



Número: 386
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS
ÁREA DE METALOGÊNESE

– LUCAS BARROS DE ANDRADE

Mapeamento do potencial mineral para níquel e ouro no Cinturão Metassedimentar Nova Brasilândia - Rondônia por meio de lógica nebulosa (*fuzzy*) e redes neurais artificiais

Dissertação apresentada ao Instituto de Geociências como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geociências.

Orientador: Prof^a. Dr^a Adalene Moreira Silva

Co-orientador: Prof Dr Carlos Roberto Souza Filho

CAMPINAS - SÃO PAULO

Fevereiro – 2008

Catálogo na Publicação elaborada pela Biblioteca do Instituto de Geociências/UNICAMP

An24c	<p>Andrade, Lucas de Barros.</p> <p>Mapeamento do potencial mineral para Níquel e ouro no cinturão Metassedimentar Nova Brasilândia – Rondônia por meio de lógica nebulosa (fuzzy) e redes neurais artificiais / Lucas de Barros Andrade--Campinas,SP.: [s.n.], 2008.</p> <p>Orientador: Adalene Moreira Silva.</p> <p>Dissertação (mestrado) Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências.</p> <p>1. Modelagem de dados. 2. Sistemas de informação geográfica. 3. Prospecção mineral. 4. Lógica fuzzy. 5. Redes neurais artificiais. I. Silva, Adalene Moreira. II. Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências. III. Título.</p>
-------	---

Título em inglês: Mineral potential mapping for nickel and gold in Nova Brasilândia Metassedimentar Belt - Rondônia through fuzzy logic and artificial neural networks..

Keywords: - Data modelling;

- Geographical information systems;

- Mineral prospecting;

- Fuzzy logic;

- Artificial neural network.

Área de concentração: Geologia e Recursos Naturais

Titulação: Mestre em Geociências.

Banca examinadora: - Adalene Moreira Silva;

- Marcos César Ferreira;

- Paulo de Tarso Ferro de Oliveira Fortes.

Data da defesa: 13/02/2008

Programa de Pós-graduação em Geociências.



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS
ÁREA DE GEOLOGIA E RECURSOS NATURAIS

AUTOR: LUCAS BARROS DE ANDRADE

Mapeamento do potencial mineral para níquel e ouro no Cinturão Metassedimentar
Nova Brasilândia - Rondônia por meio de lógica nebulosa (*fuzzy*) e redes neurais
artificiais

ORIENTADORA: Profa. Dra. Adalene Moreira Silva

Aprovada em 13/02/2008

EXAMINADORES:

Profa., Dra. Adalene Moreira Silva Adalene Moreira Silva - Presidente

Prof. Dr. Marcos César Ferreira

Prof. Dr. Paulo de Tarso Ferro de Oliveira Fortes

[Signature]
Paulo Tarso Ferro

Campinas, 13 de fevereiro de 2008

20080213

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto de Geociências da Unicamp, centro de excelência em pesquisa e ensino de ciências da terra, ao qual muito me orgulha ter sido aluno;

À minha Orientadora, Prof^a. Dr^a Adalene Moreira Silva, e a meu Co-orientador, Prof. Dr Carlos Roberto Souza Filho, pelos conhecimentos transmitidos fundamentais a execução deste trabalho;

Ao Prof. Dr. Paulo de Tarso Ferro de Oliveira Fortes, por sua participação na Banca Examinadora e colaborações que enriquecem esta dissertação;

À Secretaria de Pós-Graduação do Instituto de Geociências, nas pessoas de Valdirene e Edinalva;

Aos colegas alunos do Instituto de Geociências da Unicamp, pelas discussões científicas e pelos bons momentos de camaradagem;

Em especial aos meus familiares, pelo apoio ao longo desta jornada.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos Específicos	1
1.2. Fisiografia da Área de Estudo	2
1.3. Justificativas	3
2. CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL	4
2.1. Geologia da Área de Estudo	7
2.2. O Cinturão Metassedimentar Nova Brasilândia (CMNB)	12
3. BASE DE DADOS E PRÉ-PROCESSAMENTO	16
3.1. Aerogeofísica	16
3.2. Geoquímica	20
3.3. Mapa Litológico	22
3.4. Mapa Estrutural	23
3.5. Ocorrências e Recursos Minerais	26
4. INTERPOLAÇÃO DE DADOS GEOQUÍMICOS POR MEIO DE KRIGAGEM E IDW-MULTI-FRACTAL	26
4.1. Interpolação por Krigagem	27
4.2. Interpolação Multi-fractal	36
4.3. Comparação entre os resultados da krigagem e da interpolação multi-fractal	40
4.4. Identificação de anomalias pelo método C-A	41
5. MAPEAMENTO DO POTENCIAL MINERAL PARA NI E AU NO CINTURÃO METASSEDIMENTAR NOVA	47
5.1. Modelagem por Lógica <i>Fuzzy</i>	47
5.2. Modelagem por Redes Neurais	57
6. CONCLUSÕES	62
7. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Localização da área de estudo.	3
Figura 2.1: Províncias geocronológicas do Cráton Amazônico (adaptado de Tassinari e Macambira, 1999).	5
Figura 2.2: Compartimentação tectônica do Cráton Amazônico em território brasileiro (segundo Santos, 2003).	6
Figura 2.3: Mapa geológico da área de estudo (adaptado de Schobbenhaus <i>et al.</i> , 2004).	8
Figura 2.4: Reconstrução esquemática do supercontinente de Rodínia no final do Mesoproterozóico (modificado de Karlstrom, 1999).	12
Figura 2.5: Evolução tectônica do sudoeste do Cráton Amazônico entre 1,2 e 1,0 G.a. (modificado de Tohver <i>et al.</i> , 2004).	15
Figura 3.1: Lineamentos interpretados a partir dos dados magnetométricos sobrepostos ao mapa da amplitude do sinal analítico.	19
Figura 3.2: Distribuição espacial das amostras de sedimento de corrente do Projeto Sudeste de Rondônia (Pinto Filho, 1977).	21
Figura 3.3: Lineamentos interpretados a partir da imagem ETM+/Landsat 7 integrada ao modelo digital de terreno da SRTM.	24
Figura 4.1: Parâmetros fundamentais do semi-variograma necessários ao cálculo da krigagem (adaptado de Journel, 1978).	28
Figura 4.2: Semi-variograma do Co (passo de 2500 m, pepita de 160 unidades de variância, patamar absoluto de 360 unidades de variância e alcance de 9.000 m).	29
Figura 4.3: Semi-variograma do Cu (passo de 2500 m, pepita de 0 unidades de variância, patamar absoluto de 12.000 unidades de variância e alcance de 25.000 m).	30
Figura 4.4: Semi-variograma do Ni (passo de 2500 m, pepita de 100 unidades de variância, patamar absoluto de 325 unidades de variância e alcance de 9.000 m).	30
Figura 4.5: Mapa geoquímico de teores de Co gerado por krigagem.	32
Figura 4.6: Mapa geoquímico de teores de Cu gerado por krigagem.	33
Figura 4.7: Mapa geoquímico de teores de Cu gerado por krigagem.	34
Figura 4.8: Histogramas mostrando a distribuição das populações dos resultados analíticos originais pra A) Co, B) Cu e C) Ni; dos valores interpolados por krigagem de D) Co, E) Cu e F) Ni; e dos valores interpolados por IDW-Multifractal de G) Co, H) Cu e I) Ni. Limite superior de cada classe incluso na respectiva classe.	35
Figura 4.9: Mapa geoquímico de teores de Co gerado por IDW-Multifractal.	37
Figura 4.10: Mapa geoquímico de teores de Cu gerado por IDW-Multifractal.	38

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.11: Mapa geoquímico de teores de Ni gerado por IDW-Multifractal.	39
Figura 4.12: Gráficos C-A das superfícies krigadas para Co, Cu e Ni. Os alinhamentos segundo diferentes linhas de tendência separam populações de base, anomalia de 1ª ordem e anomalia de 2ª ordem.	43
Figura 4.13: Gráficos C-A das superfícies interpoladas com o IDW Multi-fractal para Co, Cu e Ni. Os alinhamentos segundo diferentes linhas de tendência separam populações de base, anomalia de 1ª ordem e anomalia de 2ª ordem.	44
Figura 4.14: Mapas de anomalias geoquímicas gerados pela aplicação do Modelo C-A em superfícies interpoladas por krigagem (A: Co; B: Cu e C: Ni)	45
Figura 4.15: Mapas de anomalias geoquímicas gerados pela aplicação do Modelo C-A em superfícies interpoladas por IDW Multi-fractal (A: Co; B: Cu e C: Ni)	46
Figura 5.1: Gráfico da função <i>Large</i> utilizada para atribuir valores de possibilidade <i>fuzzy</i> à imagem da amplitude do sinal analítico.	52
Figura 5.2: Gráfico da função <i>Small</i> utilizada para atribuir valores de possibilidade <i>fuzzy</i> à imagem gamaespectrométrica do canal do K.	52
Figura 5.3: Gráfico da função <i>Small</i> utilizada para atribuir valores de possibilidade <i>fuzzy</i> à imagem gamaespectrométrica do canal do Th.	52
Figura 5.4: Gráfico da função <i>Small</i> utilizada para atribuir valores de possibilidade <i>fuzzy</i> à imagem gamaespectrométrica do canal do U.	52
Figura 5.5: Gráfico da função Linear utilizada para atribuir valores de possibilidade <i>fuzzy</i> à malha regular de teores de Co em sedimentos de corrente interpolados por IDW-Multifractal.	53
Figura 5.6: Gráfico da função Linear utilizada para atribuir valores de possibilidade <i>fuzzy</i> à malha regular de teores de Ni em sedimentos de corrente interpolados por IDW-Multifractal.	53
Figura 5.7: Fluxograma da modelagem <i>fuzzy</i> descrita visando o mapeamento do potencial mineral para Ni..	55
Figura 5.8: Mapa do Potencial Mineral para Ni no CMNB.	56
Figura 5.9: Gráfico esquemático de uma função de base radial centrada no vetor v em um espaço bidimensional (Porwal <i>et al</i> , 2003).	58
Figura 5.10: Arquitetura esquemática de uma RNFBR (modificado de Porwal <i>et al</i> , 2003).	59
Figura 5.11: Mapa do Potencial Mineral para Au no CMNB gerado por modelagem em RNFBR utilizando dezenove vetores de entrada de natureza estrutural e um vetor de natureza litológica.	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 5.12: Mapa do Potencial Mineral para Au no CMNB gerado por modelagem em RNFBR utilizando dois vetores de entrada de natureza estrutural e um vetor de natureza litológica. 63

INDICE DE TABELAS

Tabela 2.1: Tabela comparativa entre a compartimentação tectônica de Tassinari e Macambira (1999) e de Santos (2003). 7

Tabela 3.1: Características dos projetos aerogeofísicos Pacaás Novos e Serra dos Parecis, conduzidos pelo Serviço Geológico do Brasil – CPRM. 17

Tabela 3.2: Características do conjunto de resultados de análises geoquímicas de sedimentos de corrente do Projeto Sudeste de Rondônia. 22

Tabela 3.3: Sistema de classificação adotado para os diferentes tipos de lineamentos. 25

Tabela 4.1: Tabela comparativa entre estatísticas básicas dos dados originais e das superfícies krigadas para Co, Cu e Ni. 31

Tabela 4.2: Tabela comparativa entre estatísticas básicas dos dados originais e das superfícies geradas por interpolação multifractal para Co, Cu e Ni. 40

Tabela 4.3: Valores do INR para a krigagem e para a interpolação multifractal dos teores de Co, Cu e Ni em sedimentos de corrente. 41

Tabela 4.4: Limites entre as populações de valores de base, anomalias de 1ª ordem e anomalias de 2ª ordem individualizadas pelo método CA em superfícies interpoladas por krigagem e IDW Multi-fractal. 42

Tabela 5.1: Possibilidades *fuzzy* atribuídas às unidades litoestratigráficas do mapa geológico. 50

INDICE DE EQUAÇÕES

Equação 4.1: Função fractal do método C-A	42
Equação 5.1: Operador E da lógica nebulosa	48
Equação 5.2: Operador OU da lógica nebulosa	48
Equação 5.3: Operador PRODUTO da lógica nebulosa	49
Equação 5.4: Operador SOMA da lógica nebulosa	49
Equação 5.5: Operador GAMA da lógica nebulosa	49
Equação 5.6: Função <i>Small</i> da lógica nebulosa	51
Equação 5.7: Função <i>Large</i> da lógica nebulosa	51
Equação 5.8: Função Linear da lógica nebulosa	53
Equação 5.9: Função de base radial	57
Equação 5.10: Função de saída da RNFBR	59

RESUMO

A análise e integração de dados espaciais de naturezas diversas, especialmente em sistemas de informações geográficas (SIG), é prática já consagrada em prospecção mineral. As técnicas disponíveis e as recentemente desenvolvidas podem auxiliar campanhas de prospecção em áreas onde é parco o conhecimento geológico e metalogenético, como no Cinturão Metassedimentar Nova Brasilândia (CMNB), localizado no sudeste do Estado de Rondônia, um orógeno desenvolvido durante o limite Esteniano – Toniano na porção sudoeste do Cráton Amazônico. Esse cinturão apresenta relações tectônicas com o Cinturão Orogenético Greenville e é interpretado como resultado da colisão entre o Cráton Amazônico e a Laurentia nos estágios finais da aglutinação do Supercontinente de Rodínia, no final do Mesoproterozóico. Neste trabalho, duas técnicas de interpolação de dados pontuais, krigagem e IDW-Multifractal, foram utilizadas para produzir mapas geoquímicos de teores de Co, Cu e Ni em sedimentos de corrente para posteriormente integrá-los a dados geofísicos, litológicos e estruturais por meio de lógica *fuzzy* e redes neurais artificiais, técnicas de análise e integração disponíveis em um SIG, para mapear o potencial mineral regional para Ni e Au no CMNB. A krigagem, uma das técnicas mais tradicionais de interpolação baseada em conceitos geostatísticos, teve como principais efeitos a redução do desvio padrão e dos valores de máximo dos dados originais, obliterando possíveis anomalias. Já o IDW-Multifractal, técnica fundamentada na geometria fractal, manteve a variabilidade dos dados e à vezes extrapolou os valores máximos, o que pode vir a ressaltar importantes anomalias. Os dois métodos interpolatórios não alteraram significativamente a distribuição das populações dos teores observada nos histogramas. Quando comparados pelo Índice Normalizado Residual – INR, os resultados da interpolação multifractal obtiveram melhores ajustes aos dados originais de teores de Co e Ni, enquanto que para teores de Cu ambos os métodos obtiveram ajustes similares. O método C-A para definição de anomalias geoquímicas, também baseado nos conceitos fractais, auxiliou a determinação de valores de base e anômalos de teores nos mapas interpolados. Para modelagem e mapeamento do potencial mineral no CMNB, foram utilizadas a lógica nebulosa (*fuzzy*) para o Ni, baseada em critérios litológicos, geofísicos e geoquímicos, e uma rede neural artificial baseada em funções de base radial para o Au, desenvolvida sobre dados lito-estruturais. Os dois modelos gerados apresentaram resultados coerentes na localização de áreas com alto potencial para Ni e Au quando comparadas com as ocorrências conhecidas. Os resultados das modelagens invariavelmente dependem da escala e da resolução dos dados, que neste trabalho adequam-se à escala 1:500.000, úteis em definir áreas para prospecção mais detalhada na região.

ABSTRACT

Analysis and integration of spatial data from different natures, particularly on Geographic Information Systems (GIS), is a well known technique in mineral prospection. The available tools and other ones recently developed can help prospection campaigns where there is not enough geologic and metalogenetic knowledge, as the Nova Brasilândia Metasedimentary Belt (NBMB), localized on the south eastern of Rondonia State, a orogeny developed during the Stenian-Tonian limit on the SW Amazon Craton. This belt presents tectonic relationships with the Greenville Orogenic Belt and is interpreted as the result of the collision between the Amazonian Craton and Laurentia, during the final stages of the Rodinia Supercontinent agglutination in the Late Mesoproterozoic. In this work, two punctual data interpolation techniques, kriging and IDW-Multifractal, were used to produce geochemical maps of Co, Cu and Ni concentrations in stream sediments that were integrated with geophysics, lithological and structural data by fuzzy logic and neural artificial networks, tools for analysis and integration in GIS environment, in order to map the regional mineral potential for Ni and Au on the NBMB. Kriging, one of the most traditional techniques for interpolation based on geostatistics concepts, presented as principal results a decreasing on the standard deviation and the maximum values of the original data, obliterating possible anomalies. The IDW-Multifractal, a technique settled on the fractal geometry, maintained the data variability and sometimes has extrapolated the maximum values, evidencing possible anomalies. Both methods have not altered the distribution of the populations of elements concentrations observed in the histograms. When compared by the Residual Normalized Index – RNI, the results of multifractal interpolation presented a best fit to original data for Co and Ni, while for Cu both methods presented similar fits. The C-A method for geochemical anomalies identification, also based on fractal concepts, assisted the definition of background and anomalous concentration on the interpolated maps. The mineral potential modeling and mapping on the NBMB were achieved by fuzzy logic for Ni, settled on lithological, geophysical and geochemical criteria, and by a artificial neural network based on radial basis functions for Au, developed on litho-structural data. Both models presented coherent results with the distribution of known mineral occurrences. Modeling results depend invariably of the data scale and resolutions, which in this work a compatible with a 1:500.000 scale, useful to define targets for detailed prospection.

ANEXOS DIGITAIS

ANEXO I - Mapa da amplitude do sinal analítico do campo magnético anômalo.

ANEXO II - Mapas dos canais gamaespectrométricos (A: K, B: Th e C: U).

ANEXO III - Mapas das composições ternárias com os canais gamaespectrométricos K, Th e U (A: RGB;B: CMY).

ANEXO IV - Distribuição das amostras de sedimento de corrente do Projeto Sudeste de Rondônia.

ANEXO V - Mapa geológico.

ANEXO VI - Imagem ETM+/Landsat7 integrada com modelo digital de terreno.

ANEXO VII - Mapa de linemaentos estruturais.

ANEXO VIII - Mapas geoquímicos gerados por krigagem (A: Co; B: Cu e C: Ni).

ANEXO IX - Mapas geoquímicos gerados por interpolação multi-fractal (A: Co; B: Cu e C: Ni).

ANEXO X - Mapas de anomalias geoquímicas gerados pela aplicação do Modelo C-A em superfícies interpoladas por krigagem (A: Co; B: Cu e C: Ni).

ANEXO XI - Mapas de anomalias geoquímicas gerados pela aplicação do Modelo C-A em superfícies interpoladas por IDW Multi-fractal (A: Co; B: Cu e C: Ni).

ANEXO XII - Mapa do Potencial Mineral para Ni no CMNB.

ANEXO XIII - Mapa do Potencial Mineral para Au no CMNB.

1. INTRODUÇÃO

A integração de diferentes tipos de dados (dados multifontes) é uma prática bastante comum na exploração mineral e por muito tempo foi realizada de maneira analógica por meio da sobreposição de *overlays* dos planos de informação em mesas de luz. O advento dos sistemas de informações geográficas (SIG) representou uma inovação nesse processo, já que são sistemas computacionais que permitem a manipulação e análise de dados espaciais envolvendo operações matemáticas, lógicas e probabilísticas de maneira muito rápida (Bonham-Carter, 1994; Bonham-Carter, 1997).

O Cinturão Metassedimentar Nova Brasilândia (CMNB), localizado na porção sudoeste do Cráton Amazônico, apesar de pouco estudado, apresenta considerável potencial metalogenético para Au e metais bases (Rizotto, 1999). Corresponde, portanto, a uma área onde são indicados trabalhos de exploração regional que possam selecionar alvos para prospecção detalhada.

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é a aplicação de métodos de análise e modelagem de dados geológicos, geoquímicos e geofísicos utilizando programas computacionais para processamento de dados geoquímicos e de SIG (GEODAS Fase III e Arc-GIS 9.2 com as extensões *Spatial Analyst* e Arc-SDM) para mapear áreas com favorabilidade mineral para ouro e níquel em uma área no CMNB.

1.1. Objetivos Específicos

Os objetivos principais do trabalho são:

1) analisar e interpolar dados geoquímicos de sedimentos de corrente por dois diferentes métodos: krigagem (Journel, 1978) e interpolação multifractal (Cheng, 1999; Li *et al.*, 2004) para posteriormente incluí-los em análises e modelagens em ambiente SIG;

2) separar valores de base e anômalos nas malhas interpoladas pelos métodos supracitados por meio do método C/A, baseado no conceito multifractal, e assim definir anomalias importantes (Cheng, 1994; Cheng *et al.*, 1996); e

3) integrar e modelar dados de geologia de superfície, geologia estrutural, aerogeofísica e dados de geoquímica em ambiente SIG utilizando lógica nebulosa (*fuzzy logic*) (Boham-Carter, 1994) e análises por redes neurais (Singer e Kouda, 1996 e Brown *et al.*, 2000) com a finalidade de criar mapas de favorabilidade mineral regionais em escala 1:500.000 para a exploração de níquel e ouro no CMNB.

1.2. Fisiografia da Área de Estudo

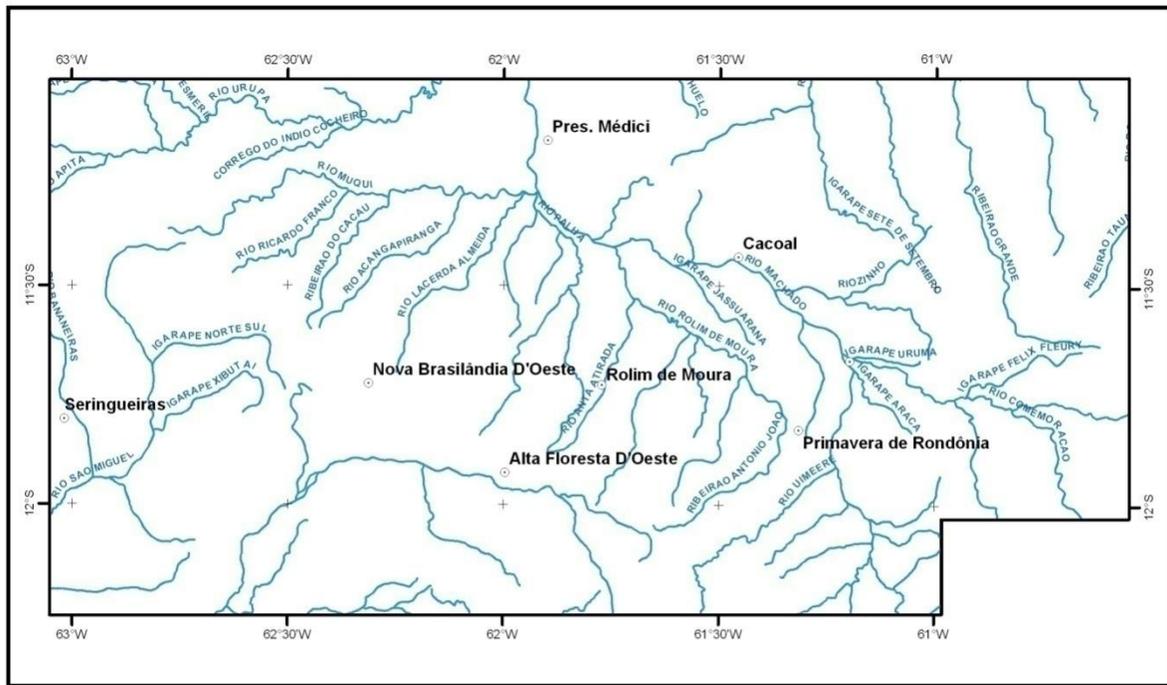
A área de estudo situa-se na porção sudeste do Estado de Rondônia e inclui, entre outras, as cidades de Nova Brasilândia do Oeste, Alta Floresta do Oeste, Rolim de Moura e Pimenta Bueno (Figura 1.1). É definida por um hexágono irregular com vértices em aproximadamente:

- 11° S e 63° W;
- 11° S e 60° 30' W;
- 12° S e 60° 30' W;
- 12° S e 61° W;
- 12° 15' S e 61° W; e
- 12° 15' S e 63° W.

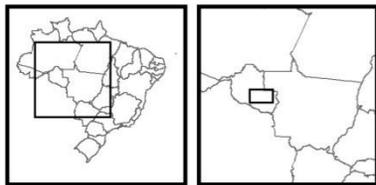
O clima da área é do tipo equatorial, com temperaturas médias entre 24 e 26° C, mínimas entre 18 e 21° C, máximas entre 28 e 33° C e pluviosidade anual em torno de 1.800 a 2.400 mm, com chuvas concentradas entre dezembro e maio.

A área está inserida nas bacias hidrográficas do Rio Machado / Ji-Paraná e do Rio Guaporé e faz parte do Bioma da Floresta Amazônica. Entretanto, grandes extensões já foram desmatadas para dar lugar às atividades de pecuária bovina e lavouras de café e soja, entre outras.

Na porção oeste da área estão localizados o Parque Nacional Pacaás Novos e as terras indígenas Rio Branco e Uru-Wau-Wau e a nordeste as terras indígenas Sete de Setembro e Roosevelt (Schobbenhaus *et al.*, 2004).



SITUAÇÃO



LEGENDA

- Cidades
- Rodovias
- Cursos d'água



Figura 1.1: Localização da área de estudo.

1.3. Justificativas

Nos últimos anos, estudos geotectônicos têm sugerido a correlação entre a evolução do sudoeste do Cráton Amazônico com o sudeste da Laurentia (América do Norte) no final do Mesoproterozóico e primórdios do Neoproterozóico (limite Esteniano – Toniano) durante o Ciclo Orogenético Grenvilliano, que resultou na amalgamação do supercontinente de Rodínia (Brito-Neves e Cordani, 1991; Sadowski e Bettencourt, 1996). Esta correlação, que indica uma ligação entre o Cráton Amazônico e o a porção leste da Laurentia, implica num contexto metalogenético bastante interessante, já que existem importantes depósitos minerais no Cinturão Orogenético Grenville.

No CMNB, inúmeros indícios e ocorrências de Au, Ni, Cu, Cr e Pt estão catalogadas pelo Serviço Geológico Brasileiro – CPRM. No entanto, com exceção de alguns garimpos de ouro, depósitos metálicos mais expressivos não são conhecidos.

A descoberta de novos depósitos é cada vez mais difícil e as demandas atuais em exploração mineral requerem o emprego de tecnologias cada vez mais avançadas e eficientes, como o uso de dados geológicos, geofísicos, geoquímicos e de sensores remotos integrados em SIG (Bonham-Carter *et al.*, 1989; Silva, 1999; Nóbrega, 2001).

A área de estudo foi escolhida a partir da interseção entre as áreas cobertas por projetos de aerogeofísica e geoquímica do Serviço Geológico do Brasil – CPRM. Grande parte do CMNB encontra-se inserida nesta área, localizada na porção centro-sul do estado de Rondônia.

Ná área, o contexto tectônico é compatível com o esperado para mineralizações de Ni laterítico ou sulfetado, relacionado a rochas intrusivas de natureza básica encontradas no CMNB, ou de Au orogênico, relacionado à Orogenia Sunsás, que afetou a área no final do Mesoproterozóico.

