos), dispostos em várias orientações (Van der Sanden & Hoekman, 1999). A Figura 1.46 exemplifica a resposta ideal esperada de radar em diferentes comprimentos de onda, em função do tamanho dos principais difusores que constituem o dossel. O que se observa é que o radar, para um dado comprimento de onda, é sensível aos difusores cujas dimensões são daquela magnitude. Além da geometria do dossel, o retroespalhamento depende do conteúdo de umidade e do índice da área foliar.

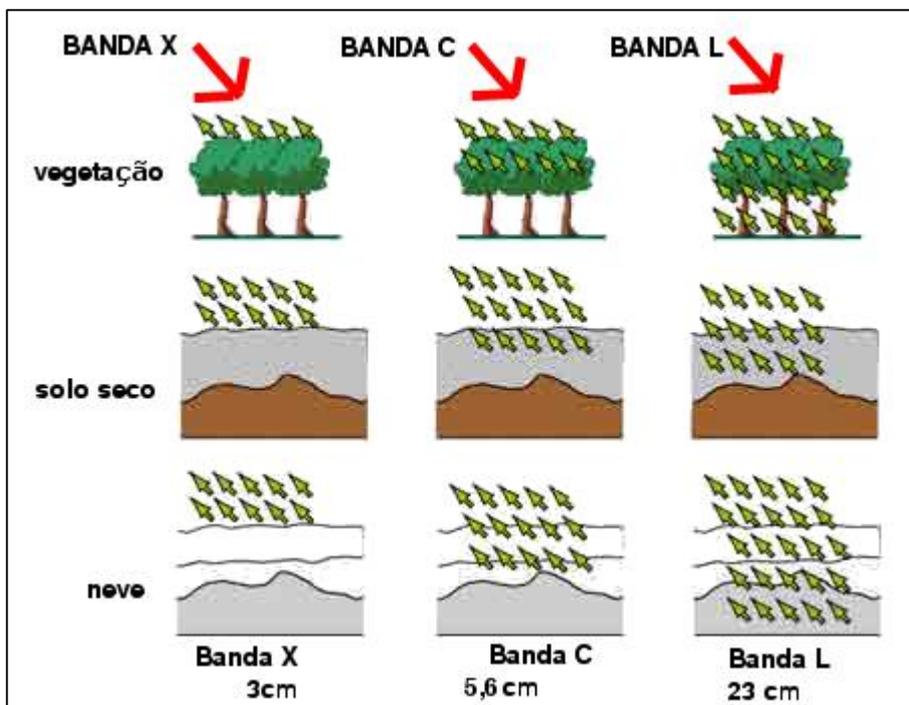


Figura 1.46 - Esquema da interação de frequências disponíveis em sistemas de radar com os estratos da cobertura vegetal e solo seco. Banda X (3 cm), Banda C (6 cm) e Banda L (23 cm). Fonte: NASA (1988).

Para a biomassa foliar, tipo de vegetação e suas condições, comprimentos de ondas menores (bandas X e C) e elevado ângulo de incidência apresentam melhor resposta, pois os espalhamentos de topo de dossel e de volume predominam. Por outro lado, para realce de biomassa lenhosa (troncos), o retorno das bandas L e P são mais fortes. Já o conteúdo de umidade do dossel é mais bem caracterizado através dos dados SAR banda X, onde a contribuição do espalhamento do terreno é minimizada. Por outro lado, o estado da interface superfície/vegetação é beneficiado com imageamentos nas bandas L e P, quando a contribuição do dossel é minimizada.

1.7.3.5.2.3 Polarização

A polarização no imageamento de radar define a orientação, fase relativa e repetibilidade dos campos elétricos e magnéticos das ondas eletromagnéticas. As antenas de um sistema de radar de sensoriamento remoto são construídas para transmitir e receber a radiação eletromagnética polarizada vertical ou horizontalmente. Dessa forma, os radares são de polarização paralela hh quando emitem e recebem energia horizontalmente polarizadas, de polarização vv quando emitem e recebem energia verticalmente polarizada e de polarização cruzada hv, quando emite com polarização horizontal e recebe a energia retro-espalhada com polarização vertical e vice-versa para polarização vh (Figura 1.47).

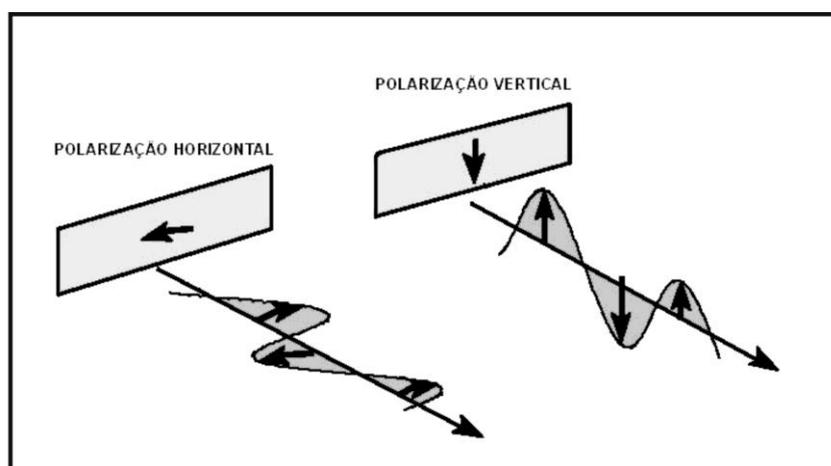


Figura 1.47 – Polarização hh e vv de um radar. Fonte: Ahern (1995).

Os ecos de um radar são mais intensos na polarização paralela e mais fracos na polarização cruzada. Na polarização paralela (hh e vv), as respostas mais intensas ocorrem quando os difusores são orientados na mesma direção da polarização da onda incidente. O retro-espalhamento de polarização cruzada resulta de múltiplos espalhamentos associados à difusão de volume (dossel de vegetação) e de múltiplas interações de retorno (*double bounce*), associados com refletores diédricos naturais, tais como afloramentos de rochas, barrancos nas bordas de rios, etc. Deste modo, as imagens de

polarização cruzada, embora com sinais de retorno mais fracos, podem estar vinculadas a informações valiosas sobre características de dosséis, estruturas e composições de rochas.

Os dados multipolarizados podem ser usados de modo análogo aos dados multi-espectrais do espectro óptico, como novas bandas que facilitem o reconhecimento de feições no terreno e a discriminação entre alvos na superfície. Superfícies rugosas, com constante dielétrica elevada, podem contribuir para o espalhamento múltiplo com um componente de polarização cruzada no sinal de retorno. Para estudos geobotânicos, vv é mais indicada para observações de caules e troncos e hh realça a estrutura do dossel horizontal. Já a polarização cruzada é importante como indicador de múltiplos espalhamentos, que podem estar vinculados com a biomassa foliar.

Em alicações geológicas, imagens adquiridas com polarização hh são mais usadas, sendo que as polarizações hh ou vv são de 10 a 15% mais intensas que os retornos com polarizações cruzadas (hv ou vh). Imagens com polarizações paralelas (hh ou vv) exibem um intervalo dinâmico maior e uma melhor relação sinal-ruído em relação às observadas em polarizações cruzadas. A polarização hh é melhor do que a vv devido a sua melhor capacidade de penetração em materiais superficiais como areias (secas) de ambientes desérticos e principalmente porque a configuração da maior parte dos materiais superficiais, particularmente de rochas, é dominada por componentes horizontais (Werle, 1988).

1.7.3.5.3– Parâmetros do alvo

1.7.3.5.3.1 – Tonalidade

A potência recebida pelos parâmetros do alvo e os parâmetros do sensor, por uma sistema ativo pode ser descrita pela equação do radar (Colwell, 1983), descrita abaixo:

$$W_r = \frac{W_t G_t}{4\pi R^2} \sigma \frac{1}{4\pi R^2} A_r$$

onde:

W_r = potência recebida;

W_t = potência transmitida;

G_t = ganho da antena na direção do alvo;

R = distância entre o radar e o alvo;

σ = seção transversal do radar; área efetiva de retroespalhamento do alvo, isto é, seção transversal de uma esfera que quando localizada na mesma posição que o alvo, espalharia de volta ao radar a mesma quantidade de energia como a que é retornada pelo alvo;

A_r = área receptora efetiva da abertura da antena do radar e

$1/4\pi R^2 =$ espalhamento isotrópico.

A maior parte das aplicações em geociências envolve alvos extensos, usualmente maiores que uma célula de resolução, e sendo assim, define-se uma seção transversal diferencial média ou seção transversal por unidade de área e considera a intensidade média do retorno. Esta seção transversal diferencial média é conhecida por coeficiente de retroespalhamento e comumente denotada por σ^0 . A equação do radar pode ser escrita então de forma simplificada. Portanto, para um alvo perfeitamente isotrópico e sem perdas, em função da potência média recebida do alvo W_{ar} , e de σ^0 , tem-se:

$$W_{ar} = \frac{W_t \lambda^2 G_0^2 A_p \sigma^0}{(4\pi)^3 R^4}$$

onde:

W_{ar} = potência média recebida pela antena;

W_t = potência transmitida;

λ = comprimento de onda do radar;

G_0^2 = ganho máximo da antena e

σ^0 = coeficiente de retroespalhamento (*backscatter*).

Detalhes sobre as formalidades matemáticas relacionadas ao σ^0 podem ser encontradas em Ulaby et al. (1986). O que é de interesse notar pela equação acima é que σ^0 é diretamente proporcional à potência recebida pela antena e que esta sofre uma perda proporcional a R^4 . O coeficiente de retroespalhamento σ^0 é adimensional ($m^2.m^{-2}$), exibindo um intervalo dinâmico amplo de magnitude usualmente expresso em decibéis : σ^0 (dB) = $10 \log \sigma^0$ (m^2m^{-2}) (JPL, 1986).

O nível de cinza de uma imagem de radar está relacionado ao retroespalhamento de forma que, após o processamento digital, o produto de saída de uma imagem de radar é uma imagem digital composta de um arranjo bidimensional de *pixels*. A intensidade (também chamada tom ou nível de cinza) ou número digital (*digital number*) $DN(i, j)$ do *pixel* (i, j) está relacionada à potência retroespalhada W_r da célula do terreno correspondente por:

$$DN(i, j) = a \sqrt{w_r(i, j)} + b$$

onde a e b são constantes conhecidas.

A potência recebida W_r é diretamente proporcional ao coeficiente de retroespalhamento σ^0 (i, j) da célula do terreno, isto é:

$$W_r(i, j) = K(j) \sigma^0(i, j)$$

onde $K(j)$ é um fator do sistema dependente do *range* que incorpora a potência transmitida, o *range* ao alvo, a área da célula no terreno e a função do ganho da antena.

Já as variações na tonalidade de uma imagem de radar resultam das mudanças da energia retroespalhada vinda dos alvos contidos no terreno. As mudanças no retroespalhamento médio da seção transversal σ^0 para um dado alvo influencia fortemente o tom de cinza e conseqüentemente sua interpretação. σ^0 é função de vários parâmetros, os quais são:

$$\sigma^0 = f(\lambda, \phi, P, \theta, \varepsilon, \Gamma_1, \Gamma_2, V)$$

onde os parâmetros do sistema sensor são:

λ = comprimento de onda do radar;

ϕ = ângulo de incidência;

P = polarização da onda incidente e

os parâmetros do terreno são:

θ = ângulo de aspecto (incidente local);

ε = constante dielétrica complexa;

Γ_1 = rugosidade superficial em micro-escala do limite sólido-ar relativo ao comprimento de onda do radar;

Γ_2 = sub-superfície de uma camada com descontinuidade, que o sinal do radar pode penetrar e

V = coeficiente de espalhamento de volume complexo.

A determinação de qual destes parâmetros causam mudanças na tonalidade de uma imagem é muito complexa. No entanto, isto pode ser facilitado através de informações do terreno (dados de campo) e das propriedades superficiais, aliadas à imagens com multiparâmetros (comprimento de onda, polarização, resolução espacial), dados de outros sensores ou uma combinação entre estes. Desta forma, a interpretação visual de imagens de radar, tenta-se inferir o significado das feições através das variações tonais contidas na cena e a tonalidade é analisada não de forma isolada, mas através de uma aproximação relativa de um nível tonal discreto (Simonett & Davis, 1983).

1.7.3.5.3.2 - Textura

Na interpretação visual de imagens de sensoriamento remoto; feições espectrais, texturais, temporais e contextuais são os quatro elementos importantes de padrões usados, e também em imagens de radar. As feições espectrais descrevem as variações tonais médias banda a banda numa

imagem multi-espectral, enquanto que as texturais, a distribuição espacial dos valores tonais numa banda. Já as feições contextuais contêm informações sobre o arranjo relativo de segmentos grandes pertencentes a diferentes categorias e feições temporais descrevem mudanças nos atributos da imagem em função do tempo (Frost *et al.*, 1984).

A textura constitui uma característica importante em análises de diversos tipos de imagens, desde aquelas obtidas de *scanners* multi-espectrais através de aeronaves ou satélites (com aplicação em sensoriamento remoto), até imagens de culturas de células ou amostras de tecido (com aplicação na área de biomédicas). Embora os métodos de análise de textura sejam muito utilizados, não há uma apresentação formal e nem uma definição precisa do termo. As técnicas de discriminação de textura desenvolvidas se aplicam para este propósito, já que os métodos de caracterização da textura encontrados na literatura são baseados na intuição e percepção de cada autor (Haralick, 1979).

A textura está intrinsecamente ligada a tonalidade e, em determinadas circunstâncias uma pode dominar a outra. Esta relação pode ser entendida da seguinte forma: quando uma área pequena de uma imagem tem pouca variação de níveis de cinza, a propriedade dominante é a tonalidade, caso contrário, a propriedade dominante é a textura (Haralick, 1979).

Numa imagem de radar, a textura pode ser dividida em três componentes (Dallemand *et al.*, 1993):

- a) micro-textura ou ruído *speckle*: ocorre sob a forma de grãos do mesmo tamanho ou mais largo do que um elemento de resolução e é inerente ao sistema do radar;
- b) meso-textura: variação natural da média do retro-espalhamento na mesma escala de um elemento de resolução (*pixel*);
- c) macro-textura: variações no brilho das imagens de radar que se estendem por muitos elementos de resolução.

A textura pode apresentar uma orientação e esta se relaciona à disposição da direção das áreas claras e escuras. Se estas não possuem uma orientação preferencial e são equidimensionais, a textura é isotrópica, caso contrário, se as áreas se dispõem de forma alongada em uma direção preferencial, a textura é anisotrópica. A geometria de anisotropia dos elementos de uma imagem pode variar de acordo com o arranjo da orientação. Regiões de cultivo, por exemplo, apresentam anisotropia paralela; formações rochosas diaclasadas mostram anisotropias em várias direções e estruturas geológicas dômicas indicam anisotropias curvilíneas (Rubin, 1989).

Outro aspecto importante a ser considerado em análises texturais é a resolução espacial do sensor. Quando esta é menor que os alvos de interesse contidos na cena, a maioria das medidas (números digitais) da imagem são altamente correlacionadas com as de sua vizinhança. No entanto, se

o tamanho dos objetos se aproxima da resolução espacial do sensor, há uma diminuição das semelhanças entre medidas vizinhas. E quando a resolução espacial do sensor diminui vários objetos podem ser encontrados num único *pixel*, tornando as medidas uniformes (Woodcock *et al.*, 1987). Assim, a textura observada na banda pancromática do sensor HRV-SPOT, com resolução espacial de 10m, não é distinguida numa imagem do sensor AVHRR-NOAA, com resolução espacial de 1,1Km (Mather, 1987).

Além da variação tonal e da resolução espacial, análises de textura em imagens de radar estão fortemente condicionadas à resolução radiométrica do sensor. Se as resoluções radiométrica e espacial são degradadas, a separabilidade entre as classes também se degrada com a textura (Frost *et al.*, 1984).

1.7.3.5.3.3 - Rugosidade Superficial

A rugosidade superficial, no contexto de imagens de radar, refere-se ao micro-relevo ou micro-topografia e este pode modular o retorno de radar em terrenos planos. A dependência do coeficiente de retro-espalhamento com superfícies de rugosidades variáveis e o ângulo de incidência local é mostrada na figura 1.48, assumindo-se que o datum topográfico é plano. Pela figura, nota-se que pequenas mudanças no ângulo de incidência, menores que 20° a 25° resultam em mudanças relativamente grandes na intensidade do retorno (NASA, 1988).

A rugosidade de uma superfície no terreno influencia fortemente a intensidade do retorno do radar (Sabins, 1978). Ela se distingue do relevo topográfico, que é medido em metros e centenas de metros (macrotopografia); referindo-se à rugosidade superficial determinada pelas feições texturais superficiais, medidas em milímetros ou centímetros (microtopografia).

As superfícies são geralmente caracterizadas em três tipos:

- a) Lisa: reflete toda a energia incidente do radar com o ângulo de reflexão igual e oposto ao ângulo de incidência;
- b) Intermediária: reflete parte da energia incidente e espalha uma porção em todas direções e
- c) Rugosa: espalha a maior parte da energia em todas as direções.

A rugosidade está relacionada ao comprimento de onda do radar e ao ângulo de depressão, através do critério de Rayleigh, dado por:

$$h < \frac{\lambda}{8 \text{ sen } \gamma}$$

onde:

h = altura das rugosidades ou rugosidade superficial medida em cm;

λ = comprimento de onda do radar (em cm) e

γ = ângulo de depressão (em graus).

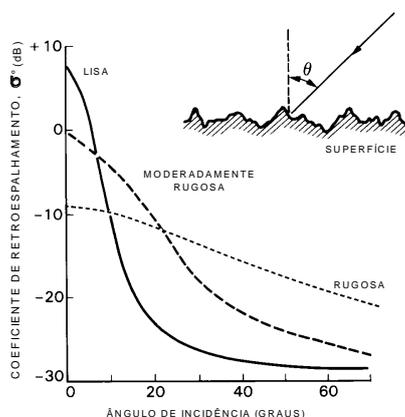


Figura 1.48 – Curvas típicas de retro-espalhamento para superfícies lisas, moderadamente rugosas e muito rugosas. Fonte: NASA (1988).

Como o critério de Rayleigh não leva em consideração superfícies intermediárias entre uma superfície lisa e uma rugosa, Peake e Oliver (1971), estabelecem um critério onde uma superfície é considerada:

lisa se:

$$h < \frac{\lambda}{25 \sin \gamma}$$

e rugosa se:

$$h > \frac{\lambda}{4,4 \sin \gamma}$$

Outra característica importante da rugosidade superficial é que ela, comum importante atributo na análise do terreno, está frequentemente relacionada com o substrato geológico. Processos de alteração de rochas, variação de composição e textura de horizontes superficiais de solos ou associações de vegetais tendem a causar variações na rugosidade do terreno. Assim, a intensidade do sinal em imagens SAR é normalmente usada por geólogos para inferir a rugosidade superficial de unidades no terreno. Considerando a classificação granulométrica de sedimentos (cascalho, areia, silte e argila), radares em diferentes frequências podem ser muito valiosos na determinação da natureza dos depósitos sedimentares (Colwell, 1983).

1.7.4– Aplicações geoambientais de sensoriamento remoto multiespectral e radar.

O uso da tecnologia do sensoriamento remoto assume grande importância no levantamento de informações ambientais de uma determinada região, com minimização de custos de campanhas de

campo, especialmente na região amazônica. O conhecimento prévio das características geoambientais da jazida, na etapa de pesquisa mineral, pode minimizar impactos relacionados à erosão pela água e pelo vento; por meio de indicações de áreas mais favoráveis para abertura de picadas, realização de sondagens e escavações de poços. A capacidade de realce do relevo, propiciada pelas imagens de radar, juntamente com as características das imagens multiespectrais pode propiciar melhor conhecimento dos aspectos fisiográficos e físico-químicos dos diversos alvos presentes na área.

A integração de radar com dados ópticos, em ambientes como o de Carajás, fornece um produto de valor agregado, no qual as variações de matiz correspondem às respostas espectrais controladas pela composição físico-química da cobertura vegetal (baixos valores de reflectância no espectro visível controlados por absorções de clorofila e carotenóides; elevada reflectância na região do infravermelho próximo (0,75 -1,35 μ) causada por interações entre a estrutura interna das folhas e a radiação eletromagnética; e diminuição da resposta espectral para o infravermelho (1,35 - 2,35 μ) devido a influência de conteúdo de água no tecido foliar. Neste produto integrado, radar contribui com a informações texturais devido à macro-topografia (intensidade do retroespalhamento controlada por mudanças decamétricas de declividade topográfica) e a micro-topografia (variações de rugosidade na escala do comprimento de onda do SAR).

A informação fornecida pelo radar reflete a natureza elétrica e geométrica dos alvos contidos no terreno, o que a torna importante na obtenção de dados geológicos. A alta sensibilidade de realce do relevo (macrotopografia) e da rugosidade superficial do terreno (microtopografia), além da cobertura vegetal e das propriedades dielétricas de materiais, em grande parte ligada ao conteúdo de umidade constituem aspectos muito importantes para o geólogo, pois estão relacionadas à litologia, à estruturas, aos fenômenos geobotânicos e geomorfológicos. A extração das informações que as imagens de radar podem fornecer apresenta um enorme potencial em mapeamentos geológicos e geoambientais, principalmente quando são utilizadas várias combinações de comprimento de onda, ângulos de incidência e polarização (JPL, 1986).

Estas características do radar imageador fazem com que ele seja amplamente utilizado em grandes projetos de mapeamento de recursos naturais renováveis e não renováveis. Imagens de radar têm sido utilizadas em investigações geológicas em ambientes de florestas tropicais chuvosas da América Central, América do Sul e Sudeste Asiático. O uso do radar nestas regiões serve como dado básico no reconhecimento geológico, na pesquisa mineral e na exploração de hidrocarbonetos, bem como nos estudos geomorfológicos, florestais e na preparação de mapas topográficos (Werle, 1988).

A detecção das feições morfológicas é fundamental em investigações geológicas, tanto em mapeamentos geológicos, prospecção mineral, estudos geotécnicos e geoambientais. Nos sensores ópticos (TM-LANSAT e HRV-SPOT), as informações obtidas do espectro óptico estão relacionadas

às características físico-químicas dos alvos. Isto torna as informações obtidas por ambos sensores complementares, constituindo um modo valioso de obtenção de dados a um custo relativamente baixo.

Um problema comum para qualquer planejamento ou estudo ambiental é a acurácia da informação no que diz respeito ao uso e ocupação do solo. Sem isto, corre-se o risco de não haver validação dos estudos e de se tomar decisões incorretas em processos de gestão ambiental. No caso de abertura de uma mina a céu aberto, os impactos ambientais mais proeminentes, mas não únicos em função dos vários tipos de áreas de influência de uma mineração (Martins Jr. *et al.*, 2006c), estão relacionados às configurações da cava, da barragem de rejeito e da pilha de estéril (Ripley *et al.*, 1996).

O uso de imagens ópticas (LANDSAT/TM), cujas características de imageamento fornecem informações sobre as características físico-química dos alvos, tais como, vegetação, solo, hidrografia e rochas, complementam as informações obtidas pelas imagens de radar. A interpretação dos produtos gerados a partir do processamento digital de imagens de radar, para mapeamentos geológicos-geomorfológicos, é baseada nos procedimentos similares aos usados para interpretação de dados ópticos orbitais ou aerotransportados Trevett (1986). No entanto, as diferenças entre estes dois tipos de produtos, no que diz respeito à aquisição e à geometria da imagem; bem como os fatores que influem nas respostas dos alvos da região de microondas, diferem totalmente daqueles das porções do visível e do infravermelho próximo.

Embora a textura seja um importante atributo usado em interpretação de imagens de sensoriamento remoto, são poucas as aplicações desta propriedade na caracterização da cobertura superficial, quanto em mapeamentos geológicos. Ainda assim, a eficácia das técnicas de análise texturais pode ser comprovada em Shanmugan *et al.* (1981), que conseguiram discriminar quatro unidades litológicas através das informações texturais extraídas de dados SAR SEASAT. Seis medidas derivadas da MCNC foram utilizadas (uniformidade, contraste, correlação, entropia, momento da diferença inversa e probabilidade máxima) e mostraram o potencial de discriminação para alvos geológicos, especialmente em imagens que apresentem boas resoluções espaciais.

Em outra abordagem com aplicação geológica, Frost *et al.* (1984) trabalharam com medidas derivadas da matriz de co-ocorrência dos níveis de cinza em imagens de radar SEASAT (banda L - 23,5cm). No mesmo trabalho, os autores utilizaram imagens SAR simuladas em três diferentes configurações de direção de vôo e constataram que a orientação da trajetória e a disposição das feições no terreno influenciaram as feições de textura obtidas. Isto se justificou em função da natureza estruturas a mono-estática do imageamento por radar, ou seja, a mesma superfície imageada aparecia totalmente distinta em dois diferentes ângulos de visada.

Em relação ao uso do solo, Ulaby *et al.* (1986) trabalharam com imagens SEASAT (banda L, 16 *looks*) e selecionaram duas medidas de 2ª ordem (contraste e homogeneidade) e comprovaram que usando apenas a informação tonal, o resultado obtido na classificação produziu 50% de precisão nas classes de uso analisadas. Ao usarem estatísticas de 2ª ordem, os autores verificaram resultados melhores que os anteriores, obtendo um percentual de 80% para cada medida classificada separadamente e de 88% para as medidas classificadas combinadas. Em imagens SIR-A de 24 *looks*, os mesmos autores ao tentarem discriminar 5 tipos de florestas, obtiveram resultados com precisão de 90%, utilizando a informação tonal combinada com a textura (média e contraste).

Azzibrouck *et al.* (1997) utilizaram 12 parâmetros texturais derivados da MCNC (homogeneidade, contraste, dissimilaridade, média, desvio padrão, entropia, energia, correlação, vetor diferença da energia, vetor diferença da entropia, vetor diferença da média e vetor diferença do contraste) em uma imagem RADARSAT (banda C, polarização hh, *wide mode*). Uma classificação não supervisionada foi realizada com a utilização destas medidas, permitindo a separação das unidades litológicas da área. Os autores observaram ainda que uma análise das texturas permitiu evidenciar os diferentes contrastes morfológicos da imagem associados às unidades litológicas.

Medidas de textura derivadas da MCNC (contraste, energia, dissimilaridade e homogeneidade), através de imagens de radar JERS-1 (Banda L – hh), na caracterização de mineralizações do tipo *placers* da Província Mineral do Tapajós (Pedroso *et al.*, 1998). Através de classificações não supervisionadas, o autor avaliou o desempenho destes parâmetros texturais nas imagens originais (com a resolução espacial original) e em imagens subamostradas (com a resolução espacial degradada pela metade). Os resultados obtidos nestas últimas, ao contrário do esperado, foi melhor em relação às primeiras.

Em Carajás, uma pesquisa realizada na jazida de N1 com dados de radar SAREX '92 (Banda C – hh e vv) e uma RADARSAT-1 Fine (Banda C – hh) em N1 através de descritores numéricos de textura extraídos de primeira e de segunda ordem (GLCM) e usados em classificações supervisionadas. Os resultados prévios desta investigação prévia indicaram que as unidades lateríticas mineralizadas em ferro podem ser discriminadas, somente através de imageamentos por aeronave Morais *et al.* (2002). O desempenho da classificação com a imagem orbital Fine foi considerado muito pobre e o ruído da granulação (*speckle*) teria representado um papel importante neste baixo desempenho. A degradação que este ruído provoca na cena se reflete nas imagens derivadas de textura e consequentemente, no baixo desempenho das classificações texturais.

Em relação aos dados ópticos, o uso de imagens de sensoriamento remoto integradas, SPOT e TM/LANDSAT para solucionar problemas relacionados à proteção ambiental em uma área de mineração desativada na Espanha, são avaliadas por Rigol e Chica-Olmo (1998). A aplicação de técnicas de processamento digital de imagens, tais como IHS, é analisada para criar produtos de

imagens com alta resolução, focando particularmente em áreas mineradas abandonadas, onde se extraíam ouro, argilas industriais e alunita. A utilização destas técnicas beneficia a interpretação visual de dados, onde é desejável ter o máximo de da informação espectral quanto possível, sem perda de informação espacial. Os resultados obtidos mostraram que a qualidade das imagens integradas é superior às das imagens originais. A resolução espacial das imagens é melhorada e a interpretação das características morfológicas e estruturais do terreno é fortemente realçada nas imagens integradas.

Em uma aplicação de dados ópticos integrados com dados de radar, Metternicht & Zinck (1998) estimam as degradações da superfície e a erosão dos solos em uma região dos Andes na Bolívia. Os autores constataram que heterogeneidades no terreno, em função de áreas mais erodidas, acarretaram variações na rugosidade superficial, com valores variados de retroespalhamento. Além disso, combinações entre imagens TM/LANDSAT e JERS-1 produziram um bom resultado na classificação para extrair as diferentes classes de vegetação, apresentando acurácia acima de 90% para a maioria das classes.

Abordagens com imagens de radar aerotransportadas multi-frequênciais, multi-polarizadas são raras na literatura, dado o alto custo de aquisição destes dados. Van der Sanden & Hoekman (1999) avaliaram o potencial de imagens de radar aerotransportadas, com as bandas X, C, L e P, para extração de tipos de cobertura em floresta tropical. Os autores demonstraram que os atributos texturais extraídos da MCNC (Matriz de Co-ocorrência dos Níveis de Cinza) foram mais eficientes na discriminação de diferentes tipos de uso em áreas de floresta na Guiana e na Colômbia, em detrimento do retroespalhamento e das informações polarimétricas.

Em relação à rugosidade superficial, Dierking (1999) apresenta uma síntese sobre a caracterização quantitativa da rugosidade de terrenos geológicos. Três escalas de rugosidade do terreno podem ser consideradas em imagens SAR: macrotopografia, microtopografia, e a região intermediária escala entre estes dois regimes. De acordo com o autor, a macrotopografia está relacionada com mudanças ondulações ampla do terreno, geralmente relacionadas com estruturas geológicas, com características de erosão e geomorfologia (padrões de textura muitas vezes maior do que a célula de resolução do sensor). A microtopografia compreende variações de altura e comprimentos de onda comparáveis ao comprimento de onda do radar e determina a intensidade e o tipo (espalhamento único ou múltiplo) do sinal de radar. Os efeitos intermediários escala não são bem conhecidos, mas afetam a topografias de pequeno e grande escala.

Zribi & Dechambre (2002) utilizando dados de RADARSAT-1, SIR-C e ERASME (helicóptero operando nas bandas C e X, polarização hh e vv) desenvolveram uma modelagem empírica que permite extrair os parâmetros de superfície medidos pelo de radar. Nesta modelagem, um novo parâmetro leva em consideração o efeito da altura e da declividade do terreno. Os autores

verificaram que radar, operando em duas configurações de ângulo de incidência, melhora a caracterização dos parâmetros do solo, como a rugosidade superficial.

O uso das propriedades texturais extraídas das imagens de radar aerotransportadas, banda-C, polarizações hh e vv, para mapeamento de detalhe da cobertura superficial da crosta laterítica do Depósito N1 em Carajás (PA), se mostrou eficaz neste tipo de aplicação (Morais *et al.*, 2002) . Um forte controle geobotânico marca as variações dos diversos tipos de coberturas e da vegetação de campos rupestres. No entorno do depósito, a vegetação circundante de floresta é claramente detectável neste tipo de dado com uma textura rugosa. Dados de rugosidade superficial obtidos em vários pontos da área validaram os resultados obtidos nas classificações e neste comprimento de onda, foi possível classificar as crostas lateríticas como lisa, intermediárias e rugosas.

Recentes abordagens feitas com imagens radar polarimétrico, banda C e L, investigam a rugosidade superficial com base no coeficiente de retroespalhamento. Investigações conduzidas em ambiente semi-árido brasileiro, com imagens de radar RADARSAT-1 e PALSAR abordam o efeito da microtopografia sobre o coeficiente de retroespalhamento (σ^0) de superfícies geológicas em dados adquiridos na planície do Vale do Curaçá, Bahia. Os resultados deste estudo mostraram uma fraca a moderada correlação entre o coeficiente de retroespalhamento linear e microtopografia para as imagens, indicando limitações para a caracterização quantitativa de produtos de alteração (Paradella *et al.*, 2009).

Nesta mesma linha, estudos de rugosidade superficial com dados de retroespalhamento (σ^0) do radar PALSAR (Banda-L) foram conduzidos no Depósito de N1 (Carajás, PA) por Silva *et al.* (2009). Os resultados mostraram que há uma correlação linear moderada entre descritores σ^0 e os descritores topográficos, declividade e aspecto, em relação aos dados PALSAR. Isso significa que retroespalhamento PALSAR é modulada de forma predominante pela morfologia das superfícies geológicas (macro e microtopografia) para a polarização hh, que apresentou melhores resultados. A pesquisa também mostrou que a altura média das unidades mapeadas foi um importante parâmetro que a resposta de retroespalhamento na escala da microtopografia e outros estudos serão necessários para avaliar a influência do espalhamento múltiplo e a contribuição de umidade nas respostas detectadas.

Haack & Bechdol (2000) utilizaram imagens LANDSAT e SIR-C em classificações por Máxima Verosimilhança para mapeamentos de uso na Tanzânia. Os resultados mostraram um incremento nas classificações com as imagens ópticas e de radar combinadas. Em relação à frequência, os resultados mostraram que a banda C foi considerada melhor para a avaliação da vegetação do que a banda L, embora a diferença entre as acurácias médias entre as duas bandas fossem em torno de 2,5% o que leva os autores a avaliarem que os retornos de ambas frequências fossem similares.

Millington *et al.* (2003) fizeram uso de imagens muti-temporais TM-ETM e uma imagem AVHRR para avaliarem a fragmentação de uma área de floresta na Bolívia e sua relação com a

resolução espacial. Uma classificação não supervisionada foi efetuada para obter informações preliminares do uso da área, e os resultados foram posteriormente usados com dados de campo em uma classificação supervisionada pelo método da máxima verossimilhança. Os resultados foram agrupados em classes de floresta e não floresta para criar umas imagens binárias floresta/não floresta e então serem analisadas usando um programa de análise de padrão espacial para calcular paisagens métricas. Os resultados mostraram que resoluções finas como TM e ETM foram superiores ao de resoluções grossas (AVHRR) em estudos de conservação de paisagens fragmentadas.

A classificação automatizada de dados de sensoriamento remoto é um meio muito eficiente de extrair informações de uso e cobertura, especialmente em áreas com cobertura vegetal dispersa. Estas informações podem ser integradas com atributos texturais de forma a compor um banco de dados de informações espaciais (Li & Narayanan, 2004).

Estudos com imagens de radar e ópticas conduzidos com o suporte de um Modelo Digital de Elevação (MDE) têm mostrado um incremento no levantamento dos alvos a serem discriminados. O mapeamento de áreas áridas com pouca vegetação é dificultado devido à mistura da resposta espectral dos solos do deserto com a relativamente baixa resposta espectral da vegetação esparsa. Com vistas a melhorar o mapeamento destas áreas, diferentes combinações de dados, TM/LANDSAT, ERS-1 e MDE (Modelo Digital de Elevação) foram analisados. Classificadores por Máxima Verossimilhança e por redes neurais foram utilizados, sendo que a acurácia usando o classificador por Máxima Verossimilhança foi melhor. Além disso, onde a vegetação é mais densa, o radar apresentou a melhor acurácia (Shupe & Marsh, 2004).

O uso do radar para estimar parâmetros biofísicos da cobertura florestal para obter um melhor entendimento da estrutura fisionômica da vegetação também é uma aplicação muito investigada (Gama *et al.*, 2005). A interação banda L com a vegetação dá-se com a penetração da energia parcial com dossel, interagindo com galhos e troncos, o que permite a identificação de áreas que foram queimadas, que aparecem como áreas brilhantes nas imagens de radar (Búfalo e Valeriano, 2005).

Em relação às escalas espaço-temporal de ecossistemas, por satélite a tecnologia de sensoriamento remoto tem apresentado uma ferramenta poderosa em estudos ambientais devido à cobertura sinótica e temporal. Isso já foi demonstrado em diversos trabalhos envolvendo estudos de impacto ambiental na mineração em vários contextos (Sinha *et al.*, 2000, Rigina 2002, Trinder, 2008, Erener, 2011). Em relação às mudanças que ocorrem no ambiente físico, o sensoriamento remoto tem o potencial de ser capaz de contribuir para projetos detalhados em duas escalas: semi-regional e regional (Jordan, 2009).

A utilização de dados multi-sensores tem sido utilizada para coleta e processamento de informações de forma a fornecer instruções e apoio à decisão na exploração de carvão na China. A

aplicação de técnicas de sensoriamento remoto para realizar levantamento de recursos relacionados à exploração de carvão mostrou precisão, alta eficiência, economia, especialmente em situações em que a área de trabalho apresentava condições desfavoráveis (Wenruo *et al.*, 2008). Os autores ressaltam outras vantagens da utilização do sensoriamento remoto, entre as quais: (i) mapeamento geológico para detecção de recursos minerais, (ii) exploração de recursos mina de carvão em campo e análise das circunstâncias existentes no desenvolvimento da mina, (iii) levantamento dos aspectos ecológico e a análise das circunstâncias existentes para o ambiente da mina, (iv) monitoramento de campo nas mudança do uso na região das minas e (v) análise das circunstâncias existentes para planejamento do uso de terra, combinados com a oferta e a demanda de recursos minerais.

As imagens de sensoriamento remoto podem fornecer informações valiosas sobre o ambiente geológico, para avaliar e monitorar as condições geológicas e ambientais das principais minas chinesas de carvão de grande porte. Dados multi-fontes e multi-resolução, como fotografias aéreas, imagens de satélite e até mesmo imagens SAR para extrair informações de forma precisa são indicadas para trabalhos futuros na pesquisa realizada pelos autores. A fim de mostrar o estado ambiental das áreas de mineração a partir de lados diferentes, os autores demonstram o potencial das ferramentas para a visualização e mapeamento. A avaliação enfatiza particularmente na modelagem quantitativa para obter uma compreensão exata e ao redor do ambiente geológico para formação de um esquema de recuperação. O mapeamento fornece algumas informações sobre a variação de alguns parâmetros importantes, sensíveis à mudança de ambiente para que a deterioração do ambiente possa ser detectada a tempo de ser recuperada (Liu & Zhang, 2008).

Em mapeamentos de uso do solo com imagens de radar, Chamundeeswari *et al.* (2009) utilizaram técnica a ACP, juntamente com um conjunto de diferentes medidas de texturas e realizaram uma classificação não supervisionada K-means. Os autores testaram o efeito de medidas individuais texturais na classificação para escolher os conjuntos adequados que podem para serem aplicados na classificação. A contribuição de diversas medidas de textura para aumentar a precisão de classificação também foi avaliada, variando a combinação de medidas de textura no conjunto de recursos e para diferentes pontos de verdade terrestre. Verificou-se que a aplicação de transformação ACP sobre todas as medidas ajuda na integração de informações importantes para fins de classificação, melhorando a acurácia na classificação.

Atualmente, a avaliação ambiental, monitoramento, e as mudanças da cobertura são elementos importantes dos processos globais de mudança ambiental. A detecção e monitoramento destas mudanças utilizando dados multi-temporais de satélites tem sido um tema de interesse na comunidade de sensoriamento remoto e várias técnicas e algoritmos de detecção de mudanças e de monitoramento foram introduzidas, entre elas a ACP e a classificação digital de imagens de satélite. A análise de PCA foi usada em dados Landsat ETM para investigações regionais envolvendo conjuntos de dados

maiores e os resultados confirmam o potencial discriminador em região de deserto (Khalifa & Arnous, 2010).

A Banda L é muito sensível a pequenas variações em escalas de rugosidade da superfície e o retroespalhamento é afetado pelo terreno abaixo do dossel da vegetação (Tapley, 2002). Imagens de multiprômetros C-vv/L-hv/ P-hv realçadas são excelentes para delinear unidades de rocha com base nas variações na rugosidade da superfície e propriedades dielétricas quando a cobertura vegetal é mínima. Segundo o autor, a técnica é mais apropriada para as seqüências sedimentares, em vez de complexos metamórficos onde os resultados têm demonstrado uma pobre correlação entre rugosidade e o retroespalhamento do radar.

As imagens digitais obtidas por sensores em plataformas aéreas ou espaciais podem ser manipuladas e melhoradas para destacar características, tais como tipo de vegetação e densidade, turbidez da água ou poluentes, litologia e mineralogia, tipo de solo, umidade do solo, e outros (Monjezi *et al.*, 2009). As estradas, por exemplo, afetam habitat a uma gama de escalas espaciais e, geralmente, agem diretamente sobre uma série de *habitats* em uma região, bem como da fragmentação do *habitat* individual e agindo como barreiras para o movimento de espécies. O impacto de estradas é facilmente identificado por imagens de sensoriamento remoto (Anjaneyulu e Maninckam, 2010).

A quantidade de dados de sensoriamento remoto disponíveis compõe um conjunto valioso de informações geoambientais que podem ser extraídas, de forma a se caracterizar a área de influência em relação a diversos aspectos e escalas. A grande quantidade de dados ambientais exigidos pela legislação ambiental brasileira faz com que seja difícil tomar decisões em processos dinâmicos, com variáveis que se relacionam com diferentes escalas de trabalho. Como uma ferramenta de tomada de decisão, os EIA são fortemente influenciada pela natureza e pela estrutura do processo de planejamento local (Anjaneyulu & Maninckam, 2010). Neste contexto, três pontos devem ser considerados a interface entre as pessoas e os ecossistemas, as escalas espaço-temporal que regem as funções do ecossistema e a capacidade de síntese de dados e informações, que são tanto qualitativas como quantitativas (Hodge, 2004). De acordo com autor, é a síntese que fornece melhor apoio à melhoria de tomada de decisão.

