

Capítulo 3

ESTUDO DE CASO

O trabalho foi realizado a partir das informações geológicas e amostrais fornecidas pelo grupo Pirineus relativas um empreendimento de calcário operado pelo grupo, situado no município de Indiara, estado de Goiás. Neste capítulo serão abordados primeiramente os detalhes da localização da área de estudo, as características do empreendimento e aspectos geológicos e de gênese dos calcários da região. Em seguida, será apresentado o perfil das informações amostrais disponibilizadas pela empresa.

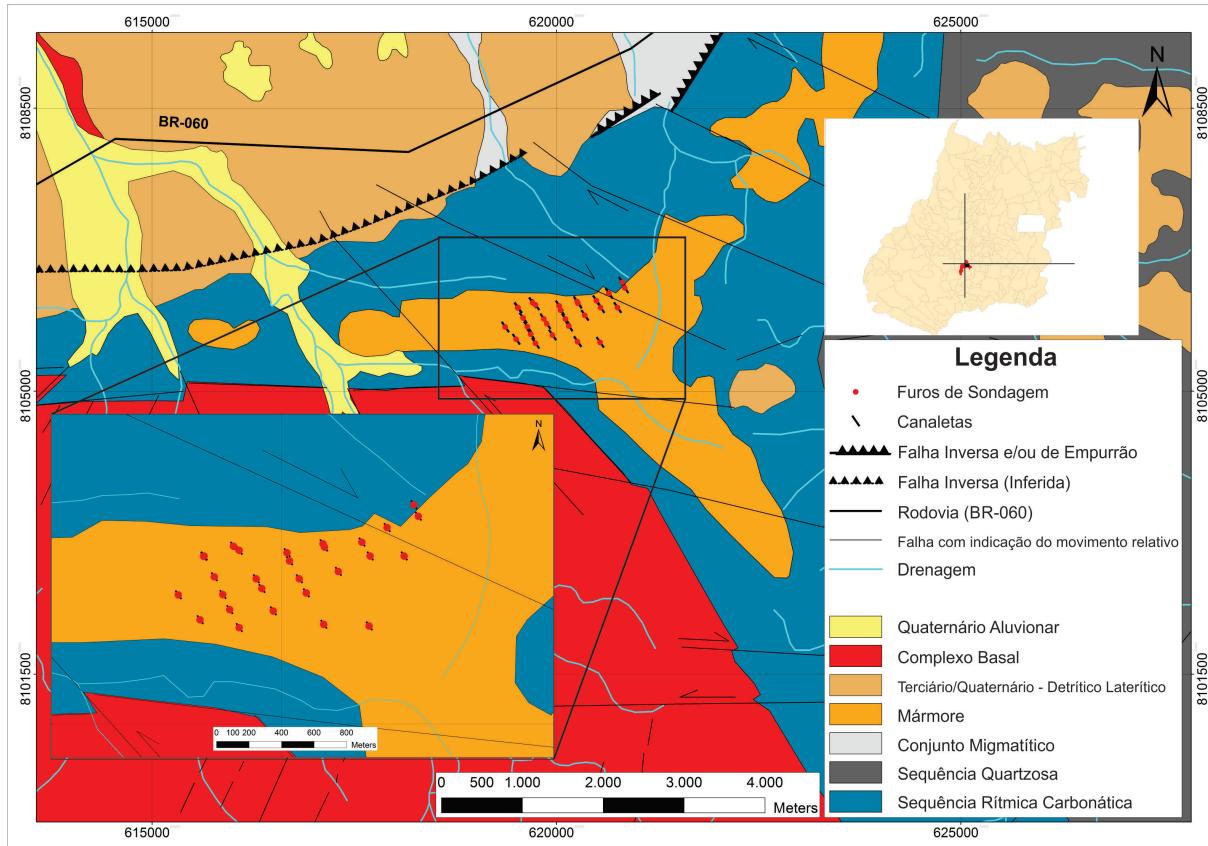
3.1 Características do Local e Aspectos Geológicos

O local de estudo está situado a 15 km do município de Indiara, Goiás, nas margens da BR-060 sentido Goiânia. As amostras coletadas em campo estão posicionadas na Mina Francisco Pereira, localizada aproximadamente nas coordenadas 17°7'45.87"S e 49°52'13.85"O (Figura 3.1). O Grupo Pirineus possui, no empreendimento, instalações administrativas, de processamento mineral e de armazenamento, e três minas em operação, estas lavradas a céu aberto, pelo método de lavra em cava. A Calcário Ouro Branco, uma das empresas do grupo, possui infraestrutura para produção de calcário agrícola, enquanto a Fillercal possui linha de fibrocimento, ração animal, textura, finos e superfinos, os dois últimos para tintas. A lavra se dá predominantemente na Mina Francisco Pereira, área de estudo deste trabalho.

O local de estudo, de acordo com a Figura 3.1, pertence à Sequência Anicuns-Itaberaí. Estudos realizados por [Laux *et al.* \(2010\)](#), [Barbosa \(1987 apud LAUX, 2004\)](#), [Pimentel *et al.* \(2000 apud LAUX, 2004\)](#), [Laux, Pimentel e Dantas \(2001 apud LAUX, 2004\)](#), [Laux *et al.* \(2002 apud LAUX, 2004\)](#), [Hasui \(2012\)](#), [Navarro *et al.* \(2015\)](#), e [Borges *et al.* \(1999\)](#) indicam que a Sequência Anicuns-Itaberaí (890 a 830 Ma) é uma sequência metavulcanossedimentar, neoproterozóica, pertencente ao Arco Magmático de Goiás. Esta sequência está exposta ao longo do contato entre a parte oriental do Arco Magmático de Goiás e o terreno de alto grau de Anápolis-Itauçu, e é representada predominantemente por anfibolitos e metapelitos, com subordinações de formações ferríferas, cherts, mármore, e rochas ultramáficas.

Ocorrem ainda na unidade lentes de calcário e mármore com intercalações de xistos.

Figura 3.1 – Localização da área de estudo e posicionamento das amostras coletadas. Pontos vermelhos representam o início dos furos de sondagem e os traços pretos o início das canaletas.



Fonte: Modificado de (ARAÚJO *et al.*, 1980 apud FUMES, 2014)

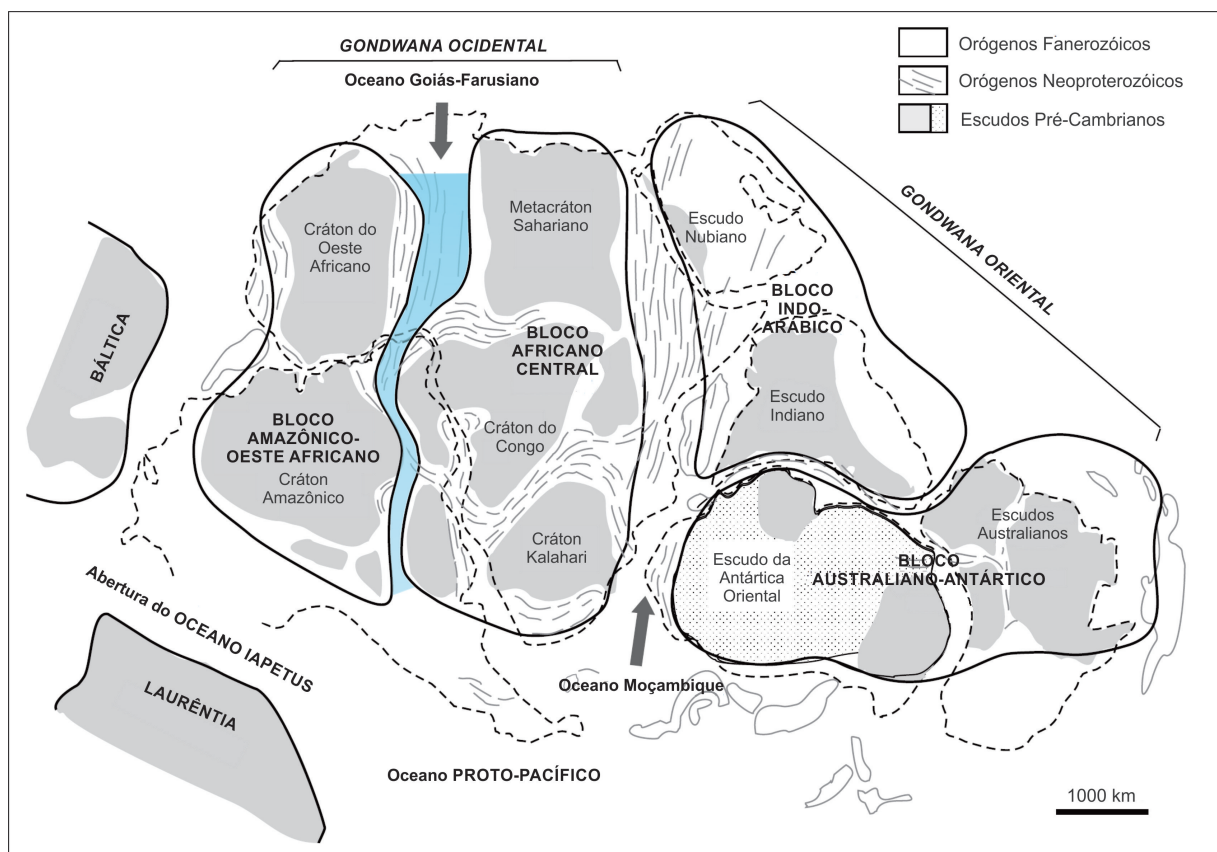
O Arco Magmático de Goiás abrange seqüências vulcanossedimentares associadas a tonalitos cálcicos a cálcico-alcálicos/gnaisses granodioríticos, expostas em duas seções separadas pelo terreno arqueano do Maciço de Goiás. A parte sul é conhecida como Arco Arenópolis, e a parte norte, como Arco Mara Rosa, ambas primeiramente evoluídas como arcos de ilhas intraoceânicos (LAUX, 2004) (PIMENTEL *et al.*, 2000 apud LAUX *et al.*, 2005).