A aplicação das ferramentas propostas é, portanto, fundamental para melhor definir alvos e prospectos na área de estudo de forma a minimizar custos e auxiliar geólogos de exploração na tarefa de descobrir jazidas minerais.

2. CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

A área de estudo está inserida no Cráton Amazônico, uma das maiores e menos conhecidas áreas cratônicas do mundo (Tassinari *et al.*, 2000; Santos, 2003). Tassinari e Macambira (1999) dividem o Cráton Amazônico em um núcleo arqueano a paleoproterozóico, denominado Província Amazônia Central (idades > 2,3 G.a.) bordejada por uma série de províncias paleo a mesoproterozóicas: Província Maroni - Itacaiúnas (2,2 - 1,9 G.a.) a leste e províncias Tapajós - Ventuari (1,95 - 1,85 G.a.), Rio Negro - Juruena (1,8 - 1,55 G.a.), Rondônia - San Ignácio (1,5 - 1,3 G.a.) e Sunsás (1,3 - 1,0 G.a.) a oeste (Figura 2.1).

Essa divisão baseia-se em datações por diferentes métodos do embasamento metamórfico de cada província, de forma que rochas vulcânicas, sedimentares e plutônicas anorogênicas

podem encontrar-se inseridas em províncias mais antigas, assim como blocos mais antigos podem ser englobados em províncias relativamente mais novas (Tassinari *et al.*, 2000).

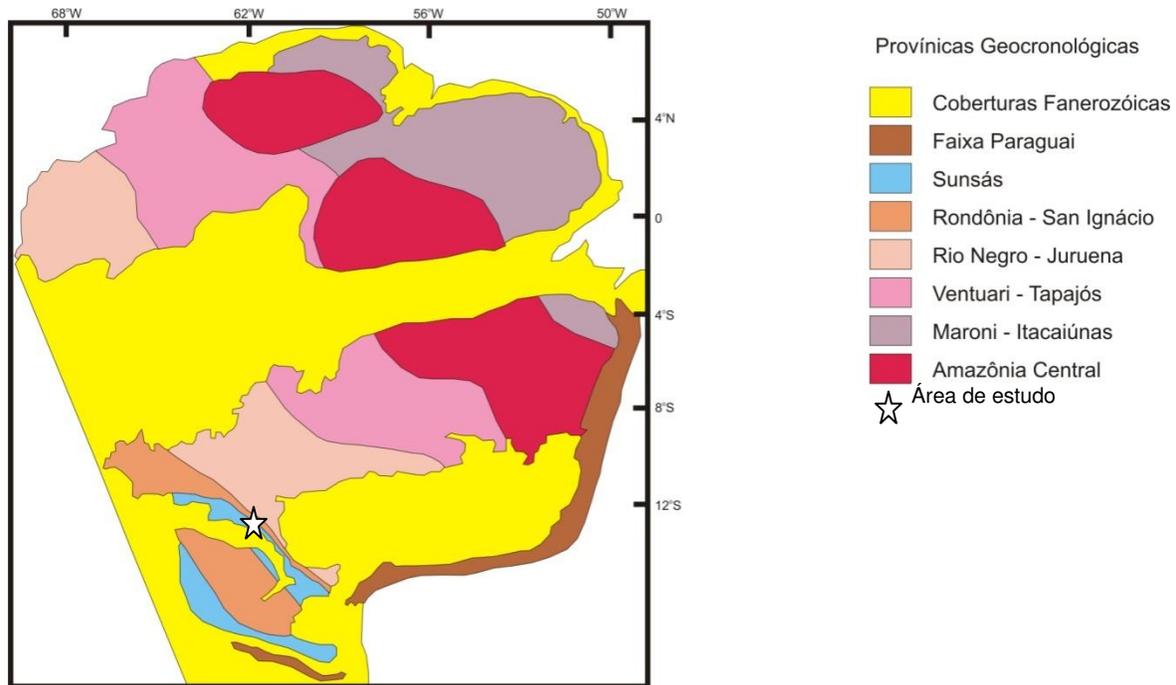


Figura 2.1: Províncias geocronológicas do Cráton Amazônico (adaptado de Tassinari e Macambira, 1999).

A estruturação do Cráton Amazônico reflete a evolução policíclica paleo a mesoproterozóica ao longo das bordas de um núcleo arqueano a paleoproterozóico (Província Amazônia Central). Essa evolução envolveu episódios de acreção crustal de arcos magmáticos juvenis (parte das províncias Maroni-Itacaiúnas e Rondônia-San Ignácio e as províncias Ventuari-Tapajós e Rio Negro-Juruena) e de colisão continental (parte das províncias Maroni-Itacaiúnas e Rondônia-San Ignácio e a província Sunsás) (Tassinari *et al.*, 2000).

O modelo de Tassinari e Macambira (1999) é baseado principalmente em datações Rb-Sr, cujo sistema isotópico é facilmente resetado e não indicado para o estudo de terrenos polideformados. Santos (2003), com base na reinterpretação de dados U-Pb e Sm-Nd e em mapeamentos sistemáticos do Serviço Geológico Brasileiro – CPRM, sugere algumas

modificações na compartimentação clássica do Cráton Amazônico (Figura 2.2). As principais são:

- desmembramento da Província Carajás da Província Amazônia Central;
- segmentação da bifurcação NE-SW da Província Maroni – Itacaiúnas que é designada Província Transamazonas;
- definição da Província Tapajós – Parima, englobando partes das províncias Amazônia Central e Tapajós – Ventuari;
- divisão da Província Rio Negro – Juruena nas províncias Rio Negro e Rondônia-Juruena;
- e
- ampliação da Província Sunsás, englobando parte da Província Rondônia – San Ignácio.

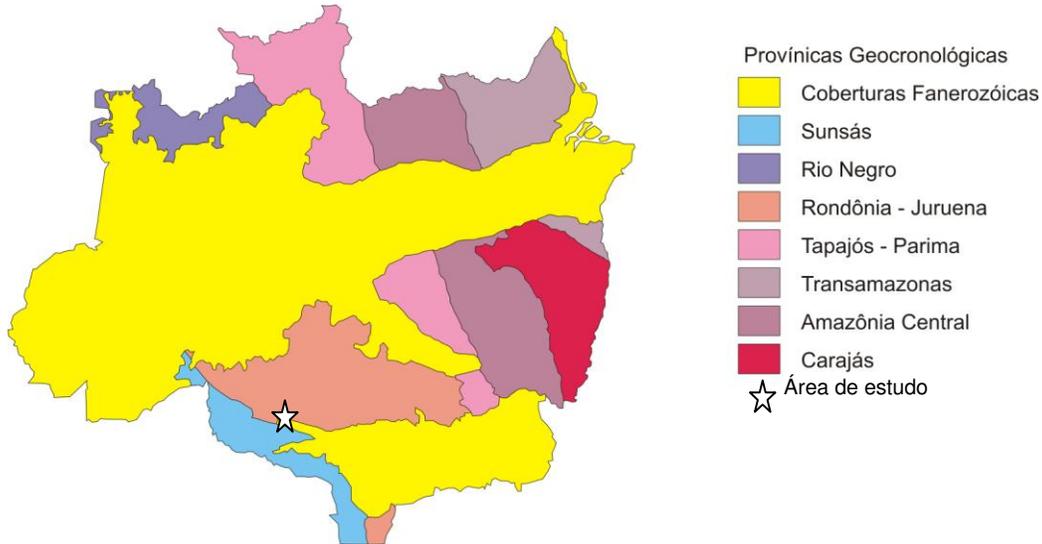


Figura 2.2: Compartimentação tectônica do Cráton Amazônico em território brasileiro (segundo Santos, 2003).

Uma comparação entre os modelos clássicos de Tassinari e Macambira (1999) e de Santos (2003) é apresentada na Tabela 2.1. Em ambos os modelos, a maior parte da área de estudo está inserida na Província Sunsás, de idade mesoproterozóica, localizada na porção sudoeste do Cráton Amazônico, cujas características estruturais e geocronológicas sugerem uma correlação com a Orogênese Grenvilliana, responsável pela aglutinação do supercontinente de Rodínia, no limite meso-neoproterozóico (Brito Neves e Cordani, 1991; Sadowski e Bettencourt, 1996).

Tabela 2.1: Tabela comparativa entre a compartimentação tectônica do Cráton Amazônico de Tassinari e Macambira (1999) e de Santos (2003).

Tassinari e Macambira (1999)	Santos (2003)
Amazônia Central (> 2,3 G.a.)	Carajás (3,1-2,53 G.a.)
	Amazônia Central (2,6-1,7 G.a.)
Maroni – Itacaiúnas (2,2-1,9 G.a.)	Transamazonas (2,25-2,0 G.a.)
Tapajós – Ventuari (1,9-1,8 G.a.)	Tapajós – Parima (2,1-1,87 G.a.)
Rio Negro – Juruena (1,8-1,55 G.a.)	Rio Negro (1,86-1,52 G.a.)
Rondônia – San Ignácio (1,5-1,3 G.a.)	Rondônia – Juruena (1,81-1,52 G.a.)
Sunsás (1,3-1,0 G.a.)	Sunsás (1,45-0,99 G.a.)

2.1. Geologia da Área de Estudo

A seguir, é apresentado um breve resumo acerca das unidades litoestratigráficas que ocorrem na área de estudo conforme Scandolaro (1999) e Schobbenhaus *et al.* (2004). A Figura 2.3 mostra o mapa geológico da área com base em Schobbenhaus *et al.* (2004).

O Complexo Jamari é composto de gnaisses policíclicos félsicos a intermediários, metamorfisados e migmatizados na fácies anfibolito (localmente granulito) (Schobbenhaus *et al.*, 2004). Compreende ortognaisses graníticos, granodioríticos, tonalíticos e quartzo-dioríticos, com intercalações lenticulares subordinadas de enderbitos, gnaisses calcissilicáticos, granada-biotita-sillimanita gnaisses, mica xistos e raros anfibolitos (Silva *et al.*, 2002). As idades do complexo Jamari variam entre 1,80 e 1,55 G.a. (Scandolaro, 1999).

O Grupo Roosevelt é representado por uma seqüência vulcanossedimentar intermediária e calcialcalina em fácies xisto verde (Schobbenhaus *et al.*, 2004). Essa seqüência foi depositada em ambiente continental ou marinho raso e é composta por fluxos piroclásticos e tufos, de composição dacítica a riolítica, intercalados com mica-xistos e formações ferríferas (Tohver *et al.*, 2005). Scandolaro (1999) estima uma idade em torno de 1,60 G.a. e propõe uma relação genética com a Suíte Intrusiva Serra da Providência, descrita adiante.

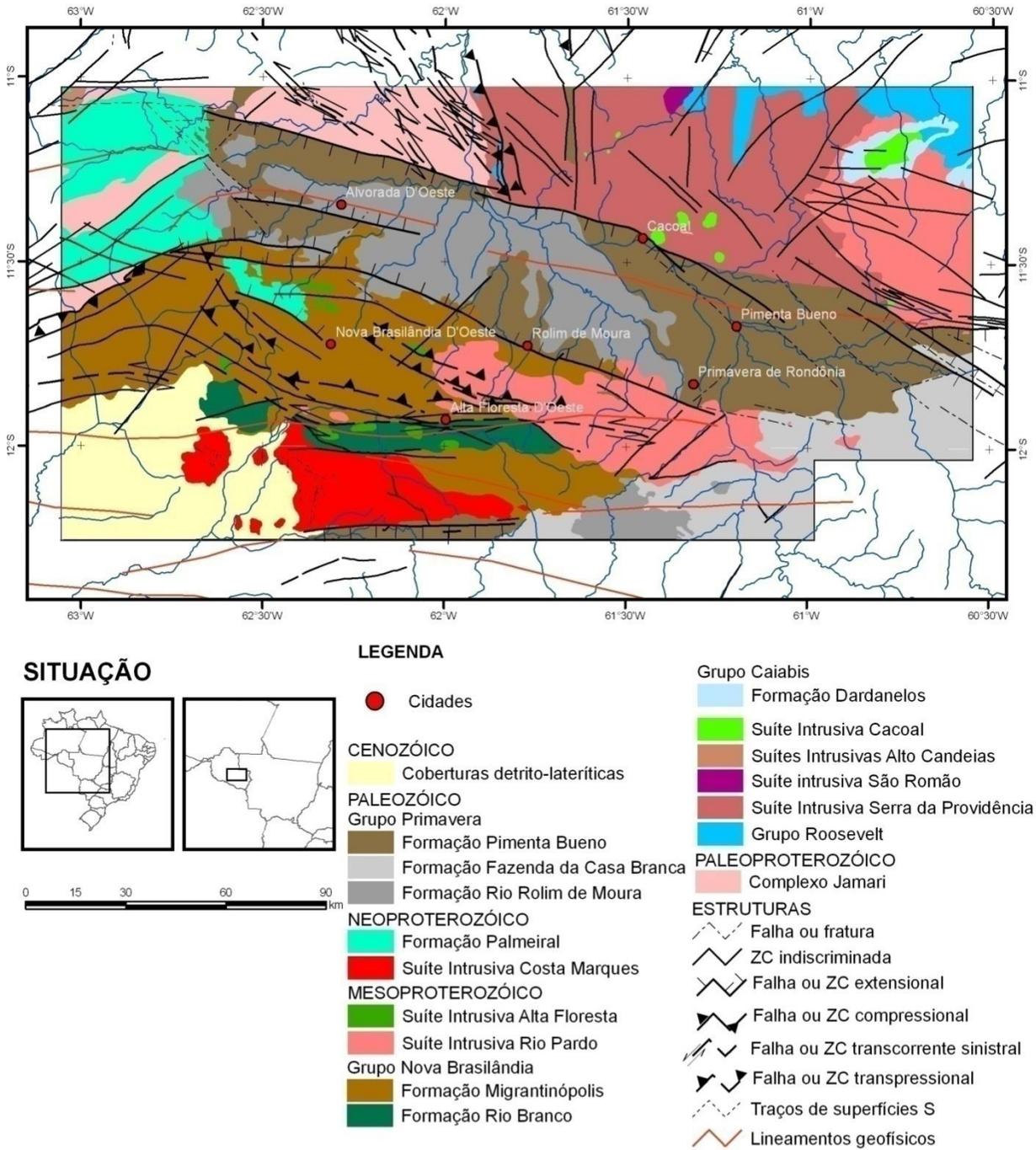


Figura 2.3: Mapa geológico da área de estudo (adaptado de Schobbenhaus *et al.*, 2004).

A Suíte Intrusiva Serra da Providência representa uma granitogênese subalcalina bastante volumosa com idades entre 1,60 e 1,53 G.a. (Bettencourt *et al.*, 1999). A intrusão desses granitos no Complexo Jamari marca o final do desenvolvimento do Arco Rio Negro-Juruena (Tassinari *et al.*, 1996; Tohver *et al.*, 2005) ou Província Rondônia – Juruena.

Charnockitos e monzo a sieno granitóides compõem a Suíte Intrusiva Alto Candeias, que ocorre em uma pequena área no extremo noroeste área de estudo (Schobbenhaus *et al.*, 2004). A idade de intrusão é estimada em 1,34 G.a. (Bettencourt *et al.*, 1999).

A Suíte Intrusiva Cacoal é de composição básica a ultrabásica e intrude o embasamento paleo a mesoproterozóico na forma de corpos peridotíticos diversos (Schobbenhaus *et al.*, 2004). Esses corpos têm formato elipsoidal alongados na direção NW e estrutura acamadada, com alternância de níveis de peridotitos e olivina-gabros (Scandolara, 1999).

A Formação Dardanelos, base do Grupo Caiabis, corresponde a uma seqüência de arenitos vermelhos às vezes arcoseanos, com estratificações cruzadas e plano paralelas, siltitos e argilitos avermelhados, e conglomerados polimíticos basais e intraformacionais (Lacerda Filho *et al.*, 2001).

As formações Rio Branco e Migrantinópolis correspondem respectivamente a rochas da infraestrutura e supracrustais do Grupo Nova Brasilândia, unidade estratigráfica que representa o CMNB (Rizzotto, 1999). Essas unidades são detalhadas em um subitem específico adiante.

Os granitos da Suíte Intrusiva Rio Pardo ocorrem como corpos ovalados concordantes com a foliação das encaixantes, fortemente foliados em zonas de cisalhamento e com sutil foliação quando distantes das mesmas, apresentam natureza subalcalina a alcalina e composição granítica *sensu strictu*, com idade de 1.005 ± 41 Ma que marca o final do ciclo orogênico que afetou a CMNB no limite Esteniano-Toniano (Scandolara, 1999; Rizzotto, 1999).

A Suíte Intrusiva Alta Floresta compreende uma associação de rochas básicas, de composição predominantemente basáltica alcalina, que ocorre na forma de soleiras hectamétricas (Scandolara, 1999). Rizzotto (1999) sugere que essa suíte pode estar relacionada a uma fase distensiva, posterior à orogênese mesoproterozóica, que resultou na instalação de um sistema de grábens onde foram depositadas seqüências paleozóicas.

A Suíte Intrusiva Costa Marques é definida como um complexo vulcanoplutônico de caráter peraluminoso a metaluminoso com tendência peralcalina, composto por granitos

subvulcânicos, granófiros, riolitos, riodacitos, traquitos e diques de lamprófiros que ocorrem na forma de *stocks* elipsoidais a circulares (Scandolara, 1999). Teixeira e Tassinari (1984) obtiveram idades de 1.018 ± 76 Ma para essas rochas e sugerem uma correlação com os *Younger Granites* de Rondônia de Kloosterman (1968).

Várias unidades sedimentares neoproterozóicas e fanerozóicas recobrem rochas mais antigas na SW do Cráton Amazônica (Tohver *et al.*, 2004). A mais antiga delas é a Formação Palmeiral, depositada na Bacia de Rondônia, formada nos grábens dos Pacaás-Novos, Upioanes e São Lourenço (Scandolara, 1999).

A Formação Palmeiral ocorre na porção noroeste da área de estudo (Schobbenhaus *et al.*, 2004), depositada em inconformidade angular (Tohver *et al.*, 2004). É composta por arcóseos avermelhados, arenitos e ortoconglomerados depositados em um sistema fluvial tipo entrelaçado (Scandolara, 1999).

Um expressivo pacote de rochas sedimentares paleozóicas, depositadas principalmente em grábens com direção WNW-ESSE (Gráben Pimenta Bueno e Gráben dos Parecis), compõe o Grupo Primavera que inclui as formações Rio Rolim de Moura, Pimenta Bueno e Fazenda da Casa Branca.

Variados litotipos, como conglomerados, arenitos feldspáticos, margas ferruginosas, siltitos, calcários dolomíticos e folhelhos, compõe a Formação Rolim de Moura, de idade siluriana. Os conglomerados são polimíticos com matriz arcósiana e os clastos são angulosos de composição é variada (rochas básicas a ultrabásicas, vulcânicas ácidas, gnaisses, cataclasitos e metassiltitos). Recobrem os conglomerados argilitos dolomíticos com intercalação de calcários dolomíticos e intercalações de arcóseos e siltitos. O ambiente deposicional é tido como leques aluviais para os conglomerados, porção mediana de um delta lacustre para os arenitos e arcóseos e lacustre para os argilitos (Scandolara, 1999).

A Formação Pimenta Bueno, do Carbonífero, é constituída por folhelhos micáceos, arenitos quarzo-feldspáticos com muscovita com estratificações plano-paralelas e cruzadas, siltitos e paraconglomerados com matriz (Scandolara, 1999). Segundo Bahia e Pedreira (1996), os folhelhos foram depositados em ambiente marinho raso, os arenitos em um sistema fluvial entrelaçado com sedimentos imaturos, provavelmente em clima desértico ou glacial, e a associação de siltitos e paraconglomerados, com seixos pingados, em um ambiente glacial.

A Formação Fazenda da Casa Branca, de idade permo-carbonífera (Olivatti e Ribeiro Filho, 1976), é composta de lentes de ortoconglomerados polimíticos, grauvacas, arenitos ortoquartzíticos com estratificações plano-paralelas e cruzadas de médio porte, e intercalações de pelitos subordinados, principalmente argilitos e folhelhos (Scandolara, 1999). O ambiente deposicional dessa unidade é interpretado como fluvial com depósitos com barras de canal (arenitos), depósitos residuais de canal (conglomerado) e planície de inundação (pelitos) (Scandolara, 1999).

A unidade Coberturas Detrito-Lateríticas inclui variados tipos de depósitos cenozóicos coluviais, eluviais, aluvionares, pantanosos e lacustrinos (Rizzotto *et al.*, 2000), além de solos lateríticos diversos.

O arcabouço estrutural da área é reflexo da complexa evolução tectônica policíclica que afetou a região entre o paleo e o mesoproterozóico. O subparalelismo entre as estruturas geradas em nos diferentes eventos deformacionais que podem ter reativado estruturas antigas dificultam ainda mais a compreensão da história geológica da área.

No embasamento paleoproterozóico da Província Rondônia Juruena de Santos (2003) (ou Rio Negro Juruena de Tassinari e Macambira (1999), predominam zonas de cisalhamento NW desenvolvidas na estruturação do Arco Rio Negro Juruena (Tohver *et al.*, 2005).

No final do mesoproterozóico, o desenvolvimento do CMNB se deu principalmente em um regime transpressivo sinistral que gerou cavalgamentos e extensas zonas de cisalhamento dextral, com vergência para NE na porção sul e para SW na porção norte do cinturão. Maiores detalhes acerca dessa estruturação e da evolução tectônica do CMNB são apresentados adiante.

Esforços distensivos no final do Pré-Cambriano foram responsáveis pela reativação extensional de antigas estruturas e formação de falhas normais em grande escala. Essa fase distensional formou um sistema de grábens, como, por exemplo, o Gráben de Pimenta Bueno, que veio a ser preenchido no fanerozóico.

2.2. O Cinturão Metassedimentar Nova Brasilândia (CMNB)

Reconstruções do supercontinente de Rodínia sugerem que a porção sudoeste do Cráton Amazônico esteve ligado ao leste da Laurentia e que os cinturões orogênicos Grenville, na América do Norte e Sunsás, na América do Sul, são produtos de uma colisão continental que uniu os dois Crátons entre os períodos Esteniano e Toniano (Cordani *et al.*, 2001; Rizzotto, 2001 e Tohver *et al.*, 2004). A Figura 2.4 apresenta uma reconstrução do Supercontinente de Rodínia mostrando a conexão entre o Cráton Amazônico e Laurentia.

Essa possível conexão entre as duas entidades cratônicas implica em um significativo potencial mineral na porção sudoeste do Cráton Amazônico, já que são conhecidos importantes depósitos minerais em áreas com contextos geológicos correlatos na América do Norte, como no Cinturão Grenville.

O CMNB também marca uma zona de sutura fundamental para a compreensão da tectônica mesoproterozóica que afetou o SW do Cráton Amazônico, onde as rochas metassedimentares do CMNB contrastam com os gnaisses e granitóides policíclicos paleoproterozóicos (Tohver *et al.*, 2004).

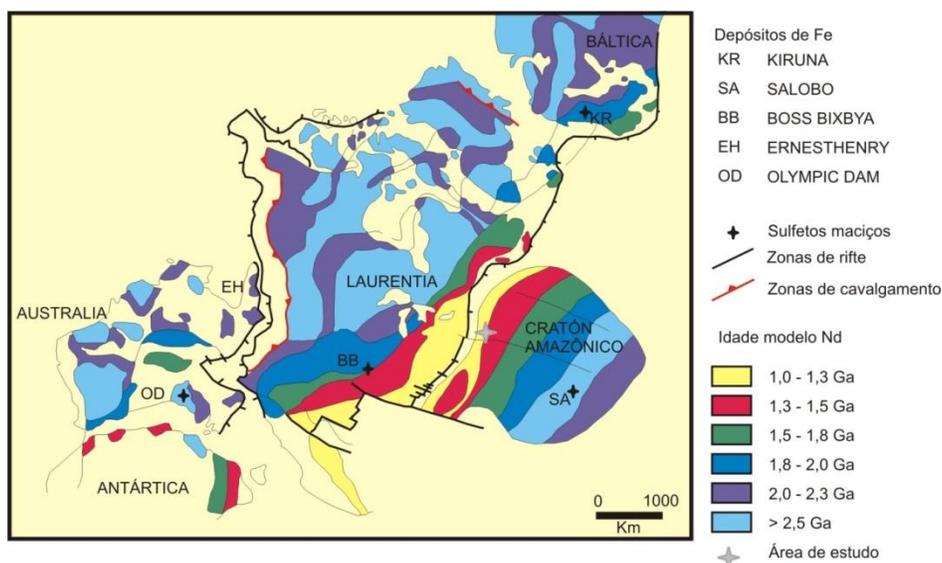


Figura 2.4: Reconstrução esquemática do supercontinente de Rodínia no final do Mesoproterozóico (modificado de Karlstrom *et al.*, 1999).

Rizzotto (1999) agrupou as rochas metassedimentares e metabásicas intrusivas do CMNB no Grupo Nova Brasilândia, unidade litoestratigráfica subdivida nas formações Rio Branco, que inclui um espesso pacote de rochas intrusivas metabásicas diferenciadas (metagabros e metanortositos) na porção sul do cinturão; e Migrantinópolis, composta por rochas metassedimentares diversas (xistos, gnaisses, quartzitos e rochas calcissilicáticas).

A Formação Rio Branco representa soleiras e *stocks* de rochas metabásicas intrusivas de granulação fina a média (metagabros, metanoritos e metadiabásios) heterogeneamente deformadas, exibindo por vezes textura ígnea cumulática preservada ou sutil foliação com direção WNW-ESE e mergulhos entre 60° e 90° para SSW (Rizzotto, 1999). Intercalações tectônicas de rochas metassedimentares, notadamente calcissilicáticas, são comuns em meio a essas metabásicas (Tohver *et al.*, 2004).

A Formação Migrantinópolis é constituída por um espesso pacote de rochas predominantemente metassedimentares clásticas psamo-pelíticas, com pequena participação de gnaisses calcissilicáticos, cujos principais litotipos são mica-quartzo xistos (muscovita-biotita-quartzo xistos e subordinadamente silimanita-biotita quartzo xistos); paragnais (biotita-gnaisses) e quartzitos (Rizzotto, 1999 e Tohver *et al.*, 2004). Esses litotipos ocorrem de forma camadas decimétricas a métricas intercaladas e é comum a gradação de quartzitos para metassiltitos, que por sua vez mostram uma transição para meta-argilitos. Com base nesta granodecrescência, Rizzotto (1999) considera que as rochas da Formação Migrantinópolis formaram-se em ambiente turbidítico.

O metamorfismo no CMNB é marcado por um incremento do grau metamórfico de norte , onde se observa o fácies anfibolito, para sul, onde ocorrem granulitos máficos e félsicos (Tohver *et al.*, 2005).

As condições metamórficas nos dois domínios apresentam não só variações do grau metamórfico, mas também na evolução das condições de P-T (Tohver *et al.*, 2005). No domínio norte o fácies granulito nunca foi alcançado e a evolução das condições P-T se deu segundo um *loop* horário, situação típica de terrenos que sofreram espessamento crustal. No domínio sul as condições de fácies granulito registram aumentos de pressão litostática associados a decréscimos de temperatura, resultando numa evolução segundo *loop* anti-horário.

