



Duarte Nuno da Silva Latas

Licenciado em Engenharia Geológica

Modelação e avaliação de recursos de depósitos aluvionares diamantíferos: um caso de estudo em Angola

Dissertação para Obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Geológica

Orientador: Doutor José António de Almeida

Co-orientador: Doutor Luís Manuel Chambel Filipe Rodrigues Cardoso

Júri

Presidente: Doutor Joaquim António dos Reis Silva Simão

Arguente: Doutor António Jorge Gonçalves de Sousa

Vogal: Doutor Luís Manuel Chambel Rodrigues Cardoso

Modelação de depósitos aluvionares diamantíferos e avaliação de recursos: um caso de estudo em Angola

“© Copyright” Duarte Nuno da Silva Latas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

O desenvolvimento, conceção e finalização desta dissertação representou uma oportunidade única para o meu desenvolvimento académico e pessoal. A sua conclusão não seria possível sem o contributo de diversas pessoas cujo apoio se deu nos mais variados contextos.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao meu orientador, o Professor Doutor José António de Almeida, pela magnífica orientação prestada, pela oportunidade de desenvolver um tema de tese que tem tanto de interessante como de desafiante, pela paciência demonstrada no esclarecimento de qualquer dúvida que tivesse e pela dedicação e entusiasmo que me transmitiu ao longo do desenvolvimento desta dissertação.

Ao Engenheiro Luís Manuel Chambel, diretor geral da Sínese – Consultoria Ld.^a, pelo fornecimento dos dados de partida, pela disponibilidade demonstrada em todas as reuniões, sugestões e correções que contribuíram para o aperfeiçoamento desta dissertação.

A todos os docentes que me acompanharam ao longo do meu percurso académico e contribuíram para a minha formação.

À minha família pelo apoio, motivação e carinho incondicional. Aos meus pais, a quem eu devo tudo o que tenho de bom, que são para mim um exemplo a seguir em todos os aspetos e aos quais agradeço também pela paciência que tiveram quando eu não tinha tempo para nada. À minha irmã e meu cunhado, que com o passar dos anos acompanharam-me e apoiaram ao longo de diversas fases da minha vida e que agora vão poder ver-me concluir mais uma.

À Inês, a minha pequenina, a quem agradeço por todo carinho e dedicação. Apoiámo-nos mutuamente ao longo desta batalha assim como nos apoiaremos em todas as que se seguirem.

Aos meus amigos e colegas Inês, Mário, Lúcia, Diogo, Telmo, João, Elias, Miguel e André pela amizade e apoio. Pelos intervalos e almoços onde conversávamos sobre tudo e pelas conversas motivadoras ao longo do desenvolvimento da dissertação.

Ao Nero, Tobias, Lucky e Mali pelo carinho incondicional e por me conseguirem animar em qualquer tipo de circunstância.

Resumo

Apresenta-se uma metodologia para a caracterização espacial de depósitos aluvionares diamantíferos e subsequente avaliação de recursos. Nestes depósitos, as ocorrências diamantíferas à escala regional são condicionadas pela rede hidrográfica, no entanto, à escala local, têm comportamento “quase” errático. Neste contexto, a que acresce o valor económico do diamante, a modelação do recurso é um problema desafiante e complexo.

A metodologia proposta envolve a construção de um modelo morfológico a que se segue o modelo de quantidades. Estes submodelos foram construídos a 2D e a 3D para permitirem a comparação de quantitativos. A informação de partida foi obtida a partir de poços de amostragem e inclui espessura de estéril, possança de cascalho (formação diamantífera), número de pedras e quilates totais por camada de cascalho intersetada.

A construção do modelo a 2D consiste na estimação por krigagem normal das variáveis: i) espessura total de estéril; ii) possança total de cascalho; iii) número de pedras por m^3 ; iv) quilates totais por m^3 . Para a estimação destas duas últimas variáveis recorreram-se às respetivas variáveis auxiliares de acumulação.

Seguidamente construiu-se um modelo a 3D do depósito. Para a morfologia, estabeleceu-se uma malha de blocos a 3D, com origem na interface com o substrato, e estimou-se a localização dos blocos com maior probabilidade de pertencerem a cascalho ou a estéril (formalismo da indicatriz). Para as variáveis de quantidade, separaram-se as formações de cascalho que são disjuntas entre si no modelo morfológico e estimaram-se, por krigagem normal, as variáveis de quantidade condicionadas aos valores observados nos poços.

Os variogramas das variáveis morfológicas são de melhor qualidade comparativamente aos das variáveis de quantidade, significando que as estimações locais da morfologia são mais fiáveis. Os modelos a 2D e a 3D permitiram o cálculo dos recursos e também apresentar imagens da variação das quantidades no espaço. Os resultados dos modelos a 2D e a 3D são da mesma ordem de grandeza.

Palavras-chave: Diamantes; depósitos diamantíferos aluvionares; Lunda Norte; Rio Chambua-ge; Formação Calonda; estimação e simulação geoestatística; avaliação de recursos diamantíferos.

Abstract

This work presents a methodology for the spatial characterization of diamond alluvial deposits and subsequent evaluation of resources. In these type of deposits, diamond occurrences at regional level are conditioned by the streamline network, however, at the local level, they exhibit a behaviour "almost" erratic. In this context, and in addition to the economic value of the diamond, the modelling of diamond alluvial deposits is a challenging and complex problem.

The method proposed involves the construction of two sub-models, a morphological model first and then a quantitative diamonds model. These sub-models were built both at 2D and 3D and allow a reciprocal comparison. The starting information was obtained from vertical wells and includes thickness of waste rock, thickness of gravel (diamond formation), number of stones and total carats per intersected layer of gravel.

The construction of the 2D model involves the estimation by ordinary kriging of the following variables: i) total thickness of waste rock; ii) total thickness of gravel; iii) number of stones per m^3 ; iv) total of carats per m^3 . The estimation of the two latter variables appealed to the respective auxiliary variables of accumulation.

Then a 3D geological model of the deposit was built. For the morphology, a 3D mesh of blocks were established, with a zero level coincident with the interface with the substrate, and then the location of the blocks most likely to belong to gravel or waste rock was performed following an indicator formalism. For que quantity diamond variables, the estimated gravel formation were spitted into disjoint geobodies and then the number of stones and carats were estimated by ordinary Kriging, conditional to the values measured in wells.

The variograms of the morphological variables are of better quality when compared to the quantity of diamond variables, meaning that the morphology estimation is most reliable. Both models at 2D and 3D enabled the calculation of resources and the visualization of images of the quantities involved. The results of the 2D and 3D models are of the same order of magnitude.

Key-words: Diamonds; alluvial diamond deposits; Lunda North; Chambuage River; Calonda Formation; geostatistical estimation and simulation; evaluation of diamond resources.

Índice Geral

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Enquadramento e objetivos do estudo.....	1
1.2	Organização do trabalho.....	2
2	ASPETOS GERAIS SOBRE DIAMANTES	3
2.1	O valor do diamante	3
2.2	Génese dos diamantes na Terra	6
2.2.1	<i>Influência dos cratões.....</i>	<i>7</i>
2.2.2	<i>Importância das cunhas mantélicas</i>	<i>8</i>
2.3	Erupções kimberlíticas	10
3	DIAMANTES EM ANGOLA	13
3.1	Breve historial da exploração de diamantes em Angola.....	14
3.2	Enquadramento geológico relacionado com a génese dos diamantes	15
3.3	Depósitos diamantíferos de Angola.....	20
3.4	Metodologia de prospeção e pesquisa de diamantes usada em Angola.....	27
3.5	Métodos de mineração e tratamento de minérios	30
3.5.1	<i>Métodos de mineração de depósitos aluvionares</i>	<i>30</i>
3.5.2	<i>Métodos de tratamento dos minérios diamantíferos.....</i>	<i>30</i>
4	METODOLOGIA	33
4.1	Estado da arte	33
4.2	Métodos Usados	35
4.2.1	<i>Construção do modelo a 2D.....</i>	<i>38</i>
4.2.2	<i>Construção do modelo a 3D.....</i>	<i>38</i>
4.2.2.1	Construção do modelo morfológico a 3D.....	39
4.2.2.2	Construção do modelo de teores a 3D.....	40
4.3	Fundamentos teóricos dos métodos geoestatísticos utilizados	42
4.3.1	<i>Continuidade espacial.....</i>	<i>42</i>

4.3.2	<i>Estimação por krigagem</i>	44
4.3.2.1	Krigagem normal	45
4.3.3	<i>Simulação geoestatística</i>	46
4.3.4	<i>Análise da entropia das imagens binárias simuladas</i>	48
5	CASO DE ESTUDO	49
5.1	Apresentação dos dados	49
5.2	Estatísticos básicos	52
5.3	Modelo 2D.....	54
5.3.1	<i>Modelo morfológico</i>	55
5.3.2	<i>Modelo de teores</i>	58
5.3.3	<i>Apresentação de quantitativos dos recursos</i>	62
5.4	Modelo 3D.....	63
5.4.1	<i>Modelo morfológico</i>	63
5.4.2	<i>Modelo de teores</i>	71
5.5	Discussão de resultados	76
6	CONCLUSÕES	79
7	REFERÊNCIAS	81

