

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**SERGIO RAMOS MATURANA FILHO**

**DIAGNÓSTICO E CARACTERIZAÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DE  
ELEMENTOS DE TERRAS-RARAS (ETR) NA REGIÃO CENTRAL DO ESCUDO  
SUL-RIO-GRANDENSE, ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL**

**Caçapava do Sul**

**2015**

**SERGIO RAMOS MATURANA FILHO**

**DIAGNÓSTICO E CARACTERIZAÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DE  
ELEMENTOS DE TERRAS-RARAS (ETR) NA REGIÃO CENTRAL DO ESCUDO  
SUL-RIO-GRANDENSE, ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Curso de Geologia da Universidade Federal  
do Pampa, como requisito parcial para obtenção  
do Título de Bacharel em Geologia.

Orientador: Luis Eduardo de Souza

Coorientador: Delia Del Pilar Montecinos de  
Almeida

**Caçapava do Sul**

**2015**

**SERGIO RAMOS MATURANA FILHO**

**DIAGNÓSTICO E CARACTERIZAÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DE  
ELEMENTOS DE TERRAS-RARAS (ETR) NA REGIÃO CENTRAL DO ESCUDO  
SUL-RIO-GRANDENSE, ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Curso de Geologia da Universidade Federal  
do Pampa, como requisito parcial para obtenção  
do Título de Bacharel em Geologia.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 04 de Dezembro de 2015.

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Luis Eduardo de Souza  
Orientador  
(UNIPAMPA)

---

Prof. Me. Vinícius Matté  
(UNIPAMPA)

---

Prof. Me. Luiz Delfino Teixeira Albarnaz  
(UNIPAMPA)

Dedico este trabalho aos meus queridos pais,  
Sergio e Sandra, por todo apoio que me deram  
nessa importante etapa de minha vida, sempre  
com muito incentivo e amor.

“O único lugar onde o sucesso vem antes do trabalho é no dicionário.”.

Albert Einstein

## RESUMO

O substancial crescimento na utilização de elementos de Terras Raras (ETR), para aplicações em altas tecnologias, que incluem desde a fabricação de supermagnetos e supercondutores, componentes eletrônicos e desenvolvimento de novos materiais, tem levado a um aumento significativo de sua demanda em todo o mundo e, em particular, no Brasil, onde a pesquisa e exploração destes elementos passaram a ser citadas como prioritárias e estratégicas. Apesar dos elementos Terras Raras poderem estar presentes em mais de 250 espécies minerais conhecidas, somente em algumas ocorre concentração suficiente para justificar sua exploração. Neste sentido, este trabalho realizou um levantamento de dados e compilação de análises geoquímicas, na região central do Escudo Sul-Rio-Grandense, dando maior ênfase nos municípios de Caçapava do Sul, Vila Nova do Sul e Lavras do Sul, estrategicamente escolhidas por terem histórico de mineralizações de alguns metais. Além de possuírem uma grande diversidade litológica. Foi consolidado um banco de dados composto por 166 amostras com análises geoquímicas contendo ETR (traço). Estando uma parte destes dados disponíveis em bibliografias e outros fornecidos por pesquisadores de trabalhos que ainda vão ser publicados. Com o banco de dados foi realizado uma estatística básica para cada um dos 16 elementos, onde se notou uma correlação positiva entre os teores de ETR com o conteúdo de sílica para algumas variáveis, tornando-se assim interessante fazer a separação do banco de dados em dois domínios distintos, com diferentes intervalos de teores de sílica. Na realização da estimativa dos teores utilizando 3 métodos interpoladores clássicos (Inverso do Quadrado da Distância, Shepard Modificado e Mínima Curvatura), o método de Shepard Modificado demonstrou ser o melhor interpolador para o domínio das rochas ácidas, enquanto o de Mínima Curvatura demonstrou ser o melhor para o domínio das rochas intermediárias e básicas. A escolha do melhor método foi possível de ser identificado através do uso da técnica de validação cruzada. Com os teores médios de cada ETR gerados através dos dados estimados, foi possível realizar a sua comparação com os teores de depósitos conhecidos no Brasil e no mundo. Sendo concluído que os teores dos dois domínios de rochas demonstraram ser muito inferiores aos teores praticados nos depósitos economicamente viáveis, uma vez que atualmente não exista tecnologia suficiente para explorar esses teores tão baixos de forma econômica.

Palavras-chave: elementos Terras Raras, análises geoquímicas, modelos de distribuição, caracterização, interpolação, estimativa de teores, comparação entre teores.

## ABSTRAT

The substantial growth in the use of rare earth elements (REE), for applications in high technologies, ranging from the manufacture of supermagnetos and superconductors, electronics components and development of new materials has led to a significant increase in its demand across the world and in particular in Brazil, where the research and exploitation of these elements came to be cited as priority and strategic. Despite the rare earth elements may be present in more than 250 known mineral species, only in a few occurs in some concentration sufficient to justify their exploitation. In this sense, this paper conducted a data collection and compilation of geochemical analysis, in the region of central Shield South-Rio-Grande, placing greater emphasis in the municipalities of Caçapava do Sul,, Vila Nova do Sul and Lavras do Sul, strategically chosen for having historical mineralization of some metals. Besides having a great lithological diversity. It was consolidated a database consisting of 166 samples containing REE geochemical analyzes (trace). Being a part of this data available in bibliographies and other provided by researchers jobs that will be published. With the database was made a basic statistics for each of the 16 elements where was noted a positive correlation between the ETR and the silica content for some variables, making it interesting to divide the database in two distinct areas with different ranges of silica concentration. In the realization of the estimation using 3 classic interpolation methods (Distance Square Inverse, Modified Shepard and Minimum Curvature), the Modified Shepard method proved to be the best interpolation for the field of acid rocks, while the Minimum Curvature demonstrated to be the best for the field of intermediate and basic rocks. The choice of the best method was able to be identified through the use of cross-validation technique. With average grades of each ETR generated by the estimated data, it was possible to make a comparison with the deposits grades of know deposits in Brazil and the World. It is concluded that the grades of the two rock domains demonstrated to be much lower than the grades prevailing in economically viable deposits, since currently doesn't exist sufficient technology to explore these grades as economically.

Keywords: rare earth elements, geochemical analysis, distribution models, characterization, interpolation, grade estimation, comparing grades.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma de atividades, exemplificando o passo a passo da metodologia do trabalho .....	11
Figura 2: Tabela periódica com o posicionamento dos ETR (contornados em vermelho) e seus respectivos números atômicos, e em cor rosa, são a série dos lantanídeos.....	12
Figura 3: Mapa do Brasil indicando as principais ocorrências de ETR. ....	19
Figura 4: Mapa com as principais ocorrências ou minas de ETR no mundo (círculos cinzas), bem como principais países que possuem reservas significativas (coloridos em cor laranja) e dentro dos círculos amarelos estão os depósitos de Bayan Obo, Mountain Pass e Mount Weld. ....	21
Figura 5: Mapa de situação e localização das áreas de estudo .....	25
Figura 6: Mapa geológico da Bacia do Camaquã, região central do Rio Grande do Sul, com a delimitação dos Alogrupos e as porções do embasamento.....	27
Figura 7 Histograma de frequência dos teores de Gd (ppm). ....	36
Figura 8: Histograma de frequência dos teores de Tb (ppm). ....	37
Figura 9: Histograma de frequência dos teores de Sm (ppm). ....	38
Figura 10: Mapa de localização dos dois domínios de rochas da Formação Acampamento Velho .....	39
Figura 11: Mapa de localização das amostras da Formação Rodeio Velho.....	39
Figura 12: As linhas vermelhas indicam onde estão localizadas as meias distâncias entre as amostras, enquanto que os pontos vermelhos são as intersecções das mesmas, dando origem aos vértices, enquanto que os pontos pretos são as localizações das amostras e as linhas pretas são as menores distâncias entre as amostras .....	41
Figura 13: Mapa de localização das amostras de rochas ácidas da Formação Acampamento Velho. ....	42
Figura 14: Desagrupamento por área de influência para as amostras ácidas da Formação Acampamento Velho .....	42
Figura 15: Planilha que foi utilizada no cálculo de pesos e da média a partir das áreas de influência .....	43
Figura 16: Medidas de estatística descritiva dos dados para o elemento La do domínio das rohas ácidas da Formação Acampamento Velho.....	44
Figura 17: Mapa de localização das amostras intermediárias e básicas da Formação Acampamento Velho. ....	44



Figura 18: Deagrupamento por área de influência para as amostras intermediárias e básicas da Formação Acampamento Velho .....	45
Figura 19: Medidas de estatística descritiva dos dados desagrupados para a variável La do domínio das rochas intermediárias e básicas da Formação Acampamento Velho.....	45
Figura 20: Mapa de isoteor pelo método do Inverso do Quadrado da Distância. ....	49
Figura 21: Mapa de isoteor pelo método da Mínima Curvatura.....	49
Figura 22: Mapa de isoteor pelo método da Shepard Modificado. ....	50
Figura 23: Mapa de isoteor pelo método do Inverso do Quadrado da Distância para a variável La. ....	50
Figura 24: Mapa de isoteor pelo método da Mínima Curvatura.....	51
Figura 25: Mapa de isoteor pelo método Shepard Modificado .....	51
Figura 26: Histograma de distribuição dos erros da estimativa dos teores de La pelo Método da Mínima curvatura .....	53
Figura 27: Histograma de distribuição dos erros da estimativa dos teores de La pelo Método Shepard Modificado .....	54
Figura 28: Mapa de distribuição dos resíduos da estimativa do elemento La a partir do Método de Mínima Curvatura.....	55
Figura 29: Mapa de distribuição dos resíduos da estimativa do elemento La a partir do Método de Shepard Modificado.....	55
Figura 30: Gráfico de dispersão do elemento La entre os valores reais e os estimados pelo método interpolador da Mínima Curvatura. ....	56
Figura 31: Gráfico de dispersão do elemento La entre os valores reais e os estimados pelo método de Shepard Modificado.....	57
Figura 32: Histograma de distribuição dos erros da estimativa dos teores de La pelo Método da Mínima Curvatura para o domínio das rochas intermediárias e básicas. ....	58
Figura 33: Mapa de distribuição dos resíduos da estimativa do elemento La a partir do Método de Mínima Curvatura para o domínio das rochas intermediárias e básicas.....	58
Figura 34: Gráfico de dispersão do elemento La entre os valores reais e os estimados pelo método da Mínima Curvatura para o domínio das rochas intermediárias e básicas.....	59
Figura 35: Mapa de modelo de blocos para o elemento Ce do domínio das rochas ácidas da Formação Acampamento Velho. ....	61
Figura 36: Modelo de blocos para o elemento La do domínio das intermediárias e básicas. ..	62

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Principais aplicações dos elementos Terras Raras .....	14
Tabela 2: Previsão de demanda de ETR por setores (milhares de toneladas/ano) .....	15
Tabela 3: Características do banco de dados, como quantidades de dados, locais e autores ...	33
Tabela 4: Matriz de correlação dos ETRs das 166 amostras do banco de dados, destacado dentro do quadrado vermelho as correlações entre os ETRL e dentro do quadrado preto as correlações entre os ETRP.....	34
Tabela 5: Comparativo entre os teores médios obtidos para as amostras antes e depois da realização do desagrupamento.....	46
Tabela 6: Comparativo entre as médias dos dois domínios para os dados agrupados, desagrupados e estimados.....	60
Tabela 7: Tabela com os teores médios dos ETRs estimados para as duas unidades da Formação Acampamento Velho. ....	63
Tabela 8: Alguns dos principais depósitos de ETR no Brasil e no Mundo e seus respectivos teores.....	63
Tabela 9: Distribuição em massa de óxidos e elementos de Terras Raras na Monazita .....	64
Tabela 10: Distribuição em massa de óxidos e elementos de Terras Raras no Xenotímio .....	64
Tabela 11: Distribuição em massa de óxidos e elementos de Terras Raras na Bastnaesita .....	64
Tabela 12: Comparativo entre os teores da área de estudo com os teores de Catalão I (GO)..	65
Tabela 13: Comparativo entre teores do elemento Y no depósito de Pitinga com os domínios da áreas estudo.....	65
Tabela 14: Resultados comparativos entre os teores da área estudada com os depósitos do Bayan Obo (China) e Mountain Pass (EUA).....	66

## SUMÁRIO

### Capítulo 1

<b>Introdução .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Estado da Arte.....</b>	<b>4</b>
<b>1.2 Meta.....</b>	<b>7</b>
<b>1.3 Objetivos Específicos .....</b>	<b>7</b>
<b>1.4 Justificativa.....</b>	<b>7</b>
<b>1.5 Metodologia .....</b>	<b>9</b>
<b>1.5.1 Matriz de Correlação .....</b>	<b>9</b>
<b>1.5.2 Análise Estatística Básica e Histogramas de Frequência das Variáveis do Banco de dados.....</b>	<b>9</b>
<b>1.5.3 Geração de Modelos de Distribuição de Teores .....</b>	<b>10</b>
<b>1.5.4 Cálculo de Resíduos e Técnicas de Validação dos Resultados de Interpolação</b>	<b>10</b>
<b>1.5.5 Geração de Modelos de Blocos Paras as Rochas do Acamamento Velho .....</b>	<b>10</b>
<b>1.6 Organização da Monografia .....</b>	<b>10</b>

### Capítulo 2

<b>Revisão Bibliográfica.....</b>	<b>12</b>
<b>2.1 Aplicações .....</b>	<b>14</b>
<b>2.2 Geologia dos Depósitos de ETR.....</b>	<b>15</b>
<b>2.2.1 Depósitos de Origem Carbonatítica.....</b>	<b>16</b>
<b>2.2.2 Hidrotermais Plutogênicos .....</b>	<b>17</b>
<b>2.2.3 Pegmatitos .....</b>	<b>17</b>
<b>2.2.4 Depósitos Peralcalinos.....</b>	<b>17</b>
<b>2.2.5 <i>Placers</i> Marinheiros .....</b>	<b>17</b>
<b>2.2.6 <i>Placers</i> Fluviais .....</b>	<b>18</b>
<b>2.2.7 Depósitos Lateríticos .....</b>	<b>18</b>

2.2.8 Depósito de ETR-Ferro.....	18
2.3 Principais Depósitos no Brasil e no Mundo.....	19
2.3.1 Depósitos Brasileiros .....	19
2.3.2 Depósitos no Mundo.....	21

### **Capítulo 3**

Apresentação das Área de Estudo e Análise do Banco de Dados.....	23
3.1 Localização das Áreas de Estudo .....	23
3.1.1 Associação Shoshonítica de Lavras do Sul (ASLS).....	23
3.1.2 Depósito Cerro dos Martins .....	23
3.1.3 Mina do Seival .....	24
3.1.4 Platô da Ramada. ....	24
3.2 Geologia da Bacia do Camaquã.....	26
3.2.1 Evolução Tectônica da Bacia do Camaquã.....	26
3.3 Geologia Local das Áreas de Estudo .....	30
3.3.1 Contexto Geológico da Associação Shoshonítica de Lavras do Sul.....	30
3.3.2 Ambiente Geológico do Depósito Cerro dos Martins (DCM) .....	31
3.3.3 Geologia da Mina do Seival.....	31
3.3.4 Geologia do Platô da Ramada e sua Intrusão Diorítica.....	32
3.4 Descrição do Banco de Dados .....	32
3.4.1 Procedimentos de Realização das Análises Geoquímicas de Cada Trabalho... 34	34

### **Capítulo 4**

Análise dos Resultados .....	36
4.1 Análise Estatística Básica e Histogramas de Frequência das Variáveis do Banco de Dados.....	36
4.1.1 Desagrupamento das Amostras e Geração de Histogramas com Pesos .....	40
4.2 Geração de Modelos de Distribuição dos Teores .....	46

4.2.1 Escolha do Tamanho de Bloco .....	47
4.2.2 Interpolação .....	48
4.3 Cálculo de Resíduos e Técnicas de Validação dos Resultados de Interpolação .....	52
4.3.1 Validação Cruzada no Domínio das Rochas Ácidas .....	53
4.3.2 Validação Cruzada no Domínio das Rochas Intermediárias e Básicas.....	57
4.3.3 Estatística Básica dos Modelos de Distribuições de Teores.....	59
4.4 Geração de Modelos de Blocos Para as Rochas da Formação Acampamento Velho .....	61
4.4.1 Modelo de Blocos do Domínio das Rochas Ácidas .....	61
4.4.2 Modelo de Blocos do Domínio das Rochas Intermediárias e Básicas.....	61
4.5 Comparação Entre os Teores com Depósitos do Brasil e no Mundo .....	62
4.5.1 Comparativo Com o Depósito de Catalão I (GO) .....	65
4.5.2 Comparativo com o Depósito de Pitinga (AM).....	65
4.5.2 Comparativo com o Depósito Montain Pass (EUA) e Bayn Obo (China).....	65
<b>Capítulo 5</b>	
Conclusões .....	67
5.1 Resultados Obtidos .....	67
5.2 Recomendações Para Trabalhos Futuros .....	69
Referências .....	70
Anexos.....	78

# Capítulo 1

## Introdução

As Terras Raras (TR) formam uma família de 15 elementos com números atômicos entre 57 e 71, além do Ítrio (39) e do Escândio (21), que possuem características similares muito importantes, principalmente em relação à sua ampla aplicabilidade na indústria de alta tecnologia e, neste sentido, sua demanda vem aumentando significativamente. A descoberta de sua utilização na indústria começou ainda no século XIX, onde sua primeira aplicação surgiu no desenvolvimento de iluminação a gás, sendo utilizado como matéria prima de camisas de lampião, melhorando assim, a iluminação artificial. Com o passar do tempo, as propriedades destes elementos começaram a ser bem mais conhecidas e estudadas e, então, eles passaram a ser cada vez mais utilizados em outras aplicações, tendo como destaque suas principais utilizações na indústria automobilística, na fabricação de catalisadores, vidros, polimentos, ligas metálicas, ímãs permanentes e outros. Martins & Isolane (2005) destacam que suas principais importâncias na indústria atual estão relacionadas com suas propriedades magnéticas e espectroscópicas.

Em função deste incremento significativo de aplicações, o consumo tem aumentado de forma significativa nas últimas décadas e as projeções são de que irão aumentar ainda mais. Em alguns cenários mais otimistas, estima-se que a sua oferta mundial crescerá em uma taxa de 12% ao ano, atingindo em 2025 uma oferta três vezes maior do que a atual (Rocio *et al.*, 2012). Já em cenários mais conservadores, seu crescimento possui uma projeção menor, tendo como previsão 7% ao ano, ou seja, um crescimento bem significativo, mesmo no pior dos cenários.

Atualmente, a escassez de depósitos com estes elementos é principalmente em função da falta de investimento em pesquisa e exploração, além do monopólio da China, tanto em termos de lavra quanto no *know-how* em tratamento e beneficiamento. Segundo Andrade (2014), a China é hoje detentora de 40% das reservas mundiais de ETR, além de responsável por 97% da produção mundial das Terras Raras. Da mesma forma, elementos críticos como Dy e Tb, são produzidos unicamente na China e há poucos projetos fora deste país que possam produzi-los (Lifton, 2010).

Segundo Loureiro (1994), o Brasil tem enorme potencial para produzir Terras Raras, sendo que somente nos depósitos de Lagoa Seca Norte e Córrego do Garimpo, em Catalão I,

Goiás, teriam sido identificados recursos de 120 milhões de toneladas. No entanto, há uma necessidade urgente de realizar novos investimentos em pesquisa, no intuito de não apenas encontrar novas ocorrências com concentrações economicamente viáveis de ETR, mas principalmente implantar programas de pesquisa e desenvolvimento que levem à criação de cadeias produtivas de processos e produtos de alto valor agregado (MME, 2011). A pesquisa destes elementos é estratégica para o desenvolvimento de uma indústria de alta tecnologia no Brasil e, neste sentido, no Plano Nacional da Mineração 2030 (PNM) é ressaltada a necessidade de continuação do detalhamento de províncias pegmatíticas, por exemplo: Nordeste do Ceará e Leste de Minas Gerais e de intrusões alcalinas em vários Estados (SC, SP, MG, BA, MS, entre outros), bem como é importante a identificação de alvos, o desenvolvimento de recursos humanos qualificados, modelos de exploração e rotas tecnológicas.

Entre os principais depósitos que existem no Brasil, os que se destacam com maior importância são os de Catalão I (GO), Pitinga (AM) e Araxá (MG). Segundo Loureiro (2011) em Catalão I foram definidos dois depósitos de Terras Raras: Lagoa Seca do Norte e Córrego do Garimpo, sendo que os dois somados possuem 119,7 milhões de toneladas de recursos identificados com teores de 2%, tendo como principal fonte de Terras Raras o mineral monazita, associado a complexos alcalino-carbonatíticos (Ribeiro, 2008).

Já em Pitinga (AM), no município de Presidente Figueiredo, ocorre um depósito poliminerálico de Sn e elementos Terras Raras pesados (ETRP), onde as mineralizações de monazitas e xenotímio em depósitos *placers*, tiveram origem de dois corpos graníticos: Água Boa e Madeira. As reservas de xenotímio em aluviões estão estimadas em 20.000t em óxidos totais de Terras Raras (Loureiro, 2013). Os granitos da Suíte Madeira, Grupo Iricoumé (1888 ±3 Ma.), são classificados como granitos do tipo A, tendo sua mineralização primária relacionada com albita-granito, enquanto que o Água Boa está relacionado com greisens micáceos e epissienitos sódicos (Costi, 2005).

No complexo carbonatítico de Araxá (MG), é conhecido um grande potencial em exploração de nióbio, fosfato e TR sendo que é essa região onde se encontra a maior mina de nióbio do mundo. As Terras Raras em Araxá ocorrem de três formas: associado ao minério de nióbio, ao minério de fosfato e também ocorre em forma de “terra”, estando associado a enriquecimento supergênico, resultado do intemperismo dos carbonatitos da região (Loureiro, 2013). Segundo Rocio *et al.* (2012) os principais minerais como fontes de TR encontrados são: monazita, goyazita, gorceixita e apatita e, segundo dados do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS, 2015), a estimativa dos recursos são de 450.000.000t de minério de Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> com 4,4% de OTR + 800.000t de laterita com 13,5% de OTR (óxidos de Terras Raras).

China, EUA e Austrália, juntamente com o Brasil, são detentores das principais reservas de Terras Raras no Mundo. Sendo localizada na China, a Mina de Bayan Obo, na Mongólia Inferior, é constituída de depósitos de minério de ferro que contém grandes quantidades de Terras Raras, tendo monazita e bastnaesita como principais fontes de ETR, onde são recuperados como subproduto da extração do minério de ferro. Cerca de metade de todo ETR que é produzido na China, deriva deste depósito, e segundo Chao *et al.* (1997), sua gênese está associada com enriquecimento em rochas carbonatíticas.

Nos EUA e na Austrália, as principais ocorrências são localizadas nos depósitos de Mountain Pass e Mountain Weld, respectivamente. Em Mountain Pass (EUA), o principal mineral de minério de ETR é a bastnaesita, e também é extraído como minério secundário calcita e dolomita com teores de 60% (Long *et al.*, 2012). Já em Mountain Weld (Austrália), o principal minério extraído é a monazita, sendo que se trata de um depósito laterítico, com origem primária proveniente de carbonatitos (Miezits & Hoatson, 2013).

Os ETR são encontrados na natureza bem distribuídos, com baixas concentrações na crosta, e seus depósitos podem ser encontrados em diversos ambientes geológicos, podendo ser de caráter endógeno ou exógeno. Dentre os depósitos endógenos, podemos citar como fontes principais os carbonatíticos (Mountain Pass, EUA), hidrotermais plutogênicos (Bayan Obo, China), pegmatíticos em veios (Mountain Pass, EUA) e metassomáticos (Pitinga, AM). Já em ambientes exógenos através de enriquecimento residual (Araxá, MG), *placers* marinhos (Vitória, ES) e também em *placers* aluvionares, como em São Gonçalo, MG (Loureiro, 1994). Apesar de serem mais incomuns, os depósitos metamorfogênicos também são encontrados, como o de Pitinga (AM) no granito madeira, onde ocorreu greisenificação (Feio *et al.*, 2007). Além disso existem depósitos formados a partir de concentrações em argilas de adsorção iônica como nos depósitos de Jiangxi, Jiangsu e Hunan na China, também chamados de depósitos lateríticos, importantíssimas fontes de Terras Raras pesados (ETRP) e constituindo boa parte da produção Chinesa na região Sul do país (Mariano, 2010).

Assim, devido a diversos fatores como aumento da demanda e utilização de cada vez mais destes elementos na indústria moderna, bem como o monopólio Chinês atual na exploração dos ETR, este trabalho se propõe a inventariar, caracterizar e avaliar as concentrações de ETR na região central do Escudo Sul-Rio-Grandense, RS, dando ênfase a locais com histórico de mineralizações, nos municípios de Caçapava do Sul e Lavras do Sul. A partir da compilação de dados geoquímicos de diferentes campanhas e levantamentos, será consolidado um banco de dados único e elaborado um modelo de distribuição de teores dos elementos que apresentarem quantidades de informações compatíveis. A partir da análise estatística destas informações e



dos modelos de distribuição elaborados, pretende-se efetuar uma análise comparativa com concentrações e/ou teores de outros depósitos, onde já tenha sido apontada viabilidade técnica e econômica.

Foram selecionadas como estudos de caso 4 áreas estratégicas: duas situadas no município de Caçapava do Sul (depósito de cobre Cerro dos Martins na sequência vulcano-sedimentar do Grupo Bom Jardim e área que fica na Mina do Seival, pertencente à Formação Hilário), outra no município de Lavras do Sul (análises realizadas na Associação Shoshonítica Lavras do Sul) e a quarta área com acesso mais próximo pelo município de Vila Nova do Sul (Platô da Ramada, da Formação Acampamento Velho).

## 1.1 Estado da Arte

Apesar de alguns autores mais antigos considerarem como elementos Terras Raras (ETR ou TR) apenas os 15 elementos do grupo dos lantanídeos, Chepcanoff (2006), Lima (2012), Rocio *et al.* (2012), Andrade (2014) e outros, consideram como Terras Raras todos os elementos contidos no Grupo III-B da tabela periódica, posicionados entre os elementos de número atômico 57 e 71, desde o Lantânio (La) ao Lutécio (Lu), com a adição de mais dois: o Ítrio (Y) e o Escândio (Sc).

Em condições normais de temperatura e pressão, os metais de Terras Raras são macios e maleáveis, com cores tendendo para prateado e cinza. São facilmente magnetizáveis e conduzem muito bem o calor e a eletricidade. De todos os elementos, o Cério (Ce) é o que apresenta maior abundância na crosta terrestre, enquanto o Promécio (Pm) é o mais raro. Apesar de comumente chamados de Terras Raras, esta designação não está correta, tendo sido atribuída de forma errônea, pois se acreditava que estes elementos fossem muito mais raros do que de fato são e também porque os Terras Raras e seus óxidos apresentam aspecto terroso. Chepcanoff (2006) comenta, em sua tese de doutorado, que os ETR encontram-se distribuídos bem amplamente na crosta, não sendo tão “raros” assim como se pensava, sendo que em conjunto apresentam concentrações médias ao redor de 128 ppm, ou seja, mais abundantes que muitos elementos mais comuns como, por exemplo, o Cu (70 ppm).

Os elementos Terras Raras (ETR) apresentam uma vasta gama de aplicações por possuírem certas particularidades, podendo-se ressaltar como mais importantes as propriedades magnéticas e espectroscópicas (Martins & Isolani, 2005). As primeiras aplicações dos ETR na indústria, segundo Loureiro (1994), ocorreram por volta de 1800, tendo sido utilizados em lâmpões de gás, melhorando assim, a iluminação artificial. Essa utilidade foi descoberta por

Carl Auer Von Welsbach no século XIX, quando descobriu que muitos óxidos brilhavam de maneira significativa quando aquecidos, ao utilizar uma mistura de óxido de tório com óxido de cério nas camisas de lampiões a gás. Atualmente suas principais aplicações estão sendo nas indústrias de catalizadores, metalurgia, cerâmica, indústria de vidros, magnetos permanentes, fósforos e lasers, além de serem utilizados em aplicações biológicas, médicas e até mesmo em energia nuclear (Long, 2012).

Sua ocorrência mineralógica na natureza, como citado em Loureiro (1994), Andrade (2014) e Lima (2012), é observada como elementos acessórios dos minerais, sendo encontrados em duas formas: como inclusões e como elementos acessórios introduzidos por isomorfismo. Os elementos Terras Raras estão presentes em mais de duzentos e cinquenta espécies de minerais conhecidos, só que minerais onde ETR são representativos não passam de 70. Como minerais de interesse econômico apenas 20 são citados, mas tendo mesmo como destaque principal três minerais específicos, que sozinhos são responsáveis por cerca de 95% da produção de óxidos de Terras Raras no Mundo (Rocio *et al*, 2012): a bastnaesita (Ce, La)CO<sub>3</sub>F, monazita (Ce, La)PO<sub>4</sub> e o xenotímio (YPO<sub>4</sub>).

Segundo Piorino-Maria (2001), um dos principais depósitos dos elementos Terras Raras são os do mineral monazita, cuja formação se dá a partir de depósitos de cordões litorâneos e aluviões fluviais, formando-se por alteração e desagregação de rochas fontes, que geralmente são granitos pegmatíticos. Um exemplo brasileiro deste tipo de depósito fica na Província Mineral de Pitinga, em Presidente Figueiredo (AM), que estão associados aos corpos graníticos Água Boa e Madeira, que deram origem as mineralizações secundárias de *placers* que possuem reservas com 2 milhões de toneladas de xenotímio a teores de 1%, que ainda faltam ser aprovadas pelo DNPM (Andrade, 2014).

Já a bastnaesita é um fluorcarbonato rico em Terras Raras leves (ETRL), o mais importante mineral de minério de TR, sendo um dos que ocorre em maior frequência na natureza. É comum ser encontrado em rochas alcalinas, em pegmatitos, carbonatitos, escarnitos, granitos, granitos pegmatíticos, no contato ou em zonas de alteração, como pode ser encontrado, por exemplo, em Araxá (MG), em zonas de falhas associados a carbonatitos, e em Weishn (China), associado a rochas alcalinas enriquecidas (Castor, 2006).

O xenotímio é um importante fosfato de Y (Ítrio), concentrador de Terras Raras pesados (ETRP). Sendo muito comum estar associado a monazita, ele tanto pode ser encontrado em rochas ácidas como em rochas alcalinas, sendo mais comum sua ocorrência em pegmatitos em forma de pequenos cristais dispersos. Um exemplo de reserva bem conhecida com este mineral é o depósito de Pitinga (AM), associado a intrusões graníticas alcalinas (Feio *et al.*, 2007).

Como apontado por Andrade (2014), a China possui cerca de 40% das reservas mundiais de Terras Raras, seguida pelo Brasil (16%) e EUA (10%), sendo que a China é responsável pela liderança da produção mundial, com quase 90% da produção de óxidos de Terra Raras em 2013. As maiores reservas de bastnaesita, estão na China (Baotou, interior da Mongólia) e no EUA (Mountain Pass, Califórnia). Já em outros países como África do Sul, Austrália, Brasil, Índia, Sri Lanka e Tailândia as ocorrências são encontradas em depósitos de areias monazíticas e em carbonatitos. No Brasil, as principais ocorrências encontram-se em Araxá (Mg), Catalão (GO), Jacupiranga (SP), Mato Preto (PR) e Tapira (MG), sendo que no segundo semestre de 2012 foram aprovadas duas novas reservas de óxidos de Terras Raras, passíveis de serem lavradas, na região mineira da cidade de Araxá, das empresas CBMM e CODEMING, possuindo um total de 14,20 Mt e 7,73 Mt, respectivamente, contendo teores de 3,02% e 2,35%.

Na grande maioria das reservas brasileiras e do mundo, a associação dos TRs estão relacionadas com complexos alcalinos-carbonatíticos. Isso ocorre pelo fato de que muitas vezes os carbonatitos possuem enriquecimento residual nestes elementos sendo que estes tipos de depósitos são grandes produtores de ETRP e ETRL, com seu principal mineral de minério sendo a bastnaesita, como podemos verificar no depósito de Mountain Pass, Califórnia (Long *et al.*, 2012). Nos complexos alcalinos-carbonatíticos, o hidrotermalismo tem um papel importante, a atividade dos voláteis contemporâneas à formação dos depósitos de metais raros dos carbonatitos, é um dos principais agentes mineralizadores, sendo capazes de carrear Ta e Nb entre outros elementos (Biondi, 1986).

A ocorrência de depósitos de Terras Raras em rochas ígneas peralcalinas é bem grande, sendo um concentrador de ETRL, só que na maioria das vezes estes depósitos são de baixos teores, sendo registrado ocorrências com teores significativos em apenas um país. Na península de Kola na Rússia encontra-se uma área de quatro suítes sieníticas onde é minerado por cerca de 50 anos as ETR a partir deste tipo de depósito (Castor, 2006).

Mineralizações de TR em pegmatitos são de comum ocorrência, mas de pouco interesse econômico, pois não chegam a produzir um depósito de volume considerável. Um exemplo deste tipo de depósito fica em São João del Rei (MG), onde estão relacionados numerosos pegmatitos graníticos, conhecidas mineralizações tântalo-nióbio-estaníferas (Loureiro, 1994).

Ocorrem grandes acumulações de depósitos *placers*, que possuem quantidades significativas de ETR, sendo de origem Terciária ou Quaternária, derivados do intemperismo, transporte e segregação de sedimentos de origens graníticas, ou então são depósitos mais antigos em *paleoplacers*. A maioria dos depósitos de maior potencial se encontram em cordões

litorâneos em areias de praias, geralmente ricas em monazita e xenotímio, sendo grandes concentradores de ETRP (Castor, 2006).

Depósitos lateríticos que também são usualmente chamados de “argilas iônicas” são depósitos que ocorrem ao longo de fontes primárias, como carbonatitos e sienitos e têm sido estudadas como forte potencial de fonte de ETR. Estes depósitos podem constituir grandes concentrações de ETRP. No entanto poucos lugares no mundo são explorados. Ocorrências deste tipo são explotadas ao sul da China (Mariano, 2010).

## **1.2 Meta**

Este trabalho se propôs a realizar uma análise das concentrações de elementos Terras Raras (ETR) na região central do Escudo Sul-Rio-Grandense, dando ênfase a locais com histórico de mineralizações, mas com foco nos municípios de Caçapava do Sul, Lavras do Sul, Vila Nova do Sul e São Sepé. Neste sentido, foi realizada uma compilação e interpretação de dados geoquímicos de trabalhos de pesquisa e prospecção realizados na região, visando quantificar as concentrações destes elementos, bem como sua variabilidade. A partir destas informações, foi realizado um estudo comparativo com análises de outros depósitos, onde já existia viabilidade econômica comprovada, tentando identificar eventuais potenciais nas áreas de estudo.

## **1.3 Objetivos Específicos**

Com vistas a atingir a meta proposta, este trabalho buscou cumprir os seguintes objetivos específicos:

- (i) compilação de dados e de análises geoquímicas de elementos Terras Raras;
- (ii) levantamento dos principais controles geológicos responsáveis pela gênese de depósitos deste tipo de elemento;
- (iii) caracterização estatística e de distribuição espacial das concentrações de ETR à procura de eventuais ocorrências com potencial econômico;
- (iv) análise comparativa das concentrações dos elementos Terras Raras das áreas de estudo, com os principais depósitos conhecidos do país e do mundo.

## **1.4 Justificativa**

Com o crescimento da demanda mundial por metais raros e de seus óxidos de grande pureza, indispensáveis na indústria de alta tecnologia, o interesse por ETR vem aumentando de

forma exponencial nas últimas décadas (Loureiro, 2013), sendo que entre 2015-2016 a demanda máxima global pode chegar a valores de cerca de 210 mil toneladas segundo dados mais atuais do USGS, enquanto que no ano de 2011 o mercado global dos óxidos de Terras Raras foi de aproximadamente 158,2 mil toneladas (Lima, 2012). Em função deste aumento de sua demanda mundial, o valor das Terras Raras que em 2009 representava US\$ 1 bilhão no mercado mundial, teve um aumento significativo para cerca de US\$ 11 bilhões em 2011 (McKinsey, 2011).

Produtos considerados de “linha verde” são um dos principais consumidores de Terras Raras, com essa indústria experimentando um forte desenvolvimento, principalmente a indústria automobilística, imãs permanentes e baterias. Os principais projetos adotados para a indústria de carros híbridos e elétricos com motores de imãs permanentes de Terras Raras, assim como seu uso na fabricação dos motores elétricos das turbinas eólicas, que chegam a consumir cerca de centenas de quilos, por megawatt de capacidade geradora, principalmente o elemento Nd.

Como salientado anteriormente, a China praticamente detém o monopólio da exploração destes elementos, possuindo cerca de 40% das reservas mundiais de Terras Raras (Andrade, 2014), e sendo responsável por 97% da produção mundial. Neste sentido, desde a última década os ETR passaram a ser considerados como estratégicos pelo Brasil, dando origem a diversas iniciativas no sentido de apoiar projetos de pesquisa científica e tecnológica que visem contribuir significativamente para o desenvolvimento científico e tecnológico em Terras Raras, formação de recursos humanos e capacitação de infraestrutura laboratorial e piloto para caracterização tecnológica, processamento, produção e uso de terras raras, visando agregar valor, adensar o conhecimento e promover a sustentabilidade e competitividade da cadeia produtiva desses elementos.

Com o objetivo de contribuir para retomada das pesquisas em terras raras no País e consequente redução da dependência externa de importação desses elementos e seus compostos, foi proposto um projeto em parceria entre UNIPAMPA e UFSM que foi contemplado na Chamada N° 76/2013 MCTI/CNPq/CT-Mineral - APOIO AO DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO EM TERRAS RARAS. Este trabalho está inserido nesta proposta, tendo sido escolhidas estrategicamente estudos de caso na região central do estado do Rio Grande do Sul como alvo, por já possuir um histórico em mineralizações e por possuir uma grande diversidade mineral.

## 1.5 Metodologia

A metodologia deste trabalho baseia-se em utilizar os dados que foram levantados de bibliografias da região central do Escudo Sul-Rio-Grandense, RS com o intuito de obter um panorama das concentrações de ETR. São utilizados como principais trabalhos os de quatro áreas distintas de municípios vizinhos. Destas áreas, duas são de Caçapava do Sul, uma em Lavras do Sul e outra em Vila Nova do Sul mais alguns municípios vizinhos. Estes dados foram retirados dos seguintes trabalhos:

- (i) dissertação de mestrado de Toniolo (2004) sobre o depósito Cerro dos Martins em Caçapava do Sul, RS.
- (ii) dissertação de mestrado de Lopes (2013), sobre a Mina do Seival em Caçapava do Sul, RS
- (iii) dissertação de Mestrado de Matté (2011), sobre as rochas dioríticas do Platô da Ramada em Vila Nova do Sul, RS.
- (iv) tese de doutorado de Liz (2008), sobre a Associação Shoshonítica de Lavras do Sul, RS.
- (v) dados de Almeida *et al.* (2012), sobre o magmatismo da Formação Acampamento Velho

Após a reunião de todas as amostras os próximos procedimentos foram o seguinte.

### 1.5.1 Matriz de Correlação

Com as 166 amostras que foram reunidas o primeiro passo foi a realização de uma matriz de correlação entre as 16 variáveis (ETRs), no intuito de verificar uma possível correlação entre os ETRL, ETRP e os médios.

### 1.5.2 Análise Estatística Básica e Histogramas de Frequência das Variáveis do Banco de dados

Aqui foram feitos histogramas de frequência para os teores de cada variável do banco de dados, assim como também foi realizado uma estatística descritiva. Também foi utilizado da técnica de desagrupamento das amostras, uma vez que estas apresentavam um agrupamento preferencial, depois da geração dos pesos para as amostras novos histogramas foram realizados, só que desta vez com uma maior representatividade.

### **1.5.3 Geração de Modelos de Distribuição de Teores**

Nesta etapa foram definidos os parâmetros das estimativas, como a geometria mais adequada do grid a ser criado, e a realização de mapas de isoteores a partir de 3 métodos interpoladores, o Método do Inverso do Quadrado da Distância, Mínima Curvatura e Shepard Modificado.

### **1.5.4 Cálculo de Resíduos e Técnicas de Validação dos Resultados de Interpolação**

Esta etapa consiste em determinar através de técnicas de validação cruzada, qual dos 3 interpoladores testados, foi o mais indicado para as estimativas de teores, uma vez que com ela é capaz de determinar a médio dos erros para os pontos estimados *versus* a amostras, averiguar a existência de regiões concentradoras de grande erros, e a correlação da estimativa *versus* os valores reais.

### **1.5.5 Geração de Modelos de Blocos Paras as Rochas do Acampamento Velho**

Após conhecidos todos os parâmetros necessários para a obtenção de uma melhor estimativa possível, 32 modelos de blocos foram gerados, 16 modelos de blocos referentes ao domínio das rochas ácidas do Acampamento Velho e outros 16 modelos de blocos para o domínio das rochas intermediárias e básicas.

### **1.5.6 Comparação Entre os Teores com Depósitos do Brasil e do Mundo**

Aqui foi realizado a etapa onde foi realizada a proposta principal do trabalho. As médias dos teores estimados foram comparados com os teores de outros depósitos conhecidos no Brasil e no mundo, onde foram utilizados quatro depósitos, um de Monazita (Catalão I, GO), um de Xinotímio (Pitinga, AM) e outros dois de Bastnaesita (Bayan Obo, China e Mountain Pass, EUA).

## **1.6 Organização da Monografia**

Esta monografia encontra-se na forma de capítulos estruturados da seguinte forma:

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre o que são os elementos Terras Raras, como são classificados, quais são os principais minerais de sua ocorrência, assim como os principais depósitos onde são encontrados estes elementos, no Brasil e no mundo com seus respectivos controles geológicos responsáveis pelo acúmulo dos depósitos. Também são abordados alguns fatores econômicos em relação a suas aplicações e demanda.

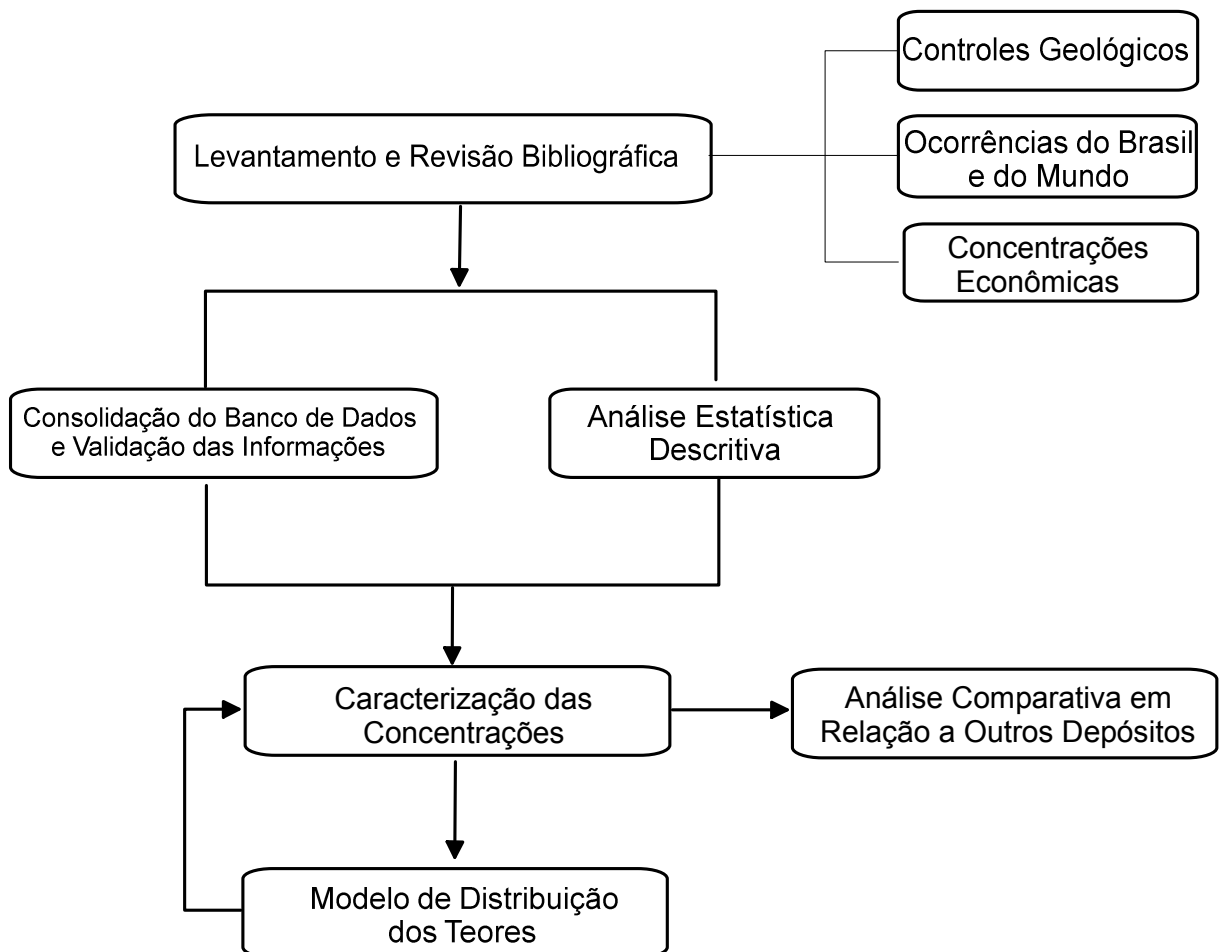
No capítulo 3 são apresentadas as áreas de estudo do trabalho, contendo suas localizações, e uma abordagem regional e local sobre os ambientes geológicos e a evolução geotectônica. Também é desenvolvida uma breve apresentação e descrição do banco de dados.