1.7.5– Arquitetura de Conhecimentos

Um dos mais importantes instrumentos da gestão ambiental é a avaliação de impacto ambiental. O processo de avaliação de impacto ambiental está definido na Resolução do CONAMA 01/86, sendo realizado através do ESTUDO DE IMPACTO AMBIENTAL – EIA, que se constitui em um conjunto de atividades técnico-científicas destinadas à identificação, previsão e valoração dos

impactos e à análise de alternativas. As conclusões do EIA devem ser apresentadas, de forma objetiva, no RELATÓRIO DE IMPACTO AMBIENTAL – RIMA. Os EIA são documentos com volumes extensos e os aspectos ecológicos, econômicos e outros envolvidos em uma atividade de mineração não devem ser analisados de forma fragmentada, mas sim integrada.

O desafio é gerenciar tanto volume de informação com tantas questões interrelacionadas, vistas sob do contexto dos aspectos das atividades relacionados e na escala de trabalho adequada. Como as agências governamentais, responsáveis pela gestão dos processos ambientais, conseguem gerir o considerável volume de conhecimento gerado através dos EIA e como ele é usado para melhorar futuras práticas de gestão ambiental é outro aspecto a ser considerado. Os pontos cruciais das agências incluem a gestão do processo de AIA em cada jurisdição, incluindo a aplicação dos requisitos legais para avaliar as propostas, projetar e implementar uma série de procedimentos para orientar as operações. Elas executam a tarefa crucial de controle da qualidade, revisão de documentos AIA, em especial, os EIA. Na realização de seu trabalho, agências podem (i) acumular informações e conhecimento; (ii) aprender com a experiência, e (iii) estabelecer novos procedimentos ou políticas destinadas a melhorar eficiência e a eficácia dos processos de AIA (Sánchez & Morrison-Sauders, 2011).

Os autores sustentam que os elementos-chave para tal questão estão na gestão do conhecimento, que são potencialmente relevantes para as agências de controle da AIA (e por extrapolação para outros órgãos de gestão ambiental em geral) os quais são: (i) estabelecer e manter completa e acessíveis as informações e a base de dados espaciais, e (ii) preparação de periódicos para consulta com os principais interessados, onde constem orientações substantivas sobre métodos e critérios para os AIA, adaptadas ao contexto de cada jurisdição. Um arranjo institucional para coletar, filtrar e interpretar as informações geradas no acompanhamento dos projetos submetidos ao processo de AIA é um terceiro elemento que potencialmente pode melhorar a prática. Do ponto de tomada de decisão de vista, várias lacunas foram identificadas: estruturas institucionais vulneráveis; foco do processo falta de transparência no processo; incompatibilidade entre o AIA e planos de governo, políticas e programas Bond *et al.* (2010).

A troca de informações e validação do conhecimento são etapas que agilizam o processo todo de AIA, pois quanto mais as informações e opiniões são trocadas na equipe, menos tempo é desperdiçado na coordenação do projeto, especialmente em relação à interpretação da lei. A integração do conhecimento deve ser abordada de forma a agregar a opinião de todos envolvidos e a troca de informação, para formar os agrupamentos de dados e avaliar os impactos sociais, os ecológicos e, raramente, os econômicos. A integração do conhecimento é um processo interdisciplinar e transdisciplinar, porque sustenta um entendimento comum de conceitos-chave da sustentabilidade Sheate *et al.* (2010). Isto permite que o trabalho a ser realizado entre os profissionais seja feito com

base em um entendimento compartilhado da forma como as questões devem ser analisadas (Bond *et al.*, 2010). Os autores sugerem que a abordagem transdisciplinar é mais alinhada com as preocupações do público do que a interdisciplinar, pois funcionam como um meio de integração entre ciência e questões sociais. De todo modo, as modalidades do conhecimento são de natureza essencialmente multidisciplinar, mas o gestor pode proporcionar incentivos para estimular o uso interdisciplinar ou mesmo transdisciplinar do conhecimento.

Seate & Partidário (2010) argumentam que a discussão de políticas ambientais sustentáveis e processos de tomada de decisão abordam mais a essência da questão, em vez de as técnicas que podem ser usadas para promover a transferência de conhecimento. Os autores destacam alguns pontos importantes a serem considerados neste processo, destacando-se o desenvolvimento de um ambiente de confiança e abertura para receptividade na proposta de insumos importantes na tomada de decisões e o uso do conhecimento trocado para informar o processo de avaliação, criar soluções de inovação, para o qual a ligação entre a avaliação estratégica e o processo de decisão torna-se crucial.

O uso de indicadores de eficiência também trata de outra forma de avaliação da sustentabilidade e é um dos objetivos de uma produção mais limpa (P+L) que pode ser definida como a aplicação contínua de uma estratégia técnica, econômica e ambiental integrada aos processos, produtos e serviços, a fim de aumentar a eficiência no uso de matérias-primas, água e energia, pela não geração, minimização ou reciclagem de resíduos e emissões, com benefícios ambientais, de saúde ocupacional e econômicos (UNEP, 2001). Assim como qualquer indústria, a mineração deve almejar a chamada produção mais limpa, os processos produtivos limpos estão diretamente relacionados à pesquisa e ao desenvolvimento tecnológico, diferentemente de outros tipos de indústria, onde é possível e emprego de um mesmo tipo de solução para várias firmas (Sánchez, 2007). Na mineração, a extração e o processamento de matérias primas requerem soluções para cada caso específico e isto relaciona-se também às alterações ao meio ambiente que são distintas e dependentes das características físico-químicas dos depósitos minerais (Cavalcanti, 1996).

As relações entre tecnologia e sustentabilidade são descritas por Villas Bôas (1995), que ressalta pontos importantes:

1. a lavra é a responsável pela grande movimentação de material numa atividade extrativa, e novos métodos de lavra são necessários para maximizar a produção mineral e minimizar problemas ambientais e sociais, quando do encerramento das atividades;
2. o processamento, envolvendo as operações químicas e metalúrgicas, é o grande responsável pelas perdas energéticas da indústria;

3. a manufatura do bem final ainda representa perdas importantes no contexto da sua massa total, indicando relativamente pouca reciclagem, à óbvia exceção do alumínio.

A própria legislação brasileira, por meio do Ministério do Meio Ambiente (MMA), por meio do PROJETO BRA/94/016 “Formulação e implementação de políticas públicas compatíveis com os princípios do desenvolvimento sustentável - diretrizes ambientais para o setor mineral”, de 1997, sugere em uma de suas diretrizes “a incorporação de tecnologias que permitam o maior aproveitamento dos recursos minerais e a geração do menor impacto ambiental”. Em outra diretriz, ressalta “o apoio ao desenvolvimento tecnológico e a divulgação de tecnologias ambientalmente compatíveis também é fator importante neste processo”.

O planejamento e a gestão ambiental na mineração tem mostrado avanços, ainda que distribuídos de forma desigual, especialmente em temas como recuperação de áreas degradadas, manejo de águas em minas, monitoramento ambiental e relações com a comunidade (Sánchez, 2007). Uma série de outros avanços e tecnologias são citados pelo autor, que ressalta a tendência mundial na busca pela ecoeficiência, ou seja, a obtenção de resultados econômicos juntamente à obtenção de ganhos ambientais, que é notada em muitas indústrias, inclusive do setor mineral.

Em se tratando de uma implantação de mina de ferro a céu aberto, os aspectos envolvidos demonstram que o gerenciamento do conhecimento de áreas críticas de exploração mineral em ambientes frágeis é composto de muitas variáveis. A gestão ambiental na mineração é complexa em seus contextos ambientais, econômicos e sociais, que se inter-relacionam entre si por conceitos, práticas propostas e soluções viáveis para uma exploração sustentável. Neste caso, os sistemas de conhecimento são indicados para soluções que dependem da avaliação de um número grande de variáveis as quais podem assumir valores distintos e mutáveis. Eles permitem extrair o conhecimento de suas diferentes fontes (humana, outros sistemas, livros, mapas, etc.) tornando-o independente das pessoas, organizá-lo, distribuí-lo e multiplicá-lo, na busca de uma produção que vise a ecoeficiência.

A gestão de conhecimento é um campo recente da administração que busca instrumentos que permitam às organizações reter, organizar e otimizar a utilização do conhecimento. Ela busca organizar processos nos quais: a) novo conhecimento é produzido, b) o conhecimento é produzido para aqueles que necessitem dele; c) o conhecimento é tornado acessível tanto para uso por toda organização como para uso futuro e d) diferentes áreas do conhecimento são combinadas (Schreiber *et al.* 2000).

Do ponto de vista corporativo, os benefícios se dão em diferentes áreas, conforme Schreiber *et al.* (2000) descrevem: a) a preservação do conhecimento organizacional: captura da perícia, organização do conhecimento disperso, reutilização do conhecimento; b) a disseminação do conhecimento organizacional: possibilidade de utilização do conhecimento longe de suas fontes,

padronização das soluções aplicadas em qualquer ponto da organização e c) a qualidade da decisão: aumento de qualidade das decisões, com possibilidade de trabalhar em cenários com incertezas.

A engenharia de conhecimento agrega um conjunto de metodologias e formalismos que suportam a construção de sistemas de conhecimento, cujas ideias básicas mencionadas por Abel (2004) são:

1 – o conhecimento não se trata de um bem estático a ser minerado, mas existe quando se produz algo com ou a partir dele;

2 – o conhecimento não é individual, mas organizacional ou institucional;

3 – o conhecimento não pode ser genérico, mas associado ou produzido pela solução de um tema particular de problema ao qual está associado e

4 – o conhecimento não pode ser um conjunto de regras de solução, mas uma experiência que foi sistematizada e pode ser transmitida.

A engenharia de conhecimento lida com aquisição e representação de conhecimento e validação, inferência, explicação e manutenção de bases de conhecimento (Schreiber *et al.* 2000). Alguns conceitos são pertinentes, especialmente dado, informação e conhecimento:

1 – Aquisição de conhecimento: obtenção de conhecimento em suas diversas fontes: livros, documentos, computadores, especialistas humanos. O conhecimento, visto como solução de problemas em um domínio de aplicação, envolve os objetos do domínio, os procedimentos e a forma de como o conhecimento é aplicado.

2 – Representação de conhecimento: escolha de uma forma de representação que possa compor um modelo de domínio e a codificação da informação adquirida nessa forma.

3 – Validação do conhecimento: verificação da consistência da base de conhecimento.

4 – Inferência: definição dos procedimentos de manipulação e aplicação do conhecimento com finalidade de implementação.

5 – Explicação e justificativa: recuperação do raciocínio do sistema ao atingir determinada conclusão e a definição da forma de apresentar esses caminhos de inferência para o usuário.

6 – Conhecimento: informação sobre o domínio e a forma como essa informação é utilizada para resolver problemas.

7 – Informação: reconhecimento dos objetos do domínio, suas características, restrições e seus relacionamentos com os outros objetos. É o dado com seu significado associado.

8 – Dado: representação simbólica de um objeto ou informação do domínio sem considerações de contexto, significado ou aplicação.

9 – Domínio: conjunto relativamente circunscrito de atividades.

A criação do conhecimento organizacional é um processo que amplia o conhecimento criado pelos indivíduos por meio de uma rede de conhecimentos de organização, que pressupõe interação destes e das dimensões tácita e explícita do conhecimento. O conhecimento tácito é pessoal, específico ao contexto e difícil de ser formulado e comunicado. Já o conhecimento explícito ou codificado é transmissível em linguagem formal e sistemática. Ambos conhecimentos são complementares, baseado no fato de que o conhecimento humano é criado e expandido com a interação social entre o conhecimento tácito e o conhecimento explícito (Boff, 2000).

Nonaka e Takeuchi (1997) desenvolveram uma teoria abrangente sobre conhecimento e sua criação com base na distinção entre conhecimento tácito e conhecimento explícito. Como pode ser visto na figura 1.49, quatro modelos de produção de conhecimentos são identificados:

1 – do tácito para o conhecimento tácito (socialização): é compartilhamento de experiências e partir daí, da criação do conhecimento tácito, como modelos mentais ou habilidades técnicas compartilhadas;

2 - do tácito para o conhecimento explícito (externalização): processo de articulação de conhecimentos tácitos em conceitos explícitos e é provocado pelo diálogo ou pela reflexão coletiva;

3 – do explícito para o conhecimento explícito (combinação): processo de sistematização de conceitos em um sistema de conhecimento e envolve a combinação de conjuntos diferentes de conhecimento explícito e

4 – do explícito para o conhecimento tácito (internalização): processo de incorporação do conhecimento explícito no conhecimento tácito, que precisa ser compartilhado com outros membros da organização, iniciando assim uma nova espiral de criação do conhecimento.

A interação e os níveis do conhecimento produzem um processo em espiral interativo, que leva à criação do processo organizacional. A espiral do conhecimento dá-se assim como uma constante transformação do tácito para o explícito e vice-versa, disseminando e enriquecendo o conhecimento organizacional: o tácito é compartilhado por socialização, de forma que possa ser sistematizado por externalização, para poder ser disseminado e aprimorado por combinação, e finalmente re-assimilado por internalização. Para Nonaka & Takeuchi (1997), os conhecimentos tácito e explícito não são entidades totalmente separadas, mas sim mutuamente complementares. Os autores sustentam ainda que o conhecimento humano é criado e expandido através da interação social entre o conhecimento tácito e o conhecimento explícito. Esta interação é chamada de conversão do conhecimento, que trata de um processo social entre indivíduos e não confinada dentro de um indivíduo.

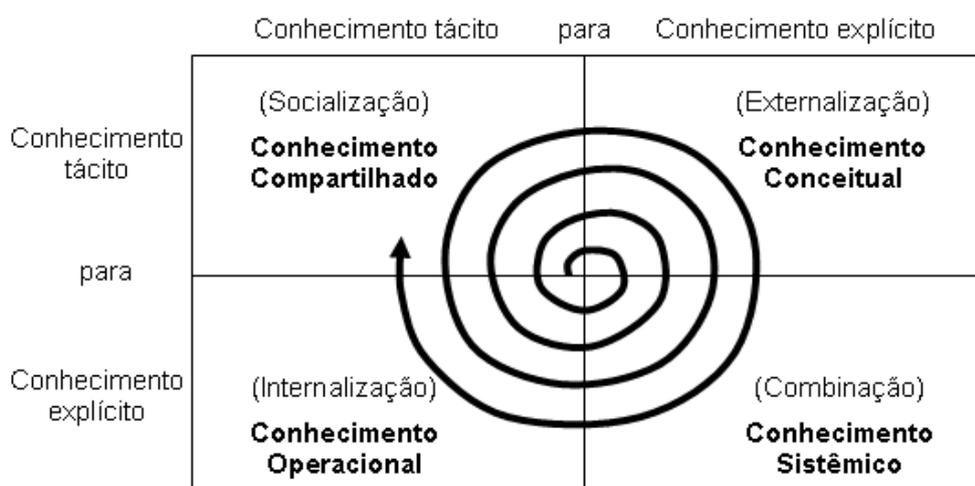


Figura 1.49 – Modelo da dinâmica da criação do conhecimento, com base no conhecimento explícito e tácito. Fonte: Nonaka & Takeuchi (1997).

A informação e o conhecimento são as bases da inovação e da capacitação, que são os fatores estratégicos do desenvolvimento. O processo inovador depende do conhecimento acumulado e não da informação e a aquisição, geração e difusão de conhecimento exercem um papel fundamental no processo de desenvolvimento (Calaes, 2006). Os processos de EIA podem se beneficiar da gestão do conhecimento, de forma a assegurar a proteção ambiental e exigir uma boa gestão das organizações encarregadas de administrar o processo.

Sistemas de conhecimento pertencem a uma classe da Inteligência Artificial desenvolvidos com o intuito de dar suporte na tomada de decisões em áreas restritas da Ciência dominadas por especialistas humanos (Abel, 1988). Estes sistemas utilizam o conhecimento extraídos de especialistas humanos e codificados em um programa para a solução de problemas. Esta é a característica que difere os sistemas de conhecimento dos sistemas de informação comuns. Os sistemas de conhecimento tem assim a função de implementar um processo de solução de problemas que foi racionalizado e padronizado por uma organização e não apenas reproduzir o conhecimento de um especialista.

Estes sistemas são de difícil visualização em seus múltiplos aspectos e em suas funções várias que co-atuam e se retro-alimentam de diferentes formas, modos e tempos. Sua construção, com muitos requisitos e uma grande quantidade de código, requer um esquema que seja capaz de descrever a sua estrutura interna de uma maneira ampla, de forma que, se consiga um produto mais confiável e de fácil manutenção. Isto é chamado de arquitetura de software e trata do modelo da estrutura fundamental e organização de um sistema de software (Sommerville, 2004). Deste modo, uma arquitetura precisa ser definida com base em considerações de desempenho, funcionalidade, segurança e outros aspectos não funcionais de um sistema.

Os sistemas de conhecimento diferem dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Estes últimos representam as ferramentas computacionais para Geoprocessamento e permitem realizar análises complexas (álgebra de mapas), ao integrar dados de diversas fontes e ao criar bancos de dados geo-referenciados (Câmara *et al.* 2001). Eles permitem ainda automatizar a produção de documentos cartográficos (cartografia digital). Segundo os autores, o que distingue um SIG de outros tipos de sistemas de informação são as funções que realizam análises espaciais. Estas funções utilizam os atributos espaciais e não espaciais das entidades gráficas armazenadas na base de dados espaciais e buscam fazer simulações (modelos) sobre os fenômenos do mundo real, seus aspectos ou parâmetros.

Sistemas de conhecimento requerem arquiteturas específicas devido as suas particularidades inerentes. Sistemas de informação comuns possuem interfaces simples, processamento reduzido de cada um dos dados armazenados e devem suportar um grande número de pequenas transações executadas sobre uma grande quantidade de dados. Já os sistemas de conhecimento se baseiam em um pequeno número de transações, porém com uma grande quantidade de processamento (raciocínio e validação de dados semanticamente complexos) em cada uma das transações. Essas características únicas exigem que sistemas de conhecimento tenham arquiteturas diferenciadas (Abel, 2004).

Por arquitetura de software, a Norma ISO/IEEE 1471-2000 a define como “a organização fundamental de um sistema incorporada em seus componentes, seus relacionamentos com o ambiente, e os princípios que conduzem seu design e evolução”. Um documento de arquitetura deve ser capaz de descrever a arquitetura do sistema, isto é, os elementos, relações, e decisões arquiteturais do sistema em questão. Os benefícios de se documentar a arquitetura se tornam análogos aos benefícios proporcionados pela própria arquitetura. O documento de arquitetura é o arcabouço conceitual para comunicação entre diferentes interessados no sistema, uma vez que define os elementos e relações que o compõem. Sua representação deve servir como modelo do sistema para a análise, dado que é manipulável e pode ser analisada e incrementada, desde que contenha informação suficiente para tanto.

A arquitetura mais utilizada para sistemas de conhecimento é mostrada esquema apresentado na figura 1.50. Os fatos e regras que representam o conhecimento necessário para a execução do mecanismo de inferência estão reunidos na base de conhecimento. O mecanismo de inferência consta das estratégias de inferência e os controles que uma especialista usa quando manipula os fatos e regras (Harmon e King, 1988). Há ainda alguns subsistemas periféricos, como interfaces com usuário, mecanismos de explanação de raciocínio e sistemas de aquisição de conhecimento, os quais variam de sistema para sistema. Cada sistema utiliza alguns formalismos para representação de conhecimento na base de conhecimento (como regras, redes semânticas e etc.), bem como utiliza um mecanismo específico para realizar inferência.

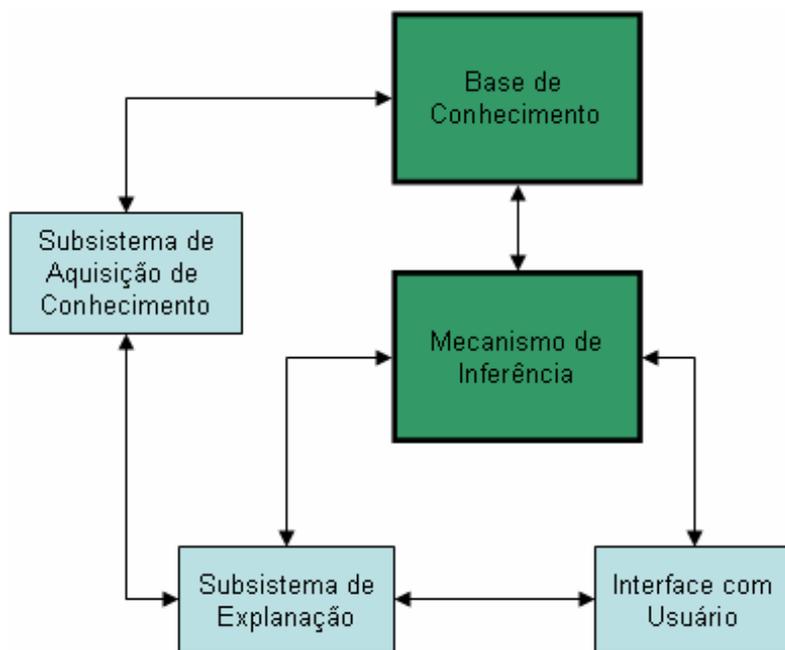


Figura 1.50 – Modelo de arquitetura clássica para sistema especialista. Fonte: Harmon & King (1988)

A construção de sistemas de conhecimento precisa ser baseada em uma arquitetura especial para serem desenvolvidos devido a suas particularidades. A representação da arquitetura não é tarefa simples, ao contrário, com complexidade alta. Isto advém do fato da necessidade de mostrar de diferentes maneiras, diferentes aspectos da arquitetura, ou seja, da necessidade de representar as diferentes visões da arquitetura. O planejamento de sistemas complexos, envolvendo diferentes modalidades tais como a ecológica, a econômica, a social, a educativa, a administrativa deve ser feito de forma a abranger os temas relevantes, bem como outros pequenos aspectos também expressivos. A dificuldade consiste em saber ver, prever, planejar os diferentes tipos de articulações entre as partes que compõem o sistema complexo.

As ferramentas computacionais para suporte a gestão do conhecimento vão desde a comunicação via internet ou intranet até ferramentas que permitem análises específicas profundas e tomadas de decisões. As aplicações procuram soluções de problemas em diversas categorias de tarefas intensivas em conhecimento. Em aplicações geológicas, destacam-se o PROSPECTOR (Hart and Duda, 1977), um sistema especialista para prospecção de minérios metálicos e o PetroGrapher (Abel *et al.*, 2004); um banco de dados inteligente para apoiar a análise petrográfica, a interpretação de rochas reservatório e a gestão de dados relevantes, com recursos de ambas baseadas em sistema conhecimentos e tecnologia de banco de dados. Para a interpretação de dados de sensoriamento remoto, destaca-se o GeioAIDA, desenvolvido para aplicação com dados multisensores, Pahl (2003).

O sisORCI (Organogramas de Rodas de Correlações e Impactos) é um sistema de arquitetura de conhecimentos desenvolvido inicialmente para aplicação em bacias hidrográficas (Martins Jr., 2008a). O objetivo inicial é introduzir os conceitos básicos sobre as relações dos grandes temas para planejar e gerir programas e projetos de feição própria à ideia de desenvolvimento eco-sustentável, com modelos econômicos e de gestão, bem como com uma ampla base de dados cartográficos. Concebido como um instrumento de arquitetura de conhecimento constitui a base para aplicações posteriores em inteligência artificial para repostas futuras de um sistema de tomada de decisão. O sisORCI foi desenvolvido para o quaisquer contexto de conhecimentos, embora inicialmente tenha sido concebido para temas relacionados à gestão em Ecologia e Economia para o planejamento de bacias hidrográficas, propriedades rurais e produção em apoio aos comitês de bacias hidrográficas (Martins Jr et al., 2006a e 2008a).

CAPÍTULO 2

ARTIGOS

2.1 Informações geoambientais derivadas de imagens de radar (R99B/SIPAM) e ópticas (LANDSAT/TM5) em jazimento de minério de ferro em Carajás

Environmental informations derived from radar R99B/SIPAM) and optical (LANDSAT/TM5) images on iron ore deposit in Carajás.

Maria Carolina de Moraes

Aluna de doutorado do curso de Geologia Ambiental e Conservação de Recursos Naturais do Departamento de Geologia (DEGEO/UFOP). E-mail: mcarolina@degeo.ufop.br

Paulo Martins Pereira Junior

Professor do Curso de Engenharia Geológica e Engenharia Ambiental da Pós-Graduação em Geologia Ambiental e Conservação de Recursos Naturais do Departamento de Geologia (DEGEO/UFOP). Pesquisador do CETEC - Belo Horizonte. E-mail: paulo.martins@cetec.br

Waldir Renato Paradella

Pesquisador Titular III da Divisão de Sensoriamento Remoto (DSR), vinculada à Observação da Terra (OBT) do INPE - São José dos Campos. E-mail: waldir@ltd.inpe.br

Abstract

One of the most significant environmental impacts of iron-ore mining is associated with landscape modifications, particularly in equatorial forest conditions around the N1-deposit located on Carajás Mineral Province. The use of remote sensing data can be an excellent alternative to decrease costs for environmental data acquisition in this region. Integrated optical and radar images were used to extract complementary information about landscape natural conditions and anthropogenic changes in a prospective vision of future use impacts. The main objective of this research is to obtain a set of environmental data for future implementation of a knowledge-system which can be of common use to other areas or regions with similar characteristics.

Resumo

Um dos impactos ambientais mais significativos em minerações de ferro está associado com as modificações da paisagem, especialmente em regiões de floresta equatorial, como no depósito N1, localizado na Província Mineral de Carajás. O uso da tecnologia do sensoriamento remoto tem mostrado muita eficiência e baixo custo no levantamento de informações ambientais nesta região. Imagens ópticas e de radar permitem a extração de informações complementares sobre a cobertura superficial e as alterações antrópicas, sob uma visão sinóptica do tratamento destes impactos. O principal objetivo desta pesquisa é a obtenção de um conjunto de informações ambientais para futura implementação em um sistema de conhecimento que possa ser utilizado em regiões com contextos geo-ambientais similares.

Keywords: iron-ore mining, environmental impacts, remote sensing, environmental data.

Palavras-chave: minerações de ferro, impactos ambientais, sensoriamento remoto, informações ambientais.

1 Introdução

A implantação e a operação de uma mineração de ferro a céu aberto acarretam modificações ao meio ambiente, afetando substancialmente as estruturas relacionadas ao meio físico e biótico. Os impactos ambientais mais proeminentes, mas não únicos, em função dos vários tipos de áreas de influência de uma mineração (Martins Jr. & Carneiro, 2006), estão relacionados às configurações da cava, da barragem de rejeito e da pilha de estéril (Ripley et al., 1996). Na Serra dos Carajás, o tratamento das questões ambientais relacionadas à mineração deve ser mais rigoroso, em face da fragilidade do ambiente amazônico.

No que diz respeito às atividades de mineração da Serra dos Carajás, o licenciamento ambiental dá-se em uma instância federal, por meio de um Decreto Lei Nº 2.486, de 2 de fevereiro de 1998, que cria a Floresta Nacional de Carajás. Como a área em questão encontra-se em vias de ser lavrada a céu aberto, informações ambientais devem ser obtidas para contribuir com o cumprimento da legislação ambiental, no sentido de indicar as áreas de influência do empreendimento (Martins Jr. & Carneiro, 2006), as melhores locações para barragem de rejeito e pilha de estéril e as áreas que devem ser preservadas, como por exemplo, os campos rupestres inseridos no bioma da floresta.

Tais informações são relevantes para a definição de critérios geo-ambientais, em escala de 1:100.000, visando a implementação de um Sistema de Arquitetura de Conhecimentos (Martins Jr. 2008) a ser implementado para um jazimento de ferro (N1). Para tanto, utilizam-se das várias técnicas

do sensoriamento remoto ativo e passivo, cujas potencialidades ainda não foram plenamente avaliadas como ferramentas para gestão de lavra a céu aberto em sistemas florestais úmidos.

2 Área de estudo

A área de estudo compreende o depósito de ferro N1, localizado na Província Mineral de Carajás. Inserido na reserva denominada Floresta Nacional dos Carajás (Flona Carajás), N1 está sobre um platô situado a sudeste no Estado do Pará, na borda norte da Serra dos Carajás, perfazendo uma área de aproximadamente 24km² (figura 1). A região de Carajás destaca-se por abrigar as maiores jazidas de ferro do mundo com diversas minas em produção.

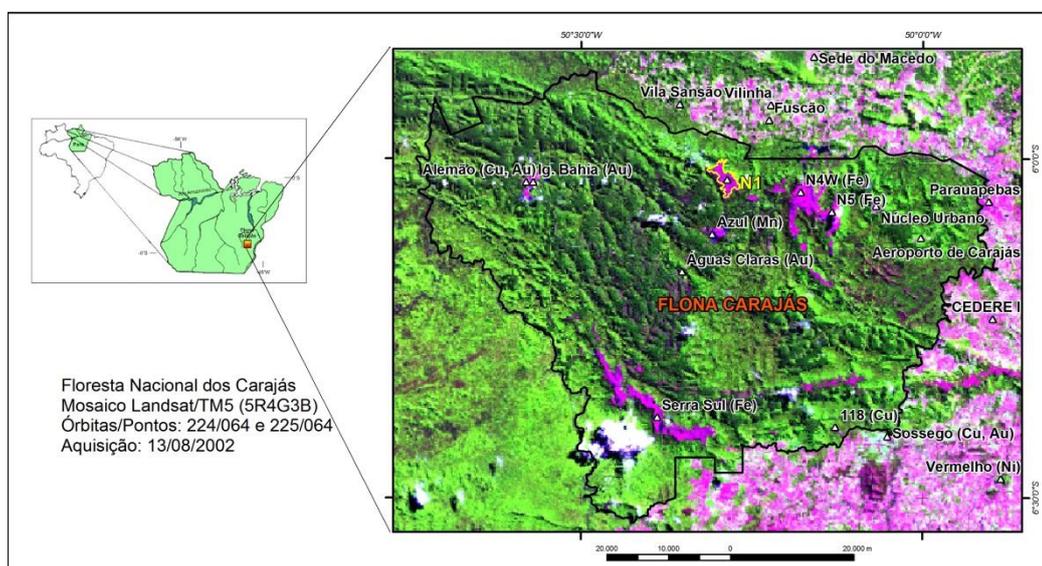


Figura 1 – Flona Carajás e N1: as cores magentas que circundam a flona correspondem a áreas desmatadas.

2.1 Litoestratigrafia, geomorfologia e vegetação

Os depósitos de ferro da Serra dos Carajás estão inseridos na na seqüência metavulcanossedimentar do Grupo Grão-Pará (Tolbert et al. 1971; Beisegel et al. 1973), com idade de 2593 ± 260 Ma, obtidas por dados Sm-Nd em jaspilitos (Lobato et al., 2005). O Grupo Grão Pará é composto por três unidades principais:

a) Unidade vulcânica máfica Inferior: denominada Formação Parauapebas em Meireles et al. (1984), e representada por rochas máficas verdes hidrotermalmente alteradas (greenstones), basaltos,

traquiandesitos e, em menor quantidade, riolitos e contribuições piroclásticas de natureza básica a intermediária.

b) Unidade de jaspilitos intermediária: denominada Formação Carajás (Tolbert et al. 1971), constituída principalmente por formação ferrífera bandada, com alternância de bandas de chert e de óxidos de ferro, com hematita e magnetita subordinada.

c) Unidade vulcânica máfica superior: representada por derrames porfiríticos e amigdaloidais de basaltos e andesitos basálticos, semelhantes aos da unidade máfica inferior, intercalados com horizontes piroclásticos.

Em relação à geomorfologia, o depósito de N1 encontra-se inserido no domínio centro-norte do Planalto Dissecado do Sul do Pará, que é caracterizado por maciços residuais de topo aplainado e conjuntos de cristas e picos interpenetrados por faixas de terrenos rebaixados (Boaventura, 1974). Neste domínio, o relevo montanhoso apresenta altitudes máximas de 900m e de 135m nos terrenos rebaixados (Figura 2). Sobre as porções mais altas dessas montanhas, ocorrem as coberturas lateríticas do depósito N1, dispostas sobre o platô com uma variação altimétrica local em torno de 200m, mapeadas por Resende e Barbosa (1972).

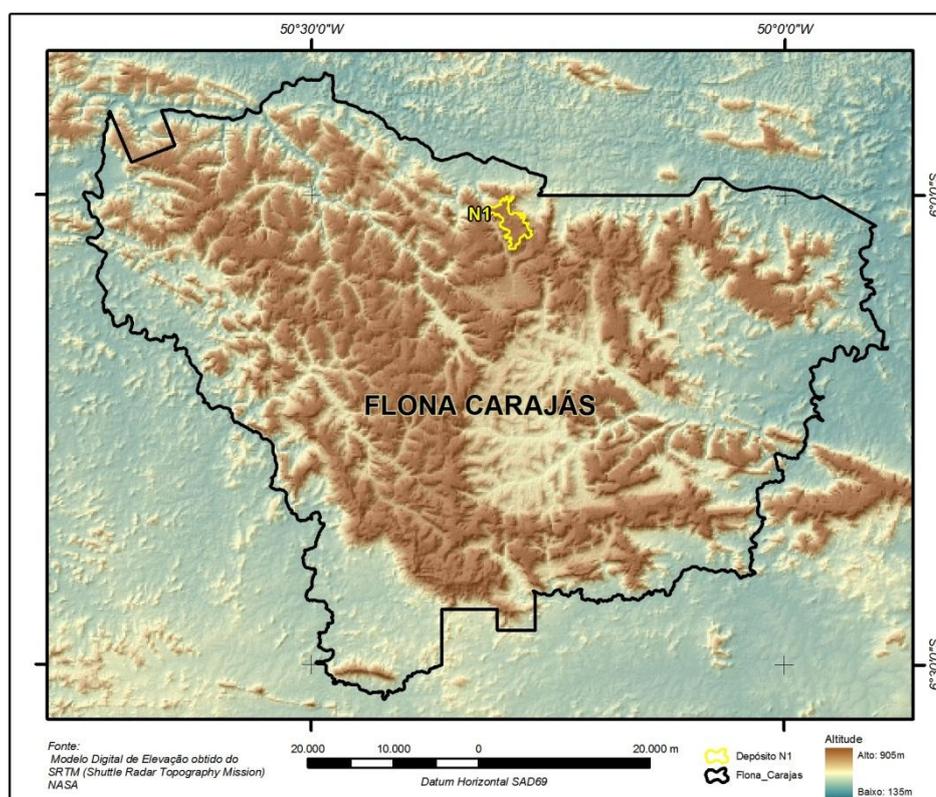


Figura 2 – Modelo Digital de Elevação da região de Carajás, com destaque para N1.

A vegetação que cresce sobre a canga na área de N1 é descrita como campo rupestre por Silva et al. (1992) e é predominantemente arbustiva, com poucos indivíduos de porte arbóreo, destacando-se como clareira em relação à floresta tropical pluvial que a circunda. As espécies desenvolvidas nas partes mais elevadas do platô são gramíneas que ocorrem devido à presença de muitos afloramentos e ao pequeno acúmulo de matéria orgânica nas fendas das cangas. Por outro lado, nas encostas destas elevações, ocorre acúmulo de solo e matéria orgânica, permitindo o desenvolvimento de espécies de porte reduzido. Na base dos morros, a vegetação é mais abundante, com ocorrência de espécies arbóreas mais desenvolvidas.

3 Materiais e Métodos

Imagens ópticas (LANDSAT/TM5) e de radar foram utilizadas nessa investigação. As imagens de radar provêm do sensor aerotransportado SAR-R99B do SIPAM (Sistema de Proteção da Amazônia). A resolução espacial original foi degradada de 3 para 11m e as faixas de vó obtidas sobre Carajás foram mosaicadas, processamentos estes realizados no CENSIPAM (Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia). O objetivo desta missão foi simular um radar orbital, o MAPSAR (Multi-Application Purpose SAR) em fase de concepção entre Brasil e Alemanha, e avaliar a sua viabilidade em aplicações geológicas na Amazônia. Os sobrevôos realizados em Carajás em banda L foram uma iniciativa conjunta do INPE, IG/UNICAMP e FEMA (MT) e com o apoio da VALE. Mais detalhes sobre a missão e suas aplicações podem ser encontrados em Paradella et al. (2006), Mura et al. (2007) e outros.

Dados de relevo obtidos do Modelo Digital de Elevação (MDE) do levantamento SRTM/NASA foram utilizados para a orto-retificação da imagem óptica. Em um estudo relativo à precisão altimétrica do MDE/SRTM para a Amazônia, Santos et al. (2005) indicam a utilização daquele modelo para escala de 1:100.000, em detrimento de modelos gerados a partir de cartas topográficas. Para o relevo montanhoso de Carajás, Oliveira (2008) também encontrou resultados satisfatórios sobre a precisão altimétrica do MDE/SRTM, com padrão classe A para escala 1:100.000. Desta forma, a utilização do MDE/SRTM nesta pesquisa é pertinente para a escala de trabalho utilizada. As informações referentes aos dados de sensoriamento remoto encontram-se sintetizados na tabela 1.

Tabela 1 – Dados utilizados.

Dado	Resolução espacial (m)	Aquisição	Bandas
Landsat/TM5	30 x 30	Ago - 02	1,2,3,4,5,e 7
SAR-R99B	11 x 11	Jun - 05	L (hh, hv, vv)
MDE - SRTM/NASA	90 x 90	Fev - 02	1

O processamento digital efetuado nas imagens de radar e ópticas encontra-se sintetizado no fluxograma da figura 3. Na imagem LANDSAT/TM5 foram realizadas a orto-retificação, a Análise por Componentes Principais (ACP) e a integração via IHS/RGB (Mather, 1987). Esta última etapa foi realizada com a utilização as imagens de radar do mosaico do SAR-R99B (hh, hv e vv), processadas com a correção radiométrica e a reamostragem de pixel. Todos os processamentos realizados nas imagens ópticas e de radar foram conduzidos através do software Geomatica PCI, versão 9.0 (PCI, 2003).

Em reação ao Modelo de Elevação do Terreno (MDE) obtido do levantamento SRTM/NASA, as inconsistências apresentadas, tais como valores negativos e ausência de informação, foram corrigidas e substituídas por valores consistentes interpolados com base na média de valores de níveis de cinza adjacentes. Posteriormente, uma re-amostragem do tamanho do pixel foi realizada, interpolando-os por variáveis regionalizadas de 90 para 30m. O MDE final foi utilizado, juntamente com pontos de controle de campo, na orto-retificação da imagem LANDSAT/TM5.

Na Análise por Componentes Principais (ACP), utilizaram-se as bandas 1,2,3,4,5 e 7 do LANDSAT/TM, de forma a se obter dois conjuntos; o conjunto das bandas 1,2 e 3 e o conjunto das bandas 5 e 7, eliminando assim toda informação redundante nestas faixas. As bandas TM 1, 2 e 3 tendem a exibir elevada correlação, função dos processos de absorção de energia em pigmentos; as bandas 5 e 7 tendem a apresentar uma maior redundância de informação, controladas espectralmente por absorções vinculadas ao teor de água do tecido foliar. Finalmente, a banda 4 foi utilizada separadamente, por ser útil na determinação do conteúdo da biomassa e no delineamento de corpos d'água.

A integração de dados de sensoriamento remoto distintos via IHS-RGB tem sido amplamente utilizada para mapeamentos geológicos. Trabalhos de integração de imagens de radar com imagens ópticas e dados auxiliares (geológicos, geofísicos, geoquímicos, etc.) são pioneiros na Província Mineral de Carajás, destacando-se, entre outros, Paradella et al. (2000) e Paradella et al. (2001).

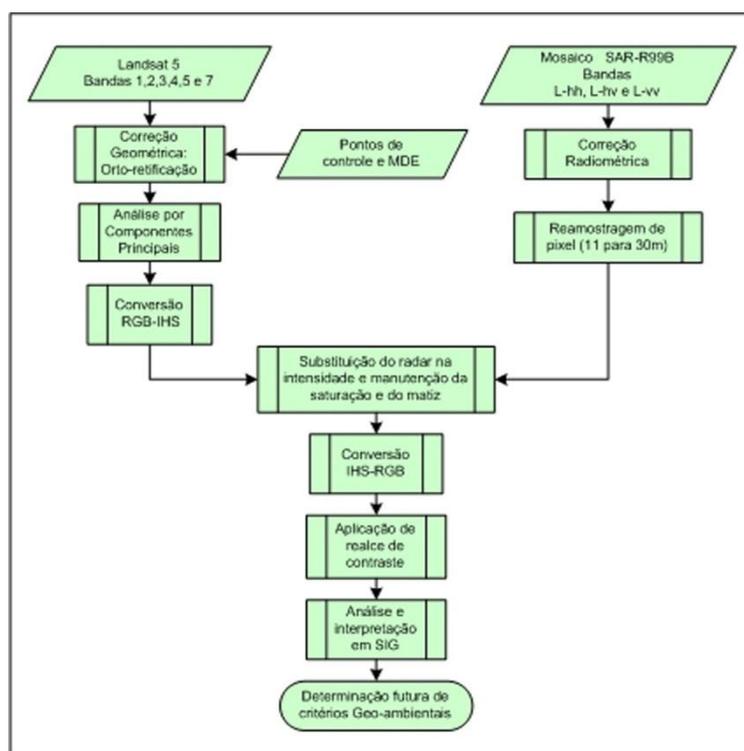


Figura 3 – Etapas da metodologia.

Na integração das imagens de radar com as imagens ópticas, foram usados como canais de entrada (RGB/IHS): a banda 4 (1), a componente principal 1 (CP-1) das bandas TM 5, 7 (2) e a (CP-1) das bandas TM 1,2 e 3 (3). Na transformação reversa (IHS-RGB) houve a substituição das imagens de radar na intensidade, com a manutenção dos canais de matiz e a saturação por meio de um modelo hexacone. Este modelo trata-se de uma representação das cores por meio de coordenadas cilíndricas de um hexacone. Os matizes são representados por uma posição angular ao longo do topo do hexacone. A saturação é dada pela distância do eixo vertical à superfície lateral do hexacone e a intensidade é representada pela distância vertical da base ao topo do hexacone (Mather, 1987).

As imagens de radar SAR-R99B (L-hh, L-hv e L-vv) substituídas na intensidade foram previamente submetidas à correção radiométrica, com filtragem para atenuação do speckle. O filtro Enhanced Frost, janela 3 x 3, foi aplicado às três cenas, com as polarizações hh, hv e vv. Em seguida, estas imagens tiveram o pixel reamostrado de 11 para 30m para serem integradas com as imagens ópticas. Esta degradação na resolução espacial dos dados de radar deve-se ao compromisso entre a escala de trabalho ideal para a finalidade desejada e a possibilidade de ortorectificação apenas da imagem óptica.