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Diamantes recuperados pela Lucapa Diamond Company. Note-se as diferentes colorações e hábitos que este mineral pode apresentar. Fonte: http://www.lucapa.com.au/gallery (2016).	3
Figura 2.2 - Condições de estabilidade dos diamantes em termos de pressão, temperatura e profundidade. É possível verificar a influência do gradiente geotérmico e que a profundidade é o fator mais determinante. Adaptado de Tappert & Tappert (2011).	6
Figura 2.3 - Localização das ocorrências de diamantes no mundo consoante a sua origem. O mapa cruza as ocorrências de diamantes com a localização dos cratões. (Fonte: Pearson and Wittig, 2008).....	8
Figura 2.4 - Bloco de diagrama demonstrativo da relação entre um cratão e a cunha mantélica. É de notar que os diamantes permanecem armazenados na cunha até serem trazidos à superfície pelas erupções kimberlíticas. Fonte: Tappert & Tappert (2011).	9
Figura 3.1 – Produção angolana de diamantes em quilates. A azul corresponde à produção proveniente do kimberlito de Catoca e a vermelho a produções das restantes fontes (Chambel, 2016).	13
Figura 3.2 – Cratões Africanos. Destacam-se as zonas de fraqueza estrutural existentes no Cratão do Congo e corredor SW-NE correspondente ao Complexo Vulcânico de Angola (Pereira et al., 2003).	16
Figura 3.3 – Modelo morfológico de um kimberlito. Adaptado de Mitchell, 1986.....	19
Figura 3.4 – Mapa de Angola e respetivos kimberlitos e depósitos aluvionares diamantíferos. Fonte: Reis, 1972.....	21
Figura 4.1 – Fluxograma das etapas levadas a cabo na construção dos modelos a 2D (à esquerda) e a 3D (à direita).....	37
Figura 4.2 – Representação conceptual das sondagens e superfícies de referência do modelo a 3D, superfície do terreno a cor cinza, camada base a cor vermelha e superfície da base das sondagens a cor azul: (a) referencial original; (b) referencial transformado onde a camada base é transformada em plano e identificação dos blocos a 3D do modelo optimista; (c) idem ao anterior mas com identificação dos blocos do modelo conservador.....	41

Figura 5.1 – Planta da área de estudo, seguindo uma imagem da original da DIAMANG. Escala original: 1:1000.	50
Figura 5.2 – Representação dos poços de sondagem enquadrados com as linhas de água principais e o limite da malha de blocos. Cada poço está representado pelo número de intercalações estéril / cascalho, que pode ser 1, 2 ou 3.....	51
Figura 5.3 – Histograma simples, histograma cumulativo e <i>box-plot</i> referente às variáveis do modelo 2D: espessura de estéril, possança de cascalho, nº de pedras / (m ³) e peso em quilates / (m ³).	54
Figura 5.4 – Distribuição espacial dos poços legendados em função da espessura total de estéril (esquerda) e possança total de cascalho (direita).....	55
Figura 5.5 – Variograma experimental da variável espessura de estéril e modelo teórico de tipo exponencial ajustado.	56
Figura 5.6- Variograma experimental da variável possança de cascalho e modelo teórico de tipo exponencial ajustado.	56
Figura 5.7 – Imagens estimadas por krigagem normal das variáveis espessura de estéril e possança de cascalho.	57
Figura 5.8 - Distribuição espacial dos poços legendados em função do valor da acumulação de pedras e do peso.....	58
Figura 5.9 – Variograma experimental da variável acumulação do número de pedras e modelo teórico de tipo exponencial ajustado.	59
Figura 5.10 - Variograma experimental da variável acumulação do peso total das pedras e modelo teórico de tipo exponencial ajustado.	59
Figura 5.11 – Imagens estimadas por krigagem normal das variáveis acumulação do número de pedras e acumulação de teor (parte superior) e resultado da divisão destas imagens pelos valores estimados da possança de cascalho (parte inferior).	61
Figura 5.12 – Variograma experimental da variável espessura total entre a superfície e a camada de base e modelo teórico exponencial ajustado.....	64
Figura 5.13 – Imagens da espessura total do modelo: (esquerda) cenário conservador, resulta da soma da espessura estimada de estéril e da possança estimada de cascalho, ambas do modelo 2D; (direita) cenário otimista, resulta da estimativa da espessura total entre a superfície e a camada de base.....	65

Figura 5.14 – Variograma experimental da variável indicatriz nas direções horizontal e vertical e modelo teórico de tipo exponencial ajustado.....	66
Figura 5.15 – Variogramas experimentais de uma realização das litologias de estéril e cascalho onde é possível observar a reprodução dos modelos teóricos de variogramas.....	67
Figura 5.16 – Imagens no perfil 44 NS ilustrando as várias etapas da modelação 3D das litologias estéril e cascalho: a) realização gerada por SSI; b) delimitação com a camada base e a superfície do terreno (cenário otimista); c) delimitação com a espessura total equivalente à do modelo 2D (cenário conservador); d) e e) valores médios das simulações, ou probabilidade de pertença à camada de estéril; f) e g) probabilidades transformadas para as litologias estéril e cascalho.....	68
Figura 5.17 – Imagens no perfil 44 NS ilustrando a entropia ou medida de incerteza das imagens simuladas: a) cenário otimista; b) cenário conservador.....	69
Figura 5.18 – Representação 3D do modelo morfológico no cenário otimista.	69
Figura 5.19 – Imagens dos corpos de cascalho disjuntos representados em quatro perfis centrais orientados NS. O corpo de cascalho de maior dimensão é o número um e está representado na base do modelo em todos os perfis com cor azul-escuro.....	73
Figura 5.20 – Variograma experimental da variável possança de cascalho condicional por corpo de cascalho e modelo teórico ajustado de tipo exponencial.	74
Figura 5.21 – Variograma experimental da variável acumulação do número de pedras condicional por corpo de cascalho e modelo teórico ajustado de tipo exponencial.	74
Figura 5.22 – Variograma experimental da variável acumulação de teor condicional por corpo de cascalho e modelo teórico ajustado de tipo exponencial.	74
Figura 5.23 – Imagens do perfil 44 NS da morfologia das litologias de estéril e cascalho, número de pedras e quilates por m ³ condicionais por corpo de cascalho.....	75

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Países produtores e respetivos valores de produção em milhões de quilates (Chambel, 2016).....	4
Tabela 2.2 - Países produtores e respetivos preços praticados por pedra (Chambel, 2016).....	5
Tabela 2.3 - Países produtores e respetivos valores de produção em milhões de dólares americanos (Chambel, 2016).....	5
Tabela 3.1 – Unidades Litoestratigráficas e episódios tectónicos da província das Lundas (NE Angolano). Adaptado de Pereira <i>et al</i> , 2003.....	18
Tabela 5.1 – Parâmetros geométricos das malhas de blocos 2D e 3D que serviram de suporte aos modelos morfológico e de teores.	52
Tabela 5.2 – Estatísticos básicos das quatro variáveis usadas na construção do modelo morfológico a 2D.....	53
Tabela 5.3 – Parâmetros dos modelos teóricos ajustados aos variogramas experimentais das variáveis espessura de estéril e possança de cascalho.	56
Tabela 5.4 – Parâmetros dos modelos teóricos ajustados aos variogramas experimentais das variáveis acumulação número de pedras e acumulação de teor.....	59
Tabela 5.5 – Tabela com os principais quantitativos relativos ao depósito em estudo: volumes de estéril e cascalho, número de pedras e peso em quilates. Estes resultados foram calculados com base nas observações (poços) e nos mapas estimados por krigagem (modelo morfológico e de teores a 2D).	62
Tabela 5.6 – Parâmetros dos modelos teóricos ajustados aos variogramas experimentais da variável indicatriz nas direções horizontal e vertical.....	66
Tabela 5.7 – Comparação de volumes totais de estéril e cascalho e relação entre os volumes de estéril e cascalho entre os modelos 2D e 3D.	70
Tabela 5.8 – Lista de corpos de cascalho, com o respetivo número de blocos, volume (m ³) e número de interseções por sondagens.	72
Tabela 5.9 – Parâmetros dos modelos teóricos ajustados aos variogramas experimentais condicionais por corpo de cascalho das variáveis possança de cascalho, acumulação do número de pedras e acumulação de teor.....	73

Tabela 5.10 – Comparação do número de pedras e quilates obtidos nos modelos 2D e nas duas variantes do modelo 3D.....	75
---	----

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento e objetivos do estudo

A proximidade ao Cratão do Congo juntamente com diversos episódios tectónicos, alguns dos quais associados à abertura do Atlântico Sul e às erupções kimberlíticas ocorrentes no Cretácico, conferiram a Angola, em especial ao NE do seu território, um elevado potencial diamantífero. O volume de pedras recuperado, e a sua qualidade, fazem de Angola um país importante no mercado mundial de diamantes. Angola tem todas as condições para manter esta posição de mercado devido à existência de áreas por explorar e outras que carecem de estudos geológicos e geomorfológicos mais detalhados (Chambel, Reis, & Caetano, 2013).