No capítulo 4 estão todas as análises de resultados, contendo análises de estatística básica, demonstração do impacto do agrupamento dos dados na inferência estatística, geração de modelos de distribuição de teores, parâmetros necessários para realização de uma boa estimativa, cálculo de resíduos e de validação dos resultados, geração de modelos de blocos e comparações entre teores de depósitos conhecidos com a área de estudo.

No capítulo 5 serão discutidos as conclusões e as etapas principais para geração das comparações de teores.

Na Figura 1 é apresentado um fluxograma com as atividades que foram executadas ao longo do projeto.

Figura 1: Fluxograma de atividades, exemplificando o passo a passo da metodologia do trabalho







Por exemplo, os elementos Lutécio (0,8 ppm) e o Túlio (0,5 ppm) que são as TRs menos abundantes na crosta, são mais abundantes que o Bismuto (0,008 ppm) e a Prata (0,07 ppm).

Os ETR podem ser classificados quimicamente em 2 grupos, os leves e os pesados. Nos leves estão enquadrados os elementos que vão do Lantânio (57) ao Európio (63), e os pesados vão do Gadolínio (64) ao Lutécio (71), incluindo o Escândio (21) e o Ítrio (39).

Apesar do Ítrio e o Escândio terem uma massa menor que os lantanídeos, eles normalmente são incluídos no grupo de pesados por causa de suas associações químicas e físicas com os elementos pesados em depósitos naturais (Lima, 2012).

As aplicabilidades dos ETR são inúmeras devido ao fato deles possuírem características e propriedades específicas, principalmente as magnéticas e espectroscópicas. Os lantanídeos possuem características muito semelhantes, consequência da sua estrutura eletrônica. Todos os átomos neutros têm em comum a configuração eletrônica  $6s^2$  com uma ocupação variável em 4f.

Estes 17 elementos têm suas utilizações concentradas na indústria de alta tecnologia, não tendo até o momento o conhecimento de outros elementos substitutos, com o mesmo desempenho (Weschenfelder *et al.*, 2012).

Aproximadamente 95% dos óxidos de Terras Raras são obtidos a partir de três minerais: monazita, bastnaesita e xenotímio (Andrade, 2014), sendo os dois primeiros os principais portadores das Terras Raras leves e o Xenotímio principal fonte de Ítrio e outros elementos que compõem os ETR pesados.

A seguir são apresentadas algumas informações sobre os três principais minerais portadores de Terras Raras:

(i) Monazita ( $R-PO_4$ ): classificado como um fosfato de Terras Raras, possuindo em sua composição elementos leves ( $R = Ce, La, Nd$  e  $Nd$ ), 90% dos ETR da monazita são o lantânio, cério e neodímio. Apresenta teores variáveis (40-50% de Cério, 20-36% de Lantânio, 8-16% de Neodímio) e quantias consideráveis de Praseodímio, Samário e Ítrio;

(ii) Xenotímio ( $YPO_4$ ): diferente da monazita é um fosfato concentrador de Terras Raras pesados como Ítrio, Itérbio, Érbio, Disprósio e Gadolínio. Sendo uma das principais fontes do minério de Ítrio tendo em média 60% de teor neste elemento. Apresenta composição variável (40-69% de Ítrio, 4-19% de Itérbio, 4-14% de Érbio e 5-13 de Disprósio). Sua ocorrência é quase que sempre associada a monazita, porém, em quantidades bem menores. Uma de suas características principais é ter uma propriedade magnética forte, podendo facilitar na separação da monazita por métodos magnéticos.

(iii) Bastnaesita ( $R-FCO_3$ ): É um fluorocarbonato de Terras Raras, e assim como a monazita, ele concentra majoritariamente elementos leves ( $R = Ce, La, Nd$  e  $Pr$ ), possuindo

cerca de 40-54% de cério, 25-40% de lantânio, 35% de praseodímio e 8-16% de neodímio. Este mineral é considerado uma das principais fontes de ETR tanto em volume de reservas quanto a teores (Chepcanoff, 2006).

## 2.1 Aplicações

As principais aplicações das Terras Raras estão nas indústrias de: catalizadores automotivos, craqueamento de petróleo, indústria de vidros e polímeros, imãs permanentes, baterias, cerâmicas, materiais luminescentes (“fósforos”), *laser* e imunologia (Martins & Isolani, 2005). A tabela 1 apresenta mais detalhadamente as aplicações de cada ETR.

Tabela 1: Principais aplicações dos elementos Terras Raras

<b>Elemento</b>	<b>Número atômico</b>	<b>Aplicações</b>
<b>Escândio (Sc)</b>	21	Fabricação de lâmpadas de alta qualidade, e em ligas de alumínio aeroespaciais
<b>Ítrio (Y)</b>	39	Fabricação de fósforos, filtros de micro-ondas, polimento, <i>lasers</i> , vidro de baixa expansão térmica
<b>Lantânio (La)</b>	57	Eletrodos de bateria, indústria de vidros, ligas metálicas, fundição
<b>Cério (Ce)</b>	58	Agente oxidante, fabricação de vidro, pedras de isqueiros, polimento, catalisador de refino de petróleo
<b>Praseodímio (Pr)</b>	59	Refratários, iluminação, corante de vidro e esmaltes, vidros de óculos de proteção
<b>Neodímio (Nd)</b>	60	Imãs especiais, corante de vidros, <i>lasers</i>
<b>Promécio (Pm)</b>	61	Baterias nucleares
<b>Samário (Sm)</b>	62	Imãs super potentes, <i>lasers</i> , vidros absorvedores de infravermelho, catalisador
<b>Európio (Eu)</b>	63	Fósforos de cinescópios, semicondutor de <i>laser</i> , reatores nucleares
<b>Gadolínio (Gd)</b>	64	Fósforos e cinescópios, ligas metálicas resistentes a alta temperatura e oxidação
<b>Térbio (Tb)</b>	65	Estabilizador de células de combustível de alta temperatura, dispositivos semicondutores

<b>Disprósio (Dy)</b>	66	Reatores nucleares
<b>Hólmio (Ho)</b>	67	<i>Lasers</i>
<b>Érbio (Er)</b>	68	Ligas metálicas e reatores nucleares
<b>Túlio (Tm)</b>	69	Máquinas portáteis de raio X
<b>Ítério (Yb)</b>	70	Metalúrgicas, agente químico redutor
<b>Lutécio (Lu)</b>	71	Vidros de alto índice de refração

Fonte: Laboratório virtual de química UNESP Bauru

A previsão da demanda dos elementos Terras Raras segundo suas utilizações entre 2008 e 2014 (Tabela 2), deixa bem claro um aumento significativo nos setores de fabricação de ímãs permanentes e de ligas metálicas, sem contar que a indústria de catalisadores se manteve com alto consumo, tendo um leve crescimento.

Tabela 2: Previsão de demanda de ETR por setores (milhares de toneladas/ano)

<b>Aplicação</b>	<b>Consumo 2008</b>	<b>Consumo 2014</b>	<b>Var. 2011-14</b>
<b>Ligas metálicas</b>	22,5	43,0-47,0	15-20
<b>Ímãs</b>	26,5	39,0-43,0	10-15
<b>Fosforescentes</b>	9,0	11,0-13,0	7-10
<b>Cerâmicas</b>	7,0	8,0-10,0	7-9
<b>Catalisadores</b>	23,0	28,0-30,0	6-8
<b>Polimento</b>	15,0	19,0-21,0	6-8
<b>Vidros</b>	12,5	12,0-13,0	----
<b>Outros</b>	8,5	10,0-12,0	7-9
<b>Total</b>	<b>124,0</b>	<b>170,0-190,0</b>	<b>8-11</b>

Fonte: Kingsnorth (2009).

## 2.2 Geologia dos Depósitos de ETR

Os elementos de Terras Raras são encontrados como constituintes de granitos, pegmatitos, rochas carbonatíficas e em rochas silicatadas. São conhecidos cerca de 250 minerais contendo Terras Raras no mundo, sendo que a maioria dos recursos estão associados a apenas três minerais: xenotímio, bastnaesita e monazita (Loureiro, 2013). Apesar da bastnaesita possuir maior teor em óxidos de Terras Raras (OTR), a monazita é o mais importante devido à sua grande abundância.

De acordo com Chaves *et al.* (2010), os depósitos do mineral monazita podem ser classificados de duas formas: depósitos primários e secundários. Os primários são encontrados em granitos, pegmatitos de rochas alcalinas e veios de quartzo hidrotermais, já os secundários são formados devido a alteração e segregação destes depósitos primários, além do transporte e da deposição em cordões litorâneos e aluviões fluviais. Já a bastnaesita é encontrada em contatos ou em zonas de alteração de rochas alcalinas e em depósitos metassomáticos (Rocio *et al.*, 2012).

As ocorrências dos ETR são numerosas, seus depósitos tem ocorrências de formas bem variadas, sendo que algumas formas de ocorrência costumam ser de um maior potencial de geração de minério em volume e/ou em qualidade. Existem basicamente dois tipos de ocorrências, as endógenas, como no caso das rochas carbonatíticas, granitos e pegmatitos, assim como podem ocorrer depósitos exógenos, do tipo *placers*, que na maioria das vezes são originados por fontes dos próprios carbonatitos, granitos ou pegmatitos.

Sendo que os de origem exógenas são melhores concentradores de ETRP, pelo fato destes serem elementos imóveis, geralmente em depósitos exógenos os Terras Raras Leves foram carregados (ETRL são elementos móveis), ocorrendo desta forma uma forma de separação por “diferença de densidade”.

A distribuição assim como as concentrações de ETR são dependentes de diversos fatores petrogenéticos, como enriquecimento em estágios finais de magmatismo ou de fluidos hidrotermais. O enriquecimento de ETRL em rochas ígneas estão comumente associados ao fracionamento de ETRP em alguns minerais, como granada e piroxênio, durante a fusão parcial ou durante a cristalização fracionada, sendo os depósitos originados de diversas formas na natureza.

### **2.2.1 Depósitos de Origem Carbonatítica**

Muitas intrusões carbonatíticas são enriquecidas em ETR e eles são, entre todos os tipos de rochas, os que possuem os teores mais elevados de Terras Raras, oscilando entre 72 a 15.515 ppm. No Brasil temos vários exemplos de depósitos dessa origem: Catalão I (GO), Catalão II (GO), Araxá (MG), Tapira (MG), Mato Preto (PR), Barra do Rio Itapirapuã (PR-SP), Sete Alagoas (AM), assim como diversos depósitos a nível mundial como Mountain Pass (EUA).

### **2.2.2 Hidrotermais Plutogênicos**

A atividade hidrotermal desempenha um grande papel, em complexos alcalino-carbonatíticos, como fonte de mineralizações. Nestes depósitos, a atividade de líquidos voláteis, como soluções fluoradas são um dos principais agentes concentradores de mineralizações, sendo eles capazes de transportar Nb e Ta, além de outros elementos incompatíveis (Biondi, 1986). No Brasil podemos citar como exemplo de ocorrências destes depósitos em Morro do Ferro (MG) e Bambuí (MG).

### **2.2.3 Pegmatitos**

São comuns as ocorrências de enriquecimento de Terras Raras em pegmatitos, pois quando eles são formados geralmente são carregados diversos elementos incompatíveis no magma residual, assim como os ETR, mas estes depósitos não expressam muita importância econômica pois são muito pequenos e com baixos teores. No norte do território Australiano existe um depósito que contém 1 milhão de toneladas a teores de 4% em OTR dessa origem (Castor, 2006), e no Brasil ocorrem alguns depósitos de pouca tonelagem como na Região de São João del Rei (MG) e Peixe (TO).

### **2.2.4 Depósitos Peralcalinos**

Apesar de rochas ígneas peralcalinas serem muito favoráveis a ter depósitos de Terras Raras e os recursos serem vastos, a maioria destes depósitos são de baixo teor. Apenas um único depósito na Rússia tem sido lavrado, sendo depósitos tipicamente enriquecidos em Ítrio e ETRL, além de zircônio. Este depósito na Rússia é um nefelina sienito, que fica localizado na Península de Kola. O maciço é em camadas e composta por 4 suítes (Mclemore, 2006).

### **2.2.5 Placers Marinhos**

A maioria das acumulações de depósitos *placers*, que tem volumes e teores significativos, são de depósitos Terciários e Quaternários derivados de áreas de origem primária que podem incluir rochas graníticas, ou metamórficas de alto grau, mas também podem ocorrer em menores quantidades em depósitos *paleoplacer*, tão antigas como de idade pré-cambriana contendo recursos significativos em ETR (Orris & Grauch, 2002). Geralmente encontrados ao longo de cordões litorâneos, são importantes fontes de ETRP, e sua associação mineralógica principal é: Ilmenita, Zirconita, Monazita, Xenotímio (mais raro) e outros. Loureiro (1994) cita vários depósitos no Brasil como o do Delta do Paraíba, no estado do Rio de Janeiro, Guarapari,

Boa Vista, Rio Sal, Linhares, em Espírito Santo, no Cumuxatiba, Joacema, Alcobaça, Belmonte estado da Bahia e várias outras ocorrências.

### **2.2.6 Placers Fluviais**

O potencial de *placers* fluviais é muito grande, sendo importantes fontes de ETRP. Geralmente formam depósitos poliminerálicos, tendo monazita e Xenotímio como coprodutos ou subprodutos de outros bens minerais primários como ouro nativo, rutilo, Zirconita, cassiterita. São considerados alvos potenciais prospectivos regiões com redes de drenagens de granitos, de complexos alcalinos de áreas que possuem barreiras naturais. Um dos depósitos mais importantes no Brasil é o depósito de Pitinga (AM).

### **2.2.7 Depósitos Lateríticos**

Depósitos lateríticos que ocorrem próximos de fontes primárias de baixo teor, tais como carbonatitos e sienitos, tem sido bem estudadas recentemente como grande potencial de acumuladores de ETR. No entanto, existem poucos depósitos sendo explorados atualmente, sendo que ao sul da China há ocorrência de alguns depósitos importantes de argilas superficiais (Orris & Grouch, 2002). Estes depósitos representam hoje cerca de 14% da produção Chinesa e formam camadas intemperizadas a partir de granitos. Como é mencionado em Castor (2006) o minério referido como argilas de adsorção iônica vem principalmente de dois locais: Jiangxi, província de Longnam e Xunwu. O primeiro sendo rico em Ítrio e ETRP e o segundo em ETRL, enquanto que Hollins (2010) cita Hunan, Jiangxi, Guangdong e Jiangsu como os depósitos Chineses ricos nas ditas argilas.

### **2.2.8 Depósito de ETR-Ferro**

Alguns depósitos onde ocorre ferro também contém recurso em ETR, no entanto apenas uma área no mundo ocorre a exploração deste tipo de depósito: Bayan Obo, na China. Apesar de ser somente este em exploração ele ainda é responsável por ser o que constitui o maior recurso em ETR no mundo, sendo considerado atualmente a fonte mundial mais importante de ETR (Castor, 2006). O depósito de Bayan Obo, é um importante gerador de ferro, nióbio e outros ETRP. A vantagem dos ETR serem minerados como subproduto é o barateamento no custeio de sua exploração, tendo assim uma maior competitividade no mercado.

## 2.3 Principais Depósitos no Brasil e no Mundo

### 2.3.1 Depósitos Brasileiros

O Brasil já possui uma tradição no estudo e aproveitamento de Terras Raras, começando a explorar areias monazíticas ainda no final do século XIX, quando chegou a ser um dos maiores produtores mundiais. Hoje as maiores reservas de Terras Raras do Brasil estão associadas a complexos alcalinos-carbonatíticos, tendo ainda areias monazíticas como importantes fontes deste minério, estes depósitos atuais são viabilizados tanto como constituintes principais de Terras Raras, quanto associados a outros bens minerais, sendo extraídos como subproduto. Os principais depósitos de Terras Raras, constituídos de xenotímio, monazita e bastnaesita estão localizados nos estados de Paraná, Rio de Janeiro, Espírito Santo, Goiás, Amazonas, Minas Gerais e Bahia (Figura 3), segundo Vieira & Lins (1997). Entre os principais depósitos do Brasil podem ser mencionados: Depósito de Catalão I (GO), Pitinga (AM), Araxá (MG), São João da Barra (RJ), Aracruz (ES) e Prado (BA).

Figura 3: Mapa do Brasil indicando as principais ocorrências de ETR



Fonte: Extraído de Loureiro (1994)



### **2.3.1.1 Depósito de Catalão I (GO)**

O depósito de Catalão I (GO) se encontra no Complexo Carbonatítico-Foscorítico, que faz parte da Província Ígnea do Alto Parnaíba (PIAP), sendo que este corpo intrusivo é formado no centro por rochas carbonatíticas e foscoríticas e uma série-bebedourítica (piroxenitos) em sua borda (Cordeiro, 2011). Tanto as bordas quanto o centro possuem apatitas enriquecidas com ETR. Neste depósito, Rócio *et al.* (2012) cita que ocorre grande produção de nióbio e fósforo, tendo Terras Raras como subproduto (Cério). Segundo dados do USGS, este depósito possui reservas de 2 milhões de toneladas de laterita com teor de 12% OTR, 5 milhões com teor de 12% de OTR, 21 milhões com teor de 1,02% OTR e 4,6 milhões com teor de 4% ETR.

### **2.3.1.2 Depósito de Pitinga (AM)**

Pitinga é um depósito poliminerálico, com Sn e elementos de Terras Raras pesadas, Nb-Ta, Zr e U. Este depósito fica situado na porção norte do Cráton Amazônico, sendo que esta jazida de Sn é considerada de classe mundial. Suas mineralizações estão relacionadas a dois corpos graníticos, Água Boa e Madeira, onde ocorreram processos pós-magmáticos, como albitização e greisenização (Feio *et al.*, 2007). As reservas estimadas de Terras Raras, contidas em Xenotímio nos aluviões, são de 2 milhões de toneladas de Xenotímio, com 1% de Ítrio, possuindo teores bem elevados de fração pesada (98,4%) de concentração de minério no Xenotímio (Loureiro, 2013).

### **2.3.1.3 Araxá (MG)**

O Complexo Alcalino Carbonatítico de Barreiro (CACB) está localizado a 6 km ao sul da cidade de Araxá (MG), local onde encontra-se a maior mina de nióbio do mundo e uma das minas de fosfato de maior importância do Brasil. A geologia é dominada por um corpo intrusivo nos terrenos Neoproterozóicos do Grupo Ibiá, tendo como rochas encaixantes intercalações de quartzitos e muscovita-quartzo-clorita xisto (Raposo & Pereira, 2013). Segundo Rócio *et al.* (2012) os recursos do depósito são superiores a 450 milhões toneladas de minério de nióbio a 2,5% de Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 4,4% de óxidos de TR; 800 mil toneladas de minério de laterita com 13,5% de óxidos de TR, 2% de Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 0,05% de U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>.

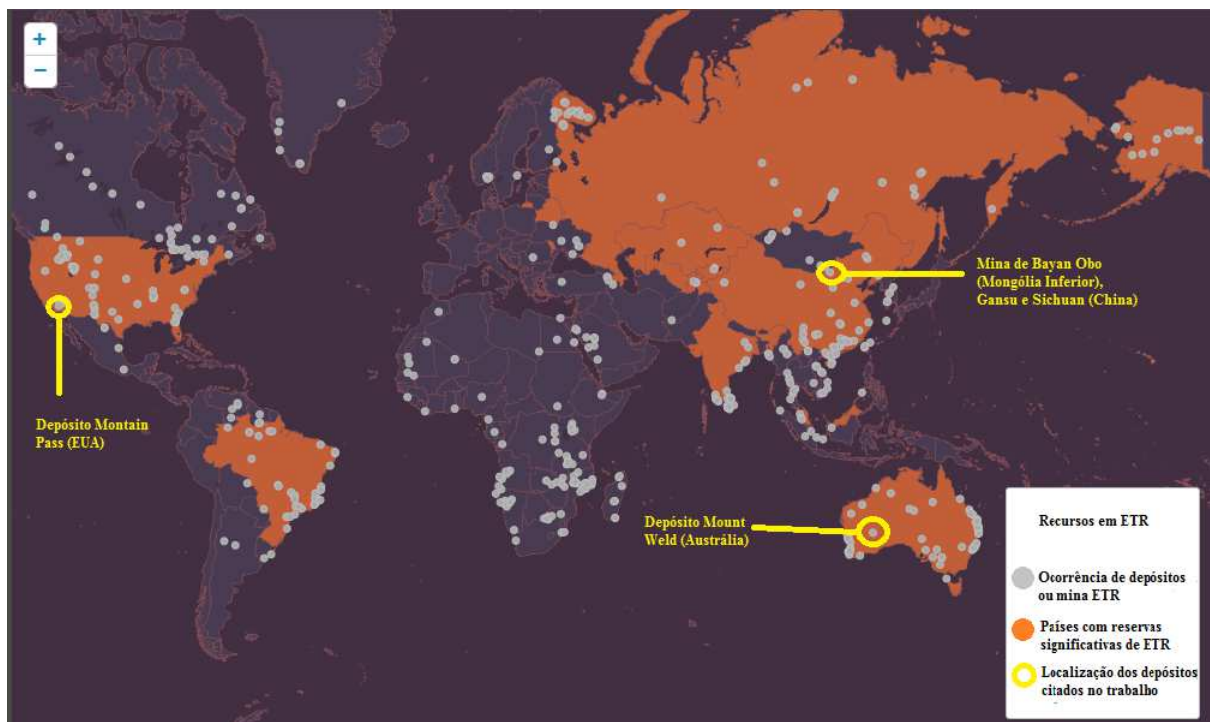
#### 2.3.1.4 São João da Barra (RJ), Aracruz (ES) e Prado (BA).

Em São João da Barra é extraído monazita em sedimentos do Grupo Barreiras (depósitos tipo *placer*) com reservas medidas de 8177t de monazita contendo 59,99% de OTR. Aracruz (ES) consistem em depósitos do tipo *placer* em praia em sedimentos do Grupo Barreiras, contendo reservas de 2964t de monazita com teor de 59,98% de OTR e 282t a 1,05% de monazita. Já o depósito Prado (BA), possui reservas medidas de 4664t de monazita contendo 19,98% de OTR, além de Xenotímio e Allanita em areias de praias (Rocio *et al.*, 2012).

#### 2.3.2 Depósitos no Mundo

No Sumário Mineral de Terras Raras do DNPM, Andrade (2014) ressalta os principais países detentores das reservas e produções mundiais de ETR, sendo a China detentora da maior parte das reservas mundiais (40%), seguido por Brasil (16%), EUA (10%), Índia (2,28%) e Austrália (1,54%). Na Figura 4 podemos ver a distribuição das áreas de maiores recursos em Terras Raras no Mundo, podendo-se ainda citar como principais depósitos a nível mundial: Mina de Bayan Obo, Mongólia Inferior (China), depósito Mountain Pass (EUA) e depósito Mount Weld (Austrália).

Figura 4: Mapa com as principais ocorrências ou minas de ETR no mundo (círculos cinzas), bem como principais países que possuem reservas significativas (coloridos em cor laranja) e dentro dos círculos amarelos



Fonte: Extraído e modificado de <http://energy.gov/maps/estimated-rare-earth-reserves-and-deposits>

### **2.3.2.1 Mina de Bayan Obo (Mongólia Inferior), Gansu e Sichuan (China)**

O depósito polimetálico de Bayan Obo fica localizado na parte norte do Cráton do Norte da China (NCC). Este gigante depósito, originado por hidrotermalismo, é um depósito rico em ETR-Fe-Nb que fica hospedado em sequência metassedimentar. É composto por mármores dolomíticos com diques carbonatíticos datados de idade Neoproterozóica (Chao *et al.*, 1997). Os seus principais minerais de minério que possuem ETR são monazita e bastnaesita, enquanto que a hematita e magnetita são os principais minerais do minério de Fe e a columbita é o principal mineral de Nb. É comum sua ocorrência em faixas, disseminados ou até mesmo maciços.

O depósito de Bayan Obo juntamente com o de Gansu e de Sichuan, representa cerca de 70% de toda produção Chinesa em TR segundo dados de Rócio *et al.* (2012). Segundo Hollins (2010), a Mongólia Inferior possui uma reserva de 300 milhões de toneladas, com um teor de 1,5% de OTR, e Sichuan com 17 milhões de toneladas, a um teor de 3%.

### **2.3.2.2 Depósito Mountain Pass (EUA)**

O depósito de bastnaesita em Mountain Pass fica localizado no estado da Califórnia e foi descoberto em 1949, tornando o EUA um dos maiores exportadores de Terras Raras. Trata-se de um complexo ígneo carbonatítico maciço que é chamado de Sulphide Queen que compõe o núcleo da montanha. A ocorrência principal é de 10-15% do mineral bastnaesita (mineral minério), tendo também como minério secundário 65% de calcita e dolomita e entre 20-25% de barita (Long *et al.* 2012). Os seus ETR foram lavrados a partir do ano de 1952 até o ano 2002, tendo 1990 como ano de maior produção (22mil toneladas por ano). Estimativas da Molycorp (Molybdenium Corporation) é que ainda restam entre 22 a 52 milhões de toneladas com teor médio de 8,9% de Terras Raras.

### **2.3.2.3 Depósito Mount Weld (Austrália)**

A oeste da Austrália está localizado um enorme depósito laterítico rico em monazita e churchita [ $Y(PO_4).2H_2O$ ] como principais minerais de minério de Terras Raras, também estando associados outros minerais como zircão, rutilo, apatita, goetita e outros. Em janeiro de 2012, Lynas Corporation Ltda, relatou os recursos medidos, indicados e inferidos, tendo um depósito com 14,949 milhões de toneladas com um teor de corte de 2,5% OTR, e de 9,8% incluindo  $Y_2O_3$  (Miezits & Hoatson, 2013).

## Capítulo 3

### Apresentação das Área de Estudo e Análise do Banco de Dados

Este trabalho possui um banco de dados composto por cinco áreas, sendo que duas estão bem próximas e as demais são distintas que se localizam em municípios vizinhos, sendo duas áreas localizadas no município de Caçapava do Sul, uma em Lavras do Sul e outras duas próximas de Vila Nova do Sul, todas na região central do Escudo Sul-Rio-Grandense RS, inseridas na Bacia do Camaquã.

#### 3.1 Localização das Áreas de Estudo

##### 3.1.1 Associação Shoshonítica de Lavras do Sul (ASLS)

Esta área fica localizada na região de Lavras do Sul, situada na parte sudoeste do Escudo Sul-Rio-Grandense, ficando a 300 Km de distância de Porto Alegre. Este percurso é feito através da BR-290 até o entroncamento com a BR-392 onde se dobra para a direção sul, em direção à cidade de Caçapava do Sul. A partir de Caçapava percorre-se cerca de 60 km pela RS-357, no sentido sudoeste, em direção à cidade de Lavras do Sul (Figura 5).

A área de estudo fica situada entre as coordenadas UTM, 6600000-6586000m N e 216000-236000m E, inserida nas folhas de Lavras do Sul (SH 22-Y-A-IV-3MI) e Arroio América (SH-22-Y-A-IV-1MI).

##### 3.1.2 Depósito Cerro dos Martins

Esta área, situada no município de Caçapava do Sul, ela é conhecida localmente como Cerro dos Martins. Seu acesso, partindo de Porto Alegre, é feito a partir da BR-290 até o entroncamento com a BR-153, localizado a 17 Km antes da cidade de Caçapava do Sul. No entroncamento segue pela BR-153 pelos próximos 45km no sentido de Bagé. Nesta quilometragem, corta-se o canto NW da área do DCM, onde à esquerda encontra-se numa estrada secundária, sem pavimentação, chegando à área do depósito de Cu do Cerro dos Martins (Figura 5). Esta região pertence à carta topográfica de Caçapava do Sul.

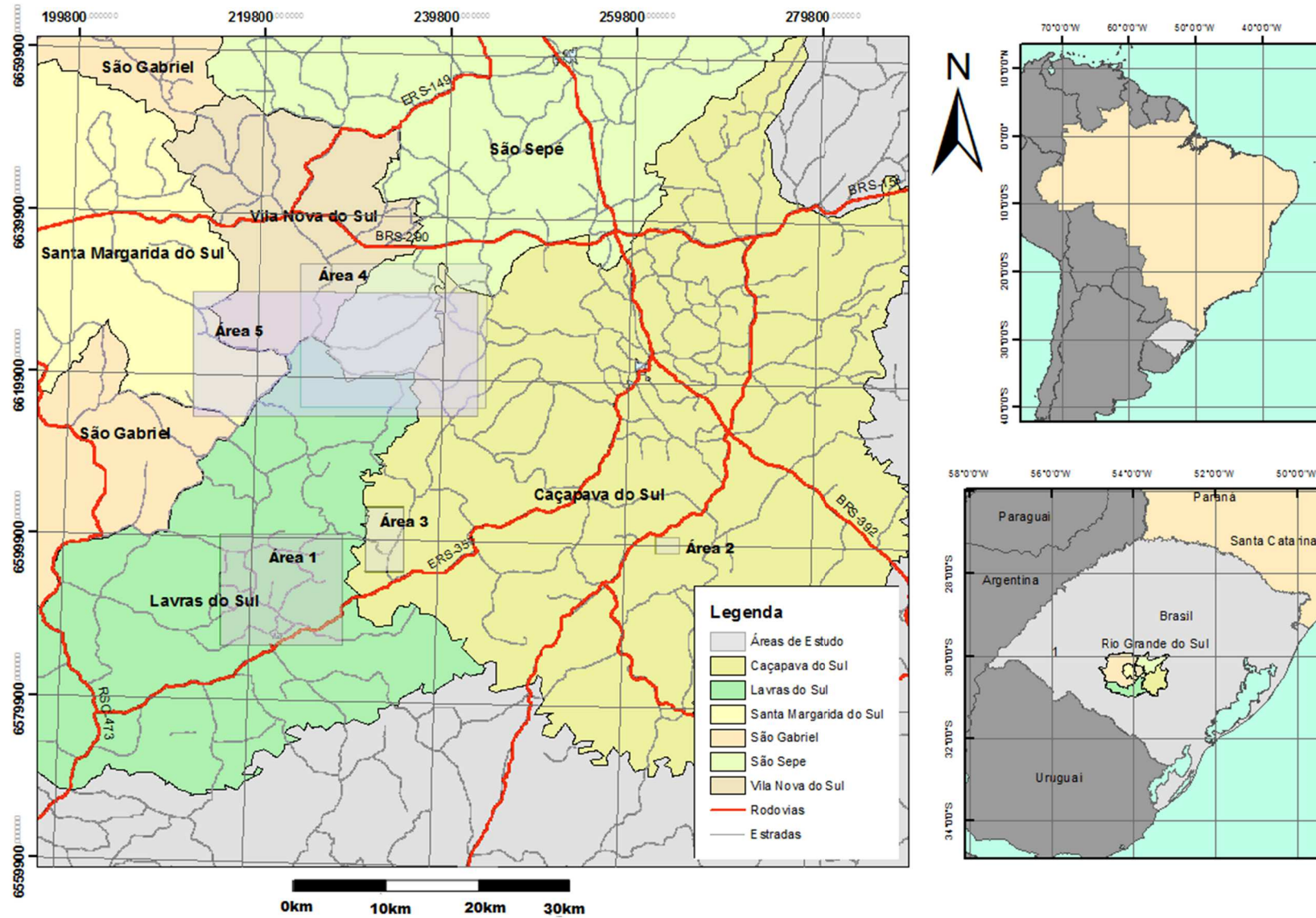
### **3.1.3 Mina do Seival**

A área de estudo está situada a 324 km de Porto Alegre, seguindo pela BR-290. Após percorrer 57 km pela RS-357, na direção SW, até chegar próximo do limite entre os municípios de Caçapava do Sul e Lavras do Sul. O acesso às Minas do Seival fica numa estrada sem pavimentação (Figura 5), o local fica inserido na carta topográfica do exército, na folha Arroio América (SH.22-Y-A-IV-1), entre as coordenadas (UTM) 6604000-6596000m N e 232000-236000m E.

### **3.1.4 Platô da Ramada.**

Esta área fica localizada no município de Vila Nova do Sul, com seu principal acesso a partir de Porto Alegre pela BR-290. Quando chega-se no município, segue por uma estrada secundária na direção sudoeste por mais 20 km, onde aflora o corpo estudado (Figura 5). Sua localização fica entre as coordenadas (UTM) 209800- 214224m E, 6620722-6621866m N.

Figura 5: Mapa de situação e localização das áreas de estudo



Fonte: Confeccionado pelo autor

## 3.2 Geologia da Bacia do Camaquã

No Escudo Sul-Rio-Grandense extensas bacias vulcano-sedimentares se desenvolveram nas fases tardia pós-colisionais do ciclo orogênico Brasileiro/Pan-Africano, estando a evolução dessas bacias ligadas a sistemas deposicionais marinhos, continentais e a transcorrência dos terrenos.

A Bacia do Camaquã, é conhecida por ser bem preservada, sem apresentar metamorfismo ou deformação dúctil (Paim *et al.*, 2014). Posicionada sobre o Cráton Rio de La Plata e o Terreno São Gabriel (oeste), e margeada a leste pelos cinturões Dom Feliciano e Tijucas com orientação NE-SW, sua evolução tem início ao final da orogênese colisional Dom Feliciano (630-600 Ma) e término em 470 Ma com o vulcanismo extensional do Membro Rodeio Velho (Hartmann *et al.*, 1998).

A Bacia do Camaquã (BC) apresenta um *locus* deposicional de quatro pulsos tectônicos vulcano-sedimentares, sendo vinculados a diferentes ambientes tectônicos e diferentes assinaturas vulcânicas (Paim *et al.*, 1998), com registros limitados por discordâncias angulares (alogramas), tendo intervalos de eventos deposicionais com acúmulo de pacotes sedimentares e intervalos de eventos erosivos. São distribuídas as sucessões em cinco sub-bacias (Boicí-Piquiri, Guaritas, Santa Bárbara, Ramada e Taquarembó).

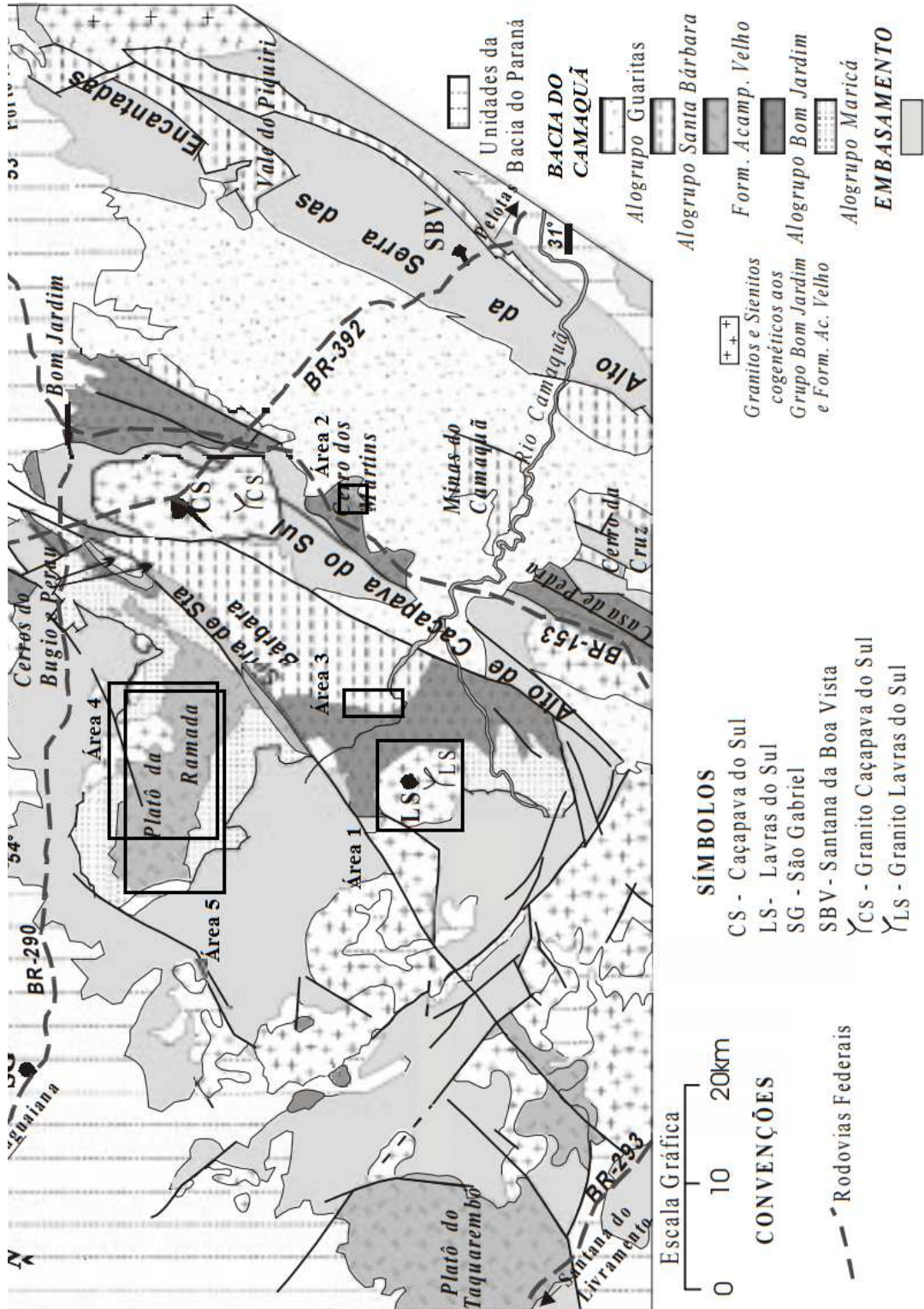
A BC armazena parcialmente ou totalmente sobreposições de bacias transcorrentes (*strike-slip*) Bom Jardim Leste e Oeste (Alogrupos Bom Jardim), bacias antepaís de retroarco Maricá (Alogrupos Maricá) e bacias riftes Santa Barbara Leste, Oeste e Guaritas (Alogrupos Santa Barbara e Alogrupos Guaritas).

Segundo Paim *et al.* (2000), a bacia apresenta uma deformação decrescente da sua base para o topo, tendo unidades mais antigas na base representadas pelos alogrupos Maricá e Bom Jardim, possuindo dobras associadas a falhas inversas, de empurrão e transcorrentes, características de ambientes compressivos e transpressivos. Enquanto que os alogrupos mais jovens (Guaritas e Santa Barbara) possuem dobras de arraste suaves e falhas normais vinculadas a ambientes transtrativos (Paim *et al.*, 2000).

### 3.2.1 Evolução Tectônica da Bacia do Camaquã

Paim *et al.* (2014) propuseram uma divisão dos estágios evolutivos da Bacia do Camaquã, em bacias tardi-orogênicas: bacia de retro-arco de antepaís Maricá (Alogrupos

Figura 6: Mapa geológico da Bacia do Camaquã, região central do Rio Grande do Sul, com a delimitação dos Alogrupos e as porções do embasamento.



Fonte: Modificado de Janikian *et al.*, (2003).



### 3.2.1.1 Alogrupo Maricá

O Alogrupo Maricá (Paim *et al.*, 2000) é a unidade mais antiga de Bacia do Camaquã, com dobras suaves associadas a falhas transcorrentes, de empurrão e inversas. É limitado no topo por uma discordância angular e na base por uma não conformidade. Na Sub-bacia Ramada (Paim *et al.*, 2014), a base apresenta um hiato de milhões de anos, recobrando o terreno juvenil São Gabriel 0,9 a 0,7 Ga (Hartmann *et al.*, 2011). Segundo datações U-Pb de Almeida *et al.* (2012) foi considerado  $601 \pm 13$  Ma como idade avançada do Alogrupo Marica.

Na Sub-bacia Ramada, a seção exposta registra um ciclo transgressivo-regressivo composto por uma sucessão inferior fluvial entrelaçada, uma intermediária marinha rasa e uma superior deltaica (Borba *et al.*, 2006). Esses intervalos são correlatos às formações Passo da Promessa, São Rafael e Arroio América de Pelosi & Frago-Cesar (2003).

Mantem-se a interpretação de uma bacia de retro-arco de antepaís, com vínculo ao estágio tardi-orogênico do Cinturão Dom Feliciano (Paim *et al.*, 2000). A borda do Cráton estaria a oeste da Sub-bacia Ramada enquanto sua margem ativa, está situada a leste da atual Sub-bacia Piquiri. O soerguimento da margem ativa teve registro preservado na forma de seixos a matações de arenitos incorporados à base do Alogrupo Bom Jardim na Sub-bacia Piquirí.

### 3.2.1.1 Alogrupo Bom Jardim

O Alogrupo Bom Jardim (Paim *et al.*, 2000), ou grupo Bom Jardim (Borba, 2006) abrange uma sucessão vulcano-sedimentar, limitada por discordâncias angulares suaves na base enquanto que no topo possui discordâncias mais acentuadas. Inclui-se a Formação Hilário (Ribeiro & Fantinel, 1978), Formação Cerro da Angélica e Formação Picada das Graças (Janikian *et al.*, 2003)

Janikian *et al.* (2003) propõe uma revisão litoestratigráfica do “Grupo Bom Jardim”, em sua área tipo que caracteriza três unidades de contatos transicionais: Formação Cerro da Angélica, Formação Hilário e Formação Picada das Graças, constituindo rochas siliciclásticas, vulcânicas (basaltos, andesitos e riolitos) e vulcanoclásticas.

A Formação Cerro da Angélica é caracterizada por ritimitos, arenitos conglomeráticos e peperitos subordinadamente, gerados em sistemas de leques sublacustres sobrepostos por sistemas deltaicos. Os depósitos conglomeráticos caracterizam um ambiente de fluxos de gravidade de leques subaquáticos, predominando na base fragmentos vulcânicos de riolitos com basaltos e andesitos em menores quantidades, indicando eventos concomitantes a ativação de falhas de bordas da bacia, contribuindo para grandes aportes sedimentares (Janikian *et al.*, 2003).

A Formação Hilário possui rochas vulcânicas de composição básica, intermediária (principalmente) e ácida (basaltos, latito-basaltos, latitos, andesitos e riolitos) datadas com  $591,8 \pm 3$  Ma por método U-Pb (Almeida *et al.*, 2012), posicionadas em ambientes subaquáticos, tendo subordinadamente rochas piroclásticas posicionadas por processos de fluxo gravitacional ou decantados em água, representando possivelmente o período de maior atividade das falhas relacionadas à região da bacia (Borba, 2006). Já a Formação Picada das Graças, possui camadas rítmicas de arenitos, argilitos e siltitos, típicos de ambientes pró-deltas, sobrepondo espessos pacotes conglomeráticos de leques proximais, predominando no topo depósitos deltaicos. A Associação Shoshonítica de Lavras do Sul correspondem a parte plutônica do vulcanismo da Formação Hilário.

### **3.2.1.2 Alogrupo Santa Bárbara (ASB)**

O Alogrupo Santa Bárbara representa mais uma sucessão vulcano-sedimentar que engloba as Formações Santa Bárbara (Robertson, 1966) e Acampamento Velho (Ribeiro & Fantinel, 1978) e alogrupos Cerro do Bugio e Santa Bárbara (Paim *et al.*, 2000). O ASB preenche dois riftes (Santa Bárbara Oeste e Leste), o intervalo superior extrapola esses limites, repousando sobre o embasamento a oeste.

A Aloformação Acampamento Velho Inferior é marcado por ter vulcanitos bem expostos na Serra de Santa Bárbara, cobertos por um espesso pacote sedimentar seguido por um intervalo vulcânico (Aloformação Acampamento Velho Inferior), expostos nos Platôs do Taquarembó e da Ramada. No Acampamento Velho Inferior os derrames e tufos ácidos recobrem uma discordância angular e são cobertos pelas aloformações Santa Fé Inferior e Superior, Serra do Segredo e Lanceiros (Paim *et al.*, 2014). Cada uma dessas unidades inicia com uma discordância erosiva coberta por depósitos de rios entrelaçados superpostos por sucessões lacustres (superfície transgressiva).