Os resultados das integrações das imagens ópticas com as imagens de radar foram três produtos integrados, correspondentes às polarizações hh, hv e vv. Estes produtos foram submetidos a um contraste linear e posteriormente analisados e interpretados em um Sistema de Informações Geo-

referenciadas (SIG), para posterior aplicação em estudos sobre critérios para gestão geo-ambiental do depósito de N1 e entorno. Para tanto, buscou-se adaptar a metodologia aplicada na Bacia do Rio Paracatu por Martins Jr. et al. (2006), para a área em questão, de forma a compor um sistema de conhecimento para o depósito em vias de ser lavrado, que possa ser aplicado em áreas com contexto geo-ambiental semelhante. Desta forma, foram analisadas as áreas de vegetação de floresta e campos rupestres, as áreas desmatadas, as áreas de mineração e a relação de todas estas variáveis com os aspectos fisiográficos que os produtos de sensoriamento remoto permitiram vislumbrar.

4 Resultados

Em relação aos produtos obtidos da integração via APC e IHS/RGB das imagens ópticas LANDSAT/TM5 com o SAR R99B/SIPAM, resultados distintos foram obtidos em função das diferentes polarizações do levantamento com o radar. A integração que mostrou maior capacidade de diferenciação de alvos refere-se ao produto integrado óptico com a imagem de radar hh (Figura 4).

Na figura 4, nota-se uma intensa fragmentação da paisagem, com as variações de matizes representando as diferenças espectrais da cobertura vegetal da floresta, dos campos rupestres, das atividades antrópicas e das atividades de mineração.

A variação de matizes na cobertura florestal propicia melhor discriminação da floresta, juntamente com a variação do relevo, realçado pelo radar. As áreas de floresta mais altas (F-1) apresentam matizes esverdeados e as mais baixas (F-2), matizes verde-avermelhados.

As variações de campos rupestres no platô de N1 também são distinguidas com matizes azuis mais claros, que representam a vegetação rasteira presente nas partes mais elevadas em N1 (Figura 5). Outras áreas de vegetação de campos rupestres são indicadas para preservação (CR-1, CR-2, CR-3 e CR-4), que juntas perfazem aproximadamente 10 Km². Na área da mina de N4W, nota-se uma variação rósea que está relacionada às bancadas da cava, o que permite um controle sobre o avanço das mesmas na escala de trabalho utilizada.

As áreas com coloração avermelhada, localizadas a norte de N1, apresentam-se intensamente desmatadas e encontram-se fora dos limites norte da Flona Carajás. Elas ilustram claramente o impacto das atividades antropogênicas não relacionadas às atividades de mineração, muito frequentes na Amazônia.

Duas barragens de rejeito são diferenciadas na área, uma parcialmente relacionada à mina de ferro N4W e outra, relacionada à mina de manganês (áreas avermelhadas e esverdeadas). Na primeira, é possível distinguir vegetação aquática preservada nos braços das drenagens graças à resposta do radar na polarização hh.

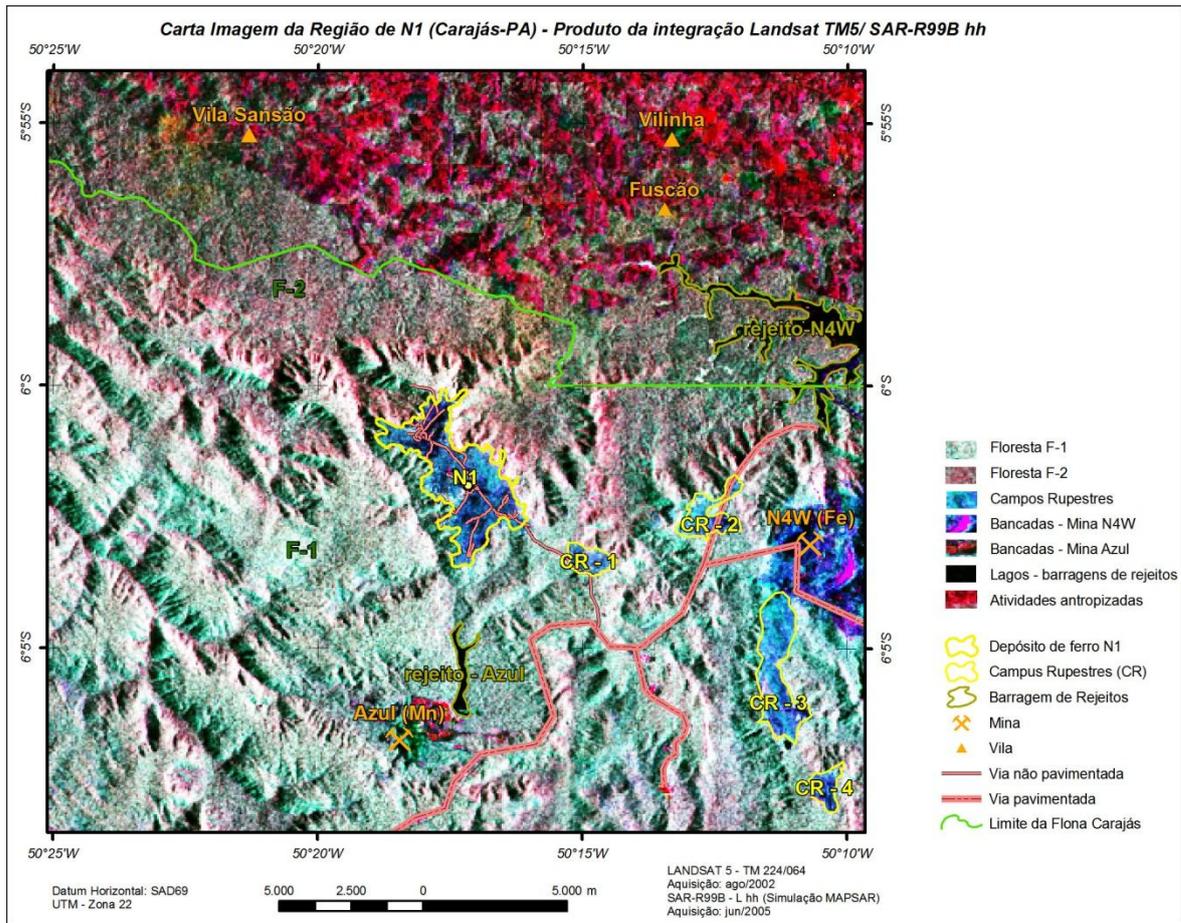


Figura 4 - Carta-imagem semi-regional da integração LANDSAT/TM5-ACP/SAR-R99B.

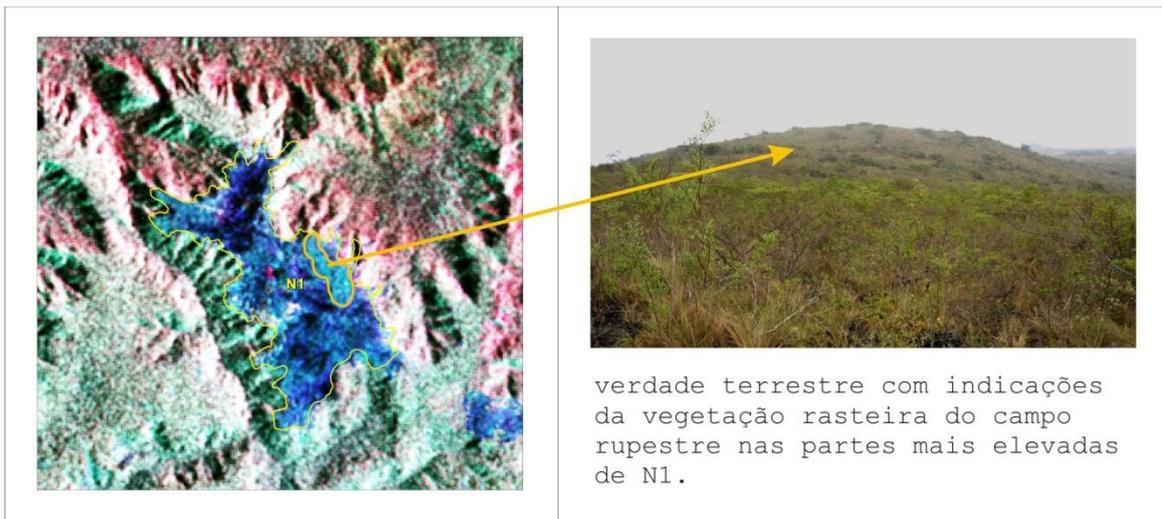


Figura 5 – Detalhe da imagem integrada óptica/radar e verdade terrestre de campo rupestre em N1, evidenciando a correlação.

5 Conclusões

As informações ambientais obtidas com o uso da tecnologia dos produtos integrados de imagens de radar e ópticas permitem, inicialmente, visualizar as diferenças dos matizes e do relevo entre os diversos alvos que compõem a paisagem de N1 e do entorno na área analisada. Áreas de florestas preservadas são abundantes nos limites da flona, mas mostram-se pressionadas pelo avanço das atividades antrópicas, evidenciando a necessidade de estudos mais elaborados sobre a temática - áreas de influência. Em relação à vegetação de campos rupestres, foi possível indicar áreas para preservação deste importante ecossistema, inserido na área da flona. No depósito N1, foi possível ainda discriminar matizes distintos, relacionados às variações de vegetação no platô, que por sua vez apresentam nítido controle geobotânico. Com base nessas diferentes respostas da cobertura superficial na paisagem do entorno de N1, a tecnologia da integração de radar com imagens ópticas pode ser utilizada para levantamento prévio de informações ambientais em escala semi-regional a local. Estudos em escala de detalhe no depósito de N1 vêm sendo conduzidos de forma a constituir parte de um Sistema de Arquitetura de Conhecimentos, que forneça critérios para acompanhamento, monitoramento e medições passíveis de serem implementados em um jazimento de ferro a ser lavrado a céu aberto bem como servir de modelo aplicável a outras áreas com semelhante contexto geo-ambiental.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), pelas imagens de radar e apoio em trabalhos de campo; à VALE, na pessoa do geólogo Lambertus C. Schardt, pela infra-estrutura de campo; à Viviane Lasmar Pacheco Monte e Fabiano Gumier Costa do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA – Flona Carajás), pelo apoio durante a realização do campo.

Referências bibliográficas

Boaventura, R. Geomorfologia da Folha SB.22 - Araguaia e parte da Folha SC.22 - Tocantins. Rio de Janeiro: MME, DNPM, 1974. (Projeto RADAMBRASIL, v.4).

Lobato, L.M., Rosière, C.A., Silva, R.C.F., Zucchetti, M., Baars, F.J., Seoane, J.C.S., Rios, F.X., Pimentel, M., Mendes, G.E., Monteiro, A.M.. A mineralização hidrotermal de ferro da Província Mineral de Carajás – Controle estrutural e contexto na evolução metalogenética da província. In.

ADIMB/DNPM. Caracterização de depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia. 1 ed. Brasília: DNPM-CT/MINERAL-ADIMB, 2005. 782p. , cap. 2, p.21-92.

Martins Jr., P.P., Carneiro, J.A. (in) Guia Prático de Requisição de Perícias Ambientais. Belo Horizonte: Ministério Público de MG. 2006. 96p., p.: 34-47.

Martins Jr., P.P., Marques, A.F.S.M., Vasconcelos, V.V., Endo, I., Novaes, L.A.A., Pereira, M.A.S. Modelo de integração de conhecimentos interdisciplinares para auxílio à decisão – os plantios ecológico-econômicos em zonas de recarga de aquíferos. Belo Horizonte: CETEC, 2006. p.24-48 (Nota Técnica-Tomo 3).

Martins Jr., P.P., Paiva, D.A., Pereira, J.S., Abreu Jr., J.C., Diniz, C.P.L. 2008. Projeto ACEE. Arquitetura de Conhecimentos em Ecologia-economia para Gestão Ambiental de Bacia Hidrográfica. Belo Horizonte: CNPq Edital 14-2004 Inovação Tecnológica em Ciência da Computação/CETEC/UFOP. Projeto em desenvolvimento. CNPq (2008).

Mather, P.M. Computer processing of remotely-sensed images: an introduction. Chichester: John Wiley, 1987. 325 p.

Meireles et al. Geologia das folhas Carajás e Rio Verde, Província Mineral dos Carajás, estado do Pará. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 33., Rio de Janeiro, 1984. Anais... Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geologia, 1984. v.5, p.2164-2174.

Mura, J. C., Paradella, W. R., Dutra, L. V. MAPSAR image simulation based on L-Band polarimetric SAR data of the airborne SAR R99 sensor of the CENSIPAM. In: SIMP. BRAS. SENS. REM, 13, 2007. Florianópolis. Anais... Florianópolis: INPE/SELPER, 2007. CD ROM, p. 4841-4848.

Oliveira, C.G., Paradella, W.R. An Assessment of the Altimetric Information Derived from Spaceborne SAR (RADARSAT-1, SRTM3) and Optical (ASTER) Data for Cartographic Application in the Amazon Region. Sensors, v.8, p. 3819-3829, 2008.

Paradella, W. R., Santos, A. R.; Veneziani, P., Silva, M. M. Q., Mura, J. C., Rabelo, T. N.; Knust, S. S. A., Teruiya, R.K., Miranda, F. P., Souza Filho, C. R., Crósta, A. P., O satélite MAPSAR do Programa Espacial Brasileiro: concepção, estado atual e potencial para aplicações nas Geociências. In: CONGR. BRAS. GEOL., 43, 2006. Aracaju. Anais... Aracaju: SBG, 2006. v. 1, p. 152.

Paradella, W. R., Santos, A R, Veneziani, P, Morais, M. C. de. O sinergismo de imagens Standard descendente do RADARSAT-1 e Thematic Mapper do LANDSAT-5 em aplicação geológica na Amazônia. . In: SIMP. BRAS. SENS. REM, 10, 2001. Fox do Iguaçu. Anais... Fox do Iguaçu: INPE/SELPER, 2001. CD ROM.

Paradella, W.R., Santos, A R; Veneziani, P; Sant'anna, M.V., Morais, M. C. de. Geological investigation using RADARSAT-1 images in the tropical rain forest environment of Brazil. Canadian Journal of Remote Sensing, v.26, n.2, p. 82-90, 2000.

PCI. Geomatica Software Solutions, reference manuals, version 9.0, PCI Geomatics Inc., 2003, Canada.

Resende, N.P., Barbosa, A.L.de M. Relatório de Pesquisa de Minério de Ferro, Distrito Ferrífero da Serra dos Carajás, Estado do Pará. Belém: AMZA, 1972. 248p, v. 1.

Ripley, E.A., Redmann, R.E., Crowder, A.A. Environmental effects of mining. Florida: St. Lucie Press, 1996. 396p.

Santos, P.R.A., Gaboardi, C., Oliveira, L.C. Avaliação da precisão vertical dos modelos SRTM para a Amazônia. In: SIMP. BRAS. SENS. REM., 12, 2005. Goiânia. Anais... Goiânica: INPE/SELPER, 2005. v. 1, p. 4473-4480. CDROM.

Silva, M.F.F. da. Análise Florística da Vegetação que cresce sobre canga hematítica em Carajás-Pa (Brasil). Pará: Museu Paraense Emílio Goeldi, 1992. p. 79-108 (Série Especial do Boletim 7, v.2).

Tolbert, G. E., Treimane, J.W., Melcher, G.C., Gomes, C.B. The recently discovered Serra dos Carajás iron deposits, Northern Brazil. *Economic Geology*, v. 66, n. 7, p. 985-994, 1971.

Wirth, K.R., Gibbs, A.K., Olszewski Jr., W.J. U-Pb ages of zircons from the Grão Pará group and Serra dos Carajás granite, Pará, Brazil. *RBG - Revista Brasileira de Geociências*, v.16, n.2, p.195-200, 1986.

2.2 Mapping iron-mineralised laterite environments based on textural attributes from MAPSAR image simulation – SAR R99B (SIVAM/SIPAM) in the Amazon region.

Maria Carolina de Moraes¹, Paulo Martins Pereira Junior^{1,2} and Waldir Renato Paradella³

1. Federal University of Ouro Preto (UFOP), School of Mines,

Department of Geology (DEGEO)

Campus Universitário Morro do Cruzeiro, s/n – Bauxita - 35400-000.

Ouro Preto, Minas Gerais State, Brazil.

Phone/Fax.: +55-31- 3559-1601

E-mail: mdemorais@gmail.com

2. Centro Tecnológico de Minas Gerais (CETEC), Water Resources Sector (SAA).

Av. José Cândido da Silveira, 2000, Horto – Belo Horizonte – 31170-000

Minas Gerais State, Brazil.

Phone/Fax.: +55-31- 3489-2250 / FAX +55 31 3489-2227

E-mail: maerteyn@gmail.com

3. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (National Institute for Space Research) (INPE), Remote Sensing Division (DSR).

Av. dos Astronautas, 1758 – São José dos Campos – 12227-010

São Paulo State, Brazil.

Phone/Fax.: +55-12- 3945-6438 / 12-3945-6400

E-mail: waldir@ltid.inpe.br

Abstract: The use of remote sensing is a valuable method for geological mapping as it provides synoptic coverage at relatively low cost. In the Amazon region, radar imagery has a potential for geological applications due the enhanced sensitivity to topography (macro-topography), surface roughness (micro-topography), and dielectric properties of materials, independent of weather, sun angle, and illumination conditions. As the roughness is highlighted, SAR textural attributes can be used for mapping iron-ore mineralized laterites in N1 deposit, located in the Carajás Province. For mapping the lateritic cover, the airborne SAR was used from Surveillance of the Amazon System (SIVAM/SIPAM, L – hh, hv, vv) to simulate orbital Multi-Application Purpose SAR (MAPSAR). The images were analysed through textural classifications derived from second-order measure (GLCM) with the objective of mapping the mineralized laterites for iron ore. Differences are highlighted when comparing the classified maps and the ground information. Not all classes were separated, but a high performance for textural attributes was presented by the hematite class. This class was sensitive to the sensor and target parameters, especially macro-topography and physics characteristics. The results showed that for mineral exploration, the radar images at L band can be used as a practical tool for a preliminary mapping, and as a guide for field-based verification.

Keywords: Amazon, SAR, textural attribute, laterite cover, SIVAM/SIPAM, L/ hh, hv, vv.

Mapeamento de ambientes com lateritas mineralizadas em ferro baseado em atributos texturais das imagens da simulação do MAPSAR obtidas do SAR R99B (SIVAM/SIPAM) na região Amazônica.

Resumo: Imagens de radar são úteis em geologia devido à visão sinóptica e a uma cobertura a um custo relativamente baixo. Particularmente na região Amazônica, o uso de imagens de radar em aplicações geológicas é favorecido pela capacidade de realce do relevo (macro-topografia), da rugosidade superficial (micro-topografia) e da constante dielétrica, independente da presença de nuvens, ângulo solar e condições de iluminação. A micro-topografia do terreno, realçada neste tipo de imagem, permite que a textura das imagens de radar possa ser usada no mapeamento das coberturas lateríticas mineralizadas em ferro do depósito N1, localizado na Província de Carajás. A investigação se baseou em imagens adquiridas por radar aerotransportado (SIVAM/SIPAM, banda L-hh, hv e vv), cujas faixas de vôo foram degradadas visando à simulação do SAR orbital MAPSAR. Os dados foram analisados através de classificações texturais, derivadas de medidas obtidas por meio de Matriz de Co-ocorrência dos Níveis de Cinza (MCNC) com o objetivo de mapeamento das unidades lateríticas em N1. Muitas diferenças foram encontradas entre as classes mapeadas e o mapa de verdade terrestre.

Nem todas as classes foram separadas, mas a hematita apresentou alto desempenho na classificação. Esta classe foi sensível aos parâmetros do alvo e do sensor, especialmente a macrotopografia e as características físicas. Os resultados mostraram que a classificação baseada em MCNC pode ser usada como ferramenta preliminar de mapeamento das lateritas como um guia para verificação de campo.

Palavras chave: Amazônia, Radar de Abertura Sintética, MAPSAR, atributo textural, cobertura laterítica, SIVAM/SIPAM, L/hh,hv,vv.

INTRODUCTION

The Carajás Mineral Province is located on the easternmost border of the Amazon Region. It is one of most important mineral provinces in the world, with a predominating iron production and enormous potentials for Mn, Cu, Au, Ni, U, Ag, Pd, Pt, Os, and others (Lobato et al., 2005). This mineral province area is on a mountainous terrain with altitudes higher than 900m, surrounded by southern and northern lowlands with altitudes around 150-200m with thick oxisols ("latosols") as a result of deep chemical weathering and with few rocks outcrops. The vegetation cover is typical of the Equatorial forest with complex, multilevel canopies and numerous species (Paradella et al. 1994).

Since 1967, when the iron deposits were discovered, a remarkable geobotanical contrast given by the iron-mineralised laterites and specific vegetation types has been recognized. The deposits are related to a set of plateaux covered by thick hard iron-rich crusts developed over volcanic rocks and ironstones. A specific low-density *Campos Rupestres* vegetation (Silva et al., 1986) is associated with the deposits, and shows a strong contrast with the dense equatorial forest. This contrast was detectable through radar airborne C-band imageries during the SAREX' 92 (South American Radar Experiment'92) campaigns (Morais, et al. 2002). The Province was almost completely covered during the SAREX' 92 campaign in preparation for ERS-2 and RADARSAT-1 launches. Details of the SAREX' 92 can be found in Wooding et al. (1993).

In the Amazon region, C-band backscatter intensity is strongly controlled by decameter scale changes in the surface slope, and by centimeter scale roughness characteristics of the crown scattering, including multiple scattering within the crowns. The preliminary evaluation, by textural classifications, of this SAR data has shown that the backscattered C band responses are sensitive to this geobotanical contrast in depicting variations in the duricrust vegetation associations (Morais et al., 2002).

Due to the economic importance of this area, there is a practical need to provide accurate and up-to-date surface maps to support mineral exploration and environmental programs. The province has been extensively covered by various airborne (RADAMBRASIL, INTERA, SAREX) and spaceborne SAR (ERS-1, JERS-1, RADARSAT-1) surveys. This data has played an important role in the acquisition of geological information in the Carajás Province (Paradella et al. 1997, Paradella et al. 2000). In addition, with SAR system satellites (ALOS/PALSAR and RADARSAT-2) having new characteristics (resolution, polarization, incidence, wavelength) the practical utility of textural SAR classification for mapping remains to be demonstrated.

The Brazilian-German MAPSAR (Multi-Application Purpose SAR) is a proposal for an innovative L-band sensor whose main mission is to assess and monitor natural resources. The MAPSAR mission is a small spaceborne SAR conceived by Brazilian-German scientific and technical cooperation between INPE (*Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais*) and DLR (*Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt*) (Schröder et al. 2005). Even before its launching, imagery simulation was an important aspect for the potential-use investigation of SAR. Thus, before its launching, the simulation of MAPSAR imagery is now performed by using images provided by the airborne SAR L-Band sensor, the R99 of the SIVAM/SIPAM (Surveillance of the Amazon System) (Schröder et al., 2005). In this stage, a set of test sites was selected covering fields like Agriculture, Forestry, Geology and Mineral Exploration, Disaster Management, Coastal Zone Studies, Geomorphology, Hydrology and Environmental Analysis.

The images of the Carajás Mineral Province were acquired on June 2005 as part of this campaign. The area was covered in June 2005 by an airborne SAR-R99B with adapted processing and simulation techniques to simulate the expected MAPSAR imagery products. Since the lateritic compositions play an important role in the expression of the macro and micro topographical roughness, it was considered worthwhile to evaluate the SAR texture obtained from MAPSAR L-band on lateritic crust.

The main objective was mapping iron ore laterites from the N1 Deposit in Carajás Mineral Province through MAPSAR imagery simulation. The research used the L-band with the expectation that this proposed approach could be used as a tool for mapping other similar areas.

STUDY AREA

The N1 is an iron-ore deposit located in the Carajás Mineral Province, on the easternmost border of the Amazon Region (Fig. 1). The total ore resources for the Carajás province are estimated to be 17.8

billion tons having a 66.1 % iron concentration (Beisiegel et al. 1973). The N1 deposit is a plateau with altitudes of around 700m and an approximate area of 24km².

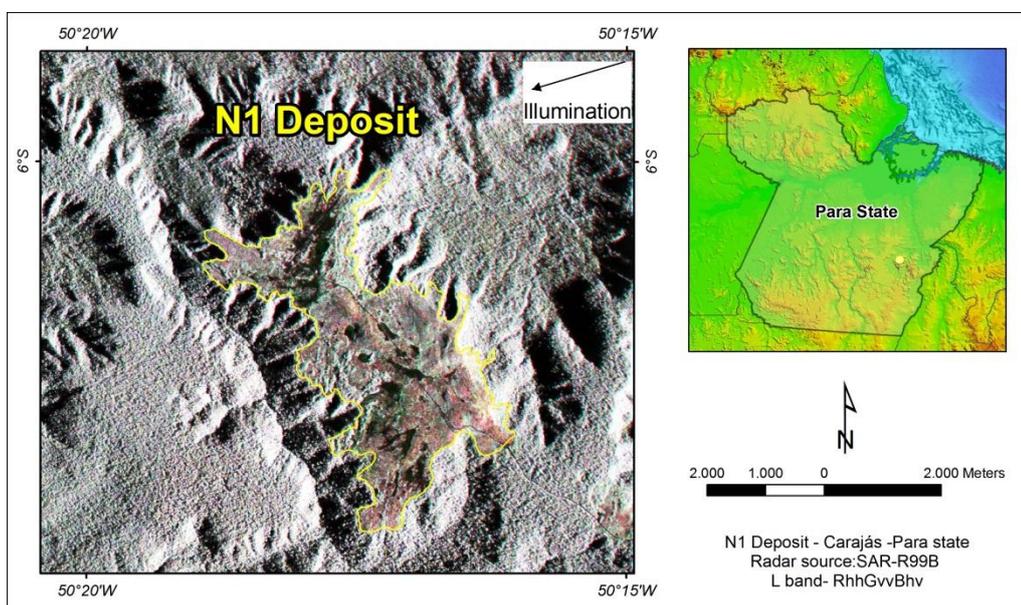


Figure 1 - Location Map of N1 Deposit.

The N1 deposit is related to rocks of the Grão Pará Group, displaying complex patterns of folding and faulting. The Grão Pará Group has been subdivided into two units: volcanic rocks of the Parauapebas Formation (Meirelles et al. 1984), and the ironstones of the Carajás Formation (Beisiegel et al. 1973). The volcanic rocks are a bimodal sequence of basalts, dolerites and rhyolites. The ironstones of the Carajás Formation are composed of several types of iron ore of various oxide facies. They are mainly jaspelite and interlayered hematite and silica (Tolbert et al., 1971), which are either of soft or hard hematite (Lobato et al. 2005). The jaspelites have variable compositions with 17.11–43.40% Fe and 35.10–60.84% SiO₂ presenting typical interlayering of dark and light centimetre-thick mesobands and micro-banding with iron-oxide layers intercalated with white to pale or bright red layers composed of crypto to microcrystalline SiO₂ (jasper and chert) with inclusions of cryptocrystalline hematite (Tolbert et al., 1971, Beisiegel et al., 1973).

Under the humid tropical climate of the Amazon region, ferruginous and latosols are extensively developed in the plateau. These weathered products show varying degrees of alteration that are responsible for the differences in composition, hardness and textures. The N1 area was mapped during the economic evaluation of the iron reserves in the Province (Resende and Barbosa, 1972). The following types of ferruginous crusts were identified in the area: duricrust (*in situ* duricrust with limonite blocks), chemical crust (hematite fragments with goethitic pisolites), iron-ore duricrust (hematite ore blocks and subordinately specularite, cemented with hydrous ferric oxides), and hematite

(mainly hematite outcrops). In addition, a latosol unit was also mapped in a restricted area, associated with arboreal vegetation. The surface map of the plateau is seen in Fig. 2.

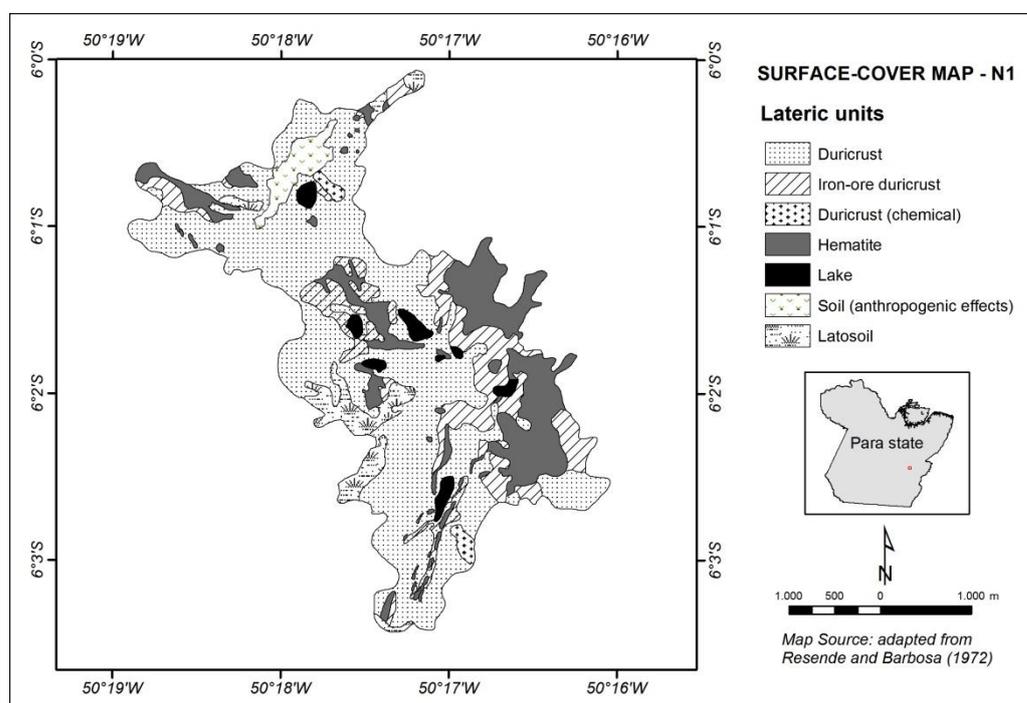


Figure 2 – Surface-Cover Map from N1 plateau adapted from Resende and Barbosa (1972).

Situated on rock outcrops N1 vegetation has a typical aspect of the tropical scrubs called *campos rupestres* (Silva et al. 1986). It is predominantly composed of herbs and arboreal plants types with less development of the semi-arboreal type. Semi-arboreal ecosystems are common in restrict lands; others areas have arboreal species strictly found in latosol. *Gramineae* and *Leguminosae* plant families have a large geographic distribution. A geobotanical control is evident in N1 ferruginous area showing relations between vegetation and relief that support the crusts (Silva et al. 1986). As seen in figure 3, on the top of the hills with many rock outcrops a layer of soil is practically inexistent and plant species are of short types. There are certain parts where this vegetation becomes sparse thus permitting the exposition of the iron formations. Coming down the hills it is common to see some soil and organic matter, which permit the development of plant species of higher sizes in fissures crusts. On the hills basis the flora attains its maximum development with a major growth of flora. Many lakes are covered by a vegetation of the *Typha sp* type regionally known as “taboa”, where it is exposed extensive outcrops of the crusts during the dry seasons

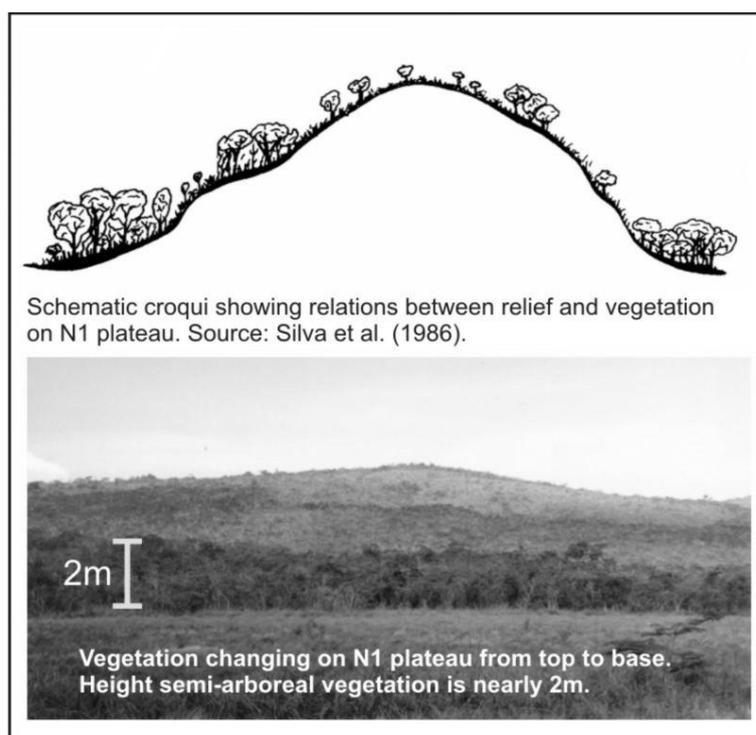


Figure 3 – Vegetation changing x relief on N1 plateau.

DATA SET

The research was based on airborne SAR imagery obtained from the Amazon Surveillance System (SIVAM/SIPAM, L – hh, hv, vv) aiming for the simulation of orbital Multi-Application Purpose SAR (MAPSAR) used for the assessment and monitoring of natural resource applications in the Amazon region. The characteristics of SAR-R99B data are shown in Tab. 1.

Table 1 – SAR R99B characteristics.

Plataform	EMB -145
Band	L
Polarisation	hh, hv, vv
Acquisition Date	June 2005
Incident Angle (deg)	48/53°
Spatial Resolution(m)	11 x 11
Image Format	8-bits
Illumination Geometry	Look Azimuth: 282°

METHODOLOGY

The research was based statistical approach known as Grey Level Co-occurrence Matrix (GLCM) proposed by Haralick (1979). Grey tone spatial dependence approach characterises texture by the spatial relationships among gray tones in a local area. Grey tone co-occurrence can be specified in a matrix of relative frequencies P_{ij} in which two neighbouring resolution cells separated by distance d occur on the image, one with grey tone i and the other with grey tone j . Such matrices of spatial grey tone dependence frequencies are symmetric and are a function of the angular relationship between the neighbouring resolution cells as well as a function of the distance between them (Haralick, 1979). Several statistical parameters can be extracted from the GLCM, which can be used as input data in an automatic classification process. Weska et al. (1976), and Welch et al. (1990) consider a class of local properties based on absolute differences between pairs of grey levels. The Grey Level Difference Vector (GLDV) is based on the absolute differences between pairs of grey levels i and j at a distance d and at an angle θ .

The textural analysis based on GLCM is a common technique which proved to be effective in earlier studies, e.g. Shanmugan et al. (1981), Ulaby et al. (1986), Yanasse et al. (1993), Baraldi and Parmiggiani (1995), and Kurvonen and Hallikainen (1999), but few examples have focused on the geological applications in tropical environments (Azzibrouck et al., 1997).

The investigation was based on textural descriptors extracted from the GLCM and GLDV used as input for an unsupervised classification scheme. Some of these parameters are related to specific first-order statistical concepts, such as contrast and variance, with clear textural meaning (pixel pair repetition rate, spatial frequencies detection, etc.), while other parameters contain textural information associated with more than one specific textural meaning (Baraldi and Parmiggiani, 1995).

No speckle filtering was applied to the images in order to keep the original texture of SAR scenes. Representative samples of nine classes were chosen, on the basis of field observations and the mapped surface: C1 = Latosol, C2 = Soil (anthropogenic effects), C3 = Duricrust (chemical), C4 = Duricrust, C5 = Iron-ore duricrust (with shadow), C6 = Iron-ore duricrust, C7 = Hematite (with shadow), C8 = Hematite, and C9 = Lake. The inclusion of some classes with shadow-effects was necessary since shadow effects were pronounced on the SAR images. Based on these samples, second-order measures derived from GLCM (mean, homogeneity, contrast, dissimilarity, entropy, energy, correlation) and from Grey-Level Difference Vector-GLDV (energy, entropy, mean, contrast) were analysed. The second-order measures were computed with nine configurations of distance (d), i.e., (-2,0), (-2,1), (-2,2), (-1,2), (0,2), (1,2), (2,2), (2,1), and (2,0). Since 82 measures were made, it became impracticable to use such a large number of configurations in the classification.

Therefore, texture measure selection was based on the Discriminant Factor decision rule that evaluates the separability between classes with details of method can be found in (Rennó et al., 1998). Thus, for two hypothetical classes *A* and *B*, and one texture measure *k*, the Discriminant Factor was computed according to the variation between and within these classes, given by Eq. 1:

$$DF_{AB,k} = \frac{n_A \cdot \sum_{i=1}^{n_A} (X_{Ai,k} - \bar{X}_{B,k})^2 + n_B \cdot \sum_{i=1}^{n_B} (X_{Bi,k} - \bar{X}_{A,k})^2}{n_A \cdot \sum_{i=1}^{n_A} (X_{Ai,k} - \bar{X}_{A,k})^2 + n_B \cdot \sum_{i=1}^{n_B} (X_{Bi,k} - \bar{X}_{B,k})^2} \quad \text{Equation (1)}$$

where $X_{\omega i,k}$ is the *i*th sample of class ω for the measure *k*, $\bar{X}_{\omega,k}$ is the mean value of measure *k* class ω , and n_{ω} is the number of samples of class ω .

According Equation 1, the texture measure chosen to separate classes *A* and *B* is one that selects the highest value of DF_{AB} for all *k*, indicating the best separateness for these classes. $DF_{AB,k}$ values near one denote that there are confusion between classes *A* and *B* for the texture measure *K*. Thus, for each pair of nine N1 classes, the best set of measures were selected by the criteria described above, using only high DF, which gave (visually) a good performance for classification.

The next step was to generate selected textural channels using Texture Analysis. For a better control of the grey levels, the textural channels were processed with 32-bits. A 7 x 7 window pixel cell size was selected in order to maintain GLCM sensitivity to the smallest details of the targets while reducing both noise effects. An unsupervised Isoclus classifier (Mather, 1987) was used for the classification. The classifications were based on the best sets of texture measures for each polarisation isolated (hh, hv, and vv) and combined (hh and hv, hh and vv, hv and vv, hh, hv, and vv). In order to refine the results, a post-classification Mode filter algorithm was also applied.

The classification results were analyzed through a confusion matrix to estimate the amount of correctly and incorrectly classified pixels for each class. The method used to evaluate its accuracy was the Kappa coefficient of agreement (Foody, 1992), which was evaluated through test samples extracted from the Surface-Cover Map (see Figure 2). On each classified map, 48 points were randomly allocated for two classes: hematite and no hematite. The statistic test used to evaluate the significant differences between the two classifications is given by Eq. 2. All tests for the significant difference between classification results were carried out at a 95 % confidence level. At this level, two results may be considered significantly different if $\hat{\Delta k} > 1.96$ (Benson and DeGloria, 1985).

$$\Delta \hat{k} = \frac{|\hat{k}_1 - \hat{k}_2|}{\sqrt{\sigma_{\infty}^2[\hat{k}_1] + \sigma_{\infty}^2[\hat{k}_2]}} \quad \text{Equation (2)}$$

Where \hat{k} kappa and $\sigma_{\infty}^2[\hat{k}]$ is the variance kappa.

In the radar images, small-scale surface roughness refers to micro-relief that may modulate the radar return in flat terrain. The roughness varies with radar wavelengths, incidence angle, and the topography. The roughness may closely relate to underlying geological substrate and may also be caused by weathering processes, by soil composition, or vegetation associations (Werle, 1988).

The roughness is a very important target parameter that influences the performance of the textural classification, and roughness measurements were also collected at 73 representative sites of the main classes. Surface roughness is generally difficult to measure accurately in the field, but the *in situ* measurements were considered a first approximation to categorise lateritic crusts as smooth, intermediate, or rough. The height values from each unit were obtained, in RMS (root mean square) values, by inserting a thin plate into the surface (Fig. 4) photographing it, and digitising the profile. The roughness classification was based on the criterion proposed by (Peake and Oliver, 1971) calculated for local incident angles at L band wavelength.

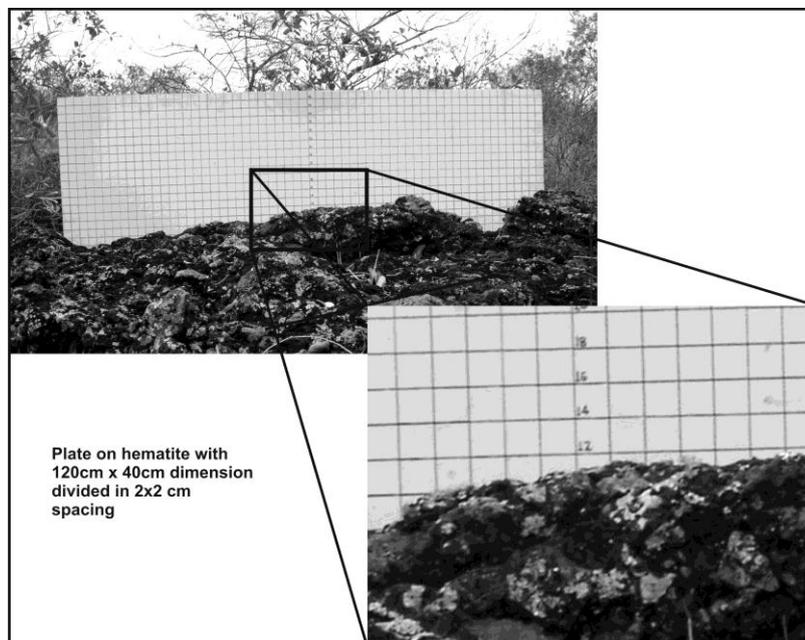


Figure 4 - Plate on the lateritic cover (120cm length x 40cm height).