Em Angola, uma parte significativa dos diamantes explorados provêm de depósitos aluvionares ou secundários. Estes depósitos concentram diamantes de pequena dimensão mas com elevada qualidade. Os diamantes estão contidos em camadas de cascalho que ocorrem associadas às redes hidrográficas antigas e atuais e encontram-se geralmente cobertos por camadas detríticas aluvionares (areias e siltes).

Como a presença de diamantes nestes depósitos está associada a processos de transporte, deposição e remobilização, a sua ocorrência está disseminada por grandes regiões, o que dificulta a avaliação destes recursos (Rodrigues, Góis, Reis, & Pereira, 2000).

Nesta dissertação propõe-se, a partir de observações de poços de amostragem, uma metodologia 3D para a modelação da morfologia e a estimação da quantidade de diamantes (nº de pedras e peso total) por unidade de volume presentes em depósitos aluvionares. A metodologia combina técnicas de estimação e simulação sequencial de forma a gerar um resultado compatível com o que é obtido nos poços de sondagem. Para a validação dos resultados do modelo 3D com a metodologia proposta, são apresentados e comparados com os resultados a 2D obtidos com a metodologia clássica. Na metodologia a 3D, a construção de um modelo geológico das formações de estéril e cascalho (binário) de alta resolução permite condicionar a estimação do número de pedras e quilates em profundidade com a resolução espacial na vertical dos dados dos poços.

Os resultados permitem apresentar tabelas de quantitativos, simples e condicionais, assim como apresentar imagens de variação de quantidades e curvas de quantidade – teor de corte.

1.2 Organização do trabalho

A dissertação encontra-se dividida em sete capítulos. No primeiro capítulo, “Introdução”, faz-se o enquadramento geral da tese, e apresentam-se as motivações que levam ao seu desenvolvimento e os objetivos a atingir. No capítulo dois, “Aspetos gerais dos diamantes”, são apresentadas as características genéricas do diamante como mineral, a sua distribuição no mundo e os processos genéticos envolvidos na sua ocorrência. No terceiro capítulo, “Diamantes em Angola”, aborda-se o historial de exploração dos diamantes, o contexto geológico das ocorrências diamantíferas do país e as metodologias de prospeção, pesquisa e tratamento de minério usadas pela DIAMANG.

No quarto capítulo “Metodologia” apresenta-se o estado da arte, a metodologia utilizada e os fundamentos teóricos dos métodos utilizados no desenvolvimento do trabalho, tanto para a geração do modelo morfológico do depósito como para a estimação de teores e análise do recurso, a 2D e a 3D.

O capítulo cinco, “Caso de estudo”, demonstra a aplicação da metodologia nos seguintes pontos: apresentação dos dados de partida; estatísticos básicos, modelo 2D, modelo 3D e discussão de resultados. Nos subcapítulos dos modelos separam-se as etapas da morfologia e dos teores. No sexto capítulo serão apresentadas as considerações finais e no capítulo sete apresentam-se as referências bibliográficas.

2 ASPETOS GERAIS SOBRE DIAMANTES

2.1 O valor do diamante

O diamante é um mineral constituído exclusivamente por carbono, com os seus átomos dispostos numa malha cúbica. Apresenta um hábito que pode variar entre o octaédrico, mais comum, o dodecaédrico, tetraédrico e, muito raramente, o cúbico. Exibe clivagem perfeita, fratura conchoidal, brilho adamantino característico, dureza de 10 na escala de Mohs e é geralmente incolor ou com colorações atenuadas de amarelo ou cinzento como se pode observar na Figura 2.1. A unidade de massa dos diamantes, que foi adotada em 1907 na Quarta Conferência Geral de Pesos e Medidas, é o quilate que corresponde a duzentos miligramas.

O diamante possui elevado valor comercial e científico. O seu valor comercial poderá ter tido origem na sua raridade e em diversos mitos e lendas que associavam este mineral a um estatuto de talismã e um exemplo de pureza com o consequente valor religioso associado. Foi a partir do século XV que se acredita que o diamante passou a ser valorizado como gema (Gouveia *et al*, 1993).

A sua classificação como gema surgiu naturalmente uma vez que os diamantes com qualidade de gema são extremamente raros e de elevada beleza e quimicamente estáveis ao não reagirem com ácidos ou bases. O diamante é produto natural de elevada dureza e pode apresentar fluorescência quando emanado com raios-X, valorizando a gema caso isso se verifique.



Figura 2.1 – Diamantes recuperados pela Lucapa Diamond Company. Note-se as diferentes colorações e hábitos que este mineral pode apresentar. Fonte: <http://www.lucapa.com.au/gallery> (2016).

Os diamantes que não apresentam a qualidade necessária para ser utilizados como gema podem ser usados para fins industriais onde a sua dureza é aproveitada ao serem integrados em brocas, coroas de sondagem, discos de metal e instrumentos de corte. Os diamantes de pior qualidade podem, ainda, ser moídos de modo a obter-se um material com propriedades abrasivas (Gouveia *et al*, 1993).

O valor científico dos diamantes é também elevado porque por vezes incorporam na sua matriz, minerais originados em ambientes de alta pressão e temperatura, que de outra forma seriam inacessíveis. Os diamantes permitem ainda o estudo de fenómenos de convecção em zonas profundas do manto relacionados com placas tectónicas (Shirey *et al*, 2013).

O diamante constitui uma importante fonte de riqueza para os países produtores. Nas tabelas 2.1 a 2.3 é possível observar os principais países produtores de diamantes e a respetiva produção anual entre 2004 e 2015 e os preços médios por pedra (em milhões de quilates e dólares americanos). Os principais produtores são a Federação Russa, Republica Democrática do Congo, Botswana, Canadá, África do Sul, Angola e Austrália.

Tabela 2.1 - Países produtores e respetivos valores de produção em milhões de quilates (Chambel, 2016)

Volume (Mct)	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Angola	6,1	7,1	9,2	9,7	8,9	9,2	8,4	8,3	8,3	9,4	8,8	9,0
Australia	20,2	32,9	29,9	18,5	14,9	15,6	10,0	7,8	9,2	11,7	9,3	13,6
Botswana	31,0	31,9	34,3	33,6	32,3	17,7	22,0	22,9	20,6	23,2	24,7	20,8
Brazil	0,3	0,3	0,1	0,3	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0
Cameroon	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Canada	12,7	12,3	13,3	17,0	14,8	10,9	11,8	10,8	10,5	10,6	12,0	11,7
Central African Republic	0,3	0,4	0,4	0,5	0,4	0,3	0,3	0,3	0,4	0,0	0,0	0,0
China, PR	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Congo, DR	30,0	33,1	29,0	28,5	33,4	21,3	20,2	19,2	21,5	15,7	15,7	16,0
Congo, R	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,4	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0
Cote D'ivoire	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Ghana	0,9	1,0	1,0	0,9	0,6	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
Guinea	0,7	0,5	0,5	1,0	3,1	0,7	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2
Guyana	0,5	0,3	0,4	0,3	0,2	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1
India	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Indonesia	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Lesotho	0,0	0,1	0,2	0,5	0,3	0,1	0,1	0,2	0,5	0,4	0,3	0,3
Liberia	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1
Namibia	2,0	1,9	2,4	2,3	2,4	1,2	1,7	1,3	1,6	1,7	1,9	2,1
Russian Federation	38,9	38,0	38,4	38,3	36,9	34,8	34,9	35,1	34,9	37,9	38,3	41,9
Sierra Leone	0,7	0,7	0,6	0,6	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,6	0,6	0,5
South Africa	14,1	15,6	14,9	15,2	12,9	6,1	8,9	8,2	7,1	8,1	7,4	7,2
Tanzania	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,1	0,0	0,1	0,2	0,3	0,2
Togo	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Venezuela	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Zimbabwe	0,0	0,2	1,0	0,7	0,8	1,0	8,4	8,5	12,1	10,4	4,8	3,5
Total	159,1	176,7	176,0	168,2	162,9	120,2	128,3	124,0	128,0	130,5	124,8	127,4

Tabela 2.2 - Países produtores e respetivos preços praticados por pedra (Chambel, 2016).