O Vulcanismo Acampamento Velho se manifesta por depósitos efusivos (fluxos de lava) e explosivos (ignimbritos), com predominância dos piroclásticos ácidos e plutônicos epizonais. Iniciam derrames com lavas básicas, seguidas por rochas piroclásticas e lavas riolíticas até o topo da unidade. Autores como Wildner *et al.* (2002), Lima *et al.* (2007) e Almeida *et al.* (2012) identificam uma afinidade alcalina bimodal sódica  $553 \pm 5,4$  foi considerado a menor idade da associação máfica (Almeida *et al.*, 2012).

### 3.2.1.3 Alogrupo Guaritas

O Alogrupo Guaritas (Paim *et al.*, 2000) ou Formação Guaritas (Goñi *et al.*, 1962), registra o último episódio tectono-sedimentar da Bacia do Camaquã. Sedimenta, na maior parte, sobre uma discordância erosiva. A Aloformação Pedra Pintada (Paim *et al.*, 2000) é constituída por expressivos depósitos eólicos, e próximo da margem sudeste do rifte, possui fácies aluviais.

No Vulcanismo Rodeio Velho ocorreram manifestações de derrames e diques básicos a intermediários intercalados com arenitos. Com base em zircões por datação U-Pb foi datado em basaltos alcalinos idades de  $547 \pm 6,3$  Ma como a idade mais jovem do vulcanismo (Almeida *et al.*, 2012). Sua melhor exposição está localizada a leste da Janela Bom Jardim (Passo do Moinho e Cerro Cascavel), na sinclinal do Arroio da Porteira. Esses basaltos revelam uma origem a partir de um manto modificado por fluidos derivados de subducção ou metassomatismo, com pequena contaminação crustal (Almeida *et al.*, 2003; Almeida, 2005).

## 3.3 Geologia Local das Áreas de Estudo

### 3.3.1 Contexto Geológico da Associação Shoshonítica de Lavras do Sul

A Associação Shoshonítica Lavras do Sul (ASLS) fica localizada na porção SW do Escudo Sul-Rio-Grandense, data de idade neoproterozóica (Nardi & Lima, 1985) e apresenta um magmatismo de característica pós-colisional, tendo relação com os estágios finais da Orogenia Brasiliana. Esta foi gerada pela fusão de um manto litosférico metassomatizado por uma subducção prévia. A ASLS representa uma série que evolui por cristalização fracionada, tendo uma grande variação de sílica. Em sua base possui uma composição de traquibasaltos potássicos, sucedidos por ciclos shoshoníticos e depósitos piroclásticos (Lima, 1995). As intrusões epizonais contemporâneas aos vulcanitos da base datam de idades 599 Ma (Monzodiorito Arroio do Jacques) e 601 Ma (Monzonito Tapera) segundo Gastal & Lafon (2010). O Monzodiorito ocorre como uma corpo de 1 km por 2,5 km alongado na direção NW-S, constituído de monzodioritos e quartzo monzodioritos. Já o Monzonito Tapera é caracterizado por dioritos e leucodioritos que na direção sul evoluem para monzodioritos e monzonitos (Remus *et al.*, 2000).

Os eventos magmáticos finais, que possuem relação com o magmatismo shoshonítico de Lavras do Sul são representados por quartzo-monzonitos e monzonitos na forma de intrusões ressurgentes na direção NW-SE que separa o Monzonito Tapera, os shoshonitos, o Monzonito

Arroio dos Jacques da borda NE do Complexo Granítico Lavras. Diques Riolíticos de idade contemporânea aos monzonitos também ocorrem.

As rochas shoshoníticas no Escudo Sul-Rio-Grandense tem sua presença concluída por Nardi (1984), sendo caracterizada na zona central do Complexo Granítico Lavras. Sendo o Complexo Granítico de Lavras do Sul, caracterizado por um núcleo granodiorítico a monzogranítico, de afinidade shoshonítica, sendo bordejados por sienogranitos e pertita granitos, de afinidade alcalina.

### **3.3.2 Ambiente Geológico do Depósito Cerro dos Martins (DCM)**

O depósito está hospedado na sequência vulcano-sedimentar do Alogrupo Bom Jardim, Bacia do Camaquã, no Neoproterozóico do Escudo Sul-Rio-Grandense, e possui reservas calculadas com uma tonelagem de 1.450.000 com teores de 0,83% Cu. O depósito consiste em uma sucessão de veios sulfetados com preenchimento de fraturas, em rochas andesíticas e sedimentares clásticas, com disseminações confinadas em níveis de arenito e siltito da Formação Hilário (Porcher & Lopes, 2000), do Grupo Bom Jardim.

O Depósito Cerro dos Martins tem como encaixante uma sequência vulcano-sedimentar formada predominantemente por andesitos, arenitos siltitos e conglomerados. A idade mínima para as rochas vulcânicas da Formação Hilário do DCM é datado de 550 Ma (Toniolo, 2004). Nesta área os andesitos apresentam com frequência venulações preenchidas por calcita e, próximos as falhas ocorrem brechas silicificadas com calcosina, malaquita e pirita disseminadas. As rochas da área do DCM foram deformados por sistemas transpressivos (Toniolo *et al.*, 2004).

### **3.3.3 Geologia da Mina do Seival**

Afloram na região as rochas vulcânicas e piroclásticas da Formação Hilário, base do Alogrupo Bom Jardim, pertencentes à Associação Shoshonítica Lavras do Sul (Nardi & Lima, 1985). Na Mina do Seival a Formação Hilário é representada por lavas andesíticas, brechas vulcânicas e corpos hipabissais de andesitos, principalmente diques de orientação NE, intrusivos na sequência piroclástica. As piroclásticas são representadas por tufo-lapilitos e tufos-brechas. Contendo algumas partes brechadas por eventos hidrotermais (Lopes, 2013). A mineralização consiste em sulfetos de cobre e ferro, tendo prata associada, e uma ganga de carbonato, quartzo, hematita e barita preenchendo os espaços das fraturas (Lindenberg, 2011).

### 3.3.4 Geologia do Platô da Ramada e sua Intrusão Diorítica

O Platô da Ramada é uma feição geomorfológica, que agrupa episódios piroclásticos e vulcânicos efusivos. Sua base é composta por conglomerados e lavas intermediárias, associados à Formação Hilário, sendo sobrepostas por litologias da Formação Acampamento Velho (Matté, 2011). O Platô da Ramada é caracterizado pelo domínio de ignimbritos, lavas e corpos hipabissais de composição ácida, e lavas básicas.

As rochas ácidas da Formação Acampamento Velho também ocorrem como *sills* e diques que cortam principalmente rochas do embasamento ao Norte do Platô da Ramada (Matté, 2011).

A Suíte Intrusiva Ramada tem como constituição principal rochas sienograníticas, sendo caracterizada por termos dioríticos, monzograníticos e monzodioríticos, sendo representados pelo Granito Cerro da Cria e o Granito Ramada (Matté, 2011).

Ao Sul do Platô da Ramada, foi identificado uma intrusão diorítica através de processamento digital de imagens ASTER (Pinheiro-Sommer *et al.*, 2006). A intrusão deste corpo segundo Matté *et al.* (2012) pode ser dividida em duas porções, elas podem ser separadas por uma cunha ignimbrítica encaixada em uma zona de falha com cerca de 600m de largura. A porção menor da intrusão tem cerca de 2km por 600 metros alongadas no sentido leste-oeste, já a outra porção tem dimensões 3 km por 1,25 km alongados no sentido leste-oeste.

## 3.4 Descrição do Banco de Dados

O banco de dados conta com um total de 166 amostras que possuem análises geoquímicas, sendo que: 20 são da área 1 onde foi estudada por Liz (2008), na Associação Shoshonítica de Lavras do Sul, onde todas as 20 litologias são de caráter monzonítico; outras 12 amostras são do depósito Cerro dos Martins (área 2), uma região bem estudada por Toniolo (2004), uma dissertação de onde foi retirada essas análises, as litologias dessa região foram classificadas como andesitos, qz-dioritos e uma amostra de dacito; a terceira área do trabalho é a Mina do Seival, que contem 15 amostras de litologias com análises geoquímicas, análises estas que foram retiradas do trabalho Lopes (2013), as 15 litologias estudadas foram classificadas com composição andesítica, traqui-basálticas e traquiandesitos; na quarta área, que abrange a feição geomorfológica Platô da Ramada e suas proximidades, somam um total de 69 amostras com análises geoquímicas, sendo que das 69, 12 são de composição diorítica e estão no mestrado de

Matté (2011), 57 em (Matté *et al.*, no prelo)<sup>1</sup>. São basaltos, ignimbritos, dioritos, monzonitos, traquitos, arenitos. A quinta área fica no mesmo local da quarta só que 29 amostras estão contidas em Almeida *et al.* (2012) somadas de outras 21 fornecidas por Almeida (informação verbal)<sup>2</sup>, (São basaltos, ignimbritos, dioritos, riolitos, monzonitos, traquitos, arenitos e granitos. A tabela 3 exemplifica a relação de dados por locais e autores.

Tabela 3: Características do banco de dados, como quantidades de dados, locais e autores

<b>Local</b>	<b>Dados</b>	<b>Trabalhos</b>
<b>ASLS (Lavras)</b>	20	Liz (2008)
<b>Cerro do Martins (Caçapava do Sul)</b>	12	Toniolo (2004)
<b>Mina do Seival (Caçapava do Sul)</b>	15	Lopes (2013)
<b>Platô da Ramada (Vila Nova do Sul)</b>	69	Matté (2011)
<b>Platô da Ramada (Vila Nova do Sul)</b>	50	Almeida <i>et al.</i> (2012) e Almeida (Informação Verbal)

No intuito de averiguar a existência de correlação entre os ETRs do banco de dados, foi realizado uma matriz de correlação entre os elementos, sendo utilizado todas as 166 amostras do banco de dados. Na tabela 4, onde se encontra a matriz de correlação, estão posicionados 16 elementos na primeira linha, por 16 elementos da primeira coluna colocados na mesma ordem. O resultado da matriz de correlação nos traz resultados que vão de encontro com os encontrados na literatura, podemos observar a forte correlação dos ETR leves, médios e pesados entre si. Algo também que chamou a atenção é a boa correlação existente dos elementos Gadolínio e o Tórbio com todos os outros ETR, tanto para os leves quanto para os pesados, eles obtiveram

<sup>1</sup> Dados fornecidos por Vinícius Matté na Universidade Federal do Pampa, em Janeiro de 2015.

<sup>2</sup> Dados fornecidos por Delia Del Pilar Montecinos de Almeida na Universidade Federal do Pampa, em Junho de 2015

correlações positivas e maiores que 0,5 para a maioria dos elementos. Também foi visível uma altíssima correlação positiva entre os ETRP Dy, Ho, Er, Tm, Yb e Lu, todos com correlação próximas de 1, isso evidencia que suas ocorrências estão altamente relacionadas.

Tabela 4: Matriz de correlação dos ETRs das 166 amostras do banco de dados, destacado dentro do quadrado vermelho as correlações entre os ETRL e dentro do quadrado preto as correlações entre os ETRP.

ETR	Y	Sc	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Y	1,00	-0,18	-0,01	-0,05	0,01	0,10	0,28	-0,16	0,54	0,83	0,92	0,95	0,94	0,93	0,92	0,91
Sc	-0,18	1,00	0,07	0,12	0,17	0,16	0,32	0,78	0,31	0,09	-0,06	-0,12	-0,17	-0,21	-0,25	-0,24
La	-0,01	0,07	1,00	0,95	0,97	0,88	0,85	0,37	0,70	0,41	0,21	0,11	0,06	0,04	0,05	0,08
Ce	-0,05	0,12	0,95	1,00	0,96	0,87	0,83	0,41	0,67	0,38	0,20	0,10	0,05	0,02	0,05	0,08
Pr	0,01	0,17	0,97	0,96	1,00	0,92	0,91	0,47	0,77	0,47	0,26	0,15	0,09	0,07	0,07	0,09
Nd	0,10	0,16	0,88	0,87	0,92	1,00	0,89	0,49	0,78	0,51	0,35	0,24	0,18	0,14	0,15	0,18
Sm	0,28	0,32	0,85	0,83	0,91	0,89	1,00	0,52	0,94	0,70	0,51	0,40	0,33	0,28	0,28	0,30
Eu	-0,16	0,78	0,37	0,41	0,47	0,49	0,52	1,00	0,43	0,15	-0,01	-0,08	-0,13	-0,20	-0,20	-0,19
Gd	0,54	0,31	0,70	0,67	0,77	0,78	0,94	0,43	1,00	0,89	0,74	0,64	0,58	0,53	0,53	0,55
Tb	0,83	0,09	0,41	0,38	0,47	0,51	0,70	0,15	0,89	1,00	0,96	0,91	0,87	0,85	0,83	0,84
Dy	0,92	-0,06	0,21	0,20	0,26	0,35	0,51	-0,01	0,74	0,96	1,00	0,99	0,97	0,96	0,95	0,95
Ho	0,95	-0,12	0,11	0,10	0,15	0,24	0,40	-0,08	0,64	0,91	0,99	1,00	0,99	0,98	0,98	0,98
Er	0,94	-0,17	0,06	0,05	0,09	0,18	0,33	-0,13	0,58	0,87	0,97	0,99	1,00	0,99	0,99	0,99
Tm	0,93	-0,21	0,04	0,02	0,07	0,14	0,28	-0,20	0,53	0,85	0,96	0,98	0,99	1,00	0,99	0,99
Yb	0,92	-0,25	0,05	0,05	0,07	0,15	0,28	-0,20	0,53	0,83	0,95	0,98	0,99	0,99	1,00	0,99
Lu	0,91	-0,24	0,08	0,08	0,09	0,18	0,30	-0,19	0,55	0,84	0,95	0,98	0,99	0,99	0,99	1,00

### 3.4.1 Procedimentos de Realização das Análises Geoquímicas de Cada Trabalho

#### 3.4.1.1 Associação Shoshonítica Lavras do Sul

Os estudos litoquímicos das 20 amostras foram feitas da seguinte forma: Os elementos maiores e traços foram analisados no *Action Laboratories Ltd.*, Ontario, Canada, utilizando a técnica de ICP (*Inductively Coupled Plasma*) para os elementos maiores e ICP-MS (*Inductively Coupled Plasma Microspectrometry*) para os elementos traço e Terras Raras (Liz, 2008).

#### 3.4.1.2 Depósito Cerro dos Martins

As análises litoquímicas das 12 amostras foram realizadas da seguinte forma: a química dos elementos maiores e traços foram realizados no *Action Laboratories Ltd.* Lancaster, Ontario, Canada, utilizando a técnica de ICP (*Inductively Coupled Plasma*) para os elementos

maiores e ICP-MS (*Inductively Coupled Plasma Microspectrometry*) para os elementos traço e Terras Raras (Toniolo, 2004)

#### **3.4.1.3 Mina do Seival**

Conforme é especificado em Lopes (2013) a determinação dos elementos maiores e traços foram realizados em 15 amostras representativas, foram enviadas para *Activacion Laboratories Ltd.* Ontario, Canadá, e foram realizadas através de FUSIC-ES (*Fusion Inductively Coupled plasma emission Spectrometry*) e FUS-ICP-MS (*Fusion Inductively Coupled Plasma emission Mass Spectrometry*).

#### **3.4.1.4 Platô da Ramada**

Em Matté (2011) explica que a separação das amostras foram realizadas nos laboratórios da UFRGS onde foram separadas e selecionadas 12 amostras para análises geoquímicas. Foram enviadas para o *Action Laboratories – ACTLABs* em Ontario, Canadá para a obtenção dos conteúdos de elementos maiores, menores e elementos traços, através dos métodos de ICP (*Inductively Coupled Plasma*) e ICP-MS (*Inductively Coupled Plasma Emission Mass Spectrometry*).

### **3.4.3 Geoquímica Como Guia Prospectivo**

As províncias geoquímicas são áreas relativamente grandes, bem definidas na crosta terrestre e de composição química bem distinta, no qual a composição química é bem diferente da média. Províncias geoquímicas em sua grande maioria, são manifestadas por suítes de rochas ígneas, onde todos os membros são relativamente enriquecidos ou empobrecidos em determinados elementos químicos (Rocha *et al.*, 2010). Uma província geoquímica pode ser indicada por rochas de distribuição vasta que, dentro de uma área definida, podem apresentar uma variação característica em teor de elemento menor. A principal vantagem da utilização da ferramenta de litogeoquímica é de cunho prospectivo regional, pois com um pequeno número de amostras pode-se identificar uma província geoquímica. Em contra partida geralmente os contrastes de anomalias são baixos. As análises geoquímicas que foram reunidas para a execução deste trabalho não foram feitas direcionadas para prospecção, mas sim pelo âmbito acadêmico, para realização de artigos, mestrados e doutorados, porém os dados foram aproveitados neste trabalho com este viés, no intuito de estudar possíveis ocorrências econômicas. Uma vez que eram os dados que estavam disponíveis nas bibliografias.



## Capítulo 4

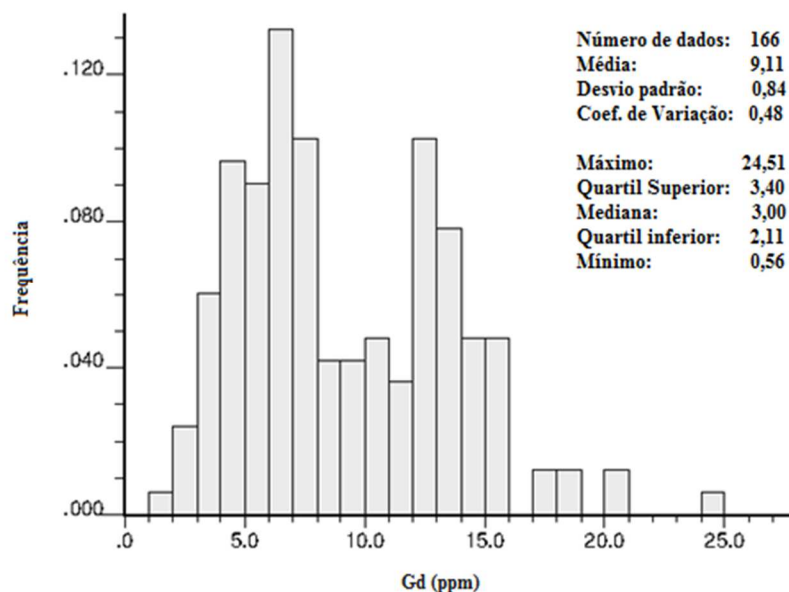
### Análise dos Resultados

Neste tópico será apresentado a análise de estatística descritiva, a técnica utilizada para lidar com o problema de agrupamento preferencial de amostras, geração de histogramas com pesos, geração de modelos de blocos com curvas de isovalores, análise estatística básica para os modelos de blocos e comparação dos teores entre depósitos no Brasil e no mundo.

#### 4.1 Análise Estatística Básica e Histogramas de Frequência das Variáveis do Banco de Dados

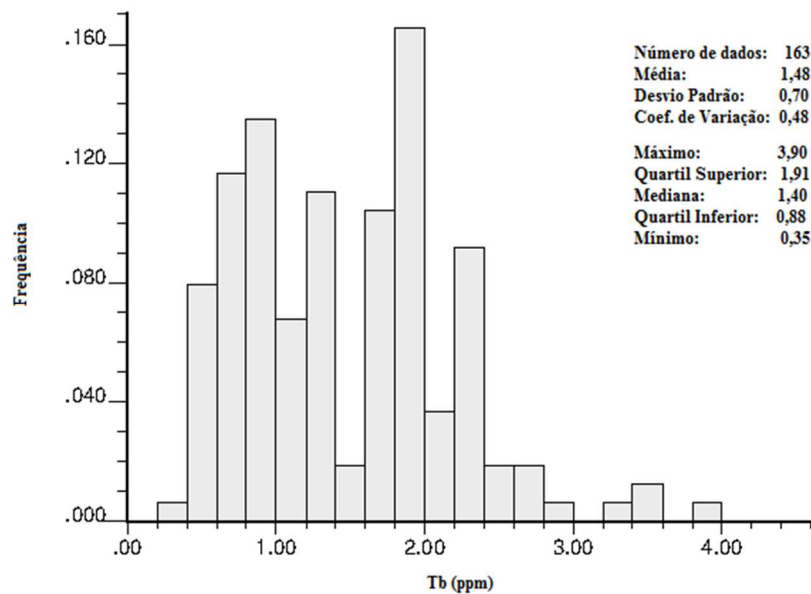
Nesta etapa foram elaborados histogramas de frequência, para cada elemento (Anexo 1). Através da observação dos histogramas foi possível identificar a existência de duas populações de dados, isto pode significar que exista uma mistura dos dados e a ocorrência de dois domínios. Em alguns elementos essa aparição de duas populações de dados foram ainda mais nítidas, como nos histogramas dos elementos Gd, Tb e Sm (Figuras 7, 8 e 9).

Figura 7: Histograma de frequência dos teores de Gd (ppm)



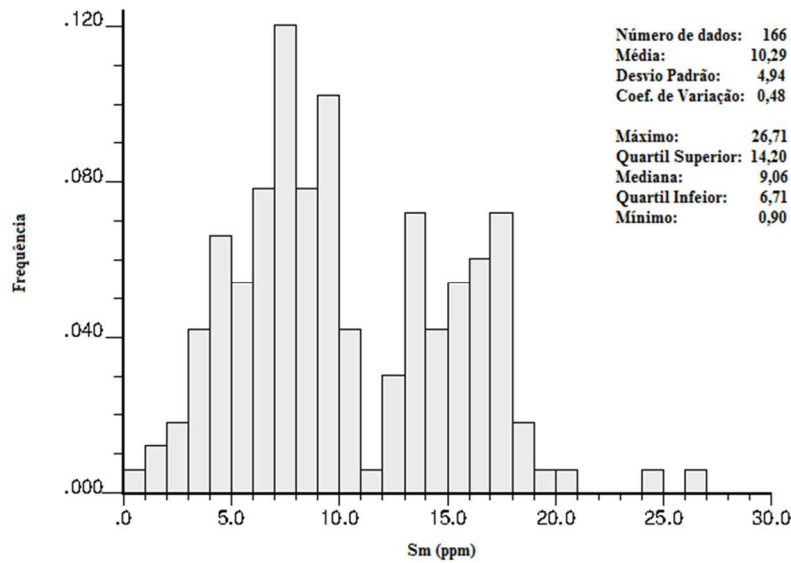
No histograma apresentado na figura 7, podemos ver que existe uma população de amostras com teores menores que 10 ppm (ao lado esquerdo), e ao lado direito, uma outra população de amostras com teores maiores que 10 ppm. No histograma do elemento Tb (Figura 8), também identificou-se este padrão, onde é notado a existência de duas populações, sendo possível ver que uma população está com valores menores que 1,5 ppm, posicionado do lado esquerdo do histograma e outra população com teores maiores que 1,5ppm, posicionados ao lado direito do histograma.

Figura 8: Histograma de frequência dos teores de Tb (ppm)



Um terceiro elemento em que o histograma ficou melhor marcado por essa existência de duas populações de dados foi o do elemento Sm (Figura 9), onde é bem visível que existe uma população de dados com teores menores que 11,5 ppm, situados ao lado esquerdo do histograma, e ao lado direito outro domínio cujo teores são maiores que 11,5 ppm.

Figura 9: Histograma de frequência dos teores de Sm (ppm)

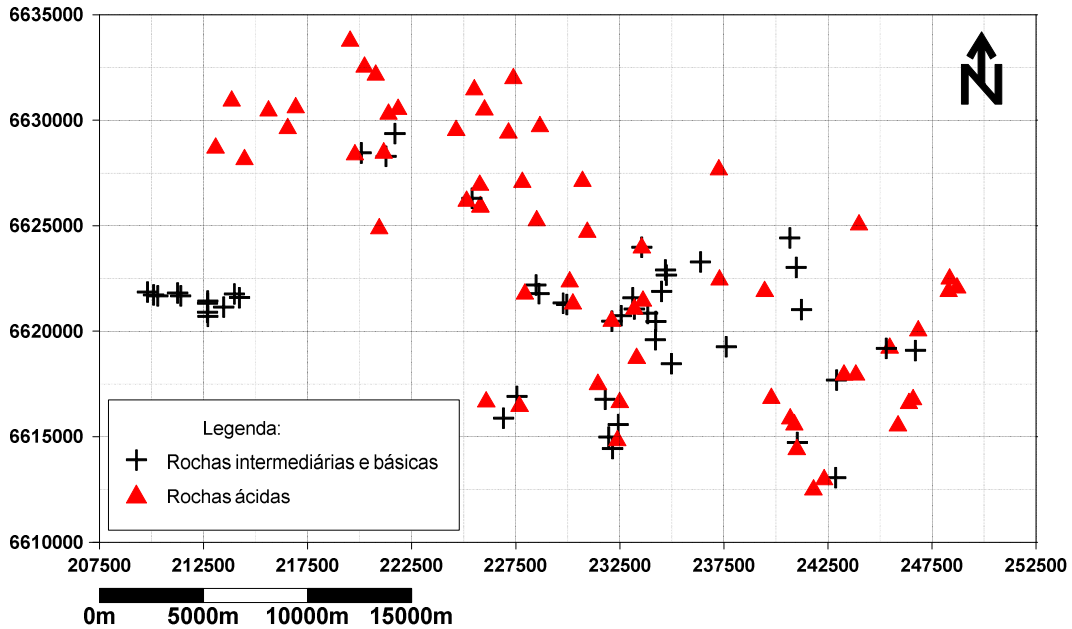


Tendo em vista a existência de duas populações de dados no banco de dados, algumas interpretações foram feitas no intuito de poder haver alguma relação que justifica-se uma separação em domínios distintos, e identificar o que as amostras tinham em comum umas com as outras em relação aos seus domínios. Com o objetivo de descobrir alguma relação, as amostras foram classificadas na ordem crescente de teores, somente para as variáveis que apresentavam populações distintas. Foi notado para boa parte das amostras a existência de uma correlação entre os teores de ETR e o teor de sílica. Já para outros elementos, notava-se o padrão ao contrário. Foi assim que optou-se por dividir o banco de dados em dois domínios, com diferentes teores de sílica, ficando um domínio somente com rochas ácidas (teor de sílica superior à 66%) e um outro domínio com as amostras de rochas que não são ácidas (teores de sílica abaixo de 66%). Ficando então o banco de dados dividido entre o domínio de rochas ácidas e o domínio de rochas intermediárias e básicas. É bem comum diferentes autores considerarem diferentes limites de teores de sílica para classificação de rochas ácidas, intermediárias e básicas, por isso este trabalho optou por seguir o intervalo segundo Branco (2014).

Além do banco de dados ter sido dividido em dois domínios, outra questão que teve que ser levada em consideração foi o fato de existir amostras de eventos magmáticos distintos, de diferentes Formações. Tornando-se assim interessante fazer essa divisão das amostras por Formação. Como no banco de dados temos amostras apenas de 3 Formações diferentes a divisão ficou da seguinte maneira: a maioria das amostras, pertencem a Formação Acampamento Velho, e elas representam 112 amostras, sendo que 109 possuem coordenadas e estão dispostas

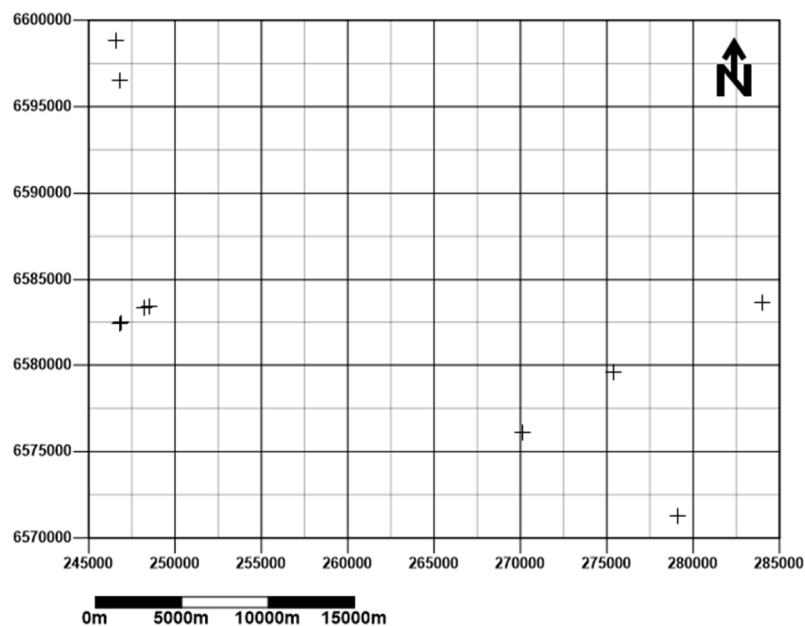
conforme a figura 10, sendo que esta formação possui tanto rochas ácidas como intermediárias e básicas.

Figura 10: Mapa de localização dos dois domínios de rochas da Formação Acampamento Velho



Já as amostras pertencentes a Formação Hilário totalizam 44 amostras, sendo que nenhuma possui coordenadas e todas são pertencentes ao domínio das intermediárias e básicas. Enquanto que o número de amostras pertencentes a Formação Rodeio Velho é bem reduzido, totalizando 10 amostras, porém todas as 10 amostras estão georeferenciadas (Figura 11), sendo todas pertencentes ao domínio das intermediárias e básicas.

Figura 11: Mapa de localização das amostras da Formação Rodeio Velho



Em grande parte dos projetos de prospecção e na mineração ou até mesmo em campanhas de mapeamento, ocorre uma tendência natural em concentrar amostras em algumas áreas. Seja ela por fatores como: questões de acessibilidade, em áreas próximas de estradas, ou até mesmo em fazendas, por não possuírem muita mata densa; também podem ser adensadas para caracterizar uma variabilidade de litologia (como por exemplo um limite entre contatos), ou até mesmo por questões de disponibilidade de afloramentos, como por exemplo em drenagens ou rios.

O grande problema deste adensamento preferencial é que do ponto de vista estatístico, causa uma estatística bem tendenciosa. O certo era uma realização de amostragem sem tendências, sem concentrar amostras e com um espaçamento regular que cobrisse por inteiro uma determinada área de estudo. Este ato de concentrar amostras chama-se de agrupamento preferencial de amostras o qual implica num efeito muito desastroso sobre os parâmetros estatísticos de uma população de dados.

Em Souza *et al.* (2001) foi demonstrado o impacto gerado pelo agrupamento preferencial de amostras nos cálculos de inferência estatística. Assim como demonstrou a importância do desagrupamento dessas amostras na execução dos cálculos estatísticos.

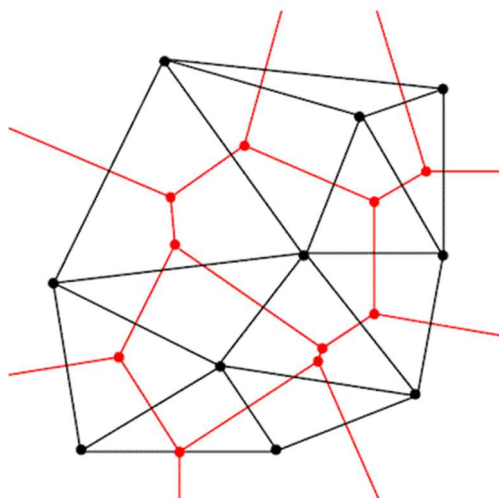
Como podemos verificar no mapa de localização, tanto as amostras da Formação Acampamento Velho (Figura 10) e as das Formação Hilário (Figura 11) apresentam um agrupamento preferencial de amostragem, com isso deve-se utilizar um procedimento para reduzir o efeito dessa amostragem preferencial, tornando assim os parâmetros estatísticos mais representativos.

#### **4.1.1 Desagrupamento das Amostras e Geração de Histogramas com Pesos**

Neste trabalho foi utilizado o desagrupamento pelo Método da Poligonal. Este é um método muito utilizado e ele consiste em atribuir pesos às amostras proporcional às suas áreas de influência. Amostras que estão em áreas densamente amostradas tendem a ter uma área de influência menor, enquanto que às amostras que estão em áreas de menor densidade amostral tendem a ter uma área de influência maior.

Os polígonos de Voronoi consistem em ter suas arestas sempre posicionadas à meia distância em relação as demais amostras da vizinhança ao seu redor (Figura 12).

Figura 12: As linhas vermelhas indicam onde estão localizadas às meias distâncias entre as amostras, enquanto que os pontos vermelhos são as intersecções das mesmas, dando origem aos vértices, enquanto que os pontos pretos são as localizações das amostras e as linhas pretas são as menores distâncias entre as amostras



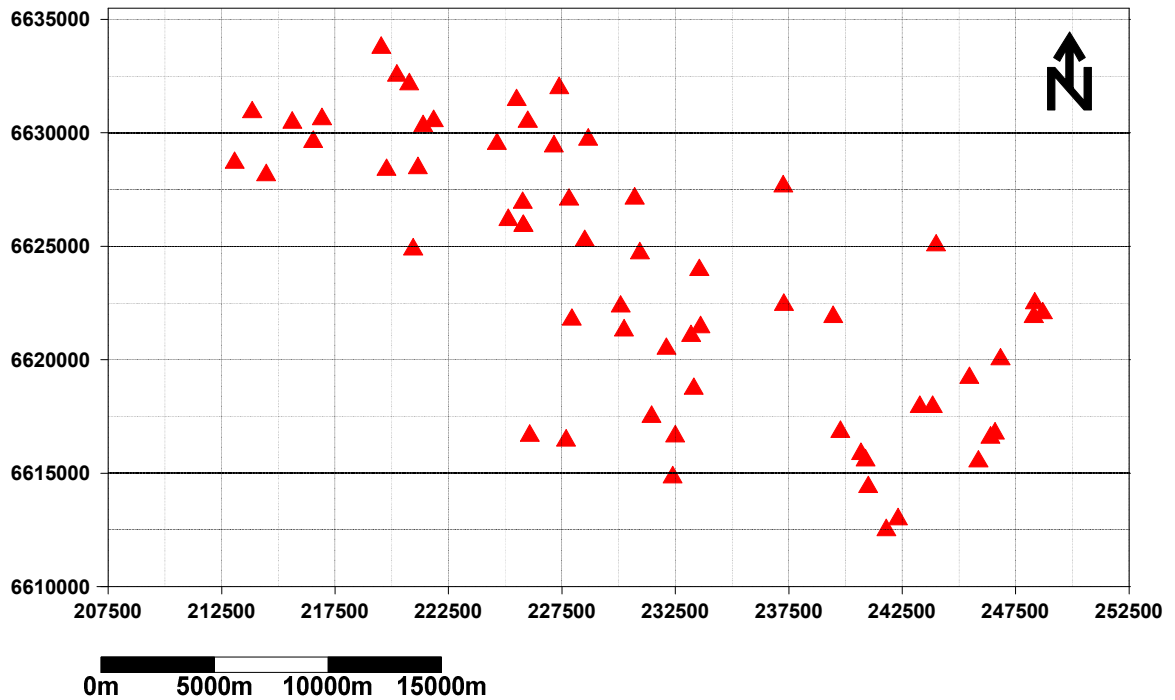
Fonte: [www.eteraestudios.com](http://www.eteraestudios.com)

O fato das amostras da Formação Hilário não estarem georeferenciadas inviabiliza a utilização do método de desagrupamento nelas. Já as rochas pertencentes a Formação Rodeio Velho, apesar de estarem georeferenciadas, não serão elaborados histogramas com pesos pelo fato de existirem poucas amostras e também estarem muito afastadas entre si. Essas 10 amostras apenas, não teriam uma boa representatividade perante tamanha extensão de área sem amostragem. Por isso tornou-se viável fazer o desagrupamento somente para as amostras da Formação Acampamento Velho.

#### **4.1.1.1 Desagrupamento do Domínio das Rochas Ácidas da Formação Acampamento Velho**

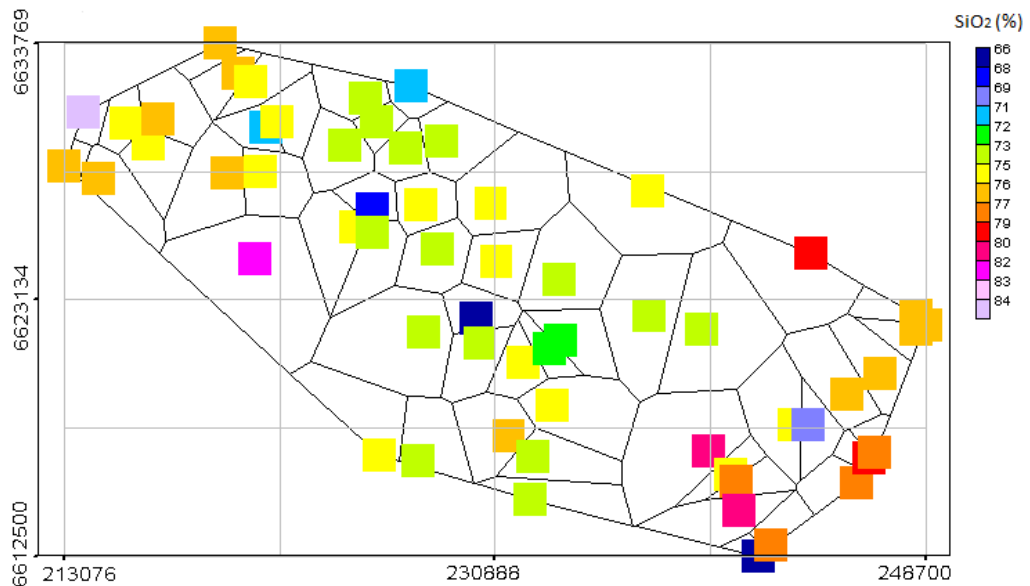
É possível perceber que no domínio das rochas ácidas, existem agrupamentos em algumas regiões (Figura 13), enquanto que em outras elas estão mais esparsas. Da pra identificar no mapa de localização que as amostras não estão dispostas de forma regular a ponto de ter uma representatividade perante a tamanha área. Por isso torna-se necessário à realização de uma técnica de desagrupamento destas amostras.

Figura 13: Mapa de localização das amostras de rochas ácidas da Formação Acampamento Velho



A geração das áreas de influência a partir dos polígonos de Voronoi foram feitas através do software livre 3Plot. O programa consiste em gerar um mapa que nos mostra como ficaram dispostas às áreas de influência de cada amostra (Figura 14), além de gerar uma tabela com as áreas de influência para cada amostra, tornando-se possível realizar a determinação dos pesos de cada amostra.

Figura 14: Desagrupamento por área de influência para as amostras ácidas da Formação Acampamento Velho



Como todas as variáveis de uma mesma amostra foram analisadas nas mesmas posições, não se fez necessário a realização de vários polígonos para várias amostras, uma vez que estas áreas não iriam sofrer alguma variação. A variável sílica foi escolhida arbitrariamente para a geração dos polígonos, podendo ter sido utilizado qualquer outra variável.

Depois de geradas as áreas de influência para cada amostra, a atribuição dos pesos das amostras tornam-se possíveis de fazer no software Microsoft Excel (Figura 15).

Figura 15: Planilha que foi utilizada no cálculo dos pesos e da média a partir das áreas de influência

	B	C	D	EFGHIJKL	MNOPC	R	S	T	U	V
1	UTM_E	UTM_N	La (ppm)	Áreas do Polígono (m²)			Área x teor	Pesos	Teor médio La	
2	213076	6628692	17	1027017,00			17459289,00	0,002459515	ppm= 68,0400601	
3	213846	6630923	7	1507977,00			10555839,00	0,003611325		
4	214461	6628153	3,3	6875292,00			22688463,60	0,016465048		
5	215615	6630461	55,6	3348000,00			186148800,00	0,008017839		
6	216538	6629615	14,1	5942582,00			83790406,20	0,014231381		
7	216923	6630615	9,6	6436639,00			61791734,40	0,015414556		
8	219538	6633769	15,8	1829573,00			28907253,40	0,004381488		
9	219769	6628384	25,5	10411810,00			265501155,00	0,024934352		
59	246833	6620031	47,3	6525918,00			308675921,40	0,015628362		
60	248300	6621900	22	2410896,00			53039712,00	0,005773648		
61	248344	6622497	28,5	2434911,00			69394963,50	0,00583116		
62	248700	6622064	64	71462,05			4573571,20	0,000171138		
63				417568896,95			28411412855,61	1,00		
64				Área total			Somatório	Somatório		
65										

Segundo Isaaks (1989) o cálculo de médias desagrupadas é dado pela equação 1.

$$m = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n w_i \cdot v_i \quad (1)$$

Onde:

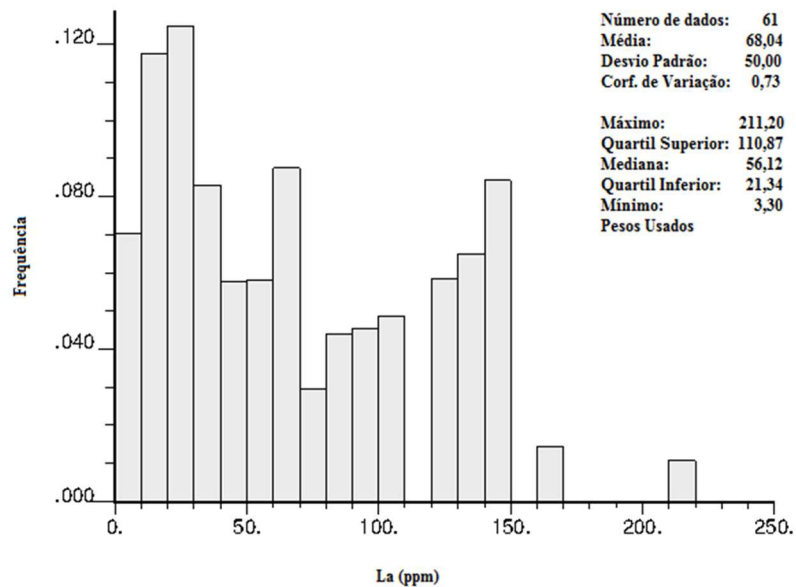
$m$  = média desagrupada,  $A$  = somatório de todas as áreas dos polígonos,  $n$  = número de amostras,  $w_i$  = área do polígono referente à amostra  $n_i$ ,  $v_i$  = valor da variável que está sendo calculada a média.

Já que sabemos às áreas de influência de cada amostra, tornou-se possível a realização dos cálculos das médias desagrupadas para cada elemento do domínio das ácidas. (Anexo 2).

Na figura 16 temos um exemplo de um histograma com pesos do elemento La para as amostras do banco de dados.



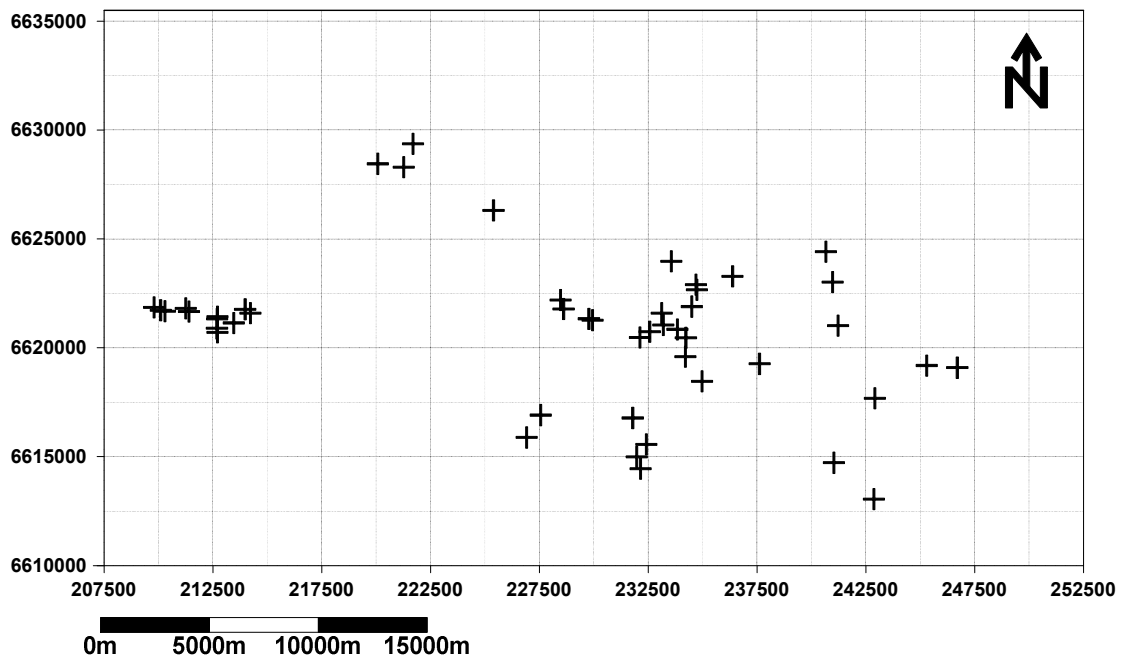
Figura 16: Medidas de estatística descritiva dos dados para o elemento La do domínio das rochas ácidas da Formação Acampamento Velho



#### 4.1.1.2 Desagrupamento do Domínio das Rochas Intermediárias e Básicas da Formação Acampamento Velho

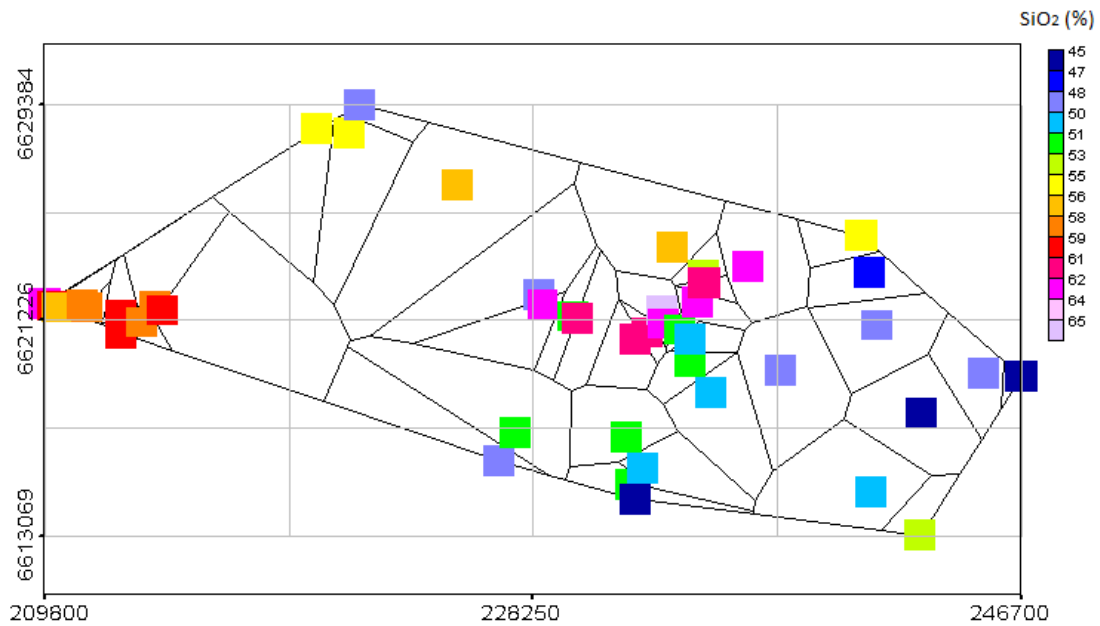
No domínio das rochas intermediárias e básicas as amostras também possuem um forte agrupamento preferencial (Figura 17), tendo várias áreas com grande densidade amostral, enquanto que em outras áreas percebe-se carência de mais amostragem, possuindo uma menor densidade amostral.