RESULTS

For each SAR configuration, Tab. 2 shows the best selected textural measures used in the classifications with distances d (distance in pixels at considered direction for measures related to GLCM). The mean and GLDV contrast measures were sensitive for all data.

Table 2 - Best selected textural measures with the d distances for each SAR configuration used in the classification.

SAR data set	Measures	d
L-hh	Mean	-2,1
	Dissimilarity	1,2
	GLDV contrast	1,2
	GLDV energy	2,1
L-hv	Mean	1,2
	Contrast	-2,1
	GLDV Contrast	2,2
	Entropy	-2,2
L-vv	Mean	-1,2
	Entropy	-2,0
	Homogeneity	1,2
	GLDV contrast	-2,1

The set of selected measures was used as input for the unsupervised classification with hh, hv, vv - L bands and their combinations, hh and hv, hh and vv, hv and vv, hh, hv and vv. The best textural classification for L band is shown in Fig. 5 (hh and vv). The results indicate that not all classes were discriminated on SAR R99B images when compared with the Surface-Cover Map (see Fig. 2). The latosoil, duricrust (chemical), iron ore duricrust, and lake were not classified. Backscattered L band responses are no sensitive to these classes. For latosoil the volume scattering effect was predominant, since response was affected by forest canopy over the at terrain.

L band is very sensitive to small-scales variations in surface roughness and the backscatter is affected by the terrain below a vegetation canopy (Tapley, 2002). The dielectric properties of surface materials can also influence on radar return signal. A very low dielectric constant in dry environments allows longer radar wavelengths to penetrate to greater depth (Werle, 1988). Lateritic crusts have capability to retain high water volume on the rainy seasons, but the area was affected by the strong

drought, which occurred in the Amazon region, from November 2004 to the end of 2005 (Marengo et al., 2007).

The drought influenced SAR imagery acquisition on June 2005, corresponding to the low rain mean of that year (Fig. 6). At this condition, duricrust (chemical) showed very dry grass vegetation in flat terrains, and the low backscattering can be related to low values of dielectric. This effect was also observed in dry lakes. At normal rain conditions, it was expected the typical aquatic vegetation on lakes, and as a consequence a higher radar responses. Therefore, grasses vegetation appears smooth at L band, as showed in Fig. 7, and it has affected the classification that may result on confusion where dry lakes were incorrectly classified as soil (anthropogenic effects).

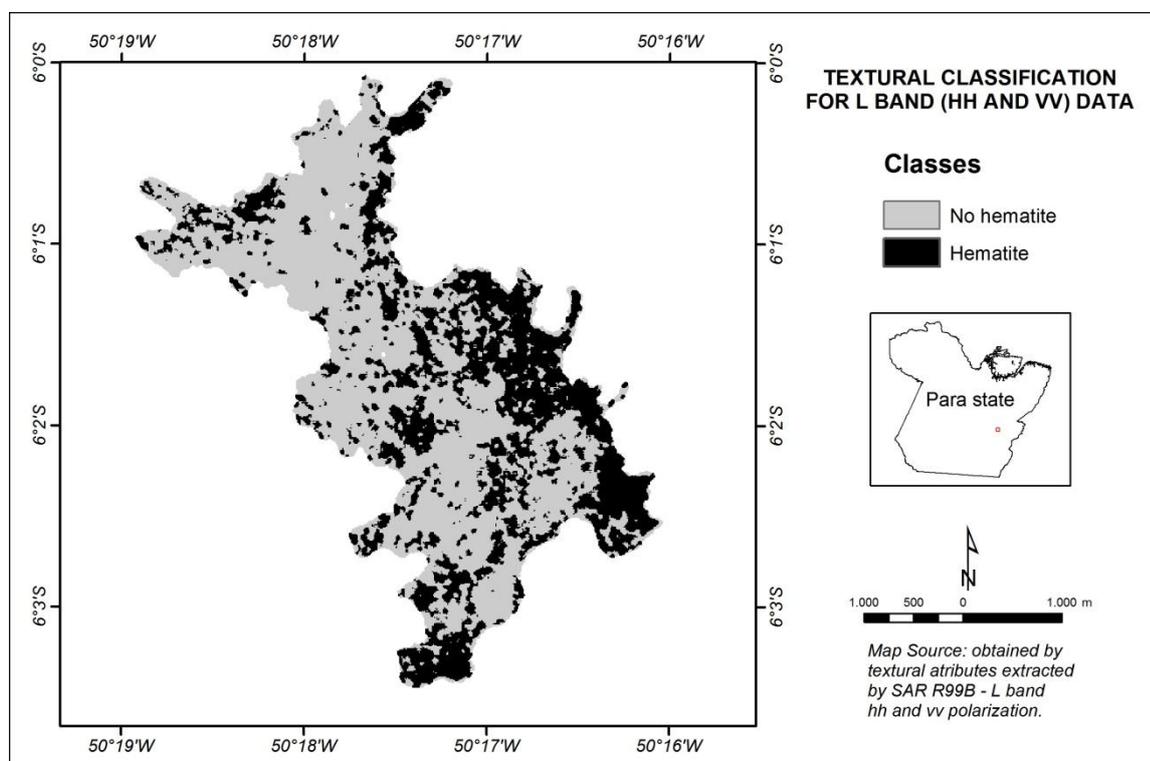


Figure 5 - Textural classification for the L band (hh and vv) data.

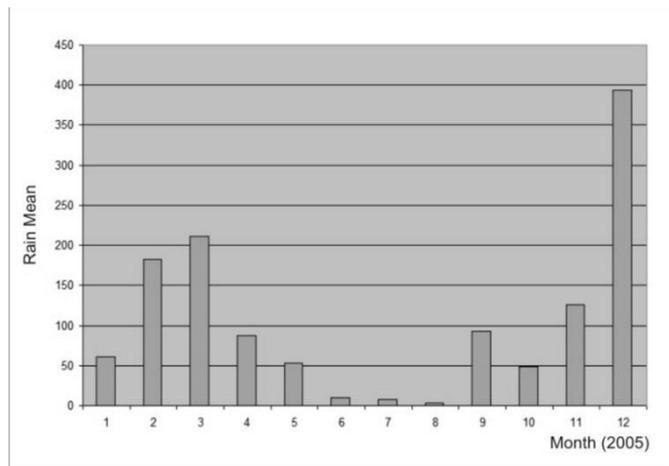


Figure 6 - Rain mean for 2005 year in the area (Source: ANA – National Water Agency).

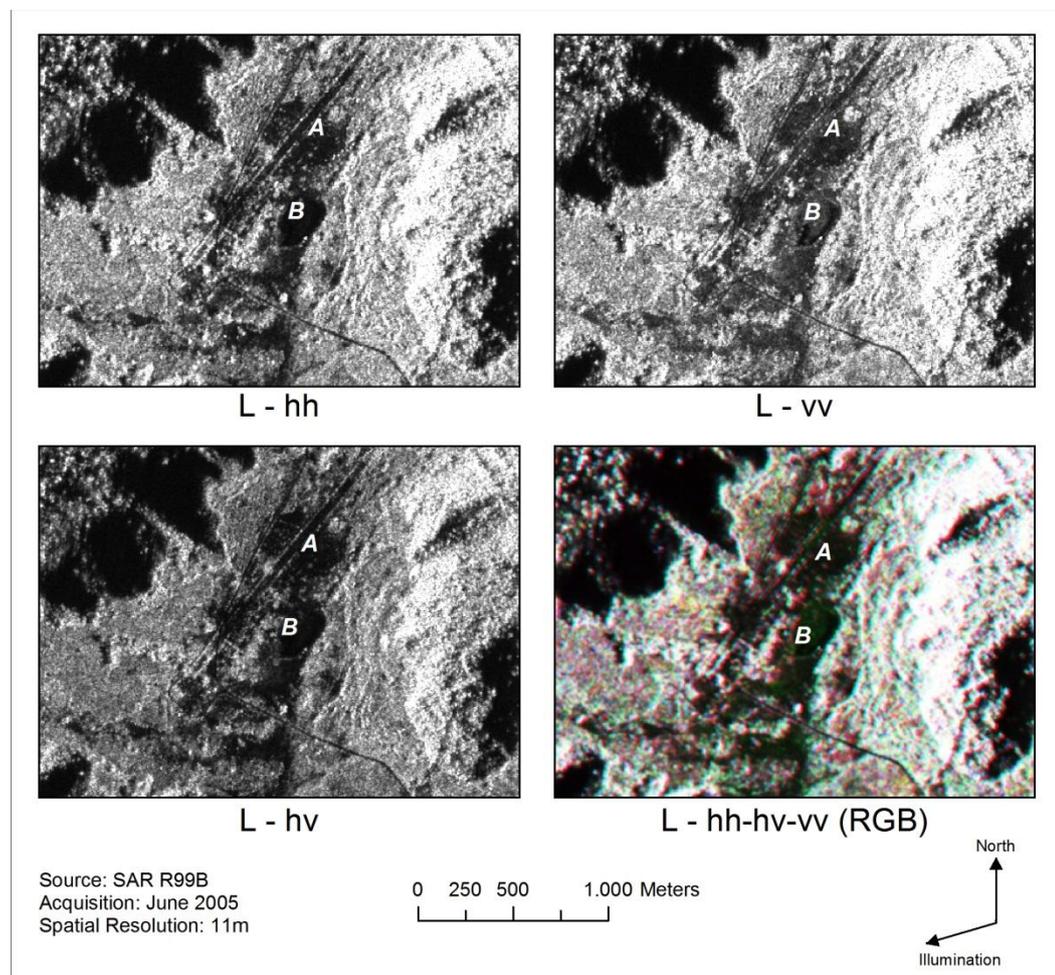


Figure 7 – Responses by polarized L band radar backscatter for soil (anthropogenic effects) – letter A and dry lake – letter B.

Although the soil (anthropogenic effects), duricrust, and hematite were relatively well classified, they presented confusion with other classes. For this reason, the statistical analysis was made between hematite and no hematite classes. Tab. 3 shows the kappa values for all classifications, where duricrust and soil (anthropogenic effects) were grouped into the “no hematite” class and evaluated with “hematite” class. According to this table, the hh classification was better than vv polarization, while the cross polarization presented the worst result. The best results are for both hh and vv classification, showed by the confusion matrix (Tab. 4) obtained by test samples based on the field-investigated points, where the rows present the percentage results of the classification and the columns are the truth obtained from random test samples. According these results, hematite showed a good performance on textural classification. The application of the Kappa ranking, as proposed by Landis and Koch (1977), supports this results and indicates the following: (1) the best results (very good in the ranking) were obtained when the classifications were based on both polarization under hh and vv, (2) the best classification with only one band occurred when using hh (bad in the ranking), and (3) the cross polarization was considered the worst result for the classifications.

These results indicate that for N1 deposit hh polarization suffers less attenuation from the vertically arboreal and semi-arboreal vegetation. The hh capacity to penetrate surface materials, which presents a compact horizontal structure, was favored by a large amount of hematite outcrops. VV signal polarization has a good performance due the ability to provide better discrimination between targets with similar roughness characteristics, like vegetation, soil (anthropogenic effects), duricrust (chemical) and dries lakes. The cross-polarized caused a decreased on kappa values when it added on both hh and vv classifications as it can be derived by a loss of signal radar on cross-polarized response. Also, cross-polarized signal provided a better discrimination between specular and diffuse signal return, like classes covered by dry grasses and arboreal and semi-arboreal vegetation.

Table 3 - Kappa Coefficients for the unsupervised classifications obtained by test samples from field.

SAR data	K (%)	Kappa variance (%)
L-hh-vv	0.720	0.009
L-hv-vv	0.560	0.011
L-hh-hv	0.450	0.013
L-hh-hv-vv	0.400	0.012
L-hh	0.372	0.013
L-vv	0.360	0.013
L-hv	0.320	0.016

Table 4 - Confusion matrix for the classification based on textural attributes extracted from airborne SAR data (hh, hv, and vv).

Classified data	Truth Reference data		
	no hematite	hematite	Number of pixels
no hematite	80%	20%	30
hematite	24%	76%	20
Number of pixels	25	25	50

In relation to roughness classification, N1 plateau with a relative flat topographic relief and low elevations variation (Fig. 9) is controlled by micro-relief. A small range of incident angles occurred since N1 plateau as located in the centre of swath. With regards to L-band, the surface roughness of lateritic crusts derived from 73 *in situ* measurements based on a scheme proposed by Peake and Oliver (1971) were not sensitive to the variations (Fig. 8). According to these results, most classes were classified as intermediate, i.e., the diffuse reflection is observed and this results in medium backscattering SAR. Duricrust (chemical) and soil (anthropogenic effects), presented the best results and were classified as smooth, as expected at L band. The reduced size particles of these classes, located at flat areas, showed a specular reflection at this wavelength.

The influence of macro-topography was evident on hematite results classification. This class exhibits a stronger influence on relief in eastern segment of the plateaux given by bright returns and shadows (front/back slopes). Further, the 282° look azimuth direction favoured the relief enhancing terrain oriented at NW-SE, with many hematite' occurrence.

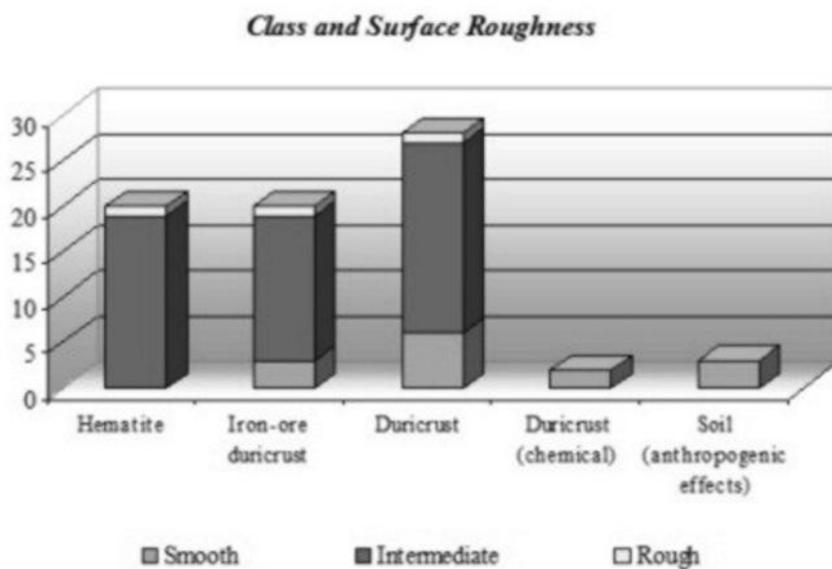


Figure 8 - Roughness classification for all classes.

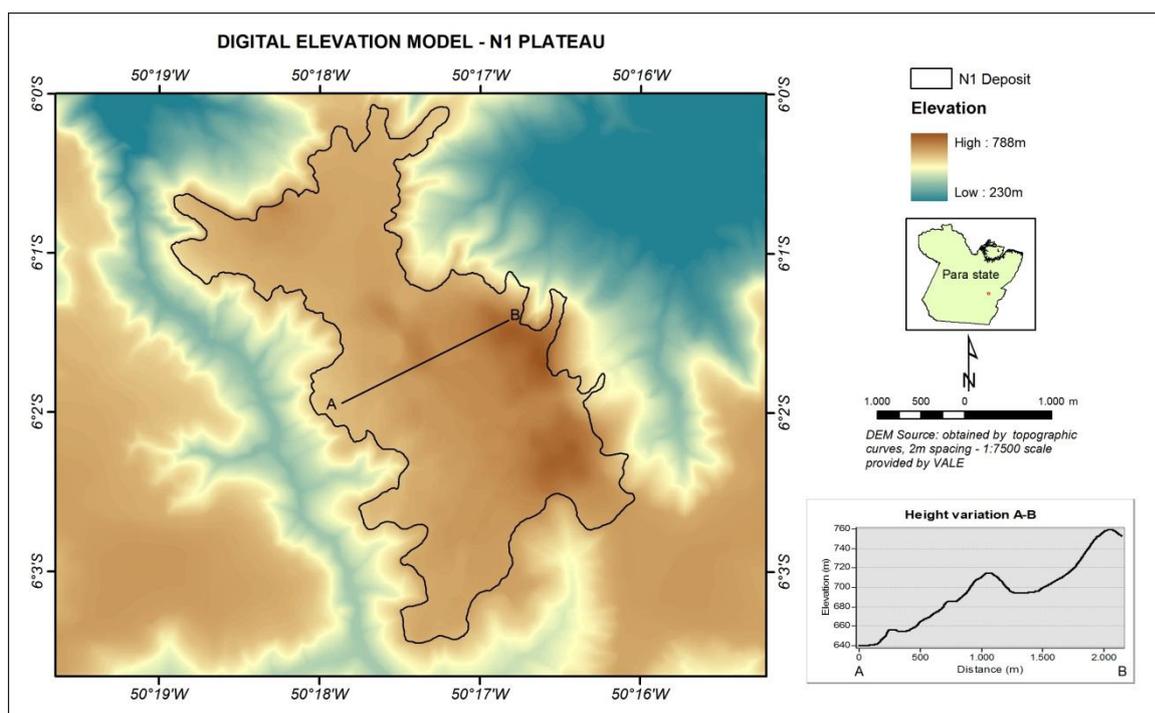


Figure 9 – DEM generated from topographic curves - N1 plateau.

CONCLUSIONS

Textures attributes derived from second-order measures (GLCM) from airborne SAR L-band can be used with limitations as a practical tool for a preliminary map. The investigation has shown that textural descriptors were sensitive to the (1) SAR wavelength, (2) SAR polarisation, and (3) target

parameters (dielectric constant, macro and micro-topography). L band was very sensitive to small-scale areas of vegetation and the surface backscatter was affected by the terrain below this vegetation. For forest canopy on flat terrain, the volume scattering effect was predominant. The hh polarization has better performance than vv to penetrate materials with a compact horizontal structure, like hematite. Already vv polarization presented better performance on discrimination targets with similar roughness characteristics, like vegetation, soil (anthropogenic effects), duricrust (chemical), and dry lakes. The cross-polarized signal caused a decreased on classification results and it can be due to the loss of signal radar of cross-polarized response. The dielectric constant can be affected the area **and** submitted targets to drought conditions. The hematite compact structure, on higher areas of the plateau, was sensitive to macro-topography and, and it contributed to discriminate it from others classes. The surface roughness was poorly classified at L-band and most classes were classified as intermediate. Most classes were classified as smooth at specular reflection conditions. From all these factors, it can be observed that the wavelength was the most important factor to discriminate iron-mineralized laterites in N1, as previously observed at C band in N1. Also, this approach can be used as a practical tool for a preliminary map, which may serve as a guide for detailed iron-mineralised laterites mapping in Carajás, and other minerals, like phosphate-titanium mineralised laterites in Maicuru. Multi-wavelength SAR images is desirable for a better classes discrimination. Finally, an additional approach will deserve attention for future research with use of textural classification derived from polarimetric SAR data.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors wish to thank to Dr. Camilo D. Rennó (INPE) for the support with the Texture algorithm and kappa statistics. Special thanks to INPE for field support, and to VALE (GAJAN) mining company, particularly to senior-geologist Lambertus C. Schardt, for the infrastructure in Carajás. The authors also thank to João Álvaro Carneiro (CETEC) for discussions.

REFERENCES

AZZIBROUCK, G.A., SAINT-JEAN, R., PREVOST, C. 1997. Analyse de la texture d'une image RADARSAT pour la cartographie géologique dans la Forêt Équatoriale de Ngoutou, est du Gabon. In: Proceedings of Geomatics in the era of RADARSAT (GER'97), 1997, Ottawa. Proceedings...CD-ROM.

- BARALDI, A., PARMIGGIANI, F. 1995. An investigation of the textural characteristics associated with Gray Level Cooccurrence Matrix statistical parameters. *IEEE Trans. Geosc. Remote Sens.*, 33: 293-304.
- BEISIEGEL, V.R., BERNADELLI, A.L., DRUMMOND, N.F., RUFF, A.W., TREMAINE, J.W. 1973. Geologia e Recursos Minerais da Serra dos Carajás. *Rev. Bras. Geoc.*, 3: 215-242.
- BENSON, A.S., DEGLORIA, S.D. 1985. Interpretation of Landsat-4 Thematic Mapper and Multispectral Scanner data for forest surveys. *Photogr. Engineering Remote Sens.*, 51: 1281-1289.
- FOODY, G.M. 1992. On the compensation for change agreement in image classification accuracy assesment. *Photogr. Engineering Remote Sens.*, 6: 1459-1460.
- HARALICK, R.M. 1979. Statistical and structural approaches to texture. *IEEE Trans. Geosc. Remote Sens.*, 67: 786-804.
- KURVONEN, L., HALLIKAINEN, M, T. 1999. Textural information of multitemporal ERS-1 and JERS images with applications to land and forest type classification in boreal zone. *IEEE Trans. Geosc. Remote Sens.*, 37: 680-689.
- LANDIS, J.R., KOCH, G.G. 1977. The measures of observer agreement for categorical data. *Biometrics.*, 33: 159-174.
- LOBATO, L.M., ROSIÈRE, C.A., SILVA, R.C.F., ZUCCHETTI, M., BAARS, F.J., SEOANE, J.C.S., RIOS, F.X., PIMENTEL, M., MENDES, G.E, MONTEIRO, A.M. 2005. A mineralização hidrotermal de ferro da Província Mineral de Carajás – Controle estrutural e contexto na evolução metalogenética da província. In *Caracterização de depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia*, ADIMB/DNPM, Ed., DNPM-CT/MINERAL-ADIMB: Brasília, 2: p. 20-92.
- MARENGO, J.A., NOBRE, C.A., TOMASELLA, J., CARDOSO, M.F. Hydro-climatic and ecological behaviour of the drought of Amazonia in 2005. 2007. *Philosophical Transactions of the Royal Society.*, Published on line, 6p.
- MATHER, P.M. 1987. *Computer processing of remotely-sensed images: an introduction*. John Wiley, Chichester, U.K., 325 p.
- MEIRELLES, E.M., HIRATA, W.K., AMARAL, A.F., MEDEIROS FILHO, C.A, GATO, W.C. 1984. Geologia das folhas Carajás e Rio Verde, Província Mineral dos Carajás, Estado do Pará. In: 33th Brazilian Congress of Geology, 33.: 1984, Rio de Janeiro Annals... Rio de Janeiro, 1984, p. 2164-2174.

MORAIS, M.C., PARADELLA, W.R., FREITAS, C.C. 2002. An assessment of the discrimination of iron-mineralised laterites in the Amazon region (Carajás Province) based on textural attributes from C-band airborne SAR data. *Asian J. Geoinfo.*, 3: 11-20.

PARADELLA, W.R., SILVA, M.F.F., ROSA, N.A., KUSHIGBOR, C.A. 1994. A geobotanical approach to the tropical rain forest environment of the Carajás Mineral Province (Amazon Region, Brazil), based on digital TM-Landsat and DEM data. *Int. J. Remote Sens.*, 6: 1633-1648.

PARADELLA, W.R., BIGNELLI, P.A, VENEZIANI, P., PIETSCH, R.W., TOUTIN, T. 1997. 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*, 18: 1483-1501.

PARADELLA, W.R., SANTOS A.R., VENEZIANI, P., SANT'ANNA, M.V., MORAIS, M.C. 2000. Geological investigation using RADARSAT-1 images in the tropical rainforest environment of Brazil. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 26: 1483-1501.

PEAKE, W.M., OLIVER, T.L. 1971. The response of terrestrial surfaces at microwave frequencies. Technical Report. Ed., Columbus. Ohio, p. 2440-2447.

RENNÓ, C D, FREITAS, C.C., SANT'ANNA, S. J. S. 1998. A system for region classification based on textural measures. In: 9th Brazilian Remote Sensing Symposium, 9.: 1998, Santos. Annals...Santos: INPE, 1998, on line.

RESENDE, N. P., BARBOSA, A.L. DE M. 1972. Relatório de Pesquisa de Minério de Ferro, Distrito Ferrífero da Serra dos Carajás, Estado do Pará, Final report. 248 pp.

SCHRÖDER, R., PULS, J., HAJNSEK, I., JOCHIM,F., NEFF, T., KONO, J., PARADELLA, W.R., SILVA, M.M., VALERIANO, D.M., COSTA, M.P.F. 2005. MAPSAR: a small L-band SAR mission for land observation. *Acta Astronautica*, 56: 35-45.

SHANMUGAN, K.S., NARAYANAN, V., FROST, V.S., STILES, J.A, HOLTZMAN, J.C. 1981. TEXTURAL FEATURES FOR RADAR IMAGES. *IEEE Trans. Geosc. Remote Sens*, 19: 153-156.

SILVA, M.F.F.; MENEZES, N.L.; CAVALCANTE, P.B.; JOLY, C.A. 1986. Estudos Botânicos: histórico, atualidade e perspectivas. In: Carajás: desafio político, ecologia e desenvolvimento (CNPq/Brasiliense, ed.). Cap. 8, 185-206.

TAPLEY, I.J. 2002. Radar Imaging. In: Geophysical and remote sensing methods for regolith exploration (Éva Papp ed.). CRC LEME Open file report 144, 22-32.

TOLBERT, G. E.; TREIMANE, J.W.; MELCHER, G.C.; GOMES, C.B. 1971. The recently discovered Serra dos Carajás iron deposits, Northern Brazil. *Economic Geology*, 66: 985-994.

ULABY, F T., KOUYATE, F., BRISCO, B, LEE WILLIAMS, T. H. 1986. Textural information in SAR images. *IEEE Trans. Geosc. Remote Sens*, 24: 235-245.

WELCH, R.M., KUO, S.S., SENGUPTA S. K. 1990. Cloud and surface textural features in polar region. *IEEE Trans. Geosc. Remote Sens*, 28: 520-528.

WERLE, D. 1988. *Radar remote sensing: a training manual*. Ottawa: Dendron Resource Survey, 300p.

WESKA, J.S, DYER, C.R., ROSENFELD A. 1976. A comparative study of texture measures for terrain classification *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, 4: 269-285.

WOODING, M.G., ZMUDA, A.D., ATTEMA, E. 1993. An overview of SAREX'92 data acquisition and analysis of the tropical forest environment. In: *Workshop of SAREX-92 (South American Radar Experiment)*, 6-8., 1993, Paris. *Proceedings...Paris, 1993*, p. 3-14.

YANASSE, C.C.F., FRERY, A.C., SANT'ANNA, S.J.S., FILHO, P.H., DUTRA, L.V. 1993. Statistical analysis of SAREX data over Tapajós – Brazil. In: *Workshop of SAREX-92 (South American Radar Experiment)*, 6-8., Paris. *Proceedings...Paris*, p. 25-40.

2.3 Multi scale approach using remote sensing images to characterize the iron deposit N1 influence areas in Carajás Mineral Province (Brazilian Amazon)

Maria Carolina de Morais¹

Paulo Pereira Martins Junior^{1,2}

Waldir Renato Paradella³

1. Federal University of Ouro Preto (UFOP), Mining School, Geology Department (DEGEO)

Av. José Cândido da Silveira, 2000, Horto – Belo Horizonte – 31170-000

Minas Gerais State, Brazil.

E-mail: mdemorais@gmail.com - Phone/Fax.: 55-31- 3489-2227

2. Technology Centre of Minas Gerais (CETEC), Water Resources Sector (SAA).

Av. José Cândido da Silveira, 2000, Horto – Belo Horizonte – 31170-000

Minas Gerais State, Brazil.

E-mail: paulo.martins@cetec.br Phone/Fax.: 55-31- 3489-2250

3. National Institute for Space Research (INPE), Remote Sensing Division (DSR).

Av. dos Astronautas, 1758 – São José dos Campos – 12227-010

São Paulo State, Brazil.

E-mail: waldir@ltd.inpe.br - Phone/Fax.: 55-12- 3945-6438/3945-6400

Abstract

Mining activities cause a wide range of changes to the environment, substantially affecting both the physical and biological environmental sectors. In the Carajás Mineral Province, located in the Amazon rainforest, environmental regulations tend to be more rigorous, due to the fragility of the environment in which large iron deposits are found. Mining environmental impact characterization considers: the impact type and extent, the physical chemistry differences and similarities of the mineral deposits, the deposit size, the adopted mining process, and the environment (both natural and economic) in which the mining process was developed. Remote sensing technology is utilized in this study; in particular, the use of ortho-aerial photograph, optical and radar images, with distinct spatial resolution. These permit the elaboration of synoptic maps, multi-scale and dynamic, of the changes wrought upon the environment: deforestation, vegetation cover removal, topographic surface and landscape alteration, and slope instabilities, among others. In this aspect, determining the extent of the mining activity influence is directly tied to the characterization of their impact on various natural systems at the observed scale, and not by simply defining a predetermined Euclidean distance. The results showed that remote sensing technology, optical and radar images, proved to be efficient in the study of environmental information and in the areas of influence on the semi-regional and local scales in the Amazon forest.

Keywords: Brazilian Amazon, iron ore, area of influence.

1 – Introduction

The Carajás Mineral Province is located on the easternmost border of the Amazon Region. It is one of most important mineral provinces in the world, with a predominating iron production and enormous potentials for Mn, Cu, Au, Ni, U, Ag, Pd, Pt, Os deposits, as well as others (Lobato et al. 2005). An open pit mining complex of five mines surrounded by dense forest, with the designations

N4E, N4W, N5E, N5W and N5EN, are responsible for the second largest mining production of iron in Brazil, with 85.5 millions of tonnage produced in 2008 (DNPM 2010). With the growing demand for iron ore, new areas of extraction are required. Due to the fragility of the surrounding rainforest and the strength of the Brazilian environmental laws overseeing the procedures for obtaining an environmental operating license in this region, the environmental impact in these areas is being critically studied.

The environmental changes caused by mining activities commence at the initial material deposit research stage and last until the disactivation of the enterprise, progressively augmenting from one stage to the other (Ripley et al. 1996). Water resources are affected by: modification of waterway courses; increase in turbidity and suspended soil quantity in the receiving water bodies; sedimentation and chemical contamination of these bodies; interference by the raising or lowering of the local groundwater level; changes in the dynamics and movement of subterranean waters; and flooding caused by the construction and operation of tailings dams. The atmosphere is also disrupted due to the process of dismantling with the use of explosives, which can cause an increase in the emission of gases, suspended particulates in the air, noise level, as well as launching rock fragments for a distance, propagating waves and vibrations, and scaring animal life. The landscape is affected by the removal of vegetation, and the modification of the land use in the area of the deposit, etc (Monjezi et al. 2009).

The range of environmental alterations from the mining activity depends upon the physical chemistry characteristics of the mineral deposits, the size of the deposit, the type of extraction and ore processing technologies used and the original natural and economic environment in which the mining is being developed (Cavalcanti 1996). The study of the changes caused by mining is related to each of these aspects and any generalization would be a mere approximation. Besides this, when considering the dynamic situation and the development of the activity in its various phases of implementation and deactivation, the changes can be accentuated or minimized.

The large quantity of environmental data required by the Brazilian environmental law makes it difficult to make decisions for such dynamic processes, with variables that relate to different scales of work. Satellite remote sensing technology has presented a powerful tool in environmental studies due its synoptic and temporal coverage. In relation to the changes occurring in the physical environment, remote sensing has the potential to contribute to detailed projects on both semi-regional and regional scales. The digital images obtained by sensors on airborne or spaceborne platforms can be manipulated and enhanced to highlight features, such as vegetation type and density, water turbidity or pollutants, lithology and mineralogy, soil type, relief, soil moisture, and others.

Application of remote sensing technology to mining environmental studies are limited for the Brazilian Amazon. In this environment, adverse atmospheric conditions such as the presence of cloud and brume, make it difficult to use optical imaging, favoring the use of radar images. Nevertheless, the fusion of radar imaging with optical imaging and ancillary data (geological, geophysical, geochemical,

etc.), of different spatial and spectral resolutions has proven to be a useful tool for the geological mapping of the Mineral Province of Carajás (Paradella et al. 1997; 2000). Optical and radar images can provide complementary information since spectral and geometrical characteristics are enhanced in one aggregated product. The integration of remote sensing images with different spatial and spectral resolutions has also been shown to have potential in geological and environmental applications with the use of LANDSAT/TM and panchromatic SPOT images for generating maps with enough precision to be used in environmental management studies in Spain in a semi-arid region (Rigol and Olmo 1998). Optical images were successfully used to evaluate their capability as a tool for assessing the environmental pollution from mining and concentration activities from a temporal perspective in the polar region of the Kola Peninsula, Russia (Rigina 2002). Hyperspectral remote sensing data can be used for predicting surface water quality, quantitatively estimating acid drainage and metal contamination on a yearly basis in the Iberian Pyrite Belt, Spain), at semi-arid climate conditions (Riaza and Müller 2009). These studies brought into evidence the potential of using remote sensing in geological and environmental applications at various different climate regions, each one with its suitable sensor.

With the advent of satellites equipped with high spatial and spectral resolution, especially those with radar, remote sensing technology is a tool that needs further exploration for geological and environmental applications in the Brazilian Amazon region. Images obtained through remote sensor technology and integrated with high spatial resolution ancillary data can be used to evaluate each type of information defining the areas of influence in the implementation of an open pit iron mine in the Amazon. The definition of limits for an area of influence is not determined only by a Euclidean definition, i.e., a space around any enterprise (Martins Junior et al. 2008). To define any area of influence, it is necessary to treat each system in its own context, and thus it can be different for subterranean water, surface water, erosive processes, deforestation, vegetation changes and many others. In this context the influence areas gain their own dimensions, due prominence, with respect to the diverse natural and cultural systems associated with the environment. Thus, the goal of this research is to characterize the environmental conditions in the areas of influence of an iron ore open-pit mine, at a multi-scale approach, to be implemented in the Amazon region. It is expected to lead to decisions on different scales according to the information that can be extracted from remote sensing images.

2 – Study Area

The test area is an iron-ore deposit, in the process of being implemented as an open-pit mine, called N1, located in the on National Forest Carajás, a florestal reserve in the State of Pará, on the easternmost border of the Brazilian Amazon Region (Fig. 1). The total ore resources for the Carajás Province are estimated to be 17.8 billion tons with a 66.1% concentration of iron (Beisiegel et al. 1973). The N1 deposit is a plateau with an altitude of around 700m and an approximate area of 24km². As shown in figure 1, the Carajás Florestal Reserve is surrounded by extensive deforested areas due to farming activities.

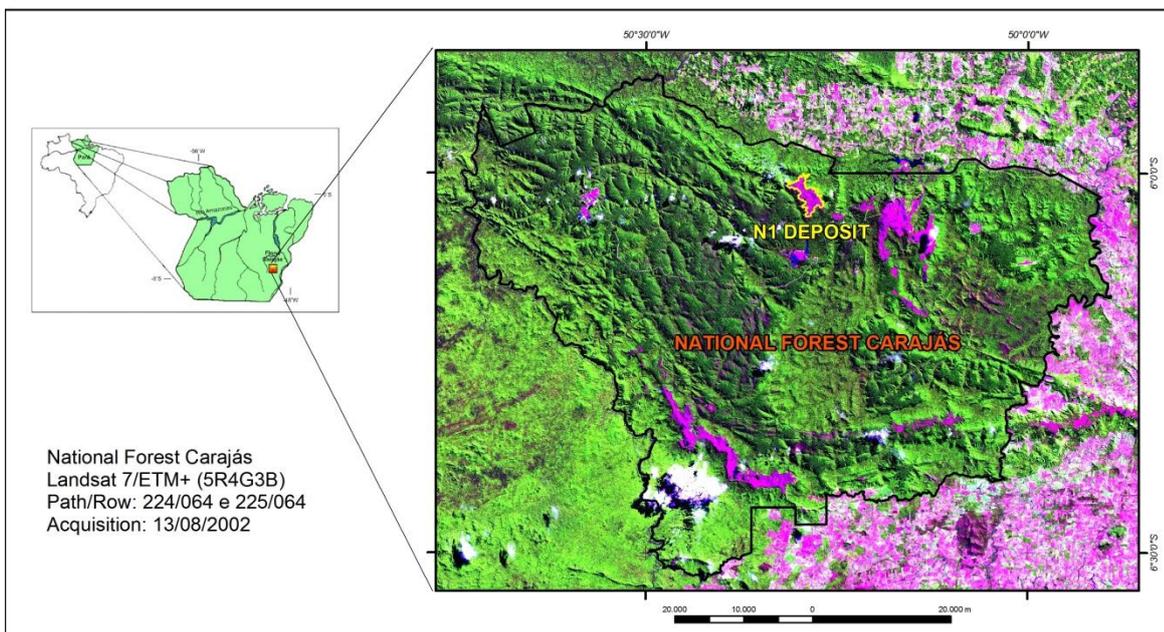


Fig. 1 – LANSAT 7/ETM+ image showing the location of the N1 Deposit (yellow contour) and the National Forest Carajás (worked scale 1:100.000).

The N1 iron ore deposits are located in the Carajás Formation (Fig.2) with an age of 2740 ± 8 Ma, obtained from zircon grains in one mafic sill combined with data from earlier U-Pb zircon work (Trendal et al. 1998). The formation has a banded iron-formation (BIF) that is over- and underlain by mafic rocks of the Grão Pará Group. These sequences have been subdivided into three units: Inferior volcanic rocks of the Parauapebas Formation (Meirelles et al. 1984), the ironstones of the Carajás Formation (Beisiegel et al. 1973), and Superior volcanic rocks. The volcanic rocks are a bimodal sequence of basalts, dolerites and rhyolites. The ironstones of the Carajás Formation are composed of several types of iron ore of various oxide facies. They are mainly jaspelite and interlayered hematite and silica (Tolbert et al. 1971), which are either soft or hard hematite (Lobato et al. 2005). The jaspilites have variable compositions with 17.11–43.40% Fe and 35.10–60.84% SiO₂ presenting

typical interlayering of dark and light centimetre-thick mesobands and micro-banding with iron-oxide layers intercalated with white to pale or bright red layers composed of crypto to microcrystalline SiO₂ (jasper and chert) with inclusions of cryptocrystalline hematite (Tolbert et al. 1971; Beisiegel et al. 1973). Positive Eu anomaly are found in the BIFs of the Carajás Formation and it is inferred to be a result of the input from suboceanic hydrothermal solutions, considered to be the source of the iron and SiO₂ (Klein and Ladeira 2002).

With the humid tropical climate of the Amazon region, ferruginous and latosoils are extensively developed in the plateau. These weathered products show varying degrees of alteration that are responsible for the differences in composition, hardness and textures. The N1 area was mapped during the economic evaluation of the iron reserves in the Province (Resende and Barbosa 1972). The following types of ferruginous crusts were identified in the area: duricrust (*in situ* duricrust with limonite blocks), chemical crust (hematite fragments with goethitic pisolites), iron-ore duricrust (hematite ore blocks and subordinately specularite, cemented with hydrous ferric oxides), and hematite (mainly hematite outcrops). In addition, a latosoil unit was also mapped in a restricted area, associated with arboreal vegetation (Fig. 2).

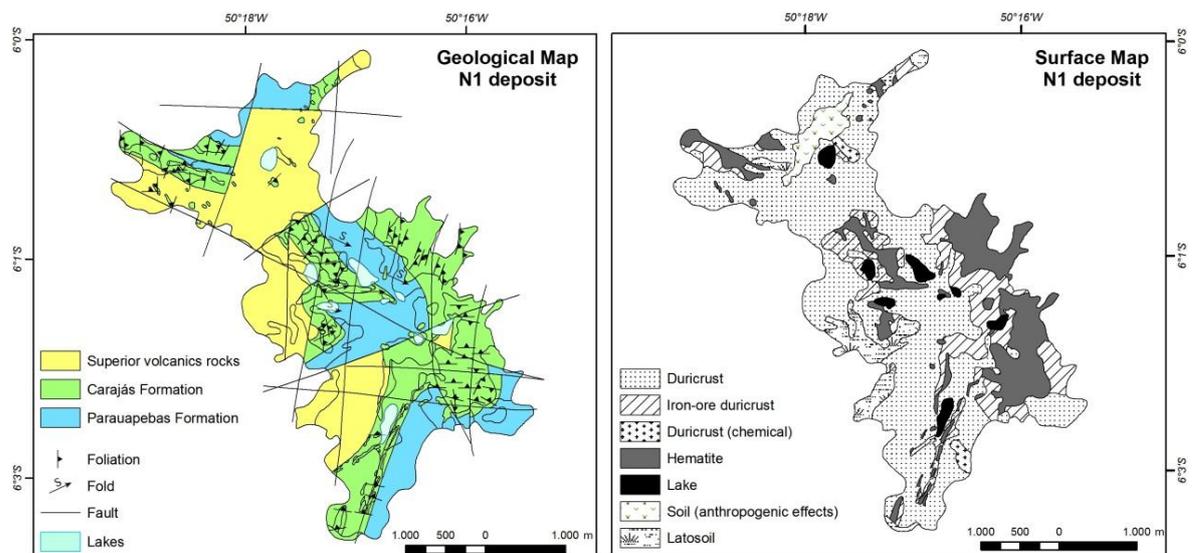


Fig. 2 – Geological and Surface Maps from the N1 deposit (worked scale 1:10.000). The Surface Map was adapted from Resende and Barbosa (1972).

Situated on rock outcrops and surrounded by dense forest, the vegetation by the N1 deposit is typically of a type of tropical scrubs called *campos rupestres* (Silva et al. 1986). It is predominantly composed of herbs, arboreal plants, and to a lesser extent, semi-arboreal plants. Semi-arboreal ecosystems are common in restricted lands; others areas have arboreal species strictly found in latosoil. *Gramineae* and *Leguminosae* plant families have a large geographic distribution. A geo-

botanical control is evident in the ferruginous area of N1, showing a relationship between the vegetation and the relief that support the crusts. As seen on Fig. 3, on the top of the hills with many rock outcrops, a layer of soil is practically inexistent and plant species are of the short type. There are certain parts where this vegetation becomes sparse, thus permitting the exposition of the iron formations. Coming down the hills, it is common to see some soil and organic matter, which permit the development of plant species of taller sizes in fissure crusts. On the hills, the flora attains its maximum development with a major growth. Many lakes are covered by a vegetation of the *Typha sp* type regionally known as “taboa”, where it is exposed on extensive outcrops of the crusts during the dry seasons.