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Angola	128	154	123	131	136	87	117	140	133	136	150	131
Australia	16	17	19	20	22	20	25	28	29	32	33	23
Botswana	83	90	94	88	101	81	117	170	145	156	148	144
Brazil	88	73	67	100	78	39	55	69	61	76	47	44
Cameroon										231	173	222
Canada	130	118	106	97	152	135	195	236	192	181	167	144
Central African Republic	149	158	141	128	127	151	162	188	170			
China, PR	16	14	17	18	20	10	16	249	23	31		
Congo, DR	18	19	15	13	13	11	9	9	9	9	9	8
Congo, R					48	32	12	24	74	27	25	25
Cote D'ivoire											104	33
Ghana		33	32	26	29	19	35	51	44	40	42	37
Guinea	59	87	84	45	17	42	75	110	163	167	151	88
Guyana	104	95	127	119	162	150	158	189	173	204	161	161
India	117	163	172			178	185	179	178	177	181	208
Indonesia		281	206			77						
Lesotho	952	1 236	722	723	880	1 456	1 817	1 602	629	585	990	931
Liberia				122	210	397	600	386	385	367	428	459
Namibia	335	373	375	316	377	343	440	695	553	805	603	591
Russian Federation	57	67	67	69	68	67	68	76	82	82	97	101
Sierra Leone	183	212	208	235	266	196	242	348	302	303	357	309
South Africa	76	85	91	93	96	144	135	211	145	146	165	193
Tanzania	115	115	94	101	101	136	185	277	266	256	319	271
Togo	90	113	114	98	106	120	110	211	198	143	99	
Venezuela	40	58	55	82	138	94	109					
Zimbabwe	180	141	32	45	55	21	40	56	53	52	50	50
Total	64	66	69	72	78	69	89	116	99	108	116	109

Tabela 2.3 - Países produtores e respetivos valores de produção em milhões de dólares americanos (Chambel, 2016).

Value (MUSD)	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Angola	788	1 089	1 133	1 272	1 210	804	976	1 163	1 110	1 278	1 317	1 182
Australia	314	547	560	365	326	313	252	221	269	381	304	308
Botswana	2 576	2 870	3 208	2 960	3 273	1 436	2 586	3 902	2 979	3 626	3 647	2 986
Brazil	26	22	6	26	6	1	1	3	3	4	3	1
Cameroon	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
Canada	1 645	1 454	1 410	1 657	2 255	1 475	2 305	2 551	2 007	1 907	2 003	1 676
Central African Republic	52	61	59	60	48	47	49	61	62	0	0	0
China, PR	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
Congo, DR	536	615	432	365	432	226	174	180	183	139	137	133
Congo, R	0	0	0	0	5	2	5	2	4	2	1	1
Cote D'ivoire	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ghana	26	34	31	23	18	7	12	15	10	7	10	6
Guinea	40	47	40	46	54	29	28	33	44	34	25	15
Guyana	47	32	44	34	31	15	7	10	8	12	16	19
India	9	10	2	0	0	2	3	2	5	6	7	7
Indonesia	0	5	11	5	8	1	0	0	0	0	0	0
Lesotho	25	64	167	328	223	134	198	359	301	242	343	283
Liberia	0	0	0	3	10	11	16	16	16	20	28	31
Namibia	673	697	901	715	918	409	744	873	900	1 360	1 156	1 214
Russian Federation	2 205	2 531	2 574	2 625	2 509	2 341	2 382	2 675	2 874	3 114	3 733	4 240
Sierra Leone	127	142	125	142	99	78	106	124	163	184	222	154
South Africa	1 076	1 319	1 362	1 417	1 236	886	1 194	1 730	1 027	1 185	1 224	1 390
Tanzania	35	25	26	28	24	25	13	11	34	46	81	59
Togo	11	2	3	2	1	0	0	0	0	0	0	0
Venezuela	0	3	2	1	1	1	0	0	0	0	0	0
Zimbabwe	8	35	34	31	44	20	340	476	644	538	239	175
Total	10 222	11 606	12 129	12 107	12 732	8 262	11 393	14 407	12 645	14 085	14 496	13 882

Estas tabelas mostram que o valor dos diamantes difere significativamente de país para país, em função da qualidade das pedras e do potencial para constituírem gemas. Angola está bem posicionada no ranking de produtores mundiais e disputa com a África do Sul e a Austrália a posição de quinto maior produtor de diamantes do mundo.

2.2 Gênese dos diamantes na Terra

Para existir potencial para a formação de diamantes é necessário que o carbono ocorra na forma livre. As condições de estabilidade dos diamantes foram determinadas em laboratório e rodam os 4 GPa de pressão e temperaturas entre 950 e 1400 °C (Figura 2.2).

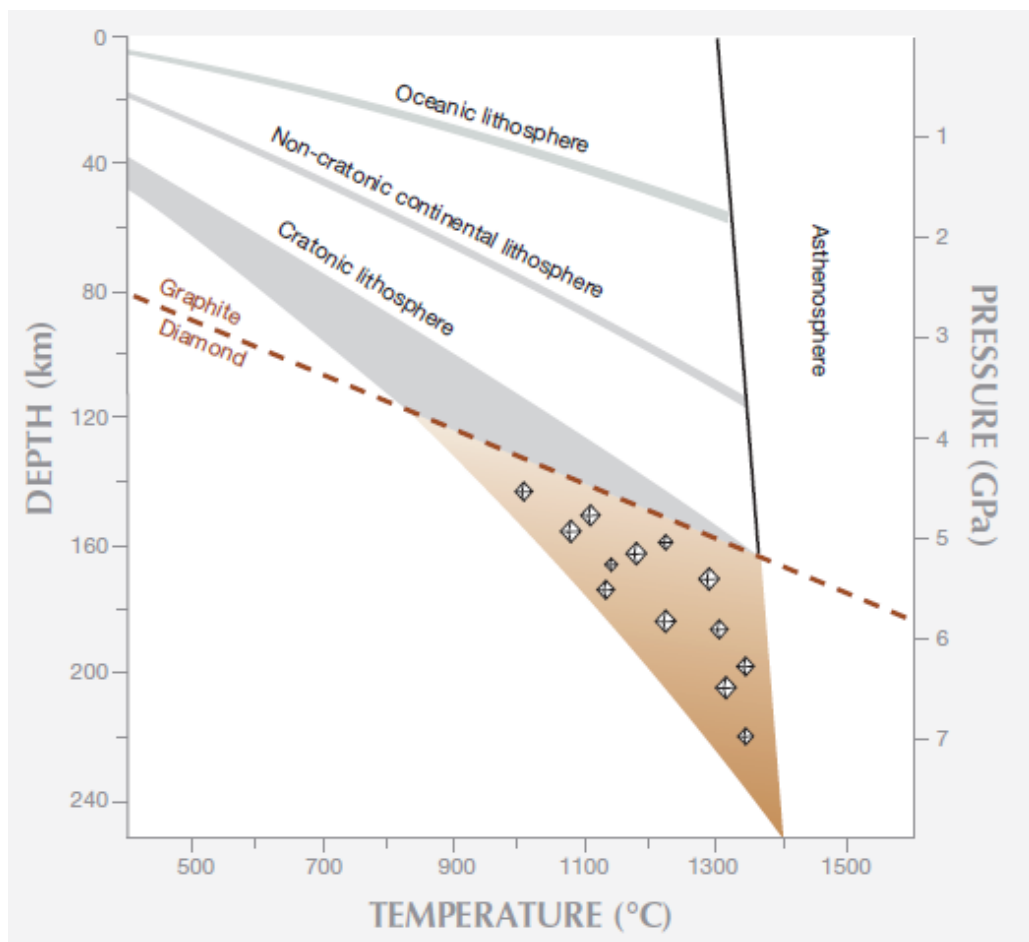


Figura 2.2 - Condições de estabilidade dos diamantes em termos de pressão, temperatura e profundidade. É possível verificar a influência do gradiente geotérmico e que a profundidade é o fator mais determinante. Adaptado de Tappert & Tappert (2011).

Da crosta para o interior do planeta, a temperatura aumenta com a profundidade o que é denominado de gradiente geotérmico. Assim, os diamantes podem-se formar em qualquer região da Terra onde a profundidade na crosta ou no manto permita valores de pressão suficientemente elevados uma vez que nesses locais a temperatura será sempre propícia (Shirey & Shigley, 2003).

A maior parte do manto está dentro do campo de estabilidade dos diamantes. A crosta, sendo normalmente pouco espessa (menor do que 40 km), só entra dentro deste campo de estabilidade quando a ela estão associados processos geológicos relacionados com as placas tectônicas. Apesar das condições para a estabilidade e consequente cristalização serem muito propícias no manto, a formação dos diamantes é muito rara devido à escassez de carbono livre (Shirey & Shigley, 2003).

2.2.1 Influência dos cratões

Um cratão, ou escudo, pode ser definido como uma grande área de crosta continental, estável por um período de tempo tipicamente superior a 1000 milhões de anos, como tal, neles é observável uma uniformidade tanto estrutural como morfológica e corresponde a áreas fortemente metamorfizadas e comprimidas. Estes locais têm um interesse particular no estudo dos diamantes uma vez que se verifica correspondência entre os cratões que datam do Arcaico e a ocorrência de kimberlitos mineralizados (Figura 2.3).