Estudos indicam a formação do arco associada à subducção de litosfera oceânica relacionado ao fechamento do oceano Goiás-Farusiano. De acordo com Cordani *et al.* (2013), o fechamento deste oceano teve início em torno de 900 Ma, e foi concluído em aproximadamente 300 Ma após os eventos iniciais, em decorrência de uma série de colisões continentais. Estas resultaram na formação de vários arcos de ilhas intraoceânicos durante o processo, cujo maior evento de metamorfismo se deu em cerca de 630 Ma, associados ao fechamento final do oceano (PIMENTEL, 2016). Os cinturões orogênicos criados durante esse processo estão alinhados ao longo de um corredor tectônico, dominado por uma extensa zona de cisalhamento (CORDANI *et al.*, 2013).

Após os eventos de fechamento do oceano e espessamento crustal, algumas áreas foram invadidas (intrudidas) por magmas máficos, os quais, a partir de reações com as rochas crustais, promoveram a geração de grandes volumes de granitos pós-orogênicos cálcico-alcalinos ricos em potássio (PIMENTEL *et al.*, 2000).

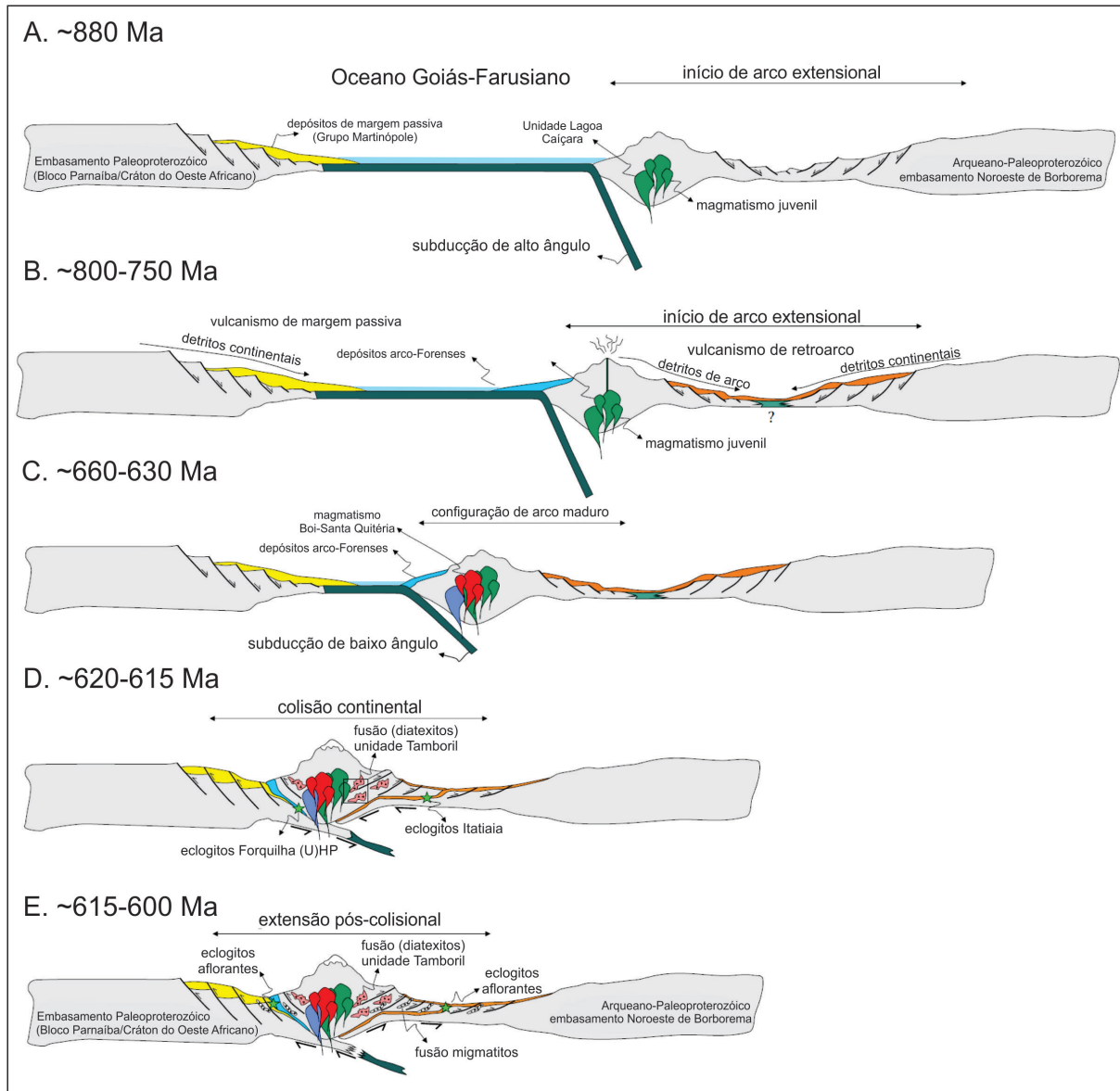
Os calcários da região de Indiara tiveram sua gênese, portanto, durante a evolução da sedimentação de carbonatos neste grande oceano denominado Goiás-Farusiano, que fez parte do processo de formação do grande continente Gondwana (Figura 3.2). O oceano (CORDANI *et al.*, 2013) ocupou uma grande área e incluiu muitos arcos magmáticos intra-oceânicos, cuja evolução tectônica começou a cerca de 900 Ma. Aproximadamente 300 Ma mais tarde, houve o fechamento do oceano devido a sucessivas colisões continentais que resultaram na união do Cráton do Oeste Africano com o Metacráton Sahariano (ABDELSALAM; LIÉGEOIS; STERN, 2002) no norte, e do Cráton Amazônico com o do São Francisco, no sul, este previamente unido ao Cráton do Congo. Uma seção Oeste-Leste (Figura xx) do continente Gondwana mostra como foi a evolução dos processos geológicos (ARAÚJO *et al.*, 2014) relativos, tanto ao fechamento do oceano Goiás-Farusiano quanto ao processo de amalgamação de vários crátons, provocados pelos sucessivos choques continentais.

Figura 3.2 – Construção dos blocos crustais que atuaram no processo de amalgamação do continente Gondwana, após o fechamento dos oceanos Goiás-Farusiano e Moçambique.



Fonte: Adaptado de (CORDANI *et al.*, 2013)

Figura 3.3 – Esquema representativo do processo de fechamento do oceano Goiás-Farusiano.