Fig. 3 – Vegetation changing x relief on the N1 plateau and forest at back

3 –Methods

Due to the variety of the nature of environmental impacts studies, ranging from small to large projects, cumulative effect assessments, have to be carried out for a wide range of spatial and temporal variables for which Remote Sensing and Geography Information Systems are very effective, rapid, reliable and useful in the various stages of the project. The application of satellite imagery has revolutionized the environmental monitoring of Earth resources. It is because of the capacity of satellites to repeatedly cover large areas and to provide both qualitative and quantitative studies that airborne and satellite images are now finding extensive usage for obtaining information on geology, geomorphology, soils, hydrology, vegetation, land cover, and producing a Digital Elevation Model for environmental studies (Anjaneyulu and Manickam, 2010).

The integration of images obtained by different sensors is an important component of digital image processing as it makes the information complete (Chavez Jr. 1986). There are two important aspects in this process: the first is the content of the information, where distinct spatial and spectral resolutions are integrated in a unique product bringing together the best information from both. The second aspect is that the images from different sensors are geometrically corrected to be in agreement with one another (Chavez Jr et al. 1991). The use of integrated imaging produces a high increase in

visual quality and is highly beneficial for the interpretation of environmental features (Rigol and Olmo 1998).

There have been several integration techniques presented in literature aimed at the combination of multi-source data (Harris et al. 1994), and amongst the most commonly used, there are three basic types: (1) IHS Transformation, (2) Analysis via Principal Components (APC) and (3) Arithmetic Operations. Normally, a wide range of color is desirable, which can then be related in a holistic understanding of the complex association between the variables involved (vegetation, lithology, structure, geo-physical properties, etc.). IHS transformation is the most commonly used in geological applications and investigations of natural resources (Rigol and Olmo, 1998). The authors presented a comparative study of some of the most common techniques of image integration in the field of geological resources, as IHS, APC, and others. The result showed that the integrated images are highly favorable as tools for geologic mapping. The authors also found that the IHS and PCA methods presented more attractive results considering the great range of the obtained spectral images. Harris et al. (1994) presents a complete discussion about this theme and concludes that the IHS transformation method shows itself to have, in general, the best performance when compared to the other techniques.

Moreover, radar is considered to be the best source of information when using this approach. In the Amazon region, C-band backscatter intensity is strongly controlled by decameter scale changes in the surface slope, and by centimeter scale roughness characteristics of the crown scattering, including multiple scattering within the crowns. Preliminary evaluation, by textural classifications, of this SAR data has shown that the backscattered C band responses are sensitive to this geobotanical contrast in depicting variations in the duricrust vegetation associations (Morais et al., 2002). For this reason, research on L-band SAR data, integrated with optical images via PCA and IHS, and with their backscatter from L-band and multispectral optical characteristics was considered in order to provide valuable information of the studied environmental resource area.

Optical image (LANDSAT/TM5), SAR images, and ortho-aerial photographs were used in this study. The radar images were obtained through the airborne sensor SAR-R99B from SIPAM (Amazonian Protection System). The airborne original spatial resolution was degraded from 3 to 11 meters. The flight tracks above Carajás were turned into mosaics, with the processing performed at CENSIPAM (Managing and Operational Center of the Amazonian Protection System). The objective of this airborne mission was to simulate an orbital radar system, MAPSAR (Multi-application SAR), which is in the design phase of a project developed in cooperation with Brazil and Germany, to evaluate its viability for various applications in the Amazon. The flight simulation conducted in Carajás at L band was a joint initiative between INPE, universities, and with the support of the mining

company VALE. More information about the mission and its applications can be found in Schröder et al. (2005).

Detailed topographic curves were also used to generate a DEM with a spatial resolution of 1 meter. The Digital Elevation Model (DEM) from the SRTM/NASA study was utilized to correct the optical image. For the mountains of Carajás, Oliveira and Paradella (2008) found that there were satisfactory results in the precision of altitude in the MDE/SRTM study, with a standard class A on the scale of 1:100.000. Thus, the use of MDE/SRTM in this study is relevant in terms of the scale used. The remote sensing data used is summarized in Table 1.

Ancillary data such as roads, location of villages, tailings dams and others were supplied by the Brazilian Institute of Environment and Natural Resources (IBAMA). This information was updated based on the data set of images. The detail topography data and ortho-photos were provided by the VALE company. Other data, satellite and radar images, were provided by the National Institute for Space Research (INPE).

Table 1 – Data Set.

Data	Spatial Resolution (m)	Acquisition	Bands
Ortho-aerial Photography	0.423 x 0.423	Jul - 2003	3
Landsat7/ETM+	30 x 30	Aug - 2002	1,2,3,4,5,and 7
SAR-R99B	11 x 11	Jun - 2005	L (hh, hv, vv)
Detailed DEM	1 x 1	Feb - 2004	1
DEM - SRTM/NASA	90 x 90	Feb - 2002	1

The digital processing performed to integrate the optical and radar images is summarized in the flowchart in Fig. 4. All images processed were taken through the PCI Geomatics software version 9 (PCI, 2003). The LANDSAT/TM5 image underwent imaging correction, Selective Principal Component, SPC (Chavez Jr. 1986) and was integrated via IHS/RGB (Mather 1987). This last step was realized through the use of a mosaic of the radar images from SAR-R99B (hh, hv and vv) that were processed for radiometric correction and pixel re-sampling.

In accordance to the Digital Elevation Model (DEM) obtained by the SRTM/NASA survey, any inconsistencies, such as negative values and the absence of information, were corrected and substituted for more consistent interpolated values based upon the average values of adjacent gray values. The final DEM was used, alongside the field control points, in orthorectification of the LANDSAT/TM5 image.

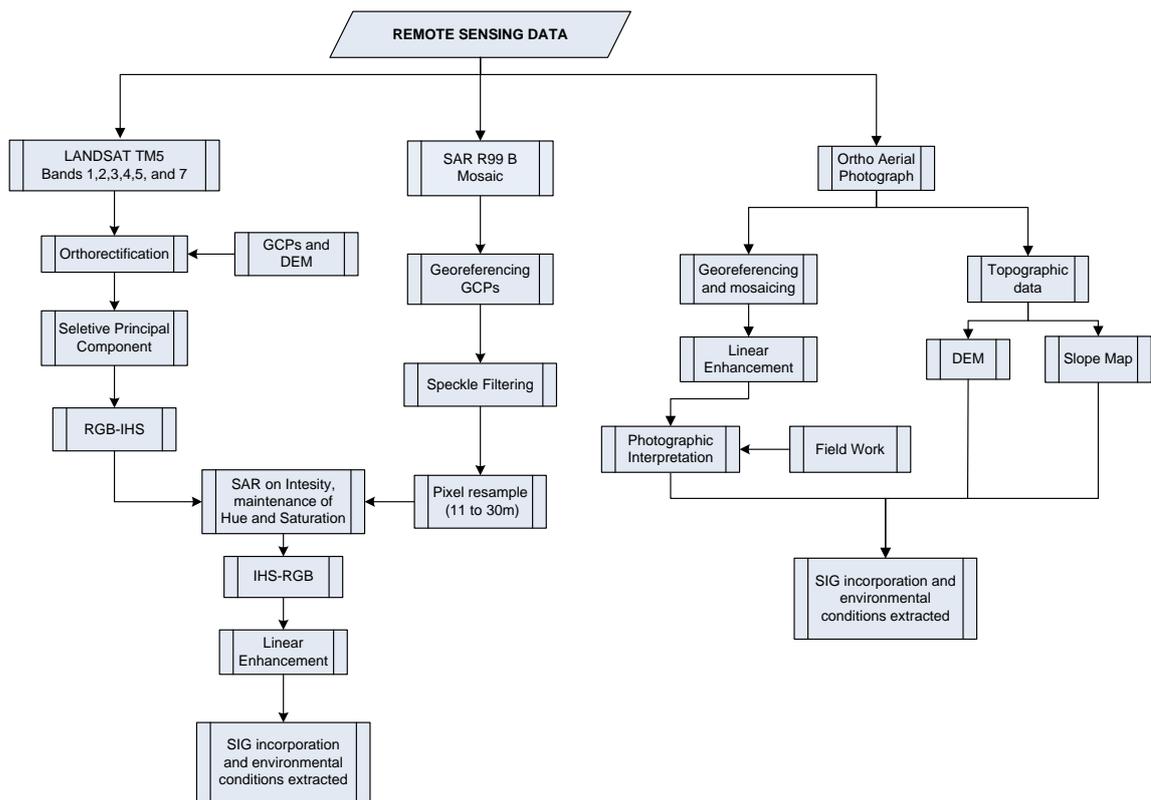


Fig. 4 – Steps used in the environmental conditions extracted by remote sensing images.

Selective Principle Component (SPC) was used on bands 1, 2, 3, 4, 5, and 7 of LANDSAT/TM in order to form two sets: the set of bands 1, 2, and 3 and the set of bands 5 and 7, thus eliminating all of the redundant information in these sets. TM bands 1, 2 and 3 tend to show a high correlation, as a function of the energy absorption processes in the pigments; bands 5 and 7 tend to have a greater redundancy in their information, controlled by spectral absorption in the water content of the foliage cover. Band 4 was separately used to be useful in the determination of the biomass content and in the delineation of the bodies of water.

In the integration of the radar and optical images, the following were used as input channels (RBG/IHS): first, band 4, second, the first component (CP-1) of TM bands 5, 7 and third, CP-1 of TM bands 1, 2, and 3. In the reverse transformation (IHS-RBG), there was a substitution in the intensity of the radar images, with the maintenance of the hue and saturation of the channels by means of a hexacone model. This model represents the colors by means of the cylindrical coordinates of a hexacone. The hues are represented by the angular position along the top of the hexacone. The saturation is represented by the vertical distance from the surface of the hexacone, and the intensity is represented by the vertical distance from the base to the top of the hexacone (Mather 1987).

The radar images from SAR-R99B (L-hh, L-hv and L-vv) were radiometrically corrected, with a speckle attenuation filter. The filter Enhanced Frost, with a 3 x 3 window, was applied to three scenes, with the polarizations hh, hv and vv. Then, the images had the pixels resampled from 11 to 30 meters so as to be integrated with the optical images. The newly increased degradation in the spatial resolution of the radar data is due to the compromise between the ideal working range for the desired purpose and the possibility of correcting only the optical image.

The result of the integration of the optical images with the radar images was the creation of three integrated products, corresponding to the polarizations hh, hv and vv. These products were submitted to a linear contrast and subsequently analyzed and interpreted for application in studies about the criterion for environmental management of the N1 deposit and surrounding areas. Thus, an analysis was performed on the vegetation areas, the pastures, the deforested areas, the mining areas and the relation between all of these variables with the physiographic aspects using remote sensor technology, which provided valuable insight.

The acquired ortho-aerial photographs of the N1 deposit were geo-referenced and organized into a mosaic. The use of photographic interpretation as reference data was assumed correct. It often has greater spatial resolution than the satellite imagery and photogrammetry has become accepted as accurate (Congalton, 2004). To validate the interpretation, field work was conducted on September 2005 in order to permit the extraction of relevant information, such as the condition for preservation of high-altitude campos rupestres vegetation, their state of preservation, data on surface cover and other aspects. Areas under dense forest canopy were impractical because the GPS signal was weak or absent. The obtained results of the imagery processing, photographic information, field points, and auxiliary data set as Digital Elevation Model, Slope map, Geologic and Surface maps were inserted in a Geographic Information System, where an analysis of the information related to the environmental conditions was performed at 1:10.000 and 1:100.000 scales.

4 – Results and Discussions

A visual comparison of the original and integrated images reveals that the APC and IHS methods used produced high quality images, with stronger colors and contrast than the original images (Fig5). The integrated images have the advantage of aggregating the original multispectral characteristic of LANDSAT and the high relief enhancement capacity of radar imagery. The results showed more abundant geomorphological information, which is expressed as more differentiation of the various vegetation types. The response of the radar in vegetation stands out both in the forest, differentiating it in terms of relief, and especially in campos rupestres, which led to the enhancement of this type of vegetation and pasture areas located to the north of the area. The ortho-aerial photography provided valuable information in detailed scale and served to support the field work and

to determine environmental information about the influence areas on a detailed scale. All this information was relevant to assess the conservation status of the areas of influence in the implementation of the iron mine, considering the difficult access to areas of dense forest and the scarcity of environmental information for this region.

Tables 2 and 3 show the SPC statistics of the TM-LANDSAT 1, 2, 3, 5, and 7 bands, used in the integration with the SAR images. The analysis of these values allows the conclusion that the CP-1 of bands 1, 2 and 3 retained 95.64% of the variance of the three bands, and that the CP-1 of bands 5 and 7 retained 97.41% of the information of the two infra-red bands.

The results obtained from the SPC integration and IHS/RGB of the optical LANDSAT/TM5 images with the SAR R99B/SIPAM show distinct results as a function of different polarizations in radar. Images with high spatial variation, associated with variations in the relief, raise the possibility of distinguishing different targets. The integration that demonstrated the highest capacity of differentiating various targets was the integrated product of the optical image with the hh radar image. From these, environmental information about the area surrounding the N1 deposit were extracted in a semi-detailed scale. An intense fragmentation of the landscape is notable in the final product, with the variation in the hues representing spectral variations of the forest vegetation, pastures, human activity and mining implementation.

The variation in the hues in the forest cover, along with the variation in the radar, provides a better level of discrimination in the mountain forests, with a hue value around 217, altitudes higher than 700m, and of the sub-mountain forest, with a hue value around 105, and altitudes around 200m. The variations in the grasslands on the plateau of N1 are also distinguished by hues of a light blue color, with a hue value around 118, which represents the vegetation present in the more elevated parts of N1. The areas colored in red, with a hue value around 12, represents the intense deforestation encountered in the northern limits of the Carajás National Forest. They clearly illustrate the impact of anthropomorphic activity not related to mining, which is quite frequent in the Amazon. Two tailings dams are differentiated in the analyzed area; one partially related to the iron mine N4W and the other related to the mining of manganese.

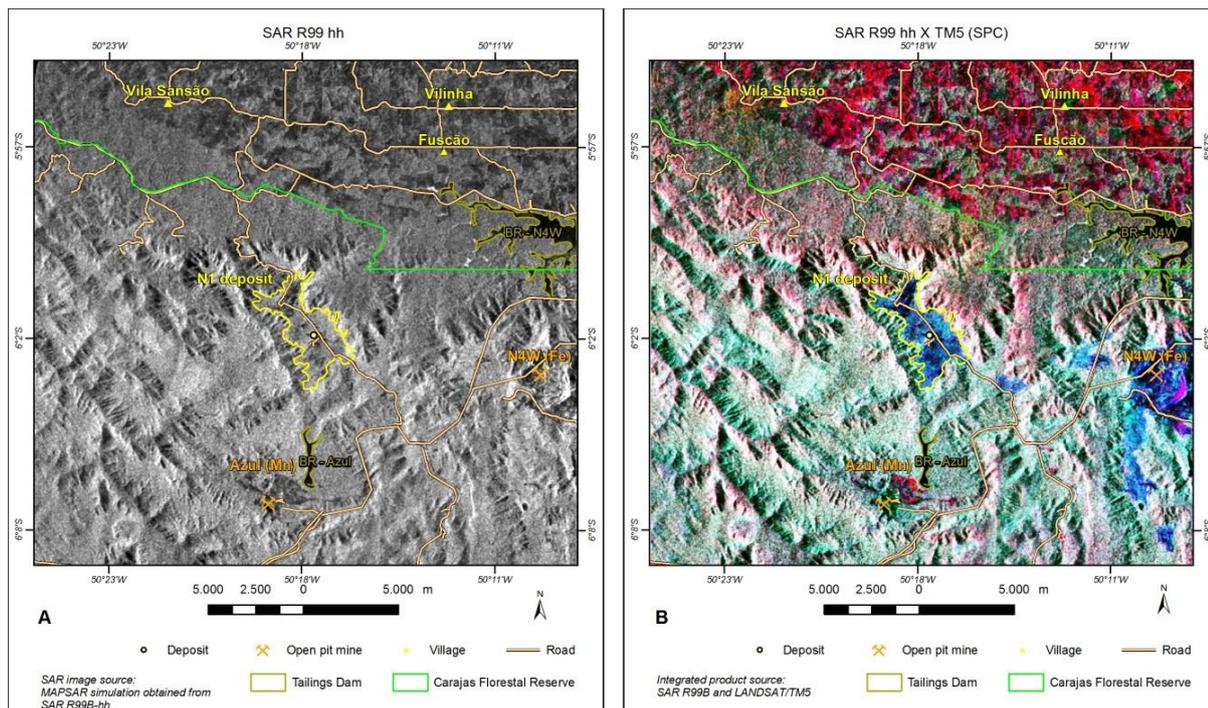


Fig. 5 – SAR image R99B-hh (A) and integrated Product SAR R99B – LANDSAT7/ETM+ (B) from the N1 region (worked scale 1:100.000).

Table 2 – SPC statistical values for bands 1, 2, and 3.

Band	Mean	Deviation	
1	62.8809	7.2929	
2	46.968	8.3201	
3	37.6156	14.1604	
Covariance matrix for input bands			
	1	2	3
1	53.186		
2	57.749	69.225	
3	91.643	110.088	200.517
Eigen channel	Eigen value	Deviation	% Variance
1	308.8565	17.5743	95.64%
2	11.6106	3.4074	3.60%
3	2.4607	1.5687	0.76%

Table 3 – SPC statistical values for bands 5 and 7.

Band	Mean	Deviation

5	68.4156	23.2022	
7	33.2680	17.0931	
Covariance matrix for input bands			
	5	7	
5	538.343		
7	373.984	292.174	
Eigen channel	Eigen value	Deviation	% Variance
1	808.9766	28.4425	97.41%
2	21.5408	4.6412	2.59%

Based on ortho-aerial interpretation, it was possible to start a preliminary study of the vegetation, surface and sub-surface water conditions, litho-geology, and the geomorphology to evaluate the area to be affected, before mining implementation. In order to estimate the environmental conditions, whether preserved or not, it is necessary to search for relationships between the possible effects already present, which are more evident in a detailed study. The greater quantity and quality of the information obtained, the more detailed the extent of impact, preservation and conservation became. Figure 6 shows examples of targets identified in the field. Outcrops of lateritic crusts are also able to be distinguished from the grassland vegetation. All of their targets were detected also in the integrated images.

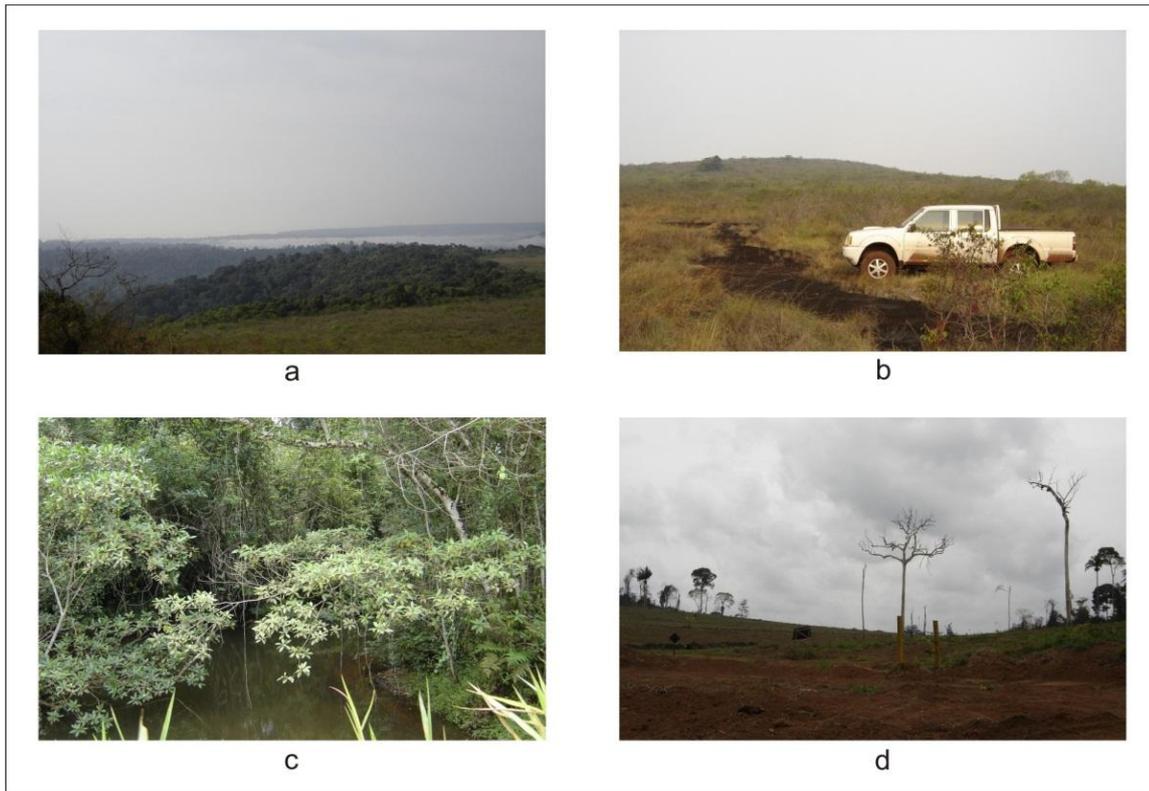


Fig. 6 – Photos taken from field points in 2005. (a) mountain forest in contrast with grassland vegetation. (b) grassland vegetation. (c) sub-mountain forest. (d) deforestation area.

Geotechnical and groundwater studies are imperative in the deployment of open-pit mines, and variables such as vegetation, waterways, soil, faults, topography, slope, as well as others are essential. Fig.7 illustrates the Slope and Shadow Relief Maps at detailed scales. Considering these maps, note that deposit N1 has a low potential for instability on the plateau. Areas with high elevations on the plateau and those with slopes around 14° - 23° , are associated with the occurrence of hematite. Resende Barbosa (1972) described this crust as Hematite semi-hard (HSD) which is characterized by the occurrence on the tops of the hills, associated with grass vegetation (see Fig. 6b), where there are many outcrops and the soil layer is practically absent. On the surface, it is marked by a mineralogical banding consisting of: a) microscopic flakes of larger crystals and specularite martite with inclusions of magnetite or a mineral-maghemite series martite; b) fibrous goethite and earthy yellow limonite earthy can predominate in most of the parts of the ore bodies. On the other hand, in the steeper slopes, for slopes 33° and greater, where colluvium soil occurs with fragments of lateritic crusts (Fig. 8), the instability can be larger and precautions should be considered. The occurrence of many lakes and fractures was also noted, which contributes to the high water storage capacity, characteristic of lateritic crusts, and can make the region a recharge zone, which drains with a firm flow into the topographically lower regions.

Geotechnical studies are also required in the implementation phase of the mine in order to avoid accidents with slope slides. Furthermore, the logistics required for the production and disposal of large quantities of iron ore require engineering works that cause a lot of impact to the environment. Road construction for quarry operation, processing and transport, and the construction of railways, the removal of vegetation, the location for the disposal of waste and other activities entail impacts on the vegetation, waterways, soil, landscape, and each must be evaluated at its proper scale. According to Figure 5, there are many roads in the N1 area and its surroundings. Thus, for new road construction this influence of geotechnical relationships should be considered and vegetation removal should be kept to a minimum.

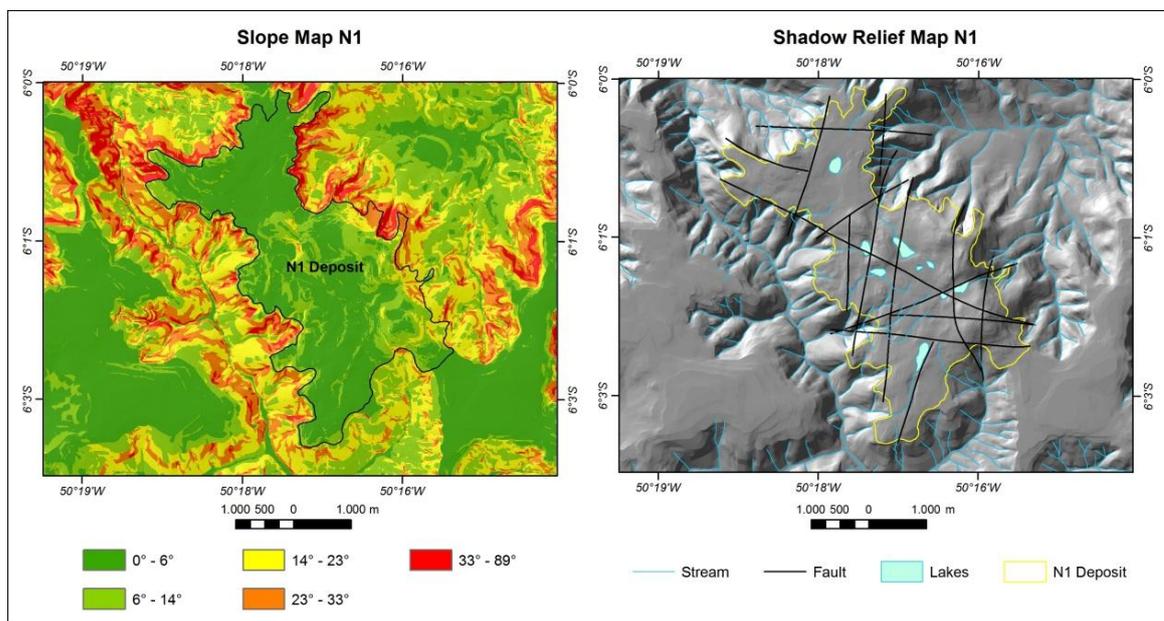


Fig. 7 – Slope Map and Shadow Relief from the N1 Deposit (worked scale 1:10.000).



Fig. 8 – Steep slopes with colluvium soil containing fragments of lateritic crusts

Table 4 summarizes the environmental conditions obtained by remote sensing images, at the scales of 1:100.000 and 1:10.000, with the areas of influence related to their respective area of coverage in km². For each topic, the area of influence is identified and must be considered in the process of implementing an open-pit mine. At the scale of 1:100.000, the areas of influence present in the N1 deposit and their corresponding relationships to the access roads to other deposits and mines are shown. These areas would be directly affected by the mining activity, due to the increased flow of vehicles for mineral transportation, support staff and other material. Similarly, the tailings dams present in the region of the deposit can affect water resources in this area, for example, with the increased flow of traffic and the increased volume of wastes deposits.

Table 4 – Environmental conditions evaluated by means of remote sensing images for each scale in and around Area N1.

Environmental Conditions	Scale 1:100.000 Area of coverage: 758 Km ²	Scale 1:10.000 Area of coverage: 61 Km ²
Area of influence	Roads and access routes for transportation of ore and waste. Tailings Dams. Vegetation. Impairment of specific flows of regional waterways. Possible underground water recharge areas.	Roads built for drilling activities. Grassland vegetation. Possible area in need of recharge.
General state of conservation and preservation	Deforested areas north of the mine deposit outside the Carajás National Forest limits. Forest mountain vegetation preserved within the limits of the national forest.	Grassland vegetation preserved. Mountain forest vegetation preserved. Preserved lakes.
Area of impact	Area of deforestation outside of the Carajás National Forest: 134 km ² Area of tailings dams: 8 km ² Extension of roads: 273.66 km	Extension of roads: 43.60 km
Fragile areas	Mountain and sub-mountain forest and grassland vegetation	Mountain and sub-mountain forest, grassland vegetation and lakes. Steep slopes at the edges of the deposit.
Vegetation	Differentiation between the mountain and sub-mountain forest surrounding the deposit and grassland vegetation in the deposit.	Differentiation between the mountain and grassland vegetation in the deposit, and the mountain and sub-mountain forest in the area surrounding the deposit.
Developments	Identification of the open-pit mines and the tailings dams.	Unexplored deposit.

In Brazil, the environmental requirements applied to the mining sector are (1) an environmental impact study (EIA), (2) environmental licensing (LA), and (3) a plan for recovery of degraded areas (PRAD). An EIA applies to mining projects for any mineral substance; an LA is mandatory for the installation, expansion, and operation of any mining activity under the systems of mining concession or licensing; and a PRAD requires suitable technical solutions for soil rehabilitation and other aspects of the environment that might be degraded by mining operations. Resolution No. 10 of December 6, 1990, requires that all mining operations obtain LAs prior to the granting of mineral rights by the DNPM (2010). In this context, the preservation and conservation of environmental conditions at the N1 plateau and its surroundings are favorable for the implementation phase of the iron-ore open-pit mine. The deforested areas identified by the images and field observation shows the occurrence of pasture and are not related to the mining activities. Thus this

research provides subsidies to the Brazilian environmental agencies needed for environmental impact studies.

5 – Conclusions

Remote sensing images with distinct spatial and spectral resolutions enabled the achievement of relevant environmental information in the context of the implementation of an iron-ore open-pit mine in the Amazon region. The fragility of this environment requires rigorous studies of impacts that could occur in the area where the new mine is to be installed. Information about the condition of the vegetation, the slope, the surface and groundwater, and of the logistics involved were able to be studied in detail, on the semi-regional and regional scales. It was established that the spread of particular areas of influence are directly related to what is being affected. In the N1 deposit and the surrounding areas, this information could be verified with two test areas, with scales of 1:10.000 and 1:100.000. Each scale was able to provide distinct information about the environmental conditions. Areas of preserved forest are abundant in the limits of the national forest, but are pressured by the advance of human activity. In relation to the vegetation in pastures, it was possible to indicate important areas of the ecosystem for preservation, inserted in the area of the National Forest. The conservation, preservation and fragility of these areas were able to be identified. Remote sensing technology, together with optical and radar images, proved to be efficient in the study of the environmental information, the areas of influence on the semi-regional and local scales in the Amazon forest, and could be applied in areas with similar geo-environmental characteristics. This study shows the advantage of adding other methods of environmental information extraction from images. Multisensor, multispectral and multiscale analyses provide different, complementary, and new responses. These procedures can be considered an effective way of developing environmental impact studies in a complex area. The integration of informations at various scales permits a more appropriate and better understanding of areas of influence around a mine in a region with little information and difficult data collection conditions, as evidenced throughout the work. This is considered as a first approach to the use of multisensor and multiscale analysis for areas with little information, like the one studied.

Acknowledgements

The authors wish to thank Mrs. Harriet Reis for the English review. Special thanks to INPE for field support, Brazilian Institute of Environment and Natural Resources (IBAMA), and to VALE (GAJAN) mining company, particularly to senior-geologist Lambertus C. Schardt, for the access to the infrastructure in Carajás.

References

Anjaneyulu Y, Manickam V (2010) Environmental Impact Assessment Methodologies. BS Publications, Hyderabad.

Beisiegel VR, Bernadelli AL, Drummond NF, Ruff AW, Tremaine JW (1973) Geologia e Recursos Minerais da Serra dos Carajás. Rev Bras Geoc 3: 215-242

Cavalcanti, RN (1996) A mineração e o desenvolvimento sustentável: Casos da Companhia Vale do Rio Doce. Thesis. University of São Paulo

Chaves Jr PS (1986) Digital merging of LANDSAT TM and digitized NHAP data for 1:24,000-scale image mapping. Photogramm Eng Remote Sens 52:1637-1646

Chavez Jr PS, Sides SC, Anderson JA (1991) Comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data: LANDSAT TM and SPOT panchromatic. Photogramm Eng Remote Sens 57:295-303

Congalton RG (2004) Putting the Map Back in Map Accuracy Assessment. In: Lunetta RS, Lyon JG (ed) Remote Sensing and GIS Accuracy Assessment, 1rd edn. CRC Press, Florida, pp 1-29

DNPM (2010) Brazilian Department of Mineral Production. <http://www.dnpm.gov.br>. Accessed 17 June 2010

Harris, JR, Murray R, Hirose T (1994) IHS Transformation for the integration of radar imagery with other remotely sensed data. Photogramm Eng Remote Sens 56:1631-1641

Klein C, Ladeira AE (2002) Petrography and Geochemistry of the least altered Banded Iron-Formation of the Archean Carajás Formation, northern Brazil. Econ Geol 97: 643-651

Lobato LM, Rosière CA, Silva RCF, Zucchetti M, Baars FJ, Seoane JCS, Rios FX, Pimentel M, Mendes GE, Monteiro AM (2005). A mineralização hidrotermal de ferro da Província Mineral de Carajás – Controle estrutural e contexto na evolução metalogenética da província. In: Marini OJ, Queiroz ET, Ramos BW (Ed) Caracterização de depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia, 1rd edn. DNPM-CT/MINERAL-ADIMB, Brasília, pp 20-92

Martins Junior PP, Carneiro JA, Alvarenga LJ et al (2008) Guia Prático de Requisição de Perícias Ambientais (Practical Guide to Request Environmental Expert). Procuradoria-Geral de Justiça do Estado de Minas Gerais, Belo Horizonte

Mather PM (1987) Computer processing of remotely-sensed images: an introduction. John Wiley, Chichester

Monjezi M, Shahriar K, Dehghani F, Samimi Namin F (2009) Environmental impact assessment of open pit mining in Iran. *Environ Geol*. doi: 10.1007/s00254-008-1509-4

Morais MC, Paradella WR, Freitas CC. (2002) An assessment of the discrimination of iron-mineralised laterites in the Amazon region (Carajás Province) based on textural attributes from C-band airborne SAR data. *Asian J. Geoinfo*. 3: 11-20

Meirelles EM, Hirata WK, Amaral AF, Medeiros Filho CA, Gato WC (1984) Geologia das folhas Carajás e Rio Verde, Província Mineral dos Carajás, Estado do Pará. Paper presented at The 33th Brazilian Congress of Geology, Rio de Janeiro, RJ, Brazil

Oliveira CG, Paradella WR (2008) An Assessment of the Altimetric Information Derived from Spaceborne SAR (RADARSAT-1, SRTM3) and Optical (ASTER) Data for Cartographic Application in the Amazon Region. *Sensors* 8: 3819-3829

Paradella WR, Bignelli PA, Veneziani P, Pietsch RW, Toutin T (1997) 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. *Int J Remote Sens* 18: 1483-1501

Paradella WR, Santos AR, Veneziani P, Sant'anna MV, Morais MC (2000) Geological investigation using RADARSAT-1 images in the tropical rainforest environment of Brazil. *Can J Remote Sens* 26: 1483-1501

PCI (2003) *Geomatica Software Solutions: Reference Manuals, version 9.0*, PCI Geomatics Inc., Canada

Riaza A, Müller A (2009) Hyperspectral remote sensing monitoring of pyrite mine wastes: a record of climate variability (Pyrite Belt, Spain). *Environ Earth Sci*. doi: 10.1007/s12665-009-0368-y

Rigina O (2002) Environmental impact assesment of the mining and concentration activities in the Kola Peninsula, Russia by multidade remote sensing. *Environ Monit Assessment* 75:11-31

Rigol JP, Chica-Olmo M (1998) Merging remote-sensing images for geological-environmental mapping: application to the Cabo de Gata-Níjar Natural Park, Spain. *Environ Geol* 34: 194-202

Ripley EA, Redman RE, Crowder AA (1996) *Environmental Effects of Mining*. St. Lucie Press, Delray Beach, Florida

Resende NP, Barbosa AL de M (1972) Relatório de Pesquisa de Minério de Ferro, Distrito Ferrífero da Serra dos Carajás, Estado do Pará. Final Report. 248p

Schröder R, Puls J, Hajnsek I et al (2005) MAPSAR: a small L-band SAR mission for land observation. *Acta Astronautica* 56: 35-45.

Silva MFF, Menezes NL, Cavalcante PB, Joly CA (1986) Estudos Botânicos: histórico, atualidade e perspectivas. In: CNPq (ed) *Carajás: desafio político, ecologia e desenvolvimento*, Brasiliense, pp 185-206

Tolbert GE, Treimane JW, Melcher GC, Gomes CB (1971) The recently discovered Serra dos Carajás iron deposits, Northern Brazil. *Econ Geol* 66: 985-994

Trendall AF, Basei MAS, Laeter JR, Nelson DR (1998) Ion microprobe zircon U-Pb results from the Carajás área of the Amazon Craton. *J South Ame Earth Sci* 11: 265-277

2.4 Knowledge Architecture for environmental planning of iron ore open pit mine in Carajás Mineral Province (Brazilian Amazon)

Maria Carolina de Morais¹

Paulo Pereira Martins Junior^{1,2}

Waldir Renato Paradella³

Douglas Rezende Jano²

1. Federal University of Ouro Preto (UFOP),
Mining School, Geology Department (DEGEO)
Campus Universitário Morro do Cruzeiro, Ouro Preto – 35400-000
Minas Gerais State, Brazil.
E-mail: mdemorais@gmail.com - Phone/Fax.: 55-31- 3559-1600

2. Tecnology Centre of Minas Gerais (CETEC), Water Resources Sector (SAA).
Av. José Cândido da Silveira, 2000, Horto – Belo Horizonte – 31170-000
Minas Gerais State, Brazil.
E-mail: paulo.martins@cetec.br , maerteyn@gmail.com
dougjano@gmail.com
Phone/Fax.: 55-31- 3489-2250

3. National Institute for Space Research (INPE), Remote Sensing Division (DSR).
Av. dos Astronautas, 1758 – São José dos Campos – 12227-010
São Paulo State, Brazil.
E-mail: waldir@ltd.inpe.br - Phone/Fax.: 55-12- 3945-6438/3945-6400

Abstract

The identification of the changes caused by mining activities, in the course of dynamic processes that characterize it in a certain context, is related to the application of a massive range of information, data, and knowledge of environmental issues. With the high and increasing volume of information obtained from Environmental Impact Studies, there to be very careful so that the inevitable impact of mining activities is minimized. Environmental issues involved in mining activity should be treated together, trying to identify the relationship between direct and indirect impacts. The recognition of areas of

influence and the characterization of regions affected by environmental impact are crucial in the context of the installation of an iron ore pit mining in the Brazilian Amazon. In mining projects located in areas of tropical rainforest, these issues become even more relevant when considering all aspects involved, from those related to the physical until all stakeholders engaged in the process. The environmental planning must be done wisely, evaluated and broadly planned and not compartmentalized. Thus, it becomes evident lack of operating an automated system and leading to it, and allows the user to plan and decide where to install a certain activity in mining. In this context, the sisORCI, a system of Knowledge Architecture, originally designed for watershed management, is adapted with main function to aggregate all types of correlations of interest between the environmental and legal issues related to the environmental planning of the mine that were suitable at the stage of implementation of iron ore open pit mine in Brazilian Amazon. The results showed that it can contribute to the decision-making process based on multi-criteria including environmental, legal and economic aspects for the iron mining activity in the Amazon at whatever stage of activity.

Keywords: iron ore, environmental impact, knowledge architecture.

1 – Introduction

In 2007, Brazil continued to occupy a leading position in the global production of the iron ore mineral commodities, second after China (DNPM, 2010). With the growing demand of iron ore, new areas of extraction are required and the environmental impact in these areas are studied critically, due to the fragility of the surrounding rainforest and the strength of the Brazilian environmental laws overseeing the procedures to obtain an environmental license for operate in this region. The Carajás Mineral Province, located on the easternmost border of the Amazon Region, is one of most important mineral provinces in the world, with a predominating iron production and enormous potentials for Mn, Cu, Au, Ni, U, Ag, Pd, Pt, Os deposits, as well as others (Lobato et al. 2005). An open pit mining complex of five mines surrounded by dense forest, with the designations N4E, N4W, N5E, N5W and N5EN, are responsible for the second largest mining production of iron in Brazil, with 85.5 millions of tonnage produced in 2008 (DNPM 2010).

The Mining Code (Decree-law No. 227 of February 27, 1967) governs the regimes from exploration to production and trade of Brazilian mineral resources and establishes the rights and duties of the holders of mining rights. The National Department of Mineral Production (DNPM) has competence in the management of mineral resources and in the inspection of the mineral activity. The Decree-law No. 227 was amended by law No. 9314 of November 14, 1996, which provides increased flexibility for investment in the Brazilian mining sector. Its Article 7 stipulates that the production of minerals will depend upon the exploration authorization permit granted by the General Director of the DNPM and the development concession issued by the Minister of Mines and Energy. Licensing is a

restricted system applicable exclusively to the production of industrial minerals. The DNPM is responsible for enforcing the Brazilian Mining Code and for implementing its legal provisions (DNPM, 2010).

The Brazilian Environmental Policy (BEP) is executed at three levels—Federal, State, and municipal. The coordination and formulation of the BEP is the responsibility of the Environment Ministry (EM). Linked to the EM is the National Council for the Environment (CONAMA), which grants the environmental licenses that are required for all mining activities in Brazil. Law No. 6938 of 1981 had also established the National System for the Environment, which comprises representatives of the Federal, State, and municipal governments and private foundations involved in environmental protection and improvement. Article 225 of the Constitution stipulates that mining operators must reclaim areas that they have environmentally degraded.

In Brazil, the environmental requirements applied to the mining sector are (1) an environmental impact study (EIA), (2) environmental licensing (LA), and (3) a plan for recovery of degraded areas (PRAD). An EIA applies to mining projects of any mineral substance; an LA is mandatory for the installation, expansion, and operation of any mining activity under the systems of mining concession or licensing; and a PRAD requires suitable technical solutions to rehabilitate the soil and other aspects of the environment that might be degraded by mining operations. Resolution No. 10 of December 6, 1990, requires that all mining operations obtain LAs prior to the granting of mineral rights by the DNPM (DNPM, 2010).

Article 6 of CONAMA Resolution number 001, dated January 23, 1986 established that EIA should contemplate the following aspects:

- a) elaboration of an environmental diagnosis of the influential area and analysis of the natural resources and their interactions, such as exists, so as to characterize the area's environmental situation, before implantation of the projects, considering the physical, ecological (biology, fauna and ecosystems) and the social-economic aspects;
- b) analysis of the project's environmental impact and its alternatives by the identification, magnitude forecast and interpretation of the importance of the probable relevant impacts;
- c) definition of the mitigated negative impact measures, which includes the control equipment and waste treatment systems, evaluating the efficiency of each one; and,
- d) elaboration of the follow-up and monitoring, indicating the factors and parameters to be considered.