As erupções kimberlíticas ocorrentes em cratões que datam do Arcaico sofrem desgaste nas suas superfícies expostas o que leva, por sua vez, à libertação de diamantes para o rególito. Se entretanto ocorrer ascensão da crosta, as rochas hospedeiras são erodidas e os diamantes são libertados, sendo posteriormente transportados por rios e correntes longitudinais (Shirey & Shigley, 2003). Se não ocorrer ascensão da crosta, estes diamantes permanecem armazenados em bacias como é o caso de diversos locais na África Ocidental, Zimbábue e Brasil.

A espessura da crosta continental e sua associação a um cratão são fulcrais para o desenvolvimento de diamantes que depois são transportados para níveis mais superficiais através de erupções kimberlíticas.

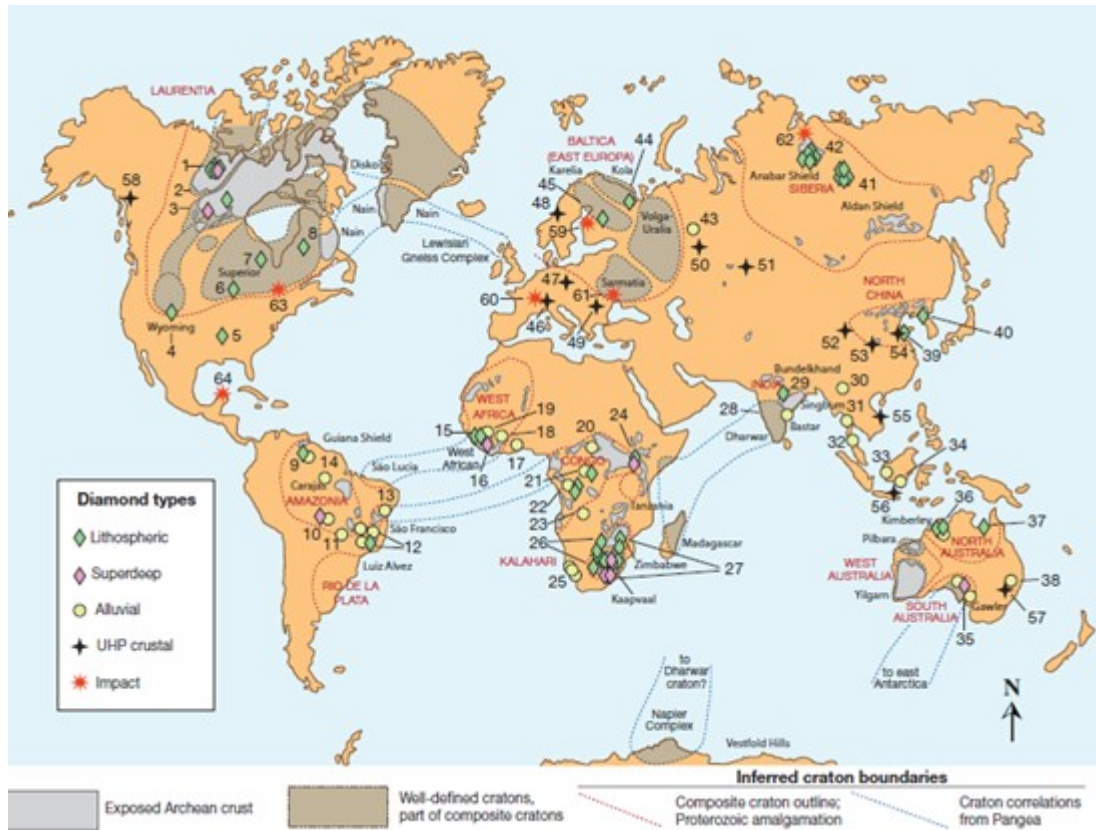


Figura 2.3 - Localização das ocorrências de diamantes no mundo consoante a sua origem. O mapa cruza as ocorrências de diamantes com a localização dos cratões. (Fonte: Pearson and Wittig, 2008).

2.2.2 Importância das cunhas mantélicas

As cunhas mantélicas ocorrem subjacentes às crustas oceânicas e continentais. São assim designadas devido à sua forma e à afinidade que demonstram, a longo prazo, com a crosta continental dos cratões. Consistem em zonas de manto rígido e peridotítico, juntamente com a crosta que lhe é sobrejacente, esta comprime a litosfera sendo por isso a principal responsável por muitas das características associadas aos continentes: estabilidade tectónica, elevação acima dos fundos marinhos e a ocorrência de diamantes (Shirey & Shigley, 2003, Shirey *et al*, 2013). Podem atingir os 40 km de comprimento e 250 a 300 km de profundidade nas crustas continentais e 110 km nas crustas oceânicas.

2.3 Erupções kimberlíticas

Os diamantes são predominantemente transportados para a superfície da Terra em três tipos de magma: os kimberlitos, os lamproitos e os lamprófiros (Gurney, 1989). Destes, os kimberlitos são de longe os mais importantes com vários milhares de ocorrências documentadas, dos quais 30% são diamantíferos. Os lamproitos possuem uma percentagem semelhante aos anteriores no que toca ao número de ocorrências diamantíferas. Ocorrerem como hospedeiros na maior mina de diamantes do mundo, Argyle (Austrália) contando também com ocorrências diamantíferas notáveis nos EUA e Índia. Os lamprófiros só ocasionalmente são documentados como diamantíferos, como tal o seu interesse é, atualmente, petrofísico pois são hospedeiros dos diamantes mais antigos que se tem conhecimento (Shirey & Shigley, 2003).

De todos os diamantes provenientes de magmas hospedeiros, os diamantes com idades compreendidas do Arcaico ao Proterozóico são geralmente transportados por rochas vulcânicas kimberlíticas que datam do Fanerozóico até ao Cretácico/Terciário (Pearson & Shirey 1999; Gurney *et al.*, 2010).

A instalação de um kimberlito procede-se pela propagação ascendente de magma ao fraturar hidráulicamente a rocha sobrejacente. Estas intrusões movem-se rapidamente, na ordem dos 20 m/s, e a pressão será progressivamente menor à medida que a profundidade diminui. Isto permitirá o surgimento de uma fase de vapor que manterá os componentes do magma em fase líquida e suportará a coluna de material arrastado pela intrusão.

O magma dos kimberlitos pode originar-se a profundidades desde os 200 a 300 km mas tem de ser gerado abaixo do valor de profundidade a partir do qual os diamantes são estáveis (superiores a 140 km) de modo a conseguirem captá-los da sua fonte na litosfera (Shirey & Shigley, 2003).

Os kimberlitos pela forma como são portadores de diamantes podem ser distinguidos em Grupo I (GI) e Grupo II (GII). Tipicamente os kimberlitos do GI contêm minerais originários do manto cuja formação não seja metassomática e a composição isotópica inicial de Sr, Nd, Hf e Pb são indicadoras de equilíbrio para com a zona convectiva do manto. Os kimberlitos do GII contêm minerais micáceos e metassomáticos e composições isotópicas extremas para Sr, Nd, Hf e Pb, que são indicadores de equilíbrio para com a zona litosférica, subcontinental e metassomatizada do manto (Smith, 1983 in Pereira *et al.*, 2003).

Os kimberlitos são rochas da família dos peridotitos micáceos. Contêm nódulos do tipo das rochas ultrabásicas sendo característica a presença de minerais de alta pressão e de formação a profundidades entre os 200 e os 300 km, tais como o piropo e o diópsido cromífero.

Os principais minerais constituintes desta rocha são a olivina, flogopite e a serpentina. Apresentam como inclusões os xenólitos, que consistem em rochas “estranhas” que foram arrancadas das paredes das chaminés vulcânicas, nódulos ultramáficos e, em alguns casos, diamantes (Gouveia *et al*, 1993).

3 DIAMANTES EM ANGOLA

Os diamantes angolanos são reconhecidos pela sua elevada qualidade e valor comercial. O país possui kimberlitos e depósitos aluvionares diamantíferos já identificados e muitas destas formações aguardam desenvolvimentos no que diz respeito ao seu estudo e eventual exploração mineira. É provável que muitos depósitos ainda estejam por descobrir.

Angola tornou-se num marco importante no mercado mundial de diamantes devido ao volume e qualidade das gemas recuperadas no seu território. É provável que esta posição se venha a manter no futuro uma vez que ainda possui recursos provados e medidos de dimensões consideráveis (Valente *et al*, 1999).

Dentro do território Angolano, as regiões mais produtivas de diamantes são as Lundas Norte e Sul situadas a nordeste do país onde, em tempos, a produção se focou maioritariamente em depósitos secundários de natureza aluvionar. Ocorrem também kimberlitos mineralizados no território angolano estando identificados centenas de afloramentos. Um bom exemplo da exploração mineira ativa de depósitos primários de diamantes é o kimberlito de Catoca. A relação entre a exploração de depósitos primários e secundários tem vindo a alterar-se como se pode verificar na figura 3.1, onde exploração destas fontes primárias tem vindo a ganhar destaque na última década.