Tohver *et al.* (2005) sugerem que a evolução metamórfica de ambos os domínios resultou de uma orogênese colisional com algum grau de obliquidade, caracterizando um regime transpressivo.

A estruturação geológica com direção predominantemente NW-SE e secundariamente E-W reflete essa tectônica transpressiva, com zonas de cisalhamento contracional no domínio norte, com lineações indicando um certo grau de obliquidade, e um domínio de grandes transcorrências sinistrais a sul, nas áreas de ocorrência dos granulitos (Rizzotto, 1999 e Tohver *et al.*, 2005).

A evolução tectônica do CMNB se deu em um curto espaço de tempo, entre cerca de 1,2 e 1,0 G.a. (Rizzotto, 1999), e é fortemente contrastante com a evolução policíclica das porções adjacentes do Cráton Amazônico (Tohver *et al.*, 2005).

Zircões detríticos em meio aos metaturbiditos apresentam idades que variam entre 2.090 ± 17 Ma a 1.215 ± 20 Ma (U/Pb em zircão), existindo um agrupamento em torno desta última idade, considerada idade máxima para a formação da bacia e deposição desses sedimentos (Rizzotto, 1999).

Para o metamorfismo do CMNB, é considerada a idade de 1.110 Ma com base nas idades U/Pb em zircão de 1.110 ± 8 Ma de uma lente de fundido anatótico em meio aos metaturbiditos e 1.110 ± 10 Ma de um metagabro deformado.

A idade de 1.005 ± 41 Ma da Suíte Intrusiva Rio Pardo marca o final do ciclo orogênico que afetou a CMNB no limite Esteniano-Toniano, representante regional do Ciclo Orogenético Grenville (Scandolaro, 1999 e Rizzotto, 1999) e a idade de 1.018 ± 76 Ma da Suíte Intrusiva Costa Marques (Teixeira e Tassinari, 1984), correlacionável com a idade dos *Younger Granites* de Rondônia de Kloosterman (1968), representam os estágios finais da cratonização da região.

Três diferentes modelos para evolução geológica do CMNB são descritos na literatura. Rizzotto (1999) considera a evolução do CMNB segundo um Ciclo de Wilson completo, iniciando-se com uma fase de tectônica extensional, responsável pelo magmatismo básico encontrado na área; o desenvolvimento de uma margem continental passiva em que se depositaram as seqüências sedimentares; seguindo-se uma fase de compressão responsável pela estruturação do orógeno.

Tohver *et al.* (2004) propõem outros dois modelos de evolução geológica possíveis: uma bacia de *foreland* ou uma bacia transtensiva e uma compressão transpressiva associadas a um regime tectônico transcorrente.

No primeiro caso, os sedimentos turbidíticos do CMNB teriam se depositado em uma bacia paralela ao orógeno em formação e posteriormente deformados e metamorfisados nas fases finais de colisão.

De acordo com o segundo modelo, a tafrogênese da bacia em que se depositaram as seqüências sedimentares resultou de esforços distensivos dentro de um amplo domínio de transcorrência, ou em outras palavras, numa zona de transtensão. Com a evolução do cisalhamento, o regime compressivo ou transpressivo teria predominado, sendo responsável pela formação do CMNB.

Supõe-se que a alternância entre transtensão e transpressão resultou da colisão transcorrente entre duas massas cratônicas, Cráton Amazônico e Laurentia, cujas margens seriam formadas por promontórios e reentrâncias. Tohver *et al.* (2004) consideram o modelo transcorrente mais adequado, considerando-se que a tectônica transcorrente sinistral é dominante no sudoeste do Cráton Amazônico e outras evidências, como o orógeno transpressivo que afetou o atual Texas, na região do Llano. A Figura 2.5 ilustra a evolução geológica para a área de estudo no final do Mesoproterozóico.

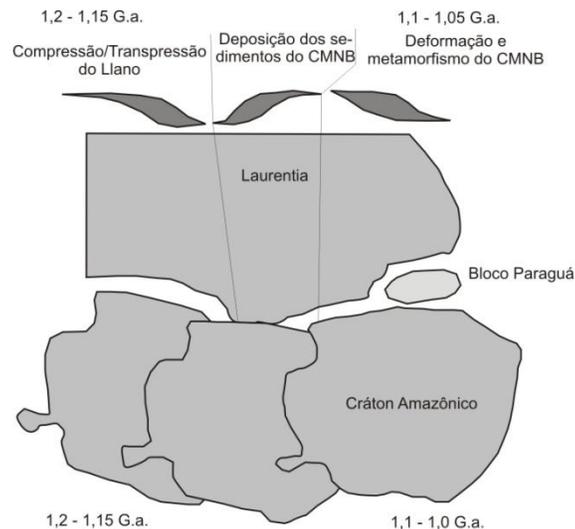


Figura 2.5: Evolução tectônica do sudoeste do Cráton Amazônico entre 1,2 e 1,0 G.a. (modificado de Tohver *et al.*, 2004).

Além do CMNB, outros dois cinturões grenvillianos são reconhecidos no SW do Cráton Amazônico, os cinturões Sunsás e Aguapeí. O Cinturão Sunsás ocorre na Bolívia e margeia o bordo oeste do Bloco Paraguá, tido como uma entidade cratônica de pequenas dimensões, e apresenta algumas semelhanças com o CMNB (Tohver *et al.*, 2004). O Cinturão Aguapeí, exposto na fronteira do Brasil com a Bolívia, contorna o bordo oeste do Bloco Paraguá. Esse cinturão é interpretado como um aulacógeno pouco deformado, desta forma, o Bloco Paraguá, a oeste desse cinturão, deve apresentar correlação geológica com as porções a leste, tidas com parte do Cráton Amazônico (Tohver *et al.*, 2004).

Segundo o modelo proposto por Tohver *et al.* (2002), o Ciclo Orogenético Grenville gerou um sistema transpressivo em que zonas de cavalgamento e falhas transcorrentes marcam a aglutinação final do supercontinente de Rodínia, o que estaria de acordo com a evolução geológica do CMNB.

3. BASE DE DADOS E PRÉ-PROCESSAMENTO

Nas modelagens conduzidas em SIG, a entrada dos dados e a organização de um sistema banco de dados georreferenciados é a etapa que demanda maior tempo. É uma fase crucial do processo e precisa ser conduzida com cuidado. Os planos de informação que contêm os dados espaciais devem ser convertidos para formatos e sistemas de projeção específicos, além de gravados de maneira organizada. É feita a seguir uma descrição dos dados utilizados e das etapas de pré-processamento envolvidas na organização do banco de dados georreferenciados. A maior parte desses pré-processamentos foi realizada com o programa Arc-GIS 9.2 e o processamento de imagens de satélite e do modelo digital de terreno com o programa ENVI 4.2.

3.1. Aerogeofísica

Foram utilizados neste trabalho dados geofísicos que incluem magnetometria e gamaespectrometria obtidos em aerolevantamentos do Serviço Geológico do Brasil – CPRM no final da década de 70. A área de estudo é coberta pelos levantamentos dos projetos Pacaás Novos e Serra dos Parecis, executados pela GEOFOTO S/A. A Tabela 3.1 apresenta as características de

ambos os levantamentos, compatíveis com a escala de trabalho proposta de 1:500.000. Os dados brutos de ambos os projetos foram fornecidos pela Divisão de Geofísica do Serviço Geológico Brasileiro.

Tabela 3.1: Características dos projetos aerogeofísicos Pacaás Novos e Serra dos Parecis, conduzidos pelo Serviço Geológico do Brasil – CPRM.

	Projeto Pacaás Novos	Projeto Serra dos Parecis
Ano	1978	1979
Total de perfis (km)	28.003	27.738
Área coberta (km²)	49.000	48.000
Altura do vôo (m)	150	150
Direção das linhas de vôo	N-S	N-S
Espaçamento das linhas de vôo (km)	2	2
Direção das linhas de controle	E-W	E-W
Espaçamento das linhas de controle (km)	20	18
Tempo de integração gama (s)	1	1

Os dados de magnetometria foram recebidos na forma de valores de campo magnético anômalo, ou seja, já corrigidos do IGRF. Os dados gamaespectrométricos foram recebidos separados nos canais do K, Th e U em contagens por segundo.

Para a inclusão dos dados geofísicos no SBDG, foi necessário executar uma série de procedimentos de pré-processamento, interpolação, micronivelamento e obtenção das imagens geofísicas.

A etapa de pré-processamento de dados consistiu na organização dos dados dentro do aplicativo Oasis Montaj, versão 5.1.8 da GEOSOFTTM, com a construção de um banco de dados contendo os dados aerogeofísicos relativos a cada bloco. Nesta etapa foram verificados e corrigidos erros provenientes da incompatibilidade de arquivos ASCII e bancos de dados gerados no aplicativo usado como, por exemplo, erro na separação correta das linhas de vôo e ausência da denominação para as linhas. Também, nesta primeira fase foram corrigidos alguns picos encontrados, relacionados a dados espúrios, pelos métodos da Diferença Quarta e Parâmetro “P” (Blum 1999), nos dados magnetométricos e valores negativos para os canais gamaespectrométricos pela adição do valor do desvio padrão referente aos dados de cada canal. As junções foram efetuadas com o algoritmo *Grid Knitting* (GRIDSTCH GX), presente no

aplicativo utilizado. Cabe ressaltar que durante a junção das malhas, o algoritmo retira, caso necessário, uma superfície de tendência de ordem zero, um ou dois, objetivando equalizar o nível de base das mesmas.

A interpolação dos dados referentes a cada bloco e a cada canal (magnetometria, gamaespectrometria) foi realizada em seguida ao pré-processamento. O método de interpolação escolhido foi o da curvatura mínima (*Ram Grid*) haja vista a maior sensibilidade do método bi-direcional de interpolação à diferença entre frequência de amostragem entre e ao longo das linhas de amostragem. Após a interpolação da malha do campo magnético anômalo e dos canais de K, U, Th e contagem total, estes foram micronivelados para posterior geração dos produtos transformados. Para o micronivelamento utilizou-se o algoritmo de Blum (1999) com base no método de Minty (1991).

Foram gerados a partir do campo anômalo e utilizados na interpretação estrutural e modelagem em SIG os seguintes produtos: derivada vertical, gradiente horizontal total e amplitude do sinal analítico. A Figura 3.1 apresenta os lineamentos interpretados a partir dos dados magnetométricos sobrepostos ao mapa da amplitude do sinal analítico, que é rerepresentado em escala 1:500.000 no Anexo Digital I.

Os dados gamaespectrométricos são obtidos medindo-se a radiação gama emitida por determinados elementos que compõe os diversos tipos de rochas. O valor de radiação gama medido é proporcional à concentração dos elementos. Os dados gamaespectrométricos são complementares ao estudo dos produtos derivados do campo magnético anômalo. Isto por que fontes magnéticas de várias profundidades contribuem para o campo medido enquanto que os dados radiométricos representam apenas os primeiros 30 a 40 centímetros da superfície.

Foram gerados a partir dos dados em contagem por segundo (cps), mapas para cada um dos canais gamaespectrométricos: K, U e Th (Anexo Digital II). A partir destes canais foram elaboradas composições ternárias, em falsa cor, utilizando os padrões de cores RGB e CMY (Anexo Digital III).

A cada canal foi atribuída uma determinada cor com sua intensidade, com K no vermelho, Th no verde e U no azul no padrão RGB e K no ciano, Th no magenta e U no amarelo, sendo proporcional à concentração dos elementos naquele ponto de observação. O processo de adição das cores que representam cada canal possibilita maior diferenciação dos diversos litotipos.

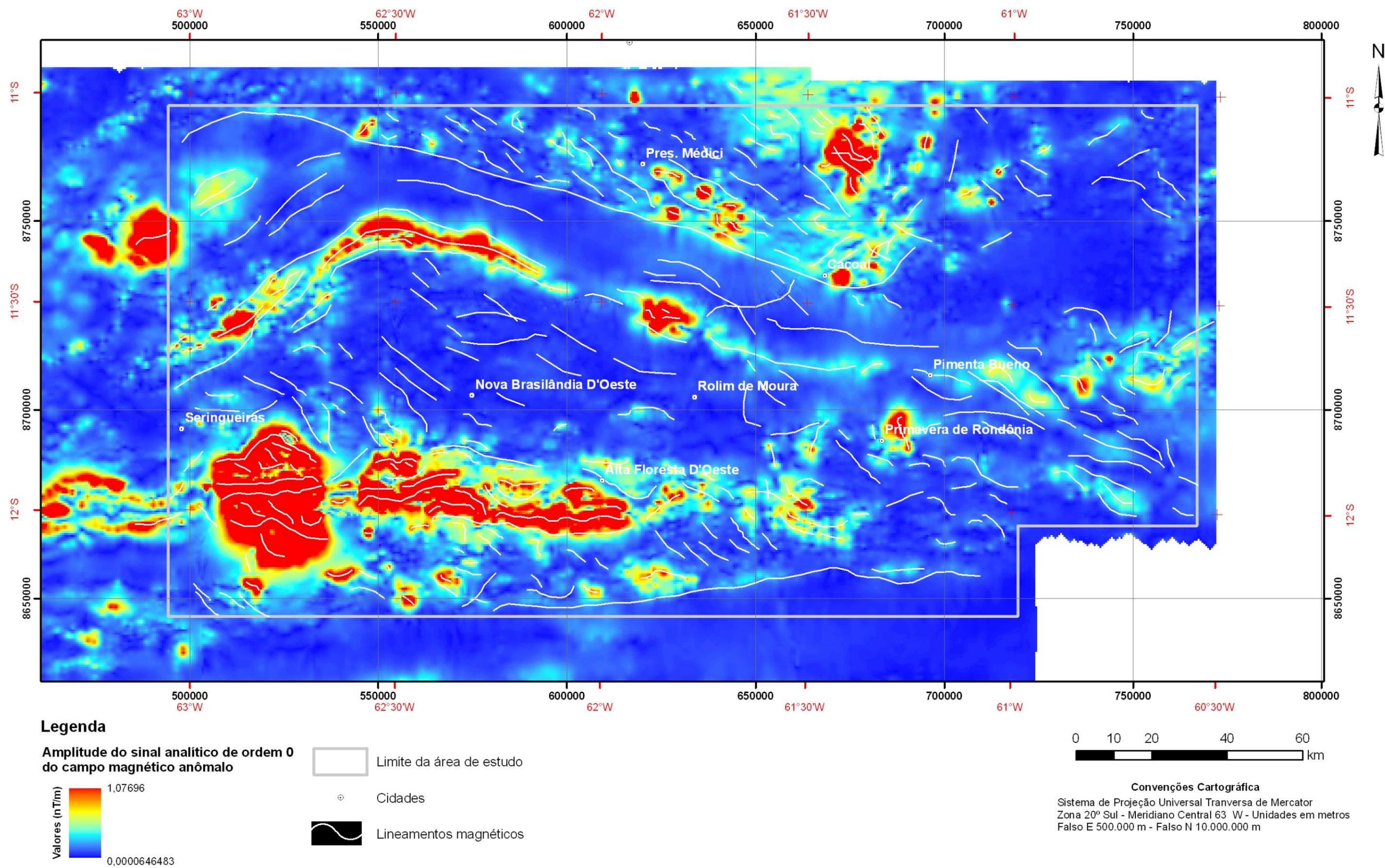


Figura 3.1: Lineamentos interpretados a partir dos dados magnetométricos sobrepostos ao mapa da amplitude do sinal analítico.

O sistema de projeção das malhas interpolados resultantes do processamento no formato de imagens foi convertido do original (UTM 20 Sul com *datum* Córrego Alegre) para o sistema de projeção UTM 20 Sul com *datum* SAD-69.

3.2. Geoquímica

Os dados de geoquímica utilizados fazem parte do acervo de análises de sedimentos de corrente do Projeto Sudeste de Rondônia, conduzido pelo Serviço Geológico do Brasil – CPRM (Pinto Filho, 1977). Esses dados foram fornecidos pela Divisão de Geoquímica do Serviço Geológico do Brasil – CPRM.

Os procedimentos de coleta, preparação e análise descritos por Pinto Filho (1977) foram os seguintes:

- As amostras de sedimentos de corrente foram coletadas em leitos de drenagens ativas, abaixo do nível d'água, em trechos retilíneos e em quantidade aproximada de 1 kg, sendo peneiradas *in loco* na fração < 32 *mesh*;
- A preparação das amostras seguiu a rotina de secagem ao ar em sacos de papel, peneiramento na fração < 80 *mesh*, pulverização a 100/150 *mesh* e digestão ácida total;
- As análises foram então conduzidas por meio da técnica de emissão espectrográfica, também denominada espectrometria de emissão óptica.

A tabela de resultados de análises químicas de sedimentos de corrente do Projeto Sudeste de Rondônia contém 1.523 amostras analisadas para diversos elementos. No conjunto de resultados analíticos disponíveis, não há valores detectados de Au ou As, metal cuja distribuição normalmente relaciona-se à do Au, que seriam úteis aos modelos de favorabilidade para Au. Para este trabalho, foram selecionadas 1.476 amostras com análises para Cu, Ni e Co, elementos associados a mineralizações de Ni e cujas distribuição espacial e quantidades das amostras apresentam-se adequadas para interpolações e posterior utilização nas modelagens de favorabilidade para Ni em escala 1:500.000. A Figura 3.2 ilustra a distribuição das amostras coletadas, que é rerepresentada no Anexo Digital 4.

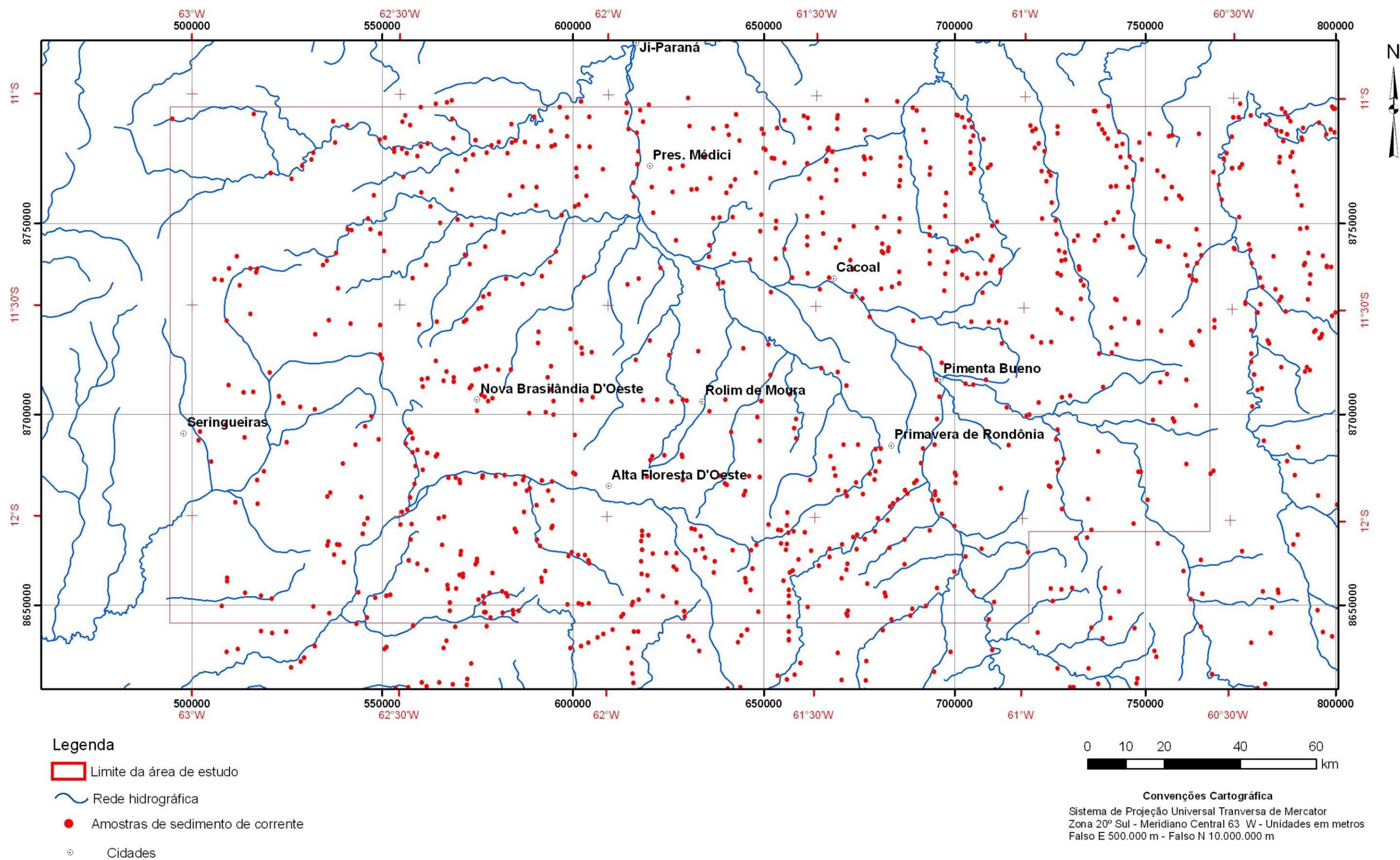


Figura 3.2: Distribuição espacial das amostras de sedimento de corrente do Projeto Sudeste de Rondônia (Pinto Filho, 1977).

A Tabela 3.2 a seguir mostra um resumo acerca dos resultados analíticos dessas amostras. Teores não detectados são precedidos pela letra N na tabela, os abaixo e acima do limite de detecção são respectivamente precedidos pelas letras L e G, e análises com interferências apresentam resultados precedidos pela letra H.

Tabela 3.2: Características do conjunto de resultados de análises geoquímicas de sedimentos de corrente do Projeto Sudeste de Rondônia.

Resultados analíticos	Cu	Ni	Co
Dentro dos limites de detecção	765	583	805
Não detectados (N)	120	686	377
Abaixo do limite de detecção (L)	591	201	259
Acima do limite de detecção (G)	-	-	-
Interferência (H)	5	6	35
Total	1.476	1.476	1.476

Às 1.476 amostras selecionadas, foi aplicado o pré-processamento estatístico descrito por Lins (2003), multiplicando-se os valores não detectados por 0,5, os acima do limite de detecção por 1,5 e os abaixo desse limite por 0,667. Os valores com interferência foram mantidos.

Com base nas coordenadas das amostras, os resultados analíticos foram incorporados à base de dados após conversão do sistema de projeção geodésico para o sistema UTM Zona 20 Sul e do sistema geodésico do *datum* Córrego Alegre o *datum* SAD-69.

O pré-processamento dos dados geoquímicos, que envolveu técnicas de análise e interpolação dos dados pontuais em uma malha regular, será abordado no Capítulo 4.

3.3. Mapa Litológico

O mapa litológico utilizado foi compilado a partir das folhas SC – 20 e SD – 20 da Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo (Schobbenhaus *et al.*, 2004). As duas folhas foram unidas num único mapa, cujo sistema de projeção foi convertido do sistema geodésico para o UTM 20 Sul, mantendo-se o *datum* SAD-1969.

Desse mapa, apenas a área de estudo foi convertida do formato vetorial para o formato matricial. Originalmente com 19 unidades, o mapa litológico foi simplificado pelo agrupamento das coberturas cenozóicas em uma única classe, resultando num mapa com 17 unidades (Figura

2.3 e Anexo Digital V). A descrição detalhada das unidades litoestratigráficas é apresentada no Capítulo 2.

3.4. Mapa Estrutural

O mapa de lineamentos foi construído a partir das estruturas já cartografadas na Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo de Schobbenhaus *et al.* (2004) (Figura 2.3) e de estruturas obtidas por interpretação imagens de geofísica e de sensores remotos.

As imagens aeromagnetométricas da amplitude do sinal analítico com sombreamento artificial (Anexo Digital I) e da amplitude do sinal analítico fundida com a imagem da derivada vertical do campo magnético anômalo foram utilizadas para mapear estruturas em subsuperfície, em geral de caráter dúctil (Figura 3.1). Algumas estruturas interpretadas coincidem com as cartografadas por Schobbenhaus *et al.* (2004).

Estruturas com expressão em superfície, geralmente de caráter rúptil a rúptil-dúctil, foram interpretadas com base em imagens integradas do ETM+/Landsat 7 e imagens no modelo digital de terreno da SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*), da NASA, conforme ilustra a Figura 3.3. O Anexo Digital VI apresenta Imagem ETM+/Landsat7 integrada com modelo digital de terreno em escala 1:500.000.

As cenas do ETM+/Landsat 7 230/68 de 15/08/1999 e 231/68 de 11/08/2001 foram adquiridas no site da *Maryland Universty* (<http://www.umd.edu/>). As cenas foram mosaicadas e o sistema geodésico foi convertido do *datum* WGS-84 para o *datum* SAD-69. Nas interpretações foram utilizadas as composições coloridas RGB com as bandas 741 e 453 e a imagem em tons de cinza da banda 8.

Os dados altimétricos utilizados são provenientes das cenas S 11° - 13° W 061° - 064° do modelo digital de elevação (MDE) da SRTM a partir do site da NASA (<http://www.nasa.gov>). Essas cenas foram corrigidas e mosaicadas e o sistema de projeção convertido de geodésico para o UTM Zona 20 Sul e o *datum* de WGS-84 para SAD-69. Os produtos derivados do MDE utilizados foram a imagem do MDE com sombreamento artificial a partir da iluminação com azimute em 045°, elevação de 45° e exagero vertical de 1,5.