Fonte: Adaptado de (ARAÚJO *et al.*, 2014)

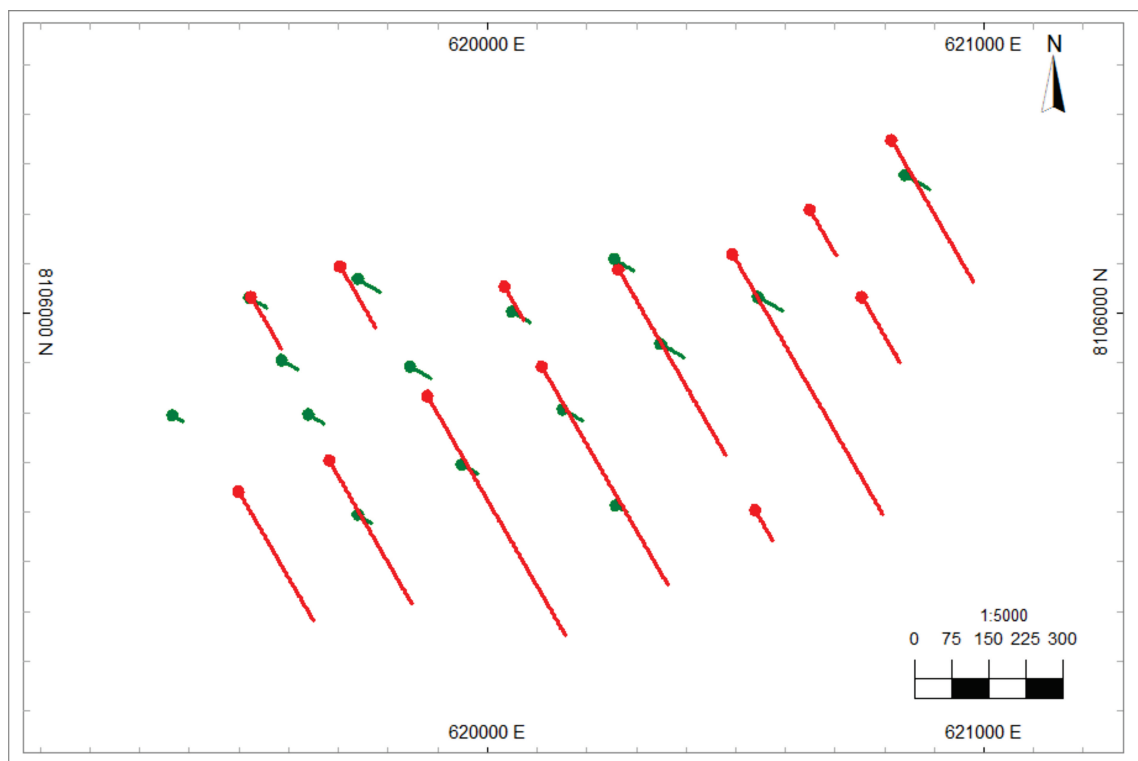
3.2 Caracterização da Base de Dados

As informações amostrais utilizadas para este trabalho, fornecidas pela empresa, são constituídas de um total de 455 amostras, obtidas a partir de 15 furos de sondagem rotativa diamantada (330 amostras) e 13 trincheiras/canaletas (125 amostras). A localização e a orientação dos furos de sondagem e das canaletas estão expostos na Figura 3.4, onde os círculos representam as coordenadas de início dos furos de sondagem e das canaletas. Além dessas informações foi também fornecida a descrição geológica das amostras retiradas nos furos de sondagem rotativa.

Os furos de sondagem rotativa estão orientados para o azimute de 120° (direção SE), com inclinação de 60° em relação à horizontal, com comprimento total médio de 83,52 metros. O furo com maior comprimento total é o OBF-05 (112,75 m), e o com menor comprimento, o OBF-15 (50,17 m). As amostras furos de sondagem, de maneira geral, possuem um comprimento médio de 3,8 metros, com um valor mínimo de 0,14 metros e máximo de 9,7 metros.

No caso das trincheiras/canaletas, estas estão orientadas para o azimute de 150° (direção SE), com uma inclinação média de $5,03^\circ$, sendo a mínima de $0,02^\circ$ e a máxima, $11,94^\circ$. O comprimento total médio das canaletas é de 290,07 metros, com valor mínimo de 71,16 metros (P_05B) e máximo de 607,89 metros (P_06). As amostras obtidas a partir das canaletas possuem um comprimento médio de 30,17 metros, com comprimento mínimo de 5 metros e máximo de 95,54 metros.

Figura 3.4 – Mapa em planta mostrando a localização dos dos furos de sondagem e das canaletas com linhas verdes representando furos de sondagem e linhas vermelhas as canaletas.



Fonte: O autor (2017)

Os resultados analíticos fornecidos são derivados de análises químicas por fluorescência de raios-X dos óxidos CaO e MgO. Além disso, foram fornecidos também os valores do Potencial Neutralizador (PN) de cada amostra.

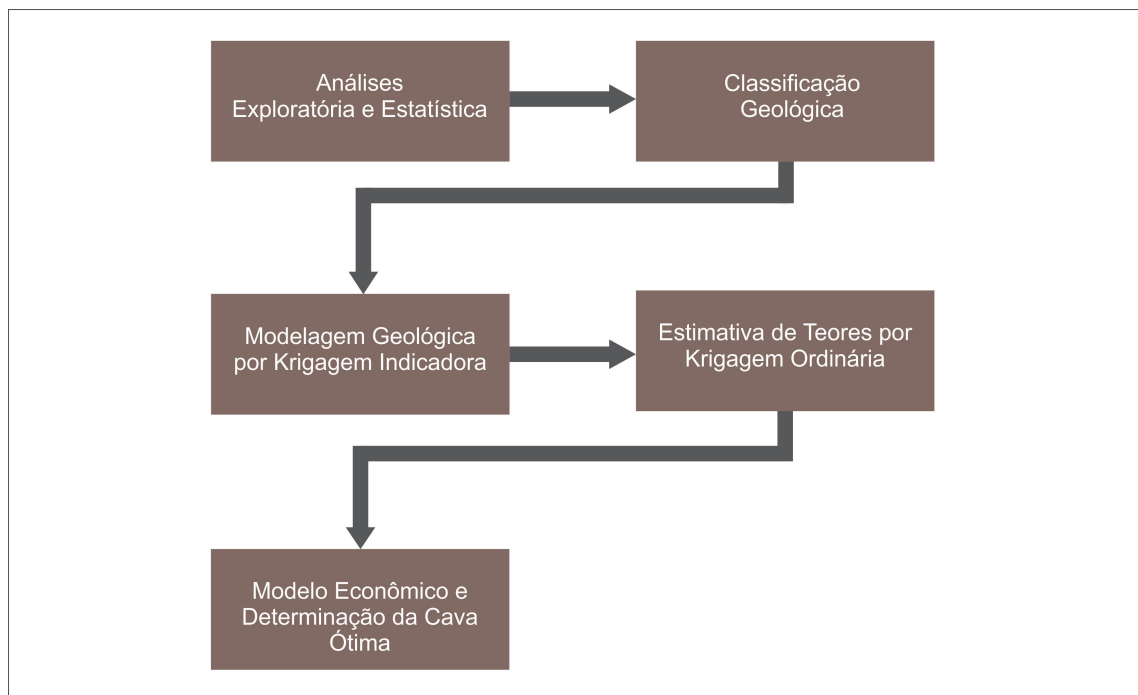
Capítulo 4

METODOLOGIA

Neste capítulo serão descritos, de forma sequencial, os procedimentos e critérios adotados para se efetuar este trabalho. Alguns resultados e/ou discussões se encontram já descritos neste capítulo em virtude de sua importância para a compreensão dos procedimentos realizados. Os demais resultados se encontram descritos no capítulo seguinte - Resultados e Discussão.

O trabalho foi realizado por meio de uma série de etapas consecutivas e interdependentes entre si, iniciando-se com uma análise exploratória preliminar das informações geológicas e químicas fornecidas pela empresa, e finalizando com o estabelecimento da superfície de extração ótima (cava ótima) do empreendimento (Figura 4.1).

Figura 4.1 – Fluxograma das etapas executadas.



Fonte: O autor (2017)

4.1 Análise Exploratória dos Dados

As informações amostrais concedidas são derivadas de dois tipos de amostragens: furos de sondagem rotativa e canaletas. Apesar da diferença entre os suportes, ou tamanhos das amostras, dos dois tipos, optou-se por utilizar ambas amostragens visando uma melhora quantitativa da informação. Sendo assim, a partir das informações químicas e geológicas (descrição dos furos de sondagem) foi feita primeiramente uma análise preliminar dos dados com o objetivo de identificar erros grosseiros, atribuídos à incompatibilidades entre a descrição geológica informada e os respectivos teores dos óxidos de cálcio (CaO) e de magnésio (MgO), resultantes da análise química por fluorescência de raios-X.

Em tal análise preliminar foram identificadas incoerências entre a descrição geológica e os teores dos óxidos. Tais diferenças estiveram mais pronunciadas no furo “OBF-08”, no qual as incompatibilidades estiveram associadas à não correspondência entre determinados intervalos geologicamente descritos e os analisados quimicamente, ou seja, alguns intervalos “*from*” e “*to*” das análises químicas não coincidiram com intervalos “*from*” e “*to*” das descrições geológicas. Nestes casos de incompatibilidades, optou-se por tomar como verdadeiras as informações fornecidas pela análise química, pelo fato desta, naturalmente, envolver procedimentos cuidadosamente controlados, os quais forneceriam resultados mais confiáveis em relação ao procedimento de descrição visual das amostras.