Figura 17: Mapa de localização das amostras intermediárias e básicas da Formação Acampamento Velho



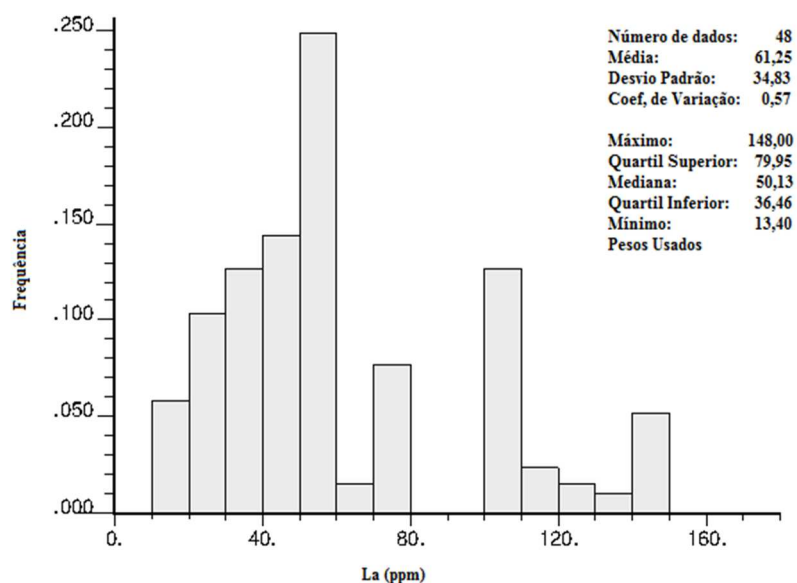
Pelo fato de apresentarem agrupamentos preferencias de amostragem, também foi necessário a geração das áreas de influência a partir dos polígonos de Voronoi através do software livre 3Plot (Figura 18).

Figura 18: Desagrupamento por área de influência para as amostras intermediárias e básicas da Formação Acamamento Velho



Depois de criados os polígonos com áreas de influências, também foram gerados os histogramas com pesos para os elementos do domínio das rochas básicas e intermediárias (em anexo 3). Na figura 19 podemos observar um histograma com pesos para o elemento La.

Figura 19: Medidas de estatística descritiva dos dados desagrupados para a variável La do domínio das rochas intermediárias e básicas da Formação Acamamento Velho



Podemos notar através dos resultados obtidos para os teores médios das amostras como é tendencioso a realização de medidas estatísticas descritivas de dados que estão agrupados preferencialmente. Fazendo um comparativo entre os teores médios agrupados e os teores desagrupados (Tabela 5), podemos ver o quão é desastroso o impacto gerado nas análises de inferência estatística. As variações dos teores médios das amostras agrupadas para as desagrupadas chegaram a variar entre 1,93 até 33,43% para alguns elementos. Uma variação nessa ordem de 33,43% seria catastrófica em uma estimativa de um depósito, podendo causar prejuízos enormes.

Tabela 5: Comparativo entre os teores médios obtidos para as amostras antes e depois da realização do desagrupamento

ETR	Média (Ácidas) em ppm		Média (Inter. e Básicas) em ppm	
	Agrupadas	Desagrupadas	Agrupadas	Desagrupadas
<b>Y</b>	63,65	70,58	36,75	37,46
<b>Sc</b>	3,41	2,27	19,67	21
<b>La</b>	60,83	68,04	77,26	61,25
<b>Ce</b>	113,52	131,22	153,98	129,16
<b>Pr</b>	12,57	14,64	17,97	14,52
<b>Nd</b>	50,63	56,38	68,94	57,24
<b>Sm</b>	9,49	11,04	11,95	10,61
<b>Eu</b>	0,5	0,47	3,61	3,42
<b>Gd</b>	9,42	10,95	10,57	9,72
<b>Tb</b>	1,77	2,01	1,55	1,44
<b>Dy</b>	10,93	12,24	8,27	7,62
<b>Ho</b>	2,31	2,56	1,62	1,5
<b>Er</b>	7,01	7,61	4,57	4,16
<b>Tm</b>	1,06	1,15	0,66	0,6
<b>Yb</b>	6,76	7,33	4,16	3,71
<b>Lu</b>	1,03	1,11	0,64	0,57

## 4.2 Geração de Modelos de Distribuição dos Teores

A geração de modelos de distribuição de teores é uma ferramenta de grande utilidade na mineração, extremamente necessária para o planejamento de lavra, uma vez que cada bloco delimita uma área e/ou volume com um determinado teor de corte para um minério ou elemento. Neste trabalho, sua utilidade será voltada para delimitar as concentrações de cada elemento em cada região. Para a realização de uma boa estimativa alguns atributos devem ser levados em consideração na geração dos mapas, como por exemplo, o tamanho de bloco mais apropriado

para a estimativa, assim como o método interpolador mais indicado, que vai depender de como as amostras estão espaçadas e distribuídas.

#### 4.2.1 Escolha do Tamanho de Bloco

Isaaks (1989) cita que o tamanho de bloco a ser determinado vai depender do espaçamento médio entre as amostras. Sendo que para ser calculado este espaçamento basta saber a área total compreendida pelas amostras e sua quantidade, o espaçamento médio pode ser aproximado a partir da equação 2.

$$\text{Espaçamento médio das amostras} \approx \sqrt{\frac{\text{Área total das amostras}}{\text{Número de amostras}}} \quad (2)$$

O tamanho da área total das amostras pode ser facilmente encontrada, podendo ser utilizada a mesma área total que foi utilizada na formula 1 nos cálculos das médias desagrupadas. Para conseguir a área total das amostras, basta fazer uma soma das áreas de influência da coluna “Área do Polígono” (Figura 15).

Escolheu-se fazer a geração de modelos de distribuição de teores para os dois domínios de rochas da Formação Acampamento Velho, pois no banco de dados só possuem coordenadas as amostras de duas formações: Acampamento Velho e Rodeio Velho. Porém no Rodeio Velho existem poucas amostras e também estão muito espaçadas entre si (figura 11).

Através dos cálculos os tamanhos dos blocos dos dois domínios da Formação Acampamento Velho ficaram da seguinte forma:

Domínio das rochas ácidas:

$$\text{Espaçamento médio} = \sqrt{\frac{417.568.897 \text{ m}^2}{61}} = 2.616,37\text{m}$$

Domínio das rochas intermediárias e básicas:

$$\text{Espaçamento médio} = \sqrt{\frac{336.722.778 \text{ m}^2}{48}} = 2.648,60\text{m}$$

O ideal para um tamanho de bloco é que ele não seja menor do que um quarto e nem maior do que o tamanho do espaçamento médio (ISAASKS, 1989). Já que os valores de

espaçamento médio para os dois domínios ficaram com valores muito próximos uns dos outros foi escolhido trabalhar com um tamanho de bloco igual e com um valor de 750m, sendo um valor pertencente ao intervalo mencionado.

#### 4.2.2 Interpolação

A interpolação é a estimativa de um valor de um atributo em locais não amostrados, a partir de locais amostrados na mesma área. Converte dados de observações pontuais para campos contínuos. É uma técnica muito utilizada na geologia, pois é impossível ter uma área tão densamente amostrada a ponto de dispensar uma estimativa, o custo disso sairia absurdamente caro.

Existem diversos métodos interpoladores disponíveis para serem utilizados e cada um desses levaria a resultados diferentes, só que neste trabalho optou-se por experimentar os seguintes métodos (todos estes disponíveis no menu grid do software Surfer 10):

(i) método do Inverso do Quadrado da Distância (IQD),

Este método fundamenta-se na premissa de que os ponderadores para uma estimativa de um teor de uma ponto ou bloco obedecem a uma lei de proporcionalidade, que seria o inverso do quadrado da distância entre eles. Neste método é dado maior peso para as amostras mais próximas do local a ser estimado. Foi escolhido sua utilização pelo fato dele não extrapolar os valores da variável além dos limites dos dados. Uma característica negativa deste método é a geração de efeito mira, ou “*bull’s eyes*” em inglês, ao redor dos pontos observados.

(ii) método da Mínima Curvatura,

Ele é um método de interpolação polinomial que divide a série de dados em subconjuntos e utiliza polinômios de pequenas ordens para cada subconjunto. A soma ou a junção deles é que forma a interpolação sobre todo o domínio. Foi escolhido, também a utilização deste método pelo fato dele gerar curvas mais suaves e ao mesmo tempo honrar ao máximo os dados. Apesar de não ser um interpolador exato.

(iii) método Shepard Modificado,

Pode ser tanto um interpolador exato como um interpolador suavizante, ele é bem similar ao método de inverso do quadrado da distância, porém distingue-se por usar localmente o método dos mínimos quadrados para reduzir ou eliminar o efeito mira. Ele foi utilizado no trabalho para lidar com o problema de eventuais “efeitos miras” que fossem gerados no IQD.

#### 4.2.2.1 Interpolação no Domínio das Rochas Ácidas da Formação Acampamento Velho

A partir do tamanho de bloco estipulado em 750 metros, foi gerado 3 mapas de Isovalores, cada um com um método interpolador diferente. Os resultados dos mapas estão representados nas figuras 20, 21 e 22.

Como podemos ver no mapa de isovalor na figura 20, um problema muito comum do Método do Inverso do Quadrado da Distância é de concentrar muitas “ilhas”, padrões de contornos concêntricos ao redor de localizações com dados, por isso já foi descartado a utilização deste método interpolador para a geração dos modelos de blocos, sobrando então somente os outros dois métodos para serem feitos a validação no tópico posterior.

Figura 20: Mapa de isoteor pelo método do Inverso do Quadrado da Distância

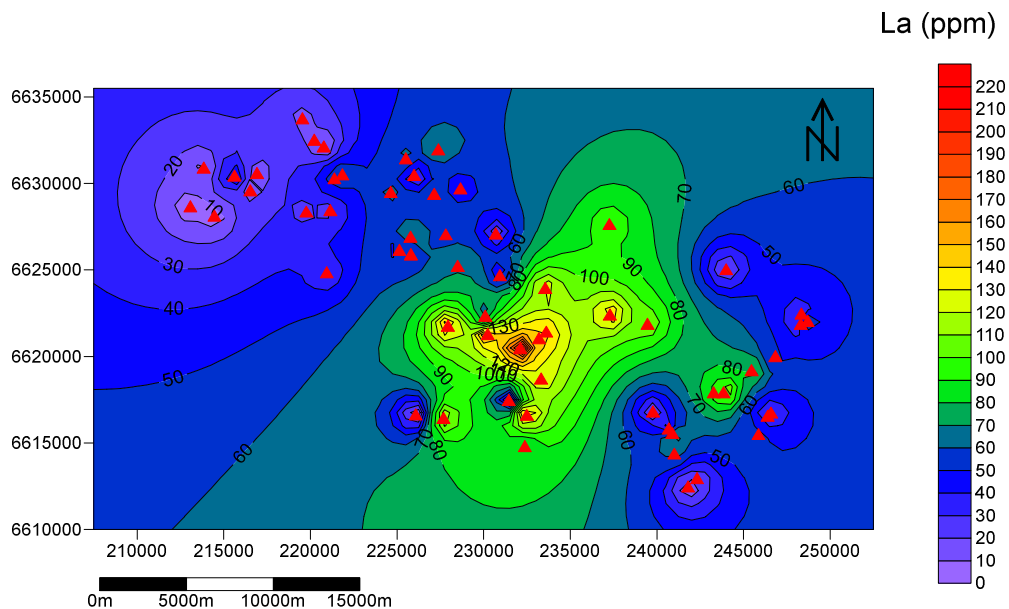


Figura 21: Mapa de isoteor pelo método da Mínima Curvatura

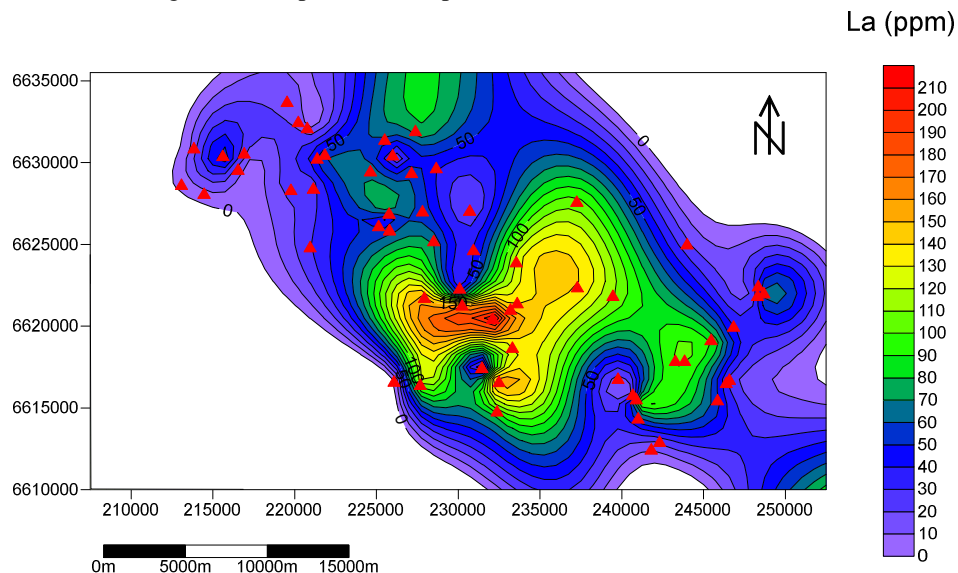
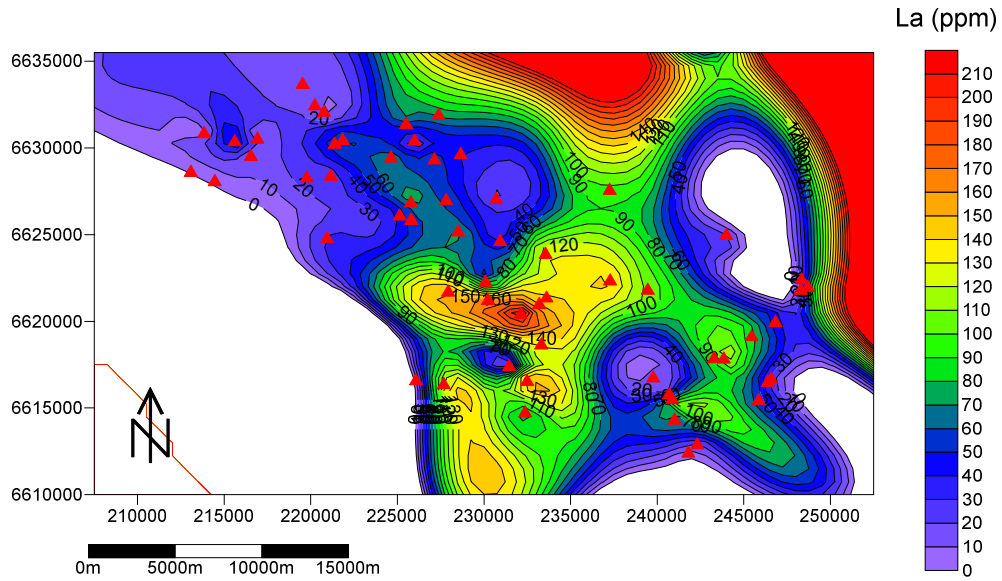


Figura 22: Mapa de isoteor pelo método de Shepard Modificado



#### 4.2.2.2 Interpolação no Domínio das Rochas Intermediárias e Básicas da Formação Acampamento Velho

Assim como foi feito para o domínio das ácidas o mesmo foi realizado para o domínio das intermediárias e básicas, foram gerados 3 mapas com tamanhos de blocos de 750m para cada interpolador. Estando apresentados os mapas de isovalores nas figuras 23, 24 e 25.

Figura 23: Mapa de isoteor pelo método do Inverso do Quadrado da Distância para a variável La

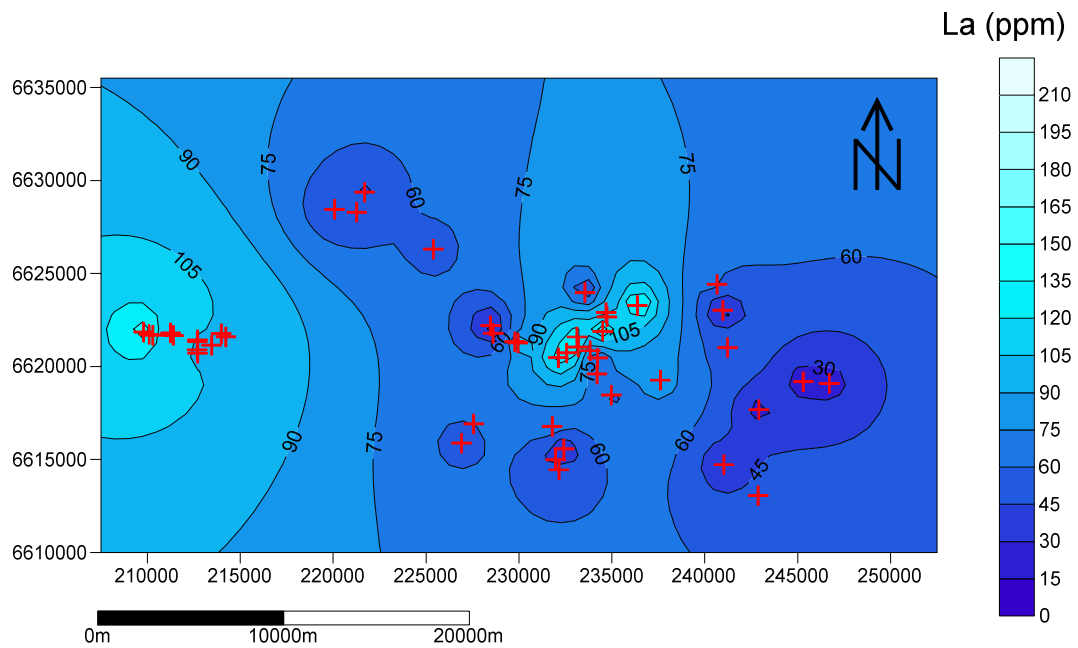


Figura 24: Mapa de isoteor pelo método da Mínima Curvatura

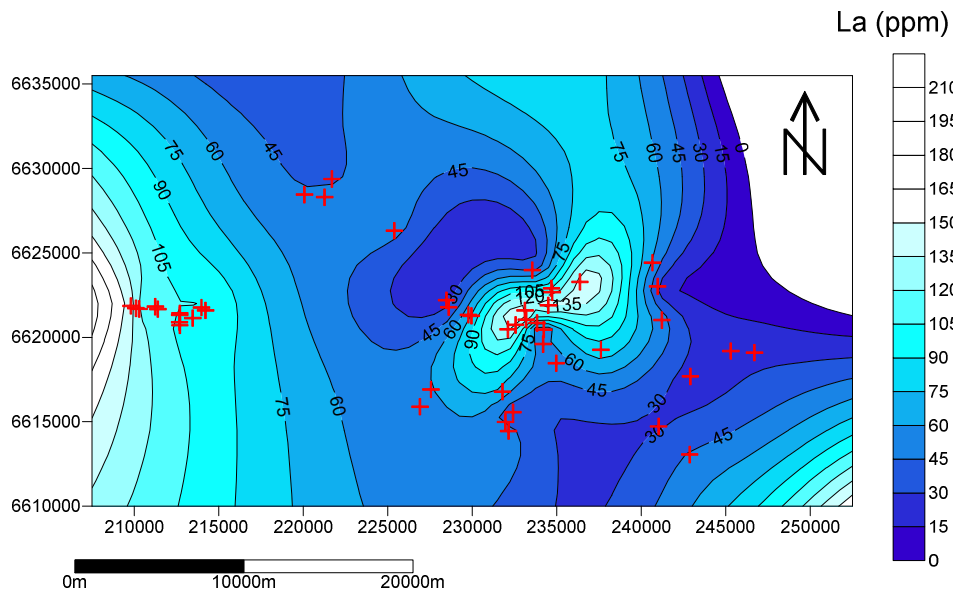
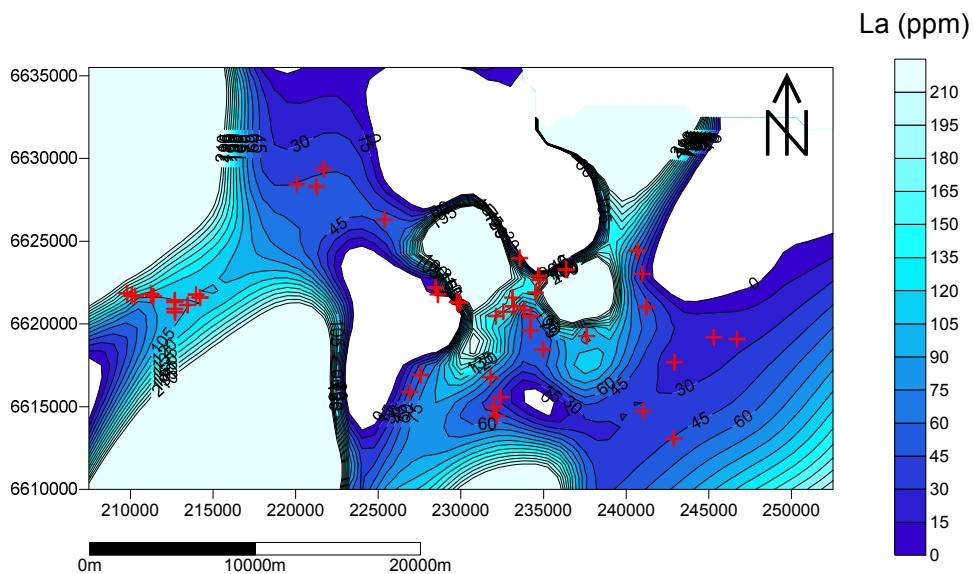


Figura 25: Mapa de isoteor pelo método Shepard Modificado



Dentre os três métodos utilizados na geração de curvas de isovalores, podemos analisar os seguintes resultados. O método de IQD demonstrou uma grande concentração de locais com “efeito mira” ao redor das amostras, por isso este método já foi descartado. Já o método Shepard Modificado, como utiliza localmente o método de mínimos quadrados para reduzir ou eliminar o efeito mira, em regiões com intervalos sem amostragem acabou ficando lugares sem serem estimados (figura 25), tornando-o assim um método pouco apropriado para este domínio, sendo logo descartado como método a ser utilizado nos modelos de teores. Dentre os três métodos o



de mínima curvatura demonstra visualmente ser o mais apropriado, e será o método utilizado para a estimativa de teores.

### **4.3 Cálculo de Resíduos e Técnicas de Validação dos Resultados de Interpolação**

Validação cruzada trata-se de uma técnica que permite, através da comparação entre valores reais e estimados das informações físicas, determinar entre diferentes procedimentos de estimativa, entre diferentes estratégias a qualidade de uma estimativa (ISAAKS, 1989). No caso do trabalho em questão ela foi utilizada para averiguar qual interpolador realizou uma melhor estimativa das concentrações dos ETRs.

Na validação cruzada os dados existentes são descartados temporariamente para que valores estimados em seus lugares sejam gerados e posteriormente sejam comparados com os reais para que possamos analisar qual o grau de confiança da estimativa.

No caso das amostras do domínio das rochas ácidas do Acampamento Velho foi realizada a validação dos Métodos de Mínima Curvatura e do Shepard Modificado para ver qual melhor se ajustou e apresentou a melhor estimativa. Já no domínio das básicas e intermediárias como o único método que ficou razoável foi o de Mínima Curvatura, a validação foi feita para este método apenas no intuito de analisar o grau de confiabilidade nas estimativas.

Foram gerados histogramas de distribuição de erros, onde esse erro é obtido através da diferença entre os valores estimados e verdadeiros. Quando esse erro é negativo podemos afirmar que o dado foi subestimado, já se o erro for positivo podemos afirmar que o dado foi superestimado. O ideal para uma boa estimativa é ter uma média de erros próxima de zero, tornando-se assim uma estimativa não tendenciosa.

Outra ferramenta que será utilizada na validação será o mapa de distribuição de resíduos (é a mesma coisa que erro), que nos serve para verificar áreas onde exista uma subestimativa ou superestimativa preferencial.

E por último será feito um gráfico de dispersão entre os valores reais e estimados, onde num eixo terá os valores reais e no outro os valores estimados, este gráfico nos fornece uma evidência do nível de acerto atingido pelo método. Uma boa estimativa nesse caso seria um alinhamento em 45° graus dos pontos plotados no gráfico, e uma correlação o mais próximo possível de 1.

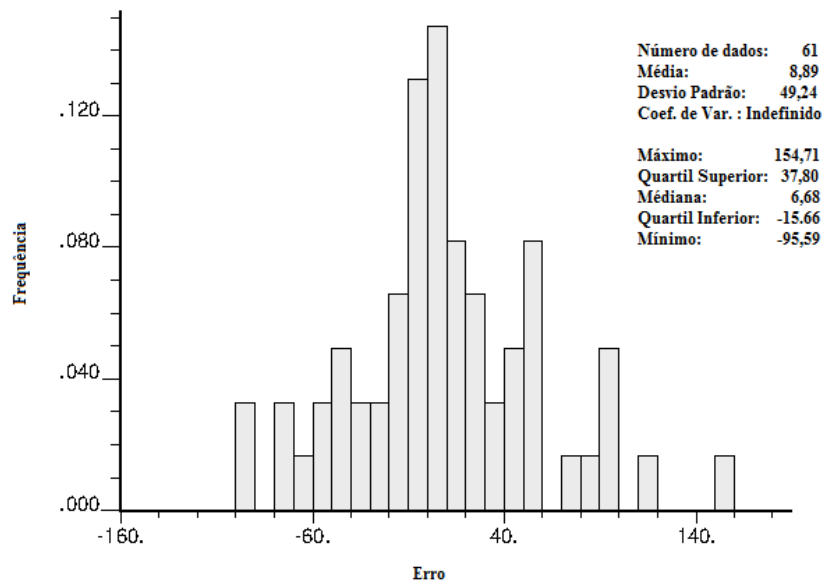
### 4.3.1 Validação Cruzada no Domínio das Rochas Ácidas

#### 4.3.1.1 Distribuição dos erros dos Métodos de Mínima Curvatura e Shepard Modificado

Em cada localização onde ocorreu uma estimativa, temos um dado verdadeiro e um dado estimado. Tendo assim como calcular o erro em cada localização através das diferenças entre os valores estimados e os valores verdadeiros. Estes erros também costumam ser chamados de resíduos. A ideia de uma boa estimativa é que seja o menos tendenciosa possível, e uma boa estimativa é aquela onde a média dos erros ou resíduos sejam o mais próximo possível de zero.

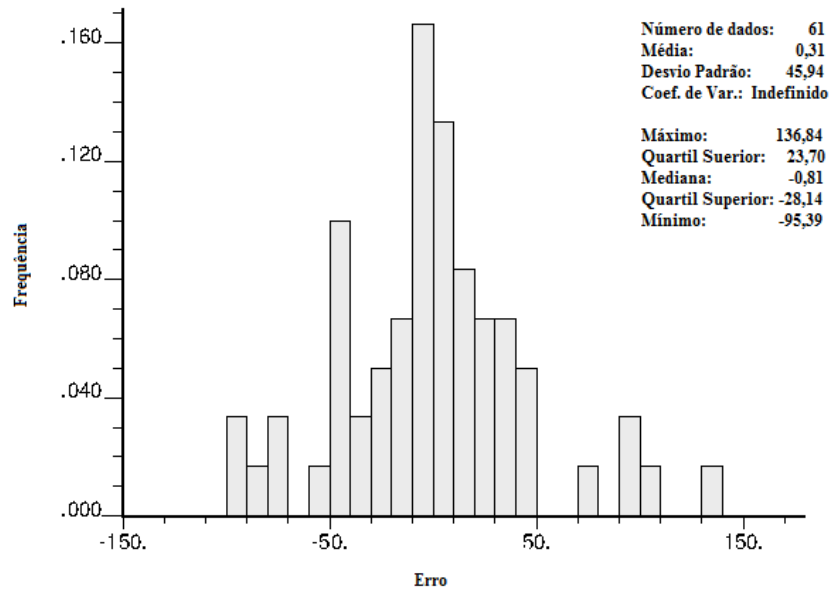
Comparando os dois histogramas de distribuições de resíduos para os métodos de Mínima Curvatura (Figura 26) e Shepard Modificado (Figura 27), podemos tirar algumas conclusões.

Figura 26: Histograma de distribuição dos erros da estimativa dos teores de La pelo Método da Mínima Curvatura



A média dos erros positiva para a estimativa a partir do método de Mínima Curvatura, reflete em uma tendência geral de estimativas superestimadas, mostrando desequilíbrio entre as amostras subestimadas e superestimadas. Mas também podemos observar que a maior parte da frequência dos erros está próximo de zero, enquanto que os erros maiores apresentam baixas frequências, acarretando em um maior erro em regiões mais pontuais.

Figura 27: Histograma de distribuição dos erros da estimativa dos teores de La pelo Método Shepard Modificado



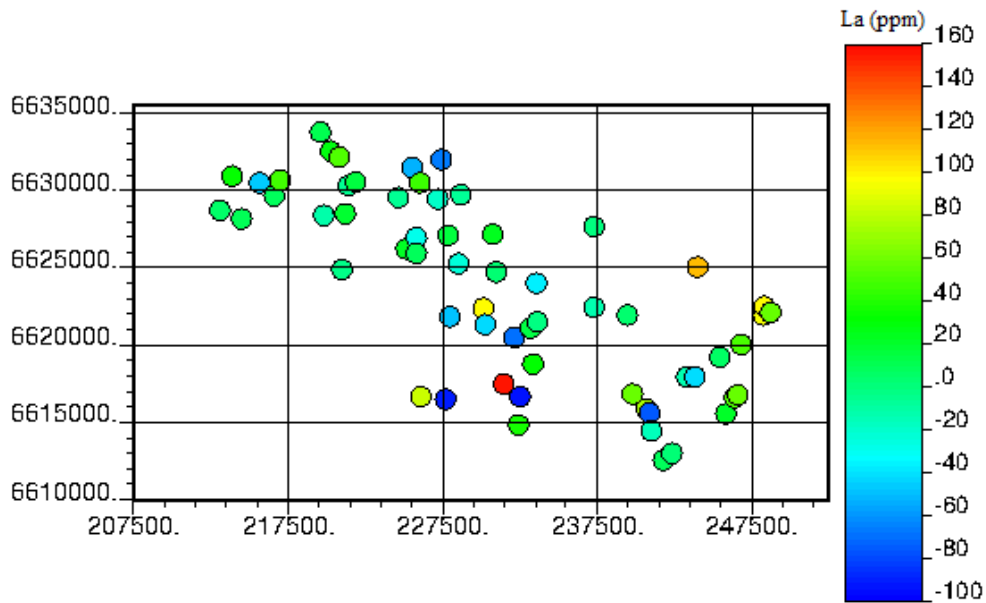
A distribuição dos erros para o método de Shepard Modificado (Figura 27) mostra que ocorreu um maior equilíbrio entre as estimativas superestimativas e as subestimativas, com uma leve tendência de superestimativa, uma vez que a média dos erros deu um valor bem próximo de zero, apresentando uma estimativa pouco tendenciosa. Sendo que boa parte dos erros concentram-se em valores baixos.

#### 4.2.1.2 Mapa de localização dos resíduos das estimativas para os Métodos de Mínima Curvatura e Shepard Modificado

Os mapas de distribuições de resíduos servem para verificar a existência de áreas em que tenham ocorrido subestimativas ou superestimativas preferencialmente. É de extrema utilidade, uma vez que os histogramas só mostram as distribuições dos resíduos e não são capazes de mostrar áreas que tenham tido estimativas tendenciosas.

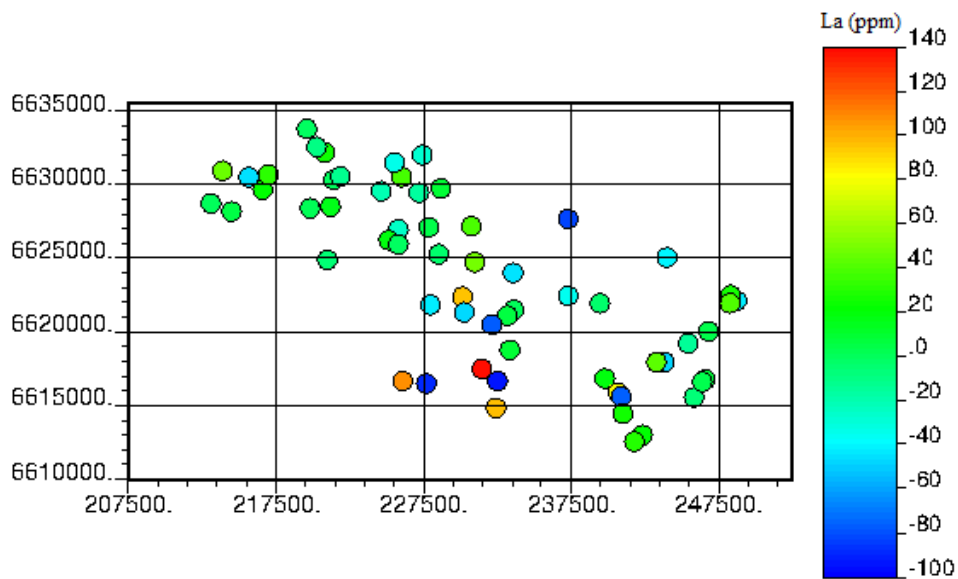
Podemos ver que no método de Mínima Curvatura algumas regiões possuem dados superestimados que se concentram na região leste (figura 28), e a região onde concentram as estimativas de maiores erros estão na parte sul, onde temos dois erros grandes de valores superestimados (bolinha amarela, e vermelha), próximas de grandes valores subestimados (bolinha azul escuro).

Figura 28: Mapa de distribuição dos resíduos da estimativa do elemento La a partir do método de Mínima Curvatura.



Para o método de Shepard modificado, o mapa de localização dos resíduos apresenta também uma região onde concentram amostras superestimadas e subestimadas (bolinhas vermelhas e azuis escuras), todas na região mais ao sul do mapa (Figura 29).

Figura 29: Mapa de distribuição dos resíduos da estimativa do elemento La a partir do Método de Shepard Modificado

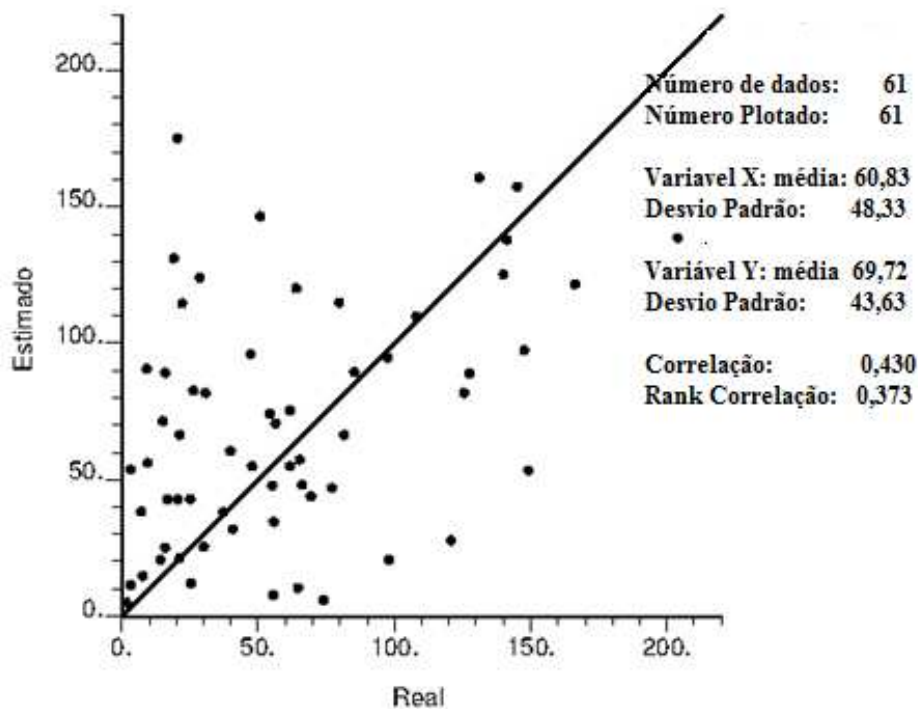


#### 4.3.1.3 Gráfico de Dispersão entre os valores reais e os estimados para os Métodos interpoladores da Mínima Curvatura e Shepard Modificado

O gráfico de dispersão entre os valores verdadeiros *versus* os valores estimados fornece mais uma evidência do nível de confiabilidade da estimativa, ou seja, o nível de acerto de suas estimativas. No caso de uma boa estimativa, os valores estariam no gráfico de dispersão, plotados próximos a uma reta de 45°.

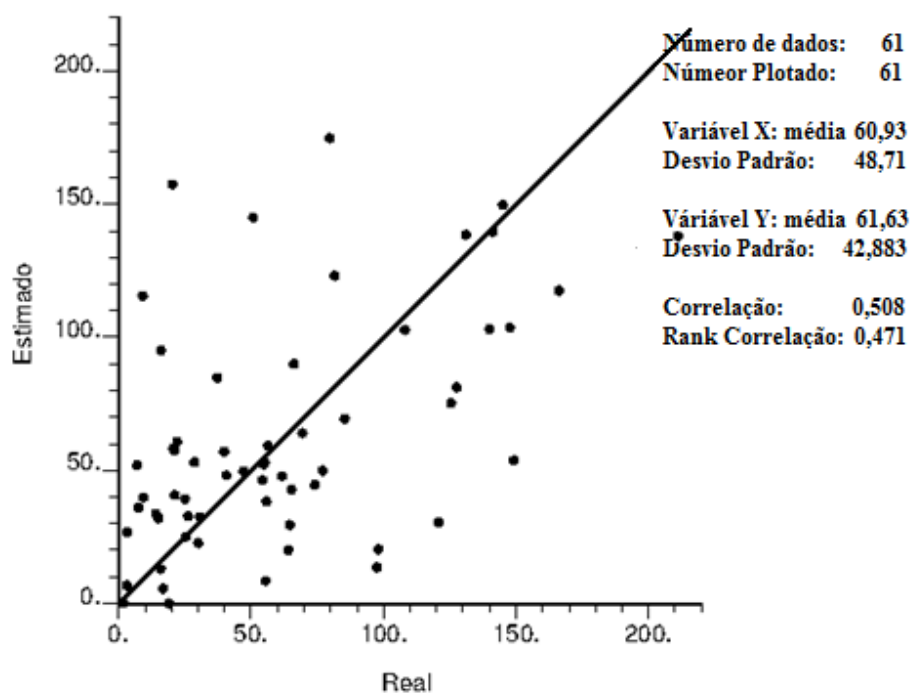
Podemos ver no gráfico de dispersão (Figura 30) que o método de Mínima Curvatura não obteve uma grande precisão em seus números de acertos, obtendo uma correlação não muito boa, dando uma estimativa de baixo grau de confiança no acerto dos teores.

Figura 30: Gráfico de dispersão do elemento La entre os valores reais *versus* estimados pelo método de Mínima Curvatura



A correlação que foi conseguida dos valores estimados versus os reais através do método de Shepard Modificado (Figura 31), apesar de não ter sido muito alta, ainda é uma correlação melhor do que a obtida pelo Método de Mínima Curvatura.

Figura 31: Gráfico de dispersão do elemento La entre os valores reais e os estimados pelo método interpolador de Shepard Modificado



Através das técnicas de validação podemos inferir que o interpolador mais indicado para a estimativa foi à interpolação pelo Método de Shepard Modificado, podemos observar que à sua média dos erros da estimativa ficou mais próxima de zero, apesar de ter sido levemente superestimada. Além de atingir um nível de acerto maior evidenciado pelo valor de sua correlação.

Por isso que para a execução dos modelos de blocos para o domínio das ácidas será utilizado então, o Método de Shepard Modificado.

#### 4.3.2 Validação Cruzada no Domínio das Rochas Intermediárias e Básicas.

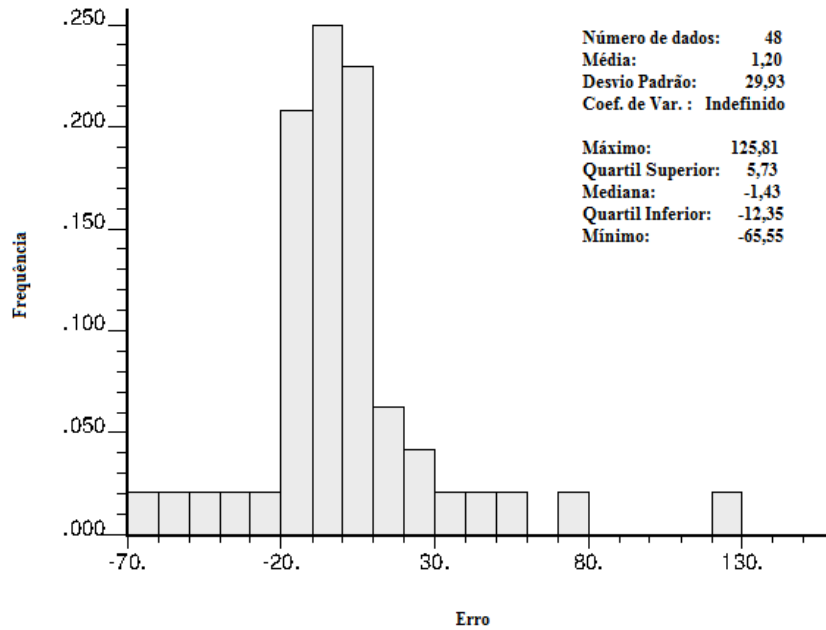
Apesar de ter sido abordado no tópico de interpolação que para o domínio das rochas intermediárias e básicas, apenas o Método da Mínima Curvatura obteve um bom resultado, também foi realizado a validação, apenas no intuito de analisar o grau de confiabilidade da estimativa dos teores.

##### 4.3.2.1 Histograma de distribuição dos erros do Métodos da Mínima Curvatura

A distribuição dos erros para o método de Mínima Curvatura (Figura 32) mostra que ocorreu um maior equilíbrio entre as estimativas superestimativas e as subestimativas, com uma leve tendência de superestimativa, uma vez que a média dos erros deu um valor bem próximo

de zero, apresentando uma estimativa pouco tendenciosa. Também é possível perceber que a maior frequência de erros se concentram na parte do meio do histograma, em valores baixos.