In the Carajás Mineral Province, environmental licensing is issued at the Federal level, regulated by Statute Decree-law No. 2486 of February 2, 1998, which also created the Carajás

National Forest. The Carajás National Forest, with an area of 411,948.87 ha, is under the control of the Brazilian Institute of Environment and Natural Resources (IBAMA). This decree establishes the following in its Art. 7: "For purposes of environmental licensing for mining activities and infrastructure associated with them in the Carajás National Forest, it is up to IBAMA to approve of strategy for its conservational use as designated in the management plan, prepared in terms of art. 6, and delegated, through an agreement concluded with the body of environmental licensing of the State of Para, responsible for the issuing, renewal and monitoring of specific environmental licenses, as provided by law". Therefore, the environmental license for mining exploration activities within the Carajás National Forest is granted by IBAMA.

The environmental changes caused by the mining activities commence with the initial stages of research for material deposits and continue until the deactivation of the enterprise, and progressively augment from one stage to the other (Ripley et al. 1996). Water resources are affected by the modification of the waterway courses, by the turbidity and suspended sediments increase in the receiving bodies of water, by their sedimentation and chemical contamination, by interference from local groundwater level raising or lowering, by changes in the dynamics and movement of subterranean waters, and by flooding from the construction and operation of the tailings dam. The atmosphere is also disrupted due to the dismantling process, which used explosives that can cause an increase in the emission of gases and particulates suspended in the air. The noise level is also increased when fragments are launched for a distance, propagating waves and vibrations, and scaring animal wildlife. The landscape is affected by the removal of vegetation, and the modification of the land use in the area of the deposit, etc (Monjezi et al. 2009).

The range of environmental alterations caused by mining depends upon the mineral's physical and chemical characteristics, the size of the deposit, the type of technology used in the extraction and processing of the ore and the environment (both natural and socio-economical) where the mining is developed (Cavalcanti, 1996). The study of the changes caused by mining is related to each of these aspects and any generalization would be a mere approximation. Besides this, when considering the dynamic situation and activity development at various stages, together with their implementation and deactivation, the changes can be accentuated or minimized.

The Brazilian environmental law requires extensive data for licensing, which makes decision-making difficult for dynamic processes that have variables related to different work scales. As a decision-making tool, EIA is heavily influenced by the nature and structure of the local planning process (Anjaneyulu & Maninckam, 2010). In this context, it has to consider the interface between people and ecosystems, the temporal-spatial scales that govern ecosystem functions, and the

capability of synthesizing both qualitative and quantitative data. It is the synthesis that provides the support for improved decision-making (Hodge, 2004).

Meanwhile, the government agencies in charge of the environmental processes manage to accumulate a considerable volume of data generated by EIA, which can then be used to improve future environmental management practices. These agencies process the AIA processes in each jurisdiction, including the application of legal requisites to evaluate proposals; projecting and implementing a series of procedures to orientate the operations. They execute the essential role of quality control and AIA document revision, especially EIAs. In doing so, the agencies can (i) accumulate information and data; (ii) learn from experience; and (iii) establish new procedures or policies destined to improve the efficiency and effectiveness of the AIA processes (Sánchez & Morrison-Sauders, 2011). From the decision-making point of view, several gaps have been identified: vulnerable institutional structures, process focus, lack of process, transparency, incompatibility between AIA and government plans, policies and programs (Bond et al., 2010).

The integration of data is a transdisciplinary and interdisciplinary process, because it requires a common understanding of the key concepts for sustainability. This common understanding allows professionals to work upon a basis for the issues to be analyzed (Bond et al., 2010). The authors suggest that the transdisciplinary approach is more aligned with the concerns of the public than the interdisciplinary approach because it works as a means of integration between science and social issues. As the data models are essentially multidisciplinary in nature, the manager can provide incentives to stimulate either the interdisciplinary or the transdisciplinary usage of the same data.

Sheate & Partidário (2010) argue that the discussion of sustainable environmental policies and decision-making processes should focus on the essence of the matter, instead of the techniques that can be used to promote data transfer. The authors highlight some important points to be considered in this process, including the development of an environment of trust and receptivity, openness to important decision-making input and the use of exchanging knowledge about the process being evaluated, creating innovative solutions for which the link between strategic evaluation and decision-making becomes crucial.

The environmental issues involved in mining activities should be treated as a whole, trying to identify the relationship between their direct and indirect impacts. In mining ventures located in environmentally fragile areas, such as in the Brazilian Amazon, these issues become even more relevant when considering all aspects involved, ranging from those related to the physical medium to those that involve the cultural values of the indigenous communities affected. Environmental planning should be done judiciously, evaluating and planning in broad terms and not by sectors.

Iron ore exploitation took place in the early 80 as per the Carajás Iron Project (CIP), in which the direct and indirect environmental impacts were provided for aspects related to soil, vegetation, water, fauna and other resources (Santos, 1989) The difficulty here was to define the influenced area of a large open-pit mining operation in a dense tropical forest (Margulis, 1990). This led to the analysis of environmental impacts taking place in the Eastern Amazon to determine to what extent they are influenced by CIP. Indeed, boundaries for the influenced area of a joint venture should be treated not only as Euclidean distances, but as areas in which its contexts are different for vegetation, groundwater, surface water, civil security, erosive processes and other topics. As such, the influenced area takes upon its true dimensions and due relevance in respect to the diverse natural systems and cultures associated within its boundaries.

All of the approached issues demonstrate that data about the management of the critical areas for mineral exploration in fragile environments is composed of many variables. Thus, management is complex in its environmental, economic and social contexts because their interrelate in regards to concepts, practical proposals and viable solutions for a sustainable exploitation. In this context, the indicated data systems should be able to evaluate a large number of variables that can assume distinct and mutable solution values As such, they extract data from different sources (human, other systems, books, maps, etc.), organize it, distribute it and multiply it for impartial solutions.

Schreiber (1999) argues that organizations utilizing data processing systems are benefited in different areas, amongst others: a) preservation of organizational knowledge where expertise is put into evidence, and dispersed data is organized and becomes reusable; b) knowledge dissemination as it can be used far from the source, standardizing solutions applied elsewhere in the organization; and c) increased decision quality where uncertain scenarios can be handled.

Creating an organizational data base requires the gathering of information from people involved in the organization's network, which is presumed to be interactive with tacit and explicit details to be recorded. Tacit knowledge is personal, specific in context and difficult to be formulated and communicated. On the other hand, explicit knowledge can be codified and transmitted by both formal and systematic languages. Both types of knowledge are complementary to each other, based on the fact that human knowledge is created and expanded by interaction between tacit and explicit knowledge Schreiber (1999).

Computational tools for supporting knowledge management range from communication, via intranet or internet, to those that enable deep specific analyses and decision-making. These latter in the form of applications, seek solutions to problems in various categories of data-intensive tasks. In

geology, some applications include: 1) PROSPECTOR (Hart & Duda, 1977), for metal ore prospecting; 2) PetroGrapher (Abel et al., 2004) to support petrographic analysis, interpretation of reservoir rocks, and management of relevant data using resources from both data-based systems and database technology; and 3) GeioAIDA for remote sensing data interpretation, developed for multisensory data application Pahl (2003).

Data system construction must be based on a specially developed architecture due to various particularities. Typically, EIA documents are extensive, of a descriptive character and with connotations in compliance with the legislation required for the issuing of an environmental license. The economic and environmental aspects involved in a mining activity must be integrated with the quest for continuous eco-efficiency. This could be achieved with an innovative architectural process called sisORCI (Martins Jr, 2008) adapted for a mining research for Mining/Environment/Carajás. In this application, the main function is to organize the data concerning environmental issues, especially those that cause a greater impact on physical, biotic, and legal areas, in order to contribute to the environmental impact studies for an open-pit iron ore mine to be implemented in the Amazonian forest (Carajás Mineral Province). The results in the form of architecture data provide a better support for determining the relationships and impacts involved in the environmental management of the mining activities. They provide assistance for decision-making in engineering and give support for monitoring projects.

In relation to the temporal-spatial scales by ecosystem, satellite remote sensing technology has presented a powerfully tool in environmental studies due the synoptic and temporal coverage. This has already been shown in several studies involving environmental impact studies in mining in various contexts (Sinha et al., 2000, Rigina, 2002, Trinder, 2008, Erener, 2011). In relation to the changes occurring in the physical environment, remote sensing has the potential to be able to contribute to detailed projects, both semi-regional and regional scales (Jordan, 2009). The digital images obtained by sensors on airborne or spaceborne platforms can be manipulated and enhanced to highlight features, such as vegetation type and density, water turbidity or pollutants, lithology and mineralogy, soil type, moisture soil, and others (Monjezi et al., 2009). Roads, for example, affect habitat at a range of spatial scales and usually act directly on a number of habitats across a region as well as fragmenting individual habitat and acting as barriers to species movement. The impact of roads is easily identified by remote sensing images (Anjaneyulu & Maninckam, 2010).

2 – Objectives

The objective was to organize data in an operational and incremental manner for the open-pit iron ore mine in Carajás, based on an architecture system, so that wherever possible:

[1] aggregate the main types of correlations of interest between the environmental and legal issues related to the environmental planning of the mine that were suitable at this stage of research;

[2] aggregate the geo-environmental typology of the area;

[3] create logical and operational paths at any of the various levels of complexity;

[4] assist managerial decision-making.

3 – Test Área

The test area is an iron-ore deposit, in the process of implementation in an open-pit mine, called N1, located in the Carajás Forest Reserve in the state of Pará, on the easternmost border of the Brazilian Amazon Region (Fig. 1). The total ore resources for the Carajás Mineral Province are estimated to be 17.8 billion tons with a 66.1% concentration of iron (Beisiegel et al. 1973). The N1 deposit is a plateau with altitudes of around 700m and an approximate area of 24km². As shown in figure 1, the N1 Deposit is surrounded by extensive forested areas called Carajás Forest Reserve.

The N1 iron ore deposits are located in the Carajás Formation (Fig.2) with an age of 2740 ± 8 Ma, obtained by zircon grains in one mafic sill combined with data from earlier U-Pb zircon work (Trendall et al. 1998), which consists of banded iron-formation (BIF) over-and underlain by mafic rocks of the Grão Pará Group. These sequences have been subdivided into three units: Lower volcanic rocks of the Parauapebas Formation (Meirelles et al. 1984), the ironstones of the Carajás Formation (Beisiegel et al. 1973), and Upper volcanic rocks. The volcanic rocks are a bimodal sequence of basalts, dolerites and rhyolites.

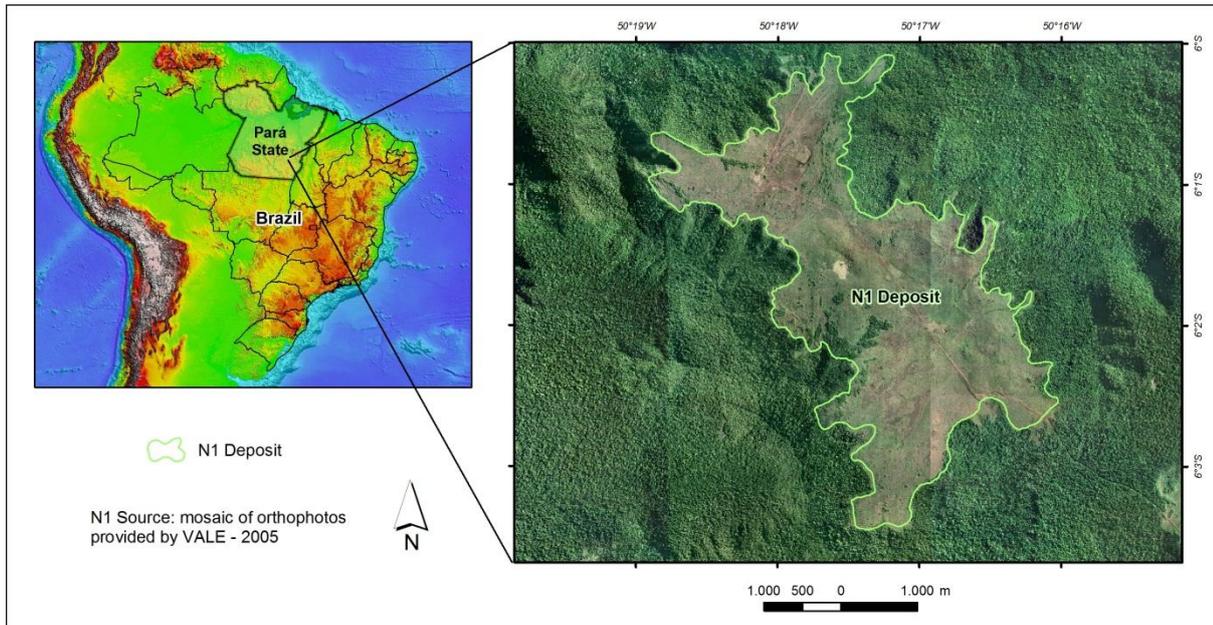


Fig. 1 – N1 Deposit (green contour) surround by the Carajás Forest Reserve.
Source: organized by Morais, 2011

The ironstones of the Carajás Formation are composed of several types of iron ore of various oxide facies. They are mainly jaspelite and interlayered hematite and silica (Tolbert et al. 1971), which are either soft or hard hematite (Lobato et al. 2005). The jaspelites have variable compositions with 17.11–43.40% Fe and 35.10–60.84% SiO₂ presenting typical interlayering of dark and light centimetre-thick mesobands and micro-banding with iron-oxide layers intercalated with white to pale or bright red layers composed of crypto to microcrystalline SiO₂ (jasper and chert) with inclusions of cryptocrystalline hematite (Tolbert et al. 1971; Beisiegel et al. 1973). Positive Eu anomaly are found in the BIFs of the Carajás Formation and it is inferred to be result of the input from suboceanic hydrothermal solutions, considered to be source of the iron and SiO₂ (Klein and Ladeira 2002). More details about geology of Carajás Mineral Province can be found in Vasquez & Rosa-Costa (2008)

With the humid tropical climate of the Amazon region, ferruginous and soils are extensively developed in the plateau. These weathered products show varying degrees of alteration that are responsible for the differences in composition, hardness and textures. The N1 area was mapped during the economic evaluation of the iron reserves in the Province (Resende and Barbosa 1972). The following types of ferruginous crusts were identified in the area: duricrust (*in situ* duricrust with limonite blocks), chemical crust (hematite fragments with goethitic pisolites), iron-ore duricrust (hematite ore blocks and subordinately specularite, cemented with hydrous ferric oxides), and hematite (mainly hematite outcrops). In addition, a soil unit was also mapped in a restricted area, associated with arboreal vegetation.

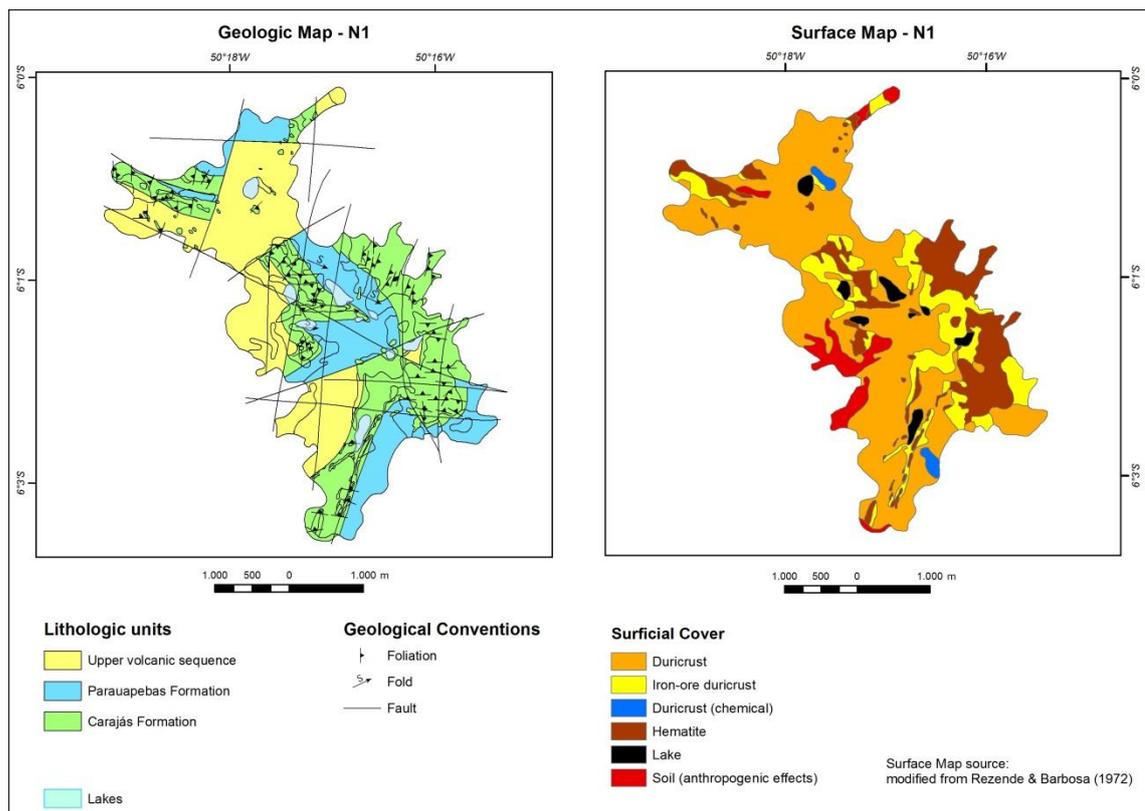


Fig. 2 – Geological and Surface Maps from the N1 deposit. Source: the Surface Map was adapted from Resende and Barbosa (1972)

Situated on rock outcrops and surrounded by dense forest (see figure 1), the vegetation by the N1 deposit is typically of a type of tropical scrubs called *campos rupestres* (Silva et al. 1986). It is predominantly composed of herbs, arboreal plants, and to a lesser extent, semi-arboreal plants. Semi-arboreal ecosystems are common in restricted lands; others areas have arboreal species strictly found in soil. *Gramineae* and *Leguminosae* plant families have a large geographic distribution. A geobotanical control is evident in ferruginous area of N1, showing relations between the vegetation and the relief that support the crusts. On the top of the hills with many rock outcrops, soil is practically inexistent and plant species are of short types. There are certain parts where this vegetation becomes sparse, thus permitting the exposition of the iron formations. Coming down the hills, it is common to see some soil and organic matter, which permit the development of plant species of higher sizes in fissure crusts. On the hills, the flora attains its maximum development with a major growth. Many lakes are covered by a vegetation of the *Typha sp* type regionally known as “taboa”, where it is exposed on extensive outcrops of the crusts during the dry seasons.

4 - Methodology

The sisORCI System (Wheel Charts for Correlation and Impacts) is conceived as an

instrument for architecture data, which is the basis for subsequent applications in artificial intelligence for the future responses of a decision-making system. This system was developed for data of any context, though initially it had been designed for topics related to the ecological and economical management of watersheds, and rural property planning and production, as a support for watershed control committees. (Martins Jr et al., 2010). The inherent interdisciplinary and multidisciplinary of the system allowed for its adaptation to a new system of issues related to Mining/Environment/Carajás. This adaptation contemplates data exclusively related to geo-environmental, economic and ecological aspects and their relationships, interactions and actions, aiming to support the environmental impact studies concerning environmental planning in the mining industry.

The impacts are evident in the representations of the issue relationships by the various wheels between them. These relationships serve for all types of issues and institutional interactions; relationships that can unite for programming actions, as well as many others.

The wheels have a series of cognitive representations, namely:

- 1) each wheel can only represent a single concept in accordance with the issues that are being considered for management;
- 2) the wheels should be organized into categories defined as the principles connected by so-called satellite wheels and structured in a convenient manner for the focused issue, without hierarchy;
- 3) the wheels should each have their own color in accordance with their attributed cognitive categories;

The arrangement of wheels in the representational space must obey a geometry that satisfies: (a) the logic of the connections; (b) their distribution within the representational space so that they avoid the crossing of connective axes, albeit it is legitimate and/or necessary for them to cross sometimes; and (c) a condition of harmony in their representation (Figure 3).

The issues of this survey begin with a quadrinomial: Carajas Mine/Ecology-Economy/Investment/Work, and seeks to cover the most obvious critical aspects of the mining/environment system at Carajás. As such, issues were chosen that are appropriate to be addressed in the environmental planning of mining activities in the catchment area of the Amazon region, using current knowledge and incremental recommendations for its increase. The issues pertaining to the same category are grouped together and represented by distinctly-colored wheels for relationships and impact, which were different from the other categories. From these central issues

represented by the wheels, connective axes were added in order to build the ORCI organizational chart.

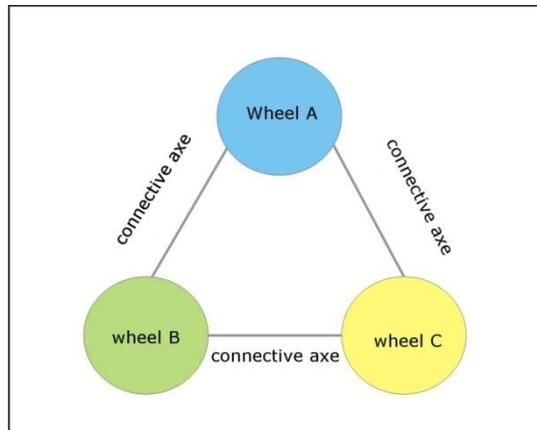


Figure 3 – Scheme for wheel connections in an ORCI organizational chart.
Source: organized by Moraes, 2011

The connective axes within the sisORCI theme: Mining/Environment/Carajás are added as an orientated program for the objects, where it is possible to visualize the types of connection(s) that connect the relationships and impact wheels. These connective axes aggregate possible paths that are direct and logical; that is, articulated in a manner that is consequent with the concepts involved and that follow the various types of impact relationships, given that whatever action or activity will necessarily has some type of impact upon another action or upon the systems. The connective axes must be separately represented by a logical connection type between the wheels, avoiding the accumulation of two types of connection in a single vector; but if this is necessary, it should be done with alphanumeric indications. The wheel connections can be either direct or indirect and work the similarity of the message transport axons and/or memory carriers. If the option is for a maximum number of connections, they can be multiplied but these are limited by the inherent logical conditions, to be verified case by case.

As for the Mining/Environment/Carajás concepts, many axes should contain information about the processes procedures between two wheels and specific knowledge of the area to be mined. The organization of this type of vector has many possibilities, as many as there are derivate, beginning from a raw database connection (satellite images, basic cartographic data) up to aggregated products (thematic maps, prospective models, etc.). Thus, listed below are examples of some sets of concepts that could occupy the topological space represented by the connective axis:

(1) Structures in Nature: represented by several thematic letters, the aspects of which are connective references to ecosystem structures and anthropic activities and structures;

- (2) Economic Concepts: economic concepts can be represented, as well as factors involving aspects of micro- and macro- economics, and ecology-economy;
- (3) Engineering Concepts: concepts that represent technical construction standards of logistics and infrastructure, as well as available data and technical information;
- (4) Mathematical Models: can aggregate statistical models, digital image processing techniques, and geological models, among others;
- (5) Management Models: several models of environmental management, ISO certification, and other topics which involve public authorities and private companies providing services and their inter-relationships;
- (6) Reforestation Models: these models comply with reforestation techniques, arboreal development, genetic development, species selection, nursery and plantation maintenance, and executable reforestation projects; all of which have varied objectives;
- (7) Mineral Research Models: a fundamental model throughout the project for mineral exploration, with concepts that span geological issues, geological modeling, mining and environmental processes, and economic feasibility for the opening of the mine;
- (8) Legislation Models: All mining and environmental laws can be represented by their own connective axes; especially for the procedures and scientific requirements needed to be in compliance with legislation. These are also represented by their respective connecting axes.

In the sisORCI system, subject Mining/Environment/Carajás, all data is organized in context. Notable is the relationships between the issues of the various wheels, amongst those that are localized in the neighborhood of one another and those that are more distant. In both cases there can be direct connections via axes, multiple connections via axes, and indirect connections of the type wheel-to-wheel, and others.

The connecting axes have a single and comprehensive general structure that is usable in a special way for each situation, obeying the concepts of the cosmic model by Herman Dooyeweerd (1958) and Stafleu (1980), who themselves presented an excellent description and articulated the appropriate interrelationships. In the ORCI Theme Mining / Environment / Carajás, in any connective axis can fit in the knowledge and suitable means for which you hold this knowledge. Depending on the knowledge, each axis connected between two wheels, it can add knowledge classified according to each modality. Then according to the needs, each modality can be divided in a required number of

sub- modalities, according to the wide range of relationships that have knowledge of the subjects of two wheels.

The notion of the model is given by the notion of its significance, which means that every single thing in the Universe passes on its significance to other things, and in turn, receives the significance of the other things (Martins Jr, 2008). The significance can be of diverse types, such as: physical, biotic, semantic and others, but they must be in accordance with the aspects of each modality. On the other hand, it can be said that everything is significant in its own mode and everything is significant at the same time, depending on the type of relationship that is occurring while observed.

The modals for the sisORCI theme Mining/Environment/Carajás were created based on data available for the area (basic and thematic maps, satellite images, etc), bibliographic consultations (articles about Carajás, environmental and mineral legislation, etc.) and in discussions with the multidisciplinary team involved in the project “Management Project for Recharging Shared Groundwater Aquifers (GZRP)” between the Paracatu Basin in São Marcos and Alto Paranaíba (Vasconcelos et. al., 2011). In this way, the identified modalities and sub-modalities implemented in sisORCI are described in the table 1.

With the possession of these elements, the overall organization chart (ORCI) was developed for implementing the following stages:

- 1 – Elaboration of lists with issues approached in the mining/environmental/context;
- 2 – Organization of issues in the form of Context Wheels (with an explicative text for each wheel);
- 3 – Establishment of a spacial structure and its axial connection between wheels;
- 4 – Designation of the context wheel tones, stemming from organization charts ORCI already existent and adapted to the phenological groupings for each wheel (Table 2); and
- 5 – final semi-optic adaptations.

Table 1 – The modalities and sub-modalities of sisORCI: Mining/Environment/Carajás

Modality	Sub-modality	
Numerical	Surface Roughness*	
Spatial (continuous extension)	Topography*	
	Drainage	
	Lithology	
	Vegetation*	
	Forest*	
	<i>Campos Rupestres</i> *	
	Maps	Surficial Cover*
	Geological*	
	Land Use*	
	Relief*	
Kinematics (motion)	Logistics	Railways
		Ports
		Roads
		Iron ore disposal
		Waste disposal
		Sterile disposal
Physics (energy and matter)	Quarries and mines	
	Cartography associated	
	Hydrology	Catchment hydrology
		Water
		Ocean water (ports)
		Surficial aquifer
		Groudwater aquifer
		Drainage
	Water chemistry	
Biotic	Vegetation maps *	
	Protected areas (ecosystems)	
Pisico-sensitive	Not considered	
Logical / Analytical	Geoprocessing	Passive Remote Sensing*
		Active Remote Sensing *
		Digital Elevation Model*
		Digital Cartography *
	Bases of concepts *	
	Definitions in general *	
	Logistics	
Historic	Local indigenous populations	
	Archeology	
Social	Not considered	
Economic	Mineral Research	
	Modeling of deposits	
	Economic administration	
Legal	Federal Legislation (Constitution, Codes, Laws regulating)*	
	Environmental Law *	
	Technical standards (ABNT)	

* covered themes

Table 2 – Relationships between the Context Wheel Tones and the phenomena approached in sisORCI: Mining/Environment/Carajás.

Colors	Related phenomena
	Ecological-Economic Systems
	Economic Systems
	Productive Systems
	Mining Systems / Environment
	Processes related to mineral exploration
	hydrological systems
	Hydrodynamic processes
	Geomorphological-geotechnical processes
	Rocks
	Vegetation
	Logistical infrastructure systems
	Technological systems
	Mining processes
	Legislative systems

5 – Results and discussion

The ORCI organization chart represents the fundamental procedure for process formalization involving any type of data and in this case, for the Mining /Environment/Carajás issue in the implementation phase of the mining. The original data for ecology, economy, investment, work, Carajás, territory (mining/environment), where the organization chart starts, by construction, aggregates Mining space in the Center of the focus/environment/Carajás, which binds the wheels of correlations and impacts (Figure 4). In ORCI, there are sequential relationships, hierarchy, but in parallel and/or in concurrency, which are systemic and conceptual in order to aggregate and synthesize all data necessary for the deployment of a mining activity with sustainability. Not all subjects placed in the organogram are discussed here, but all they were organized in architecture. For example, the ocean water theme is important because it is related to the port where the iron ore is disposed of and therefore, the railroad would have its specific area of influence throughout its course.

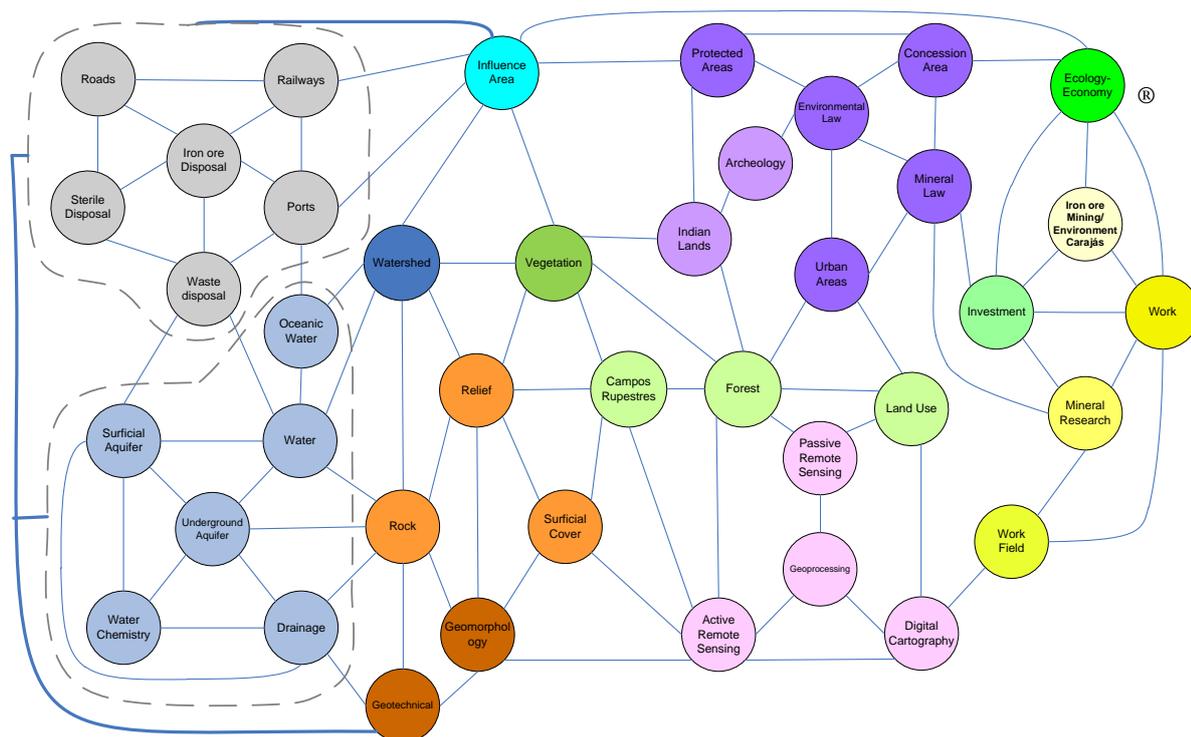


Figure 4 – Organization chart ORCI for Mining/Environment/Carajás. The legends are in the Table 2.

In sisORCI Mining Theme/environment/Carajás (Figure 5), each issue represented by the wheels is registered in the system in the name field of the wheel, followed by its concepts. The wheels that correlate with each other are visible in the Wheels field. Several files, maps, photos related to a determined wheel can be aggregated. If the user wishes to know the content of whatsoever other wheel, all is needed is a click on the phrase “All Wheels”. The registration interface of the connective axis has stages set off by steps until the contents are filled. Initially all the models for issues are presented in the square at the lower right of the screen (Figure 6). The name of the connecting axis is standardized, always containing the name of the two wheels which it connects, separated by the character bar “/”. The vector is framed in all of the listed models in the square in the upper right corner.

After inserting a sub-modal in the modal of the connective axis, the lower left part of the screen remains accessible and contains the specific attributes of the same. The concept is a textual description of the sub-modal in the context of the connective axis. The icon Executable List shows all of the algorithms referring to whatsoever modal. The user chooses those that are relevantly executable, found in the database of executable of sisORCI, to the theme of whatever sub-modal registered at the moment. These are presented in the access to the connective axis by way of the organizational chart, hiding as such the existence of the rest of the useless at the moment in the analysis. The phrase “Insert complementary data” is a space where the connective axis has to register a connection of this with

other information in some database, that contains, for example, land use maps, among others. In ORCI, the influenced area is necessarily related to connecting axes joining the issues and groups of issues and indirectly, to other issues. For a determined scale of observation, the influence area for that occurrence or phenomenon also changes, and is not restricted to a previously delimited area. The level of information in each of the scales is directly proportional to the quantity of information that can be extracted from it. When considering, for example, the relationship between two issues “Influenced Area” and “Vegetation”, it is pertinent to evaluate the observed scale at which the vegetation will be affected by the mining operation.

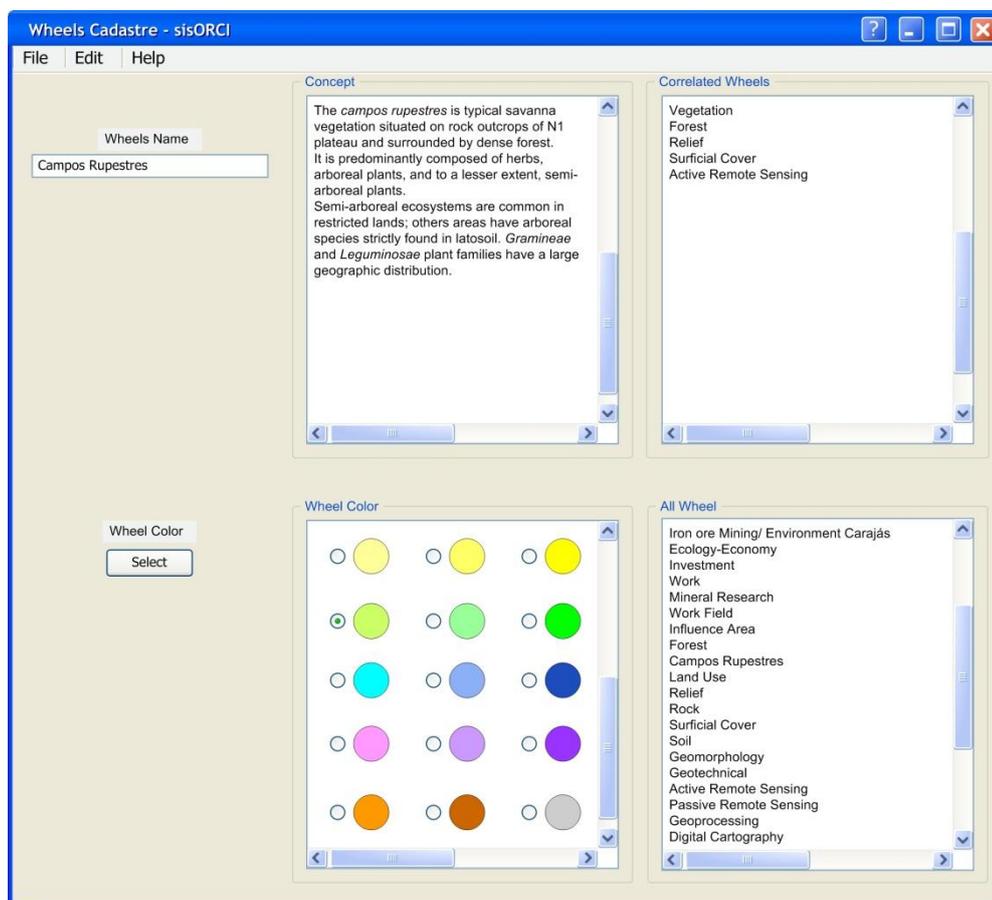


Figure 5 – Interface of sisORCI: Mining/Environment/Carajás for registering wheels.

After inserting a sub-model in the modal of the connective axis, the lower left part of the screen remains accessible and contains the specific attributes of the same. The concept is a textual description of the sub-modal in the context of the connective axis. The icon “Executable List” shows all of the algorithms referring to whatsoever modal. The user chooses those that are relevantly executable, found in the database of executable of sisORCI, to the theme of whatever sub-modal registered at the moment. These are presented in the access to the connective axis by way of the

organizational chart, hiding as such the existence of the rest of the useless at the moment in the analysis. The phrase “Insert complementary data” is a space where the connective axis has to register a connection of this with other information in some database, that contains, for example, land use maps, among others.

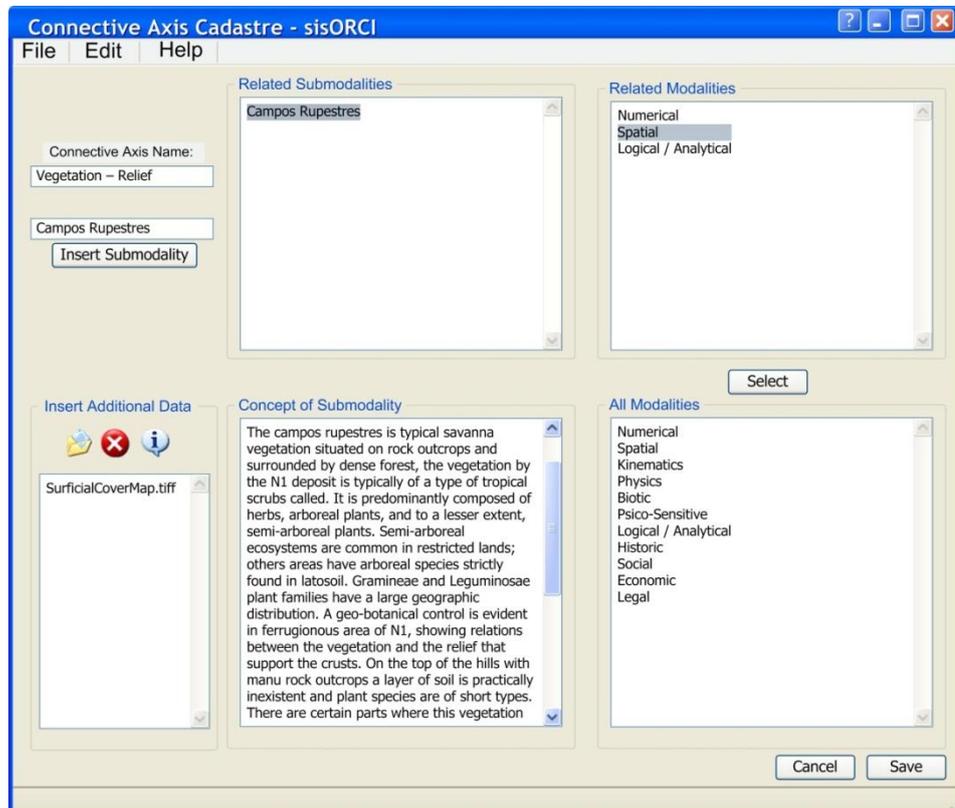


Figure 6 - Interface of registered structure for the connective axes after data insertion

In ORCI, the influenced area is necessarily related to connecting axes joining the issues and groups of issues and indirectly, to other issues. For a determined scale of observation, the influence area for that occurrence or phenomenon also changes, and is not restricted to a previously delimited area. The level of information in each of the scales is directly proportional to the quantity of information that can be extracted from it. When considering, for example, the relationship between two issues “Influenced Area” and “Vegetation”, it is pertinent to evaluate the observed scale at which the vegetation will be affected by the mining operation.

The alteration of the soil and removal of vegetation for the engineering installations, such as the pit and the tailings disposal in piles or dams impact the landscape; are predominant alterations in open-pit mining (Ripley, 1996). The visible landscape alterations are clearly evidenced in the surroundings of Deposit N1 by means of satellite images, as much for the forest, as for the *campos rupestres*, and this fragmentation can be quantified by digital image processing techniques and photo

interpretation on a semi-regional scale and in detail (Morais et al. 2011b). In ORCI, vegetation relates directly or indirectly with all other issues and affects crucial aspects in the area to be mined, since there is ecosystem alteration in function of its removal. As such, the Vegetation issue, sub-divided into forest and *campos rupestres*, is treated here to explain the relationships of sisORCI Issue Mining/Environment/Carajás. Table 3 presents examples of the detailed relationships between issues related to vegetation, and its respective models.

Table 3 – Examples of the vegetation issue connections with other issues and their respective relationships.

Themes	Relationships	Themes
Forest	- discrimination of forest in relation to <i>campos rupestres</i>	- <i>Campos Rupestres</i>
	- techniques of digital image processing for mapping forest	- Passive and Active Remote Sensing
	- mapping of land use	- Land use
	- mapping of forest in relation to relief	- Activity Remote Sensing
<i>Campos Rupestres</i>	- model of variation relief x rock	- Relief
	- mapping of lateritic crusts	- Surface cover
	- techniques of digital image processing for mapping the variation of lateritic crusts	- Activity Remote Sensing
	- mapping of the different biomes, <i>campos rupestres</i> , and forest	- Forest

The axis relationships presented in Table 3 present topological examples of Nature in Structure, represented by thematic maps and mathematical models, and by digital imagery technical processes. Considering the axis relationship between the issues Forest and Active Remote Sensing for example, it is possible to extract data about the different types of forest in relation to the relief obtained from radar images (Morais et al., 2011a). The variation in the forest cover, along with the variation in the radar images, provides a better level of discrimination in the mountain forests, with altitudes higher than 700m, and of the sub-mountain forest, with altitudes around 200m. The mineralized area is surrounded by a dense mountain forest and criteria should exist for the implementation of the pit, and the removal its vegetation for the opening of roads, for example, so as to minimize environmental impacts.

In another analysis, the issues *Campos Rupestre* and Relief were interconnected by an existing relationship of relief variations in relation to the different types of *campos rupestres*. Texture highlighting of radar images permitted the modeling of the different types of vegetation in the *campos rupestres*, related to the covered lateritic surface that demonstrates the existing relationship with the relief of the plateau N1. In this relationship, it is possible to identify, by the textural classification of the radar images, the occurrence of hematite in elevated topographic areas where the *campos rupestres* vegetation is characterized as grass (Morais et al., 2011). With this, it is possible to decide *a priori* where vegetation should be eliminated for the implementation of the mine, taking into consideration also the mineral research data related to the mining models.