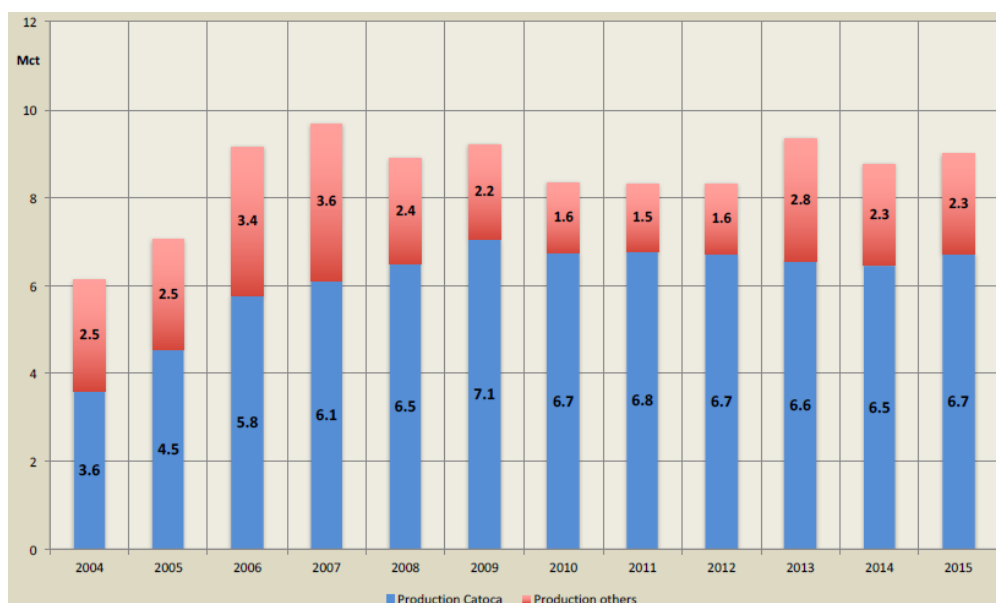


Figura 3.1 – Produção angolana de diamantes em quilates. A azul corresponde à produção proveniente do kimberlito de Catoca e a vermelho a produções das restantes fontes (Chambel, 2016).

3.1 Breve historial da exploração de diamantes em Angola

Angola é um dos principais produtores de diamantes no mundo, tendo esta produção começado no início do século XX. Angola possui ainda recursos com enorme potencial (por desenvolver ou por descobrir) estando também estes entre os maiores do mundo.

Os primeiros diamantes angolanos foram descobertos por geólogos da *Société Internationale Forestière et Minière du Congo* em 1912, no ribeiro Mussalala que é afluente da margem direita do rio Chiumbe. Estas descobertas vêm no seguimento de outras, levadas a cabo pela mesma empresa, nos rios Kasai e Tchikapa localizados na República Democrática do Congo (anteriormente denominada de Congo Belga) ao demonstrar ocorrências diamantíferas para Sul, em direção à fronteira de Angola (Gouveia *et al*, 1993).

Com a descoberta destes depósitos, e indícios de extensão para Sul, foi constituída, em 4 de Setembro de 1912, a Companhia de Pesquisas Mineiras de Angola (abreviadamente PEMA), com o objetivo de efetuar pesquisas mineiras no território de Angola. Após ser-lhe atribuída uma licença de pesquisas a empresa iniciou em 1913, na Lunda Norte, trabalhos de prospeção que incluíram as bacias dos rios Chicapa e Luachimo. No entanto, as expectativas do potencial diamantífero Angolano só foram atingidas, e até ultrapassadas, quando a prospeção se estendeu às bacias dos rios Chiumbe e Luembe. Estas descobertas levaram, em 16 de Outubro de 1917, à constituição da Companhia de Diamantes de Angola, abreviadamente DIAMANG, para a qual foi autorizada, em 6 de Julho de 1918, a transferência dos direitos concedidos à PEMA no que dizia respeito os diamantes. Em 1920, foi celebrado o contrato que conferia à DIAMANG a exclusividade na exploração e prospeção de diamantes (Gouveia *et al*, 1993).

Em 1952 foi descoberto o primeiro kimberlito designado de Camafuca-Camazambo e, nos anos de 1958 e 1969 a produção atingiu 1 e 2 milhões de quilates (Mct), respetivamente.

Este período foi interrompido em 1971 com o fim do monopólio que a empresa DIAMANG manteve sobre os diamantes angolanos. A revolução portuguesa de 25 de Abril de 1974 deu lugar à independência de Angola em Novembro de 1975. A esta seguiu-se uma guerra civil que viria a durar décadas e que viria a ter um grande impacto socio / económico (Chambel *et al*, 2013).

A indústria de diamantes na Angola colonial, baseada na DIAMANG, foi uma das primeiras vítimas deste conflito, levando ao decréscimo da produção. Isto deveu-se à nacionalização das ações portuguesas da empresa, à falência da empresa e sua substituição pela ENDIAMA, à perda de capacidade financeira, à falta de qualificação técnica e perda de infraestruturas.

Para combater o decréscimo da produção de diamantes, o governo de Angola, de 1992 em diante, legislou no sentido de atenuar restrições no comércio e mineração de diamantes. Estas medidas, no entanto, levaram ao surgimento do garimpo como prática comum na população. Desde então, têm sido tomadas medidas para erradicar esta atividade, uma das quais passaria pela obrigatoriedade de venda dos diamantes através de um canal oficial único. Estas medidas nunca foram completamente bem sucedidas até hoje.

Com a chegada do novo milénio, os kimberlitos ganharam importância na indústria diamantífera angolana, especialmente com a mina de Catoca. Diversas companhias internacionais investiram nos campos diamantíferos de Angola com resultados variados (Chambel *et al*, 2013).

A atual estabilidade política e o fim dos conflitos armados levou a que a economia angolana evoluísse de forma favorável, criando condições para a iniciativa pública e privada. Sendo um dos pilares da economia de Angola, a indústria diamantífera acompanhou este período de desenvolvimento com novos projetos de prospeção e mineração.

3.2 Enquadramento geológico relacionado com a génese dos diamantes

O Cratão do Congo tem bastante influência na formação de diamantes e localização dos kimberlitos no território angolano. As ocorrências kimberlíticas prevalecem em terrenos que datam do Arcaico, caracterizados pela presença de anfibolitos, gneisses anfibolíticos, granulitos máficos e charnoquitos.

Durante a transição do período Arcaico-Proterozoico, a crosta presente nas Lundas sofre extensão, pressões provenientes do manto, rutura e, em alguns casos, intrusão de massas máficas a ultra-máficas. Estas grandes massas mantélicas induzem a fusão parcial na crosta e a formação de granitóides e granodioritos porfiróides (Pereira *et al*, 2003).

O Cratão do Congo exhibe tendências estruturais que refletem diferentes ciclos orogénicos. Estes ciclos deram origem a zonas de fraqueza estrutural com origem em orogénias Pré-Câmbricas e do sistema de fraturas e tensões a atuar no Cratão do Congo entre os períodos Carbonífero-Pérmico e o Cretácico (Pereira *et al*, 2003).

As direções WSW-ENE do Arcaico, a tendência NW-SE das estruturas resultantes da orogénia Eburneana e as direções N-S a NNW-SSE do ciclo Pan-Africano, traduzem o fluxo tectónico sofrido pelo cratão ao longo do tempo. O cratão seria novamente reativado nos episódios tectónicos a atuar sobre o continente Gondwana após o período do Câmbrico que culminou na abertura do Atlântico Sul.

Deste fluxo tectónico geraram-se zonas de maior fraqueza estrutural no cratão com as seguintes direções: WSW-ENE, NW-SE e NNE-SSW (ver Figura 3.2).

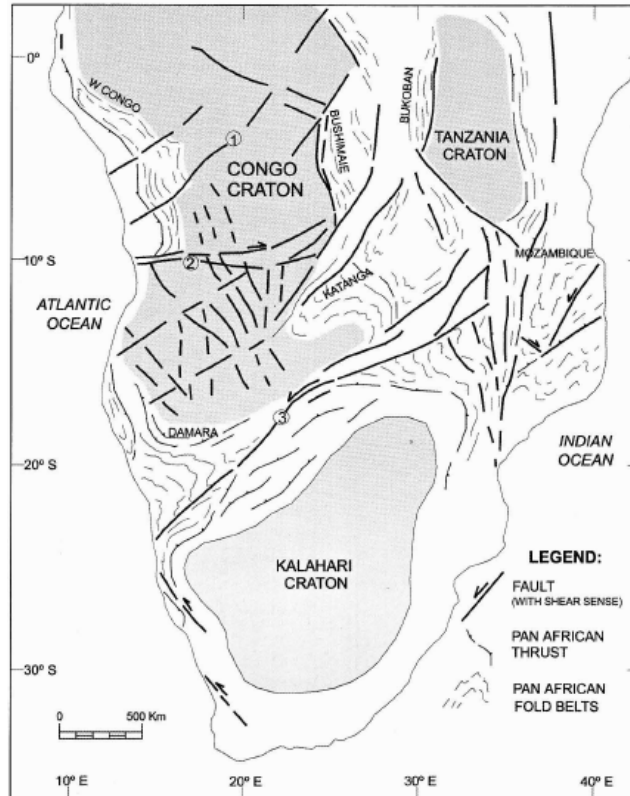


Figura 3.2 – Cratões Africanos. Destacam-se as zonas de fraqueza estrutural existentes no Cratão do Congo e corredor SW-NE correspondente ao Complexo Vulcânico de Angola (Pereira et al., 2003).