Na ocasião da análise preliminar da base de dados, observou-se a ocorrência de amostras cuja descrição geológica informava a presença de calcário intercalado por rochas não carbonáticas (vulcânicas e/ou metavulcânicas). As respectivas análises químicas apresentaram teores de CaO entre 15% e 31%, evidenciando a diluição do teor de CaO do calcário pela presença de outra unidade litológica nessas amostras.

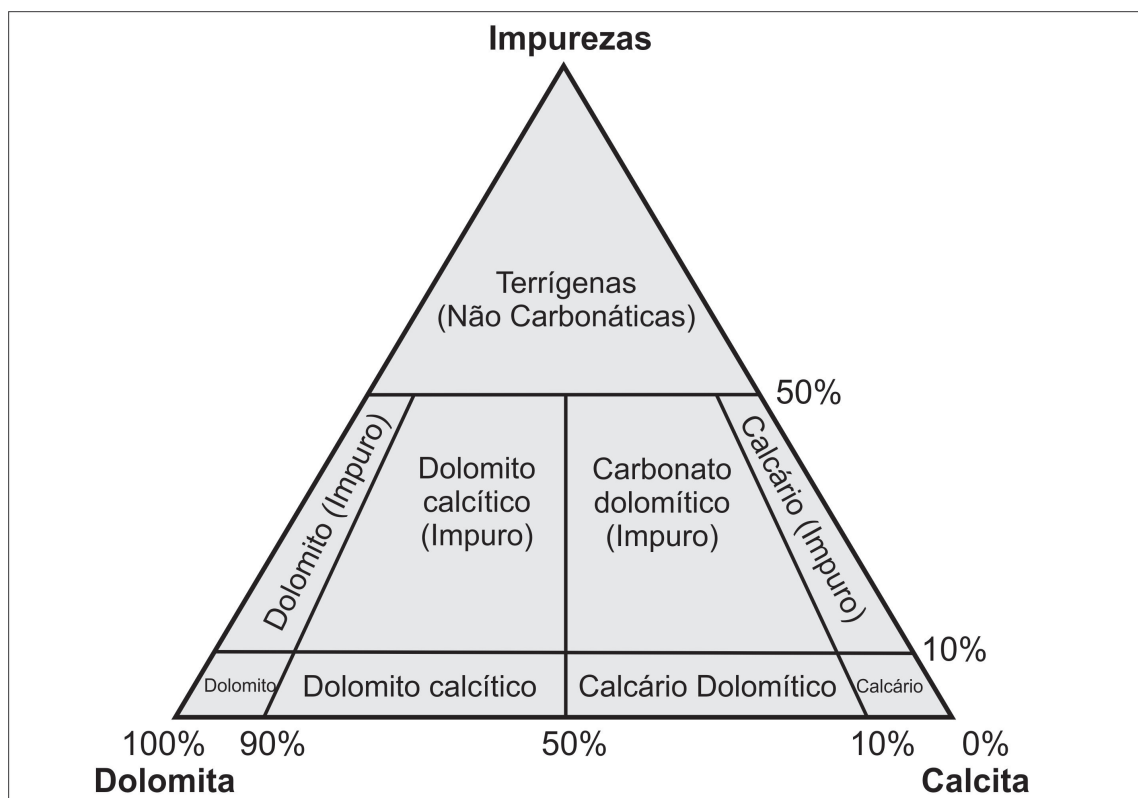
Considerando as observações realizadas durante a análise conjunta dos dados químicos e das respectivas descrições geológicas, e tomando conhecimento da escassez de amostras para os devidos estudos, optou-se pela não retirada de amostras do banco de dados, o que poderia gerar uma escassez ainda maior de informações. Isto se justifica pelo fato de que, embora não haja correspondências entre alguns intervalos amostrais descritos e analisados quimicamente, a análise química apresenta uma precisão maior em relação à descrição visual, uma vez que algumas imprecisões da análise química podem ser atribuídas basicamente à calibração do instrumento de medição. Portanto, todos os procedimentos e critérios adotados estiveram associados basicamente aos parâmetros químicos, utilizando-se das descrições geológicas como parâmetros auxiliares onde não se tinha ocorrência de divergências entre os mesmos.

4.2 Classificação dos Domínios Geológicos

Após a etapa de análise preliminar, procedeu-se com a classificação dos domínios litológicos. Para tal, usou-se como orientação, a classificação de rochas calcárias proposta por Machado (2016), e os parâmetros de classificação das rochas calcárias adotados pela empresa para seus produtos (calcário calcítico, calcário magnesiano e calcário dolomítico), sendo estes essencialmente químicos.

A classificação de rochas calcárias proposta por Machado (2016) determina regiões de ocorrência para cada classe/rocha em um diagrama ternário, cujos vértices do triângulo são teores, em porcentagem, de calcita (CaCO_3), dolomita ($(\text{Ca, Mg})(\text{CO}_3)_2$) e impurezas (Figura 4.2). Observa-se na Figura 4.2, pelos campos de ocorrência das classes/rochas e suas respectivas denominações, que as rochas dotadas de um teor de impurezas maior que 50% não são consideradas rochas carbonáticas, ao contrário das demais, com teor de impurezas menor ou igual a 50%, as quais são classificadas em diversos tipos de acordo com as proporções de calcita e dolomita.

Figura 4.2 – Diagrama ternário de classificação composicional de rochas calcárias.



Fonte: Modificado de (MACHADO, 2016)

De acordo com o diagrama ternário da Figura 4.2 nota-se que a classificação dos calcários é feita a partir de informações dos minerais calcita e dolomita, e não dos teores dos seus respectivos óxidos (CaO e MgO). As informações analíticas (análise química), forneci-

das pela empresa, estão restritas somente aos óxidos de cálcio (CaO) e de magnésio (MgO). A conversão da porcentagem de óxidos para porcentagem de minerais é feita por meio de cálculo de fórmula mineral, utilizando-se das informações dos óxidos, das fórmulas químicas dos minerais, e seguindo-se uma série de procedimentos. Entretanto, para tal, seriam necessárias informações de óxidos adicionais (SiO₂, Fe₂O₃, Al₂O₃, etc), já que os minerais, com exceção calcita e dolomita, não são constituídos apenas de cálcio e/ou magnésio, além do oxigênio e/ou carbono. Portanto, como se dispunha somente dos teores de CaO e de MgO, o cálculo dos teores de calcita e dolomita foi realizado a partir de aproximações, considerando, neste caso, que todo o cálcio constituiria a calcita, e todo o magnésio, a dolomita.

O cálculo da porcentagem de calcita e dolomita, neste caso representados por CaCO₃ e MgCO₃, respectivamente, foi então realizado por meio da multiplicação entre a porcentagem do óxido - obtida pela análise química - e um fator multiplicador, este sendo a relação entre a massa molecular do mineral e a massa molecular do respectivo óxido. Os demais minerais presentes no calcário foram considerados como impurezas, as quais foram calculadas como sendo a subtração entre o total (100%) e a soma dos teores de CaCO₃ e MgCO₃. Matematicamente, os teores destes minerais (calcita e dolomita) foram obtidos através das seguintes relações:

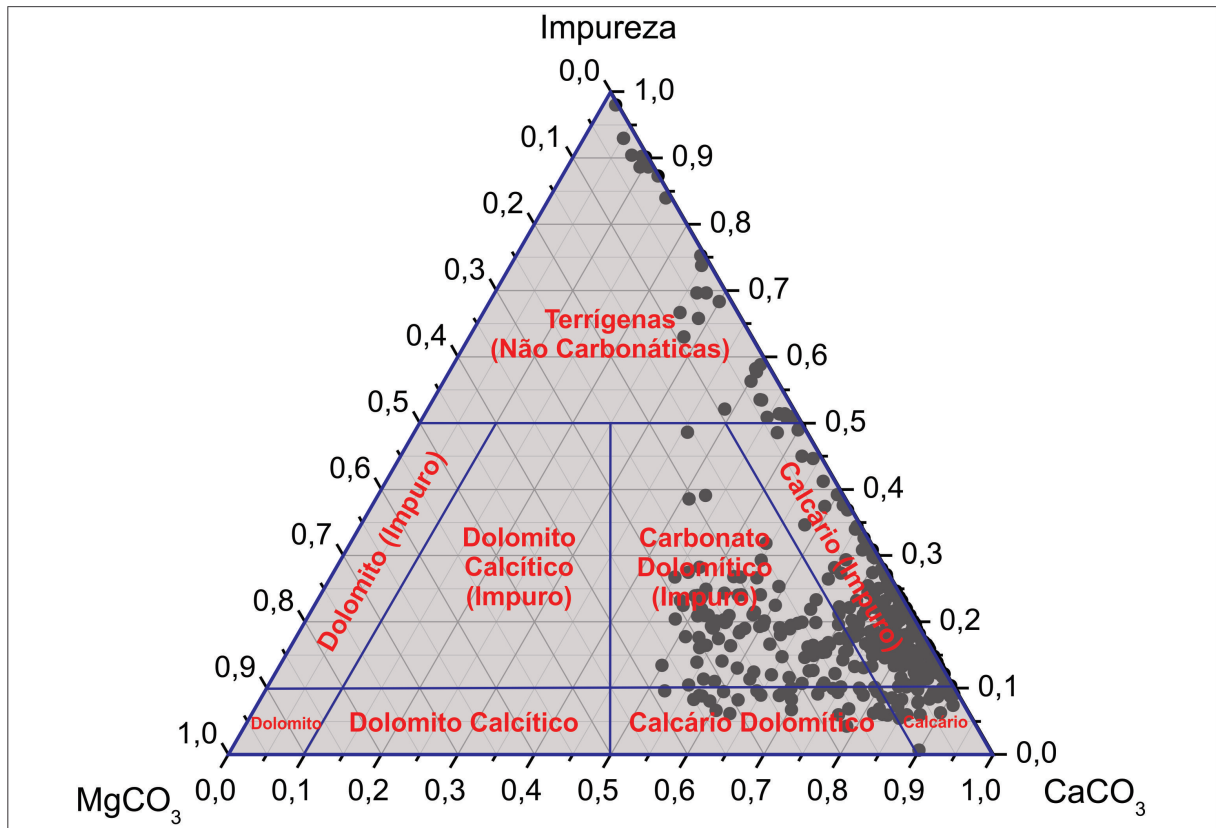
$$\text{CaCO}_3 = \text{CaO} * \text{Fator}_{\text{CaO}} = \text{CaO} * \left(\frac{100,0869 \text{ g/mol}}{56,0774 \text{ g/mol}} \right) = \text{CaO} * 1,7848 \quad (4.1)$$

$$\text{MgCO}_3 = \text{MgO} * \text{Fator}_{\text{MgO}} = \text{MgO} * \left(\frac{84,3139 \text{ g/mol}}{40,3044 \text{ g/mol}} \right) = \text{MgO} * 2,0919 \quad (4.2)$$

O procedimento realizado para a conversão de teores de óxidos em teores de minerais é uma aproximação simplista pelo fato de que há presença tanto do cálcio quanto do magnésio em outros minerais, sendo considerado, neste caso, que esses elementos estariam presentes somente na calcita e na dolomita. Além disso, as proporções de cálcio e de magnésio na própria estrutura cristalina da dolomita podem variar. Tais considerações foram realizadas pela indisponibilidade de informações referentes a outros óxidos, o que, de fato, tornaria os resultados mais exatos.

A partir das porcentagens calculadas de calcita e dolomita, representadas, neste caso, por CaCO₃ e MgCO₃ respectivamente, e da classificação proposta por Machado (2016), foi elaborado um diagrama ternário semelhante ao mostrado na Figura 4.2. Entretanto, no diagrama em questão (Figura 4.3), os vértices indicadores das porcentagens de calcita e dolomita mostram teores de CaCO₃ e MgCO₃, respectivamente. Na Figura 4.3 os pontos preenchidos se referem às amostras coletadas, localizados segundo as porcentagens de CaCO₃, MgCO₃ e impurezas, e as linhas em azul definem os limites de ocorrência de cada classe.

Figura 4.3 – Diagrama ternário contendo as posições das amostras segundo os teores de CaCO_3 , MgCO_3 e impurezas, e a posição destas em relação a cada classe/rocha.



Fonte: O autor (2017)

No diagrama ternário da Figura 4.3, observa-se uma grande concentração de amostras em sua porção direita, evidenciando uma predominância de “Calcário Impuro” e “Carbonato Dolomítico (Impuro)”. Há também uma porção moderada de amostras classificadas como “Calcário” e “Calcário Dolomítico”. Já as rochas não carbonáticas representam apenas uma pequena parte do total amostrado. Entretanto, as posições no diagrama podem ser futuramente alteradas conforme a inclusão de novas amostras, e/ou adição de novas informações químicas, uma vez que, como foi previamente comentado, o cálculo dos teores de calcita e dolomita foram realizados mediante as simplificações expostas anteriormente.

A classificação dos tipos de calcário adotada pela empresa para seus produtos é estritamente química, baseada nas porcentagens de CaO e de MgO . Desta forma, os calcários são classificados em calcítico, magnésiano e dolomítico, cujos parâmetros químicos de classificação estão expostos na Tabela 4.1. Tais parâmetros, inseridos no diagrama ternário, também resultam em áreas/regiões de ocorrência de cada tipo de calcário (Figura 4.4). Neste caso, observa-se que a maior parte das amostras seriam classificadas como calcário calcítico, e o restante, com teor de impurezas menor que 50%, como calcários magnésiano e dolomítico.

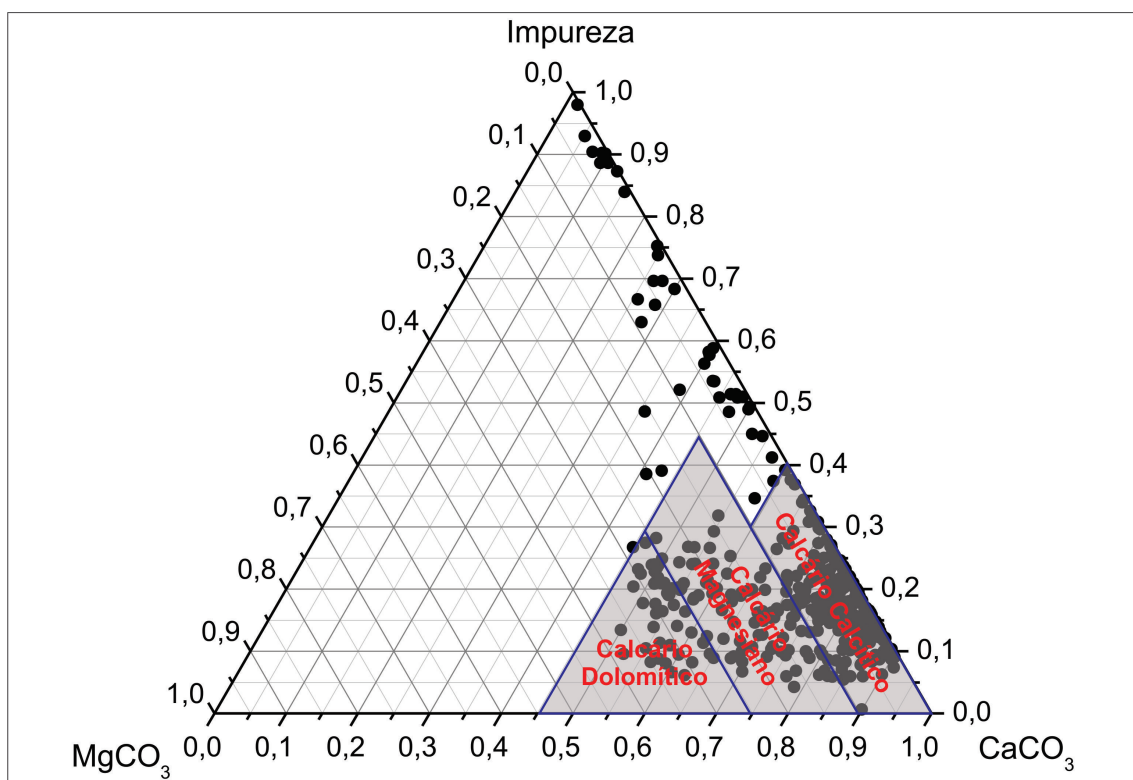
Tabela 4.1 – Critérios de classificação dos calcários adotados pela empresa⁽¹⁾.

Classe	Critérios Químicos	
	CaO + MgO	MgO
Calcário Calcítico	> 38%	< 5%
Calcário Magnesiano	> 38%	≥ 5% e ≤ 12%
Calcário Dolomítico	> 38%	> 12%

⁽¹⁾ Dados informados verbalmente pelo representante da empresa

Fonte: O autor (2017)

Figura 4.4 – Diagrama ternário contendo as posições das amostras segundo os teores de CaCO_3 , MgCO_3 e impurezas, e os campos de ocorrência das classes de calcário adotadas pela empresa.