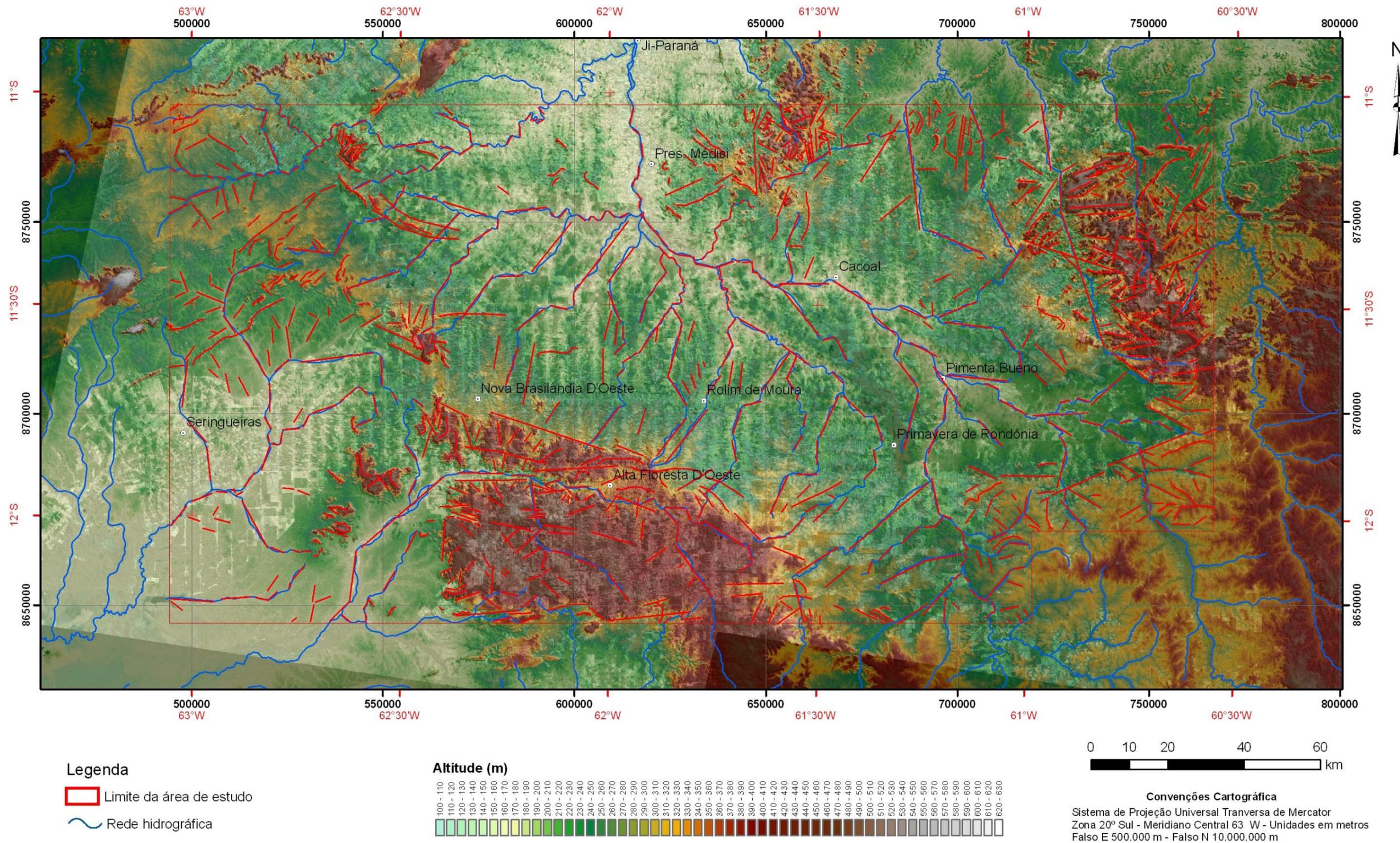


Figura 3.3: Lineamentos interpretados a partir da imagem ETM+/Landsat 7 integrada ao modelo digital de terreno da SRTM.

O Anexo Digital VII mostra todas as estruturas cartografadas por Schobbenhaus *et al.* (2004) e os lineamentos interpretados neste trabalho. Todos esses lineamentos foram classificados em função de seu comprimento e direção estrutural conforme a Tabela 3.3, de forma a se individualizarem diferentes grupos de estruturas.

Tabela 3.3: Sistema de classificação adotado para os diferentes tipos de lineamentos.

Grupo	Tipo de Lineamento	Direção	Dimensões
1	Schobbenhaus <i>et al.</i> (2004)	NW (N90°W – N)	0-10 km
2			10-50 km
3			50-100 km
4			> 100 km
5		NE (N - N90°E)	0-10 km
6			10-50 km
7			50-100 km
8			> 100 km
9	Interpretado a partir da geofísica	NW (N90°W – N)	0-10 km
10			10-50 km
11			50-100 km
12			> 100 km
13		NE (N - N90°E)	0-10 km
14			10-50 km
15			50-100 km
16			> 100 km
17	Interpretado a partir do modelo digital de terreno integrado a imagem ETM+/Landsat 7	E-W (N90°W – N67,5°W e N67,5°E – N90°E)	0-5 km
18			5-10 km
19			10-50 km
20		N-S (N22,5°W – N22,5°E)	0-5 km
21			5-10 km
22			10-50 km
23		NW (N67,5°W – N22,5°W)	0-5 km
24			5-10 km
25			10-50 km
26		NE (N22,5°E – N67,5°W)	0-5 km
27			5-10 km
28	10-50 km		

Para cada conjunto de lineamentos foi gerado uma imagem de distância de lineamentos, em que o valor de cada *pixel* corresponde à distância do lineamento mais próximo.

3.5. Ocorrências e recursos minerais

Os dados de ocorrências e recursos minerais utilizados foram compilados das folhas SC – 20 e SD – 20 da Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo (Schobbenhaus *et al.*, 2004). O Anexo Digital V ilustra a distribuição destas ocorrências na área de estudo.

A localização de garimpos de Au e de ocorrências de Au e Ni classificadas como indícios, que em geral representam pintas de Au e teores de Ni em sedimentos de corrente considerados anômalos pela CPRM, foi utilizada para balizar e validar as modelagens em SIG conduzidas neste trabalho.

No caso do níquel, a modelagem foi orientada para depósitos sulfetados ou lateríticos. Já para Au, a modelagem considerou a formação de depósitos do tipo Au-orogênico relacionados a garimpos em zonas de cisalhamento do CMNB.

4. INTERPOLAÇÃO DE DADOS GEOQUÍMICOS POR MEIO DE KRIGAGEM E IDW-MULTI-FRACTAL

A prospecção geoquímica faz parte do leque de ferramentas da exploração mineral há décadas. Recentemente, avanços técnicos como novos métodos analíticos com baixíssimos limites de detecção, métodos de processamento e outras formas integração com dados geológicos fazem com que a geoquímica mantenha um papel de ponta na prospecção mineral (Gripp, 1992; Cheng, 1994; Cheng *et al.*, 1996; Cheng, 1999; Li *et al.* 2004; Trépanier, 2007).

Muitas vezes, para modelagens conduzidas em SIG, os dados pontuais resultantes de uma campanha de geoquímica, como, por exemplo, os teores encontrados em amostras de sedimentos de corrente, são interpolados de forma a possibilitar tanto a visualização gráfica quanto os processamentos envolvidos na modelagem (Harris *et al.*, 2001; Robinson *et al.*, 2004).

Vários métodos de interpolação encontram-se descritos na literatura, cada qual com particularidades que os tornam adequados ao tratamento de um ou outro tipo de dado. Entre os métodos podemos citar o inverso do quadrado da distância, mínima curvatura, *spline*, krigagem e interpolação multifractal.

No presente trabalho, duas abordagens para a interpolação dos teores de Cu, Ni e Co em sedimentos de corrente foram consideradas: a krigagem, que representa um método geoestatístico clássico para a interpolação de dados pontuais (Journel, 1978); e a interpolação multifractal, uma técnica mais recente desenvolvida por Cheng (1999) que se baseia na teoria do fractal. Ambas as técnicas de interpolação utilizaram apenas amostras dentro do limite da área, num total de 825 amostras, de forma a reduzir o tempo de processamento.

Os dois métodos interpolatórios foram escolhidos para que a abordagem clássica da krigagem pudesse ser comparada com o método de interpolação fractal. Os métodos de interpolação foram avaliados em relação às estatísticas básicas das superfícies interpoladas comparadas às dos dados originais e quanto à correspondência entre o valor original em determinado ponto e o valor do mesmo ponto na superfície interpolada.

Outra alternativa comum na prospecção geoquímica por sedimentos de corrente é tratamento por sub-bacias. Neste método, a área de estudo é dividida em sub-bacias e a estas sub-bacias são atribuídos o valor de concentração das amostras nelas contidas. Esta alternativa foi avaliada neste trabalho, mas devido incompatibilidade de escala entre os dados topográficos e de rede de drenagem disponíveis com o levantamento geoquímico, os resultados não foram satisfatórios, sendo geradas inúmeras sub-bacias sem amostras ou amostras de valores discrepantes em uma mesma sub-bacia.

O método C-A (Cheng, 1994), também baseado na teoria do fractal, é utilizado na definição de anomalias geoquímicas, separando valores anômalos dos valores de base.

4.1. Interpolação por krigagem

A krigagem, baseada na geoestatística, é um das formas mais robustas de interpolação de dados pontuais (Journel, 1978). A teoria de geoestatística foi inicialmente desenvolvida por Matheron (1965) visando a solução para estimativas de reservas minerais e posteriormente aplicada a outras áreas como a prospecção geoquímica (Croissant, 1997).

Amostras de sedimentos de corrente são observações espaciais bi-dimensionais associadas a pares de coordenadas. Entre os valores dessas observações, existem variações

espaciais que em pequena escala podem parecer caóticas, mas há, de certa forma, uma relativa estrutura espacial que as caracterizam (Gripp, 1992).

Essas variáveis regionalizadas e as funções aleatórias que as governam são as bases da teoria da geoestatística, que busca construir modelos probabilísticos que consideram a posição das observações para representar determinada realidade física (Journel, 1978 e Gripp, 1992).

A ferramenta fundamental da krigagem é o semi-semi-variograma, uma forma gráfica de representar a estrutura da variabilidade de um conjunto de dados (Gripp, 1992). O semi-variograma é um gráfico que representa a variância em função da distância entre as observações e a partir de funções que modelam a curva do semi-variograma são extraídos parâmetros que são utilizados nos cálculos de estimativa da krigagem (Journel, 1978).

Esses importantes parâmetros do semi-variograma, apresentados na Figura 4.1, são (Journel, 1978):

- passo: é distância considerada entre duas amostras para o cálculo da variância;
- modelo: é a função matemática que ajusta a curva experimental do semi-variograma;
- patamar: é a variância máxima alcançada pelo semi-variograma em uma determinada distância a partir da qual a variância passa a não apresentar estruturação;
- alcance: é a distância a partir da qual a variância alcança o patamar
- pepita: é a variância quando a distância é 0, em teoria, deveria ser sempre nula, mas dificilmente os modelos adaptados aos semi-variogramas têm variância 0 na origem.

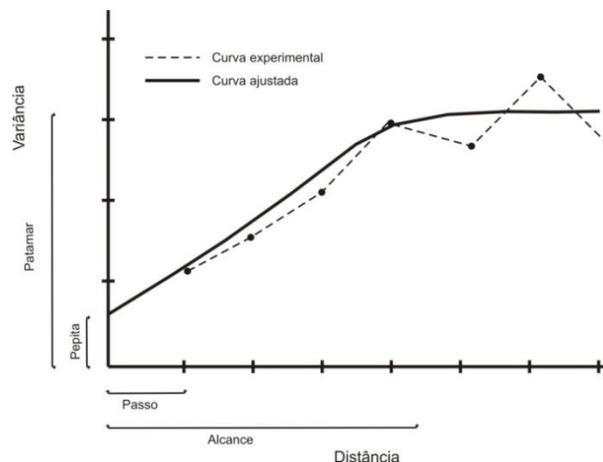


Figura 4.1: Parâmetros fundamentais do semi-variograma necessários ao cálculo da krigagem (adaptado de Journel, 1978).

Para cada elemento (Co, Cu e Ni) do conjunto de dados selecionados do Projeto Sudeste de Rondônia foi realizado um estudo variográfico de forma a determinar os melhores parâmetros e modelos para os respectivos semi-variogramas.

Nesse estudo, a construção de semi-variogramas direcionais segundo diferentes direções demonstrou que, para os três elementos, o conjunto de dados apresenta isotropia no que concerne à variabilidade. Assim, apenas semi-variogramas isotrópicos foram gerados. Os semi-variogramas para Co, Cu e Ni, gerados com o software Surfer 8.0, são apresentados respectivamente nas figuras 4.2, 4.3 e 4.4.

O semi-variograma do Co (Figura 4.2) foi construído com um passo de 2.500 m e 7 passos até a distância máxima de 17.500 m. O modelo que melhor se ajustou utiliza a função gaussiana, com pepita em 160, patamar absoluto em 360 e alcance de 9.000 m.

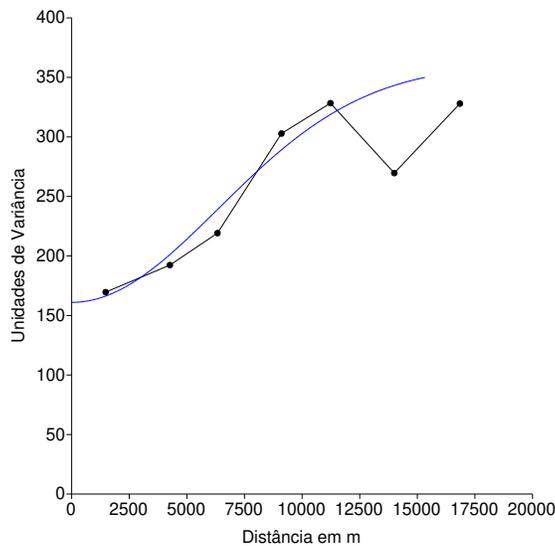


Figura 4.2: Semi-variograma do Co (passo de 2500 m, pepita de 160 unidades de variância, patamar absoluto de 360 unidades de variância e alcance de 9.000 m).

O semi-variograma do Cu (Figura 4.3) baseou-se também num passo de 2.500 m, porém com 6 passos até a distância máxima de 15.000 m. O modelo ajustado foi baseado em uma função esférica, com pepita em 0, patamar absoluto em 12.000 e alcance de 25.000 m.

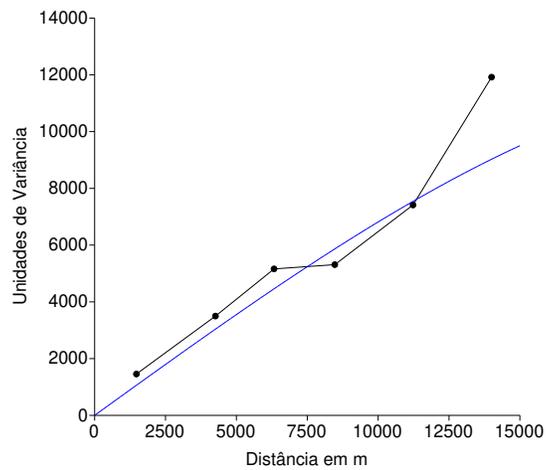


Figura 4.3: Semi-variograma do Cu (passo de 2500 m, pepita de 0 unidades de variância, patamar absoluto de 12.000 unidades de variância e alcance de 25.000 m).

O semi-variograma do Ni (Figura 4.4), assim como os anteriores, foi construído com um passo de 2.500 m. Foram utilizados e 6 passos até a distância máxima de 15.000 m. O modelo ajustado utilizou a função esférica, com pepita em 100, patamar absoluto em 325 e alcance de 9.000 m.

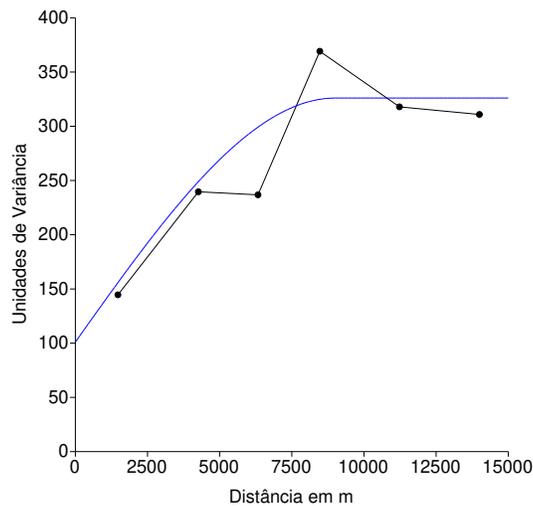


Figura 4.4: Semi-variograma do Ni (passo de 2500 m, pepita de 100 unidades de variância, patamar absoluto de 325 unidades de variância e alcance de 9.000 m).

Os mapas geoquímicos de Co, Cu e Ni foram interpolados pela krigagem ordinária com a extensão *Spatial Analyst* do programa Arc-GIS 9.2 utilizando-se uma malha regular com células de 500 m e um mínimo de três amostras num raio de 10 km. Os mapas geoquímicos resultantes são apresentados nas Figuras 4.5, 4.6 e 4.7 e em escala maior no Anexo Digital 8.

A Tabela 4.1 mostra uma comparação entre algumas estatísticas básicas dos dados originais e das superfícies krigadas para Co, Cu e Ni. Os valores mínimos, com exceção do Cu, e as médias não sofrem grandes variações após a krigagem. Entretanto, os valores máximos, que de certa forma são o foco da prospecção geoquímica, são reduzidos significativamente após a krigagem. Os desvios padrão do Ni e do Co são reduzidos aproximadamente pela metade. O desvio padrão do Cu não se altera significativamente.

Tabela 4.1: Tabela comparativa entre estatísticas básicas dos dados originais e das superfícies krigadas para Co, Cu e Ni.

Grandeza Estatística	Dados Originais			Superfícies Krigadas		
	Co(ppm)	Cu(ppm)	Ni(ppm)	Co(ppm)	Cu(ppm)	Ni(ppm)
Mínimo	2,50	2,50	2,50	2,50	-76,61	1,90
Máximo	200,00	629,00	100,00	103,98	664,80	55,88
Média	8,48	204,75	6,43	7,07	201,96	5,90
Desvio Padrão	13,04	210,09	8,01	5,92	195,90	4,51

A Figura 4.6 mostra os histogramas do conjunto de dados originais (resultados analíticos) de cada elemento e os histogramas das superfícies interpoladas por krigagem a partir desses dados. Nota-se que a forma dos histogramas não se altera significativamente, mantendo-se a forma da distribuição log-normal para o Co e o Ni e a forma assimétrica com dois picos para o Cu. A principal modificação está nos limites máximos dos histogramas dos dados interpolados que são incrementados no caso do Cu e reduzidos no caso do Co e do Ni.

A krigagem tem como importante característica minimizar variância dos dados e interpolando valores pontuais de acordo com as propriedades espaciais das amostras (Harris *et al.*, 2001). Isto significa que muitas vezes sutis anomalias podem ser suavizadas e impossíveis de se detectar.

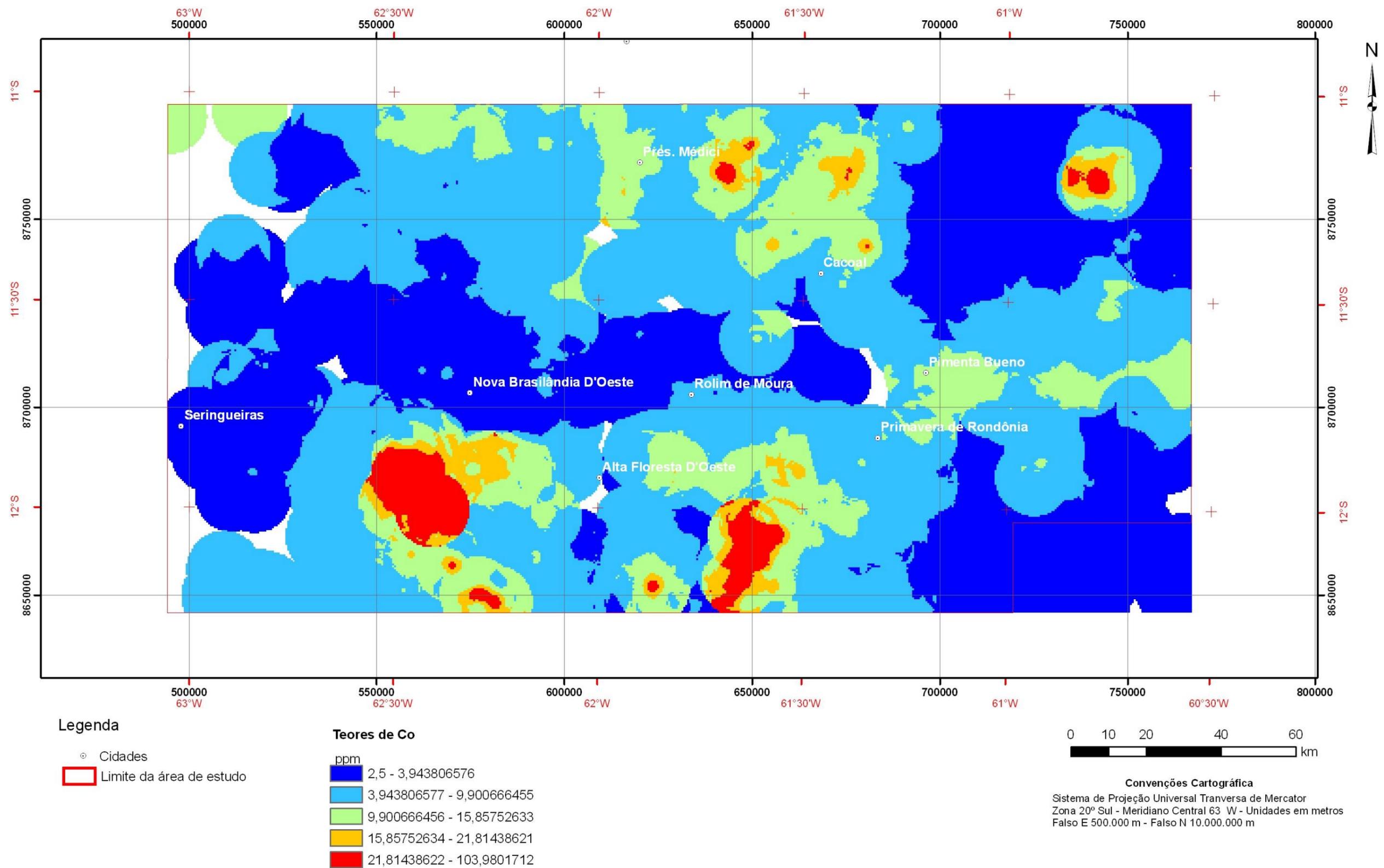


Figura 4.5: Mapa geoquímico de teores de Co gerado por krigagem.

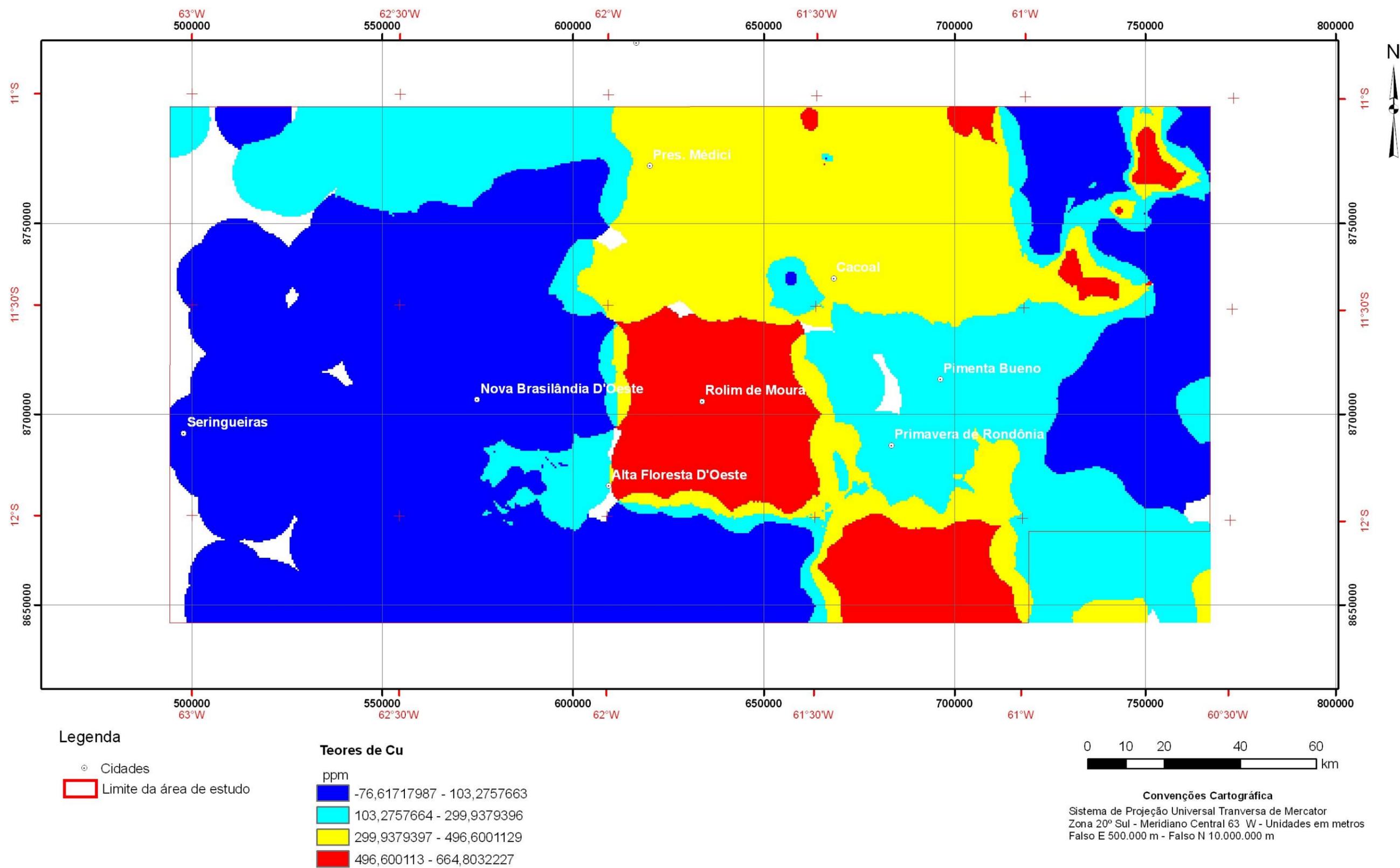


Figura 4.6: Mapa geoquímico de teores de Cu gerado por krigagem.