All of these relationships can provide support for the identification of areas to be deforested and areas that should be preserved, with a minimum elimination of vegetation due to the operation. The location of the tailings dam can be planned with a minimum of vegetation suppression from the *campos rupestres*. Priority should also be given to the maintenance of strips of *campos rupestres* vegetation, together with areas of neighboring forests, so that the fauna can move freely in the locality. Of critical importance is the preservation of this biome inserted in the forest.

Figure 7 presents the other processes used for formalizing data in relation to hierarchy and classification of some of the issues presented in the general organizational chart, such as the ontological classification by means of the Protégé tool (Knublauch et al., 2004). The ontological diagram presents a vision by system and subsystems of the ontological entities but does not visualize the efficacy of the thematic concepts, nor does it represent the relationships between the entities. This is done in ORCI, which is a notable tool for architecturing data. Even more, structural visualization Shrimp (Storey et al., 2002) is an efficient manner to detail certain relationships for classifications not explained in ORCI.

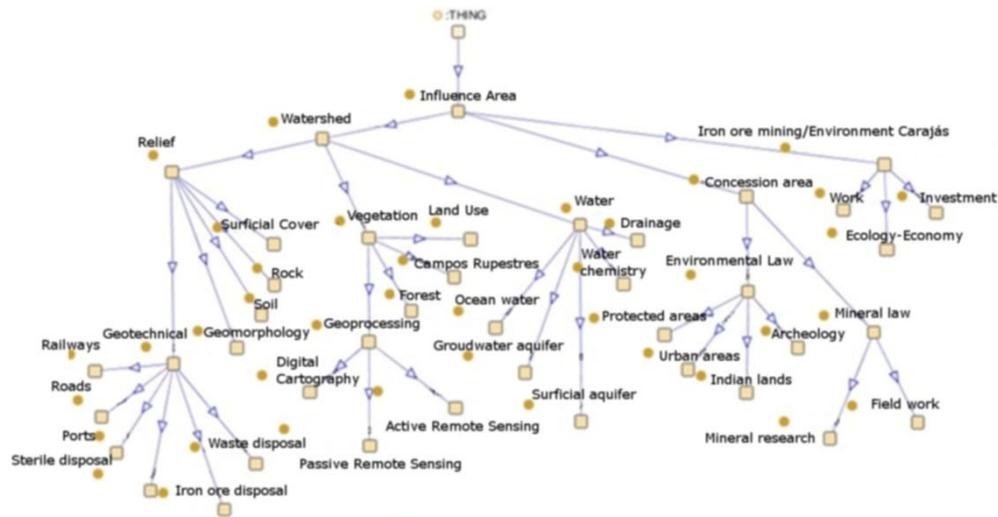


Figure 7 – Ontological graph of structural system and subsystems for the theme Mining/Environment/Carajás designed with Protégé System.

In this ontology, the influenced area is the focus of the environment in mining and to define it in relation to the impact that mining causes, the issues present on the observation scale and their relationships should be considered. In deposit N1, for the detailed cartography, the influenced areas would all be observable features at this scale; for example, *campos rupestres* and forest vegetation surrounding the plateau, lakes and roads. Once these issues and their relationships are identified, the overall state of conservation and preservation of the area's environmental conditions should be analyzed. These conditions should be perfectly characterized in ORCI.

In carrying out engineering works, which requires geotechnical studies, such as railways, roads, ports, tailings disposal, waste and minerals need to build cutting slopes, embankments, knock-outs and loan boxes cause impacts both on a local scale as regional level. In the case of the Carajás Railroad the area of influence should be examined as well, along its 890 km long, in relation to all issues that affect, that is, the watershed, the topography, vegetation soil, drainage, lithology, indigenous communities, ports and ocean waters and other relevant issues arising, such as human occupation.

One of the impacts arising from the presence of anthropogenic Carajás Railroad is the intrusion arising from the implementation of a work of this size. Roads located in southern Pará State has presented many parts of the devastation listed by Ab'Saber (2003), which include a stretch east-west the Carajás Railroad, with the devastation of the sidebands highway. According to the author, the road led to a chaotic occupation of farming areas, with total ignorance of the ecological consequences

of land and agricultural activities that led to various impacts to the biotic and abiotic, including damage of drainage from the headwaters of streams on roadsides located on interfluves.

On a local scale, changes in vegetation may result in loss of economic resources and biodiversity, especially the *campos rupestres* and even the extinction of species, and affect with the balance of erosion processes, hydrological and microclimatic. On a global scale, changes in vegetation, especially forest, may imply changes in the natural processes that occur across the globe, such as climate change related to the increased atmospheric concentration of greenhouse gases and the distribution of rainfall in Brazil and South America, phenomena controlled in part by the dynamic balance of the Amazon (IBGE, 2011).

From the organized data in the form of sisORCI Theme Mining/Environment/Carajás it is possible to articulate the concise form in which the impacts will affect the area to be mined in relation to the an specific theme and its influence area. The environmental fragility of the area requires a continuous process and environmental impact evaluation, wherewith there is constant monitoring of all involved variables, so as to minimize these impacts. On the measures in which other elements were incorporated into the system, the decision process benefits from a broad range of information and correlated data that is at the same time, synthesized. Not only the environmental aspects are contemplated, but also the integrated legal and economical ones providing auxiliary information for a mining operation that is ecoefficient, and within the same organizational chart ORCI.

6 – Conclusions

The complexity of environmental issues involved in iron ore open-pit mining in the Amazon region requires a broad approach to cover all aspects, their relationships and impacts, and the domination of these in all stages of the mining process. For the area in question, the relationships between the issues that are considered fragile, such as vegetation, became explicit by means of processes that permitted the maximum extraction of possible information for this issue by means of remote sensing images and their interaction with other data. These relationships can lead to broader engineering analysis processes for the implementation of infra-structure services that involve the elimination of vegetation and geotechnical aspects, for example, that provide agility for decision-making.

The approach proposed for the influenced area is another crucial aspect to be considered in projects of this size. The perception that this influenced area affects diverse issues along various scales, allows for a holistic vision of environmental impacts that can affect the area. It also contributes

to the decision-making process based on multi-criteria including environmental, legal and economic aspects for the iron mining activity in the Amazon at whatever stage of activity.

The sisORCI Theme Mining/Environment/Carajás system is an innovative technological tool in the stage of implementation, by which the study of environmental impacts for Deposit N1 can be benefited by data architecting that contemplates environmental, legal and economic issues in a form that is synthesized, broad, integrated and incremental. Considering the present structure of environmental impact studies using extense documents and static thematic maps, performed in a determined space and time, the sisORCI Theme Mining/Environment/Carajás can also contribute with the accompanying and monitoring of the impacts caused by mining when detected by it.

Acknowledgements

The authors wish to thank Mrs. Harriet Reis for the English review. Special thanks to INPE for field support, Brazilian Institute of Environment and Natural Resources (IBAMA), and to VALE (GAJAN) mining company, particularly to senior-geologist Lambertus C. Schardt, for the access to the infrastructure in Carajás. Thanks to FINEP agency of Federal Ministry of Science, Technology and Innovation, Sectorial Fund CT-Hidro-2002, thanks to FAPEMIG Minas Gerais State public agency for scientific research and technological support and sponsor. Thanks to CNPq the federal Brazilian agency for previous scientific support.

References

Abel, M., Silva, L.A.L., De Ros, L.F., Mastella, L.S., Campbell, J.A., Novello, T., 2004. PetroGrapher: manging petrographic data and knowledge using an intelligent database application. *Expert Systems with Applications* 26, 9-18.

Ab´Saber, A., 2003. Os Domínios de Natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas. Ateliê ed., São Paulo.

Anjaneyulu, Y., Manickam, V., 2010. *Environmental Impact Assessment Methodologies*. BS Publications ed., Hyderabad.

Beisiegel, V.R., Bernadelli, A.L., Drummond, N.F., Ruff, A.W., Tremaine, J.W., 1973. Geologia e Recursos Minerais da Serra dos Carajás. *Rev. Bras. Geoc.* 3, 215-242.

Bond, A.J., Viegas C.V., Coelho, C.C. de S.R., Selig, P.M., 2010. Informal knowledge processes: the underpinning for sustainability outcomes in EIA. *Journal of Cleaner Production* 18, 6–13.

Cavalcanti, RN., 1996. A mineração e o desenvolvimento sustentável: Casos da Companhia Vale do Rio Doce. Thesis. University of São Paulo.

DNPM, 2010. Brazilian Department of Mineral Production. <http://www.dnpm.gov.br>. Accessed 04 July 2010

Dooyeweerd, H., 1958. A New Critique of Philosophical Thought, Philadelphia: Presb. and Ref. Publ. Co, Amsterdam.

Erener, A., 2011. Remote sensing of vegetation health for reclaims areas of Seytömer open cast coal mine. *International Journal of Coal Geology*. 86, 20-26.

Hart, P.E., Duda R.O., 1977. PROSPECTOR: A computer-based consultation system for mineral exploration. Artificial Intelligence Center, Stanford Research Institute, California, Technical Note. 155, 35p.

Hodge, A., 2004. Mining's seven questions to sustainability: from mitigation impacts to encouraging contribution. *Episodes*. 27, 177-184.

Jordan, G., 2009. Sustainable mineral resources management: from regional mineral resources exploration to spatial contamination risk assessment of mining. *Environmental Geology*. 58,153-169.

IBGE, 2011. Geoestatísticas de Recursos Naturais da Amazônia Legal 2003. ISBN 978-85-240-4189-1. Rio de Janeiro.

Knublauch, H., Ferguson, R. W., Noy, N. F.; Musen, M. A., 2004. The Protégé OWL Plugin: An Open Development Environment for Semantic Web Applications. *Lecture Notes in Computer Science*. Springer Berlin /Heidelberg 0302-9743 (Print). 229-243.

Klein, C., Ladeira, A.E., 2002. Petrography and Geochemistry of the least altered Banded Iron-Formation of the Archean Carajás Formation, northern Brazil. *Econ Geol* 97, 643-651.

Lobato, L.M., Rosière, C.A., Silva, R.C.F., Zucchetti, M., Baars, F.J., Seoane, J.C.S., Rios, F.X., Pimentel, M., Mendes, G.E, Monteiro, A.M., 2005. A mineralização hidrotermal de ferro da Província Mineral de Carajás – Controle estrutural e contexto na evolução metalogenética da província, in: Marini, O.J., Queiroz, E.T., Ramos, B.W. (Eds.), *Caracterização de depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia*. ADIMB/DNPM, ed., Brasília, pp. 20-92.

Margulis, S., 1990. O Desempenho do Governo Brasileiro e do Banco Mundial com Relação à Questão Ambiental do Projeto Ferro Carajás, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA (Eds), Brasília, 97p.

Martins Jr., P.P., Carneiro, J.A., Endo, I., Melo Marques, A.F.S, Novaes, L.A.A., Gomes, L.A.M., Jano, D.R. 2010. Lógica para Modelos de Integração de conhecimentos para auxílio à decisão plantios florestais ecológico-econômicos em zonas de recarga de aquíferos. *Revista Brasileira de Geociências*. 40, 80-98.

Martins Jr., P.P., 2008. *Arquitetura de Conhecimentos em Ecologia-economia para Gestão Ambiental de Bacia Hidrográfica*. Projeto ACEE. Belo Horizonte e Ouro Preto: CETEC e UFOP-EM-DEGEO. Internal Report.

Morais, M.C., Martins Jr., P.P., Paradella, W.R., 2011a. Mapping iron-mineralized laterite environments based on textural attributes from MAPSAR image simulation – SAR-R99B (SIVAM/SIPAM) in the amazon region. *Brazilian Journal of Geophysics*. 29 , 99-111.

Morais, M.C, Martins, Jr., P.P., Paradella, W.R., 2011b. Multi-scale approach using remote sensing images to characterize the iron deposit N1 influence areas in Carajás Mineral Province (Brazilian Amazon). *Environmental Earth Science*. DOI 10.1007/s12665-011-1434-9.

Meirelles, E.M., Hirata, W.K., Amaral, A.F., Medeiros Filho, C.A., Gato, W.C., 1984. *Geologia das folhas Carajás e Rio Verde, Província Mineral dos Carajás, Estado do Pará*. Paper presented at The 33th Brazilian Congress of Geology, Rio de Janeiro, Brazil.

Monjezi ,M., Shahriar, K., Dehghani, F., Samimi Namin, F., 2009. Environmental impact assessment of open pit mining in Iran. *Environ Geol*. DOI: 10.1007/s00254-008-1509-4.

Pahl, M., 2003. *Architektur eines wissensbasierten Systems zur Interpretation multisensorieller Fernerkundungsdaten*. Thesis. Universität Hannover. 93p.

Ripley, E.A., Redman, R.E., Crowder, A.A., 1996. *Environmental Effects of Mining*, St. Lucie Press ed., Florida.

Resende, N.P., Barbosa A.L. de M., 1972. *Relatório de Pesquisa de Minério de Ferro, Distrito Ferrífero da Serra dos Carajás, Estado do Pará*. AMZA, Final Report. 248p.

Rigina, O., 2002. Environmental impact assesement of the mining and concentration activities in the Kola Peninsula, Russia by multirate remote sensing. *Environ Monit Assessment*, 75:11-31

Sánchez, L.E., Morrison-Saunders, A., 2011. Learning about knowledge management for improving environmental impact assessment in a government agency: The Western Australian experience. *Journal of Environmental Management*. 92, 2260-2271.

Santos, F.M.C., 1984. Projeto Ferro Carajás – Relatório de Impactos Ambientais vol.1. Rio de Janeiro, Companhia Vale do Rio Doce. Internal Report.

Sheate, W.R., Partidário, M.R., 2010. Strategic approaches and assessment techniques – Potential for knowledge brokerage towards sustainability. *Environmental Impact Assessment Review* 30, 278–288.

Schreiber, A., 1999. Knowledge engineering and management: the CommonKADS methodology. MA: MIT Press, Cambridge.

Silva, M.F.F., Menezes, N.L., Cavalcante P.B., Joly C.A., 1986. Estudos Botânicos: histórico, atualidade e perspectivas, in: Carajás: desafio político, ecologia e desenvolvimento, Brasiliense ed. Brasília, pp. 185-206.

Sinha, R.K., Pandey, D.K., Sinha, A.K., 2000. Mining and the environment: a case study from Bijolia quarrying site in Rajasthan, India. *The Environmentalist*. 20, 195-203.

Storey, M.A., C.B., J.M., D.R., M.L., MUSEN, M., 2002. SHriMP views: an interactive environment for information visualization and navigation, in: Proceedings of the International Conference on Human Factors in Computer Systems (CHI 2002), Minneapolis, Minnesota, USA, April 20-25, pp. 520-521.

Tolbert, G.E., Treimane, J.W., Melcher G.C., Gomes C.B., 1971. The recently discovered Serra dos Carajás iron deposits, Northern Brazil. *Econ Geol.* 66, 985-994

Trendall, A.F, Basei M.A.S., Laeter J.R., Nelson D.R., 1998. Ion microprobe zircon U-Pb results from the Carajás área of the Amazon Craton. *J South Ame Earth Sci.* 11, 265-277

Trinder, J.C., 2008. Remote Sensing for assessing environmental impacts based on sustainability indicators. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVII. Part B8. Beijing.

Vasconcelos, V.V., Martins Jr, P.P., Jano, D.R., 2011. Arquitetura de conhecimentos sobre sistemas aquíferos. *Revista Digital de Biblioteconomia e Ciência da Informação*. 9, 184-211.

Vasquez, M.L., Rosa-Costa, L. T. da., 2008. Geologia e Recursos Minerais do Estado do Pará: Sistema de Informações Geográficas – SIG : texto explicativo dos mapas Geológico e Tectônico e de Recursos Minerais do Estado do Pará. Escala 1:1.000.000. CPRM ed., Belém.

CAPÍTULO 3

CONCLUSÕES

Este capítulo apresenta as conclusões feitas com base nos dados obtidos neste trabalho, dados publicados na literatura e interpretações a partir dos mesmos, sobre o planejamento ambiental em mineração de ferro a céu aberto, com os seguintes enfoques:

- a) capacidade de extração de informações ambientais de imagens ópticas e de radar da área estudada;
- b) o potencial das imagens de radar na Banda L-hh, L-vv e L-hv como instrumento de cartografia em áreas mineráveis na Amazônia, visando explorar ao máximo os potenciais de informações sobre de minerais ferrosos;
- c) busca de correlações entre os dos principais tipos de informações obtidas em diversas escalas de trabalho de forma a identificar as áreas de influência na vizinhança próxima e longínqua da área a ser minerada e seu entorno,
- d) identificação dos principais tipos de correlações reconhecíveis de interesse entre os temas ambientais e de gestão relacionados ao planejamento ambiental dessa mineração, bem como os principais tipos de conhecimento da tipologia geoambiental da área em uma arquitetura de conhecimentos.

A partir dos resultados obtidos, foi possível obter as seguintes conclusões:

1. As informações ambientais obtidas com o uso da tecnologia dos produtos integrados de imagens de radar e ópticas permitem, inicialmente, visualizar as diferenças dos matizes e do relevo entre os diversos alvos que compõem a paisagem de N1 e do entorno na área analisada. Áreas de florestas preservadas são abundantes nos limites da Floresta Nacional de Carajás e mostram-se pressionadas pelo avanço das atividades antrópicas, evidenciando a necessidade de estudos mais elaborados sobre a temática áreas de influência.

2. Em relação à vegetação de campos rupestres, foi possível indicar áreas para preservação deste importante ecossistema, inserido na área da Floresta Nacional de Carajás. No depósito N1, foi possível ainda discriminar matizes distintos, relacionados às variações de vegetação no platô, que por sua vez apresentam nítido controle geobotânico. Com base nessas diferentes respostas da cobertura superficial na paisagem do entorno de

N1, a tecnologia da integração de radar com imagens ópticas pode e deve ser utilizada para levantamento prévio de informações ambientais em escala semi-regional a local.

3. Em relação à avaliação dos atributos texturais derivados das medidas de textura de segunda ordem (GLCM) das imagens de radar da banda L, as imagens do SARR99B podem ser utilizadas como um instrumento prático para um mapa de cobertura superficial preliminar para a discriminação da hematita, especialmente em áreas remotas onde não se dispõe de nenhuma cartografia associada. A investigação revelou que os atributos texturais de textura foram sensíveis ao (1) comprimento de onda do radar, (2) a polarização do radar e (3) aos parâmetros do alvo (constante dielétrica, macro e micro-topografia).

4. A banda L foi muito sensível a pequenas áreas de vegetação e o retroespalhamento da superfície foi afetado pelo terreno abaixo desta vegetação. Para a cobertura florestal em terreno plano, o efeito de espalhamento volumétrico foi predominante. A polarização hh tem desempenho melhor que vv para penetrar em materiais com uma estrutura compacta horizontal, como hematita. Já polarização vv apresentou melhor desempenho na discriminação de alvos com características de rugosidade semelhantes, como vegetação, solo (efeitos antropogênicos), canga química e lagos secos. O sinal da polarização cruzada causou uma perda no desempenho da classificação e pode ser devido a perda de sinal do radar na resposta da polarização cruzada.

5. A constante dielétrica pode ter afetado os alvos submetidos a condições de seca. A forte seca que ocorreu na Região Amazônica entre Novembro de 2004 e no final de 2005, evento considerado catastrófico, afetou a região e influenciou as imagens de radar, adquiridas em Junho de 2005. Como consequência, os lagos aparecem muito secos e a vegetação de gramínea domina a maior parte desses.

6. A influência da macro-topografia ficou evidenciada na discriminação da hematita. A estrutura de hematita compacta, em áreas mais altas do *plateau*, foi sensível a macro-topografia e isso contribuiu para discriminá-la, em detrimento dos demais alvos.

7. A rugosidade superficial foi mal classificada na banda L e mais classes foram classificadas como intermediárias. A maioria dos alvos foi classificada em condições de reflexão especular, isto é, apresentaram lisas nesse comprimento de onda.

8. De todos esses fatores, pode-se observar que o comprimento de onda foi o mais importante para discriminar lateritas mineralizadas em ferro em N1, conforme

anteriormente observado para a banda C. Imagens de radar com diversos comprimentos de onda são desejáveis para uma discriminação melhor de classes.

9. A abordagem com as imagens de radar demonstrou potencial para ser utilizada como uma ferramenta prática para um mapa preliminar, que pode servir como um guia para obter informações detalhadas de lateritas mineralizadas em áreas com contexto similares, e outros minerais, como lateritas mineralizadas em fosfato de titânio em Maicuru.

10. Em relação ao potencial das imagens de sensoriamento remoto com diferentes resoluções espacial e espectral, foi possível a obtenção de informações ambientais relevantes no contexto da implantação de uma mina de minério de ferro a céu aberto na Região Amazônica. A fragilidade deste ambiente requer rigorosos estudos de impactos que podem ocorrer na área onde a nova mina será instalada. Informações sobre o estado da vegetação, a declividade, cobertura superficial e da logística envolvida puderam ser estudados em detalhe, na escala semi-regional e regional.

11. Constatou-se que as áreas de influência estão diretamente relacionadas à região e são afetadas no próprio depósito N1 e nas zonas circundantes, verificadas com duas áreas de teste, em escalas de 1:10.000 e 1:100.000. Com cada escala pode-se obter informações distintas sobre as condições ambientais. Áreas de floresta preservadas são abundantes nos limites da Flona Carajás, mas são pressionadas pelo avanço da atividade humana. Em relação à vegetação em pastagens, foi possível indicar áreas importantes do ecossistema para a preservação, inseridas na área da Floresta Nacional. A preservação, conservação e fragilidade dessas áreas foram passíveis de serem identificadas.

12. A tecnologia de sensoriamento remoto, com o uso de imagens ópticas e de radar, mostrou-se eficiente no estudo das informações ambientais e das áreas de influência nas escalas semi-regional e local na floresta amazônica. Pode também ser aplicada em áreas com características semelhantes. Este estudo mostra a vantagem de adicionar outros métodos de extração de informações ambientais a partir de imagens de satélite. Análises multisensor, multispectrais e multiescala podem dar respostas diferentes e complementares.

13. Os resultados obtidos a partir dos estudos com imagens de satélite podem ser considerados uma forma eficaz de desenvolver estudos de impacto ambiental em uma área complexa. A integração de informações em várias escalas permite uma compreensão mais adequada e melhor das áreas de influência em torno de uma mina em uma região com

pouca informação e com condições difíceis de dados de coleta, como evidenciado ao longo do trabalho.

14. Estes estudos foram incorporados à Arquitetura de Conhecimentos baseada no Método ORCI e modelada para ser instalada no sistema sisORCI e fornecem subsídios para acompanhamento, monitoramento e medições ambientais passíveis de serem usadas para esse jazimento de ferro a ser lavrado a céu aberto.

15. A complexidade dos temas ambientais envolvidos em uma mineração de ferro a céu aberto requer uma ampla abordagem dos aspectos envolvidos, suas relações e seus impactos, de forma a se obter total domínio de todos impactos envolvidos em qualquer etapa do empreendimento. A partir dos temas organizados na forma do organograma ORCI para o Tema “Mineração/ Meio Ambiente/ Carajás” foi possível agregar os conhecimentos relativos à implantação de uma mina de ferro a céu aberto, de forma que os impactos ambientais possam ser agrupados de uma forma em que seus relacionamentos fiquem explícitos.

16. Na pesquisa em questão, as relações entre temas considerados frágeis como a vegetação ficaram explicitados por meio de processos que permitem extrair o máximo de informação possível deste tema, por meio de imagens de sensoriamento remoto, e sua interação com outros. Estas relações podem levar às análises mais abrangentes dos processos de engenharia decorrentes da implantação de obras de infraestrutura, que envolvam supressão da vegetação e aspectos geotécnicos, por exemplo, o que possibilita agilidade nas tomadas de decisão.

17. A abordagem proposta para a área de influência foi outro aspecto crucial a ser considerado em projetos deste porte. A percepção de que a área de influência afeta temas diversos em várias escalas possibilitou uma visão holística dos impactos ambientais, que podem afetar a área. Isto também contribuiu para um processo de tomada de decisão baseado em multi-critérios de forma a considerar os aspectos ambientais, legais e econômicos envolvidos na atividade da mineração de ferro em ambiente amazônico em qualquer etapa da atividade desta mineração.

18. O organograma ORCI (próprio do sistema sisORCI) utilizado para o Tema Mineração/ Meio Ambiente/ Carajás é um instrumento de inovação tecnológica em fase de implementação no qual os estudos de impacto ambiental para o Depósito N1 possam ser beneficiados por uma Arquitetura de Conhecimento, que contemple os temas ambientais, legais e econômicos de forma sintetizada, abrangente, integrada e incremental. Considerando a estrutura atual de apresentação de estudos de impacto ambiental, sob a forma de documentos extensos e mapas estáticos, realizados em determinado espaço e

tempo, o organograma ORCI é uma ferramenta hábil a contribuir com os Estudos de Impacto Ambiental e poder armazenar os principais conhecimentos necessários à implantação de mina de ferro a céu aberto em ambiente amazônico de modo sistêmico.

O estudo feito nesta pesquisa indica que a arquitetura de conhecimentos para a mineração de ferro a céu aberto em Carajás é capaz de agregar uma ampla abordagem multidisciplinar e interdisciplinar que envolve os aspectos ambientais, legais, logísticos, econômicos e outros envolvidos na mineração. Ressalta-se que a metodologia ORCI, cuja arquitetura foi representada para o Tema Mineração/ Meio Ambiente/ Carajás apresenta caráter incremental, isto é, em todas as fases do empreendimento, desde o licenciamento (implementação) ao descomissionamento, pode-se inserir progressivamente o andamento das atividades, seus sucessos e respectivos impactos e relacionamentos diversos que o usuário gestor necessite enfocar.

Esses estudos seguiram as diretrizes epistemológicas necessárias, bem como as diretrizes metodológicas embasadas em conceitos epistemológicos, a saber; arquitetura de conhecimentos, percepção com o uso de escalas diferentes, Modalidades cósmicas, irredutibilidade dos sistemas e outros, como vistos em cada Modalidade. As noções de representatividade de escalas, decisões deriváveis de escalas diversas de observações, irredutibilidade de conceitos, objetos, sistemas e operações minerárias devem ser articuladas no processo de gestão geo-ambiental compatível com noções de conservação sistêmica. Há que se considerar, portanto que existe sempre um custo ambiental, que deve, todavia estar restrito a uma visão e prática de sustentabilidade.

Referências

- Abel, M. 1988. *Um sistema especialista para identificação e classificação de turbiditos*. 1988. 202f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) - Curso de Pós-Graduação em Ciência da Computação – CPGCC, UFRGS, Porto Alegre.
- Abel, M., Silva, L.A.L., De Ros, L.F., Mastella, L.S., Campbell, J.A., Novello, T. 2004. PetroGrapher: managing petrographic data and knowledge using an intelligent database application. *Expert Systems with Applications*, 26:9-18.
- Ab´Saber, A., 2003. *Os Domínios de Natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas*. Ateliê ed., São Paulo.
- Ahern, F. 1995. *Conceitos fundamentais do radar imageador; nível básico: Curso ProRADAR*. São José dos Campos. 91p.
- Almeida, F.F.M. 1978. A evolução dos Crátons Amazônico e do São Francisco comparada com seus homólogos no hemisfério norte. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 30., Recife, 1978. *Anais...* Recife: Sociedade Brasileira de Geologia. 1:2393-2407.
- Amaral, G. 1974. *Geologia pré-cambriana da região Amazônica*. 1974. 212f. Tese (Livre Docência) - Instituto de Geociências, USP, São Paulo.
- Anjaneyulu, Y., Manickam, V. 2010. *Environmental impact assessment methodologies*. 2 ed. Hyderabad: BS Publications.
- Araújo, E.S. 1994. Geoquímica multielementar de crostas e solos lateríticos da Amazônia Oriental. Belém. Tese (Doutorado em Geociências) - Universidade Federal do Pará. 241p.
- Araújo, O.J.B., Maia, R.G. 1991. Programa levantamentos geológicos básicos do Brasil. Projeto especial mapa de recursos minerais, de solos e de vegetação para a área do Programa Grande Carajás. Subprojeto Recursos Minerais. *Serra dos Carajás*, Folha SB.22Z-A. Brasília: Departamento Nacional da Produção Mineral/DNPM – Companhia de Recursos Minerais/CPRM, 152 p.
- Araújo, O.J.B., Maia, R.G.N. 1991. *Serra dos Carajás: folha SB.22-Z-A*. Estado do Pará. Escala 1:250.000. Texto explicativo. Brasília: DNPM/CPRM. 164p. (Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil - PLGB).
- Araújo, O.J.B., Maia, R.G.N., João, X.S.J., Costa, J.B.S. 1988. A megaestruturação arqueana da folha Serra dos Carajás. In: Congresso Latino-Americano de Geologia, 7., Belém, *Anais...* Belém: Sociedade Brasileira de Geologia, 1: 324-328.
- Azzibrouck, G.A., Saint-Jean, R., Prevost, C. 1997. Analyse de la texture d’une image RADARSAT pour la cartographie géologique dans la Forêt Équatoriale de Ngoutou, est du Gabon. In: Proceedings of Geomatics in the era of RADARSAT (GER’97), 1997, Ottawa. *Proceedings...* CD-ROM.
- Baraldi, A., Parmiggiani, F. 1995. An investigation of the textural characteristics associated with Gray Level Cooccurrence Matrix statistical parameters. *IEEE Trans. Geosc. Remote Sens.*, 33:293-304.
- Barbosa, J.P.O. 2004. *Geologia estrutural, geoquímica, petrografia e geocronologia de granitóides da região do Igarapé Gelado, norte da Província Mineral de Carajás*. Dissertação (Mestrado Geoquímica e Petrologia) - Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 112p.
- Barreto, M.L. 2001. *Mineração e desenvolvimento sustentável: desafios para o Brasil*. Rio de Janeiro, CETEM/MCT. 215p.

- Barros, C.E.M., Macambira, M.J.B., Barbey, P. 2001. Idade de zircão do Complexo Granítico Estrela: relações entre magmatismo, deformação e metamorfismo na Província Metalogenética de Carajás. In: SBG, Simpósio Geologia Amazônia, 7, Belém, CD-ROM
- Beisiegel, V.R., Bernadelli, A.L., Drummond, N.F., Ruff, A. W., Tremaine, J.W. 1973. Geologia e recursos minerais da Serra dos Carajás. *Revista Brasileira de Geociências*, 3:215-242.
- Benson, A.S., Degloria, S.D. 1985. Interpretation of Landsat-4 Thematic Mapper and Multispectral Scanner data for forest surveys. *Photogr. Engineering Remote Sens.*, 51: 1281-1289.
- Boaventura, R. 1974. Geomorfologia da Folha SB.22 - Araguaia e parte da Folha SC.22 – Tocantins. In: BRASIL. Ministério da Minas e Energia. DNPM/CPRM. *Projeto RADAM Brasil*. Rio de Janeiro, II/5-II/30. (Levantamento de Recursos Naturais, 4).
- Boff, L.H. 2000. *O processo cognitivo de trabalho de conhecimento: um estudo exploratório sobre o uso da informação no ambiente de análise de investimentos*. 2000. 179f. Tese (Doutorado em Administração) - Programa de Pós-graduação em Administração da UFRGS, Porto Alegre.
- Bond, A.J., Viegas C.V., Coelho, C.C. de S.R., Selig P.M. 2010. Informal knowledge processes: the underpinning for sustainability outcomes in EIA? *Journal of Cleaner Production*. 18:6–13.
- Búfalo, A.C. Valeriano, D.M. 2005. Delineamento de queimada florestal em dados de banda L e polarização HH. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12. 2005. Goiânia. *Anais...* Goiânia: INPE, 4391-4393.
- Câmara, G., Davis, C., Monteiro, A.M., D'alge, J.C. 2001. Introdução à Ciência da Geoinformação. São José dos Campos: INPE (on-line, 2ª. edição, revista e ampliada)
- Calaes, G.D. 2006. *Planejamento estratégico, competitividade e sustentabilidade na indústria mineral: dois casos de não metálicos no Rio de Janeiro*. Rio de Janeiro: CETEM/ MCT/ CNPq/CYTED. 242p.
- Cavalcanti, R.N. 1996. *Mineração e o desenvolvimento sustentável: casos da companhia Vale do Rio Doce*. 1996. 432f. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas) - Escola Politécnica, USP, São Paulo.
- Chamundeeswari, V.V., Singh, D., Singh, Kuldeep. 2009. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 6(2), abril.
- Colwell, R.N. 1983. *Manual of remote sensing*. Falls Church. ASP, p. 138-336.
- Costa J.B.S., Araújo O.J.B., Santos A., Jorge João X.S., Macambira M.J.B., Lafon J.M. 1995. A Província Mineral de Carajás: aspectos tectono – estruturais, estratigráficos e geocronológicos. *Bol. do Museu Paraense Emílio Goeldi (Série Ciências da Terra)*, 7:199-235
- Costa, M.L.; Carmo, M.S.; Behling, H. 2005. Mineralogia e geoquímica de sedimentos lacustres com substrato laterítico na Amazônia Brasileira. *Revista Brasileira de Geociências*. 32(5):165-176.
- Curlander, J.C., McDonough, R.N. 1991 *Synthetic aperture radar: systems and signal processing*. New York: John Wiley. 647 p.
- Dallemand, J.F., Lichtenegger, J., Raney, R.K., Schumann, R. 1993. *Radar imagery: theory and interpretation: lecture notes*. Rome, FAO/ESA. (RSC Series 67). 103p.
- Dall'Agnol, R. et al. 2005. Petrogenesis of the Paleoproterozoic rapakivi A-type granites of the Archean Carajás metallogenic province, Brazil. *Lithos*, v. 80, p. 101-129.
- Dardenne, M.A., Schobbenhaus, C. 2001. *Metalogênese do Brasil*. Editora Universidade de Brasília, 392p.
- Dierking, W. 1999. Quantitative roughness characterization of geological surfaces and implications for radar signature analysis, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 37(5): 2397–2412. Sep.

Morais, M.C. 2012. Arquitetura de conhecimentos para a gestão ambiental da mineração de ferro em Carajás: estudo de caso depósito N1

- DNPM. 2010. Departamento Nacional de Produção Mineral. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br>>. Acesso em: 04 jul. 2010.
- DOCEGEO. 1988. Revisão litoestratigráfica da província mineral de Carajás. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 35., Belém. *Anais...* [Anexo], Sociedade Brasileira de Geologia, 11-54.
- Dooyeweerd, H. 1953 e 1958. *A New Critique of Philosophical Thought*. Amsterdam: H. J. Philadelphia: Presbyterian and Reformed Publishing Co. 4v.
- Erener, A. 2011. Remote sensing of vegetation health for reclaimed areas of Seytömer open cast coal mine. *International Journal of Coal Geology*, 86:20-26.
- Foody, G.M. 1992. On the compensation for change agreement in image classification accuracy assesment. *Photogr. Engineering Remote Sens.*, 6:1459-1460.
- Fornasari Filho, N, Braga, T.O, Galves, M.L.,Bitar, O.Y., Amarante, A.. 1992. Alterações no meio físico decorrentes de obras de engenharia. São Paulo: IPT. 165p. (IPT. Publicação, 1972; Boletim, 61).
- Frost, V.S.; Shanmugan, K.S., Holtzman, J.C. 1984. The influence of sensor and flight parameters on texture in radar images. *IEEE Transations Geoscience Remote Sensing*, 22: 440-448.
- Gama, F.F., Santos, J.R., Freitas, C.C., Mura, J.C. 2005. Aplicação de dados polarimétricos de radar aerotransportado (banda P) para estimativa de parâmetros estruturais de florestas tropicais. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12. Goiânia. *Anais...* Goiânia: INPE, 4413-4420.
- Gates, D.M., Keegan, H.J., Schleter, J.C., Weidner, V.R. 1965 .Spectral properties of plants. *Applied Optics*, 4(1): 11-20.
- Gibbs, A.K., Wirth, K.R., Hirata, W.K., Olszewski Jr., W.J. 1986. Age and composition of the Grão Pará Group volcanics, Serra dos Carajás. *Revista Brasileira de Geociências*, 16(2): 201-211.
- Guedes, S.C., Rosière C.A., Barley M., Lobato L.M. 2002. The importance of carbonate alteration associated with the Carajás high-grade hematite deposits, Brazil. Iron Ore 2002, *The Australasian Institute of Mining and Metallurgy*, Publication Series No. 7:63-66.
- Haack, B., Bechdol, M. 2000. Integrating multisensory dada and RADAR texture measures for land cover mapping. *Computers & Geoscience* 26:411-421.
- Haralick, R.M. 1979. Statistical and structural approaches to texture. *IEEE Trans. Geosc. Remote Sens.*, 67:786-804.
- Harmon, P., King, D. 1988. *Sistemas especialistas*. Rio de Janeiro: Campus. 304p.
- Hart, P.E., Duda R.O. 1977. *Prospector: A computer-based consultation system for mineral exploration*. Artificial Intelligence Center, Stanford Research Institute, California. Technical Note, 155, 35p.
- Hasui, Y., Haraly, N.L.E. 1985. Integração de informações geofísicas e geológicas na definição de estruturas crustais brasileiras. *Revista Brasileira de Geofísica*, 2(4):248-249.
- Hasui, Y., Haraly, N.L.E., Schobbenhaus, C. 1984. Elementos geofísicos e geológicos da região Amazônica: subsídios para o modelo geotectônico. In: Simpósio de Geologia da Amazônia, 2., Manaus, 1984. *Anais...* Brasília: DNPM/CNPq, 2:129-141.
- Hirata, W.K., Rigon, J.C., Kadkaru K., Cordeiro A.A.C., Meireles E.M. 1982. Geologia regional da província mineral de Carajás. In: Simpósio de Geologia da Amazônia, 1., 1982, Belém. *Anais...* Belém: Sociedade Brasileira de Geologia, 1:100-108.

- Hodge, A. 2004. Mining's seven questions to sustainability: from mitigation impacts to encouraging contribution. *Episodes*, 27:177-184.
- Huhn, S.R.B., Santos A.B.S., Amaral A.F., Ledshan E.J., Gouveia J.L., Martins L.P.B., Montalvão R.G.M., Costa V.G. 1988. O terreno "granito-greenstone" da região de Rio Maria - Sul do Pará. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 35, *Anais...*, 3:1438-1452.
- IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis). 2003. Plano de manejo para uso múltiplo da Floresta Nacional de Carajás. Brasília, DF, Brasil. 101p.
- IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). 1989. *Geografia do Brasil: Região Norte*. Rio de Janeiro: IBGE. 3.
- IBGE . 2011. *Geoestatísticas de Recursos Naturais da Amazônia Legal 2003*. ISBN 978-85-240-4189-1 (meio impresso). Rio de Janeiro. 247p.
- IBGE. 1992. Manual Técnico da Vegetação Brasileira. Série de Manuais Técnicos. N. 1, 91p. Rio de Janeiro.
- IBGE. 2006. Manual Técnico de Uso da Terra. Série de Manuais Técnicos. 2ª edição. Rio de Janeiro. 91p.
- IBRAM. 1992. *Mineração e Meio Ambiente*. Brasília. 111p.
- Jensen, J. R. 2009. *Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em Recursos Terrestres*. Tradução de J.C.N. Epiphânio. São José dos Campos, SP: Parênteses, 598 p. (Prentice Hall Series in Geographic Information Science) Tradução de: Remote Sensing of the environment: an earth resource perspective.
- JPL (Jet Propulsion Laboratory). 1986. *Shuttle imaging radar-C science plan*. Pasadena: JPL/NASA. 1v. (JPL Publication 86-29).
- Jordan, G. 2009. Sustainable mineral resources management: from regional mineral resources exploration to spatial contamination risk assessment of mining. *Environmental Geology*, 58:153-169.
- Khalifa I. H., Arnous, M.O. 2010. Assessment of hazardous mine waste transport in west central Sinai, using remote sensing and GIS approaches: a case study of Um Bogma area, Egypt. *Arabian Journal of Geosciences*, 23 set. DOI: 10.1007/S125-010-196-0.
- Klein, C., Ladeira, A.E. 2002. Petrography and Geochemistry of the least altered Banded Iron-Formation of the Archean Carajás Formation, northern Brazil. *Economic Geology*, 97:643-651.
- Li, J., Narayanan, R.M. 2004. Integrated spectral and spatial information mining in remote sensing imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 42: 673-685
- Lindenmayer Z.G., Fyfe, W.S. 1992. Comparação preliminar entre os metabasaltos dos grupos Parauapebas e Salobo da bacia Carajás, PA. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, Belém, Anais, 2: 33-34
- Lindenmayer, Z.G., Laux, J.H., Teixeira, J.B.G. 2001. Considerações sobre a origem das formações ferríferas da formação Carajás, Serra dos Carajás. *Revista Brasileira de Geociências*, 31: 21-28.
- Lillesand, T.M., Kiefer, R.W. 2000. *Remote Sensing and Image Interpretation*. 2ª Edition. New York. John Wiley & Sons. Forestry, Lake Buena Vista, Florida 721p.
- Liu, Y., Zhang J. 2008. The key roles of remote sensing techniques for evaluating environmental issues posed by mining: a case study. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVII. PartB8. Beijing, 1211-1215.
- Lobato, L.M., Rosière, C.A., Silva, R.C.F., Zucchetti, M., Baars, F.J., Seoane, J.C.S., Rios, F.X., Pimentel, M., Mendes, G.E., Monteiro, A.M. 2005. A mineralização hidrotermal de ferro da Província Mineral de Carajás – Controle estrutural e contexto na evolução metalogenética da província. In: *Caracterização de depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia*. Brasília: DNP-CT/MINERAL-ADIMB, 21-92.