Fonte: O autor (2017)

A partir da análise comparativa entre os diagramas ternários das Figuras 4.3 e 4.4 notou-se que na classificação adotada pela empresa as três classes de calcários coincidem com áreas, na classificação dada por Machado (2016), atribuídas a calcários impuros, tais como “Calcário (Impuro)” e “Carbonato Dolomítico (Impuro)”. Desta forma, embora na classificação adotada pela empresa o limite de impureza para rochas calcárias esteja menor que 50%, assim como nos critérios de Machado (2016), foi notado que havia a necessidade de se considerar um nível máximo de impurezas em cada classe de calcário a fim de se possuir uma restrição maior em relação à qualidade dos produtos (calcítico, magnesiano ou dolomítico). Portanto, para a classificação dos calcários, optou-se pela utilização dos critérios adotados pela empresa (Tabela 4.1), uma vez que são baseados em acordo com os clientes, e sujeitos a um nível máximo de impurezas.

A porcentagem máxima de impurezas separando os campos dos calcários “puros” dos “impuros”, nas três classes de calcários, foi estabelecida a partir de análises dos dois diagramas ternários já mencionados anteriormente (Figuras 4.3 e 4.4) e das descrições geológicas dos furos de sondagem. A comparação entre os teores de impurezas e as respectivas descrições evidenciou que o valor de 25% de impurezas foi o mais compatível com a geologia e as análises químicas simultaneamente. Portanto, optou-se pela utilização deste valor para separar o campo dos calcários “puros” dos “impuros”, e vice-versa. O campo dos calcários “impuros” foi separado do campo das rochas não carbonáticas pelo teor de impurezas de 50%, conforme a orientação de Machado (2016).

As unidades litológicas (domínios geológicos) foram então classificadas em cinco classes: (Calcário Calcítico (CLC), Calcário Magnesiano (MAG), Calcário Dolomítico (DOL), Calcário Impuro (CLI) e Vulcânicas ou Metavulcânicas (VMV), as duas últimas referentes ao calcário com intercalações de rochas não carbonáticas e às rochas não carbonáticas, respectivamente. A Tabela 6.2 expõe os critérios de classificação das unidades litológicas descritas.

Tabela 4.2 – Domínios litológicos e seus respectivos critérios de classificação.

Classe/Unidade	Critérios Químicos		
	Impureza	CaO + MgO	MgO
Calcário Calcítico (CLC)	< 25%	> 38%	< 5%
calcário Magnesiano (MAG)	< 25%	> 38%	≥ 5% e ≤ 12%
Calcário Dolomítico (DOL)	< 25%	> 38%	> 12%
Calcário Impuro (CLI)	≥ 25% e ≤ 50%	-	-
Vulcânicas e/ou Metavulcânicas (VMV)	> 50%	-	-

Fonte: O autor (2017)

4.3 Análise Estatística

Após a classificação das unidades geológicas procedeu-se com a análise estatística descritiva dos resultados analíticos dos óxidos (CaO e MgO), realizada por meio do programa Action Stat[®], na plataforma do Microsoft (MS) Excel[®]. Foram determinados, para cada óxido, os parâmetros amostrais de tendência central (média e mediana), de dispersão (variância e desvio padrão), de forma (assimetria e curtose), e os valores mínimo e máximo. Foram também obtidos os histogramas de cada óxido e em cada unidade. O propósito de tais procedimentos foi estabelecer e analisar as distribuições estatísticas amostrais de cada unidade litológica. Além disso, foram realizadas análises por meio de *box-plots* sobre a presença de *outliers* (valores anômalos) em cada distribuição, o que resultou na retirada de duas amostras configuradas como tal, do domínio do Calcário Dolomítico (DOL). Os resultados das estimativas dos parâmetros amostrais foram obtidos já com a retirada de tais amostras.

Conjuntamente com as análises estatísticas, e considerando-se que as distribuições das variáveis em cada unidade eram normais, foram determinados os intervalos de confi-

ança para a média e para a variância em cada unidade geológica, estabelecidos ao nível de confiança de 95%.

4.4 Krigagem Indicadora

A modelagem geológica por krigagem indicadora necessita da parâmetros relativos à continuidade geológica de cada categoria (CLC, MAG, DOL, CLI e VMV), determinados por meio de variogramas indicadores. Para tal, primeiramente, os domínios litológicos foram codificados conforme retrata a Tabela 4.3, uma vez que tais informações devem estar no formato numérico para a realização da krigagem indicadora. Os códigos resultantes, para cada amostra, foram armazenados e uma variável denominada “zone”.

Tabela 4.3 – Códigos aribuídos às unidades/categorias geológicas

Unidade/Categoria	Código (ZONE)
CLC	1
MAG	2
DOL	3
CLI	4
VMV	5

Fonte: O autor (2017)

Em seguida foram estabelecidas cinco novas variáveis, denominadas “variáveis indicadoras”, uma para cada domínio litológico (Tabela 4.4). Em cada variável, associada uma dada categoria geológica, atribuiu-se o valor 1 (um) para indicar a presença daquela categoria, e 0 (zero) para indicar a ausência desta mesma categoria. Matematicamente, para um dado domínio DL_i no local x_i , a transformação em dados indicadores foi realizada de acordo com o seguinte procedimento:

$$I(x_i) = \begin{cases} 1 & \text{se } x_i \in DL_i \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4.3)$$

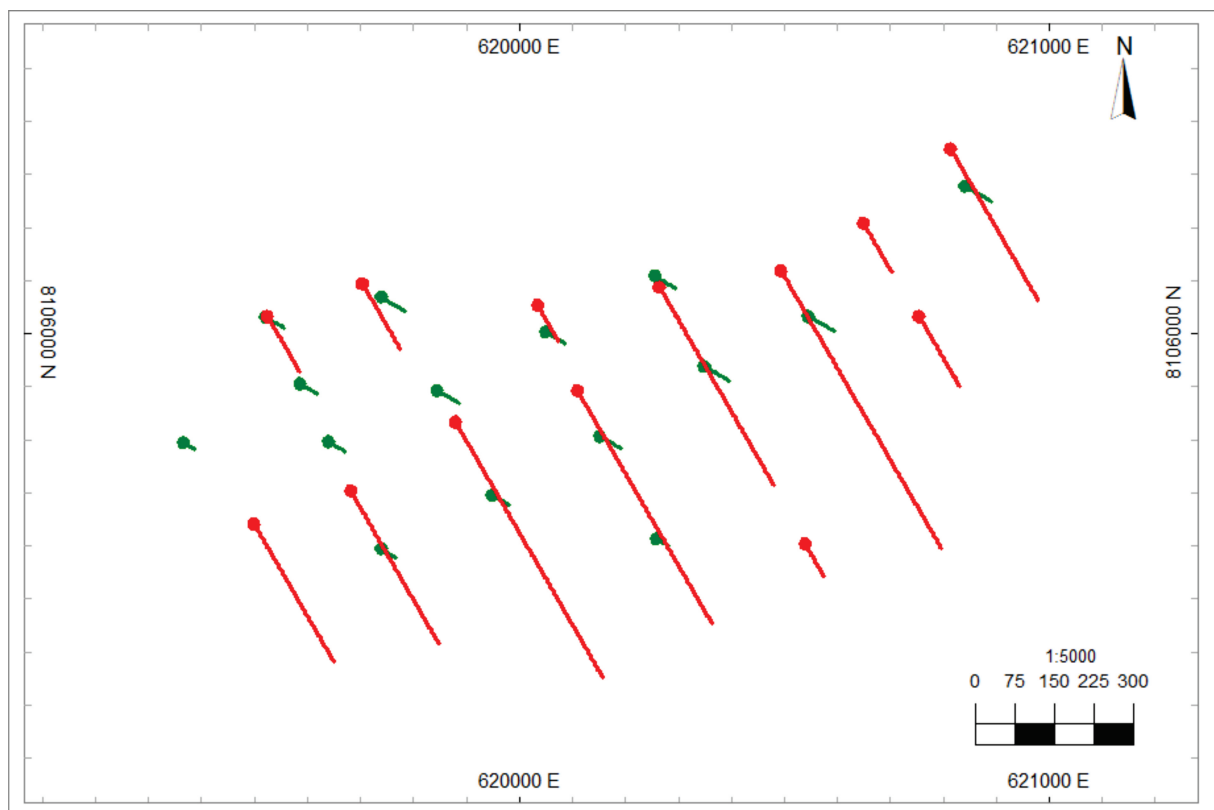
Tabela 4.4 – Domínios litológicos e suas respectivas variáveis indicadoras.