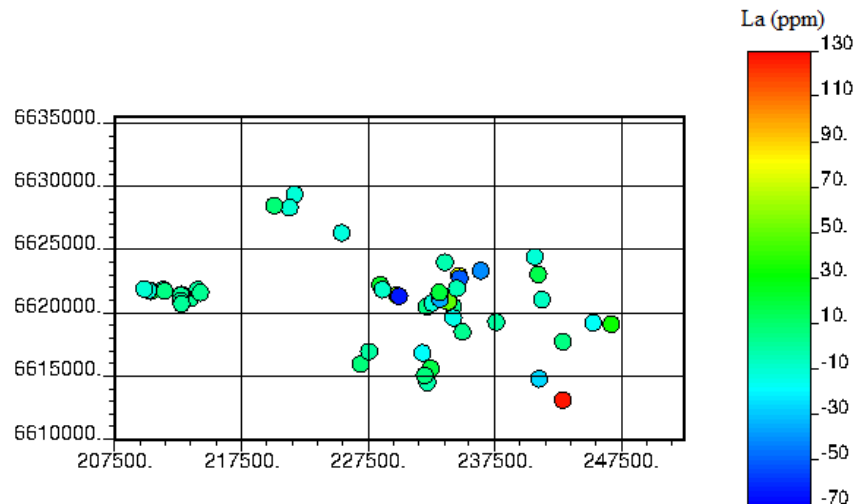
Figura 32: Histograma de distribuição dos erros da estimativa dos teores de La pelo Método da Mínima Curvatura para o domínio das rochas intermediárias e básicas



#### 4.3.2.2 Mapa de distribuição dos resíduos das estimativas do elemento La a partir do Método de Mínima Curvatura

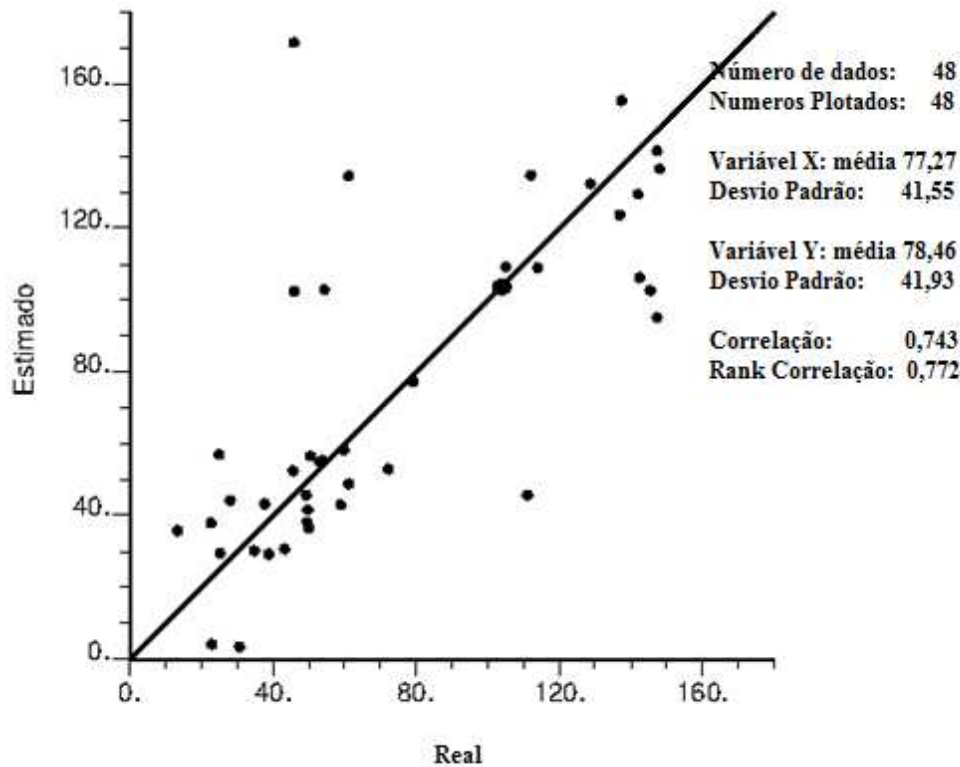
A estimativa pelo método de Mínima Curvatura não apresentou concentrações de regiões com valores superestimados ou subestimados, ficando os erros distribuídos em média com erros pequenos, exceto por uma ou duas estimativas pontuais de grande erro (Figura 33).

Figura 33: Mapa de distribuição de resíduos das estimativas a partir do Método de Mínima Curvatura para o domínio das rochas intermediárias e básicas



### 4.3.2.3 Gráfico de Dispersão entre os valores reais e os estimados do elemento La para o Método da Mínima Curvatura (Figura 34)

Figura 34: Gráfico de dispersão do elemento La entre os valores reais e estimados pelo Método de Mínima Curvatura para o domínio das rochas intermediárias e básicas.



Apesar de ter sido o único método que surtiu boas curvas de isovalores para o domínio das intermediárias, podemos ver através da validação que a sua estimativa é de boa confiabilidade, tendo como destaque o coeficiente de correlação que obteve um valor relativamente alto (Figura 34), ficando em 0,743. Sua média de erros ficou próxima de zero com o valor de 1,20 ppm, sendo levemente superestimada. Ficando também uma estimativa sem grandes regiões concentradoras de resíduos altos.

### 4.3.3 Estatística Básica dos Modelos de Distribuições de Teores

Depois de escolhido o método interpolador mais indicado para as estimativas de teores de cada domínio, para a geração das estimativas dos outros elementos foi preciso apenas utilizar os mesmos parâmetros que foram utilizados para o elemento La para a geração dos demais. A tabela 6 mostra os valores das médias dos teores estimados comparados com os teores médios dos dados.



Tabela 6: Comparativo entre as médias dos dois domínios para os dados agrupados, desagrupados e estimados.

ETR	Média (Ácidas) em ppm			Média (Inter. e Básicas) em ppm		
	Dados Agrup.	Dados Desagrup.	Estimados	Dados Aprup.	Dados Desagrup.	Estimados
<b>Y</b>	63,65	70,58	76,45	36,75	37,46	32,90
<b>Sc</b>	3,41	2,27	3,96	19,67	21	19,45
<b>La</b>	60,83	68,04	73,08	77,26	61,25	62,90
<b>Ce</b>	113,52	131,22	129,66	153,98	129,16	128,93
<b>Pr</b>	12,57	14,64	15,23	17,97	14,52	13,99
<b>Nd</b>	50,63	56,38	60,36	68,94	57,24	55,27
<b>Sm</b>	9,49	11,04	11,20	11,95	10,61	9,95
<b>Eu</b>	0,5	0,47	0,77	3,61	3,42	2,99
<b>Gd</b>	9,42	10,95	11,37	10,57	9,72	8,99
<b>Tb</b>	1,77	2,01	2,13	1,55	1,44	1,35
<b>Dy</b>	10,93	12,24	12,93	8,27	7,62	7,47
<b>Ho</b>	2,31	2,56	2,89	1,62	1,5	1,46
<b>Er</b>	7,01	7,61	8,05	4,57	4,16	4,10
<b>Tm</b>	1,06	1,15	1,18	0,66	0,6	0,60
<b>Yb</b>	6,76	7,33	7,74	4,16	3,71	3,64
<b>Lu</b>	1,03	1,11	1,12	0,64	0,57	0,55

As médias estimadas para os elementos no domínio das ácidas tiveram valores muito maiores quando comparadas com os dados, mas como já sabemos que essas médias não são tão representativas pelo fato dos dados estarem agrupados. Para ter uma comparação mais justa, foram utilizadas as médias dos dados desagrupados, para a tal comparação. Os valores das médias estimadas apresentam claramente uma superestimativa quando comparadas com as médias dos dados desagrupadas, algo que já era de se esperar, uma vez que a média dos erros deu um valor positivo, que já demonstrava uma certa tendência em superestimar.

Algo que chama atenção nas médias das estimativas de teores gerados para o domínio das intermediárias e básicas é o fato deles serem um pouco menores que as médias desagrupadas, uma vez que no histograma de distribuição de erros foi visto que as amostras tinham uma tendência de superestimativa. Essas médias de teores estimados menores que a dos dados podem ter sido ocasionados pelo fato do método de Mínima Curvatura ter extrapolado muito além das amostragens (Figura 24), e esta extrapolação na maioria das vezes teve uma boa suavização dos teores, rebaixando um pouco estes teores médios.

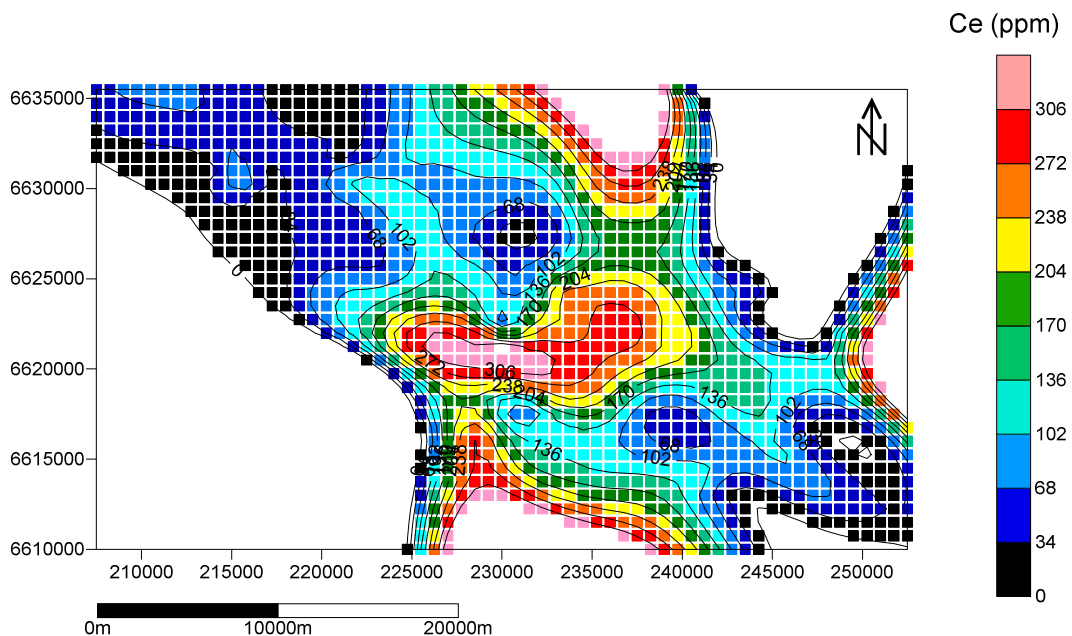
## 4.4 Geração de Modelos de Blocos Para as Rochas da Formação Acampamento Velho

Após saber os parâmetros necessários para obtenção de uma boa estimativa, foram gerados 32 modelos de blocos com o banco de dados. Foram gerados 16 modelos de blocos para o domínio das rochas ácidas (Anexo 4) e 16 para o domínio das intermediárias e básicas (Anexo 5) da Formação Acampamento Velho, sendo feitos um para cada ETR.

### 4.4.1 Modelo de Blocos do Domínio das Rochas Ácidas

O modelo de blocos serve para ajudar a identificar locais ou regiões de delimitadas áreas ou volumes que possuam um determinado teor de corte. Podendo assim identificar regiões específicas com anomalias em alguns elementos. Como no modelo de blocos do elemento Ce (figura 35) que podemos observar uma concentração mais elevada na região central e nas extremidades norte e sul, enquanto que nas extremidades sudeste e noroeste ocorrem baixas concentrações.

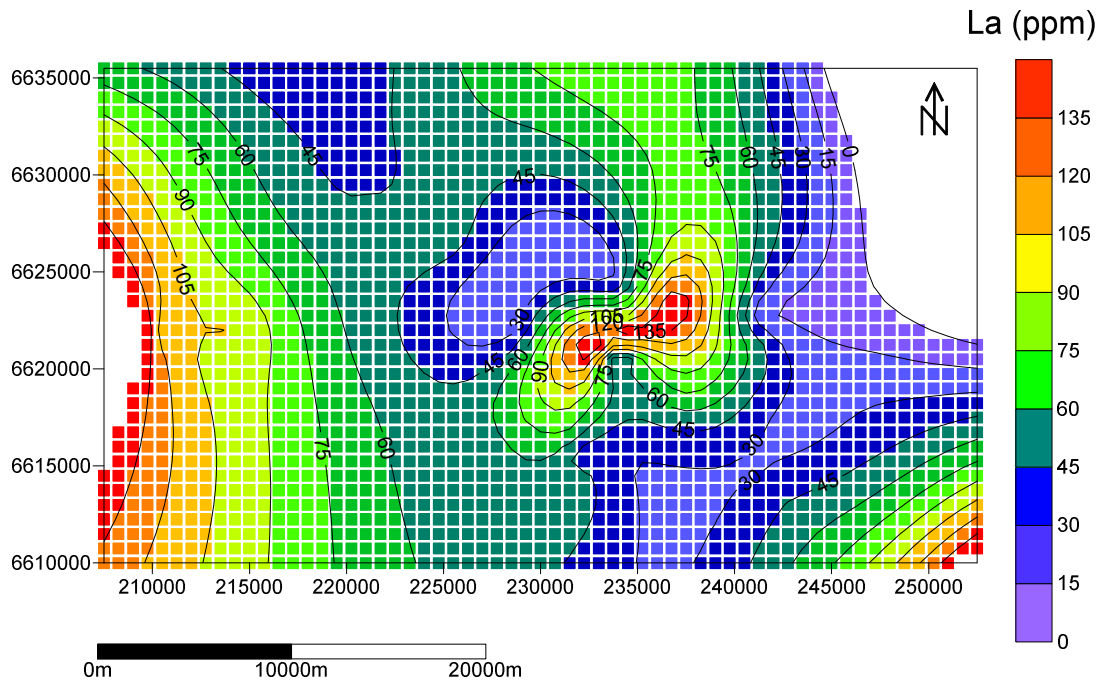
Figura 35: Mapa de modelo de blocos para o elemento Ce do domínio das rochas ácidas da Formação Acampamento Velho.



### 4.4.2 Modelo de Blocos do Domínio das Rochas Intermediárias e Básicas

Assim como foi feito para o domínio das ácidas também foram gerados modelos de blocos para o domínio das intermediárias e básicas, só que com o interpolador Mínima Curvatura. A seguir na figura 36 está apresentado um modelo de blocos para o elemento La.

Figura 36: Modelo de blocos para o elemento La do domínio das intermediárias e básicas.



O modelo de blocos desse domínio apresenta uma melhor estética, além de uma boa correlação, podemos observar no modelo de blocos para o elemento La que as estimativas ocorrem melhores distribuídas ao longo da área, ficando assim uma maior área estimada.

#### 4.5 Comparação Entre os Teores com Depósitos do Brasil e no Mundo

Neste tópico serão comparados os teores dos domínios da Formação Acampamento Velho com os teores encontrados nos principais depósitos de Terras Raras existentes no Brasil e mundo, este comparativo tem o intuito de avaliar a possível ocorrência de teores economicamente viáveis.

Os teores que serão comparados são os teores que foram gerados a partir de uma análise estatística descritiva dos modelos de blocos. As análises estatísticas do domínio das rochas ácidas e do domínio da rochas intermediárias e básicas estão na tabela 7.

Tabela 7: Tabela com os teores médios dos ETRs estimados para as duas unidades da Formação Acampamento Velho.

ETR	Média Ácidas		Média Inter. e Básicas	
	Teor (ppm)	Teor (%)	Teor (ppm)	Teor (%)
<b>Y</b>	76,45	0,00764	32,90	0,00329
<b>Sc</b>	3,96	0,00040	19,45	0,00195
<b>La</b>	73,08	0,00731	62,90	0,00629
<b>Ce</b>	129,66	0,01297	128,93	0,01289
<b>Pr</b>	15,23	0,00152	13,99	0,00140
<b>Nd</b>	60,36	0,00604	55,27	0,00553
<b>Sm</b>	11,20	0,00112	9,95	0,00100
<b>Eu</b>	0,77	0,00008	2,99	0,00030
<b>Gd</b>	11,37	0,00114	8,99	0,00090
<b>Tb</b>	2,13	0,00021	1,35	0,00013
<b>Dy</b>	12,93	0,00129	7,47	0,00075
<b>Ho</b>	2,89	0,00029	1,46	0,00015
<b>Er</b>	8,05	0,00081	4,10	0,00041
<b>Tm</b>	1,18	0,00012	0,60	0,00006
<b>Yb</b>	7,74	0,00077	3,64	0,00036
<b>Lu</b>	1,12	0,00011	0,55	0,00005

Os teores de ETR encontrados nas áreas de estudo são comparados com os teores dos seguintes depósitos (Tabela 8).

Tabela 8: Alguns dos principais depósitos de ETR no Brasil e no Mundo e seus respectivos teores.

Local	Teor (%)	Minério	Fonte
<b>Catalão I</b>	18	Monazita	(LOUREIRO, 1994)
<b>Pitinga (AM)</b>	1	Xenotímio	(LOUREIRO, 1994)
<b>Mountain Pass (EUA)</b>	9,8	Bastnaesita	(JACKSON, 1993)
<b>Bayn Obo (China)</b>	6	Bastnaesita	(JACKSON, 1993)

Para fazer um comparativo entre os teores encontrados na área de estudo com outros depósitos, foi preciso converter estes teores para uma mesma unidade. Uma vez que os teores dos depósitos são dados em porcentagem de minério (Monazita, Xenotímio e Bastnaesita).

Enquanto que nos dados temos os teores em porcentagem do elemento (ETR). Para essa comparação, vamos precisar saber quanto que a massa de cada elemento representa num mineral. As tabelas 9, 10 e 11 mostram essa relação de distribuição de massas de ETR para os minerais: Monazita, Xenotímio e Bastnaesita.

Tabela 9: Distribuição em massa de óxidos e elementos de Terras Raras na Monazita

<b>Óxidos de Terras Raras</b>	<b>Distribuição de massa (óxido em %)</b>	<b>Conteúdo metálico (ETR) em (%)</b>	<b>Distribuição de massa do elemento (%)</b>
<b>Lantânio</b>	29,46	0,853	25,13
<b>Cério</b>	48,64	0,852	41,44
<b>Neodímio</b>	14,04	0,857	12,03
<b>Praseodímio</b>	4	0,854	3,42
<b>Samário</b>	1,59	0,862	1,37
<b>Európio</b>	0,33	0,864	0,28
<b>Gadolínio</b>	0,64	0,868	0,56
<b>Disprósio</b>	0,3	0,871	0,26
<b>Itérbio</b>	0,04	0,878	0,04
<b>Ítrio</b>	0,94	0,787	0,74

Fonte: (LIMA, 2012).

Tabela 10: Distribuição em massa de óxidos e elementos de Terras Raras no Xenotímio

<b>Óxidos de Terras Raras</b>	<b>Distribuição de massa (óxido em %)</b>	<b>Conteúdo metálico (ETR) em (%)</b>	<b>Distribuição de massa do elemento (%)</b>
<b>Ítrio</b>	61,4	0,787	48,32
<b>Fósforo</b>	38,6	-	-

Fonte: Museu de minerais e rochas (UNESP)

Tabela 11: Distribuição em massa de óxidos e elementos de Terras Raras na Bastnaesita

<b>Óxidos de Terras Raras</b>	<b>Distribuição de massa (óxido em %)</b>	<b>Conteúdo metálico (ETR) em (%)</b>	<b>Distribuição de massa do elemento (%)</b>
<b>Lantânio</b>	32	0,853	27,3
<b>Cério</b>	50	0,852	42,6
<b>Neodímio</b>	13	0,857	11,14
<b>Praseodímio</b>	4	0,854	3,41
<b>Outros</b>	1	-	-

Fonte: (VIEIRA, 1997)

#### 4.5.1 Comparativo Com o Depósito de Catalão I (GO)

Como no depósito de Catalão I é extraído o minério de Monazita a teores de 18%. Para encontrar o teor de cada ETR no depósito bastou utilizar a relação da porcentagem de massa dos elementos para o mineral Monazita (Tabela 9). Assim conseguindo encontrar o teor de cada um separadamente.

Abaixo na tabela 12 está expresso o comparativo entre os teores.

Tabela 12: Comparativo entre os teores da área de estudo com os teores de Catalão I (GO).

Elemento	La	Ce	Nd	Pr	Sm	Eu	Gd	Dy	Itérbio	Ítrio
<b>Teor Catalão I (%)</b>	4,5233	7,4594	2,1658	0,6149	0,2468	0,0513	0,0999	0,0471	0,0063	0,1332
<b>Teor (ácidas em %)</b>	0,0073	0,0130	0,0060	0,0015	0,0011	0,0001	0,0011	0,0013	0,0008	0,0076
<b>Teor (básicas em %)</b>	0,0063	0,0129	0,0055	0,0014	0,0010	0,0003	0,0009	0,0008	0,0004	0,0033

Os valores observados na tabela 12 mostram como a diferença entre os teores são enormes entre os 10 elementos, ainda mais quando analisamos os elementos La e Ce. Estas então demonstram estarem muito mais concentrados em Catalão I.

#### 4.5.2 Comparativo com o Depósito de Pitinga (AM)

Para a realização dos cálculos dos comparativos deste depósito, foram utilizados os mesmos no Depósito de Catalão, só que desta vez utilizando a distribuição de massa do Ítrio em minério de Xenotímio a um teor de 1%. Os resultados foram os seguintes (Tabela 13).

Tabela 13: Comparativo entre teores do elemento Y no depósito de Pitinga com os domínios da áreas estudo.

Elemento	Y (%)
<b>Teor Pitinga</b>	0,48
<b>Teor (ácidas)</b>	0,00764
<b>Teor (básicas)</b>	0,00329

#### 4.5.2 Comparativo com o Depósito Mountain Pass (EUA) e Bayn Obo (China)

Como nos dois depósitos são explorados o mesmo tipo de minério (Bastnaesita), foi utilizado a mesma tabela pra fins de cálculos e os resultados das comparações podem ser vistos na tabela 14.

Tabela 14: Resultados comparativos entre os teores da área estudada com os depósitos do Bayan Obo (China) e Mountain Pass (EUA).

<b>Elementos</b>	<b>La (%)</b>	<b>Ce (%)</b>	<b>Nd (%)</b>	<b>Pr (%)</b>
<b>Teor Mountain Pass</b>	2,6754	4,1748	1,09172	0,33418
<b>Bayan Obo</b>	1,638	2,556	0,6684	0,2046
<b>Teor (Ácidas)</b>	0,00731	0,01297	0,00604	0,00152
<b>Teor (Básicas)</b>	0,00629	0,01289	0,00553	0,0014

Assim como no comparativo com os depósitos Brasileiros, os depósitos no mundo demonstram concentrações muito superiores às da área de estudo.

## Capítulo 5

### Conclusões

Neste capítulo, é apresentado as considerações finais relacionadas à monografia, apresentando uma síntese dos resultados obtidos, assim como análises de cada etapa executada no trabalho. Uma argumentação demonstrando o cumprimento dos objetivos do trabalho, e algumas recomendações para trabalhos futuros.

#### 5.1 Resultados Obtidos

Foi conseguido através de levantamentos bibliográficos e compilação de dados com análises geoquímicas na região central do Escudo Sul-Rio-Grandense, obter um acervo de 166 amostras que continham análises geoquímicas de elementos traços Terras Raras. Dentre os mais diversos tipos de litologia, alguns em áreas estratégicas, outros não. Além de ter sido elaborado um estudo aprofundado a respeito dos principais tipos de ambientes geológicos formadores e/ou concentradores dos principais depósitos de elementos Terras Raras. Assim como o estudo dos principais depósitos de interesse econômico existentes no Brasil e no Mundo, e suas respectivas concentrações em teores.

Através de dados de inferência estatística foi possível notar duas populações de dados, demonstrando a existência de uma mistura de dados. Além de ser observado um agrupamento preferencial de amostragem com as amostras do banco de dados, acarretando em um impacto desastroso nos cálculos de inferência estatística. Assim como foi comprovado a importância da utilização de técnicas de desagrupamento na melhoria da representatividade dos parâmetros estatísticos para um banco de dados. Através de comparações entre teores médios de dados agrupados *versus* desagrupados foram encontrados variações nas médias na ordem de 33,43%.

Na geração de modelos de distribuição de teores, foi mostrado a importância de alguns parâmetros necessários para uma boa estimativa, assim como o cálculo de espaçamento médio para realização da escolha do tamanho ideal de bloco. Posteriormente foram testado tipos de métodos interpoladores diferentes, na geração de mapas de isovalores, na tentativa de obter um interpolador que melhor se ajustasse ao banco de dados.



Através de técnicas de validação cruzada foi possível identificar através de parâmetros estatísticos qual método melhor se ajustou para cada domínio. Notou-se que para o domínio das rochas ácidas da Formação Acampamento Velho o método que melhor se ajustou foi o Shepard Modificado, uma vez que obteve uma menor média de distribuição de resíduos, apesar de ter sido uma estimativa superestimada. No gráfico de dispersão que compara os valores estimados *versus* os valores reais, apesar dele ter sido um método que obteve uma melhor correlação, ainda sim foi uma correlação ruim. Apesar de existir apenas uma ou duas áreas concentradoras de grandes resíduos

O domínio das rochas intermediárias e básicas da Formação Acampamento Velho teve problema com dois métodos de interpolação. Surgiram muitas concentrações de “efeito mira” na utilização do método IQD, enquanto que no Método de Shepard Modificado muitas áreas ficaram sem serem estimadas, sobrando apenas o método de Mínima Curvatura como o interpolador mais apropriado. Apesar de ter sido o único onde foi feita a validação, suas respostas foram muito boas em relação a qualidade de estimativa, uma vez que a correlação entre os dados reais e estimados foi de 0,743; além de obter um resíduo médio bem próximo de zero e uma boa distribuição de resíduos.

A comparação das médias estimadas dos dois domínios com as médias do banco de dados tiveram alguns resultados que já era de se esperar, como a superestimativa dos dados pelo método de Shepard Modificado para o domínio das rochas ácidas, mas em contra partida o que surpreendeu foi a subestimativa dos dados para o domínio das rochas intermediárias e básicas pelo método de Mínima Curvatura, uma vez que as médias dos resíduos demonstraram que o método estava superestimado. Esse resultado pode ser explicado pelo fato do Método de Mínima Curvatura ter suavizado mais os teores de regiões onde existia carência de amostragem, reduzindo desta forma a média geral do teores estimados.

Para a realização da comparação entre os teores de ETR do banco de dados com os teores dos principais depósitos do Brasil e do mundo, alguns fatores tiveram que ser levados em consideração. Um dos principais fatores foi deixar os teores em uma mesma unidade de medida pra poder fazer uma comparação, uma vez que os teores do banco de dados estão em ppm, enquanto que os teores dos principais depósitos é dado em percentagem.

Ficou muito clara a inexistência de teores de ETR com potencial econômico na área estudada, uma vez que os teores comumente encontrados nos principais depósitos de viabilidade econômica existentes no Brasil e no mundo são de no mínimo 100 vezes maiores que as médias encontradas nas áreas de estudo.

O fato de não existir ocorrências de grandes concentrações de ETR na área de estudo, não diminui a importância do trabalho nem para o meio acadêmico, muito menos para o meio prospectivo, uma vez que esta metodologia adotada no trabalho possa ser aplicada em outras áreas, ou até mesmo com outros elementos.

## **5.2 Recomendações Para Trabalhos Futuros**

Como este estudo de caso abrange uma área sem históricos de grandes concentrações em ETR, recomenda-se que nas próximas áreas futuras que vierem a ser estudadas sejam voltadas para regiões com maiores chances de obterem resultados mais satisfatórios, como por exemplo regiões onde ocorrem rochas carbonáticas, pegmatitos ou rochas peralcalinas. No Rio Grande do Sul existem algumas áreas mais estratégicas como, os fonolitos da suíte alcalina Passo da Capela em Piratini, assim como o carbonatitos de Lavras do Sul que atualmente está começando a ser explorado fosfato pela empresa Águia Metais e também nas areias monazíticas do litoral do estado que ficam em Bojuru. Seriam regiões bem interessantes a serem estudadas em futuros trabalhos.

## Referências

ALMEIDA, D.P.M.; Borba, A. W.; Chemale Jr., F.; CONCEIÇÃO, R. V.; KOESTER, E. Sr–Nd isotopic signature of the Acampamento Velho (Cambrian) and Rodeio Velho (Ordovician) volcanic successions of the Camaquã Basin, southern Brazil. **Simpósio Sul-Americano de Geologia Isotópica**, v. 4, n. 2003, p. 491-494, 2003.

ALMEIDA, Renato Paes de. **Tectônica e sedimentação do Ediacarano ao Ordoviciano: exemplos do Supergrupo Camaquã (RS) e do Grupo Caacupé (Paraguai oriental)**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2005.

ALMEIDA, Delia del Pilar Montecinos; MACHADO, Adriane; CHEMALE JR, Farid. **Late to post-orogenic Brasiliano-Pan-African volcano-sedimentary basins in the Dom Feliciano Belt, southernmost Brazil**. INTECH Open Access Publisher, 2012.

ANDRADE, Romulo. **Terras Raras, Sumario Mineral**. MS: DNPM, 2014.

BIONDI, Joao C. **Depósitos de minerais metálicos de filiação magmática**. Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração, 1986.

BRAGA, Guilherme Bettio. **A química das terras raras e suas potencialidades**. Monografia. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI. 20014.

BRANCO, Pércio de Moraes. Serviço Geológico do Brasil (CPRM). **<http://www.cprm.gov.br>**, 2014. Disponível em <  
<http://www.cprm.gov.br/publique/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?inford=1107&sid=129#ignea>>. Acesso em Outubro de 2015.

BORBA, André Weissheimer. **Evolução geológica da “Bacia do Camaquã” (Neoproterozóico e Paleozóico inferior do Escudo Sul-rio-grandense, RS, Brasil): uma visão com base na integração de ferramentas de estratigrafia, petrografia e geologia isotópica**. Tese de Doutorado. INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS, 2006.

CAIFENG, W. **Global Rare Earth Demand to Rise to 210,000 Metric Tons By 2015**. Bloomberg News, October 18, 2010.

CASTOR, Stephen B.; Hedrick, James B. Rare earth elements. **Industrial minerals volume, 7th edition: Society for mining, metallurgy, and exploration, Littleton, Colorado**, p. 769-792, 2006.

CHAO, E.C.T; BACK, J.M.; J.A. Minkin, M. Tatsumoto, Wang Junwen, J.E. Conrad, and E.H. McKee. **The sedimentary carbonate-hosted giant Bayan Obo REE-Fe-Nb ore deposit of Inner Mongolia, China: a cornerstone example for giant polymetallic ore deposits of hydrothermal origin**. US Government Printing Office, 1997

CHAVES, M. L. D. S. C.; BRANDÃO, P. R. G.; BUHN, B. **Monazita em veios de quartzo da Serra do Espinhaço Meridional (MG): mineralogia, idades LA-ICP-MS e implicações geológicas**. Revista Brasileiro de Geociências , São Paulo, v. 40, n. 4, p. 506-515, Dezembro 2010.

CHEPCANOFF, Vera. **Desenvolvimento de uma metodologia para a separação de samário e európio a partir de mistura de óxidos de Terras Raras por redução eletroquímica/precipitação**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2006.

CORDEIRO, Pedro Filipe de Oliveira. **Petrologia e metalogenia do depósito primário de nióbio do Complexo Carbonatítico-Foscorítico de Catalão I, GO**. 2011.

COSTI, H. T.; BORGES, R. M. K.; DALL'AGNOL, R. **Depósitos de estanho da Mina Pitinga, Estado do Amazonas. Caracterização de depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia**. Brasília, DNPM/CT-Mineral FINEP/ADIMB, p. 391-475, 2005.

FEIO, Gilmara Regina Lima; DALL'AGNOL, Roberto; BORGES, Régis Munhoz Krás. **Greisens associados ao topázio-granito do pluton Água Boa, província estanífera de Pitinga: petrografia e balanço de massa**. Brazilian Journal of Geology, v. 37, n. 3, p. 607-624, 2007.

GASTAL, M. C. P.; LAFON, J. M.; CHEMALE JR, F. **U-Pb and Pb-Pb zircon ages of Neoproterozoic-Eopaleozoic granites from the western portion of the southern Brazilian Shield**. In: South American Symposium on Isotopic Geology. Short Papers VII SSAGI, Brasília. 2010.

GOÑI, J. C.; GOSO, H.; ISSLER, R. S. **Estratigrafia e Geologia econômica do Pré-cambriano e Eo-paleozóico uruguaio e sul-riograndense**. In: Congresso Brasileiro de Geologia. p. 5-33, 1962.

HARTMANN, L. A.; SILVA, L. C.; REMUS, M. V. D.; PHILLIP, R. P. **Evolução geotectônica do Sul do Brasil e Uruguai entre 3,3 Ga e 470 Ma**. In: **II Congresso Uruguayo de Geología**. 1998.

HARTMANN, L. A.; PHILIPP, R. P.; MCNAUGHTON, N. J. **Time frame of 753–680Ma juvenile accretion during the São Gabriel orogeny, southern Brazilian Shield**. *Gondwana Research*, v. 19, n. 1, p. 84-99, 2011.

HOLLINS, Oakdene. **Lanthanide resources and alternatives. A report for Department of Transport and Department for Business, Innovation and Skills. Okadene Hollins Research & Consulting**, 2010.

ISAAKS, Edward H.; SRIVASTAVA, R. Mohan. **An introduction to applied geostatistics**. 1989.

JACKSON, Wayne D.; CHRISTIANSEN, Grey. **International strategic minerals inventory summary report; rare-earth oxides**. US Dept. of the Interior, Geological Survey., 1993.

JANIKIAN, Liliane; ALMEIDA, Renato Paes de; FRAGOSO-CESAR, Antonio Romalino Santos; FAMBRINI, Gelson Luis. **Redefinição do Grupo Bom Jardim (Neoproterozóico III) em sua área-tipo: litoestratigrafia, evolução paleoambiental e contexto tectônico**. *Brazilian Journal of Geology*, v. 33, n. 4, p. 349-362, 2003.

LIFTON, Jack. **The battle over rare earth metals**. The Journal of Energy Security. , v. 12, 2010.

LIMA, E. F. **Petrologia das rochas vulcânicas e hipabissais da Associação Shoshonítica de Lavras do Sul-ASLS, RS**. Porto Alegre, 338p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995

LIMA, E. F.; SOMMER, C. A.; NARDI, L. V. S. **O vulcanismo neoproterozóico-ordoviciano no Escudo Sul-riograndense: os ciclos vulcânicos da Bacia do Camaquã**. Iannuzzi R. & Frantz JC (eds.), v. 50, p. 79-95, 2007.

LIMA, Paulo César Ribeiro. **Terras Raras: Elementos Estratégicos Para O Brasil**. Brasília-DF: Consultoria Legislativa, 2012.

LINDENBERG, Marcelo Tatsch. **Caracterização Petrográfica e Geoquímica das Rochas da Mina do Seival, Caçapava do Sul, RS**. Salão de Iniciação Científica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2011.

LIZ, JOAQUIM DANIEL. **Associação Shoshonítica de Lavras do Sul (RS): petrologia, geoquímica de elementos-traço em zircão e aplicação de sliding normalization na avaliação de fontes magmáticas**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2008.

LONG, Keith R. et al. **The principal rare earth elements deposits of the United States: a summary of domestic deposits and a global perspective**. Springer Netherlands, 2012.

LOUREIRO, Francisco. **Terras Raras no Brasil: Depósitos, Recursos Identificados, Reservas**. Rio de Janeiro: CETEM, 1994.

LOUREIRO, F. E. **Terras Raras: Tipos de Depósitos, Recursos Identificados e Alvos Prospectivos no Brasil**. SEMINÁRIO BRASILEIRO DE TERRAS RARAS, 1º, 2011.

LOUREIRO, F. E. V.; BRASIL, O. **Brasil e a Reglobalização da Indústria das Terras Raras**. Francisco Eduardo Lapido-Loureiro, Ronaldo Luiz C. dos Santos (Ed)–Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, v. 216, 2013.

LOPES, Rodrigo Winck. **Caracterização Petrográfica e Geoquímica da Mina do Seival, Bacia do Camaquã, RS**. 2013.

KINGSNORTH, Dudley J. Industrial Minerals Company of Australia. In: **5th International Rare Earth Conference, Hongkong (November 2009)**. 2009.

MARIANO, A.N. **The Nature of Economic REE and Y Minerals on a World Level**. MIT Energy Initiative Workshop, April 29, 2010.

MARTINS, Teresa; ISOLANE, Paulo. **Terras Raras: Aplicações Industriais e Biológicas**. São Paulo: Química Nova, 2005.

MATTÉ, Vinícius. **Rochas Dioríticas do Platô da Ramada (RS) e Sua Relação com o Magmatismo Alcalino da Formação Acampamento Velho (Neoproterozóico do Escudo Sul-Rio-Grandense), RS**. Dissertação de Mestrado. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, 2011.

MATTÉ, Vinícius et al. **Rochas dioríticas do Platô da Ramada, Rio Grande do Sul, e sua relação com o vulcanismo alcalino da Formação Acampamento Velho, Neoproterozoico do Escudo Sul-Rio-Grandense**. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 42, n. 2, p. 343-362, 2012.

MCKINSEY GLOBAL INSTITUTE. **Resource Revolution: Meeting the World's Energy, Materials, Food, and Water Needs**. Novembro 2011.

MCLEMORE, Virginia T; **Nepheline Syenite**. *Industrial Mineral and Rocks*, 7th Edition, Kogel, JE, Trivedi, NC, Barker, JM and Krukowsk, ST (Seniors Editors), Society of Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. Littleton, Colorado , p. 653-670, 2006.

MIEZITIS, Y.; HOATSON, D. Australian atlas of minerals resources, mines & processing centres. [www.australianminesatlas.gov.au](http://www.australianminesatlas.gov.au), 2013. Disponível em: <[http://www.australianminesatlas.gov.au/aimr/commodity/rare\\_earth.html](http://www.australianminesatlas.gov.au/aimr/commodity/rare_earth.html)>. Acesso em: 01 Junho 2015.

MME, M. d. Plano Nacional de Mineração 2030-Geologia, Mineração e Transformação Mineral. **Brasília: Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral-SGM**, 2011.

NARDI, Lauro Valentim Stoll. **Geochemistry and Petrology of the Lavras Granite Complex, RS, Brasil**. Tese de Doutorado. Universidade de Londres. 1984.

NARDI, L. V. S.; LIMA, EF de. **A associação shoshonítica de Lavras do Sul, RS. Revista Brasileira de Geociências**, v. 15, n. 2, p. 139-146, 1985.

ORRIS, Greta J.; GRAUCH, Richard I. **Rare earth element mines, deposits and occurrences**. US Department of the Interior, US Geological Survey, 2002.

PAIM, P. S. G.; CHEMALE JR, F.; LOPES, R. da C. **A Bacia do Camaquã. Geologia do Rio Grande do Sul**, p. 251-74, 2000.

PAIM, Paulo Sérgio Gomes; JUNIOR, Farid Chemale; WILDNER, Wilson. **Estágios Evolutivos da Bacia do Camaquã (RS). Ciência e Natura**, v. 36, n. 3, p. 183-193, 2014.

PELOSI, Ana Paula de Meireles Reis; FRAGOSO-CESAR, Antonio Romalino S. **Proposta litoestratigráfica e considerações paleoambientais sobre o Grupo Maricá (Neoproterozóico III), Bacia do Camaquã, Rio Grande do Sul**. Brazilian Journal of Geology, v. 33, n. 2, p. 137-148, 2003.

PINHEIRO-SOMMER, Jussara Alves; LIMA, Evandro Fernandez; SALDANHA, Dejanira Ludertz; SOMMER, Carlos Augusto; PIEROSAN, Ronaldo. **O uso de imagens do sensor ASTER no mapeamento de unidades vulcano-sedimentares do Platô da Ramada, Vila Nova do Sul, RS**. Pesquisas em Geociências, v. 33, p. 23-36, 2006.



PIORINO-MARIA, Sheila. **Estudo das Características de Distribuição de Elementos Terras Raras em Solanum Lycocarpum em Diferentes Ambientes Tropicais do Brasil por Ativação Neutrônica**. Tese de Doutorado. UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 2001.

PORCHER, C. A.; LOPES, R. da C. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. **Cachoeira do Sul, Folha SH**, 2000.

RAPOSO, Daniel Bernardes; PEREIRA, Sueli Yoshinaga. **Caracterização Litológica e Hidrodinâmica do Aquífero Associado ao Complexo Alcalino Carbonatítico do Barreiro, Oeste DE Minas Gerais**. Geociências (São Paulo), v. 32, n. 1, p. 33-50, 2013.

REMUS, MVD et al. **The link between hydrothermal epigenetic copper mineralization and the Caçapava Granite of the Brasiliano Cycle in southern Brazil**. Journal of South American Earth Sciences, v. 13, n. 3, p. 191-216, 2000.

RIBEIRO, Carlos Cordeiro. **Geologia, Geometalurgia, Controles e Gênese dos Depósitos de Fósforo, Terras Raras e Titânio do Complexo Carbonatítico Catalão I, GO**. Tese de Doutorado. INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, 2008.

RIBEIRO, M.; FANTINEL, L. M. **Associações petrotectônicas do Escudo Sul-Riograndense: I Tabulação e distribuição das associações petrotectônicas do Escudo do Rio Grande do Sul**. Iheringia, Série Geológica, v. 5, n. 1, 1978.

ROBERTSON, JF **Revision of Stratigraphy and nomenclature of rock units in Caçapava-Lavras Region**. Notas e estudos, v. 1, n. 2, p. 41-54, 1966.

ROCHA, Alexandre Magno Rocha; NETO, Mário Tavares de Oliveira Cavalcante. **Noções de Prospecção e Pesquisa Mineral para Técnicos de Geologia e Mineração**. 2010

ROCIO, Marco Aurélio Ramalho; Silva, Marcelo Machado; Carvalho, Pedro Sergio Landim; Cardoso, José Guilherme da Rocha. **Terras Raras: situação atual e perspectivas**. BNDES Setorial, n. 35, mar. 2012, p. 369-420, 2012.

SERRA, Osvaldo Antônio. **Terras Raras: Brasil x China**. Revista da Sociedade Brasileira de Química, v 22, n.. 5, p. 811-812, 2011

SOUZA, Luis Eduardo de et al. Impacto do agrupamento preferencial de amostras na inferência estatística: aplicações em mineração. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 54, n. 4, p. 257-266, 2001.

TONIOLO, João Angelo. **Metalogênese do depósito de Cu Cerro dos Martins, RS**. Tese de Doutorado. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, 2004.

UNESP. Museu de Minerais e Rochas “HEINZ EBERT”. <http://www.rc.unesp.br>. Disponível em < <http://www.rc.unesp.br/museudpm/banco/index.html>. Acesso em: 23 de Novembro de 2015.

USGS. U. S. Geological Survey. Rare Earth elements mines, deposits, and occurrences. <http://www.usgs.gov>. Disponível em: <[http://mrdata.usgs.gov/ree/show-ree.php?rec\\_id=110](http://mrdata.usgs.gov/ree/show-ree.php?rec_id=110). Acesso em: 02 de Junho de 2015

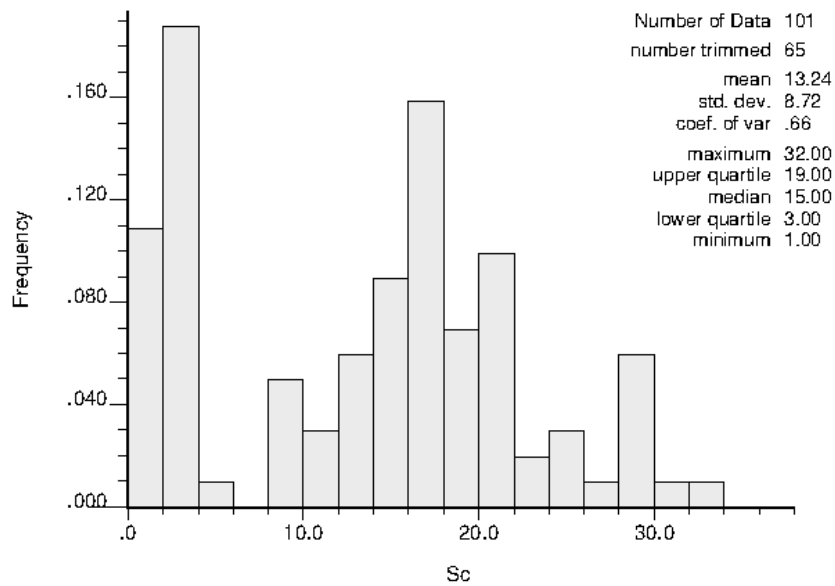
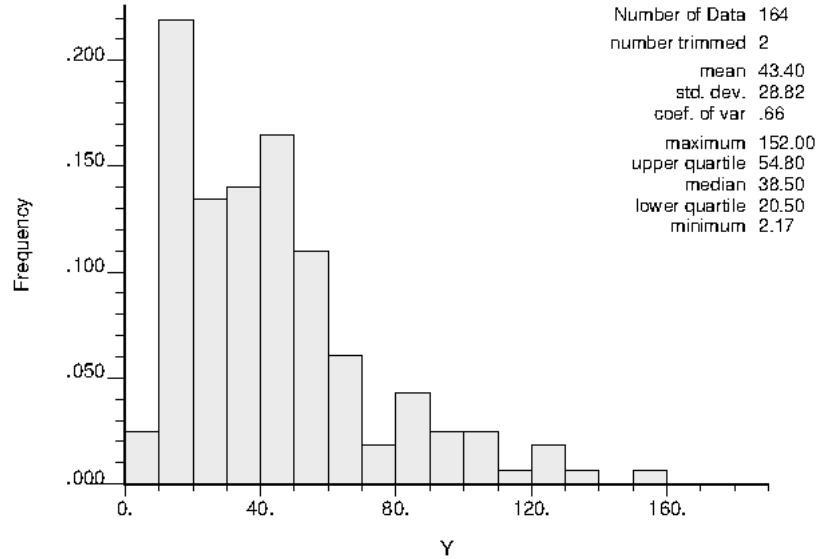
VIERA, Elbert Valdiviezo; LINS, Fernando Freitas. **Concentração de minérios de Terras Raras: uma revisão**. MCT, CNPq, CETEM, 1997.