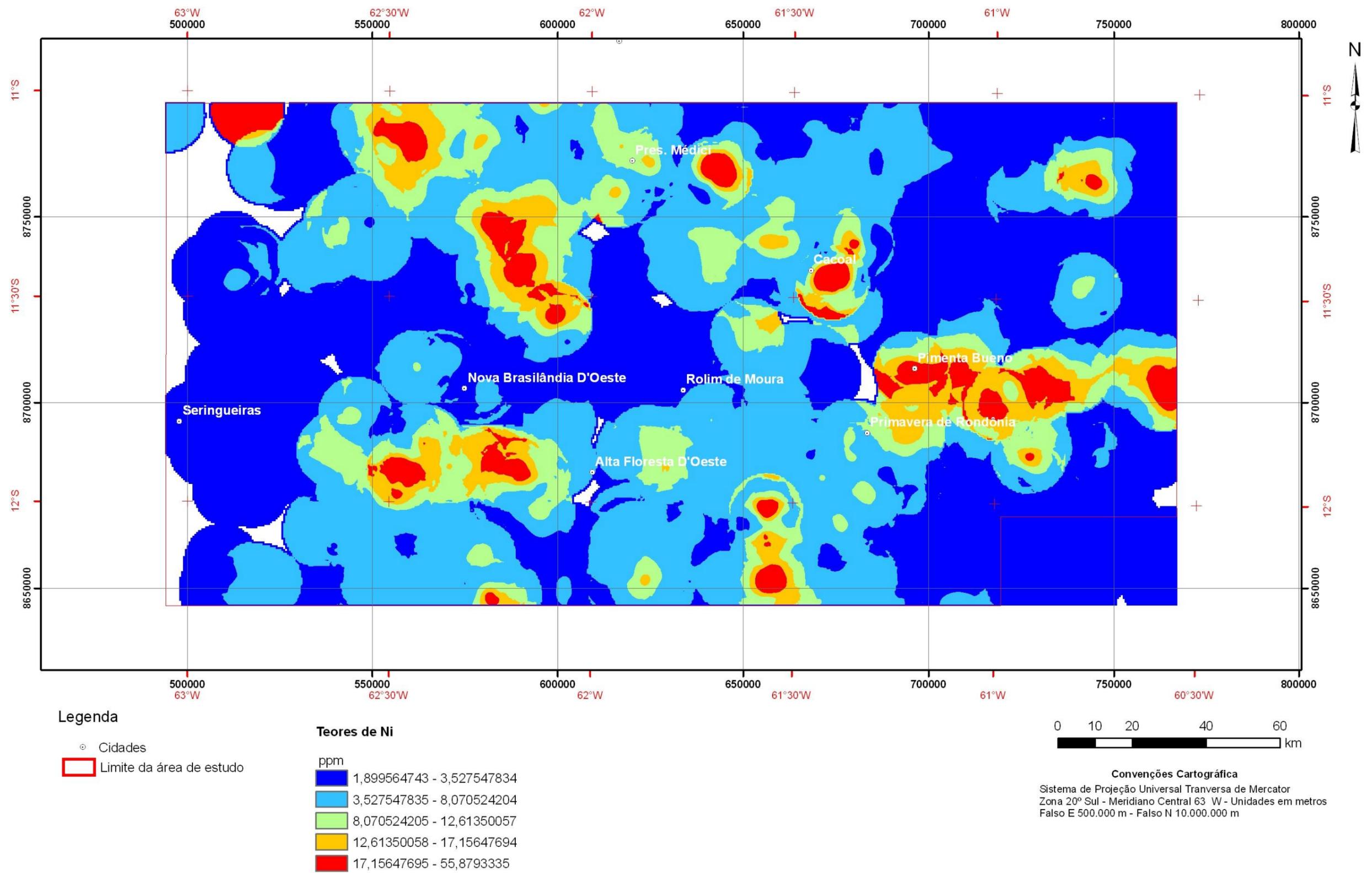
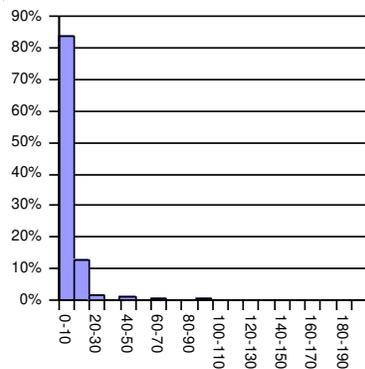
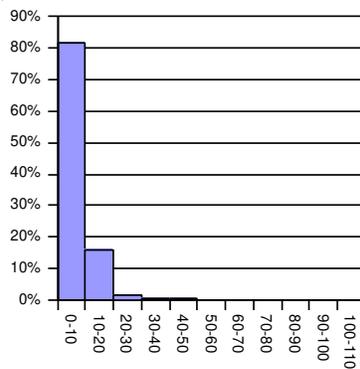


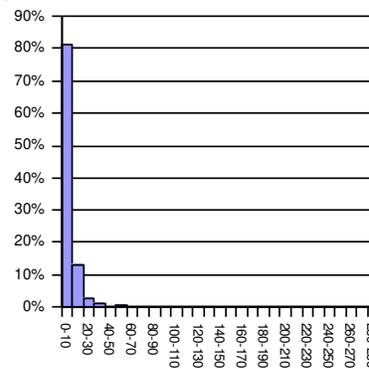
Figura 4.7: Mapa geoquímico de teores de Ni gerado por krigagem.



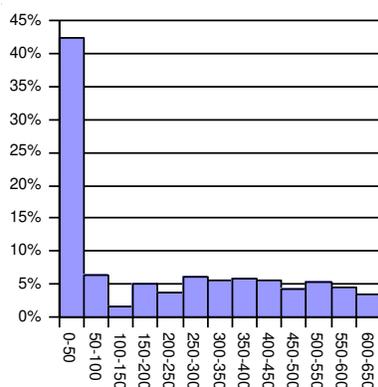
A: Conjunto de dados originais, 761 resultados analíticos para Co



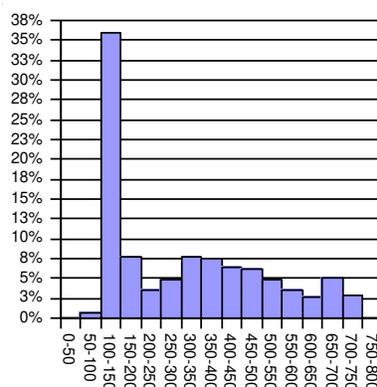
D: Conjunto de valores de Co interpolados por krigagem, 142.876 pontos da malha regular



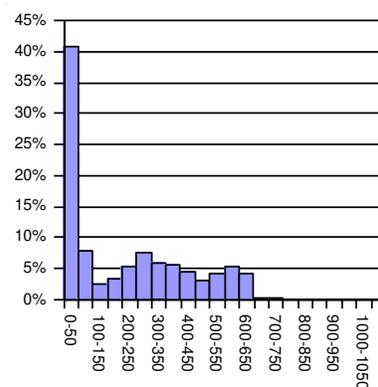
G: Conjunto de valores de Co interpolados por IDW-Multifractal, 122.449 pontos da malha regular



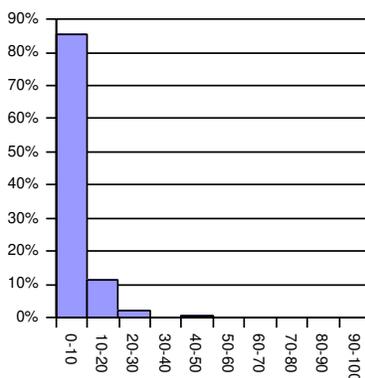
B: Conjunto de dados originais, 761 resultados analíticos para Cu



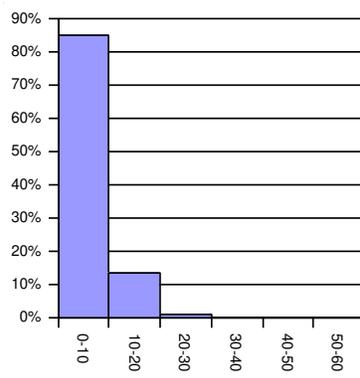
E: Conjunto de valores de Cu interpolados por krigagem, 142.876 pontos da malha regular



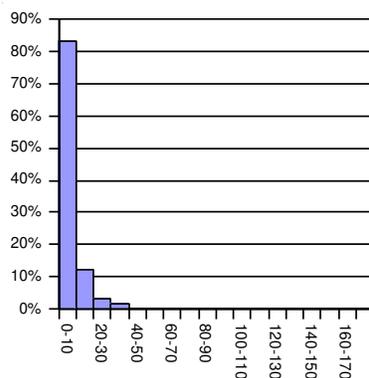
H: Conjunto de valores de Cu interpolados por IDW-Multifractal, 122.449 pontos da malha regular



C: Conjunto de dados originais, 761 resultados analíticos para Ni



F: Conjunto de valores de Ni interpolados por krigagem, 142.876 pontos da malha regular



I: Conjunto de valores de Ni interpolados por IDW-Multifractal, 122.449 pontos da malha regular

Figura 4.8: Histogramas mostrando a distribuição das populações dos resultados analíticos originais pra **A)** Co, **B)** Cu e **C)** Ni; dos valores interpolados por krigagem de **D)** Co, **E)** Cu e **F)** Ni; e dos valores interpolados por IDW-Multifractal de **G)** Co, **H)** Cu e **I)** Ni. Limite superior de cada classe incluso na respectiva classe.

4.2. Interpolação multifractal

Recentemente, modelos fractais têm sido aplicados à análise e interpolação de dados geoquímicos (Cheng, 1994; Cheng, 1999; Cheng *et al.*, 1996; Li *et al.*, 2004). Modelos fractais têm a propriedade de auto-similaridade de forma que, na média, a variabilidade espacial da feição em estudo independe da escala. Podem ser matematicamente expressos por equações que associam as variáveis e suas dimensões fractais (Mandelbrot, 1983; Cheng, 1994).

Uma nova técnica de interpolação de dados baseada em modelos fractais é denominada *IDW – Multifractal* (Cheng 1999; Li *et al.*, 2004). Este interpolador leva em conta não só a associação espacial, mas também as singularidades locais dos dados de forma que a superfícies interpoladas mantêm a variabilidade local dos dados.

Os mapas geoquímicos de Co, Cu e Ni foram interpolados em um *grid* regular com células de 500 m, utilizando-se sempre um mínimo de três amostras num raio de 10 km para os cálculos das estimativas utilizando-se o programa GEODAS Fase III. Os mapas geoquímicos resultantes são apresentados na Figura 4.7 e no Anexo Digital 9.

Uma comparação entre algumas estatísticas básicas dos dados originais e para as superfícies geradas por interpolação multifractal para Co, Cu e Ni é exibida na Tabela 4.2. Os valores de mínimos aproximam-se sistematicamente de 0 após a interpolação multifractal. As médias e os desvios padrão sofrem variações sutis, mantendo valores próximos ao do conjunto de dados original. Os valores de máximo, entretanto, são fortemente incrementados, o que, de certa maneira, pode realçar anomalias geoquímicas.

Na Figura 4.6 é possível notar que as formas dos histogramas do conjunto de dados originais (resultados analíticos) de cada elemento e dos histogramas das superfícies interpoladas por *IDW-multifractal* a partir desses dados são muito semelhantes, mantendo-se a forma da distribuição log-normal para o Co e o Ni e a distribuição assimétrica para o Cu. Nota-se que os limites máximos são significativamente incrementados em todos os histogramas.

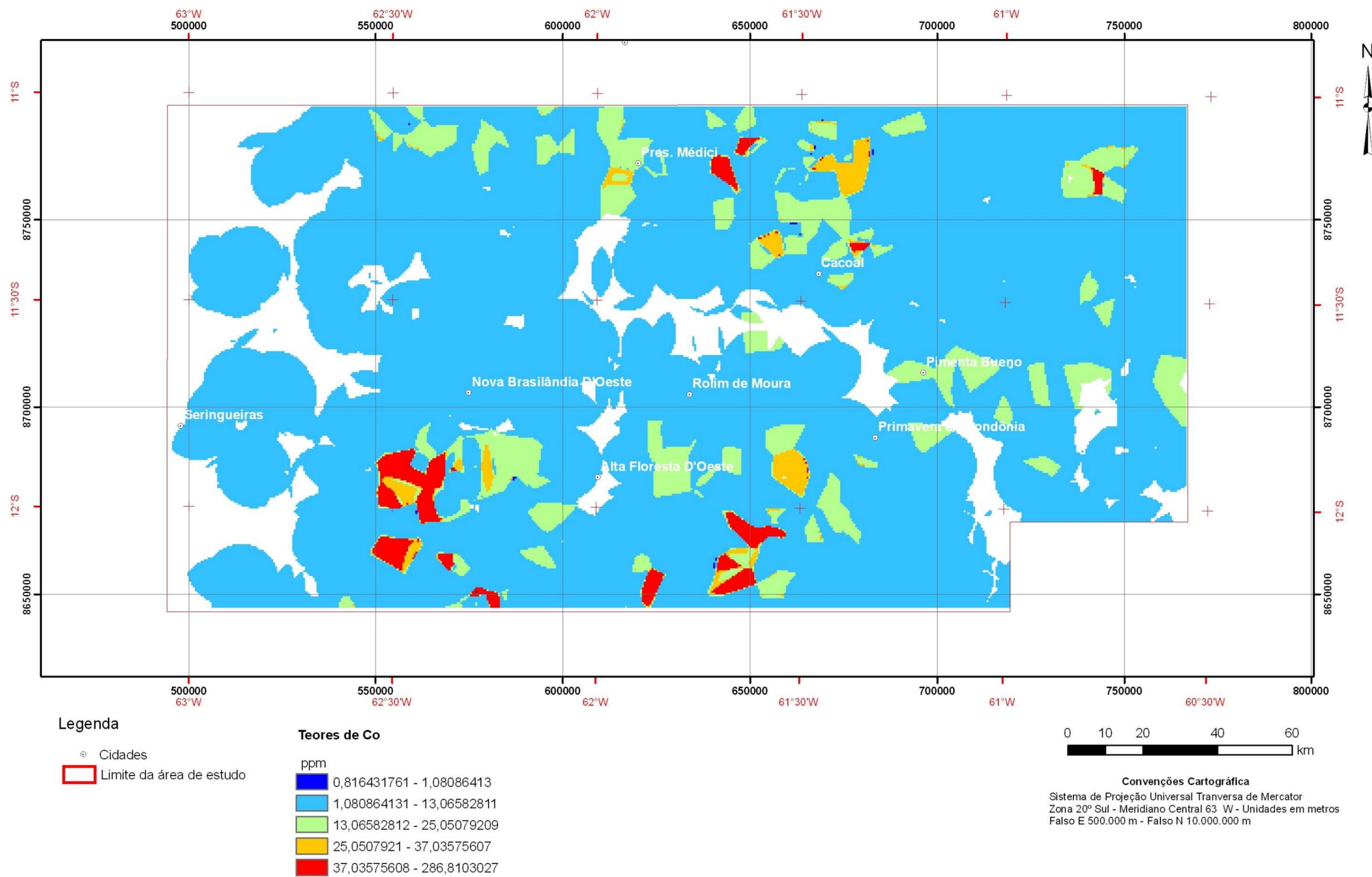


Figura 4.9: Mapa geoquímico de teores de Co gerado por IDW-Multifractal.

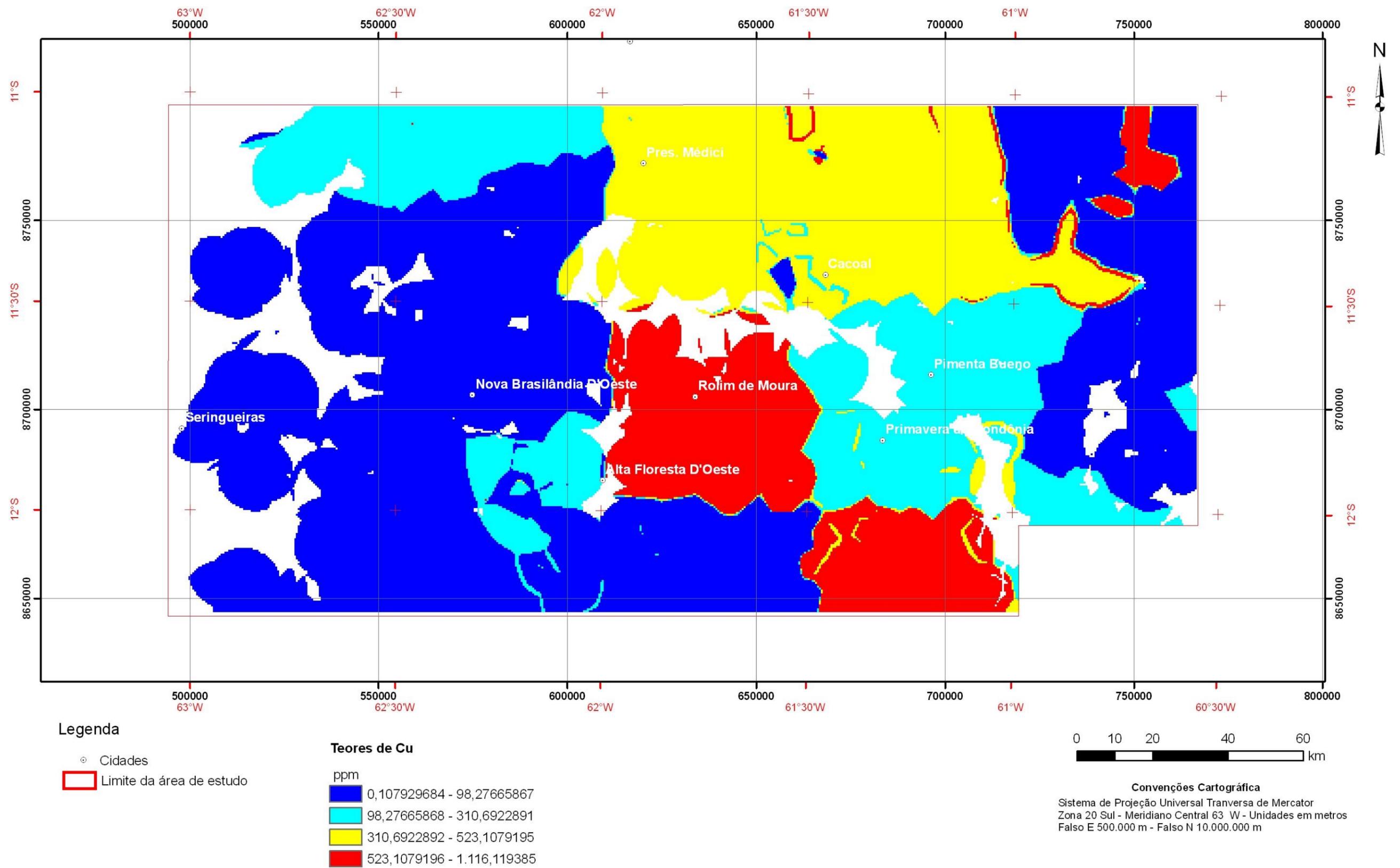


Figura 4.10: Mapa geoquímico de teores de Cu gerado por IDW-Multifractal.

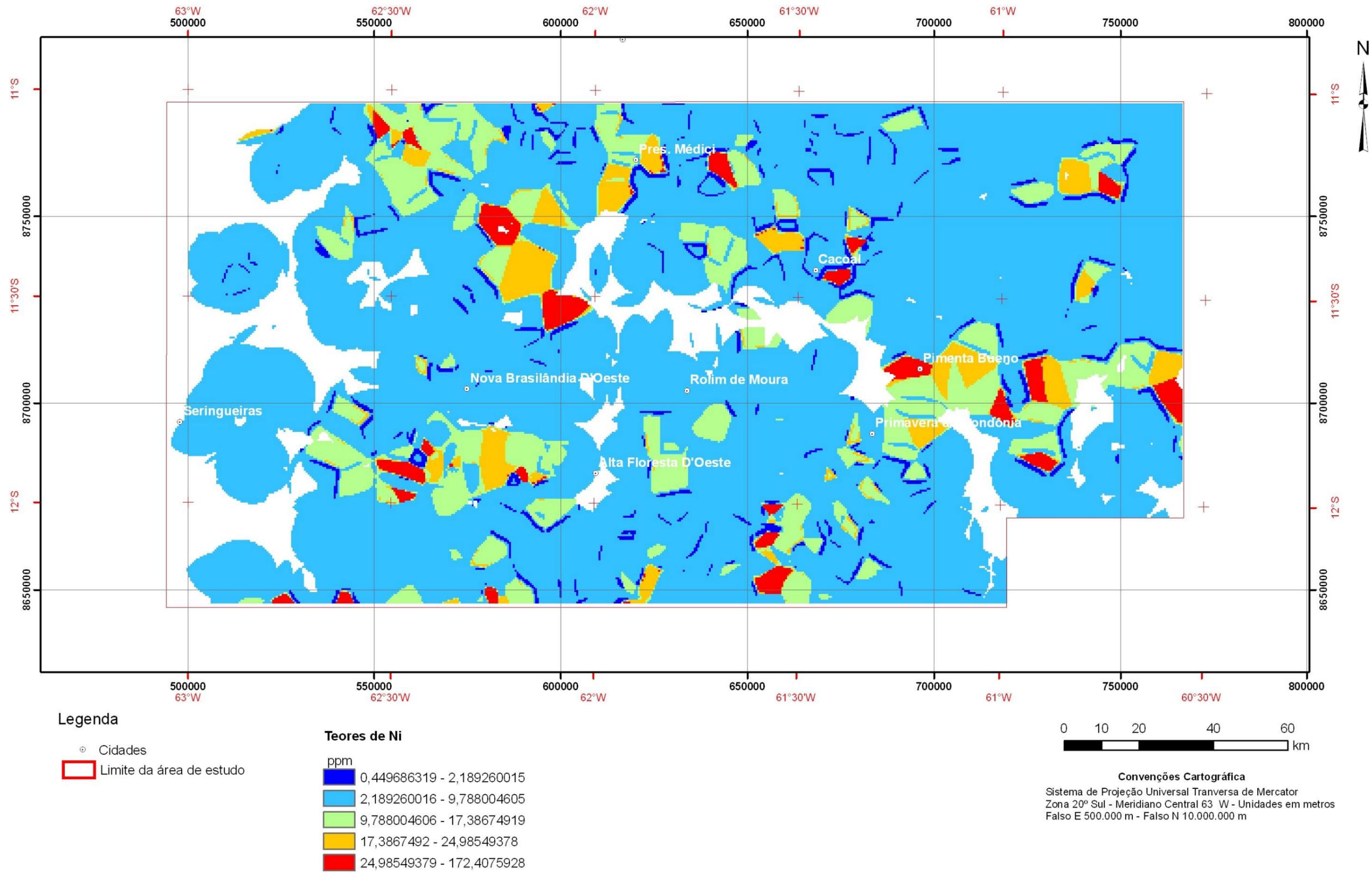


Figura 4.11: Mapa geoquímico de teores de Ni gerado por IDW-Multifractal.

Tabela 4.2: Tabela comparativa entre estatísticas básicas dos dados originais e das superfícies geradas por interpolação multifractal para Co, Cu e Ni.

Grandeza Estatística	Dados Originais			Superfícies Interpoladas pelo IDW Multifractal		
	Co(ppm)	Cu(ppm)	Ni(ppm)	Co(ppm)	Cu(ppm)	Ni(ppm)
Mínimo	2,50	2,50	2,50	0,82	0,11	0,45
Máximo	200,00	629,00	100,00	286,81	1.116,11	172,40
Média	8,48	204,75	6,43	7,59	205,92	6,21
Desvio Padrão	13,04	210,09	8,01	11,94	211,52	7,60

A interpolação multifractal é especialmente útil na identificação e realce de anomalias geoquímicas discretas, que em outros tipos de interpolação, como a krigagem, são suavizadas (Cheng, 1999; Li *et al.*, 2004; Robinson *et al.*, 2004).

4.3. Comparação entre os resultados da krigagem e da interpolação multifractal baseada no Índice Normalizado Residual - INR

Ambos os métodos interpolatórios utilizados buscam criar um modelo na forma de uma superfície matemática que melhor se aproxime da realidade dos dados. Existem diferentes formas de se avaliar a qualidade do resultado de uma interpolação e uma delas é o Índice Normalizado Residual – INR (Berry, 1997; Nóbrega, 2001).

Os resíduos de uma distribuição são calculados pela diferença entre o valor da amostra e o valor, no mesmo local, da superfície interpolada. Berry (1997) sugere o cálculo do Índice Normalizado Residual (INR) como um método para comparação dos valores originais e os interpolados. O INR é a razão entre a média dos resíduos absolutos e a média dos valores originais. Quanto menor o valor do INR para uma superfície, mais próxima estará essa interpolação dos dados originais.

A Tabela 4.3 apresenta os valores do INR para a krigagem e para a interpolação multifractal dos teores de Co, Cu e Ni em sedimentos de corrente. Os INRs da interpolação multifractal para o Co e o Ni apresentam valores de cerca de um terço dos valores krigados,

enquanto que os INR de ambas as interpolações para Cu têm valores muito próximos. De acordo com este índice, a krigagem seria a interpolação ideal para o Cu e a IDW Multifractal para o Co e Ni.

Tabela 4.3: Valores do INR para a krigagem e para a interpolação multifractal dos teores de Co, Cu e Ni em sedimentos de corrente.

Elementos	INR Krigagem	INR Interpolação multifractal
Co	0,336038	0,117276
Cu	0,009756	0,011361
Ni	0,271872	0,088415

A krigagem, por definição, é uma interpolação exata e teoricamente não deveria gerar, em um mesmo ponto, valores interpolados diferentes dos valores reais. Estas diferenças são decorrentes do ajuste do semi-variograma do conjunto de dados a um modelo de semi-variograma cuja função matemática que o define é conhecida.

4.4. Identificação de anomalias pelo método C-A

Uma das principais questões da prospecção geoquímica está em definir quais populações ou teores devem ser considerados como anômalos e quais devem ser considerados como valores de base (Gripp, 1992; Cheng, 1994; Robinson *et al.*, 2004). Alguns autores, como Reedman (1979), sugerem alguns valores de limiar entre valores de base e anomalia baseados em experiências em exploração mineral. Outros usam estatísticas básicas ou mesmo geoestatística pra separar estes valores (Gripp, 1992).

A recente aplicação de modelos fractais ao tratamento de dados geoquímicos traz uma nova perspectiva a esta questão. Cheng (1994) mostra que a relação entre a concentração de determinado elemento químico e as áreas em que ocorrem valores maiores ou iguais a essas concentrações seguem um modelo fractal, conforme a Equação 4.1 a seguir, onde $A_{(\rho)}$ representa a área em que ocorrem teores maiores ou iguais a concentração ρ , α denota proporcionalidade e d é a dimensão fractal da superfície geoquímica em questão.

$$A(\rho) \propto \rho^{-d}$$

Equação 4.1

De forma concreta, esta equação sugere a relação área das de diferentes isopletas (curvas de isovalores de concentração) em mapas geoquímicos seguem modelos fractais. Com base nessas relações fractais, Cheng (1994) apresenta um método baseado em modelos fractais para a separação de anomalias geoquímicas: o Modelo Concentração – Área (C-A).

Este método baseia-se na construção de gráficos logarítmicos da área onde existem concentrações maiores que determinado valor em função deste mesmo valor. O alinhamento dos pontos desses gráficos segundo diferentes linhas de tendência marcam populações de base e anomalias de uma ou mais ordens (Cheng *et al.*, 1996).

A aplicação do Modelo C-A às superfícies geoquímicas interpoladas por krigagem e IDW Multi-fractal para Co, Cu e Ni foi realizada com o programa GEODAS Fase III. A Figura 4.12 ilustra os gráficos C-A das superfícies krigadas e a Figura 4.13, os das superfícies interpoladas pelo IDW Multi-fractal.

As superfícies krigadas e interpoladas pelo IDW Multi-fractal foram divididas em três populações: valores de base, anomalias de 1ª ordem e anomalias de 2ª ordem. A Tabela 4.4 resume os limites em ppm entre as três populações das superfícies krigadas e interpoladas pelo IDW Multi-fractal.

Tabela 4.4: Limites entre as populações de valores de base, anomalias de 1ª ordem e anomalias de 2ª ordem individualizadas pelo método CA em superfícies interpoladas por krigagem e IDW Multi-fractal.

	Superfícies krigadas			Superfícies interpoladas pelo IDW Multi-fractal		
	Co	Cu	Ni	Co	Cu	Ni
Valores de base	0-10,17	0-260,65	0-14,49	0-98,49	0-252,53	0-14,99
Anomalia 1ª ordem	10,18-45,73	260,66-563,16	14,50-43,95	98,50-199,32	252,54-600,25	15,00-103,96
Anomalia 2ª ordem	45,74-103,98	563,17-664,80	43,96-55,88	199,32-286,81	600,26-1116,11	103,96-172,40

Os mapas de anomalias geoquímicas baseados no Modelo C-A para as superfícies interpoladas por krigagem e IDW Multi-fractal encontram-se ilustradas respectivamente nas figuras 4.14 e 4.15 e em maior escala nos anexos digitais 10 e 11.