Unidade/Categoria	Variável Indicadora
CLC	IND1
MAG	IND2
DOL	IND3
CLI	IND4
VMV	IND5

Fonte: O autor (2017)

O banco de dados resultante foi então importado para o programa Datamine Studio 3[®] no formato de furos de sondagem (*drillholes*) para visualização, confirmação e análise da disposição espacial das amostras. A Figura 4.5 mostra a disposição espacial em planta dos furos de sondagem (linhas em verde) e das canaletas (linhas em vermelho). Observou-se que não há agrupamentos preferencias de amostras, de tal forma que não se fez necessário o desagrupamento dos dados antes de se proceder com a análise variográfica, e posteriormente com as estimativas.

Figura 4.5 – Projeção em planta mostrando as disposição espacial dos furos de sondagem e canaletas.



Fonte: O autor (2017)

As informações amostrais, particularmente as variáveis indicadoras, foram utilizadas para o cálculo e a posterior modelagem teórica dos variogramas indicadores. Nesta etapa, os dados, no formato do Datamine Studio 3[®], foram exportados para o formato MS Excel[®] e então organizados para o cálculo dos variogramas indicadores no programa Isatis[®].

A partir de observações relativas à continuidade geológica dos corpos minerais, foi observado que os corpos de calcário estão hospedados em uma grande anticlinal, com um mergulho suave para oeste (W). Desta forma, as direções preferenciais de continuidade geológica foram definidas como sendo as direções N-S (menor continuidade) e E-W (maior continuidade). A partir de tais considerações, procedeu-se com o cálculo dos variogramas experimentais, seguidos do correspondente ajuste variográfico.

Os variogramas indicadores, para cada variável, foram calculados da seguinte forma: dois na horizontal, perpendiculares entre si, nas direções/azimutes de 0° (N-S) 90° (E-W); e um na vertical, com inclinação (*dip*) de 90° . Em seguida, os variogramas experimentais de cada variável indicadora foram ajustados interativamente por modelos teóricos, considerando-se, no ato do ajuste, os parâmetros (Efeito Pepita, modelos teóricos e número de estruturas) mais adequados aos três variogramas simultaneamente.

Os parâmetros do ajuste variográfico foram então utilizados para a realização da krigagem indicadora, efetuada por meio do módulo “ik3d” da pacote de programas GSlib. Os parâmetros utilizados para a estimativa estão descritos na Figura 4.6, na qual se pode observar duas colunas de dados: a primeira referente aos valores adotados, e a segunda, ao significado de tais valores. Todas as linhas de valores na imagem estão numeradas a fim de se expor melhor o significado de tais parâmetros.

Nos parâmetros do *ik3d*, conforme mostra a Figura 4.6, foi definido primeiramente (linha 01) o tipo de variável (contínua ou categórica) a ser estimada. Neste caso, como as variáveis indicadoras são constituídas de valores binários, e portanto não enquadradas como variáveis contínuas, optou-se pelo uso do código correspondente ao uso de variáveis categóricas. Em seguida, na linha 02, escolheu-se a opção de se utilizar um protótipo (modelo de blocos) definido no próprio arquivo de parâmetros do *ik3d*, sem houver a necessidade de uso de um arquivo externo para tal (*jackknife*). Tal arquivo seria, caso utilizado, definido nas linhas 03 e 04.

Os parâmetros seguintes foram o número de categorias, os códigos das categorias, e as respectivas proporções em relação aos dados amostrais (frequências relativas) (Tabela 4.5), definidos nas linhas 05, 06 e 07 da Figura 4.6, respectivamente.

Figura 4.6 – Parâmetros adotados para a realizado na krigagem indicadora no *ik3d*.

```

START OF PARAMETERS:
[1]0 -1=continuous(cdf), 0=categorical(pdf)
[2]0 -option: 0=grid, 1=cross, 2=jackknife
[3]jack.dat -file with jackknife data
[4]1 2 0 3 - columns for X,Y,Z,vr
[5]5 -number thresholds/categories
[6]1 2 3 4 5 - thresholds / categories
[7]0.51 0.17 0.10 0.10 0.11 - global cdf / pdf
[8]fsindicadores.txt -file with data
[9]0 1 2 3 9 - columns for DH,X,Y,Z and variable
[10]direct.ik -file with soft indicator input
[11]1 2 0 3 4 5 6 - columns for X,Y,Z and indicators
[12]-1.0e21 1.0e21 -trimming limits
[13]2 -debugging level: 0,1,2,3
[14]ik3d_calc_ind_NE.dbg -file for debugging output
[15]ik3d_calc_ind_NE.out -file for kriging output
[16]310 618629.0 10.0 -nx,xmn,xsiz
[17]202 8104598.0 10.0 -ny,ymn,ysiz
[18]38 550.0 5.0 -nz,zmn,zsiz
[19]3 8 -min, max data for kriging
[20]253.0 140.0 13.5 -maximum search radii
[21]90.0 0.0 0.0 -angles for search ellipsoid
[22]0 -max per octant (0-> not used)
[23]0 2.5 -0=full IK, 1=Median IK(threshold num)
[24]1 -0=SK, 1=OK
[25]2 0.07 -One nst, nugget effect
[26]1 0.04 90.0 0.0 0.0 - it,cc,ang1,ang2,ang3
[27] 300.0 30.0 8.0 - a_hmax, a_hmin, a_vert
[28]1 0.14 0.0 0.0 0.0 - it,cc,ang1,ang2,ang3
[29] 125.0 51.0 6.0 - a_hmax, a_hmin, a_vert
[30]2 0.03 -Two nst, nugget effect
[31]1 0.03 90.0 0.0 0.0 - it,cc,ang1,ang2,ang3
[32] 48.0 35.0 7.0 - a_hmax, a_hmin, a_vert
[33]1 0.095 90.0 0.0 0.0 - it,cc,ang1,ang2,ang3
[34] 106.0 7.0 2.0 - a_hmax, a_hmin, a_vert
[35]2 0.036 -Three nst, nugget effect
[36]1 0.01 90.0 0.0 0.0 - it,cc,ang1,ang2,ang3
[37] 160.0 60.0 9.0 - a_hmax, a_hmin, a_vert
[38]1 0.059 90.0 0.0 0.0 - it,cc,ang1,ang2,ang3
[39] 20.0 5.0 5.0 - a_hmax, a_hmin, a_vert
[40]2 0.043 -Four nst, nugget effect
[41]1 0.008 90.0 0.0 0.0 - it,cc,ang1,ang2,ang3
[42] 200.0 90.0 3.30 - a_hmax, a_hmin, a_vert
[43]1 0.037 90.0 0.0 0.0 - it,cc,ang1,ang2,ang3
[44] 90.0 13.0 11.70 - a_hmax, a_hmin, a_vert
[45]2 0.02 -Five nst, nugget effect
[46]1 0.01 0.0 0.0 0.0 - it,cc,ang1,ang2,ang3
[47] 265.0 250.0 2.0 - a_hmax, a_hmin, a_vert
[48]1 0.063 0.0 0.0 0.0 - it,cc,ang1,ang2,ang3
[49] 72.0 40.0 13.60 - a_hmax, a_hmin, a_vert

```

Fonte: O autor (2017)

Tabela 4.5 – Proporções relativas das categorias/unidades geológicas na amostragem.

Unidade/Categoria	Código	Proporção
CLC	1	0,51
MAG	2	0,17
DOL	3	0,10
CLI	4	0,10
VMV	5	0,11
Total	-	1,00

Fonte: O autor (2017)

Nas linhas 08 e 09 foram apontados, respectivamente, o nome do banco de dados, no formato de arquivo de texto, e os códigos ordenados das colunas contidas no mesmo, referentes às coordenadas X, Y, Z e à variável (código dos domínios geológicos). Em seguida, nas linhas 14 e 15, foram nomeados os dois arquivos de saída, um contendo o resultado propriamente dito da krigagem indicadora (.out), e o outro, a depuração da estimativa (.dbg).

Na sequência, das linhas 17 à 19, definiu-se o protótipo (modelo de blocos) no qual a estimativa seria realizada. Os limites externos do protótipo foram definidos de tal forma a abranger toda a área amostrada e não permitir a existência de estimativas nas bordas do modelo, uma vez que se perderia informações estimadas. As dimensões de cada bloco do modelo foram definidas considerando-se, a princípio, o fato de que blocos muito grandes resultariam em uma baixa precisão na delimitação dos contatos geológicos entre as unidades/categorias, e ao contrário, blocos muito pequenos, resultariam em um modelo com uma quantidade excessiva de informação, tornando-o impraticável de ser utilizado. Os fatores considerados na escolha das dimensões dos blocos foram: alcance dos variogramas indicadores, dimensões utilizadas na empresa, e características da amostragem realizada (espaçamento entre furos e comprimento das amostras).