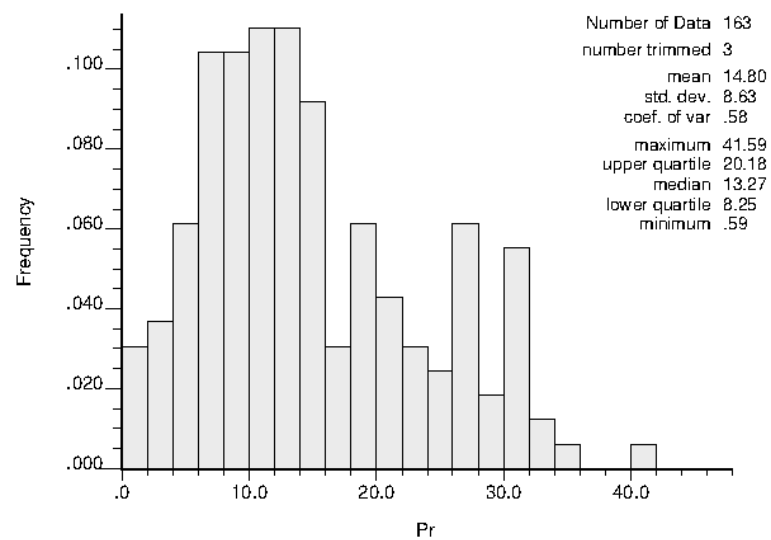
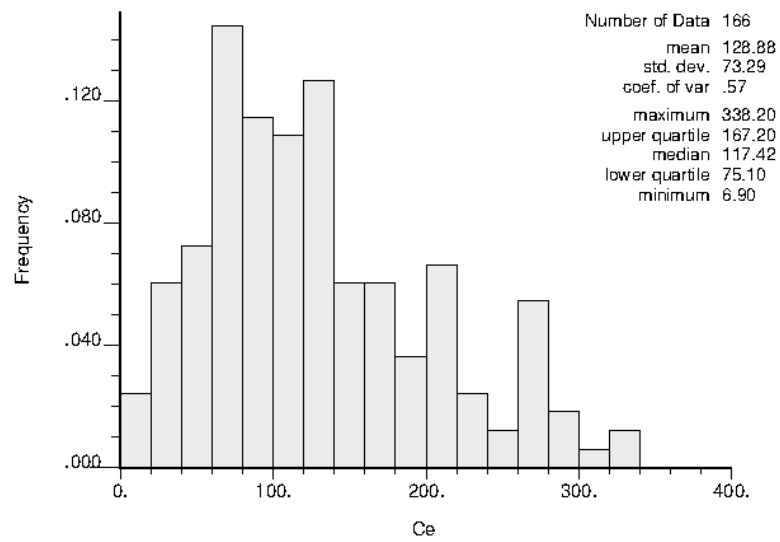
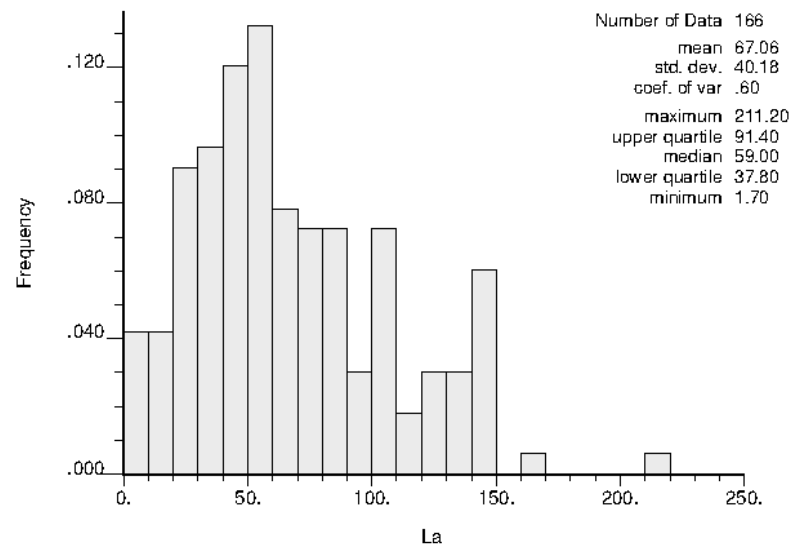
WESCHENFELDER, Franciele et al. **Situação Atual e Perspectivas da Produção de Ímãs Permanentes e Reservas de Terras Raras: BRASIL× MUNDO**. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, v. 9, n. 4, 2012.

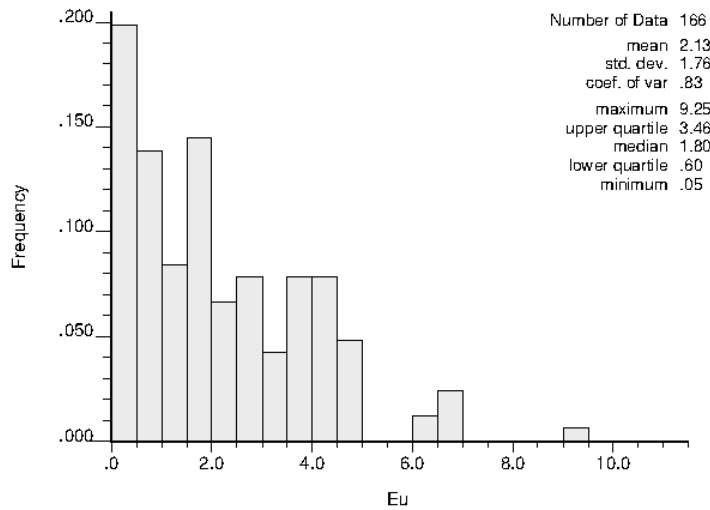
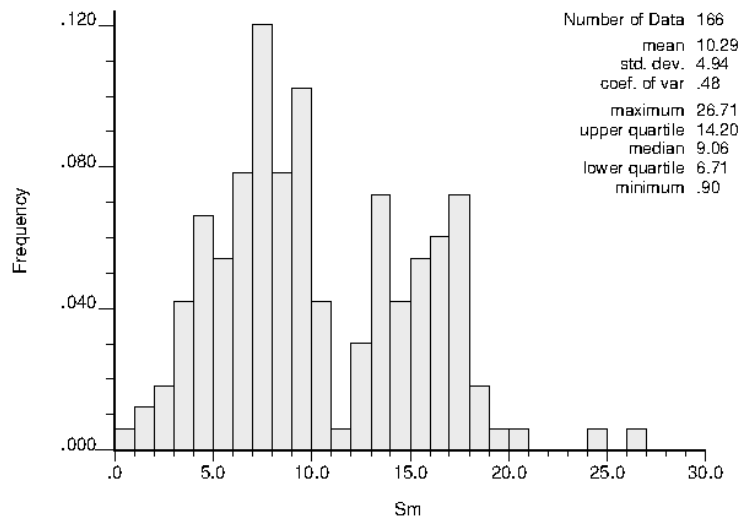
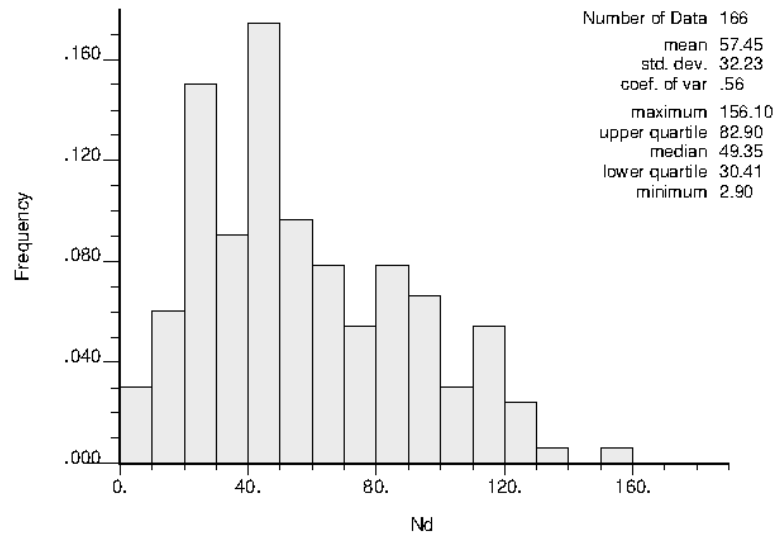
WILDNER, W. et al. **Volcanic cycles and setting in the Neoproterozoic III to Ordovician Camaquã Basin succession in southern Brazil: characteristics of post-collisional magmatism**. Journal of Volcanology and Geothermal Research , v. 118, n.. 1, p. 261-283, 2002.

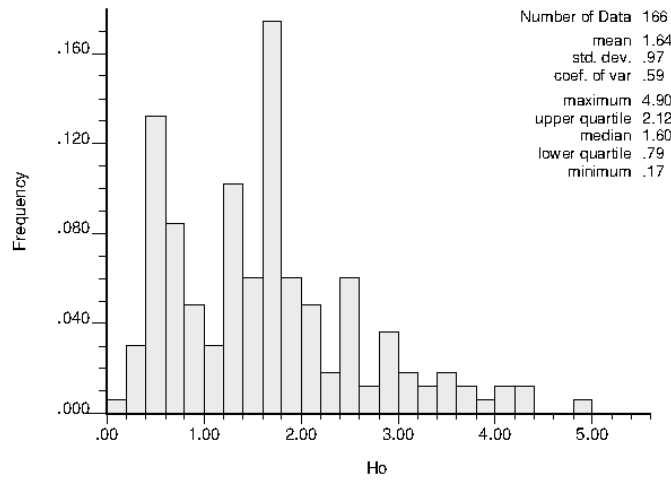
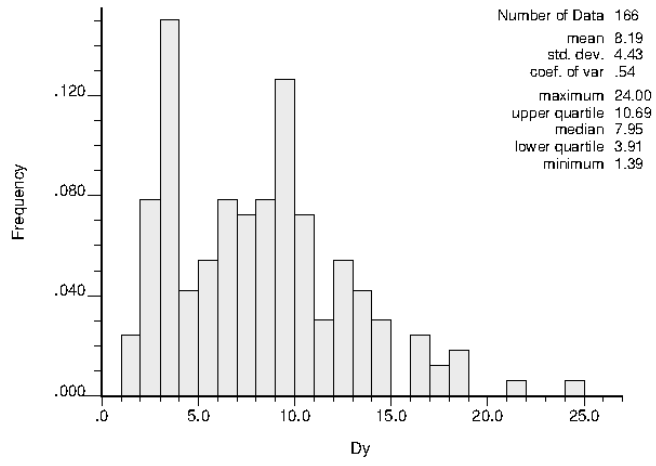
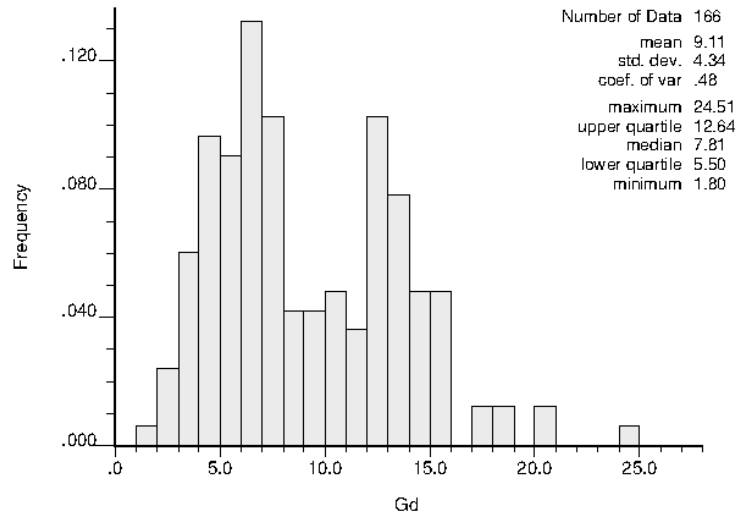
## Anexos

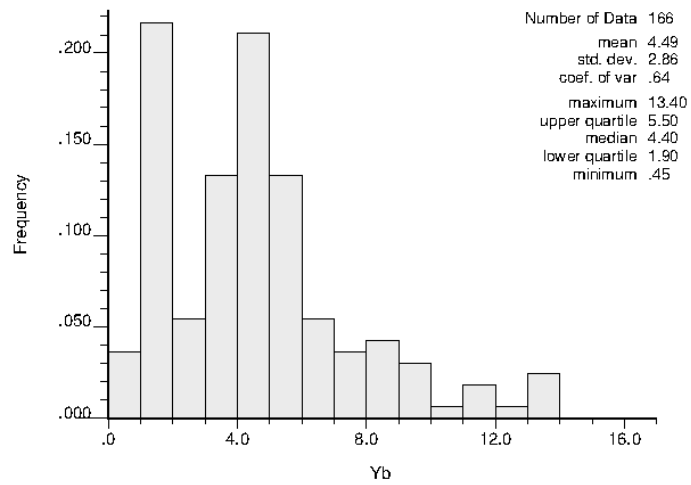
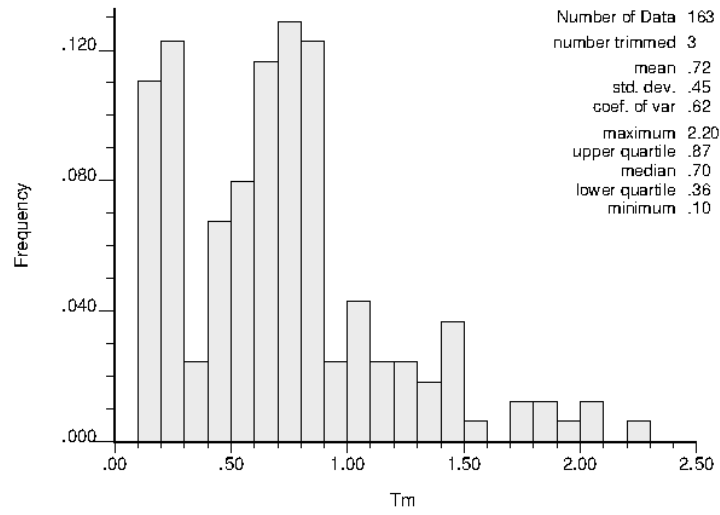
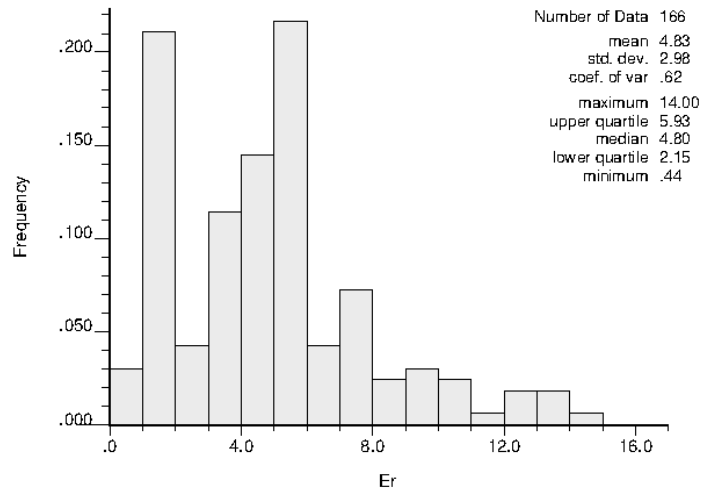
**Anexo 1:** Abaixo serão apresentados os 16 histogramas de frequência para os teores em ppm para cada elementos, pertencentes ao banco de dados completo.

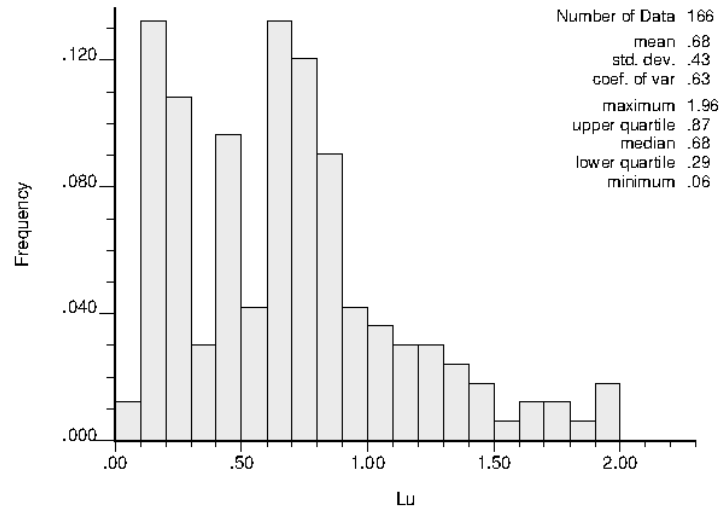






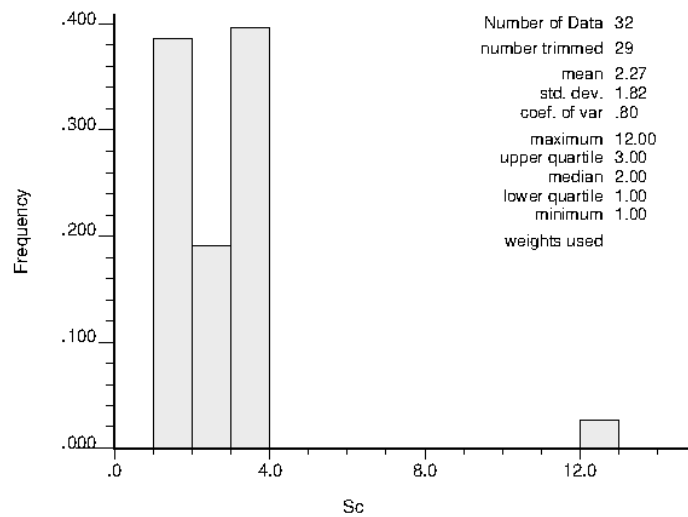
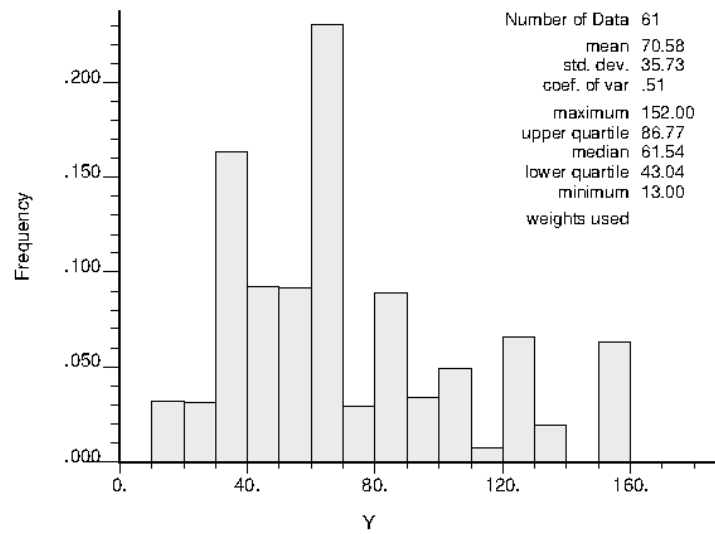


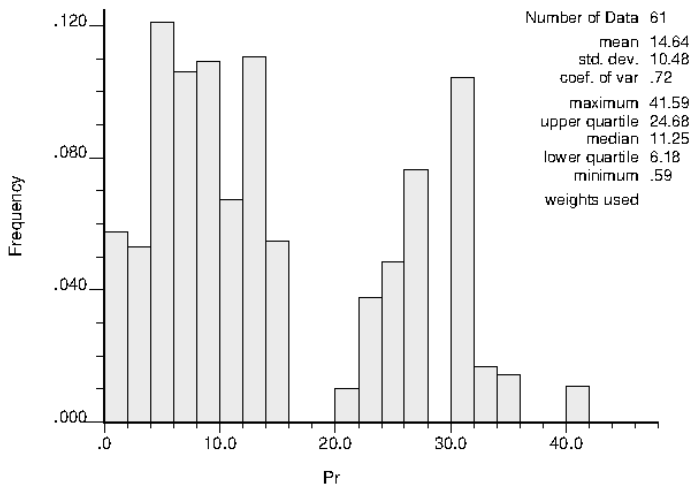
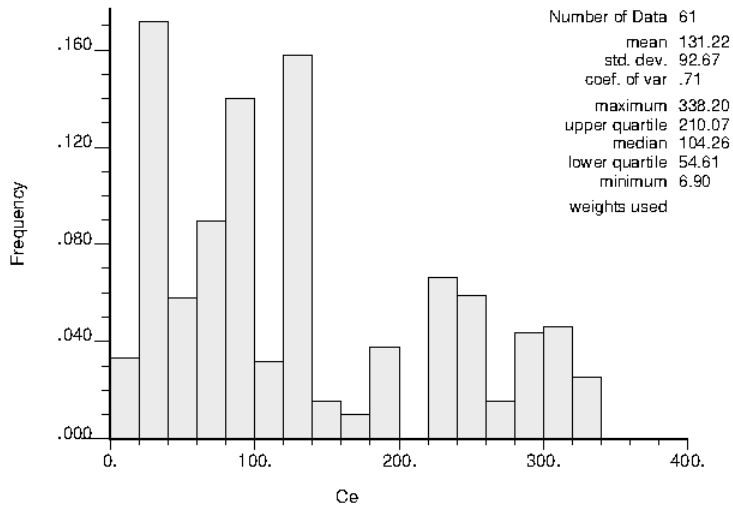
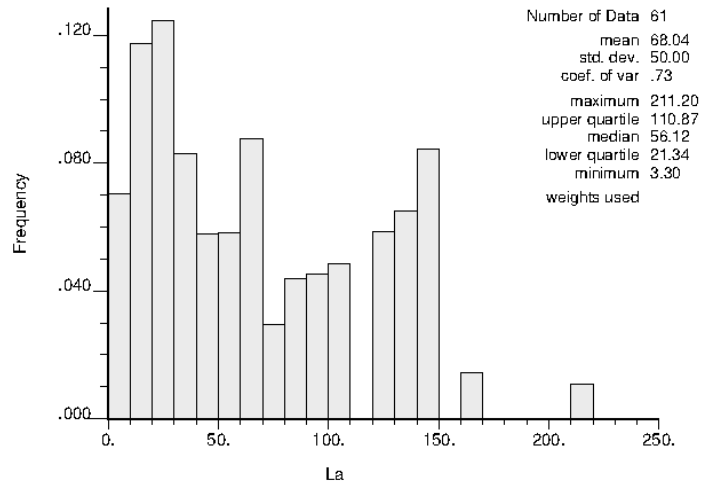


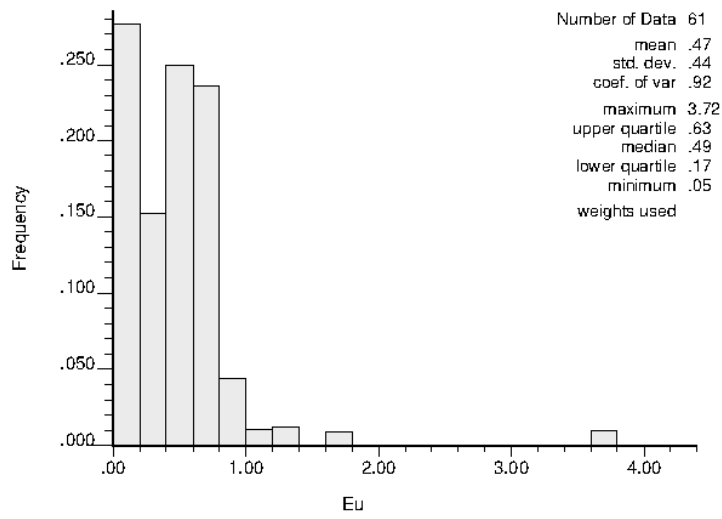
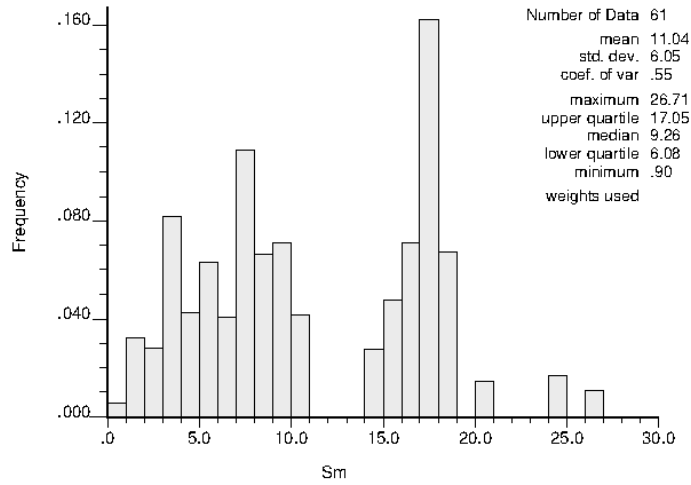
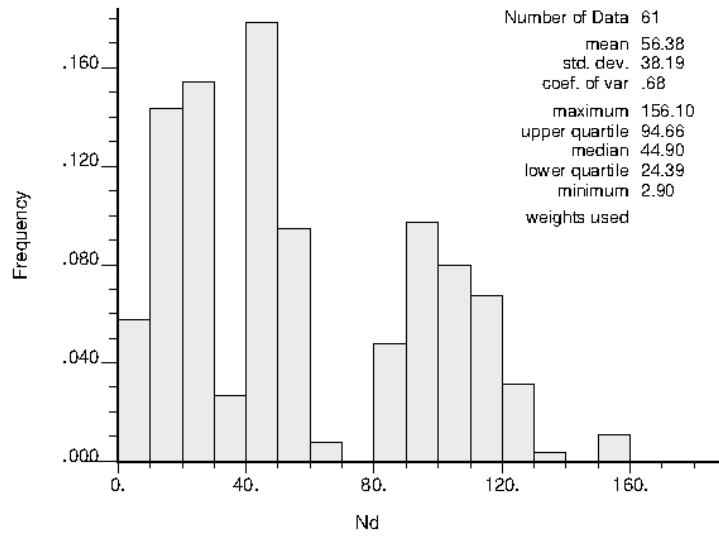


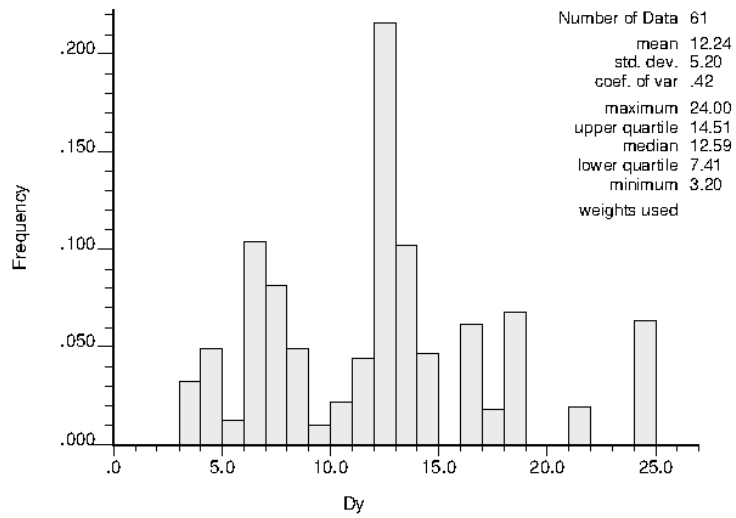
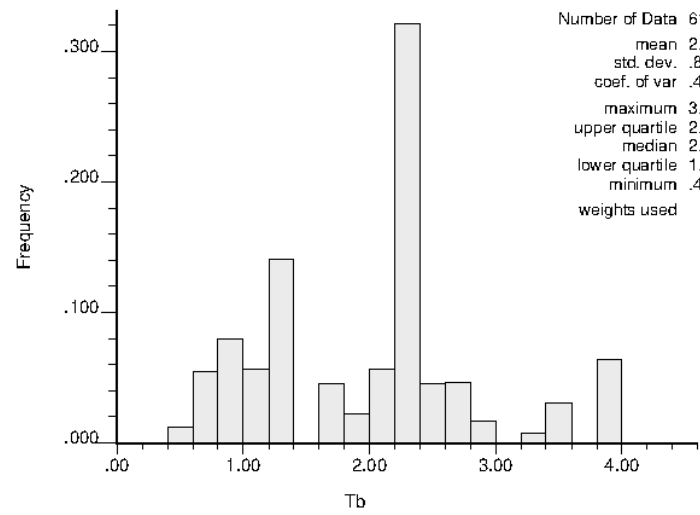
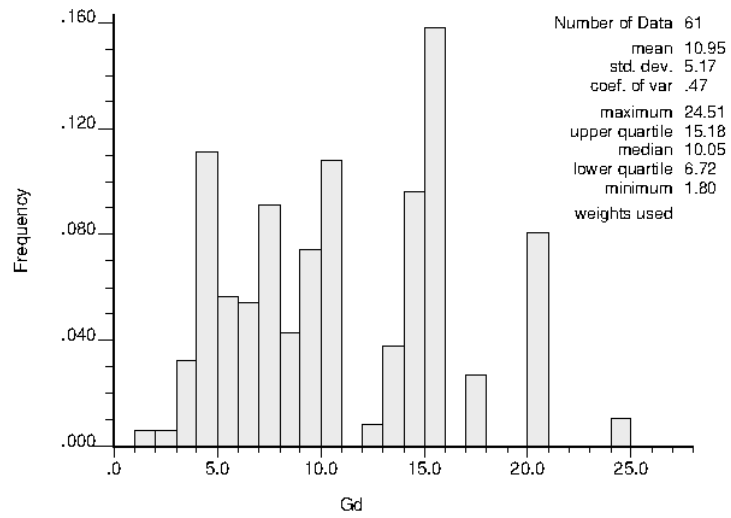


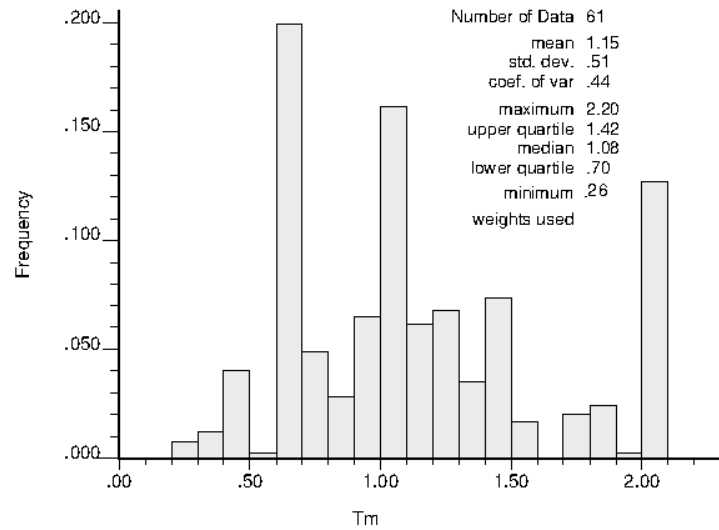
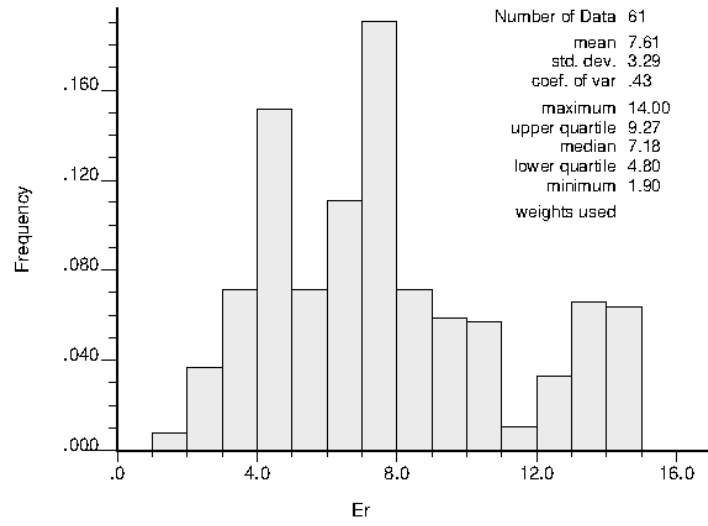
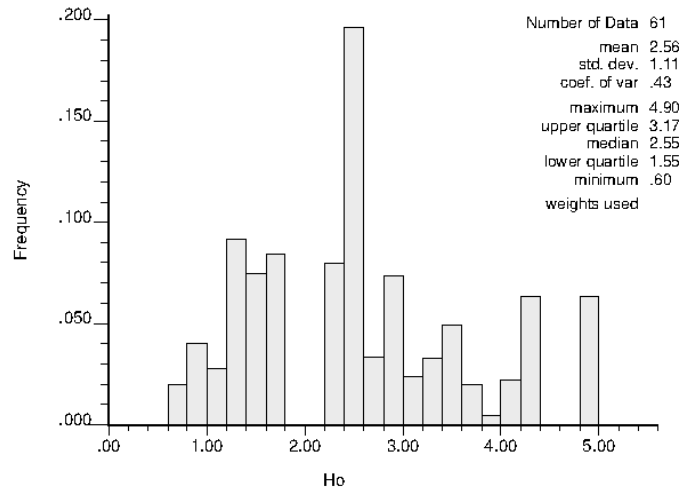
**Anexo 2:** Aqui serão expostos os 16 histogramas com pesos, referentes aos 16 ETRs do domínio das rochas ácidas da Formação Acampamento Velho.

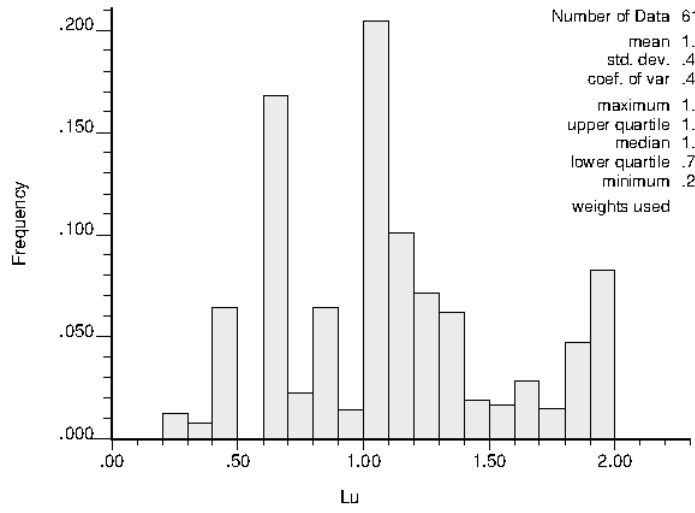
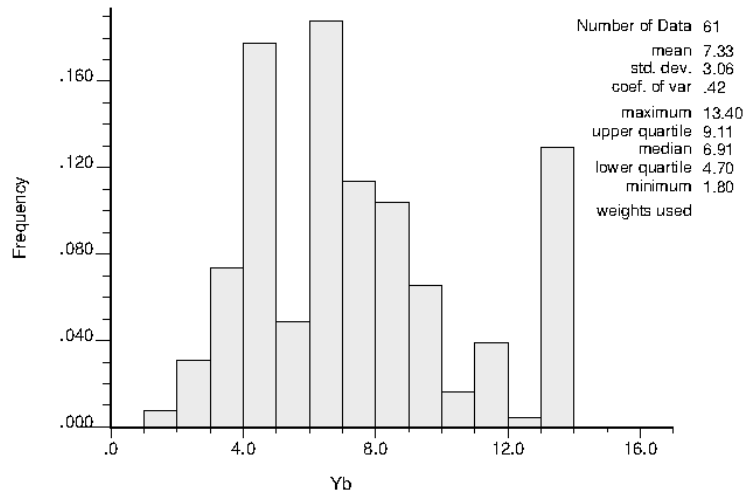




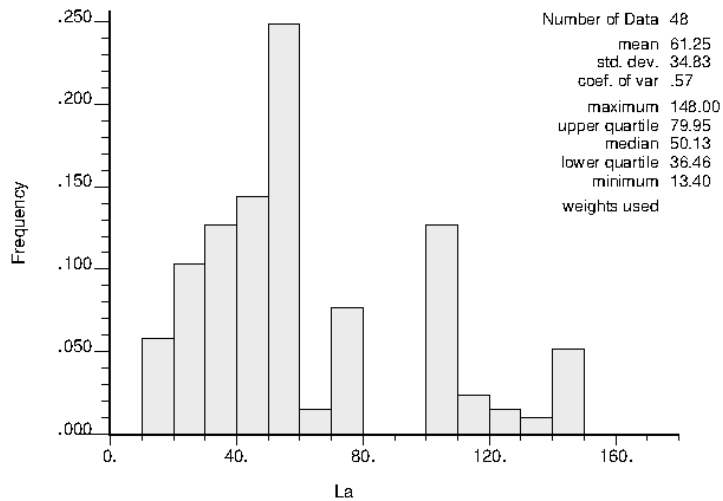
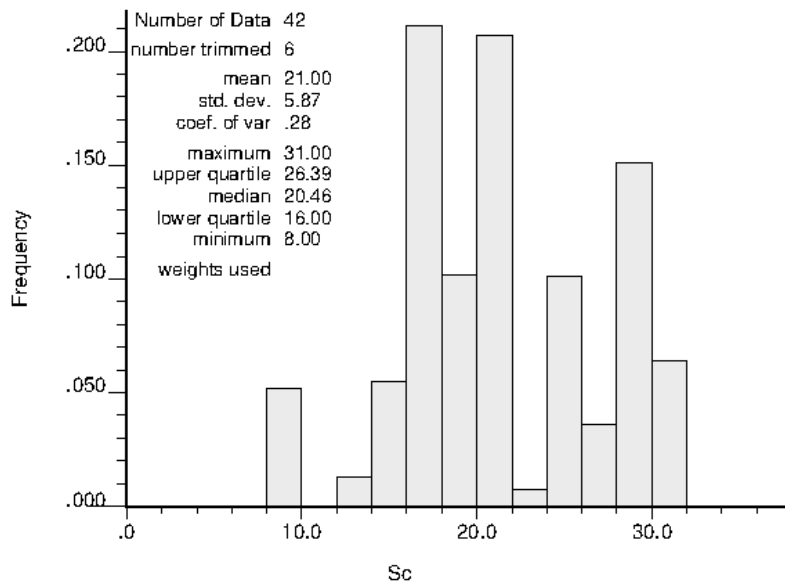
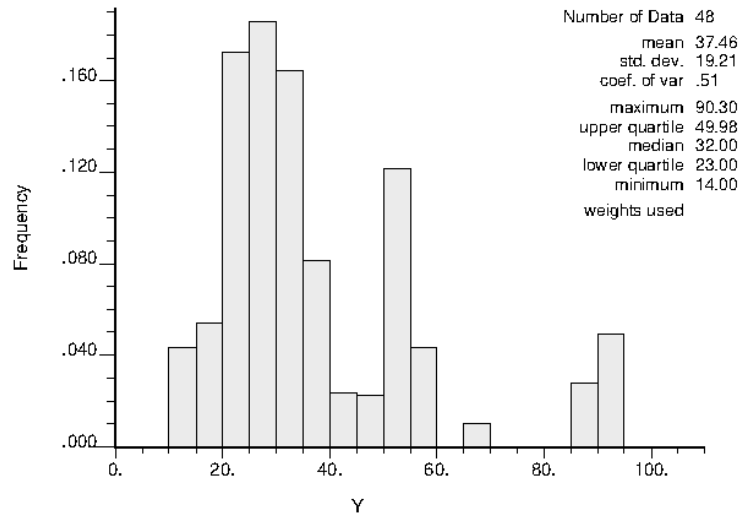


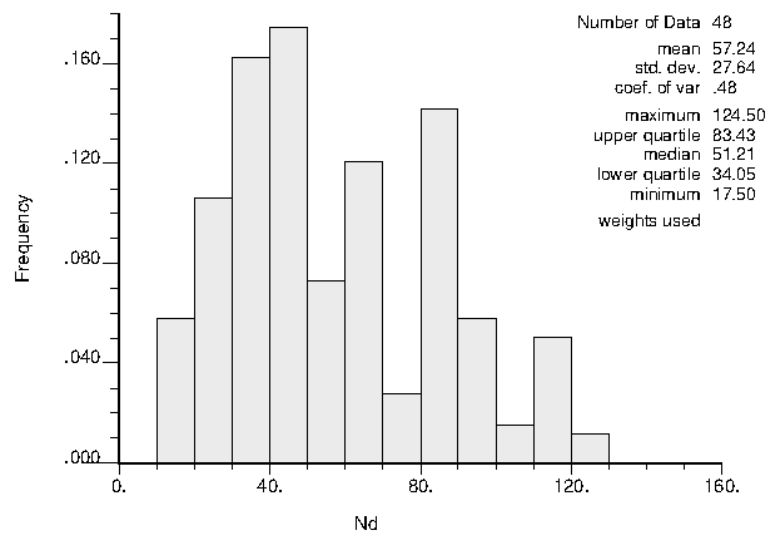
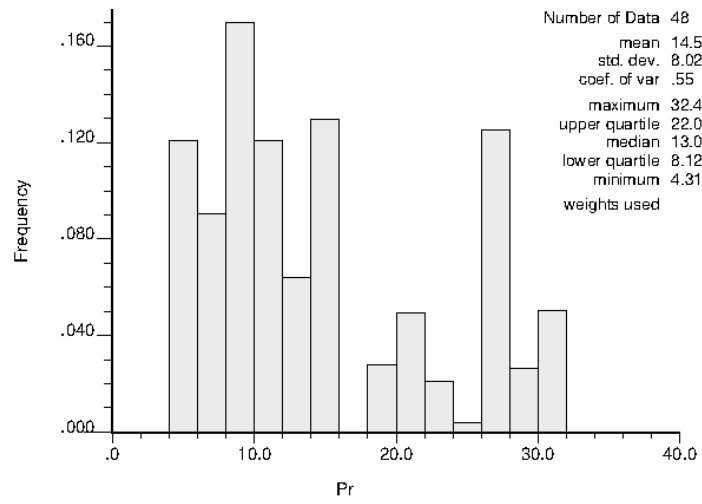
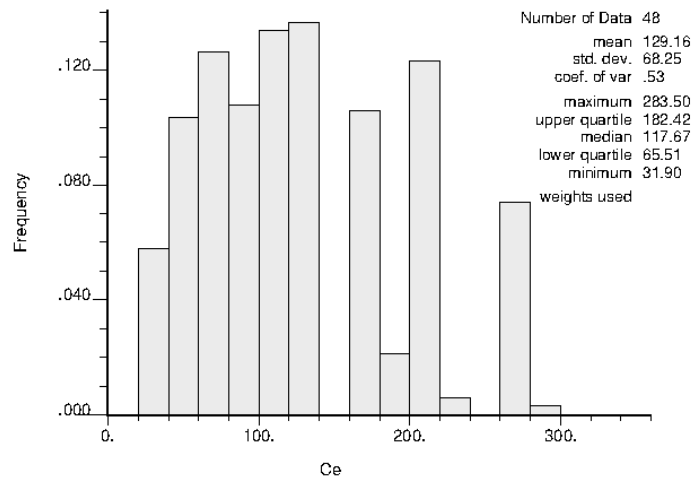