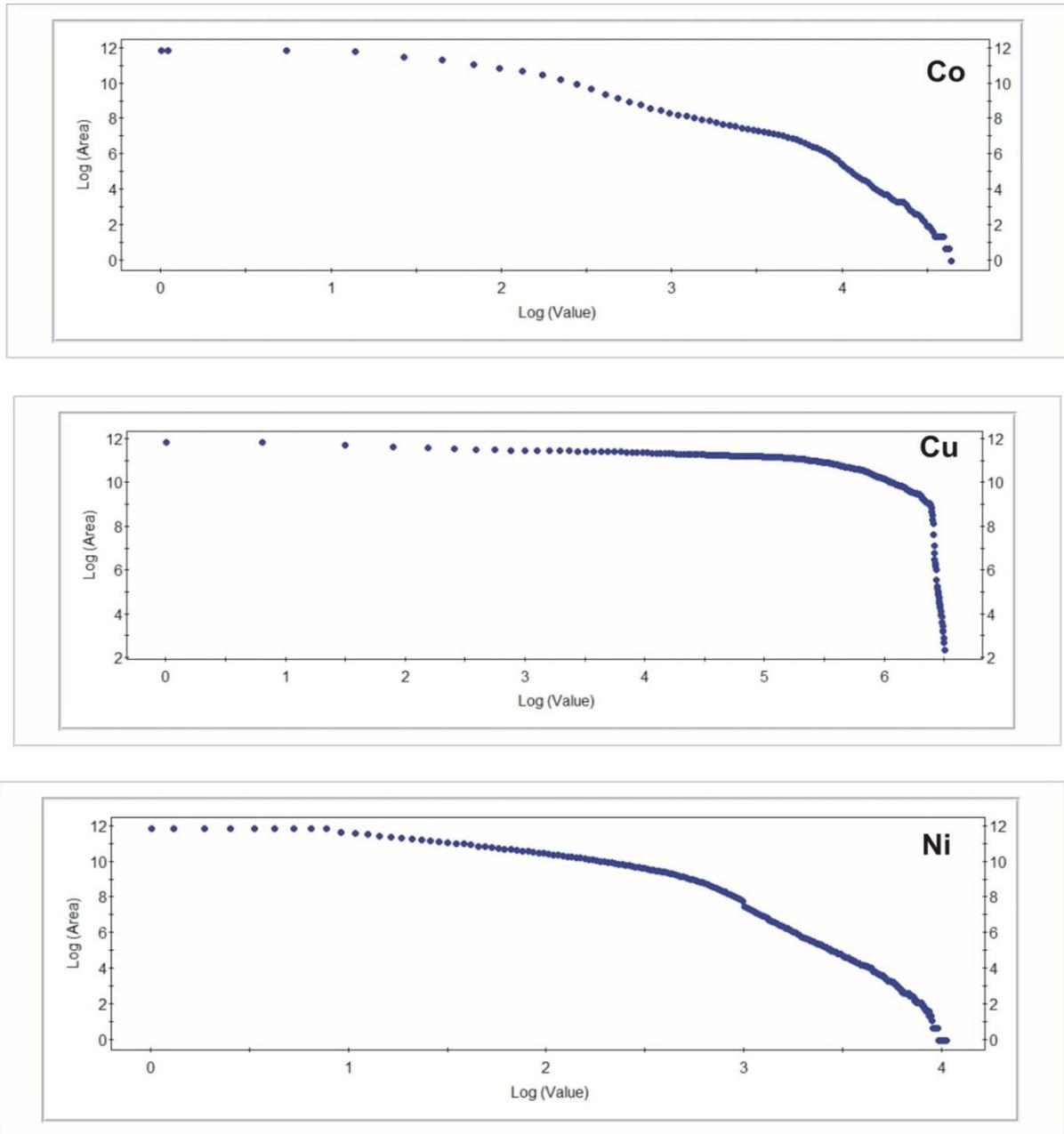


Figura 4.12: Gráficos C-A das superfícies krigadas para Co, Cu e Ni. Os alinhamentos segundo diferentes linhas de tendência separam populações de base, anomalia de 1ª ordem e anomalia de 2ª ordem.

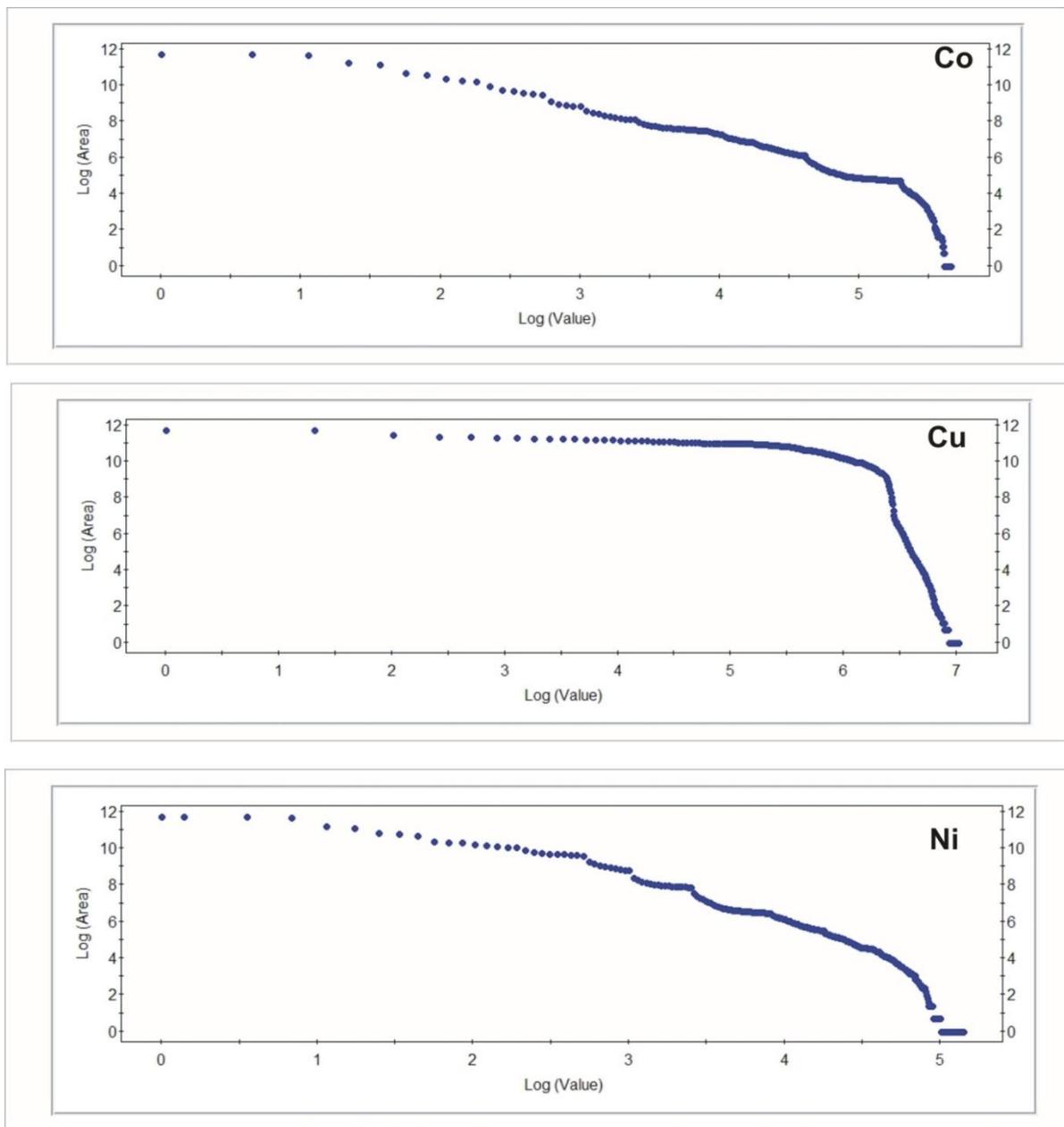


Figura 4.13: Gráficos C-A das superfícies interpoladas com o IDW Multi-fractal para Co, Cu e Ni. Os alinhamentos segundo diferentes linhas de tendência separam populações de base, anomalia de 1^a ordem e anomalia de 2^a ordem.

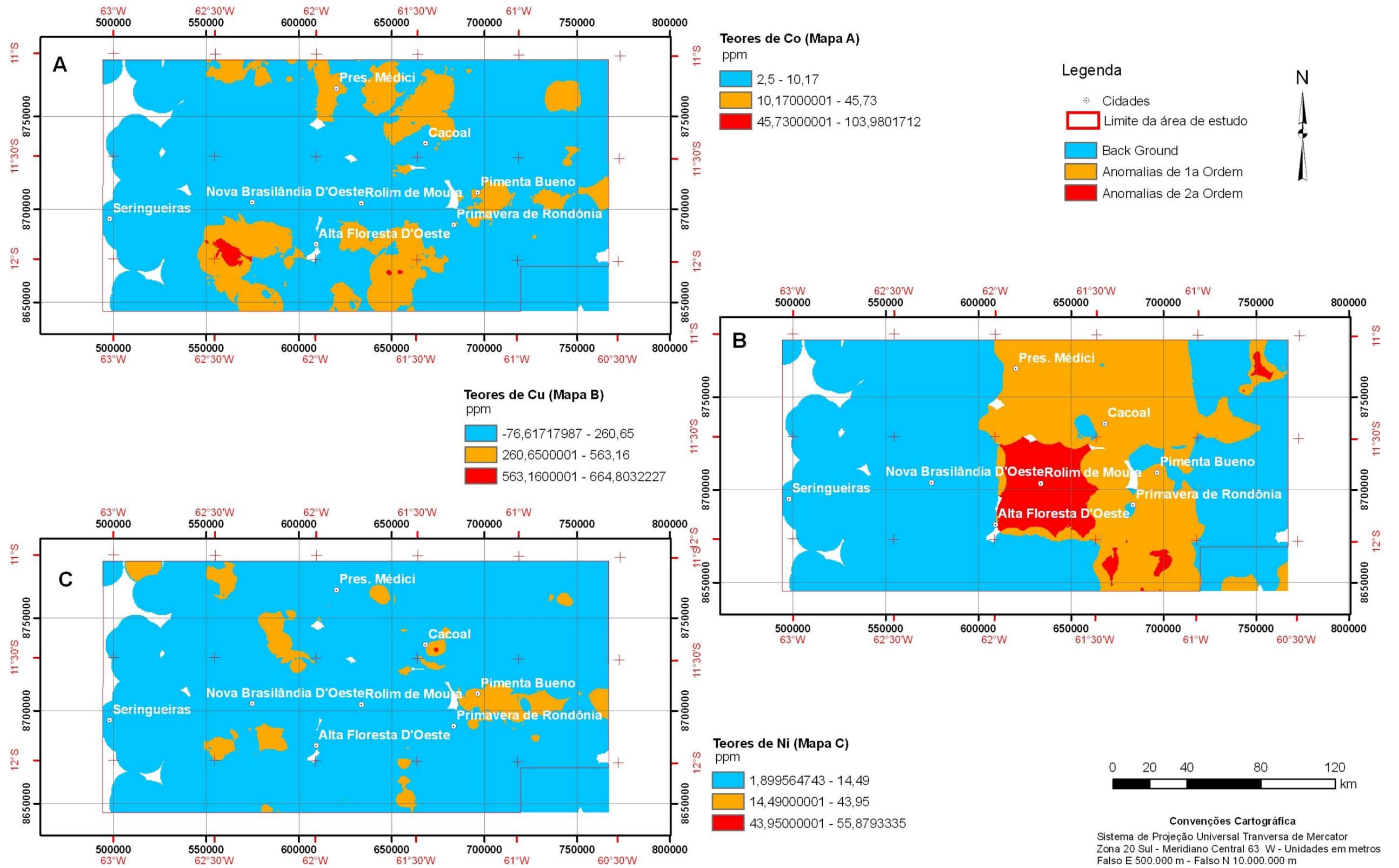


Figura 4.14: Mapas de anomalias geoquímicas gerados pela aplicação do Modelo C-A em superfícies interpoladas por krigagem (A: Co; B: Cu e C: Ni).

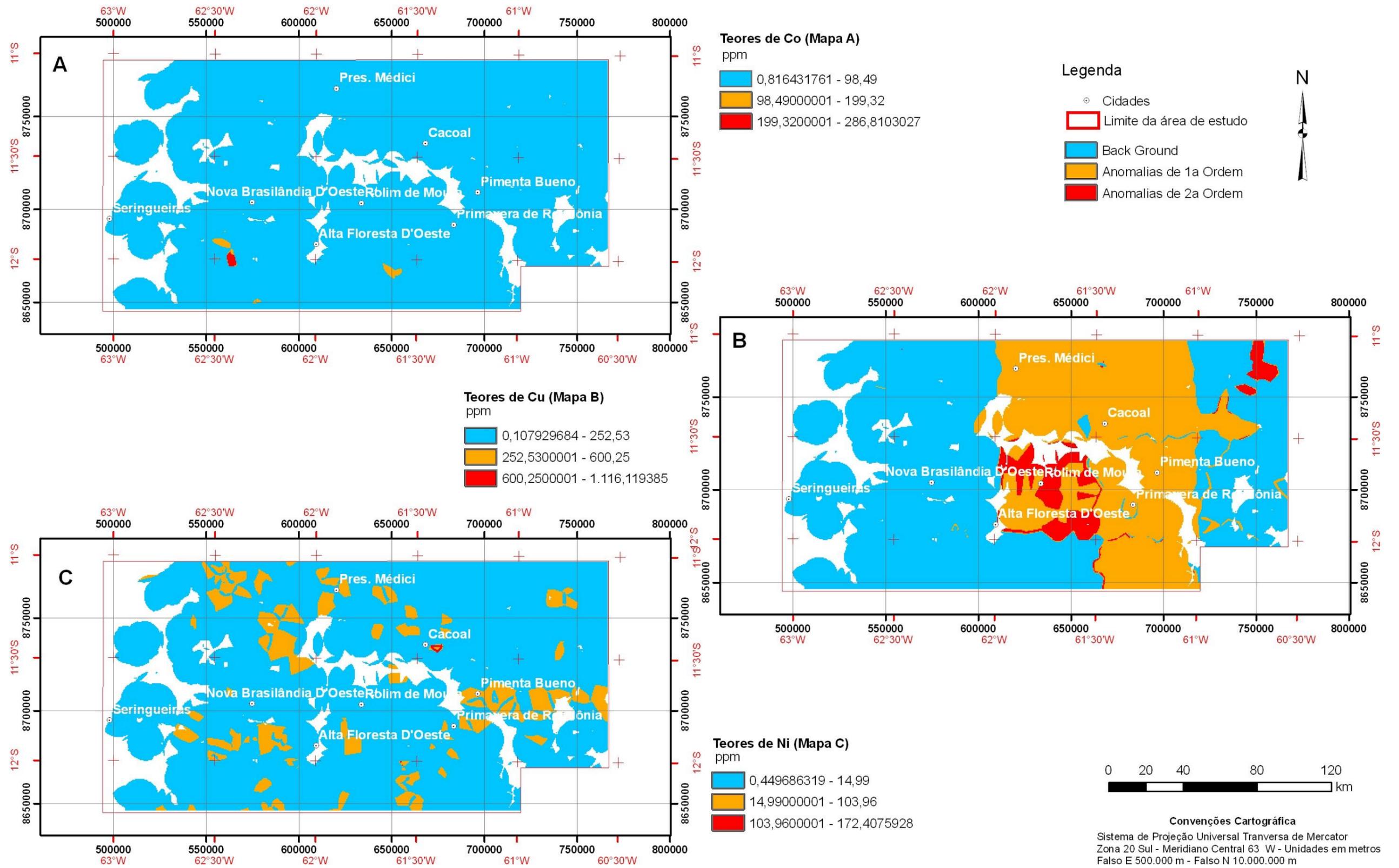


Figura 4.15: Mapas de anomalias geoquímicas gerados pela aplicação do Modelo C-A em superfícies interpoladas por IDW Multi-fractal (A: Co; B: Cu e C: Ni).

5. MAPEAMENTO DO POTENCIAL MINERAL PARA NI E AU NO CINTURÃO METASSEDIMENTAR NOVA BRASILÂNDIA - RONDÔNIA POR MEIO DE LÓGICA NEBULOSA (FUZZY) E REDES NEURAS ARTIFICIAIS

Uma das finalidades mais avançadas de um SIG é a criação de modelos previsionais dos fenômenos estudados (Bonham-Carter; 1994). No caso da exploração mineral, busca-se prever onde se encontram depósitos minerais por meio da análise de um conjunto de dados, denominados planos de informação, como geologia, geofísica e geoquímica, construindo-se mapas de favorabilidade mineral para o bem procurado (Singer e Kouda, 1996, Silva, 1999; Brown *et al.* 2000; Nóbrega, 2001; Harris *et al.*, 2001; Porwal *et al.*, 2003).

Bonham-Carter (1994) classifica as várias técnicas de modelagem em SIG para mapeamento do potencial mineral em duas abordagens distintas: a guiada pelo conhecimento (lógica booleana, lógica nebulosa ou *fuzzy, index overlay*), em que os parâmetros do modelo de prospectivo são definidos por um especialista, e a guiada pelos dados (pesos de evidência, regressão logística, razões de probabilidade, redes neurais artificiais), na qual o modelo é calculado a partir das ocorrências conhecidas.

Como não foram encontrados ainda depósitos de Ni no CMNB, a abordagem guiada pelo conhecimento foi adotada na modelagem da favorabilidade mineral para Ni, por meio do método de lógica nebulosa (*fuzzy*). Os garimpos de Au cadastrados foram utilizados na modelagem guiada pelos dados para favorabilidade mineral deste recurso com a utilização da técnica de redes neurais artificiais.

5.1. Modelagem por Lógica Nebulosa (*Fuzzy*)

A lógica nebulosa ou lógica *fuzzy* é uma adaptação mais maleável da lógica booleana. Na lógica booleana, aos conjuntos de dados de cada plano de informação como mapas geológico, estrutural, geofísicos ou geoquímicos, é associado pelo especialista um peso com valor binário de 0 ou 1 para a ausência ou presença de potencial mineral de dada substância (Bonham-Carter, 1994).

Por exemplo, uma modelagem com lógica booleana do potencial mineral para Ni sulfetado, as rochas básicas e ultrabásicas seriam associadas ao valor 1 e as demais ao valor 0,

anomalias geoquímicas de Ni seriam também relacionadas ao valor 1 e os teores de base ao valor 0. Desta forma também se procederia com as anomalias magnéticas e de condutividade.

As várias evidências são então combinadas por meio de dois operadores booleanos principais: o operador **E**, que faz prevalecer sempre o menor valor entre duas evidências; e o operador **OU**, que mantém no resultado o maior valor (Bonham-Carter, 1994).

Uma mapa de favorabilidade mineral gerado por lógica booleana tem, portanto, apenas duas classes: favorável (valor 1) ou não favorável (valor 0), o que é uma forma demasiadamente rígida de se tratar fenômenos associados à formação de depósitos minerais.

A lógica nebulosa é dita mais maleável porque no processo de atribuição de pesos às diferentes evidências, os valores, chamados de possibilidade *fuzzy*, são fracionários e variam entre 0 para ausência e 1 para a presença potencial de um depósito, sendo que os valores intermediários significam diferentes graus de possibilidade da existência ou não de um depósito (Bonham-Carter, 1994).

No exemplo acima, a modelagem com lógica nebulosa do potencial mineral para Ni sulfetado, as rochas básicas e ultrabásicas poderiam ser associadas ao valor 0,75 e as demais ao valor 0,10. Altos valores de Ni e Co em amostras de geoquímica poderiam ter seus valores linearmente associados a um mínimo de 0,1 e um máximo de 0,9, assim como os valores da amplitude do sinal analítico ou da condutividade total.

Além da maior flexibilidade na atribuição das possibilidades, a lógica nebulosa conta com um leque mais variado de operadores (Boham-Carter, 1994). Os operados **E** e **OU** mantêm no resultado respectivamente os menores e maiores valores de possibilidade nebulosa das evidências envolvidas, conforme as equações 5.1 e 5.2 que se seguem, onde $\mu_{(E)}$ e $\mu_{(OU)}$ representam a possibilidade nebulosa resultante e μ_A , μ_B e μ_C são as possibilidades *fuzzy* estipuladas para as evidências A, B e C.

$$\mu_{(E)} = \text{MIN} (\mu_A, \mu_B, \mu_C) \quad \text{Equação 5.1}$$

$$\mu_{(OU)} = \text{MAX} (\mu_A, \mu_B, \mu_C) \quad \text{Equação 5.2}$$

O Produto Algébrico *Fuzzy* é um produtório entre as possibilidades *fuzzy* das várias evidências envolvidas (Equação 5.3, onde $\mu_{(produto)}$ é a possibilidade *fuzzy* resultante e μ_i representa as várias possibilidades *fuzzy* das evidências de 1 até **n**). Esta multiplicação acarreta numa diminuição da possibilidade *fuzzy* resultante, mas, diferentemente do operador E, todas as evidências têm participação.

$$\mu_{(\text{produto})} = \prod^n \mu_i \quad \text{Equação 5.3}$$

A Soma Algébrica *Fuzzy* é calculada pela diferença entre a unidade e o produto das diferenças entre a unidade e as possibilidades *fuzzy* das evidências combinadas (Equação 5.4, onde $\mu_{(\text{soma})}$ é a possibilidade *fuzzy* resultante e μ_i representa as várias possibilidades *fuzzy* das evidências de 1 até n). Esta operação sempre gera um incremento na possibilidade *fuzzy* resultante e conta com a contribuição de todas as evidências.

$$\mu_{(\text{soma})} = 1 - \prod^n (1 - \mu_i) \quad \text{Equação 5.4}$$

O operador Gama *Fuzzy* faz uma combinação ponderada entre o Produto Algébrico *Fuzzy* e a Soma Algébrica *Fuzzy* conforme a Equação 5.5, onde o índice de ponderação γ é estipulado pelo especialista com valor entre 0 e 1, favorecendo ou o efeito do produto ou efeito de incremento da soma, respectivamente.

$$\mu_{(\text{gama})} = \mu_{(\text{soma})}^\gamma * \mu_{(\text{produto})}^{1-\gamma} \quad \text{Equação 5.5}$$

A lógica nebulosa, portanto, é considerada uma forma mais maleável de integrar e modelar dados geológicos, sendo esta flexibilidade ideal para o tratamento dos fenômenos associados à formação de depósitos minerais.

Na modelagem por lógica nebulosa, as funções do especialista são, de acordo com o modelo prospectivo escolhido:

- atribuir, em cada um dos planos de informação como mapa geológico e imagens geofísicas ou geoquímica, as possibilidades *fuzzy* para diferentes classes ou valores numéricos; e
- determinar quais operadores *fuzzy* serão utilizados na integração entre os planos de informação.

A atribuição da possibilidade *fuzzy* aos dados é tratada em duas abordagens. A primeira é de dados ditos categóricos, em que as classes do plano de informação não tem significado numérico, como por exemplo o mapa litológico, em que a cada unidade litológica é atribuído um valor de possibilidade *fuzzy*.

A outra é dos dados numéricos, como por exemplo mapas geoquímicos e geofísicos, em os planos de informação representam valores numéricos e cujos os valores de possibilidade *fuzzy* podem ser estabelecidos conforme funções pré-definidas presentes na extensão ArcSDM 3.2.

No presente trabalho, foram utilizados os seguintes planos de informação na elaboração de um modelo de potencial mineral de Ni no CMNB com base em lógica *fuzzy*: mapa litológico

(Anexo Digital 5), imagem da amplitude do sinal analítico (Anexo Digital 1), imagens gamaespectrométricas dos canais K, Th e U (Anexo Digital 2) e malhas regulares de teores de Co e Ni em sedimentos de corrente interpolados por *IDW-Multifractal* (Anexo Digital 9).

O modelo prospectivo adotado para áreas favoráveis considera a ocorrência de rochas básicas; altos valores de amplitude do sinal analítico que representam fontes de anomalias magnetométricas, baixos valores de radiação gama nos canais K, Th e U e anomalias geoquímicas delineadas pelo método C-A a partir das malhas regulares de teores de Co e Ni interpoladas pelo *IDW-Multifractal*.

As várias unidades litoestratigráficas do mapa geológico foram divididas em seis grupos de possibilidade *fuzzy* conforme a Tabela 5.1. Os operadores *fuzzy* não têm como considerar valores em branco (*missing values*) e a possibilidade *fuzzy* deve variar sempre entre 0 e 1. Assim, as unidades fanerozóicas que podem ou não recobrir áreas favoráveis receberam o valor 0.

Tabela 5.1: Possibilidades *fuzzy* atribuídas às unidades litoestratigráficas do mapa geológico.

Unidades Litoestratigráficas	Possibilidade <i>fuzzy</i>	Justificativa
Fm. Rio Branco e Suíte Intrusiva Alta Floresta	0,9	Rochas básicas associadas ao CMNB
Suíte Intrusiva Cacoal	0,7	Rochas básicas a ultrabásicas não pertencentes ao CMNB
Fm Migrantinópolis	0,5	Rochas metassedimentares com intrusões básicas associadas ao CMNB
Fm Palmeiral e Fm Dardanelos	0,3	Rochas metassedimentares não pertencentes ao CMNB
Complexo Jamari, Grupo Roosevelt, suítes intrusivas Serra da Providência, São Romão, Alto Candeias, Rio Pardo e Costa Marques,	0,1	Gnaisses, granitóides e rochas vulcânicas ácidas
Grupo Primavera e coberturas detrito-lateríticas	0	Unidades fanerozóicas que podem ou não recobrir áreas favoráveis

As possibilidades *fuzzy* dos planos de informação geofísicos, todos de caráter numérico, foram definidas com base nas funções da extensão Arc-SDM 3.2 *Small* e *Large*, que respectivamente atribuem altos valores de possibilidade *fuzzy* aos menores e aos maiores valores contidos no plano de informação. As funções *Small* e *Large* são apresentadas respectivamente

nas equações 5.6 e 5.7, onde $\mu_{(x)}$ é a possibilidade *fuzzy*, x representa determinado valor no plano de informação, M é o ponto médio e S o espalhamento. A constante b é igual a 0 para planos de informação com dados numéricos não negativos ou igual ao valor mínimo de planos de informação que contêm dados numéricos negativos.

$$\mu_{(x)} = \frac{1}{1+((x-b)/M)^S} \quad \text{Equação 5.6}$$

$$\mu_{(x)} = \frac{1}{1+((x-b)/M)^{-S}} \quad \text{Equação 5.7}$$

Ambas as funções atribuem a possibilidade *fuzzy* próxima a 0,5 para valores concentrados em torno de um ponto médio (*Midpoint*), definido pelo usuário que também arbitra um valor de espalhamento (*Spread*) utilizado nas funções. Foi observado que quanto maior o espalhamento, mais abrupta a transição entre valores menores e maiores que o ponto médio.