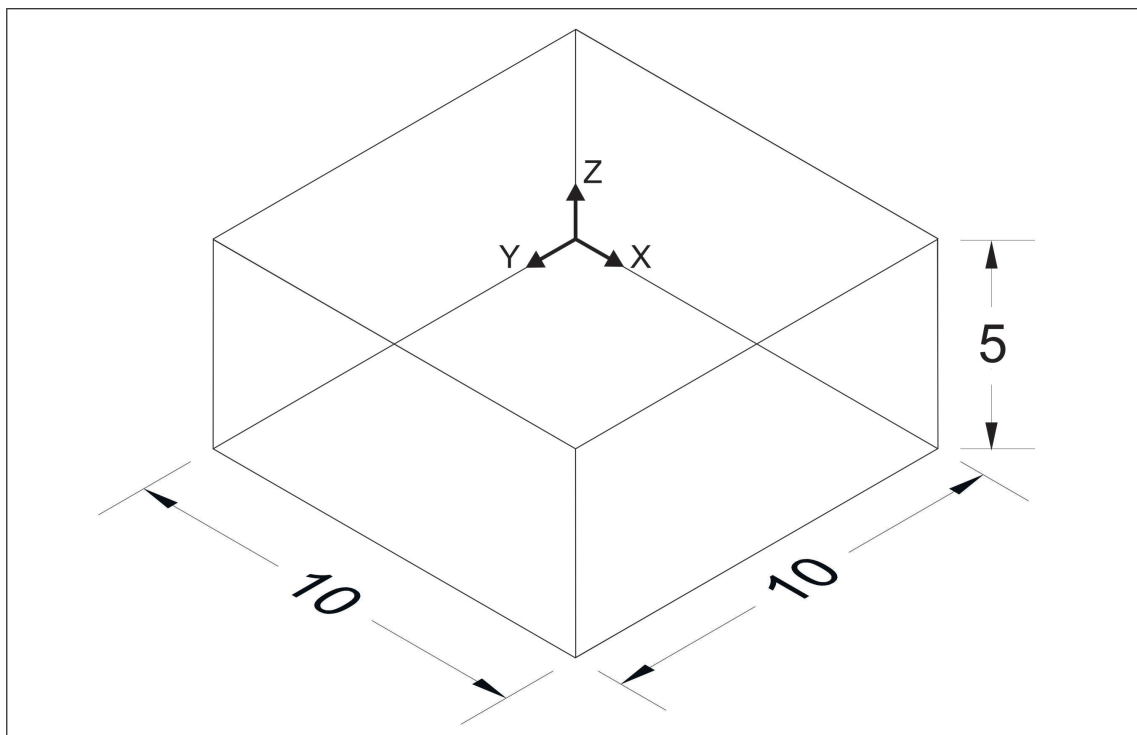
A partir dos alcances dos variogramas indicadores, observou-se que os maiores valores estavam associados aos variogramas horizontais, de tal forma que as dimensões dos blocos na horizontal não seriam limitados por esses. Ao contrário, os menores valores de alcance foram associados aos variogramas verticais, cujo menor valor foi de 9 metros, atribuído ao Calcário Magnesiano (IND2). Portanto, seria fundamental que a dimensão dos blocos na vertical (eixo Z) fosse menor que tal valor, evitando, desta forma, que tal dimensão exceda o alcance dessa unidade.

O modelo de blocos utilizado atualmente na empresa possui blocos de 25 (vinte e cinco) metros na horizontal (25 x 25 m) e 10 (dez) metros na vertical. Portanto, a utilização de blocos com dimensões múltiplas destas facilitaria o planejamento e a execução da lavra na transição entre modelos geológicos. Em seguida, a análise do tamanho das amostras mostrou que o comprimento amostral de maior ocorrência (moda) era de 5 (cinco) metros.

A partir das considerações expostas, optou-se por utilizar blocos com 10 (dez) metros na horizontal (10 x 10 m), ou seja, nas direções X e Y, e com 5 (cinco) metros na direção

vertical (Figura 4.7). As dimensões em X e Y foram definidas desta forma para se ter um maior nível de detalhe nos contatos geológicos, além de ser um valor próximo de um múltiplo da largura dos blocos no modelo utilizado atualmente na mina (25 m). Já a dimensão em Z (vertical) foi definida como 5 metros: (i) por ser o valor mais recorrente de comprimento das amostras, (ii) ser menor que todos os alcances variográficos, e; (iii) ser um valor múltiplo da dimensão utilizada atualmente pela empresa (10 m). A Tabela 4.6 mostra os parâmetros do protótipo empregado.

Figura 4.7 – Desenho esquemático de um bloco do modelo em perspectiva com as suas dimensões.



Fonte: O autor (2017)

Tabela 4.6 – Parâmetros do protótipo utilizado para a krigagem indicadora.

Eixos	Parâmetros	Valores
X	Coordenada Mínima (m)	618.629,00
	Dimensão do Bloco (m)	10,00
	Número de Blocos	310
Y	Coordenada Mínima (m)	8.104.598,00
	Dimensão do Bloco (m)	10,00
	Número de Blocos	217
Z	Coordenada Mínima (m)	530,00
	Dimensão do Bloco (m)	5,00
	Número de Blocos	59

Fonte: O autor (2017)

Sequencialmente, nas linhas 20 e 21 da Figura 4.6, inseriu-se os parâmetros do volume de busca (vizinhança) da estimativa. A busca, neste caso, foi realizada por meio de um elipsoide cujos eixos foram orientados de acordo com as direções dos variogramas, e as dimensões dos mesmos, em cada orientação, foram obtidas a partir da média aritmética dos alcances totais naquela direção.

Os últimos parâmetros preenchidos foram os referentes aos ajustes variográficos, os quais foram obtidos por meio dos ajustes aos variogramas experimentais nas etapas anteriores, e inseridos nas linhas 25 à 49. Após o preenchimento destes parâmetros foi realizada a rotina de cálculo do *ik3d*, gerando os dois arquivos de saída mencionados previamente. Destes, o arquivo contendo o resultado propriamente dito da krigagem indicadora (.out) foi então, importado para o programa SGeMS (*Stanford Geostatistical Modeling Software*).

O resultado da krigagem indicadora é a probabilidade de ocorrência de cada unidade geológica em cada bloco do modelo, de tal forma que, para cada bloco, foram atribuídos cinco valores de probabilidade, cada um referente à sua respectiva categoria geológica. Entretanto, tal resultado não fornece diretamente o domínio geológico prevalecente em cada local, sendo necessária a sua determinação a partir dos resultados das probabilidades calculadas. Portanto, utilizou-se algoritmo (*script*) no SGeMS, o qual calculou, para cada ponto estimado: (i) o domínio geológico associado ao maior valor de probabilidade - entre os cinco valores, e (ii) a incerteza na definição da categoria de maior probabilidade, calculada como sendo a subtração entre a probabilidade total (um) e a maior probabilidade entre os cinco valores. Matematicamente, a incerteza foi calculada da seguinte forma:

$$\text{Incerteza}(i) = 1 - \text{Maior Probabilidade}(i) \quad (4.4)$$

Na Eq. (4.4) o parâmetro *i* se refere cada ponto/bloco do modelo, variando então de 1 (um) ao número total de pontos/blocos estimados.

O modelo obtido após se estabelecer o domínio com a maior probabilidade de ocorrência e a incerteza associada a tal domínio não apresentava as coordenadas espaciais dos pontos estimados. Tais coordenadas foram adicionadas por meio do módulo “addcoord”, também do pacote de programas GSlib, no qual foram inseridos os parâmetros do protótipo utilizado para a estimativa (Tabela 4.6). Na Figura 4.8 estão expostos os valores utilizados no arquivo de parâmetros do *addcoord*, onde foram adicionados os nomes dos arquivos de entrada (linha 01) e de saída (linha 02), e as especificações do protótipo (da linha 04 à linha 06).

O banco de dados resultante, já com as coordenadas espaciais dos pontos estimados foram transferidos para o programa Datamine Studio 3[®] no formato de arquivo de pontos, e então convertido em modelo de blocos por meio do processo “ijk”, resultando, então, no modelo geológico do depósito mineral contendo os domínios litológicos e a incerteza associada