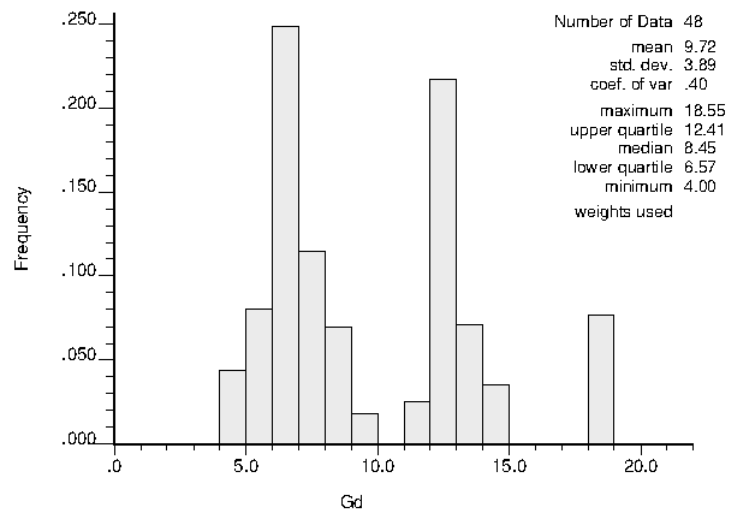
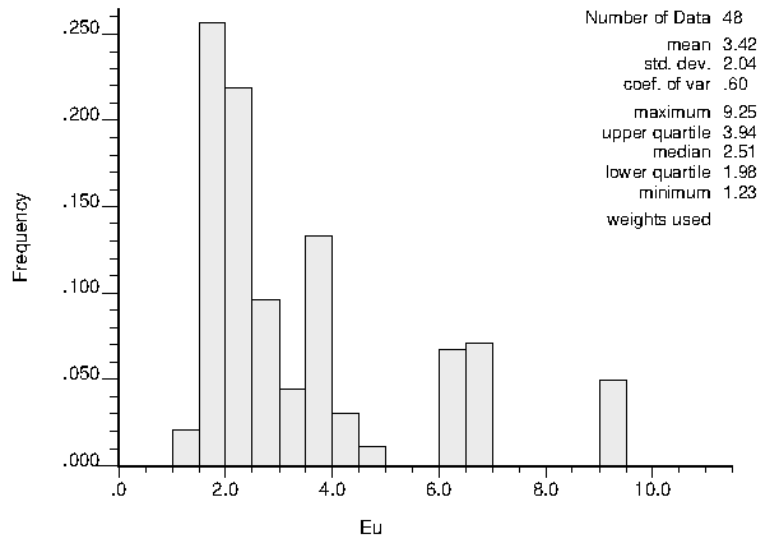
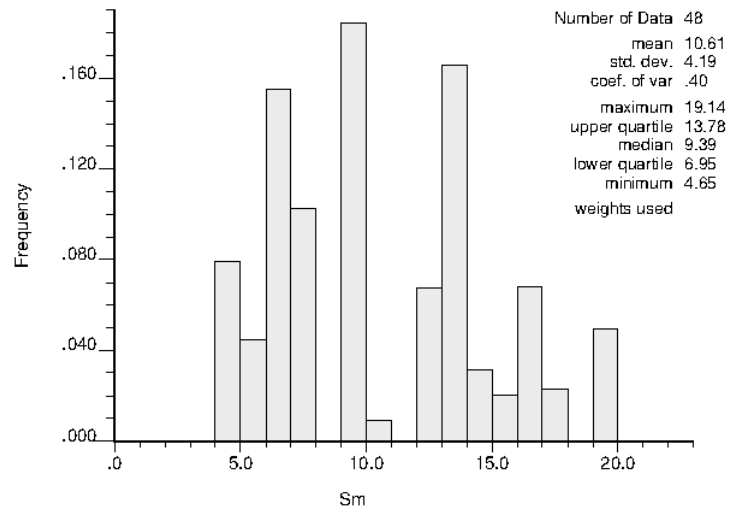


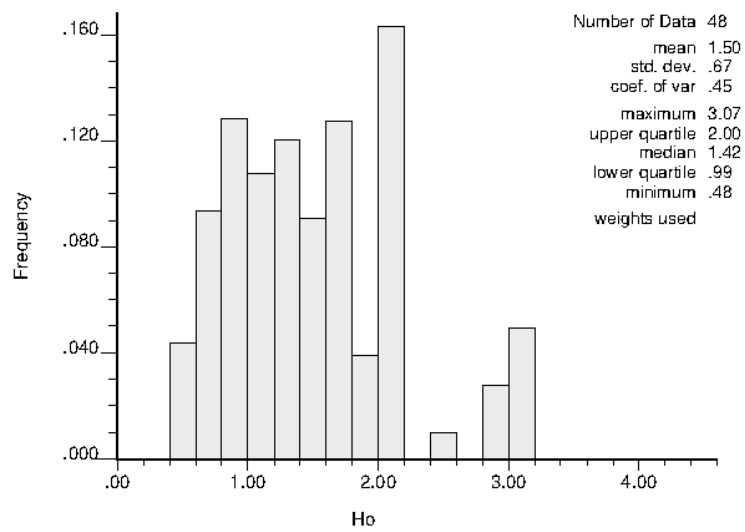
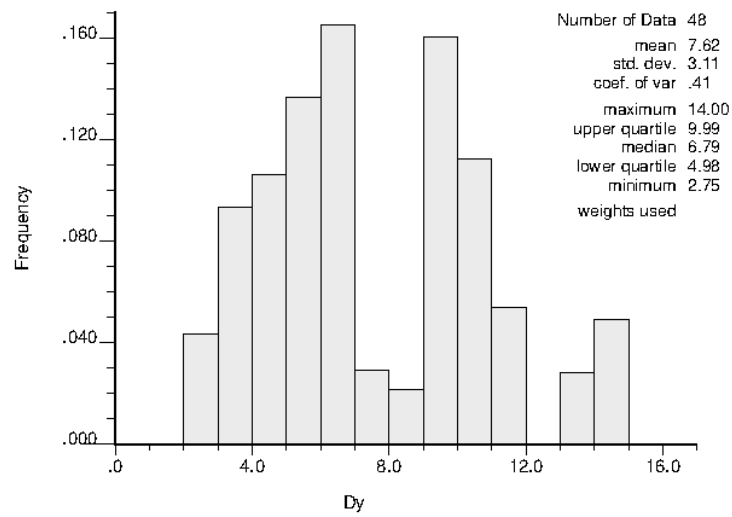
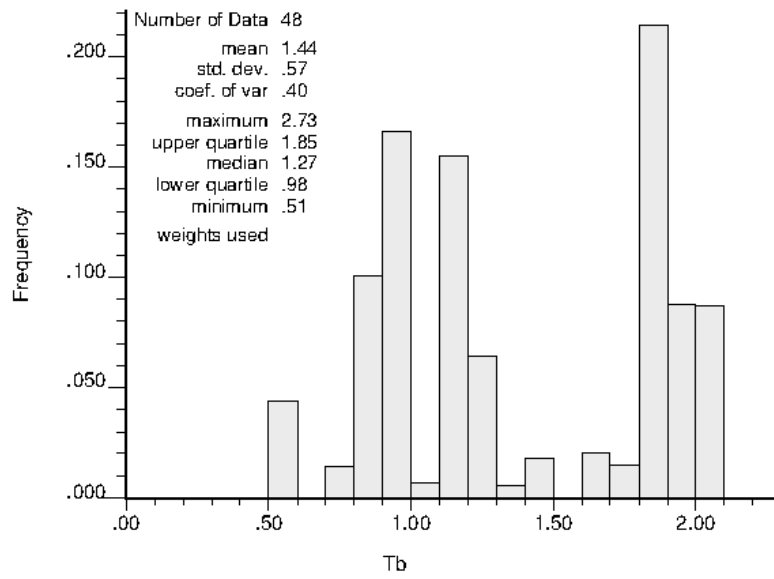
**Anexo 3:** Aqui serão expostos os 16 histogramas com pesos, referentes aos 16 ETRs do domínio das rochas intermediárias e básicas da Formação Acampamento Velho.

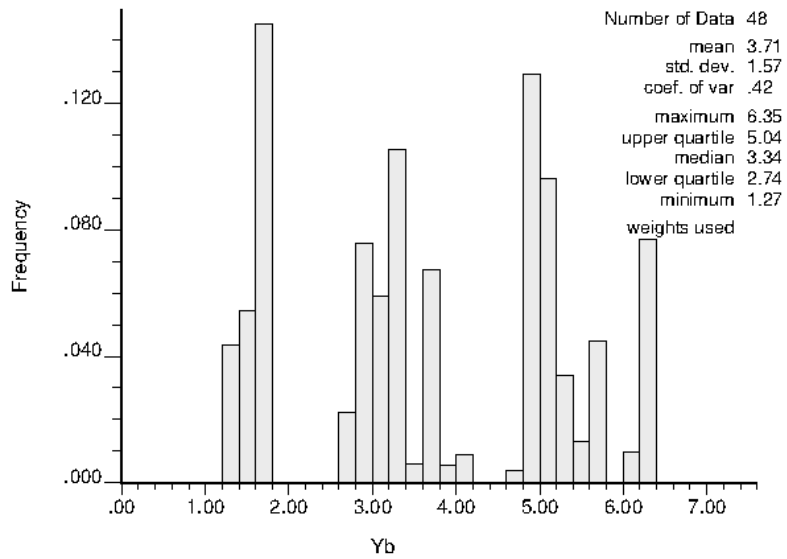
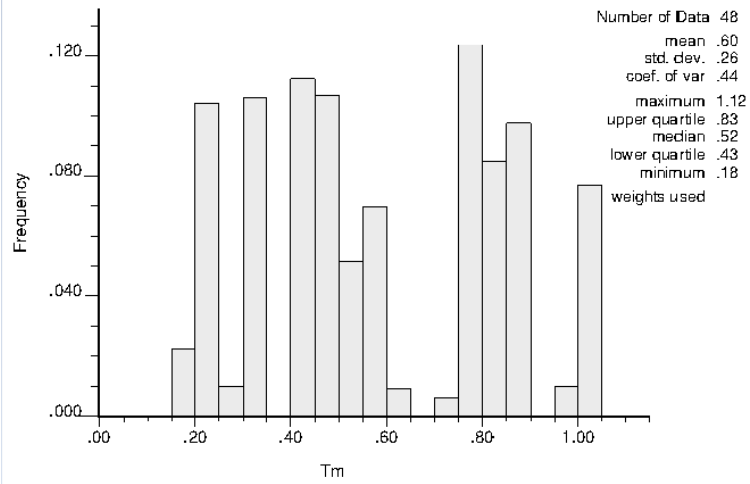
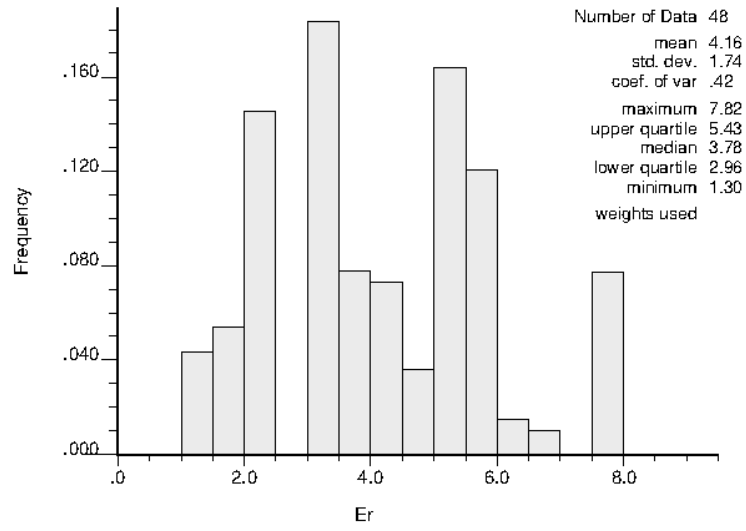


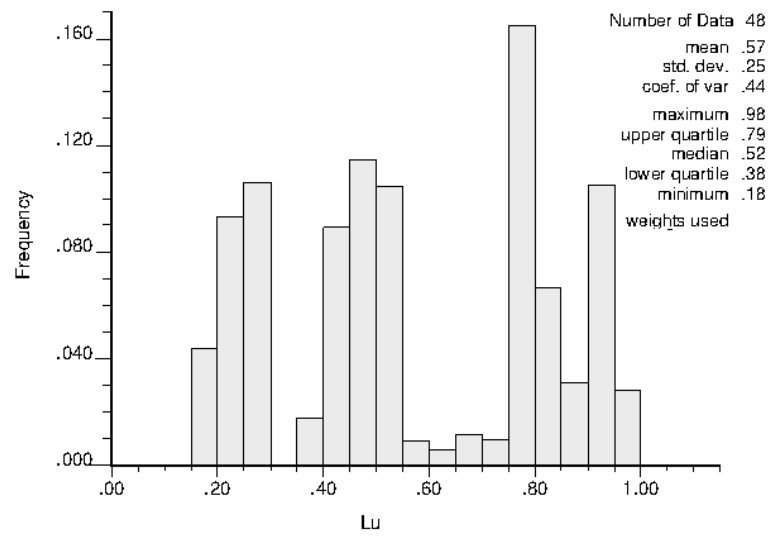




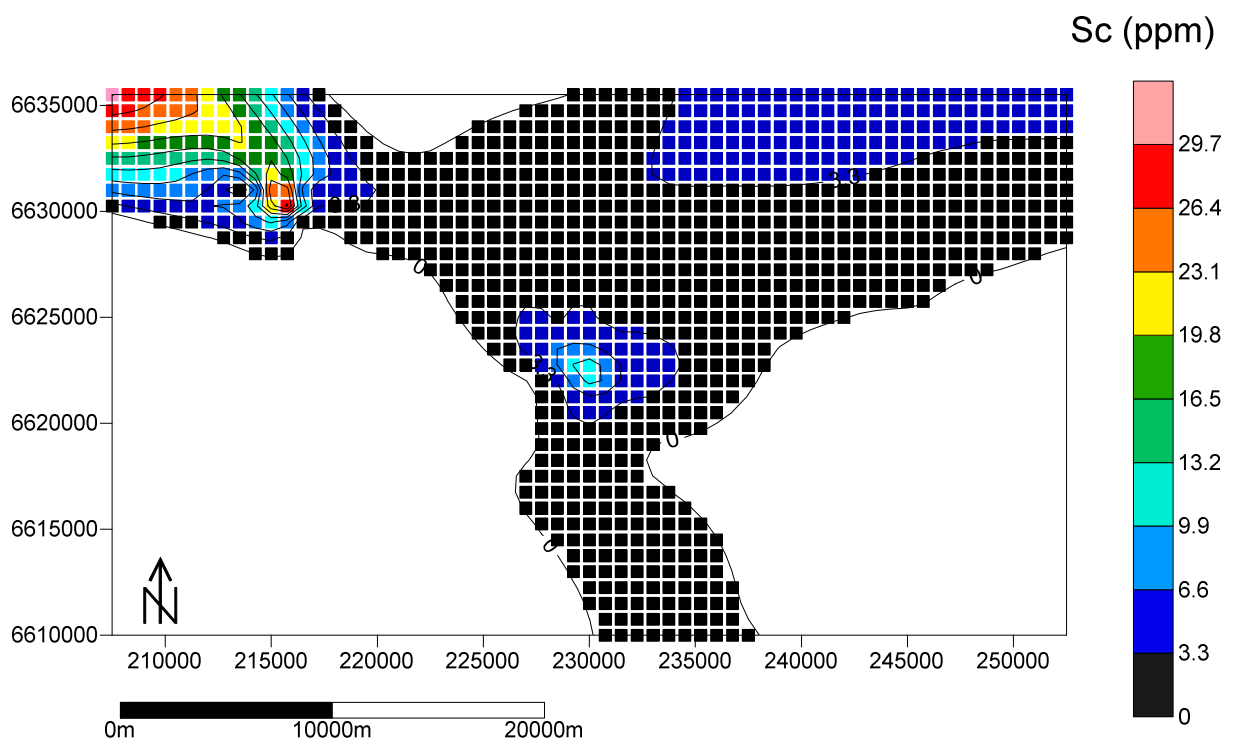
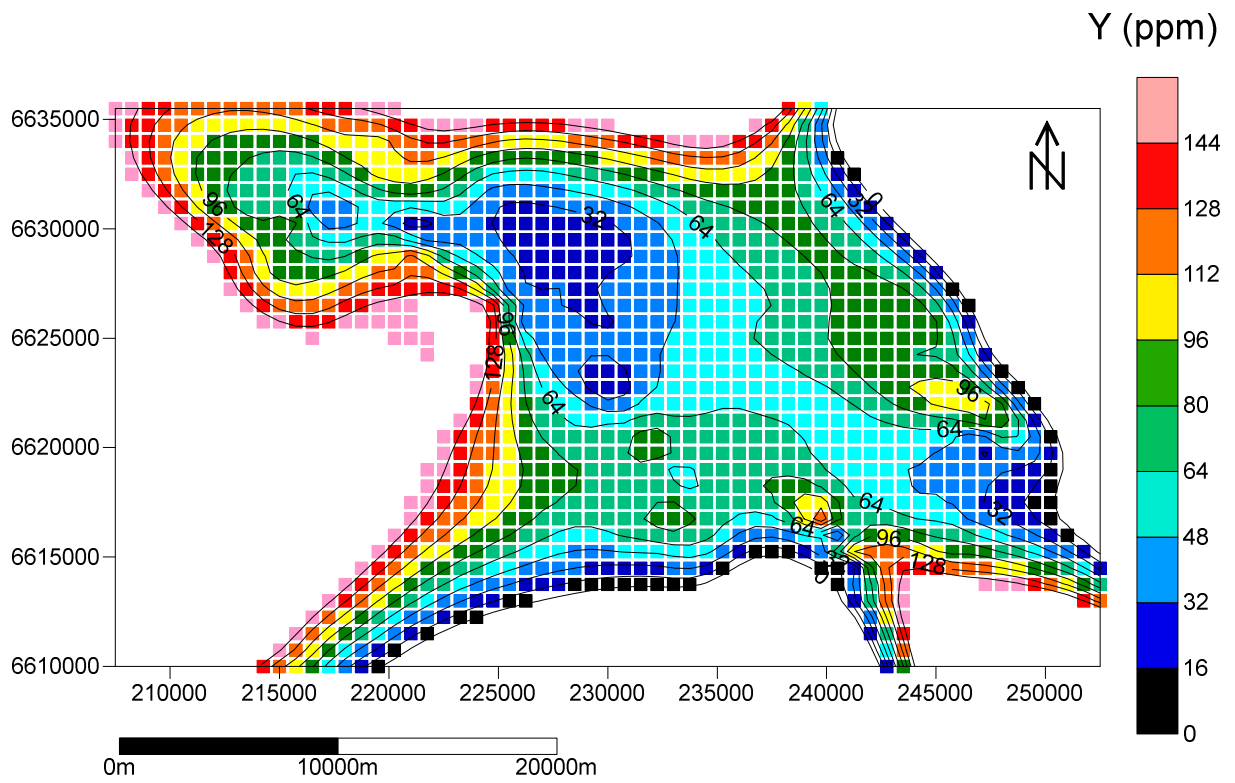


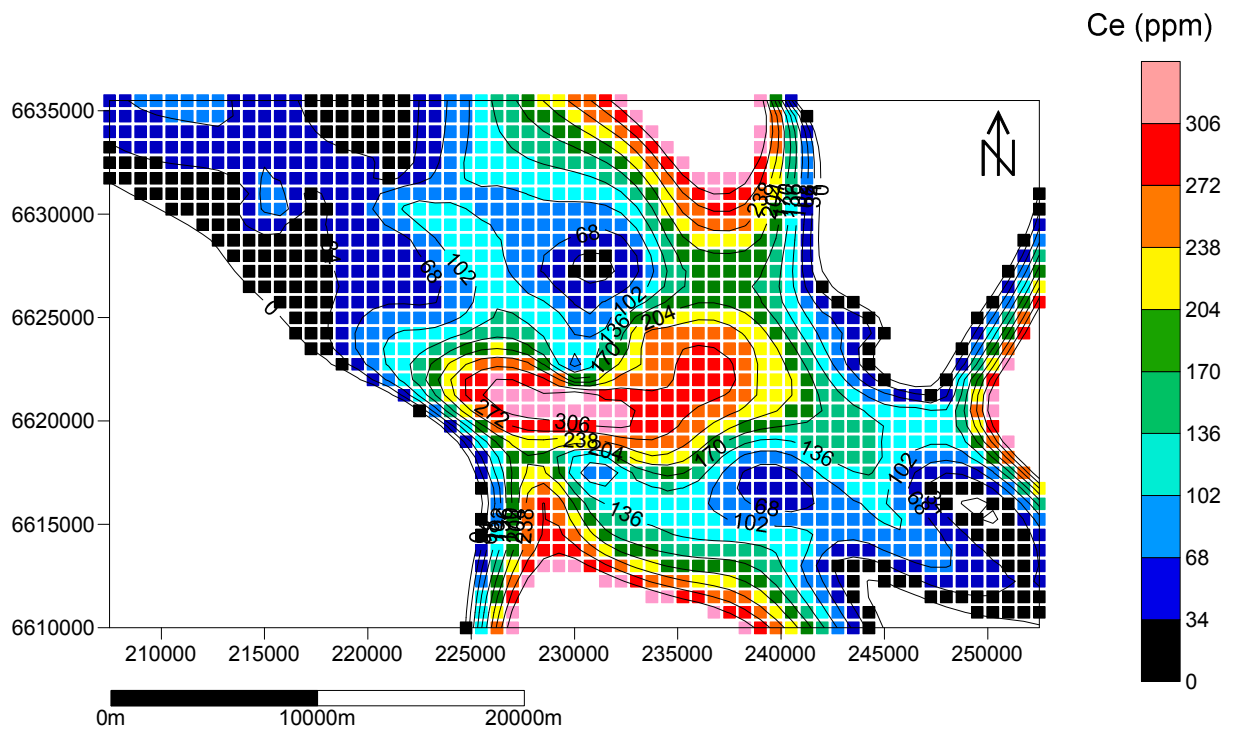
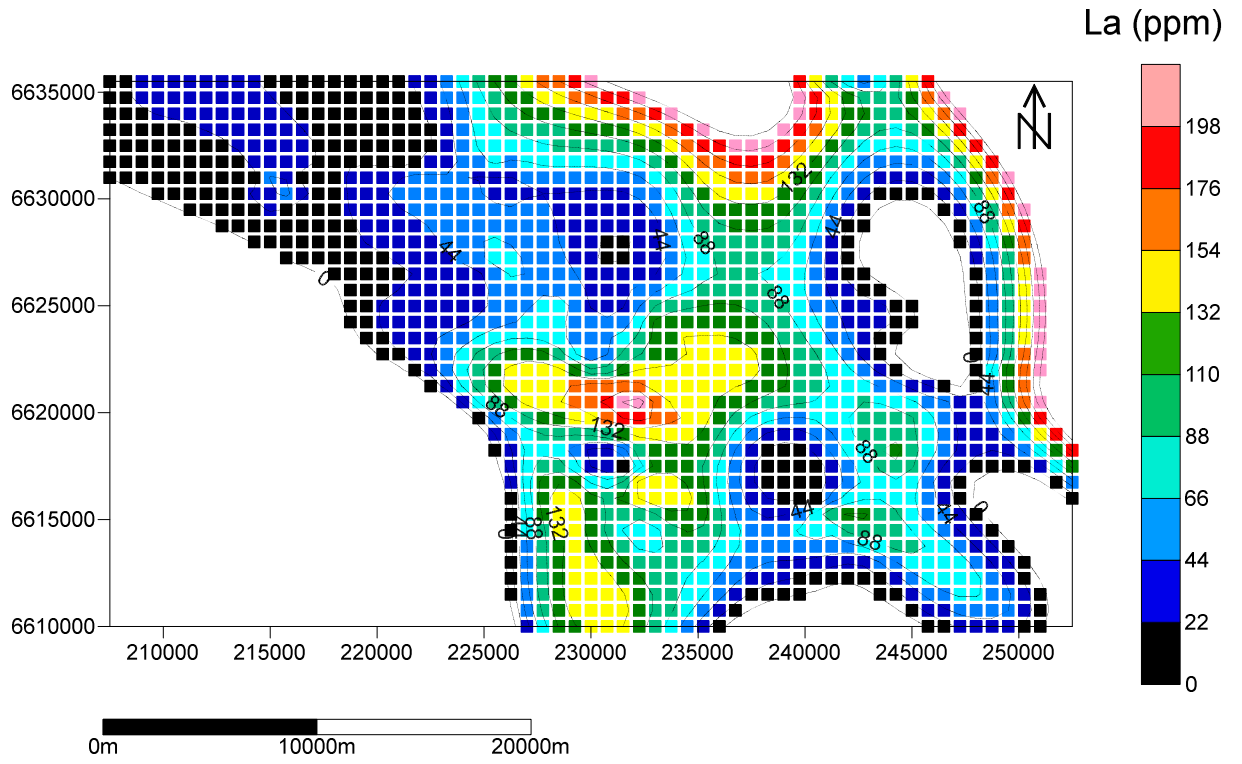


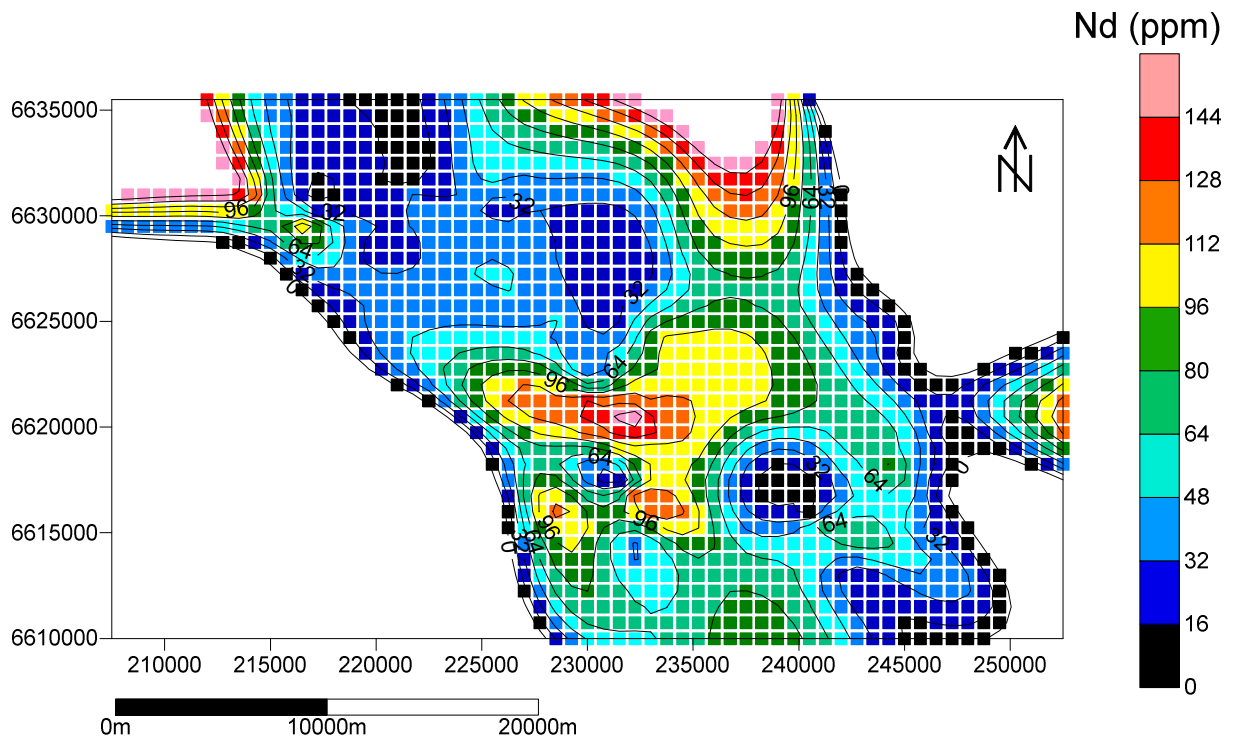
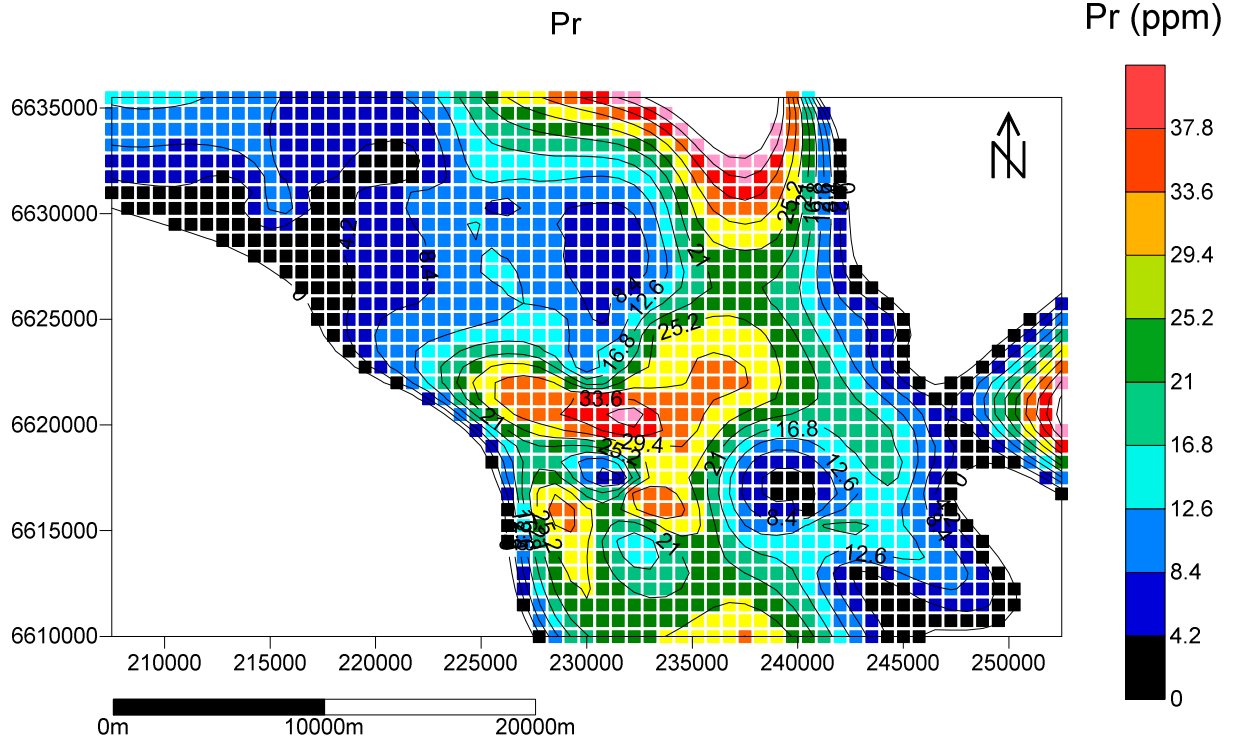




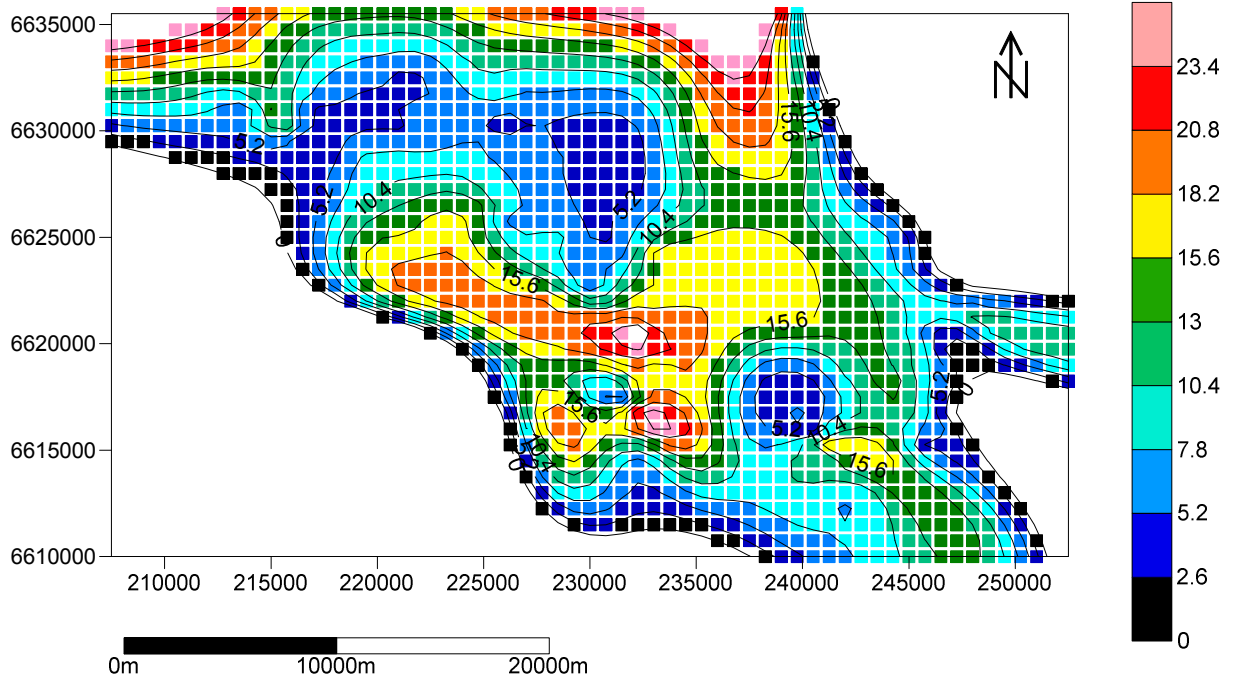
**Anexo 4:** Modelos de blocos para os 16 elementos do domínio das rochas ácidas da Formação Acampamento Velho.



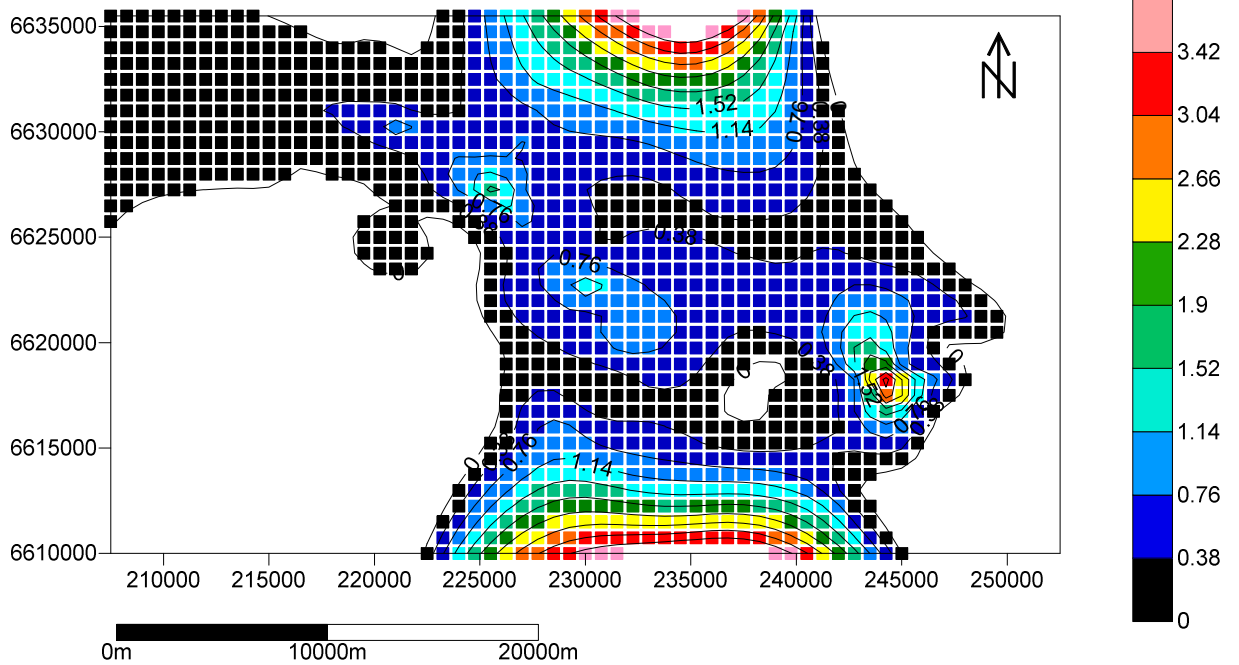




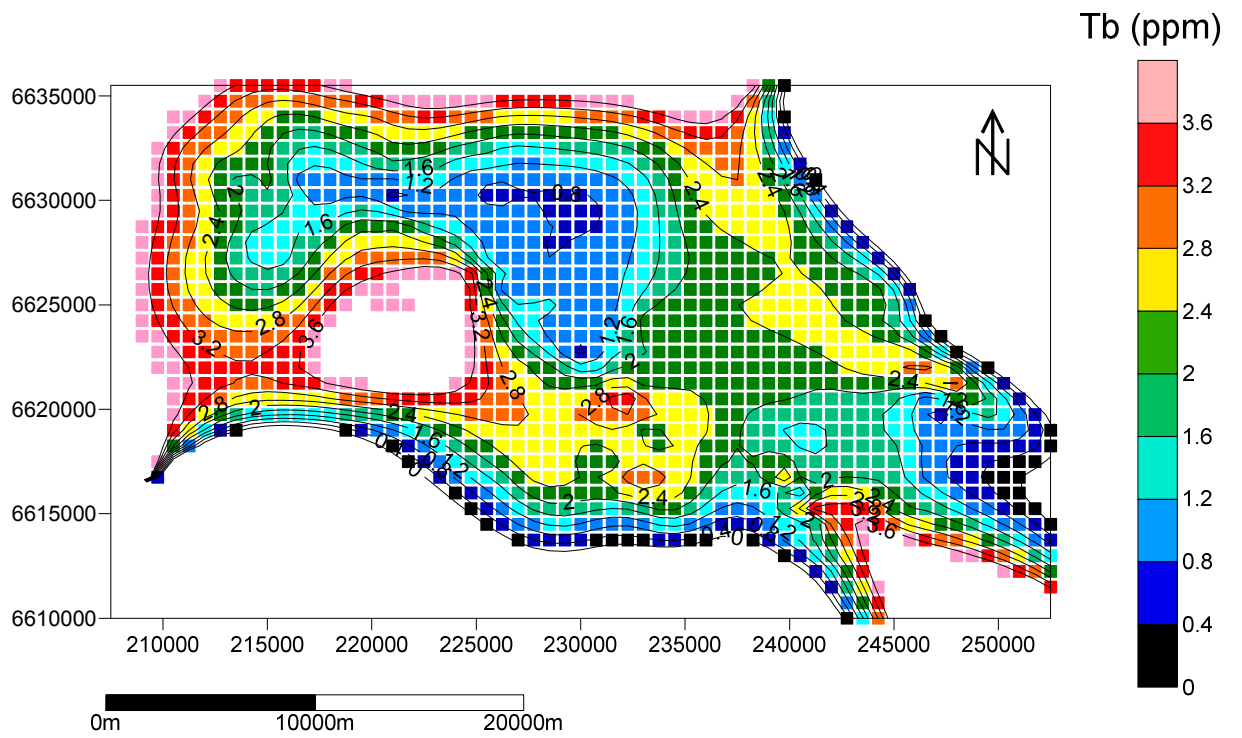
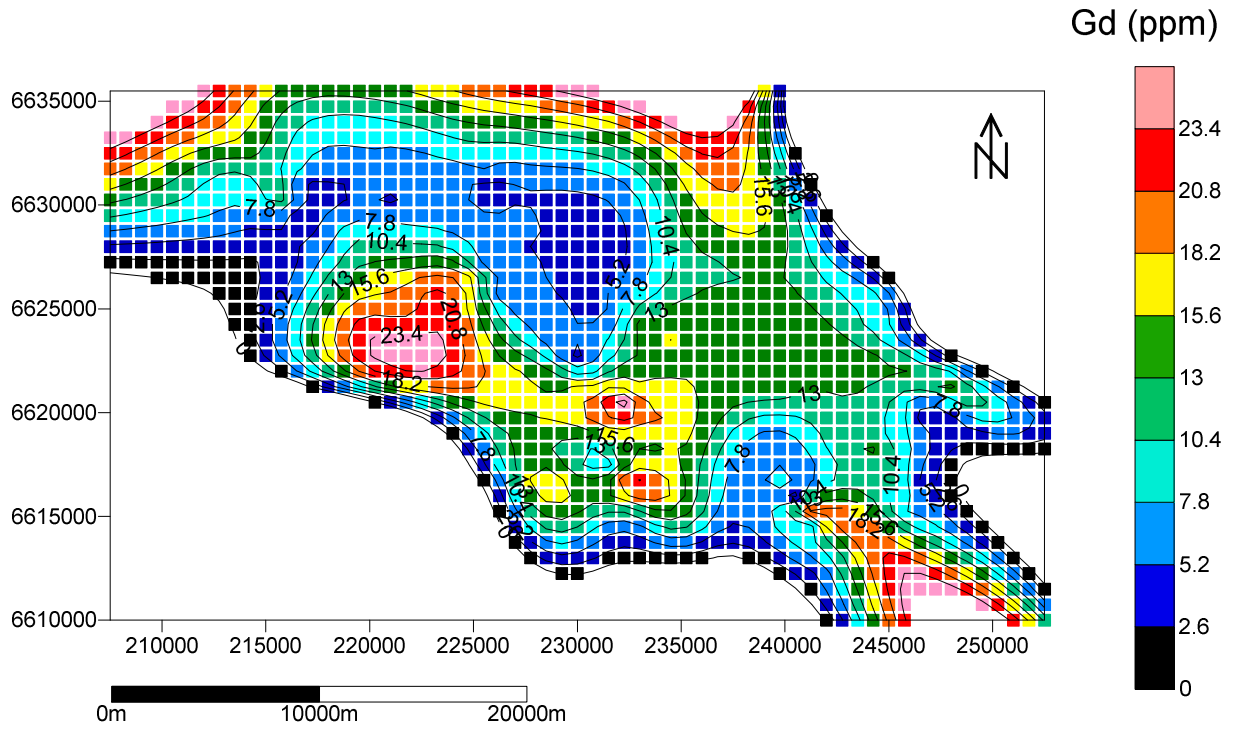
Sm (ppm)

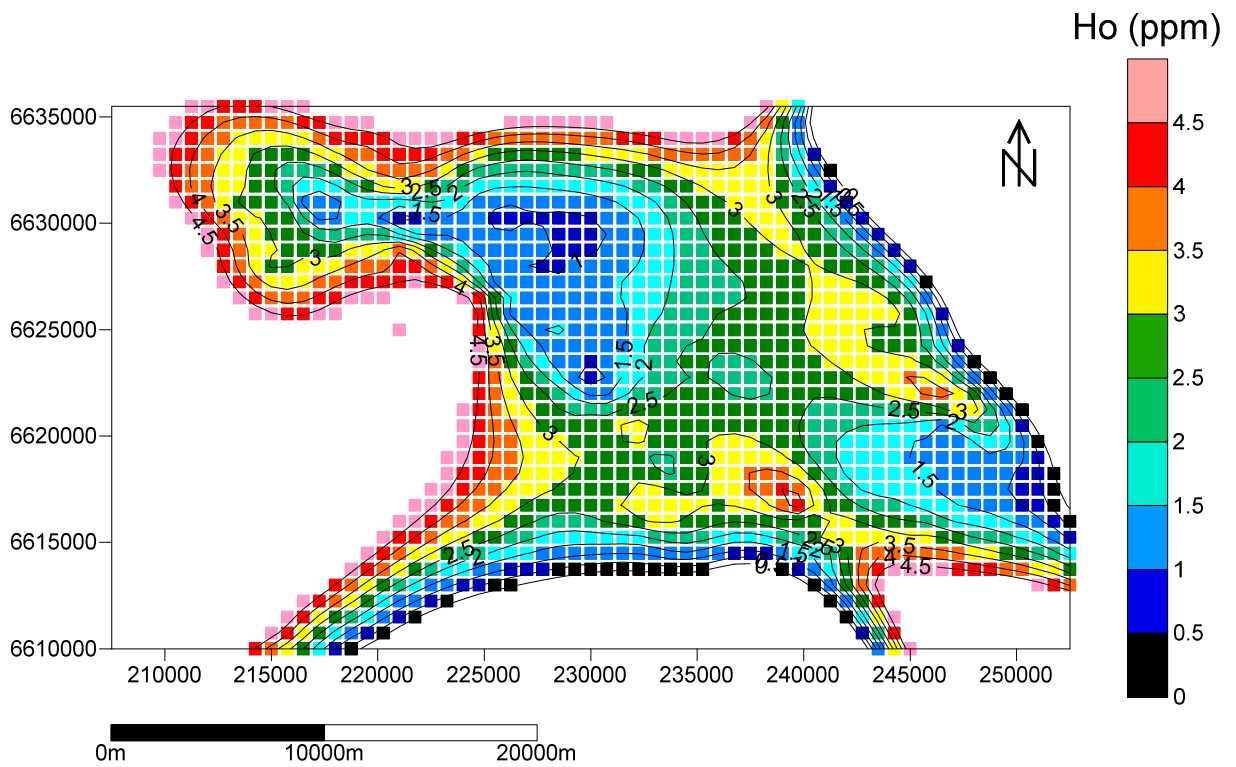
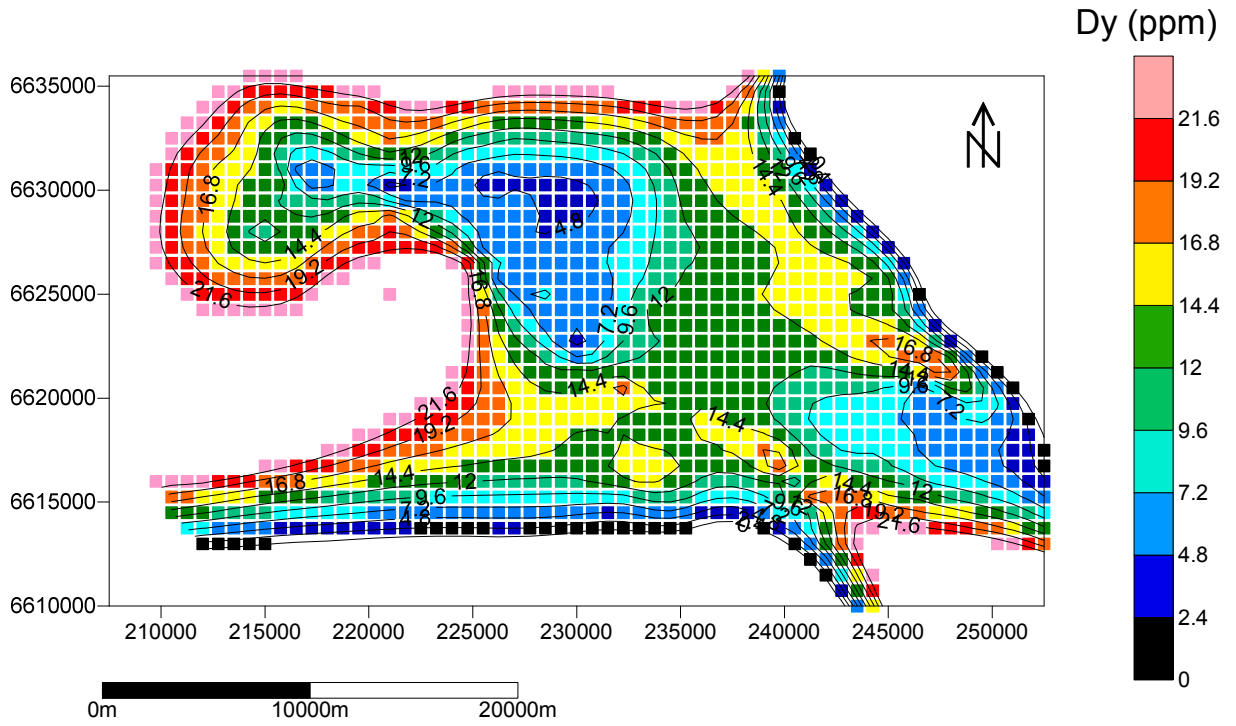