De todos estes episódios tectónicos, originaram-se estruturas geológicas que viriam a desempenhar um papel muito importante no controle estrutural dos kimberlitos mineralizados, portadores de diamantes e, conseqüentemente, da distribuição dos depósitos secundários de natureza aluvial. Destas estruturas, as mais antigas e umas das mais importantes serão as estruturas com direção WSW-ENE do Graben de Lucapa (Delville, 1961; Monforte, 1970).

Após um período de episódios vulcânicos, que ocorreram como resultado de movimentos tectónicos e da atividade sedimentar no fim do Cretácico, seguiu-se um ciclo erosivo durante o qual o relevo regional foi erodido e a região ficou coberta de espessas seqüências sedimentares compostas por lamias, areias e conglomerados pertencentes às seqüências do Grupo Kwango e Grupo Kalahari (ver Tabela 3.1).

Apenas a erosão provocada pela rede hidrográfica atual permite que o substrato cristalino, as estruturas vulcânicas kimberlíticas e a Formação Calonda aflorem à superfície.

As idades das instalações dos kimberlitos em todo o mundo datam do Pré-Câmbrico, Paleozóico e Meso-Cenozóico (Kirkley *et al*, 1992; Fipke *et al*, 1995; Gurney, 1989; Meyer, 1985; 1987). Já para os diamantes a datação das inclusões por vezes presentes no interior dos mesmos, indicam idades compreendidas entre os 3300 e os 990 Ma. É possível, portanto que os diamantes sejam mais antigos do que os kimberlitos que os transportaram à superfície (Pereira *et al*, 2003). É assumido que as erupções kimberlíticas e a posterior instalação em Angola ocorreram no período Cretácico, sendo contemporâneos da abertura do Atlântico Sul (Pereira *et al*, 2003). Foram também identificadas as ocorrências de kimberlitos anteriores e posteriores às anteriormente referidas e é ainda admitido que tenha ocorrido um segundo episódio de vulcanismo kimberlítico mais recente (Monforte, 1993).

Em algumas áreas, estas erupções estão associadas a movimentos tectónicos N-S e E-W, isto porque, durante o Terciário ocorreu uma rotação do Escudo Africano. São encontrados blocos silicificados como ilmenite à superfície de corpos kimberlíticos ou misturados em cascalho presente na atual rede hidrográfica. Estes blocos são de grés polimorfo, o que indica que as erupções kimberlíticas são contemporâneas da silicificação que originou o grés polimorfo, e que esta se estendeu até, pelo menos, ao Terciário médio (Chambel *et al*, 2013).

Na sua generalidade, os diamantes de Angola provêm dos kimberlitos localizados ao longo de um corredor tectónico que se estende de SW a NE com aproximadamente 2000 km. Este corredor é designado de Complexo Vulcânico de Angola, também conhecido por *Lucapa Trend*, e consiste numa faixa cuja direção coincide com locais propícios à ocorrência de kimberlitos. Esta tendência deve-se à presença de estruturas graben que conferem à área uma fraqueza estrutural que a torna propícia à erupção de magma. Neste corredor tectónico estão incluídos centenas de vulcões antigos, na maioria estéreis, e outros mineralizados mas sem valor económico, sendo por isso seguro dizer que os kimberlitos que oferecem uma exploração economicamente viável são raros.

Os kimberlitos mineralizados ocorrem perto do núcleo do cratão do Congo. Dentro do Complexo Vulcânico de Angola ocorre uma forte diferenciação que pode ser observada ao longo das direções NE e SW. Tal poderá estar relacionado com a variação do gradiente térmico verificada do centro para a parte mais exterior do cratão juntamente com o posicionamento da cunha mantélica associada ao cratão.

À medida que aumenta a distância ao núcleo do Cratão, a probabilidade de ocorrência de kimberlitos diminui dando lugar a vulcanismo carbonatítico. Daqui resulta uma predominância de

carbonatos no setor SW e de kimberlitos no setor NE, esta última corresponde às regiões das Lundas Norte e Sul ficando assim explicado o potencial diamantífero destas regiões.

Tabela 3.1 – Unidades Litoestratigráficas e episódios tectónicos da província das Lundas (NE Angolano).

Adaptado de Pereira *et al*, 2003.

Cronostratigrafia	Litoestratigrafia	Episódios Tectónicos
Pliocénico	Grupo Kalahari Areias Ocre	Erosão
Eocénico-Miocénico	Formação Grés Polimorfo	Erosão - Hiato
Cretácico	Grupo Kwango Formação Calonda	Erosão Instalação dos kimberlitos
	Grupo Continental Intercalar	Rifting Continental
		Extensões Tectónicas de direção W-E Erosão-Hiato
Jurássico		
		Fracturação Tectónica com direção NNE-SSW
Triásico		
Pérmico		Fracturação Tectónica com direção NNW-SSE
Carbonífero		Extensões Tectónicas com direção W-E Erosão-Hiato
		Fracturação Tectónica com direção WSW-ENE
Câmbrico	Grupos Metamórficos	Orogenia Pan-Africana
Neoproterozóico		
Paleo-Proterozóico		Orogenia Eburneana
Arcaico	Complexo Charnoquítico	Orogenia Limpopo-Liberiana(?)

Na província das Lundas, o modo de ocorrência dos kimberlitos é feito através de diatremas, sendo também reconhecidos na região diques e *sills* (Figura 3.3). As chaminés vulcânicas possuem secção elíptica ou circular e dimensões variadas, sendo geralmente pequenas em tamanho (Pereira *et al*, 2003). Os diques e os *sills* são estruturas estreitas que podem atingir comprimentos na ordem das centenas de metros e demonstram uma estrutura porfírica e poucos xenólitos. Estas ocorrências estão associadas aos lineamentos de fraturas ou surgem dispostos de forma radial em relação às chaminés de maiores dimensões.

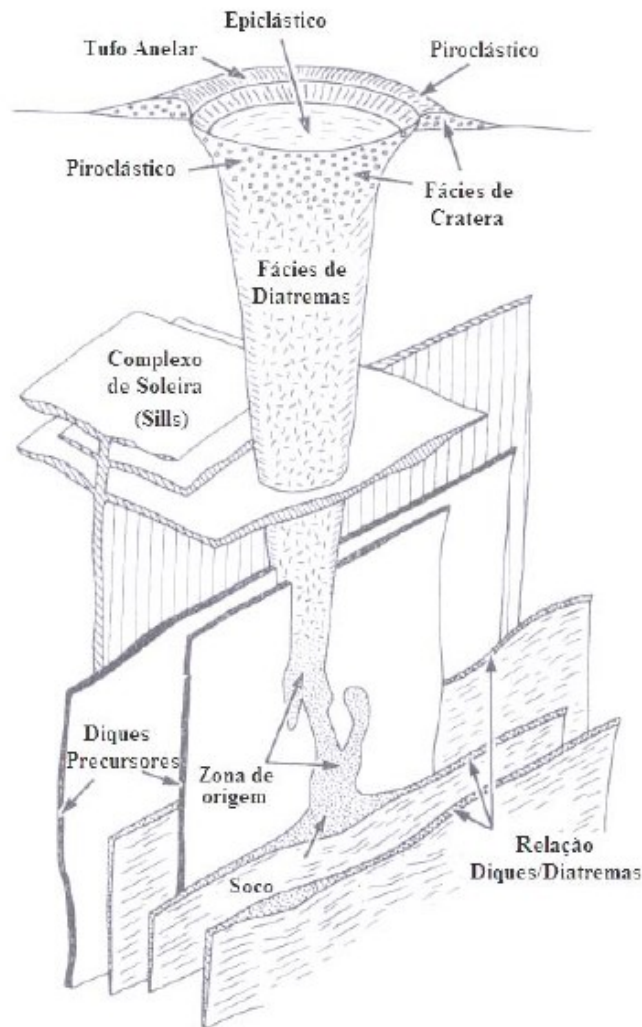


Figura 3.3 – Modelo morfológico de um kimberlito. Adaptado de Mitchell, 1986.

Os kimberlitos que ocorrem inseridos no Complexo Vulcânico de Angola e demonstram uma tendência em agrupar-se formando áreas denominadas de Distritos ou Províncias. A uma escala menor, os kimberlitos ocorrem agrupados, deste modo, quando um kimberlito é encontrado, é espectável que existam outros por perto. Em Angola é possível individualizar sete províncias sendo as quatro seguintes as mais importantes:

- Lunda;
- As regiões dos rios Cucumbi, Cacuilo e Cuango;
- A bacia de Cuanza;
- As regiões das nascentes dos rios Cunene, Queve e Catumbela.