A imagem da amplitude do sinal analítico foi primeiramente convertida para uma resolução de 8 *bits*. Os valores de possibilidade *fuzzy* para este plano de informação foram definidos com base na função *Large* com ponto médio em 150, espalhamento igual a 5 e constante b igual a 0, ilustrada na Figura 5.1. A função *Large* foi escolhida por atribuir altos valores de possibilidade *fuzzy* às anomalias magnetométricas, seguindo o modelo prospectivo proposto.

As possibilidades *fuzzy* para as imagens gamaespectrométricas foram definidas com base em funções *Small* com pontos médios em 18 para o K, 19 para o Th e 12 para o U, espalhamentos de 7 e constantes b iguais a 12 para o K, 21 para o Th e 13 para U. As figuras 5.2, 5.3 e 5.4 exibem os gráficos das funções *fuzzy* aplicadas aos dados gamaespectrométricos. A função *Small* foi escolhida por atribuir maiores valores de possibilidade *fuzzy* a áreas com baixos valores de contagem de radiação gama nos três canais.

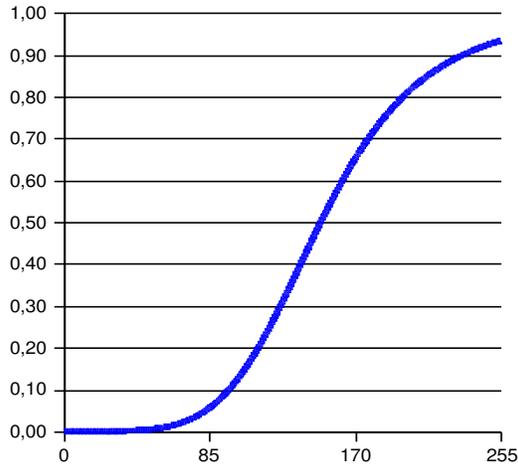


Figura 5.1: Gráfico da função *Large* utilizada para atribuir valores de possibilidade *fuzzy* à imagem da amplitude do sinal analítico.

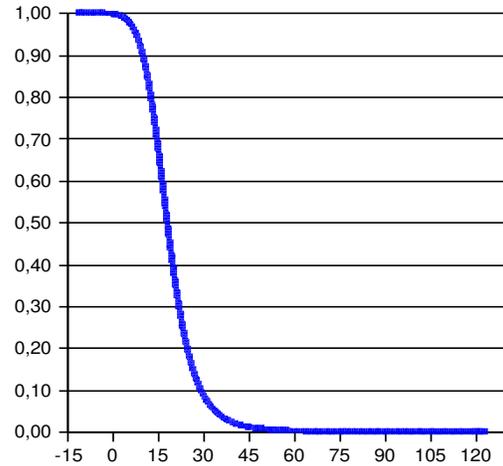


Figura 5.2: Gráfico da função *Small* utilizada para atribuir valores de possibilidade *fuzzy* à imagem gamaespectral do canal do K.

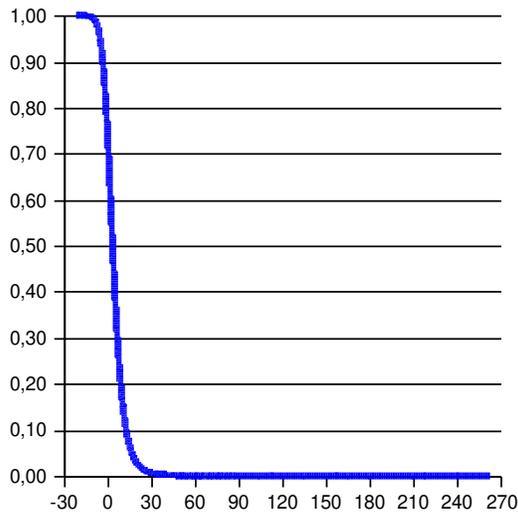


Figura 5.3: Gráfico da função *Small* utilizada para atribuir valores de possibilidade *fuzzy* à imagem gamaespectral do canal do Th.

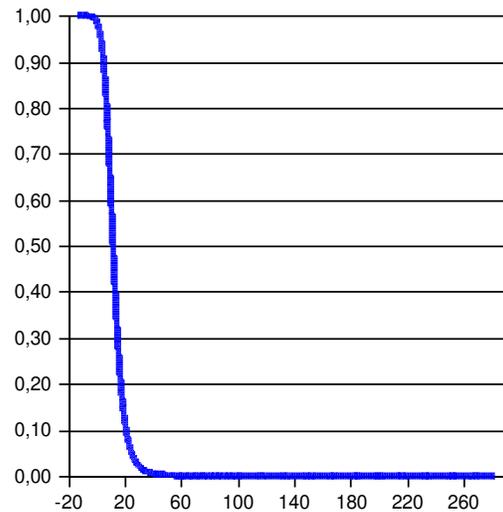


Figura 5.4: Gráfico da função *Small* utilizada para atribuir valores de possibilidade *fuzzy* à imagem gamaespectral do canal do U.

No caso dos dados gamaespectrométricos, a possibilidade *fuzzy* foi considerada 0 para áreas fanerozóicas, pois a gamaespectrometria nestas áreas representa as respostas das rochas sedimentares que recobrem as unidades mais antigas e podem ocultar áreas favoráveis.

As possibilidades *fuzzy* dos planos de informação geoquímicos (malhas regulares de teores de Co e Ni em sedimentos de corrente interpolados por *IDW*-Multifractal) foram definidas com base na função Linear da extensão Arc-SDM 3.2. Esta função atribui possibilidade *fuzzy* respectivamente igual a 0 ou 1 para valores menores ou maiores que determinados valores

mínimo ou máximo arbitrados pelo especialista e distribui linearmente valores de possibilidade *fuzzy* entre 0 e 1 para os valores entre o mínimo e o máximo definido.

A Equação 5.8 apresenta a função Linear utilizada na definição das possibilidades *fuzzy* dos dados geoquímicos, onde $\mu_{(x)}$ é a possibilidade *fuzzy*, x representa determinado valor no plano de informação, m e M são respectivamente os valores mínimo e máximo arbitrados pelo especialista.

$$\mu_{(x)} = 0 \text{ para } x \leq m; \mu_{(x)} = 1 \text{ para } x \geq M; \text{ e } \mu_{(x)} = \frac{(M-m)^{-1} \cdot x - m}{(M-m)} \quad \text{Equação 5.8}$$

Para ambos os mapas geoquímicos (teores de Co e Ni), as possibilidades *fuzzy* foram definidas com base em funções do tipo Linear, utilizando como mínimos os valores limiares entre os valores de base e de anomalia de 1ª ordem (98 ppm para Co e 15 ppm para Ni) e como máximos os limiares entre anomalias de 1ª e 2ª ordens (199 ppm para Co e 104 ppm para Ni), definidos pelo método C-A no Capítulo 4 desta dissertação. Os gráficos das funções utilizadas são apresentados nas figuras 5.5 e 5.6.

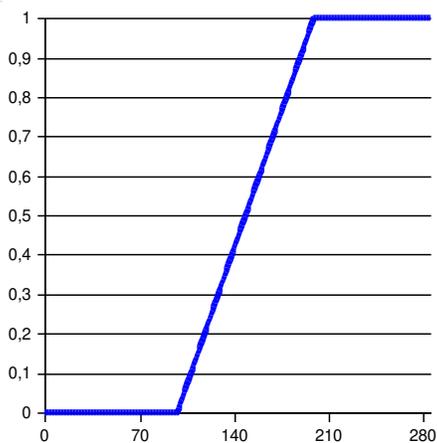


Figura 5.5: Gráfico da função Linear utilizada para atribuir valores de possibilidade *fuzzy* à malha regular de teores de Co em sedimentos de corrente interpolados por *IDW*-Multifractal.

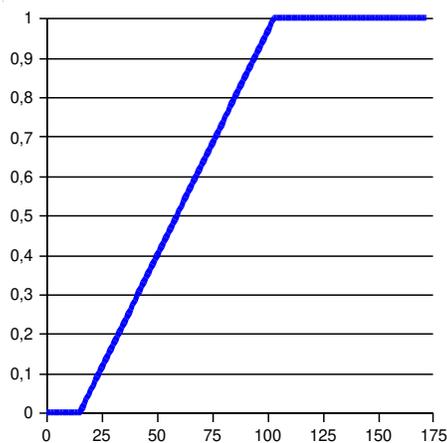


Figura 5.6: Gráfico da função Linear utilizada para atribuir valores de possibilidade *fuzzy* à malha regular de teores de Ni em sedimentos de corrente interpolados por *IDW*-Multifractal.

Em áreas em que não há interpolação de teores os valores de possibilidade *fuzzy* foram considerados 0, como no caso dos dados litológicos e gamaespectrométricos de áreas fanerozóicas.

Definidas as possibilidades *fuzzy* para os planos de informação, estes foram combinados utilizando-se variados operadores *fuzzy*.

Os mapas de possibilidade *fuzzy* dos dados gamaespectrométricos foram combinados por meio do PRODUTO, gerando um mapa de possibilidade *fuzzy* para os dados gamaespectrométricos, que foi combinado com o mapa de possibilidade *fuzzy* da imagem da amplitude do sinal analítico pelo operador SOMA, resultando no Mapa *Fuzzy* Geofísico.

Os dois mapas de possibilidades *fuzzy* geoquímicos (Co e Ni) foram combinados por meio da SOMA *fuzzy*, resultando no Mapa *Fuzzy* Geoquímico.

O Mapa *Fuzzy* Litológico resultou do processo de atribuição de possibilidades *fuzzy* ao mapa litológico.

Por fim, os mapas *fuzzy* Geofísico e Litológico foram combinados por meio do operador SOMA. O mapa *fuzzy* resultante desta soma foi combinado como o Mapa *Fuzzy* Geoquímico também por meio do operador SOMA, resultando no Mapa de Potencial Mineral para Ni no CMNB, que foi reclassificado em cinco classes de potencial mineral para Ni.

A Figura 5.7 ilustra o fluxograma da modelagem fuzzy descrita. A Figura 5.8 apresenta o Mapa do Potencial Mineral para Ni no CMNB, reapresentado em escala 1:500.000 no Anexo Digital 12, resultado da modelagem descrita.

Os valores de possibilidade *fuzzy* foram reclassificados em 5 classes de potencial mineral para Ni: Alto, com valores entre 0,85 e 1,00; Intermediário a alto, com valores entre 0,60 e 0,85, Intermediário, com valores entre 0,40 e 0,60; Baixo, com valores entre 0,10 e 0,40; e Muito Baixo, com valores entre 0,00 e 0,10.

No modelo de potencial mineral apresentado na Figura 5.8, das 76 ocorrências de Ni cadastradas pela CPRM como indícios, 49 % encontram-se em áreas de alto potencial mineral, 16 % em áreas de potencial intermediário a alto, 26 % em áreas de potencial intermediário e 9 % em áreas de baixo potencial mineral para Ni.

Essas ocorrências são em sua maioria teores de Ni considerados anômalos em amostras de sedimentos de corrente pela CPRM, portanto, é aceitável que haja um deslocamento entre a ocorrência sua área fonte, como no caso das ocorrências situadas próximas à Suíte Intrusiva Cacoal, área de potencial intermediário a alto, ou a norte da Formação Rio Branco, área de potencial considerado alto.

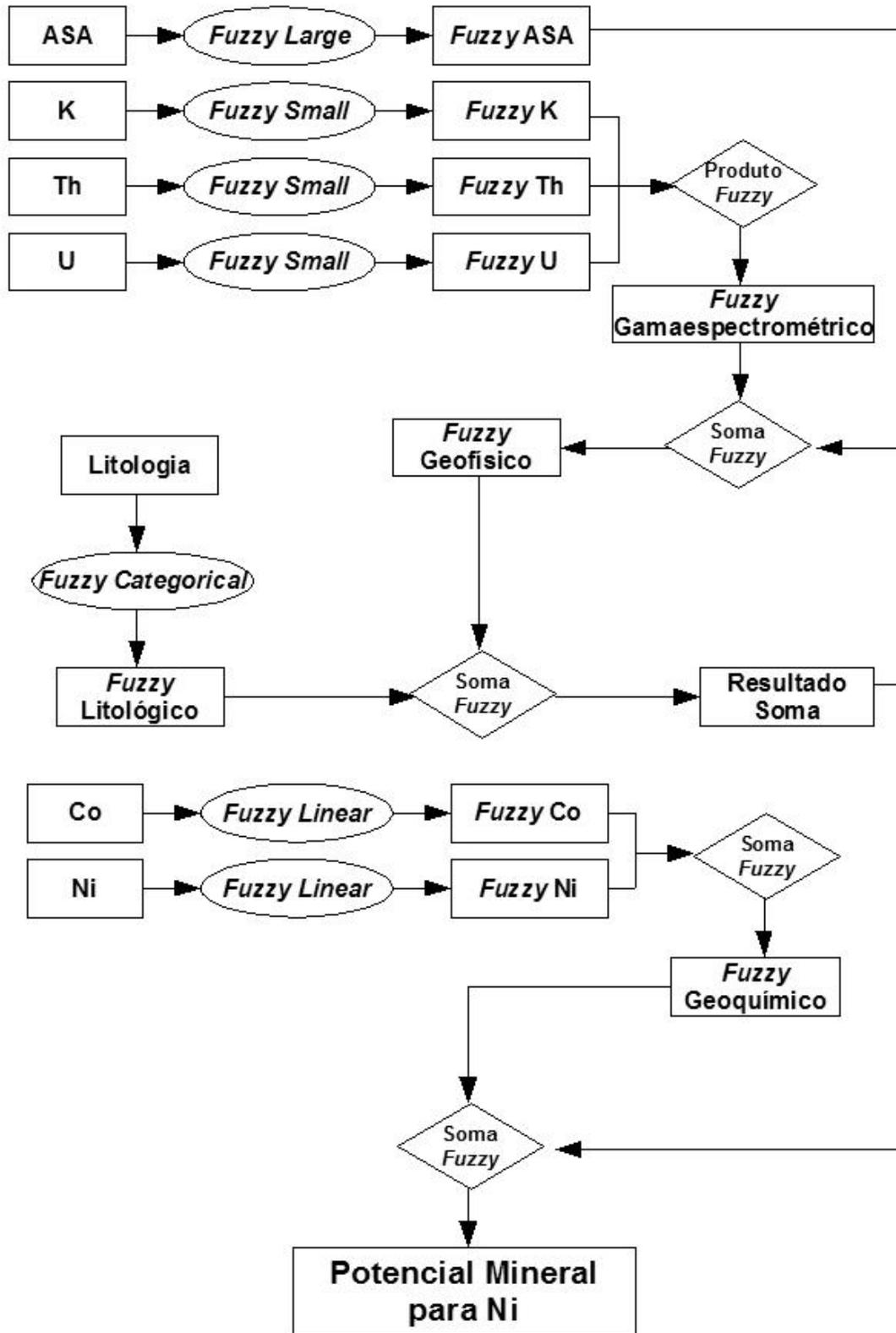
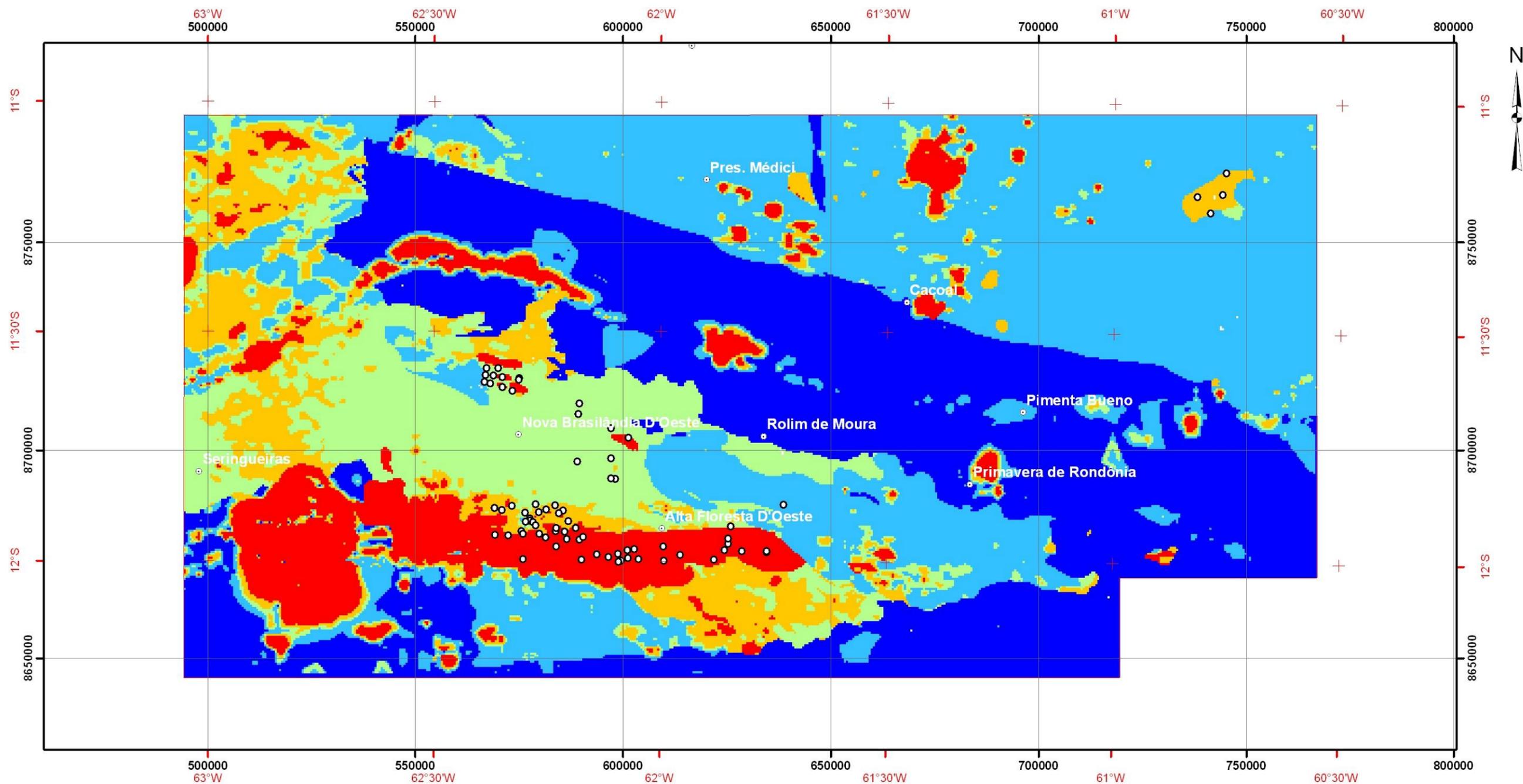


Figura 5.7: Fluxograma da modelagem *fuzzy* descrita visando o mapeamento do potencial mineral para Ni.



Legenda

- Cidades
- Limite da área de estudo
- Ocorrências de Ni

Potencial mineral para Ni

- Muito baixo
- Baixo
- Intermediário
- Intermediário a alto
- Alto



Convenções Cartográfica
 Sistema de Projeção Universal Transversa de Mercator
 Zona 20° Sul - Meridiano Central 63° W - Unidades em metros
 Falso E 500.000 m - Falso N 10.000.000 m

Figura 5.8: Mapa do Potencial Mineral para Ni no CMNB.

5.2. Modelagem por Redes Neurais

Redes neurais artificiais (RNA) são modelos computacionais distribuídos, paralelos, adaptativos e inspirados no raciocínio humano (Brown *et al.*, 2000; Nóbrega, 2001). As RNA imitam o processo de aprendizado humano na medida em aprendem com os dados de entrada disponíveis e aplicam este aprendizado (ou treinamento) para generalizar além destes dados (Porwal *et al.*, 2003).

Estas redes são compostas por elementos de processamento simples chamados de neurônios, que essencialmente são funções matemáticas, que por sua vez são interconectados por ligações associadas a coeficientes numéricos, denominados pesos sinápticos, que indicam a força de cada conexão e são sistematicamente alterados de forma a melhor adaptar os modelos à realidade conhecida (Haykin, 1994; Singer e Kouda, 1996; Porwal *et al.*, 2003).

As RNA possuem algumas propriedades que as tornam adequadas ao reconhecimento de padrões e à classificação de dados espaciais, tais como: facilidade para a análise de grandes conjuntos de dados; possibilidade de se trabalhar com dados ruidosos, limitados, interdependentes ou não-lineares; e habilidade em extrair padrões ocultos em conjuntos de dados que podem ser imperceptíveis ao seres humanos e às técnicas estatísticas tradicionais (Brown *et al.*, 2000; Porwal *et al.*, 2003).

As RNA de diferentes tipos baseiam-se em diferentes funções matemáticas. Looney (2002) desenvolveu a técnica de redes neurais baseada em funções de bases radiais (RNFBR) para mapeamento de potencial mineral que foi incorporada ao leque de ferramentas de modelagem espacial da extensão Arc-SDM 3.2 e utilizada neste trabalho.

Uma função de base radial com centro no vetor N-dimensional \mathbf{v} e parâmetro de espalhamento σ é definida para o vetor N-dimensional \mathbf{x} conforme a Equação 5.9, cujo gráfico esquemático é apresentado na Figura 5.9.

$$y = e^{-\|\mathbf{x}-\mathbf{v}\|^2 / 2\sigma^2} \quad \text{Equação 5.9}$$

Conforme ilustrado na Figura 5.9, todos os pontos \mathbf{x} equidistantes do centro \mathbf{v} retornam os mesmos valores de y na superfície gerada pela função de base radial, que decrescem à medida que os pontos \mathbf{x} se afastam de \mathbf{v} . A função de base radial apresentada é do tipo Gaussiano e em cada plano $x_n y$ a função tem a feição típica das funções gaussianas. Um número de M funções de

base radial podem ser centradas em M vetores centrais de forma que os círculos basais de raio σ tenham recobrimento de todo o espaço vetorial N-Dimensional

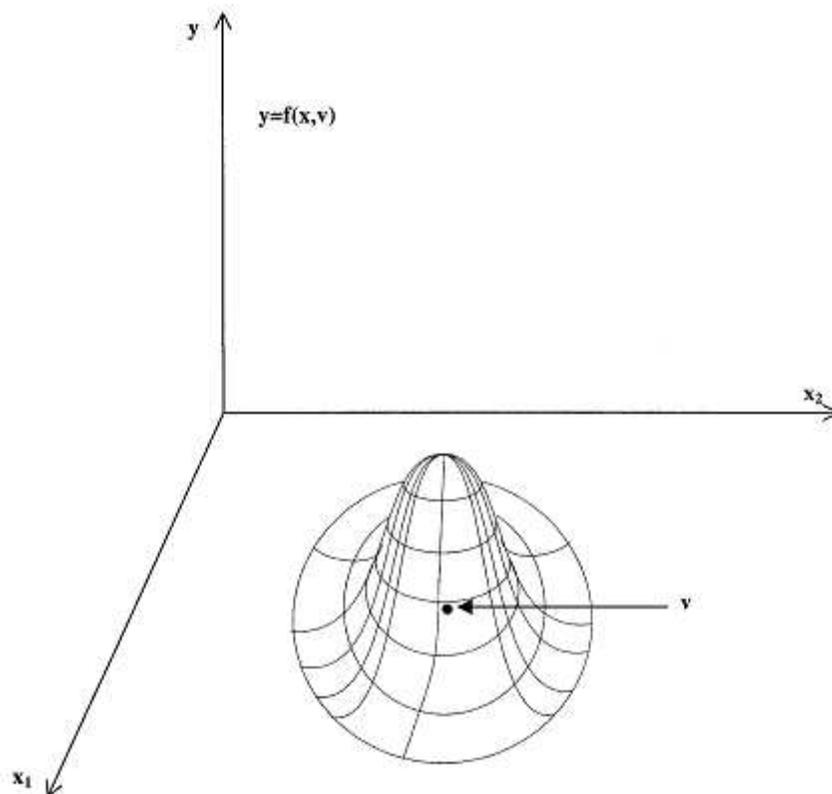


Figura 5.9: Gráfico esquemático de uma função de base radial centrada no vetor v em um espaço bidimensional (Porwal *et al*, 2003).

A arquitetura de uma RNFBR é composta por três camadas principais: uma camada de entrada composta por N neurônios cada qual associado a vetores de treinamento (que representam as variáveis dos planos de informação associadas ou não aos depósitos); uma camada oculta de M neurônios (que são funções de base radial) e uma camada de saída com J neurônios, conforme ilustrado na Figura 5.10. Cada vetor x da camada de entrada ativa as funções de base radial na camada oculta. Cada um dos M neurônios da camada oculta retorna um valor y para os N neurônios da camada de entrada. Estes valores de y são multiplicados pelos pesos sinápticos u_{mj} nas conexões entre os neurônios da camada oculta e da camada de saída. Adicionalmente, os vetores de entrada são conectados aos da camada de saída de forma ponderada pelos pesos sinápticos w_{nj} . Assim, cada um dos J neurônios da camada de saída é calculado com somatórios dos valores de y multiplicados pelos pesos sinápticos u_{mj} e dos valores de x multiplicados pelos pesos sinápticos w_{nj} acrescido do parâmetro b_j conforme a Equação 5.10 (Looney, 2002).

$$z_j^q = [1/(M+N)] \{ [\sum_{m=1}^M u_{mj} \cdot y_m^q] + [\sum_{n=1}^N w_{nj} \cdot x_n^q + b_j] \} \leftarrow t \quad \text{Equação 5.10}$$

Na etapa de treinamento da RNFBR, os pesos sinápticos u_{mj} e w_{nj} são constantemente modificados buscando-se o melhor ajuste da saída z aos pontos de treinamento t , que no caso da exploração mineral representam os depósitos conhecidos. O controle do ajuste dos pesos sinápticos fundamenta-se em um algoritmo baseado no método de propagação total, que busca minimizar, a cada iteração, a soma do quadrado dos erros para todos os vetores de entrada entre os resultados calculados e os pontos de treinamento (Looney, 2002).

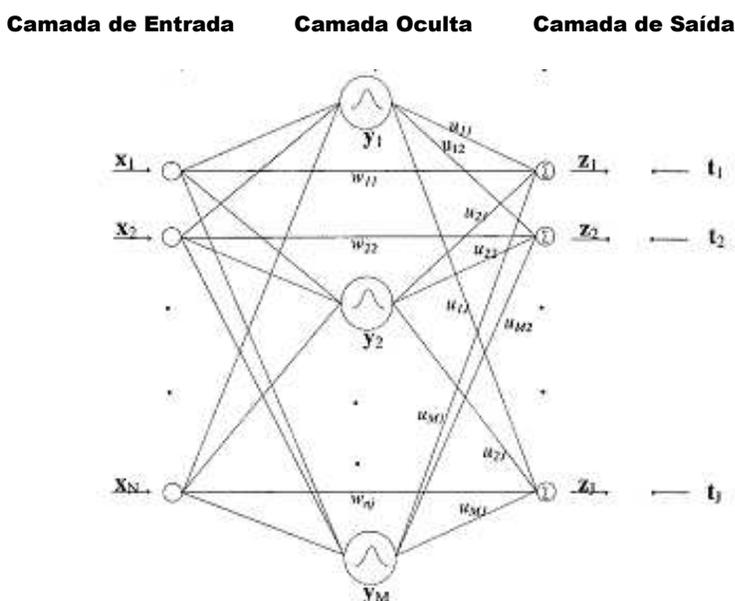


Figura 5.10: Arquitetura esquemática de uma RNFBR (modificado de Porwal *et al*, 2003). Na modelagem proposta, os vetores da camada de entrada são representados por 20 mapas de distâncias de lineamentos interpretados a partir de imagens magnetométricas e de sensores remotos.