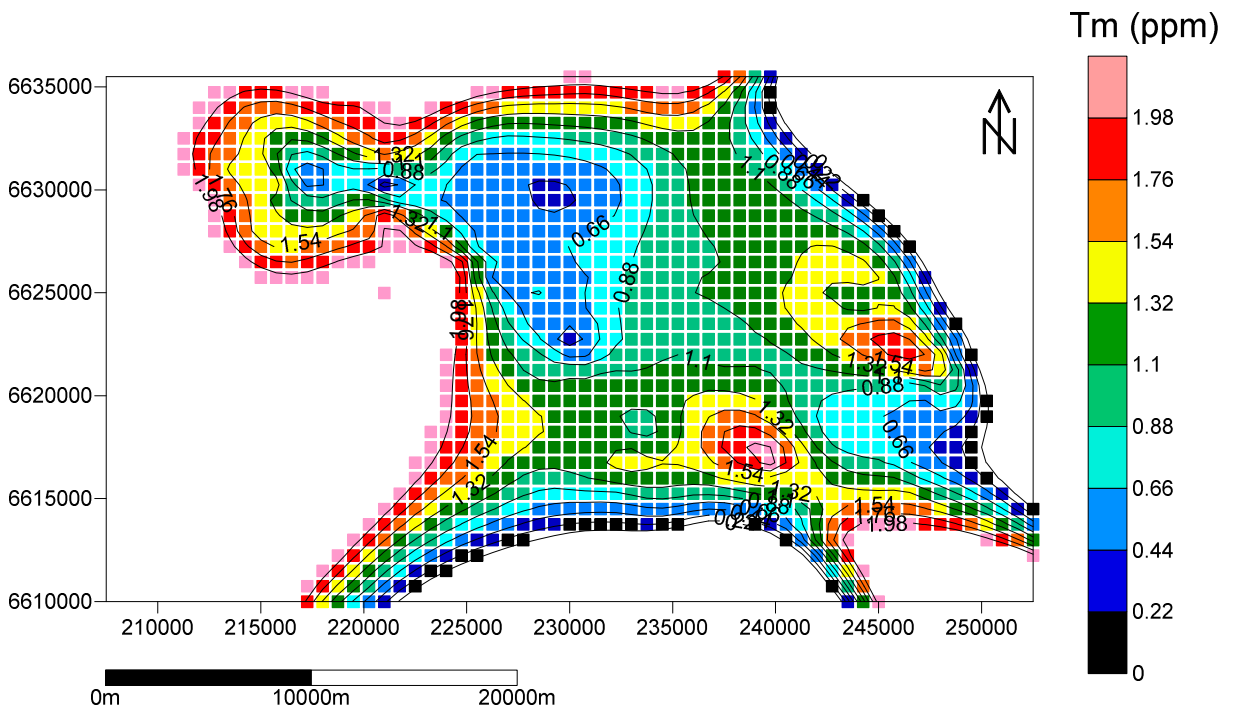
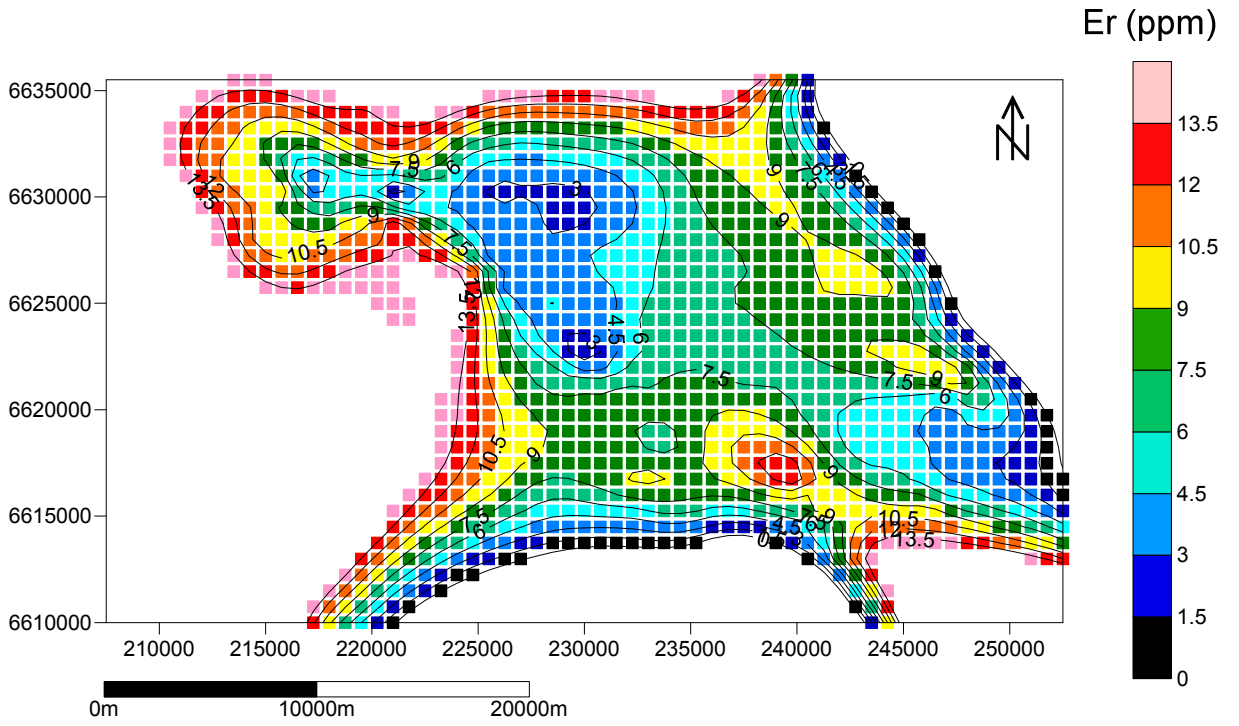
Eu (ppm)

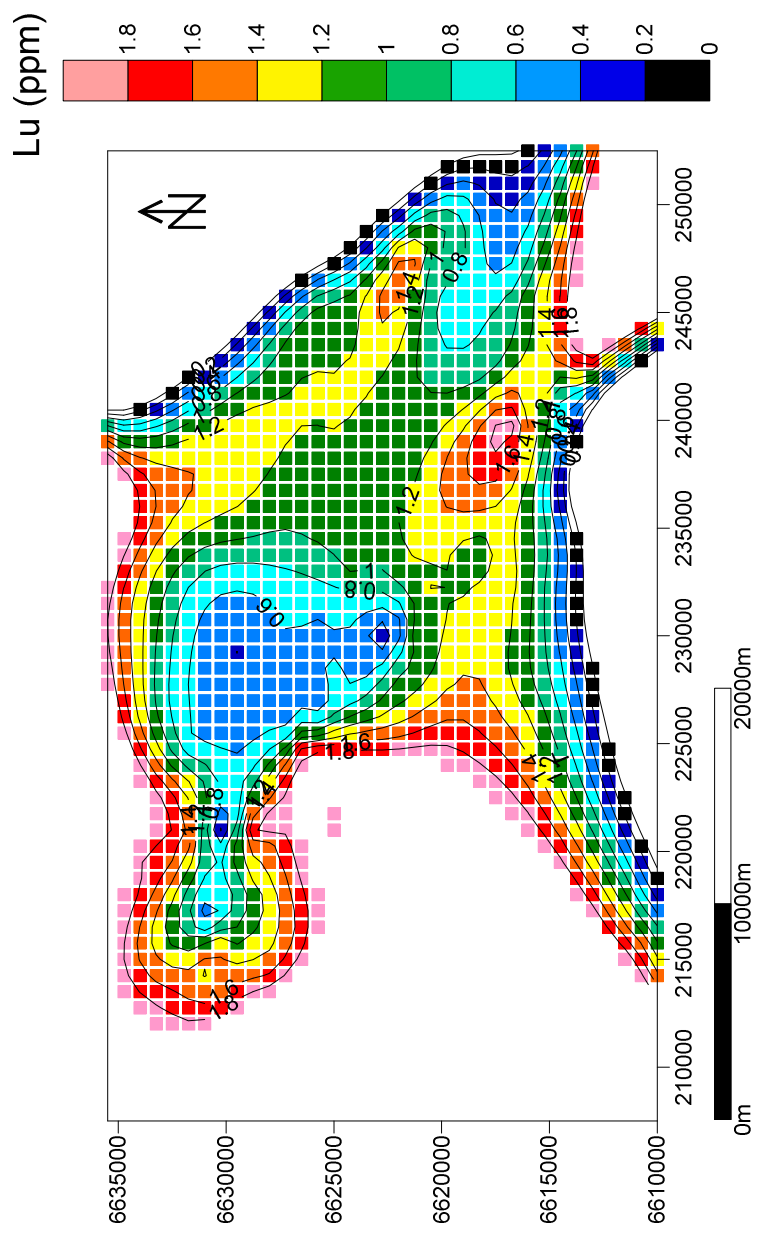
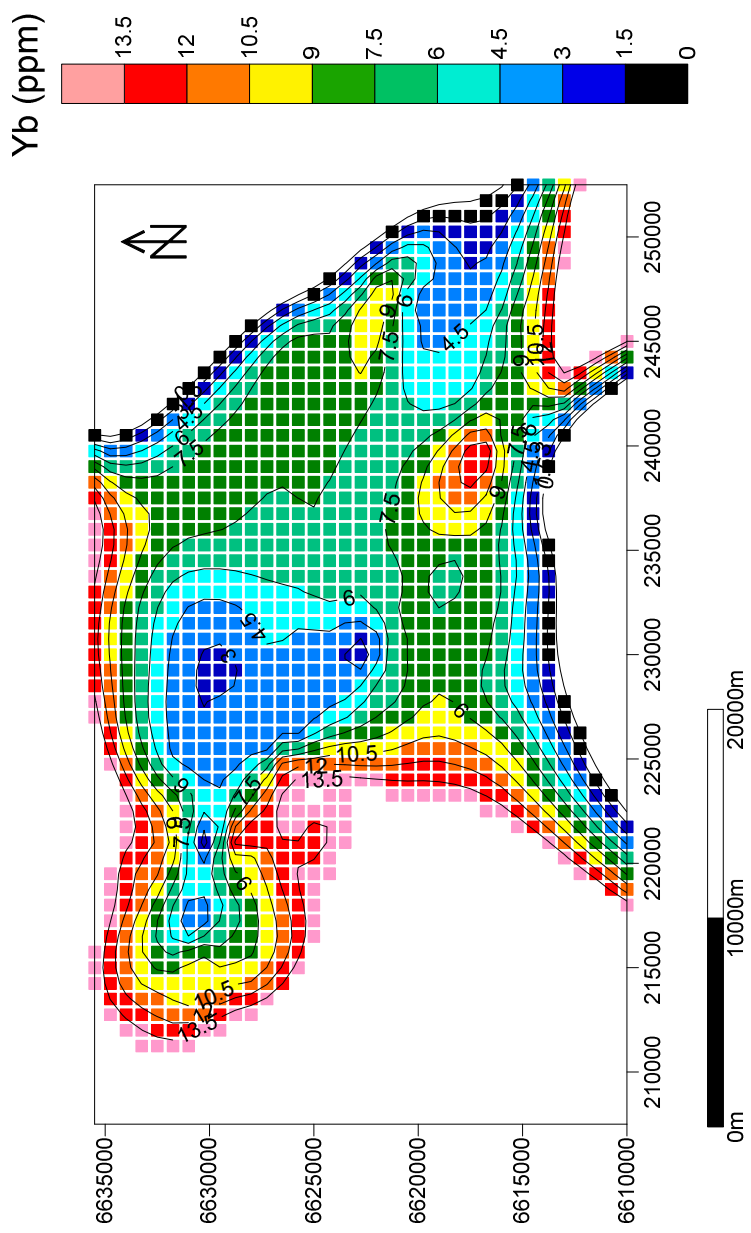




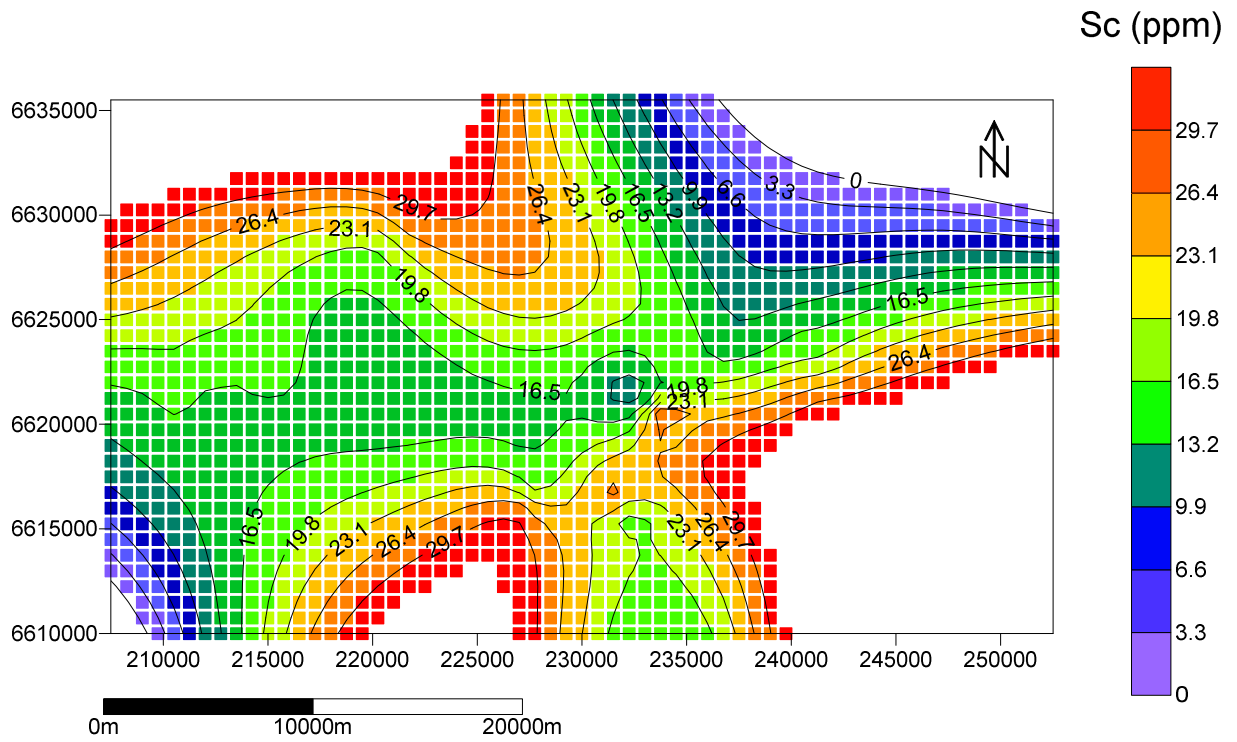
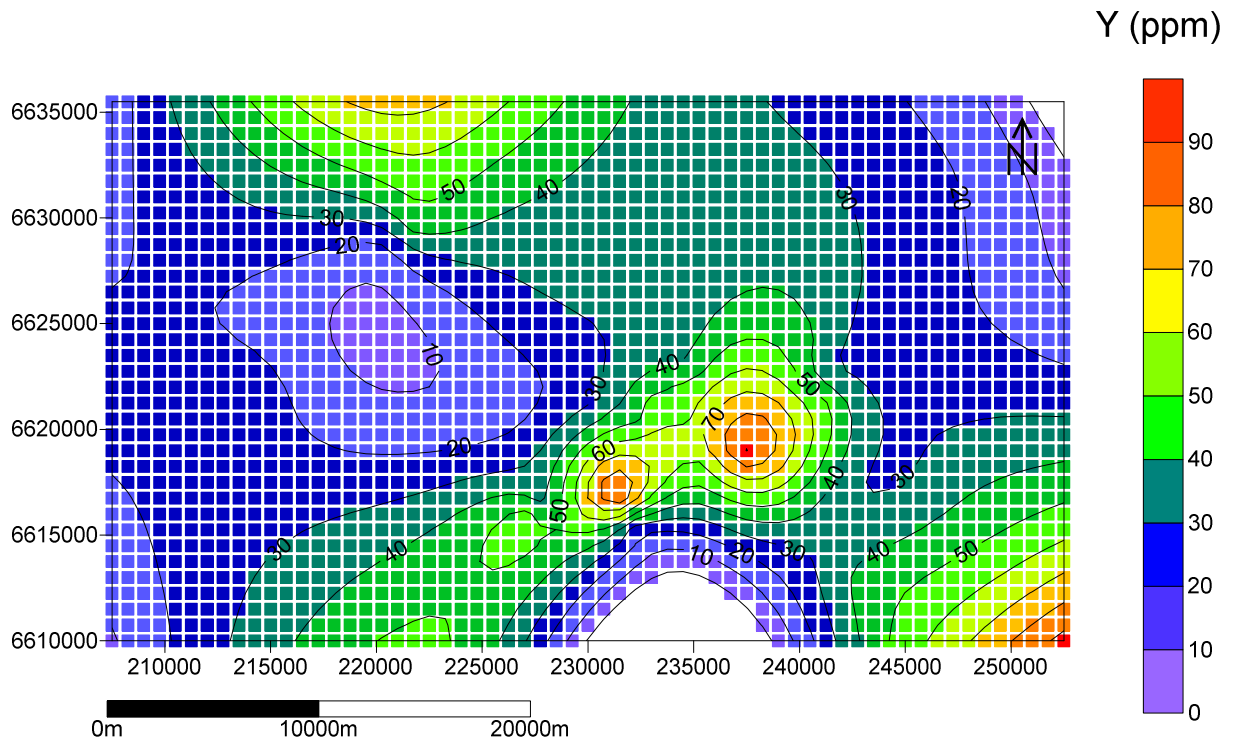


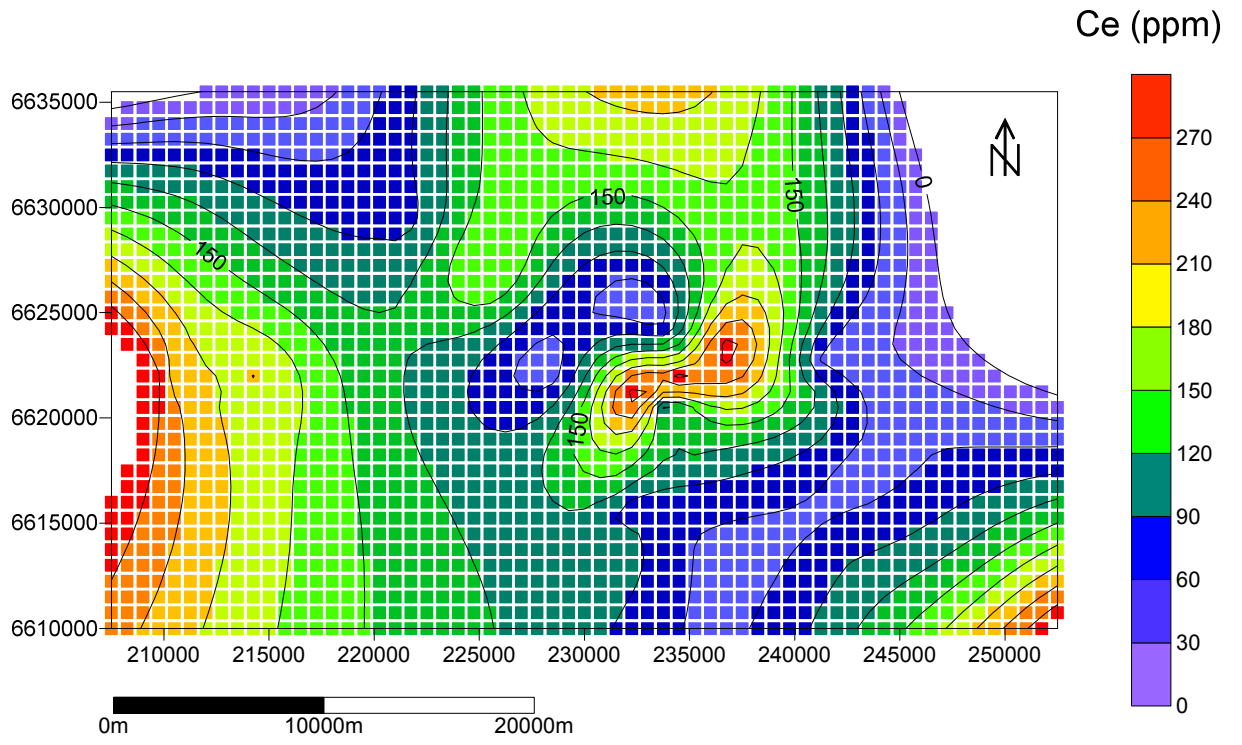
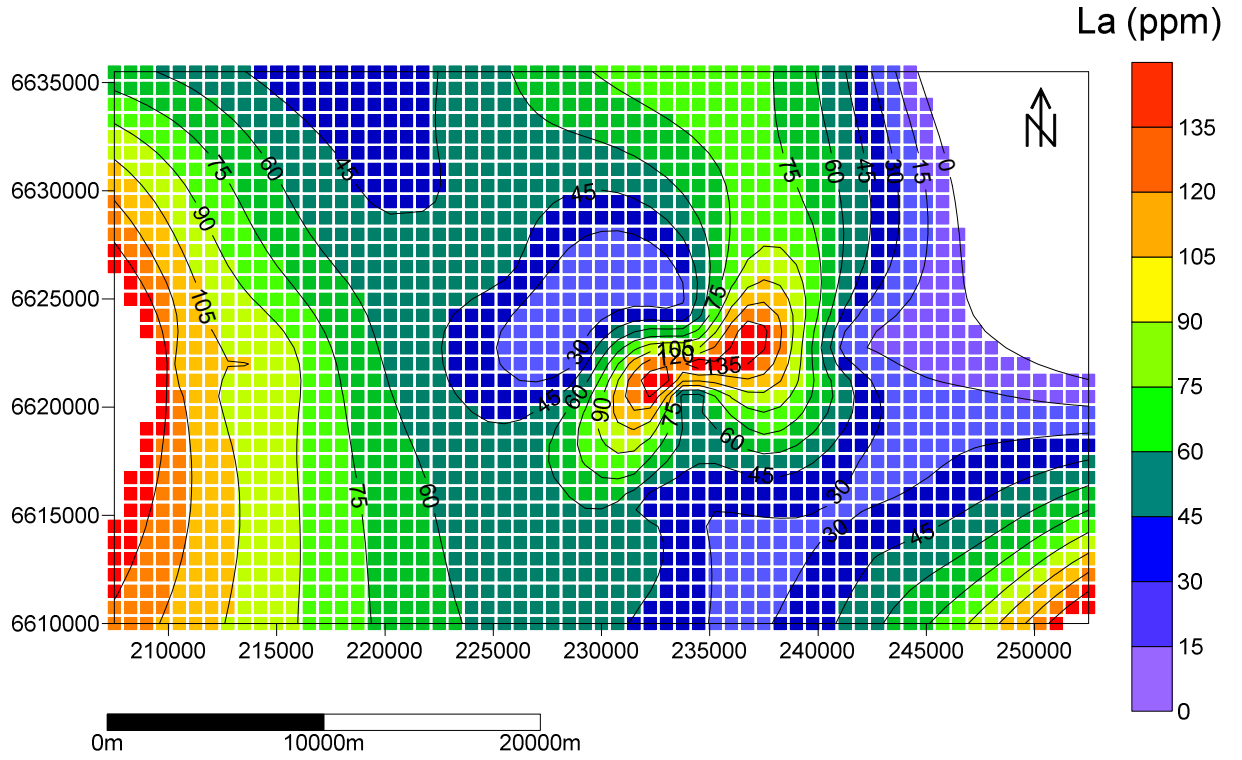


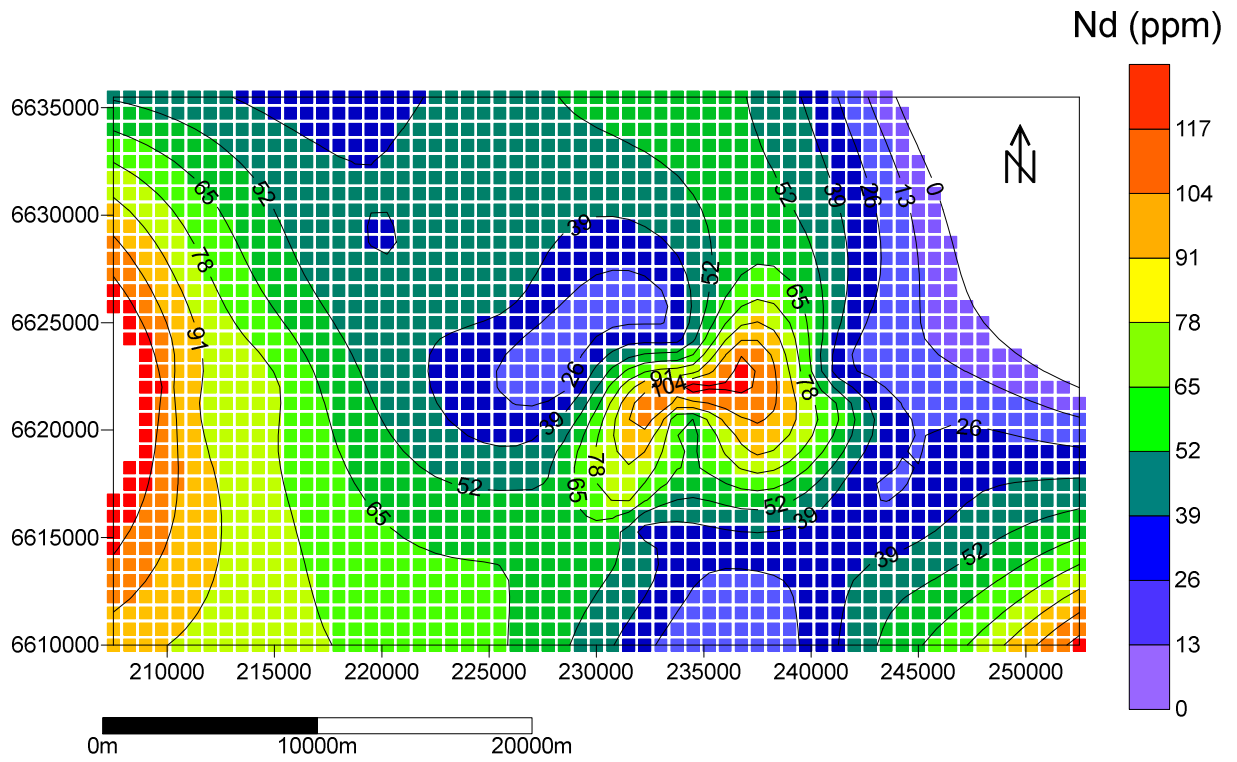
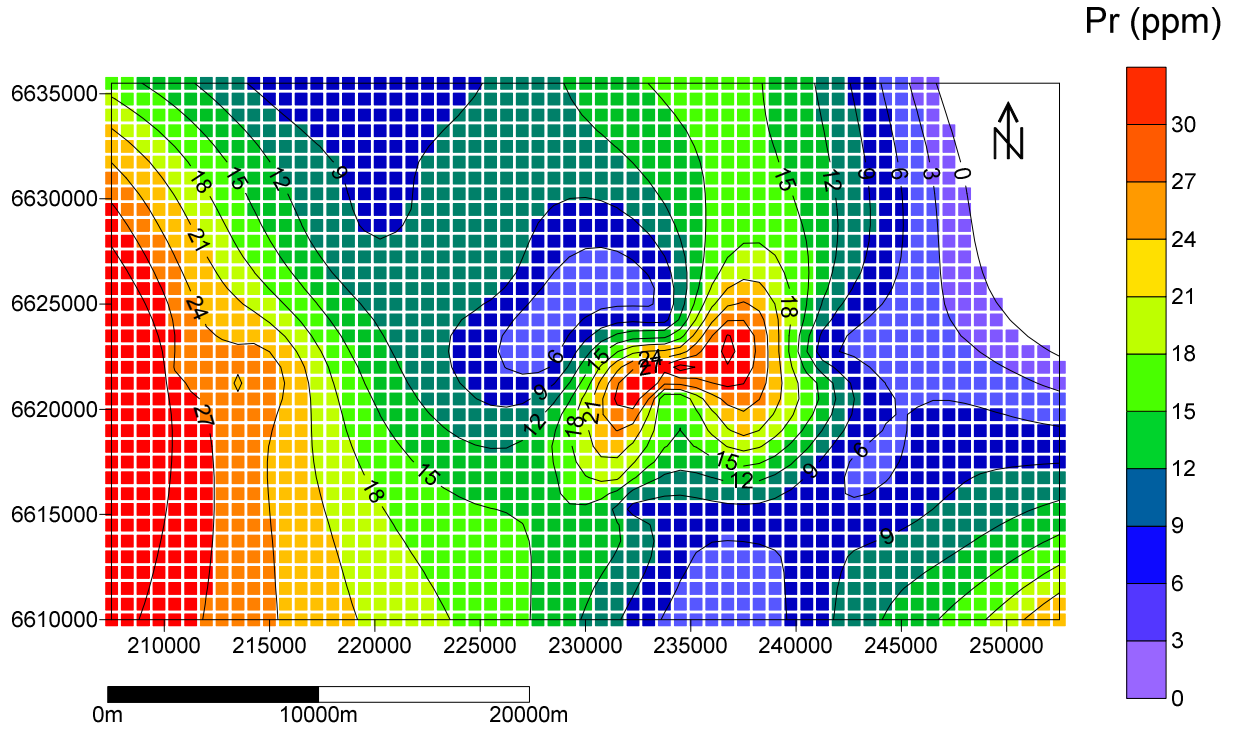




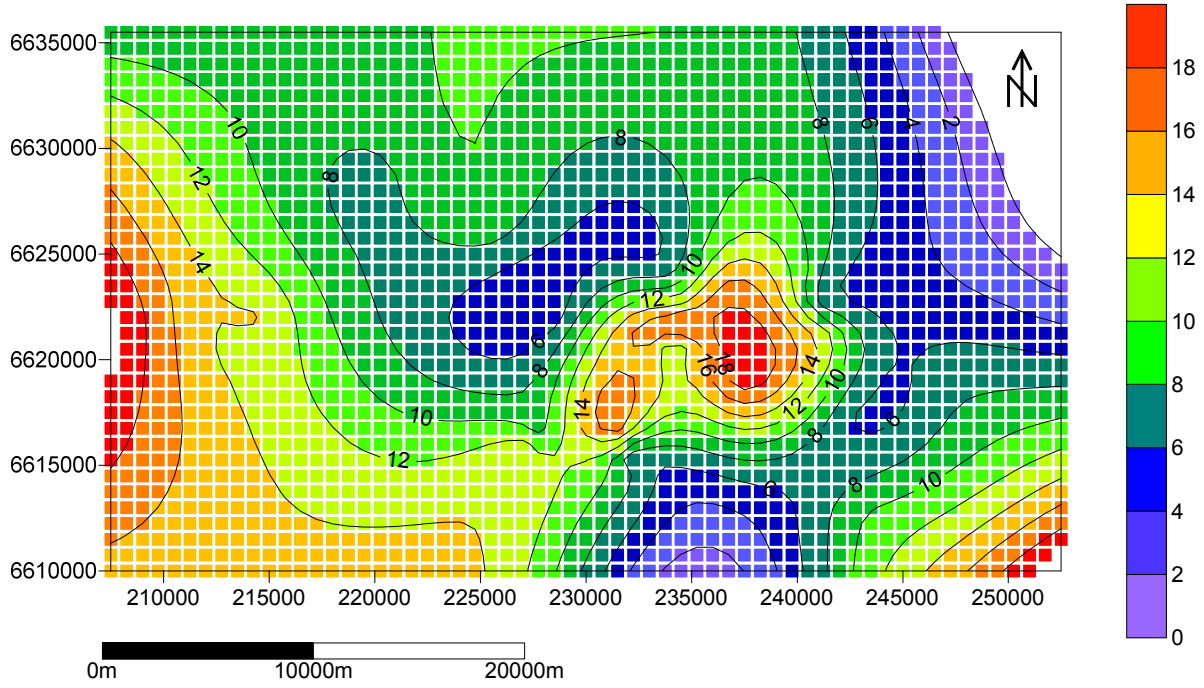
**Anexo 5:** Modelos de blocos para os 16 elementos do domínio das rochas intermediárias e básicas da Formação Acampamento Velho.



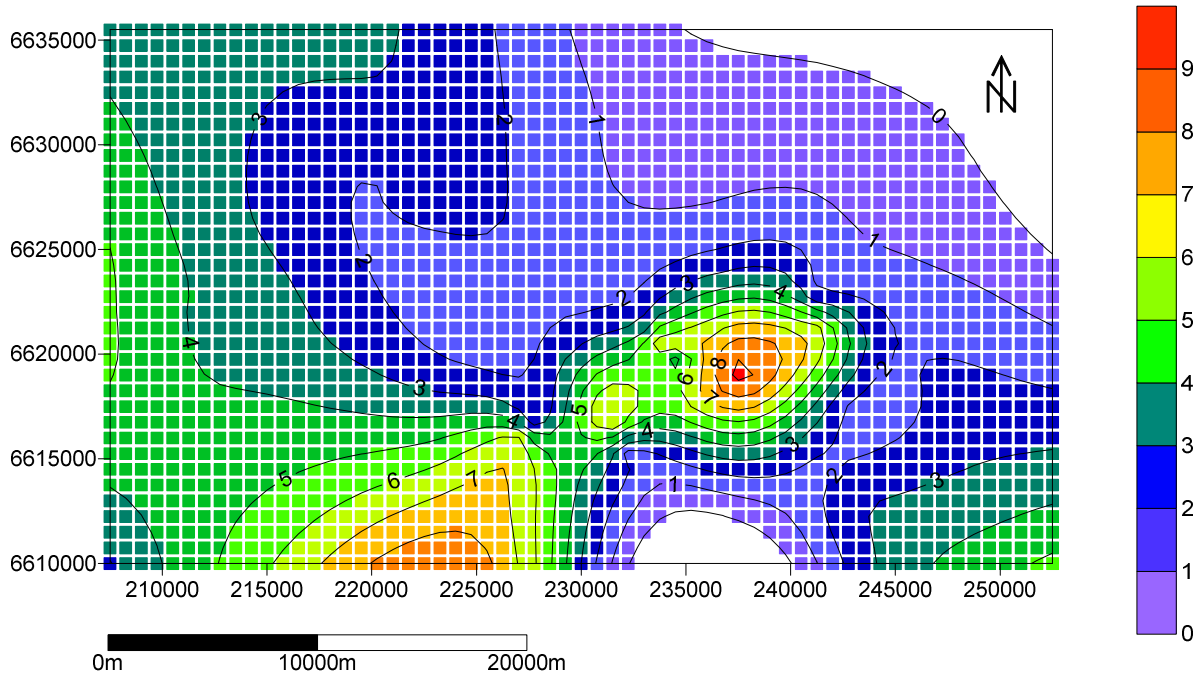




Sm (ppm)

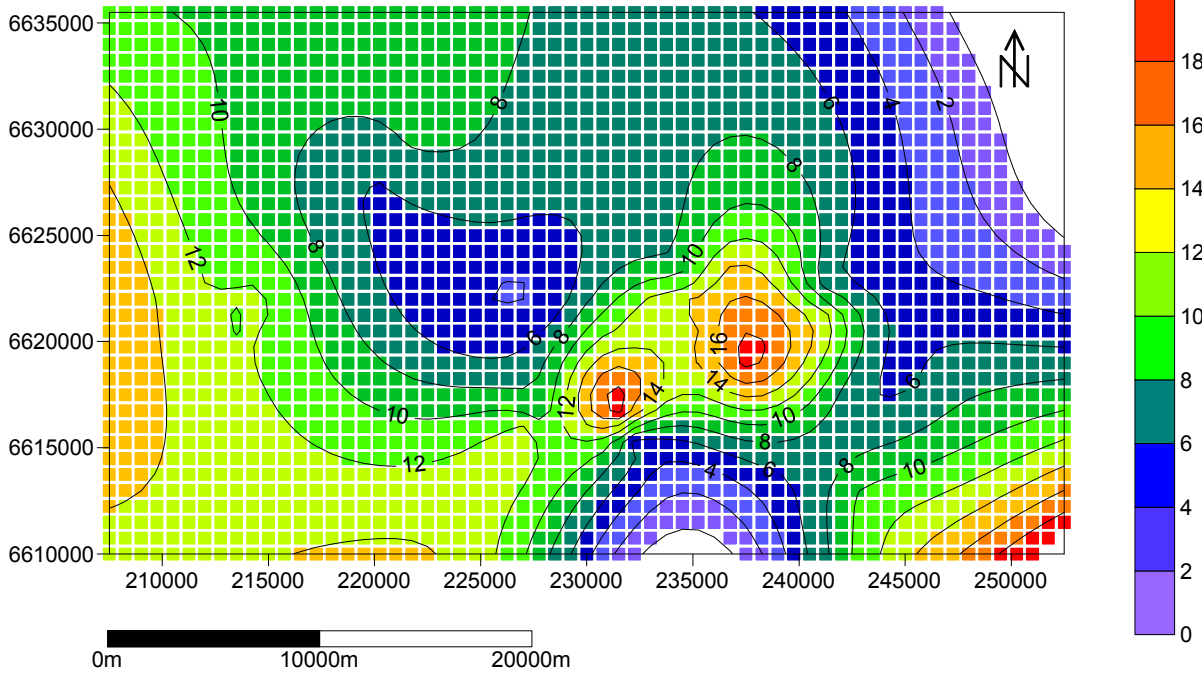


Eu (ppm)

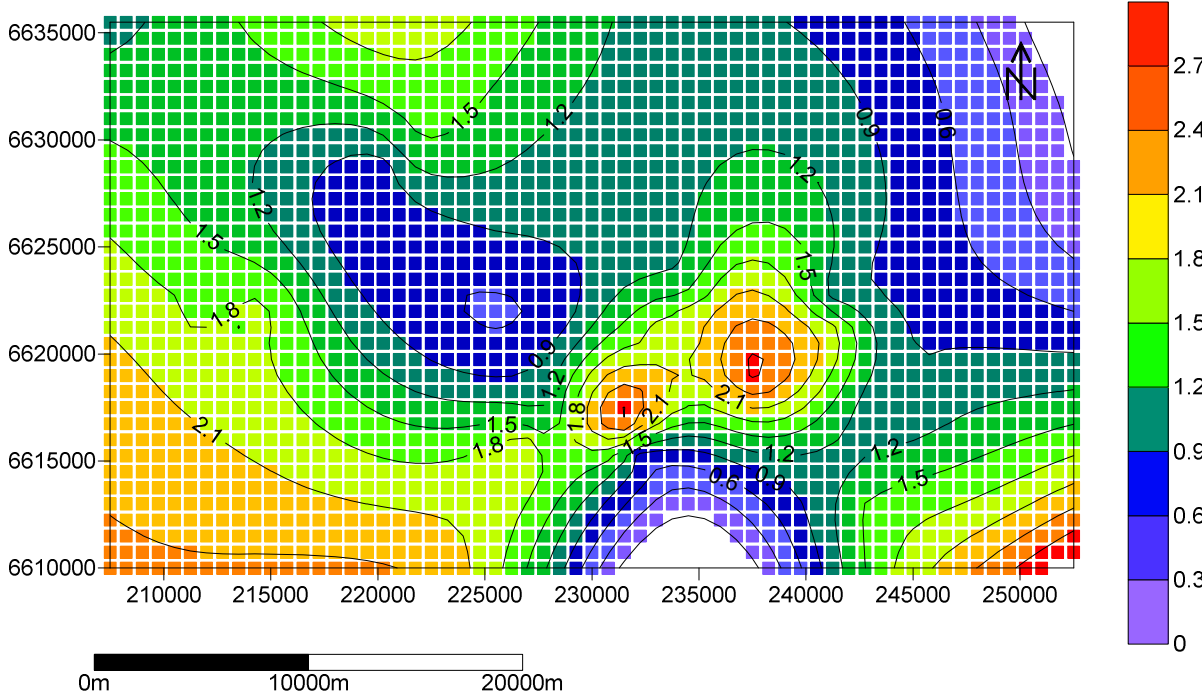




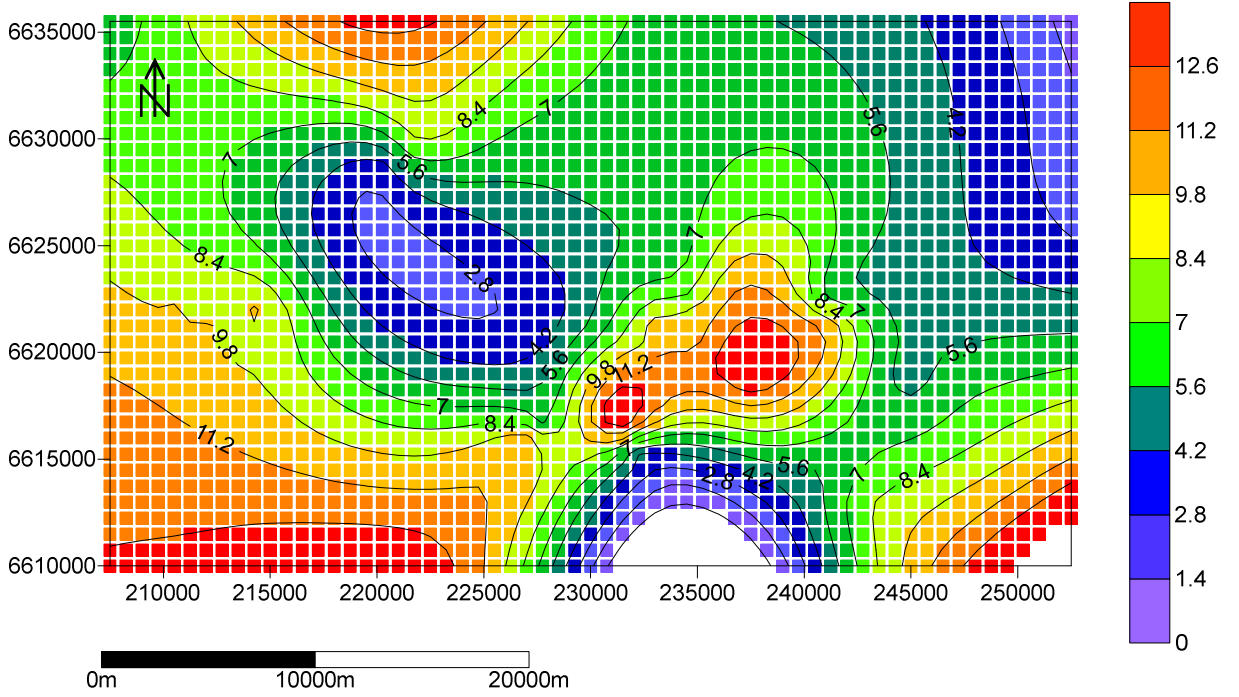
Gd (ppm)



Tb (ppm)



Dy (ppm)



Ho (ppm)