- Lowman Jr, P.D., Harris, J., Masuok, P.M., Singhroy, V.H, Slaney, V.R. 1987. Shuttle Imaging Radar (SIR-B) investigations of the Canadian Shield: Initial Report. *IEEE Transactions Geoscience Remote Sensing*, v. GE25, 1: 55-66.
- Macambira, J.B., Schrank, A. 2002. Químio-estratigrafia e evolução dos jaspilitos da Formação Carajás (PA). *Revista Brasileira de Geociências*, 32: 567-578.
- Machado, N., Lindenmayer, Z., Krogh T.E., Lindenmayer, D. 1991. U-Pb geochronology of Archean magmatism and basement reactivation in the Carajás área, Amazon shield, Brazil. *Precambrian Research*, 49:329-354.
- Marengo, J.A., Nobre, C.A., Tomasella, J., Cardoso, M.F. 2007. Hydro-climatic and ecological behaviour of the drought of Amazonia in 2005. 2007. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, Published on line, 6p.
- Margulis, S.O. 1990. *Desempenho do governo brasileiro e do banco mundial com relação à questão ambiental do Projeto Ferro Carajás* (texto para discussão n. 193). Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada–IPEA, 97p.
- Martins Jr., P.P. 2000. Epistemologia Fundamental. Um Estudo Introdutório sobre a Estrutura do Conhecimento e a Aplicação Prática da Epistemologia na Pesquisa Científica. Belo Horizonte: Fundação CETEC. Memória Técnica. Apostila Pré-livro. CDU 001.891.2006. 169 p.
- Martins Jr., P.P. & Oliveira M.A.I. 2004. Rodas de Correlações e de Impactos em Planejamento Ecológico-Econômico de Bacia Hidrográfica - O Sistema sisORCI. Belo Horizonte: Projeto CRHA (2003-2006) Conservação de Recurso Hídrico no Âmbito da Gestão Ambiental e Agrícola de Bacia Hidrográfica. Nota Técnica NT-CRHA 19 / 2004. 42p. Portal www.cetec.br/crha
- Martins Jr., P.P., Marques, A.F.S.M., Vasconcelos, V.V., Endo, I., Novaes, L.A.A., Pereira, M.A.S. 2006. Modelo de integração de conhecimentos interdisciplinares para auxílio à decisão – os plantios ecológico-econômicos em zonas de recarga de aquíferos. Belo Horizonte: CETEC, p.24-48 (Nota Técnica-Tomo 3).
- Martins, JR. P.P., Endo, I., Vasconcelos, V.V., Novaes, L.A. d’A., Sequetto, M.A. 2006a. Modelo de integração de conhecimentos geológicos para auxílio à decisão sobre uso da terra em zonas de recarga de aquífero. *Revista Brasileira de Geociências*, 36:4. 12p.
- Martins Jr., P.P. 2006b. Conservação de Recurso Hídrico no Âmbito da Gestão Ambiental e Agrícola de Bacia Hidrográfica. Belo Horizonte e Ouro Preto: Projeto CRHA (2003-2006). Fundação CETEC, UFOP, IGA, UFMG-DCC. Financiamento MCT / FINEP Fundo Setorial-2002. Relatório Final 3 Tomos. Notas Técnicas 58. Portal na INTERNET. www.cetec.br/crha.
- Martins Jr., P.P., Paiva, D.A., Pereira, J.S., Abreu Jr., J.C., Diniz, C.P.L. 2008. Projeto ACEE. Arquitetura de Conhecimentos em Ecologia-economia para Gestão Ambiental de Bacia Hidrográfica. Belo Horizonte: CNPq Edital 14-2004 Inovação Tecnológica em Ciência da Computação/CETEC/UFOP. Projeto em desenvolvimento. CNPq (2008).
- Martins Jr., P.P. 2008a. Arquitetura de Conhecimentos em Ecologia-economia para Gestão Ambiental de Bacia Hidrográfica. Projeto ACEE. Belo Horizonte e Ouro Preto: CETEC e UFOP-EM-DEGEO. Financiamento CNPq. Edital 14 de Inovação Tecnológica CNPq Ciência da Computação. www.sisorci.cetec.br em desenvolvimento do Projeto para um Sistema de Arquitetura de Conhecimentos interdisciplinares para gestão de bacia hidrográfica e propriedades rurais SisORCI). 2005-2008.
- Martins Jr, P.P. 2008b. Zoneamentos Ecológicos de Bacia Hidrográfica – Importância Econômica. *Revista Economia & Energia ECEN*. No. 69. Ago-Set/2008. Ano XI. p.: 01-26. Meio digital e impresso. (Em Português e Inglês). ISSN 1518-2932.

- Martins Jr, P.P., Carneiro, J.A., Alvarenga, L.J., Pinheiro, Z.C., Matosinhos, C.C., Miranda, M.P.S. 2008c. *Guia Prático de Requisição de Perícias Ambientais*. 1ª Edição. Procuradoria-Geral de Justiça do Estado de Minas Gerais. Centro de Estudos e Aperfeiçoamento Funcional do Ministério Público. Belo Horizonte, MG, 116p.
- Mather, P.M. 1987. *Computer processing of remotely-sensed images: an introduction*. John Wiley, Chichester, U.K., 325p.
- Maurity, C., Kotschoubey, B. 1994a. Caracterização e gênese dos minerais de espeleotemas das cavernas do platô N-1 – Serra dos Carajás-PA. In: Simpósio de Geologia da Amazônia, 4., Workshop sobre a Província Mineral de Carajás, Belém, 1994. *Anais...* Belém: Sociedade Brasileira de Geologia, 356-357.
- Maurity, C., Kotschoubey, B. 1994b. Evolução das feições pseudocársticas na cobertura intempérica do platô N-1 – Serra dos Carajás – PA. In: Simpósio de Geologia da Amazônia, 4., Workshop sobre a Província Mineral de Carajás, Belém, 1994. *Anais...* Belém: Sociedade Brasileira de Geologia, 353-355.
- Meireles, E.M., Hirata, W.K., Amaral, A. F., Medeiros Filho, C.A., Gato, W.C. 1984. Geologia das folhas Carajás e Rio Verde, Província Mineral dos Carajás, Estado do Pará. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 33. Rio de Janeiro, 1984. *Anais...* Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geologia, 5:2164-2174.
- Meirelles, M.R.; Dardenne, M.A. 1991. Vulcanismo basáltico de afinidade shoshonítica e ambiente de arco arqueano, Grupo Grão-Pará, Serra dos Carajás, Pará. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 21, n. 1, p. 41-50.
- Metternicht, G.I., Zinck, J.A. 1998. Evaluating the information contents of JERS-1 SAR and LANDSAT TM data for discrimination of soil erosion features. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 53: 143-153.
- Millington, A.C., X. M., Velez-Liendo, A.V. Bradley. 2003. Scale dependence in multitemporal mapping of forest fragmentation in Bolivia: implications for explaining temporal trends in landscape ecology and applications to biodiversity conservation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 57:289–299.
- Monjezi, M., Shahriar, K., Dehghani, H., Namin, F. S. 2009. Environmental impact assessment of open pit mining in Iran. *Environmental Geology*, 58:205-216.
- Morais, M.C., Paradella, W.R., Freitas, C.C. 2002. An assessment of the discrimination of iron-mineralised laterites in the Amazon region (Carajás Province) based on textural attributes from C-band airborne SAR data. *Asian Journal of Geoinformatics*, 2(3): 11-20.
- Morais, M.C.; Martins Jr. P.P.; Paradella, W.R. 2011a. Mapping iron-mineralized laterite environments based on textural attributes from MAPSAR image simulation – SAR R99B (SIVAM/SIPAM) in the Amazon region. *Revista Brasileira de Geofísica*. 29(1): 99-111.
- Morais, M.C, Martins, Jr., P.P., Paradella, W.R., 2011b. Multi-scale approach using remote sensing images to characterize the iron deposit NI influence areas in Carajás Mineral Province (Brazilian Amazon). *Environmental Earth Science*. DOI 10.1007/s12665-011-1434-9.
- Mura, J.C., Paradella, W. R., Dutra, L.V., Santos, J. R. dos, Rudorff, B.F.T., Miranda, F. P. de Mario, Silva, M. Q., Silva, W. F. da. 2009. MAPSAR Image Simulation Based on L-band Polarimetric Data from the SAR-R99B Airborne Sensor (SIVAM System). *Sensors*, 9:102-117.
- NASA. 1988. *SAR Synthetic Aperture Radar: Instrument panel report*. Washington, DC. (Earth Observing System, v.2).
- Nogueira, A.F.C. 1995. *Análise faciológica e aspectos estruturais da Formação Águas Claras, região central da Serra dos Carajás-PA*. 167f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém.
- Nonaka, I., Takeuchi, H. 1997. *Criação de conhecimento na empresa: como as empresas japonesas geram a dinâmica da inovação*. Rio de Janeiro: Campos.

- Novo, E.M.L.M. 2008. *Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações*. São Paulo, Terceira Edição. Editora Edgard Blucher, 388 p
- Oliveira, I.S.D. 2004. A contribuição do zoneamento ecológico econômico na avaliação do impacto ambiental: bases e propostas metodológicas. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Universidade de São Paulo, São Carlos. 111p.
- Oliveira, C.G., Paradella, W.R. 2008. An Assessment of the Altimetric Information derived from Spaceborne SAR (RADARSAT-1, SRTM3) and Optical (ASTER) Data for Cartographic Application in the Amazon Region. *Sensors*, 8: 3819-3829.
- Pahl, M. 2003. *Architektur eines wissensbasierten Systems zur Interpretation multisensorieller Fernerkundungsdaten*. Thesis. Universität Hannover. 93p.
- PCI. 2011. Geomatica Software Solutions, reference manuals, version 10.1.3, *PCI Geomatics Inc.*, Canada.
- Paradella, W.R., Silva, M.F.F., Rosa, N.A., Kushigbor, C.A. 1994. A geobotanical approach to the tropical rain forest environment of the Carajás Mineral Province (Amazon Region, Brazil), based on digital TM-Landsat and DEM data. *International Journal of Remote Sensing*, 6:1633-1648.
- Paradella, W.R., Bignelli, P.A., Veneziani, P., Pietsch, R.W., Toutin, T. 1997. 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*, 18:1483-1501.
- Paradella, W.R., Santos, A.R., Veneziani, P., Sant'anna, M.V., Morais, M.C. 2000. Geological investigation using RADARSAT-1 images in the tropical rainforest environment of Brazil. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 26:1483-1501.
- Paradella, W. R., Santos, A R, Veneziani, P, Morais, M. C. de. 2001. O sinergismo de imagens Standard descendente do Radarsat-1 e Thematic Mapper do LANDSAT-5 em aplicação geológica na Amazônia. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 10, 2001. Fox do Iguaçú. *Anais...* Fox do Iguaçú: INPE/SELPER, 2001. CD ROM.
- Morais, M.C., Paradella, W.R., Freitas, C.C. 2002. An assessment of the discrimination of iron-mineralised laterites in the Amazon region (Carajás Province) based on textural attributes from C-band airborne SAR data. *Asian J. Geoinfo.*, 3: 11-20.
- Paradella, W. R., Santos, A. R.; Veneziani, P., Silva, M. M. Q., Mura, J. C., Rabelo, T. N.; Knust. S. S. A., Teruiya, R.K., Miranda, F. P., Souza Filho, C. R., Crósta, A. P. 2006. O satélite MAPSAR do Programa Espacial Brasileiro: concepção, estado atual e potencial para aplicações nas Geociências. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 43, 2006. Aracaju. *Anais...* Aracaju: SBG, 2006. v. 1, p. 152.
- Paradella, W.R., Silva A.Q., Knust S.S.A., Rabelo T.N. Santos A.R., Rennó C.D., Oliveira C.G., Rodrigues, T.G. 2009. Effect of microtopography on RADARSAT-1 and PALSAR backscattering from rock alteration products in the Curaçá Valley, Brazil. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 35(3):262–269.
- Peake, W.M., Oliver, T.L. 1971. *The response of terrestrial surfaces at microwave frequencies*. Technical Report. ed., Columbus. Ohio, 2440-2447.
- Pedroso, E.C. 1998. *A utilização de imagens JERS-1/SAR e LANDSAT na caracterização espacial das mineralizações do tipo "placer" da Província Mineral do Tapajós*. Universidade Estadual de Campinas. Dissertação (Mestrado em Geociências) 151p.
- Pidgeon, R.T., Macambira, M.J.B., Lafon, J.M. 2000. Th-U-Pb isotopic systems and internal structures of complex zircons from enderbite from the Pium Complex, Carajás Province, Brazil: evidence for ages of granulite facies metamorphism and protolith of the enderbite. *Chemical Geology*, 166: 157–171.

- Pinheiro, R.V.L. 1997. *Reactivation history of the Carajás and Cinzento strike-slip systems, Amazon, Brazil*. EUA. Phd Thesis – University of Durham, Durhan. 408 p.
- Pinheiro R.V.L., Holdsworth R.E. 2000. The Anatomy of shallow – crustal transpressional structures: insights from the Archaean Carajás fault zone, Amazon, Brazil. *Journal of Structural Geology*, 22: 1105-1123.
- Prado Filho, J.F. 2001. O Processo de avaliação de impacto ambiental (AIA) de projetos e empreendimentos minerais como um instrumento de gestão ambiental: estudo de casos no quadrilátero ferrífero (MG). 258p. Tese (Doutorado) – EESC -Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.
- Rennó, C.D., Freitas, C.C., Sant`anna, S.J.S. 1998. A system for region classification based on textural measures. In: Brazilian Remote Sensing Symposium, 9., 1998, Santos. *Annals...* Santos: INPE, on line.
- Resende, N.P., Barbosa, A.L. de M. 1972. *Relatório de pesquisa de minério de ferro, distrito ferrífero da Serra dos Carajás, Estado do Pará*. Belém, AMZA, 1. 248p.
- Ricci, P.S.F. 2006. Rocks of the Pium-Area, Carajás Block, Brazil – a deep-seated high-T gabbroic pluton (charnockitoidlike) with xenoliths of enderbitic gneisses dated at 3002 Ma – the basement problem revisited. In: Simpósio de Geologia da Amazônia, 9., Belém. *Resumos expandidos...* Belém: Sociedade Brasileira de Geologia. 1 CD-ROM.
- Rigina, O. 2002. Environmental impact assesment of the mining and concentration activities in the Kola Peninsula, Russia by multirate remote sensing. *Environmental Monitoring and Assessment*, 75:11-31.
- Rigol JP, Chica-Olmo M. 1998. Merging remote-sensing images for geological-environmental mapping: application to the Cabo de Gata-Níjar Natural Park, Spain. *Environmental Geology*. 34: 194-202
- Ripley, E.A., Redman R.E., Crowder, A. A. 1996. *Environmental Effects of Mining*. Delray Beach, Florida: St. Lucie Press. 356p.
- Rosatelli, J.S.,Vieira, L.S., Araujo, J.V., Araujo, M.P.de, Sommer, S. 1974. Levantamento Exploratório de Solos da Folha SB.22 Araguaia e parte da Folha SC.22 Tocantins. In: BRASIL. Ministério da Minas e Energia. DNPM/CPRM. *Projeto RADAM Brasil*. Rio de Janeiro. III/7-III/118. (Levantamento de Recursos Naturais, 4).
- Rosière C.A., Baars F.J., Seoane J.C.S., Lobato L.M., da Silva L.L., de Souza S.R.C., Mendes G.E. 2006. Structure and iron mineralisation of the Carajás Province. *Applied Earth Science* (Trans. Inst. Min. Metall. B) 115(4):126-136.
- Rubin, T. 1989. Analysis of radar image with variograms and other simplified descriptors. In: Image Processing'89. Reno, *Proceedings*. (Bethesda:American Society of Photogrammetry and Remote Sensing) p.185-195.
- Salomão, R.P., Silva, M.F.F. da, Rosa, N.A. 1988. Inventário ecológico em floresta pluvial tropical de terra firme, Serra Norte, Carajás, PA. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi*. 4(1): 1-46. (Série Botânica).
- Sánchez, L.E., Morrison-Saunders, A. 2011. Learning about knowledge management for improving environmental impact assessment in a government agency: The western australian experience. *Journal of Environmental Management*, 92:2260-2271.
- Sánchez, L.E. 2007. Mineração e meio ambiente. In: Fernandes, Francisco R. C.; Matos, Gerson M. M.; Castilhos, Zuleica C.; Luz, Adão Benvindo (Ed.). *Tendências tecnológicas Brasil 2015: geociências e tecnologia mineral*. Rio de Janeiro: CETEM/MCT.
- Sánchez, L.E. 2008. Avaliação de Impacto Ambiental: conceitos e métodos. São Paulo: Oficina de Textos, 495 p
- Santos, B.A. dos. 1986. *Recursos Minerais*. In: Carajás: desafio político, ecologia e desenvolvimento. São Paulo: Brasiliense, Brasília: CNPQ, 294-361.

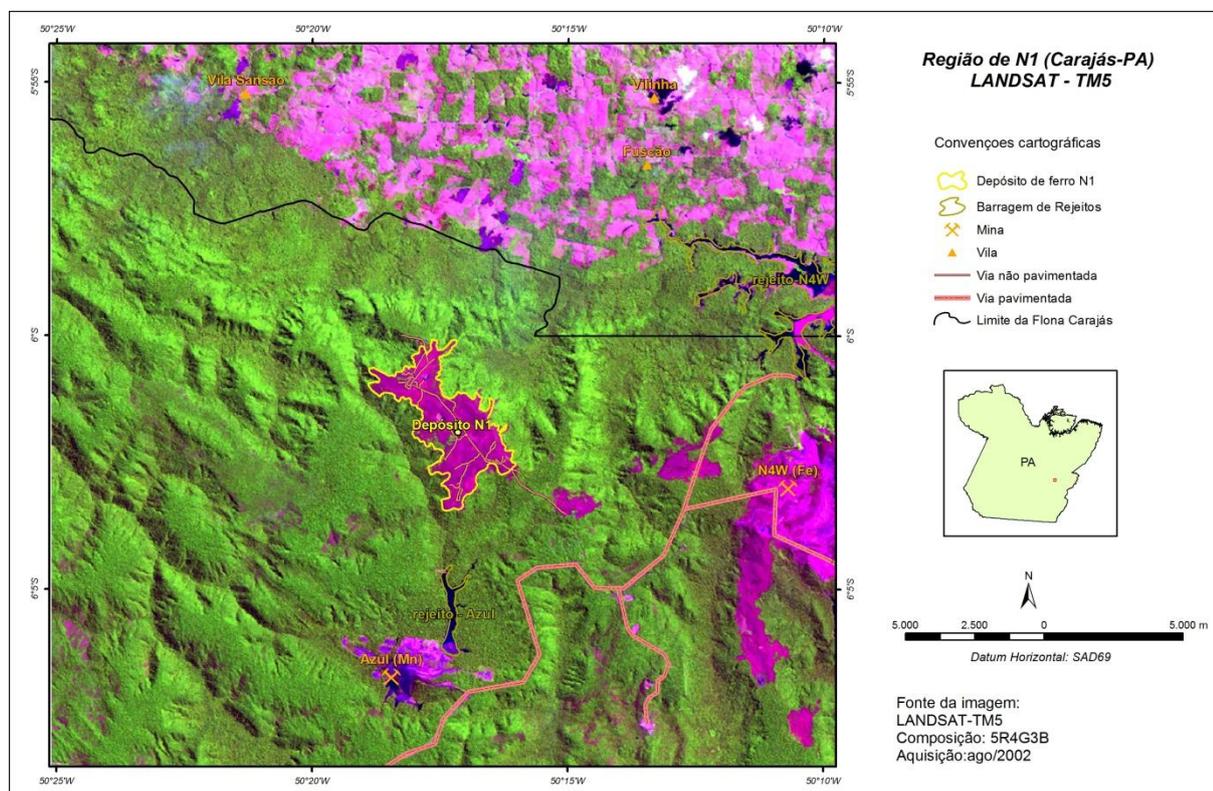
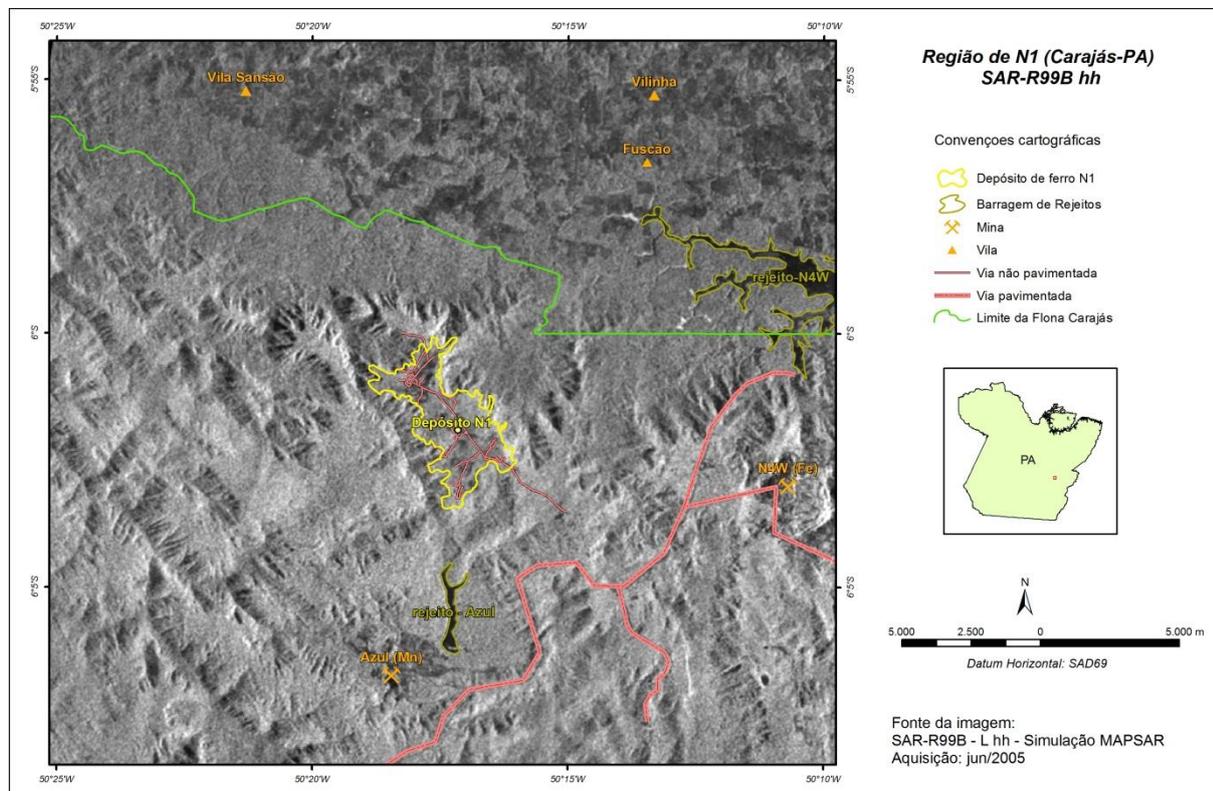
- Santos, F.M.C. 1984. *Projeto Ferro Carajás – Relatório de impactos ambientais*, vol.1. Rio de Janeiro, Companhia Vale do Rio Doce. 185p.
- Santos, J.O.S. 2003. Geotectônica dos escudos das Guianas e Brasil-Central. In: Bizzi, L.A., Schobbenhaus, C., Vidotti, R.M., Gonçalves, J.H. (Ed.), *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil*, Companhia de Recursos Minerais/CPRM. 169-226.
- Santos, J.O.S. et al. 2000. New understanding of the Amazon Craton provinces, based on field work and radiogenic isotope data. *Gondwana Research*, 3(4): 453-488.
- Santos, P.R.A., Gaboardi, C., Oliveira, L.C. 2005. Avaliação da precisão vertical dos modelos SRTM para a Amazônia. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12, 2005. Goiânia. *Anais...* Goiânia: INPE/SELPER, 1:4473-4480.
- Sardinha, A.S. 2002. *Petrologia, geoquímica e geocronologia do granito Serra do Rabo, Província Mineral de Carajás*. Dissertação (Mestrado) – Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará. 108 p.
- Schreiber, G., Akkermans, H., Anjewierden, A., de Hoog, R., Shadbolt, N., Van de Velde, W., Wielinga, B. 2000. *Knowledge engineering and management: the CommonKADS methodology*. Cambridge, MIT Press. 455p.
- Schröder, R., Puls, J., Hajnsek, I., Jochim, F., Neff, T., Kono, J., Paradella, W.R., Silva, M.M., Valeriano, D.M., Costa, M.P.F. 2005. MAPSAR: a small L-band SAR mission for land observation. *Acta Astronautica*, 56:35-45.
- Shanmugan, K.S., Narayanan, V., Frost, V.S., Stiles, J.A, Holtzman, J.C. 1981. Textural features for radar images. *IEEE Transactions Geoscience Remote Sensing*, 19:153-156.
- Sheate, W.R., Partidário, M.R. 2010. Strategic approaches and assessment techniques – Potential for knowledge brokerage towards sustainability. *Environmental Impact Assessment Review*, 30:278–288.
- Sieddine, A., Martin, L., Turcq, B., Volkmer-Ribeiro, C., Soubiès, F., Cordeiro, R.C., Suguio, K. 2001. Variations of the Amazonian rainforest environment: a sedimentological record covering 30.000 years. *Paeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 168:221-235.
- Silva A.Q., Paradella W.R., Freitas C.C., Oliveira C.G. 2009. Relationship between PALSAR backscatter and surface-roughness parameters from iron laterites in Carajás, Amazon Region. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 47: 4027–4031
- Silva, G.G., Lima, M.I.C., Andrade, A.R.F., Issler, R.S., Guimarães, G. 1974. Geologia das folhas SB-22 Araguaia e parte da SC-22 Tocantins. In: BRASIL. Ministério da Minas e Energia. DNP/CPRM. *Projeto RADAM Brasil*. Rio de Janeiro. (Levantamento de Recursos Naturais, 4).
- Silva, M.F.F. da, Menezes, N.L. de, Cavalcante, P.B. & Joly, C.A. 1986. Estudos botânicos: histórico, atualidade e perspectivas. In: *Carajás: desafio político, ecologia e desenvolvimento*. São Paulo: Brasiliense; Brasília: CNPq, 184-207.
- Silva, M.F.F. da, Rosa, N.A. 1990. Estudos botânicos na área do Projeto Ferro Carajás, Serra Norte. I - Aspectos fito-ecológicos dos Campos Rupestres. In: Congresso Nacional de Botânica, 35., Manaus, 1984. *Anais...* Brasília, IBAMA: 367-379.
- Silva, M.F.F. da. 1992. Distribuição de metais pesados na vegetação metalófila de Carajás. *Acta Botânica Brasílica*, 6(1):107-122.
- Silva, M.F.F. da; Secco, R.S. ; Lobo, M.G.A. 1996. Aspectos ecológicos da vegetação rupestre da Serra dos Carajás (PA). *Acta Amazônica*, 26(1/2):17-44.

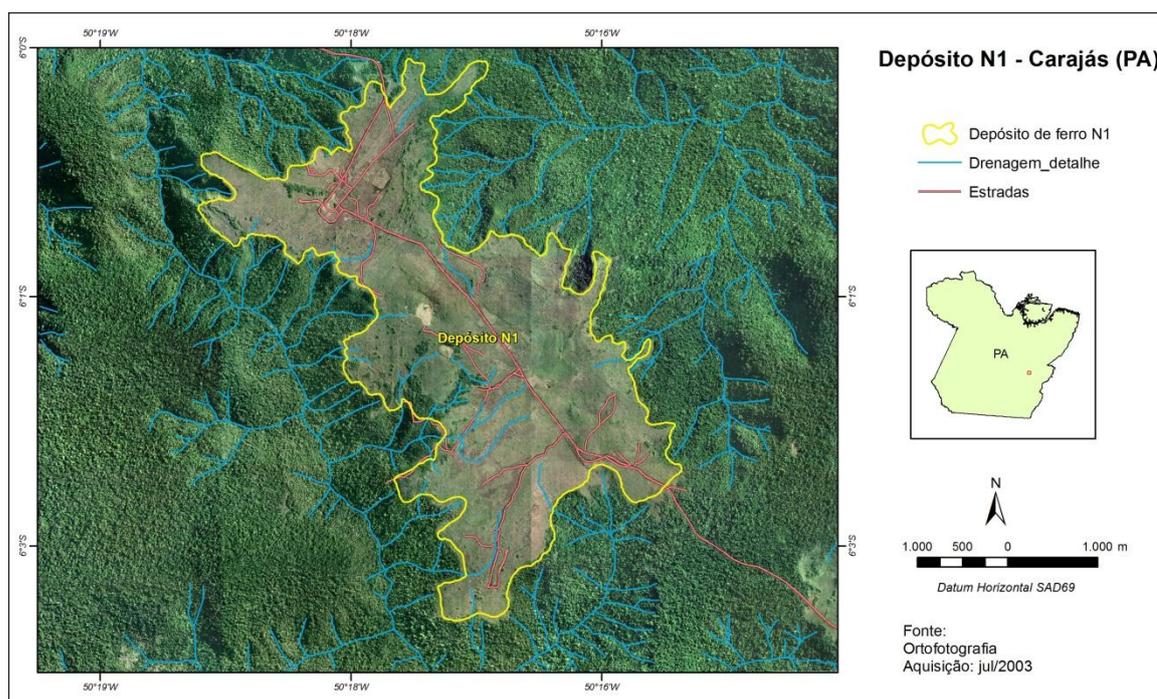
- Silva, M.F.F., Menezes, N.L., Cavalcante, P.B., Joly, C.A. 1986. Estudos Botânicos: histórico, atualidade e perspectivas. In: Almeida, J.M.G. (Org.). CARAJÁS: desafio político, ecologia e desenvolvimento. São Paulo, Brasiliense/CNPq. 184-207.
- Silva, M.F.F.; Menezes, N.L.; Cavalcante, P.B.; JOLY, C.A. 1986. Estudos Botânicos: histórico, atualidade e perspectivas. In: *Carajás: desafio político, ecologia e desenvolvimento*. CNPq/Brasiliense, 8:185-206.
- Silva, M.G. et al. 2005. Geologia e mineralizações de Fe-Cu-Au do alvo GT-46 (Igarapé Cinzento), Carajás. In: Marini, O.J.; Queiroz, E.T.; Ramos, B.W. (Ed.). *Caracterização de depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia*. Brasília: DNPM/CT-Mineral/ ADIMB, p. 97-151.
- Simonett, P.S., Davis, R.E. 1983. Image analysis - active microwave. In: American Society of Photogrammetry (ASP). *Manual of Remote Sensing: theory, instruments and techniques*. Falls Church. 2:1125-1179.
- Sinha, R.K., Pandey, D.K., Sinha, A.K. 2000 Mining and the environment: a case study from Bijolia quarrying site in Rajasthan, India. *The Environmentalist*, 20:195-203.
- Sommerville, I. 2004. Engenharia de Software. São Paulo: Addison Wesley.
- Steffen, C. A. 1995. *Reflectância*. São José dos Campos, INPE (INPE-5638-PUD/070). 40p.
- Shupe, S.M., Marsh, S.E. 2004. Cover- and density-based vegetation classifications of the Sonoran desert using Landsat TM and ERS-1 SAR imagery. *Remote Sensing of Environment*, 93: 131-149.
- Tallarico, F.H.B. et al. 2005. Geology and SHRIMP U-Pb geochronology of the Igarapé Bahia Deposit, Carajás Copper-Gold Belt, Brazil: an Archean (2.57 Ga) example of Iron-Oxide Cu-Au-(U-REE) Mineralization. *Economic Geology*, 100(1):7-28.
- Tallarico, F.H.B., McNaughton, N.J., Groves, D.I., Fletcher, I.R., Figueiredo, B.R., Carvalho, J.B., Rego, J.L., Nunes, A.R. 2004. Geological and SHRIMP II U-Pb constraints on the age and origin of the Breves Cu-Au-(W-Bi-Sn) deposit, Carajás, Brazil. *Mineralium Deposita*, 39:68-86.
- Tapley, I.J. 2002. Radar Imaging. In: Papp, É. (Ed.). Geophysical and remote sensing methods for regolith exploration. CRC LEME Open file report. 144:22-32.
- Teixeira, J.B.G., Ohmoto, H., Eggler, D.H. 1997. Elemental and oxygen isotope variations in Archean mafic rocks associated with the banded iron-formation at the N4 iron deposit, Carajás, Brazil. In: Costa, M.L., Angélica, R.S. (coords.), Contribuições à Geologia da Amazônia, FINEP/SBG, p. 161-203
- Tolbert, G.E., Treimane, J.W., Melcher, G.C., Gomes, C.B. 1971. The recently discovered Serra dos Carajás iron deposits, Northern Brazil. *Economic Geology*, 66:985-994.
- Trendall, A.F., Basei, M.A.S., Laeter, J.R., Nelson, D.R. 1998. Ion microprobe zircon U-Pb results from the Carajás área of the Amazon Craton. *Journal of South American Earth Sciences*, 11:265-277.
- Trinder, J.C. 2008. Remote Sensing for assessing environmental impacts based on sustainability indicators. In: *The International Archives of the Photogrammetry. Sens and SIS Vol. XXXVII. Part B8*, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Beijing, China, presented at ISPRS Congress, Beijing, China, Jul. 2008.
- Trevett, J.W. 1986. *Imaging radar for resource surveys: remote sensing applications*. New York: Chapman and Hall, 313 p.
- Turban, E. 1992. *Expert systems and applied artificial intelligence*. New York: Macmillan Pub. Co.; Toronto: Maxwell Macmillan Canada; New York: Maxwell Macmillan International.
- Ulaby, F. T., Kouyate, F., Brisco, B, Lee Willians, T. H. 1986. Textural information in SAR images. *IEEE Transactions Geoscience Remote Sensing*, 24:235-245.

- UNEP. 2001. Cleaner Production: sixth international high-level seminar Montereal. *Industry and Environment*, 24:1-2, jan.-jun.
- Van der Sanden, J.J., Hoekman, D.H. 1999. Potential of airborne radar to support the assessment of land cover in a tropical rain forest environment. *Remote Sensing of Environment*, 68:26-40.
- Vasconcelos, V.V., Martins Jr, P.P., Jano, D.R., 2011. Arquitetura de conhecimentos sobre sistemas aquíferos. *Revista Digital de Biblioteconomia e Ciência da Informação*. 9: 184-211.
- Vasquez, M.L., Rosa-Costa, L.T. da. 2008. *Geologia e recursos minerais do Estado do Pará: Sistema de Informações Geográficas – SIG : texto explicativo dos mapas geológico e tectônico e de recursos minerais do Estado do Pará. Escala 1:1.000.000. Belém: CPRM, 328. CD-ROM*
- Veloso, H.P., Japisdu, A.M.S., Goes Filho, L., Leite, P.F. 1974. As regiões fitoecológicas, sua natureza e seus recursos econômicos: estudo fitogeográfico da área abrangida pelas folhas SB. 22 Araguaia e SC. 22 Tocantins. In: BRASIL. Ministério da Minas e Energia. DNPM/CPRM. *Projeto RADAM Brasil*. Rio de Janeiro, 1-119. (Levantamento de Recursos Naturais, 4).
- Veneziani, P. Santos, A.R. dos, Paradella, W.R. 2004. A evolução tectono-estratigráfica da Província Mineral de Carajás: um modelo com base em dados de sensores remotos orbitais (SAR-C RADARSAT-1, TM LANDSAT-5), aerogeofísica e dados de campo. *Revista Brasileira de Geociências*. 34:67-78.
- Villas Bôas, R.C. 1995. *Sustainable development: material technology and industrial development in Brazil*. Rio Janeiro: CETEM/MCT. 21p.
- Villas Bôas, R.C. 2009. *Indicadores de desenvolvimento sustentável para a indústria extrativa mineral: Guia Prático / Rio de Janeiro: CETEM/MCT/CNPq/CYTED*. 28p.
- Villas Boas, R.C., Beinhoff, C. 2002. *Indicators of sustainability for the mineral extraction industry*. Rio de Janeiro: CNPq/CYTED. 524p.
- Villas Bôas, R.C., Shields D., Solar, Š., Anciaux P., Önal, G. (Ed.). 2005. *A review on indicators of sustainability: for the mineral extraction industries*. Rio de Janeiro: CETEM/MCT/ CNPq/CYTED/IMPC. 230p.
- Welch, R.M., Kuo, S.S., Sengupta, S.K. 1990. Cloud and surface textural features in polar region. *IEEE Transactions Geoscience Remote Sensing*, 28:520-528.
- Wenruo, Z., Gaofeng, K., Xiaopeng, W. 2008. Multi-source remote sensing technology using in the service of coal resources exploration and coal industry informatization construction. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing an Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVII. PartB7. Beijing, 1325-1329.
- Werle, D. 1988. *Radar remote sensing: a training manual*. Ottawa: Dendron Resource Survey. 300p.
- Woodcock, C.E., Strahler, A.H., Jupp, D.L.B. 1987. The factor of scale in remote sensing. *Remote Sensing of Environment*. 21: 311-332.
- Zribi, M., Dechambre, M. 2002. A new empirical model to retrievesoil moisture and roughness from Radar Data, *Remote Sensing of Environment*. 84: 42-52.
- Zucchetti, M. 2007. *Rochas máficas do Grupo Grão-Pará e sua relação com a mineralização de ferro dos depósitos N4 e N5, Carajás, PA*. 2007. 125f. Tese (Doutorado em Geologia) - Instituto de Geociências, UFMG.

Anexos

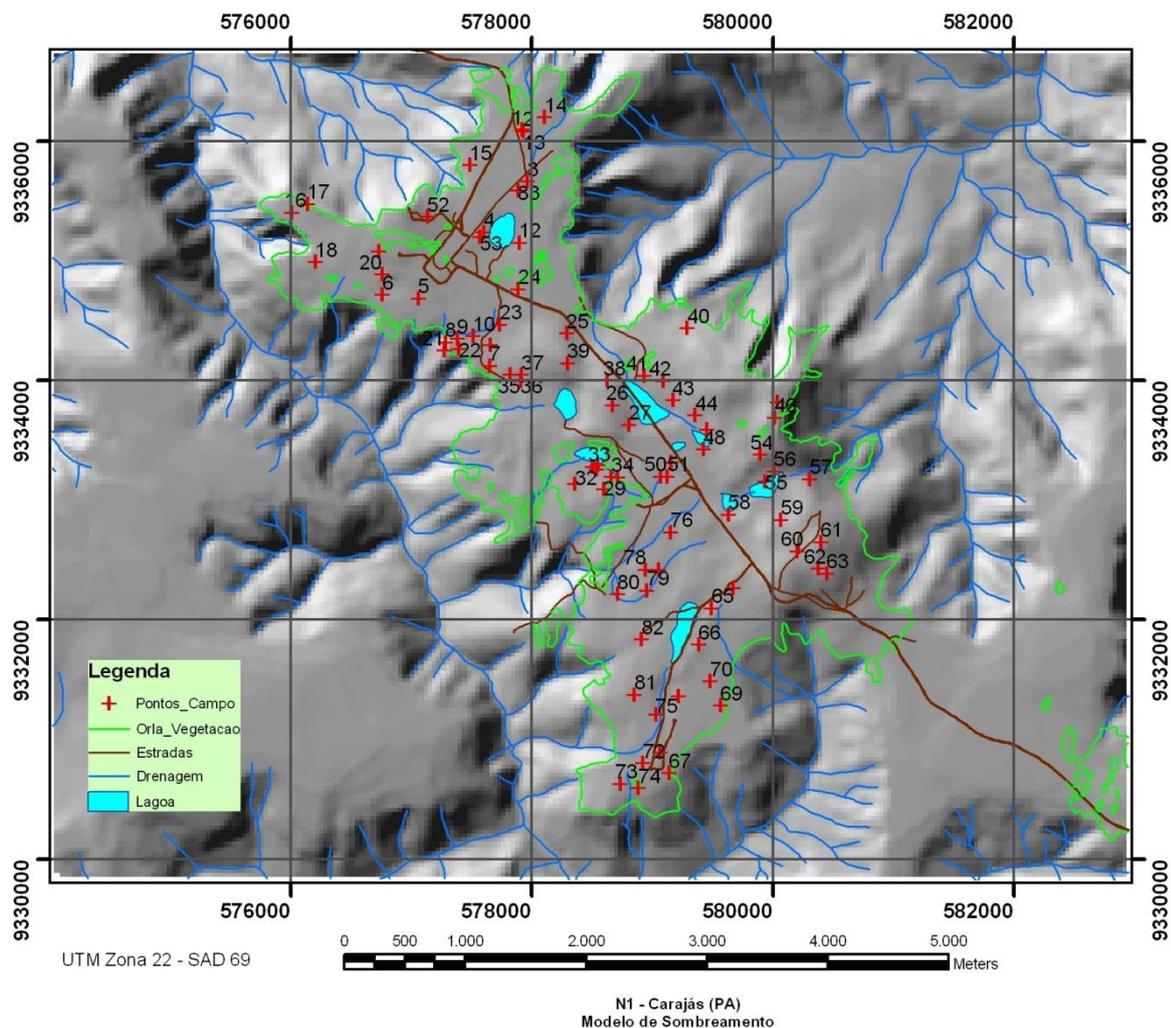
Anexo 1 – Imagens utilizadas na pesquisa





Anexo 2 – Mapa de pontos

MAPA DE PONTOS



Ficha de Aprovação

TESE DE DOUTORAMENTO

TÍTULO: Arquitetura de Conhecimentos para a Gestão Ambiental da Mineração de Ferro em Carajás: Estudo de Caso Depósito N1

AUTOR(A): MARIA CAROLINA DE MORAIS

ORIENTADOR: Luís de Almeida Prado Bacellar

CO-ORIENTADOR: Paulo Pereira Martins Junior

CO-ORIENTADOR: Waldir Renato Paradella

Aprovada em: 24/04/2012

PRESIDENTE:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Luís de Almeida Prado Bacellar _____ DEGEO/UFOP

Prof. Dr. Paulo Pereira Martins Junior _____ DEGEO/UFOP

Profa. Dra. Auxiliadora Maria Moura Santi _____ DEPRO/UFOP

Profa. Dra. Cláudia Constantina Saltarelli Saraiva _____ IGA/MG

Prof. Dr. Renato Moreira Hadad _____ PUC/MG

Ouro Preto, 20/05/2012