Na modelagem do potencial mineral por meio de RNFBR é necessário definir os vetores de entrada, representados pelos planos de informação que serão utilizados no modelo, e as áreas testes, representadas pelos depósitos conhecidos, ao qual o modelo deve se ajustar.

As áreas testes devem incluir pontos de treinamento tipo depósito, representando depósitos do bem mineral prospectado, e pontos tipo não-depósito, onde sabidamente não há ocorrência deste bem mineral. Os depósitos devem abranger também um único tipo descritivo ou metalogenético do minério em análise.

O modelo de depósito de Au considerado neste trabalho é do tipo orogênico, caracterizado por depósitos de Au em terrenos metamórficos associados a veios de quartzo em zonas de cisalhamento desenvolvidas em margens tectônicas convergentes (Groves *et al.*, 1998).

Na área de estudo, dos nove garimpos de Au existentes, seis, associados a veios de quartzo ou às zonas de cisalhamento do CMNB, foram selecionados como pontos de treinamento tipo depósito, e cinco depósitos de rochas industriais ou ornamentais foram escolhidos como pontos tipo não depósito (Figura 5.11).

Os depósitos de Au do tipo orogenético apresentam forte controle lito-estrutural (Groves *et al.*, 1998), geralmente associados a estruturas de segunda ou terceira ordens próximo a zonas compressionais, por onde migram os fluidos mineralizantes, e a litologias em que as condições sejam favoráveis a precipitação do metal.

Assim, inicialmente foram utilizados como vetores de entrada para a RNFBR dezenove mapas de distâncias de lineamentos interpretados a partir de dados magnetométricos e de sensoriamento remoto conforme descrito no Capítulo 3 (grupos 9 a 28, exceto o grupo 16, já que não existem lineamentos geofísicos com as características dimensionais e direcionais deste grupo) e o mapa litológico, totalizando vinte vetores de entrada. O objetivo foi permitir que a RNFBR aplicada reconhecesse o padrão estrutural que controla a localização desses garimpos.

O treinamento envolveu 200 iterações e os valores de saída foram classificados em quatro classes de potencial mineral para Au: Alto, Médio, Baixo e Muito Baixo. A Figura 5.11 apresenta o Mapa do Potencial Mineral para Au no CMNB, resultante da modelagem descrita.

Observa-se na Figura 5.11 que as áreas de alto potencial mineral para Au não se comportam conforme as tendências lito-estruturais observadas no mapa geológico ou em imagens geofísicas ou de sensoriamento remoto. Isso possivelmente ocorreu porque no processamento os vetores de entrada têm influências iguais no modelo resultante, e a utilização de dezenove planos de informação estrutural implica na consideração de que o controle estrutural da mineralização é dezenove vezes mais importante que o litológico.

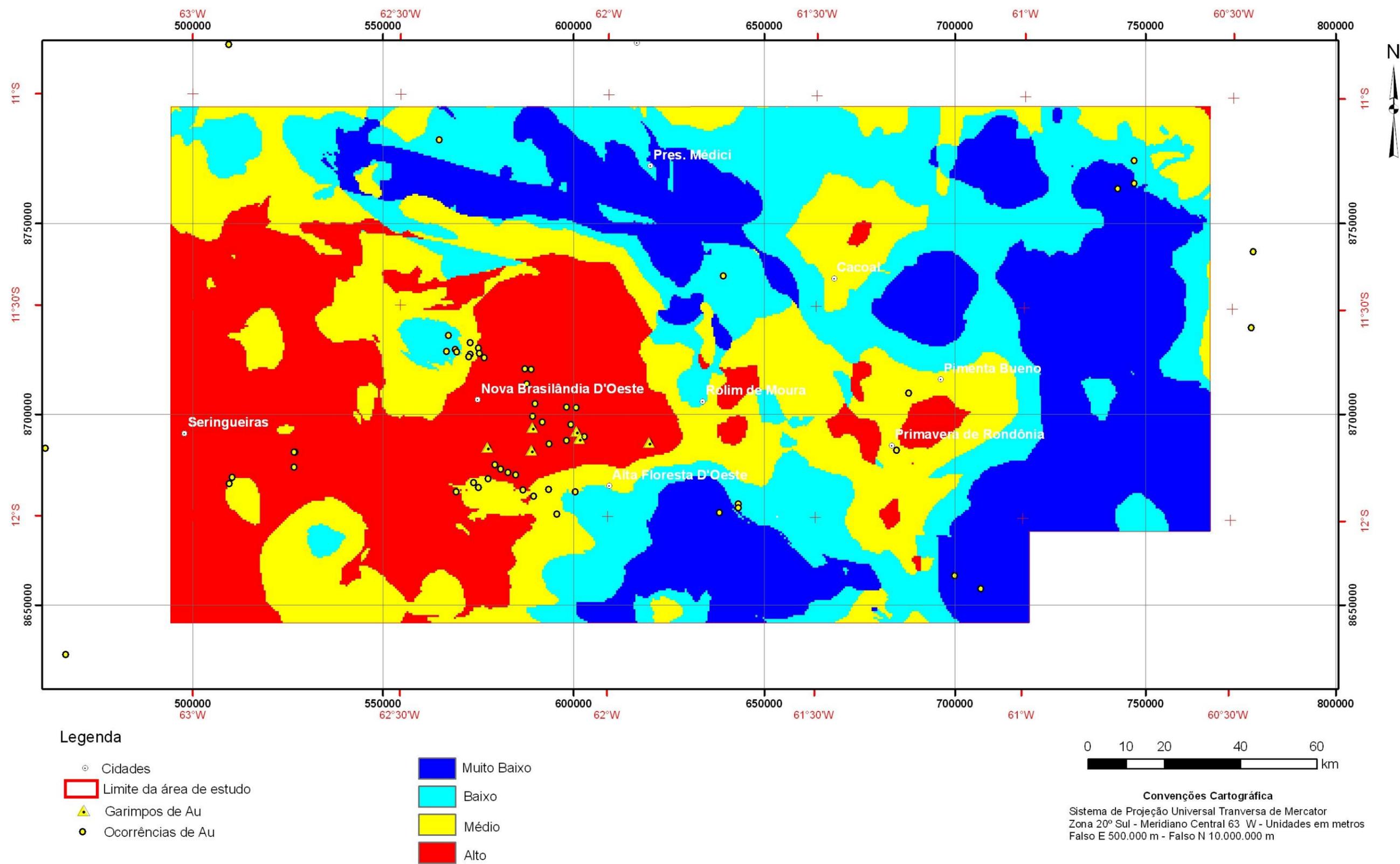


Figura 5.11: Mapa do Potencial Mineral para Au no CMNB gerado por modelagem em RNFBR utilizando dezenove vetores de entrada de natureza estrutural e um vetor de natureza litológica.

Assim, optou-se pela construção de outro modelo em que as informações de natureza estrutural não se sobressaíssem às de natureza litológica. Nesta modelagem, foram utilizados apenas três vetores de entrada para a RNFBR: um mapa de distância de lineamentos interpretados a partir de dados magnetométricos (estruturas predominantemente de caráter dúctil-rúptil), um mapa de distância de lineamentos interpretados a partir de dados e de sensoriamento remoto (estruturas predominantemente de caráter rúptil) e o mapa litológico.

O treinamento também envolveu 200 iterações e os valores de saída foram novamente classificados em quatro classes de potencial mineral para Au: Alto, Médio, Baixo e Muito Baixo Baixo. A Figura 5.12 apresenta o Mapa do Potencial Mineral para Au no CMNB, resultante da modelagem descrita.

Na Figura 5.12, verifica-se que as áreas de alto potencial mineral para Au seguem as tendências lito-estruturais observadas no mapa geológico. Também é possível observar que a maior parte das ocorrências de Au cadastradas pela CPRM como indícios localizam-se dentro das ou nos limites das áreas consideradas de alto potencial mineral para Au.

Essas ocorrências, em geral, são pintas de Au em concentrados de bateia de sedimentos de corrente identificadas pela CPRM, portanto, também é aceitável um certo deslocamento entre as ocorrências sua área fonte.

6. CONCLUSÕES

A crescente demanda por bens minerais acarreta na criação de novas técnicas que auxiliem a prospecção mineral, como os métodos interpolatórios e as ferramentas para modelagem e mapeamento do potencial mineral em SIG abordados neste trabalho.

O potencial mineral na região amazônica é ainda pouco conhecido e explorado. O Cráton Amazônico, uma das maiores entidades cratônicas no mundo, abriga vários depósitos de classe mundial na região de Carajás. No entanto, em outras áreas como no CMNB no SW do Cráton Amazônico, depósitos minerais expressivos ainda não são conhecidos. Nessas áreas, técnicas de prospecção regional podem auxiliar o trabalho dos geólogos de exploração na árdua tarefa de encontrar depósitos minerais economicamente viáveis.

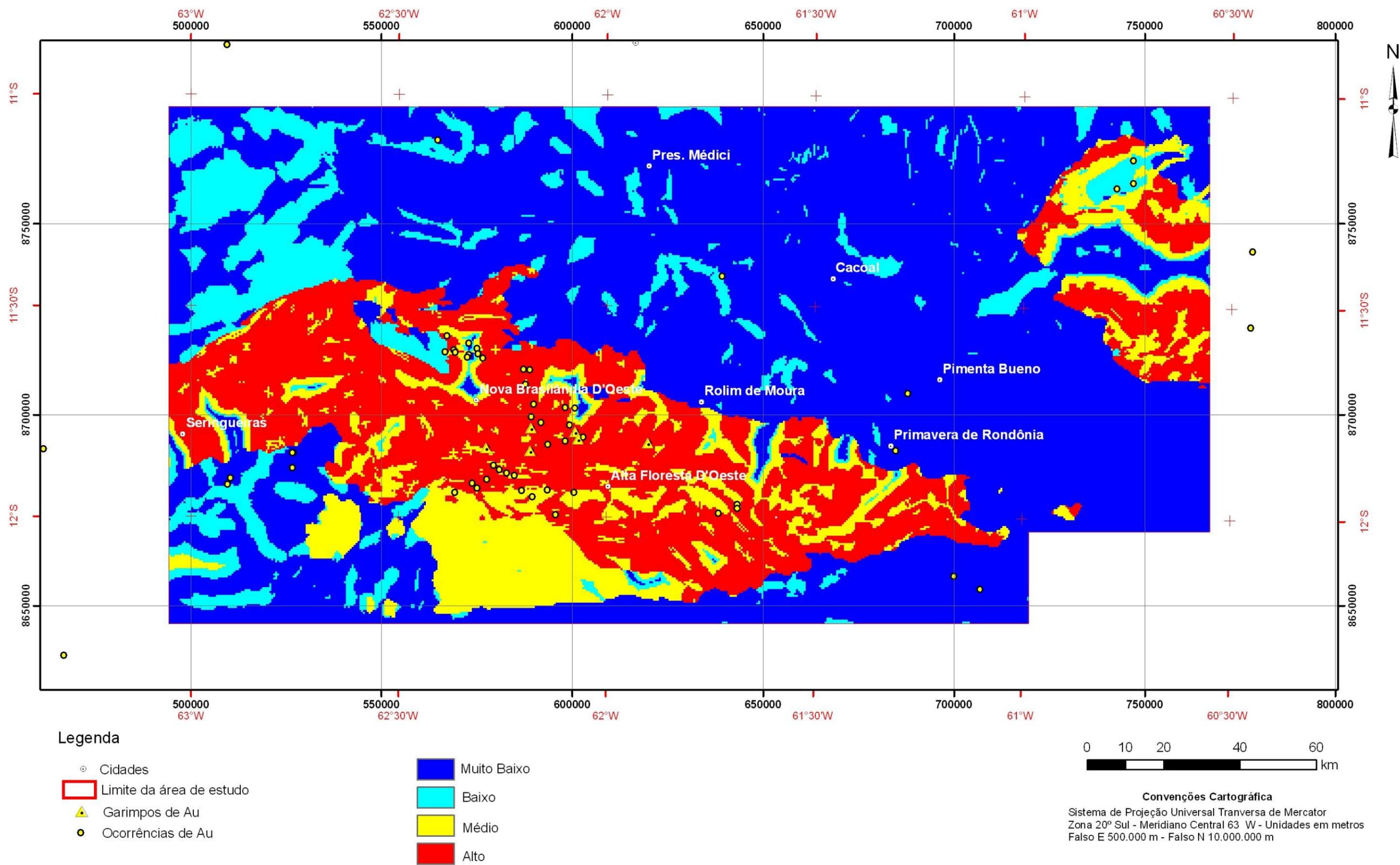


Figura 5.12: Mapa do Potencial Mineral para Au no CMNB gerado por modelagem em RNFBR utilizando dois vetores de entrada de natureza estrutural e um vetor de natureza litológica.

A interpolação de dados geoquímicos, por vezes útil à visualização de anomalias e integração de dados geoquímicos em forma de malhas regulares, pode ser abordada segundo diferentes técnicas. A krigagem e a interpolação multifractal foram duas técnicas utilizadas na interpolação teores de Co, Cu e Ni em sedimentos de corrente.

A krigagem, uma das técnicas aqui tratadas, representa uma das mais tradicionais formas de interpolar dados pontuais. Baseada em conceitos geostatísticos, teve como principais efeitos a redução do desvio padrão e dos valores de máximo, obliterando possíveis anomalias.

Já o IDW-Multifractal, técnica fundamentada na geometria fractal, manteve a variabilidade dos dados, não alterando significativamente o desvio padrão e por vezes extrapolando os valores máximos, o que pode vir a ressaltar importantes anomalias

Os dois métodos interpolatórios não alteraram significativamente a distribuição das populações dos teores observada nos histogramas. Cabe ainda avaliar o efeito sobre a estrutura da variabilidade observada nos variogramas dos dados originais e das superfícies interpolados pelos dois métodos.

Quando comparados pelo Índice Normalizado Residual – INR, os resultados da interpolação multifractal obtiveram melhores ajustes aos dados originais de teores de Co e Ni. Para teores de Cu, ambos os métodos obtiveram ajustem similares.

O método C-A para definição de anomalias geoquímicas, também baseado nos conceitos fractais, auxiliou a determinação de valores de base e anomalias de teores de Co, Cu e Ni em sedimentos de corrente.

O mapeamento do potencial mineral em SIG representa uma forma de integrar e modelar dados geológicos visando determinar áreas favoráveis à ocorrência de depósitos minerais.

As abordagens para modelagem e mapeamento do potencial mineral no CMNB utilizadas foram a guiada pelo conhecimento da lógica nebulosa para o Ni, baseada em critérios litológicos, geofísicos e geoquímicos, e guiada pelos dados das RNFBR para o Au, desenvolvida sobre dados lito-estruturais. Os dois modelos gerados apresentaram resultados coerentes na localização de áreas com alto potencial para Ni e Au quando comparadas com as ocorrências classificadas como indícios de bens minerais.

Em ambos os casos, os resultados das modelagens invariavelmente dependem da escala e da resolução dos dados. Neste trabalho, foram utilizados dados adequados à escala 1:500.000. Assim, os resultados representam o potencial mineral regional da área de estudo e não podem ser

utilizados, por exemplo, para local furos de sonda, mas são úteis em definir áreas para prospecção mais detalhada.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bahia, R.B.C.; Pedreira, A.J. 1996. Depósitos glaciogênicos da Formação Pimenta Bueno (Carbonífero) na região de Rolim de Moura, sudeste e Rondônia. *A Terra em Revista*. **2**(1): 24-29.
- Berry, J.K. 1997. Justifiable Interpolation. *GIS World*, February 1997, p.34-35
- Bettencourt, J.S.; Tosdal, R.M.; Leite Jr, W.B.; Payolla, B.L. 1999. Mesoproterozoic rapakivi granites of the Rondônia Tin Province, southwestern border of the Amazonian Craton, Brazil / I. Reconnaissance U/Pb geochronology and regional implications. *Precambrian Research*. **95**: 41-67.
- Blum, M.L.B. 1999. *Processamento e Interpretação de Dados de Geofísica Aérea no Brasil Central e sua Aplicação à Geologia Regional e à Prospecção Mineral*. Inst. de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, Tese de Doutorado.
- Bonham-Carter, G.F. 1994. *Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS*. Ontario. Pergamon Press. 398 p.
- Bonham-Carter, G.F. 1997. GIS Methods for Integrating Exploration Data Sets. In: *Proceedings, Exploration 97: Fourth Decennial International Conference On Mineral Exploration*, edited by A.G. Gubins, p.59- 64.
- Bonham-Carter, G. F.; Acterberg, F. P.; Wright, D. F. 1989. Weights of evidence modeling: a new approach to mineral mapping potential. In: Actberberg F. P e Boham-Carter G. F. (eds). *Statistical Applications in the Earth Sicences*. Geological Survey of Canada, p 171-183.
- Brito-Neves, B. B. e Cordani, U. G. 1991. Tectonic evolution of South América during the Late Proterozoic. *Precambrian Research*, **53**: 23-40.
- Brown, W. M.; Gedeon, T. D.; Groves, D. I.; Barnes, R. G. 2000. Artificial neural networks: a new method for mineral prospectivity mapping. *Australian Journal of Earth Sciences*, **47**: 757-770.
- Cheng, Q. 1994. The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods. *Journal of Geochemical Exploration*, **51**: 109-130.

- Cheng, Q. 1999. Multifractality and spatial statistics. *Computer & Geosciences*, (25)10: 1-13.
- Cheng, Q.; Acterberg, F. P.; Boham-Carter, G. F. 1996. A spatial analysis method for geochemical anomaly separation. *Journal of Geochemical Exploration*. **56**: 183-195.
- Cordani, U. G.; Brito-Neves, B. B.; D'Agrella-Filho, M. S. 2001. From Rodinia to Gondwana: A Review of Available Evidence from South America. In: Workshop Geology of the SW Amazonian Craton: State-of-the-Art, *Extended Abstracts*, 39-44.
- Croissant, A. 1977. La géostatistique comme outil dans la prospection géochimique. *Sciences de la Terre*, 9: 129-144.
- Gripp, A. H. 1992. Utilização de geostatística para o tratamento de dados de prospecção geoquímica. *Revista Brasileira de Geociências*, **22**(2): 248-251.
- Groves, D. I.; Goldfarb, R. J.; Gebre-Mariam, M.; Hegemann, S. G.; Robert, F. 1998. Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationships to other gold deposit types. *Ore Geology Reviews*, **13**: 7-27.
- Haykin, S. 1994. *Neural networks: a comprehensive foundation*. Upper Saddle River. Prentice Hall. 842 p.
- Harris, J. R.; Wilkinson, L.; Heather, K.; Fumerton, S.; Bernier, M. A.; Ayer, J.; Dahn, R. 2001. Application of GIS Processing Techniques for producing mineral prospectivity maps – A case study: Mesothermal Au in the Swayze Greenstone Belt, Ontário, Canadá. *Natural Resources Research*. **10**(2): 91 – 124.
- Journel, A. G. 1978. *Mining Geostatistics*. Londres. New York: Academic. 600 p.
- Karlstrom, K. E.; Williams, M. L.; McLelland, J.; Geissman, J. W.; Ahäll, K. 1999. Refining Rodinia: Geologic Evidence for the Australia–Western U.S. connection in the Proterozoic. *GSA Today*. **9**(10): 1-40.
- Kloosterman, J.B. 1968. Uma província do tipo nigeriano no sul da Amazônia. *Mineração Metalurgia*, **47**(278): 59- 64.
- Lacerda Filho, J. V.; Souza, S. O.; Oliveira, C. C.; Ribeiro, S. E.; Boas, P. F. V.; Albuquerque, M. C.; Frasca, A. A. S.; Borges, F. R.; Moreton, L. C.; Martins, E. G.; Camargo, M. A.; Valente, C. R.; Pimentel, M. M.; Botelho, N. F. 2001. *Geologia e Evolução Tectônica da Região Norte do Mato Grosso (Projeto Promin – Alta Floresta)*. Brasília, CPRM Serviço Geológico do Brasil. 4 p.

- Li, C.; Ma, T.; Cheng, J. 2004. A fractal interpolation approach to geochemical exploration data processing. *Math. Geology*, **36**(5): 593-606.
- Lins, C. A. C. 2003. *Manual Técnico da Área de Geoquímica*. Rio de Janeiro. CPRM. 35 p.
- Looney, C. G. 2002. Radial basis functional link nets and fuzzy reasoning. *Neurocomputing*, **48**: 489-509.
- Mandelbrot, B. B. 1983. *The Fractal Geometry of Nature*. San Francisco. W H Freeman. 468 p.
- Matheron, G. 1965. *Les Variables Régionalisées et leur Estimation*. Paris, Masson. 212 p.
- Minty, B. R. S. 1991. Simple micro-levelling for aeromagnetic data. *Expl. Geophys.* **22**:591-592
- Nóbrega, R.P. 2001. *Análise espacial knowledge-driven e data-driven : o uso das lógicas booleana, fuzzy e redes neurais para geração de mapas de favorabilidade mineral na região centro-leste da Bahia*. Instituto de Geociências, Unicamp Campinas, Dissertação de Mestrado.
- Olivatti, O.; Ribeiro Filho, W. 1976. *Projetos Centro-Oeste de Mato Grosso, Alto Guaporé e Serra Azul*. CPRM, 51p.
- Pinto Filho, F. P. 1977. *Projeto Sudeste de Rondônia*. Rio de Janeiro, CPRM, 100 p.
- Porwal, A.; Carranza, E. J. M.; Hale, M. 2003. Artificial Neural Networks for Mineral-Potential Mapping: A Case Study from Aravalli Province, Western India. *Natural Resources Research*, **12** (3): 155-171.
- Reedman, J. H. 1979. *Techniques in Mineral Exploration*. London, Applied Science Publishers, 533 p.
- Rizzotto, G. J. 1999. *Petrologia e Ambiente Tectônico do Grupo Nova Brasilândia – RO*. Instituto de Geociências, UFRGS, Porto Alegre. Dissertação de Mestrado.
- Rizzotto, G. J. 2001. Reavaliação do Ciclo Orogênico Sunsás/Aguapeí no Sudoeste do Cráton Amazônico. In: Workshop Geology of the SW Amazonian Craton: State-of-the-Art, *Extended Abstracts*, 66-70.
- Rizzotto, G. J.; Scandolara, J. E.; Adamy, A. 2000. *Geologia e Geomorfologia dos Municípios de Alta Floresta e Alto Alegre*. Porto Velho. CPRM – Serviço Geológico do Brasil. 64 p.
- Robinson Jr., G. R.; Kapo, K. E.; Grossman, J. N. 2004. *Chemistry of Stream Sediments an Surface Waters in New England – USGS Open File Report 2004-1026*. USGS. 18 p.
- Sadowski, G. R. e Bettencourt, J. S. 1996. Mesoproterozoic tectonic correlations between eastern Laurentia and the western border of the Amazonian Cráton. *Precambrian Research*, **76**: 213-227.

- 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. (eds). *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil*. Brasília, CPRM, pp: 169-226.
- Scandolara, J. (ed). 1999. *GEOLOGIA E RECURSOS MINERAIS DO ESTADO DE RONDÔNIA: Texto Explicativo e Mapa Geológico do Estado de Rondônia*. Porto Velho, CPRM, 97 p.
- Schobbenhaus, C.; Gonçalves, J. H.; Santos, J. O. S.; Abram, M. B.; Leão Neto, R.; Matos, G. M. M.; Vidotti, R. M.; Ramos, M. A. B.; Jesus, J. D. A. 2004. *Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo, Sistema de Informações Geográficas – SIG e 46 folhas na escala 1:1.000.000*. Brasília, CPRM. 41 CD-ROM.
- Silva, A.M. 1999. *Geophysical and Geological Data Integration Using a New Statistical Approach for Mineral Target Selection Applied to the Rio das Velhas Greenstone Belt, Quadrilátero Ferrífero*. Inst. de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, Tese de Doutorado.
- Silva, L. C.; Armstrong, R.; Pimentel, M. M.; Scandolara, J.; Ramgrab, G.; Wildner, W.; Angelim, L. A. A.; Vasconcelos, A. M.; Rizzoto, G. J.; Quadros, M. L. E. S.; Sander, A.; Rosa, A. L. C. 2002. Reavaliação da Evolução Geológica em Terrenos Pré-Cambrianos Brasileiros com Base em Novos Dados U-Pb Shrimp, Parte III: Províncias Borborema, Mantiqueira Meridional e Rio Negro-Juruena. *Revista Brasileira de Geociências*, **32**(4): 529-544.
- Singer, D.; Kouda R. 1996. Application of feedforward neural network in search for Kuroko deposits in the Hokuroku district, Japan. *Math. Geology*, **(28)**3: 1017-1023.
- Tassinari, C.C.G.; Cordani, U.G.; Nutman, A.P.; Van Schmus, W.R.; Bettencourt, J.S.; Taylor, P.N. 1996. Geochronological systematics on asegment rocks from the Rio Negro- Juruena province (Amazonian Craton) and tectonic implications. *International Geological Review*. **38**: 161-175.
- Tassinari, C. C. G. e Macambira, M. J. B. 1999. Geochronological Provinces of the Amazonian Craton. *Episodes*. **22**(3): 174-182.
- Tassinari, C. C. G.; Bettencourt, J. S.; Geraldés, M.C.; Macambira, M. J. B.; Lafon, J. M. 2000. The Amazon Craton. In: Cordani U. G., Milani E. J., Thomaz Filho A., Campos D. A (eds) *Tectonic Evolution of South America*. In Fólio Produção Editorial, Gráfica e Programação Visual, pp: 41-100.

- Teixeira, W. e Tassinari, C.C.G. 1984. Caracterização geocronológica da província Rondoniana e suas implicações geotectônicas. In: Symposium Amazônico, *Anais*. Manaus, DNPM, 87-102 p.
- Tohver, E.; Pluijm, B.; Voo, R; Rizzotto, G. J.; Scandolara, J. 2002, Paleogeography of the Amazon craton at 1.2 Ga: Early Grenvillian collision with the Llano segment of Laurentia. *Earth Planetary Sciences Letters*, **199**, 185–200.
- Tohver, E.; Pluijm, B.; Mezger, K.; Essene, E.; Scandolara, J.; Rizzotto, G. J. 2004. Significance of the Nova Brasilândia metasedimentary belt in western Brazil: Redefining the Mesoproterozoic boundary of the Amazon craton. *Tectonics*, **23**: 1-20.
- Tohver, E.; Pluijm, B.; Mezger, K.; Scandolara, J.; Essene, E. 2005. Two stage tectonic history of the SW Amazon Craton in the late Mesoproterozoic: identifying a cryptic suture zone. *Precambrian Research*, **137**: 35-59.
- Trépanier, S. 2007. Application of multivariate statistics to the interpretation of geochemical signals in regional lake sediment surveys in Québec. In: Québec Exploration 2007, *Geoscience Exhibitt*, Québec, AEMQ/Ressources naturelles et Faune.