Estas províncias encontram-se alinhadas com a macroestrutura denominada de Complexo Vulcânico de Angola (Pereira *et al*, 2003). A província da Lunda apresenta um controlo estrutural derivado de compartimentos limitados por falhas com direção WSW-SSE em padrão *echelon* e deslocadas por falhas com direção NNW-SSE. As forças de tração resultantes da abertura do Atlântico levaram à formação de estruturas do tipo graben que controlam e preservam os depósitos secundários de diamantes tais como o Grupo Kwango, terraços fluviais, e depósitos aluviais recentes. Destas forças resultou também o controlo estrutural que viria a definir a área de colocação dos kimberlitos.

3.3 Depósitos diamantíferos de Angola

No território Angolano ocorrem diferentes tipos de depósitos diamantíferos sendo estes divididos, consoante a sua natureza, em depósitos primários ou secundários (Figura 3.4).

Os depósitos primários são os kimberlitos, são por isso de origem vulcânica. Estima-se que já foram encontrados milhares de depósitos deste género em Angola. Alguns são explorados desde os anos 70 do século passado, como é o caso dos depósitos de Catoca, Camatchia, Camagico, Camutuê e Sangamina (Chambel *et al*, 2013).

As características metalogénicas entre kimberlitos vizinhos podem diferir bastante. Tal pode ser explicado por situações em que a chaminé vulcânica de um kimberlito tenha resultado de diversas erupções e seja, por isso, constituída por material sucessivamente expelido ao longo do tempo. Estas situações podem dar origem a diferentes populações de diamantes, o que contribui para o aumento da variabilidade dos teores de área para área ou mesmo a combinação de pedras com valores comerciais distintos (Chambel *et al*, 2013).

Podem ter ocorrido, eventualmente, novas erupções a partir de uma única chaminé ou perto desta, resultando na modificação do vulcão pré-existente ou na criação de um novo. Se o novo magma kimberlítico em ascensão incorporar rochas ricas em diamantes ao longo do seu percurso, ocorre uma nova fase mineralizada ao adicionar novas gemas na área de erupção e no ciclo mineralizante secundário.

Os depósitos aluvionares antigos formaram-se imediatamente após a principal fase de erupções kimberlíticas no Cretácico. Os conglomerados situados na base da Formação Calonda armazenaram os diamantes libertados a partir de erupções kimberlíticas, então recentes.

Já os depósitos aluvionares modernos encontram-se ao longo de (ou relacionados com) bacias hidrográficas. Os diamantes contidos nestes depósitos provêm de kimberlitos, que foram alvo de meteorização contínua de que resultou na sua erosão, e dos conglomerados da formação de Calonda, uma vez que esta formação atua como o principal coletor de diamantes fluviais.

Os diamantes podem ainda ser provenientes de outros depósitos mais recentes cujos diamantes tenham sofrido outro ciclo de remobilização e deposição (Chambel *et al*, 2013). Nestes inclui-se a atividade dos rios em terraços, planícies de inundação e em leitos de rios. A água corrente terá tido um papel fulcral na criação, desenvolvimento e evolução de depósitos secundários de diamantes. Exemplo disso será o transporte de diamantes efetuado por inundações e linhas de água ao longo de bacias hidrográficas para longe das suas fontes primárias.

Durante o transporte, os diamantes misturam-se com litologias das mais diversas granulométricas: cascalho, areias e argilas. Quando a água perde velocidade, o material transportado vai sendo depositado, com as partículas mais densas e maiores (cascalho, diamantes, ouro ou outros minerais metálicos) as primeiras a serem depositadas seguindo-se as areias e argilas. A mistura heterogénea inicial é então segregada pela ação da corrente de água e a variação na sua capacidade de transporte de partículas. Ocorre um processo de classificação ou segregação natural uma vez que as partículas são separadas com base no seu tamanho, densidade e forma (Rodrigues *et al*, 2000).

Outro fator que afeta os locais de deposição dos diamantes e, conseqüente, as áreas onde estes ocorrem é a morfologia das margens e os leitos dos rios. Depressões, buracos, fissuras, canais ou barreiras são estruturas que alteram a capacidade de transporte das águas e constituem pontos propícios para a acumulação de diamantes. O lado interno dos meandros, e o alargamento repentino dos rios, atuam como armadilhas constituindo, também, pontos preferenciais para a deposição de diamantes.

Os diamantes mais pequenos e mais densos viajam através dos interstícios dos sedimentos no fundo da camada de cascalho tendo, por isso, uma maior probabilidade de deposição perto do limite entre a camada de cascalho e o substrato rochoso. O transporte dos diamantes através dos cursos de água gera também segregação na qualidade dos diamantes, com conseqüências no seu valor. Os diamantes são frágeis, e ao longo do seu transporte pelos rios, o choque entre partículas pode quebrá-los o que contribui para ocorrência de fraturas nas pedras e a conseqüente perda de qualidade.

Os diamantes que apresentem inclusões e fraturas internas terão, naturalmente, maior tendência para quebrar-se. A propensão que alguns diamantes têm em se quebrar e a seleção natural do tamanho das partículas através da perda de energia por parte da água, provoca um decréscimo na média dos pesos de diamantes ao longo do fluxo de água. Consequentemente, à medida que estes viajam para longe dos kimberlitos que os originam os diamantes são de menor dimensão mas de maior qualidade (Chambel *et al*, 2013).

Seguidamente apresenta-se uma listagem dos depósitos secundários e unidades geológicas relevantes presentes nas regiões das Lundas, região na qual está inserida a área alvo do estudo levado a cabo para esta dissertação.

Depósitos aluvionares das Lundas (Monforte, 1993)

- ❖ Depósitos relacionados de forma direta e imediata com a atual atividade dos rios.

- ❖ Margens de rios e ilhas de cascalho – Acumulações depositadas por cursos de água em determinados locais das margens e ilhas ou no meio do leito do rio perto do nível da água sob a forma de barras longas em locais onde o rio alarga e a corrente é mais fraca.

- ❖ Depósitos relacionados com atividade antiga de rios. As peneplanícies (regiões quase planas devido à erosão normal das águas correntes que desgastam as elevações e as foram aplanando) que datam do Miocénico e Plio-Plistocénico estão a ser alvo, atualmente, da erosão. Os principais rios cortam estas peneplanícies e criam depósitos de vale e terraços.
 - Depósitos de planícies aluvionares – depositados em uma ou ambas as margens de um rio. Podem ser subdivididos em: 1) Depósitos planos – disseminados ao longo de largas plataformas fluviais dos grandes rios. 2) Depósitos de enseada – ocorrem nos vales estreitos dos afluentes secundários. Estes depósitos geram reservas muito rapidamente.
 - Depósitos de terraços – localizados nos flancos das valas com a elevação a variar entre os 1 e 40 metros acima do nível da água.
 - Depósitos independentes da presente rede hidrográfica.

Grupo Kwango – Formação Calonda

Esta formação foi definida na região das Lundas (Andrade, 1953a, b; 1954) e mais tarde incluída no grupo Kwango (Monforte *et al*, 1979; Cahen 1983). Possui espessura média de 40-60 metros. É considerado o primeiro coletor de diamantes, dado que a sua formação coincide com os episódios de diastrofismo continental anteriormente referidos e com a destruição supergénica dos kimberlitos mineralizados. A Formação Calonda coletou os produtos da destruição de kimberlitos e lamproítos (Delville, 1973; Rodrigues, 1993). A formação terá tido a sua origem através do preenchimento de depressões limitadas por falhas resultantes dos episódios tectónicos extensivos relacionados com a abertura do Atlântico Sul (Reis *et al*, 2000).

É constituída, maioritariamente, por depósitos de ambientes torrenciais relacionados com as elevações de terreno. Estas elevações contribuíram para um ambiente com elevada energia e capacidade de transporte, num meio denso e viscoso, onde os clastos angulosos e finos são transportados em suspensão por uma massa argilosa e densa. Intercalações conglomeráticas e argilosas tornam-se recorrentes à medida que as diferenças no relevo se tornam menos pronunciadas.

No topo da sequência da formação existem níveis limoníticos, siliciosos, e carbonatados, que indicam uma maior frequência de estações de seca e a total ausência de águas superficiais. A formação termina com um nível de sedimentos terrígenos siltosos correspondentes a um transporte de baixa energia e de fluxo laminar juntamente com episódios de transporte eólico.

Segundo Monforte (1993), podem ocorrer três formas distintas, do menor para o maior valor económico:

- Aspeto conglomerático com blocos angulosos a sub-angulosos e com extensão reduzida.
- Apresenta-se de forma mais fina que os anteriores, com dominância de quartzitos e com elevada extensão.
- Com menor espessura, erodidos e constituídos por elementos de menor dimensão dentro de uma matriz argilosa (Pereira *et al*, 2003).

Grupo Kalahari

A formação deste grupo coincide com os principais ciclos de erosão responsáveis pelo desgaste da topografia regional e dos quais resultaram vastas planícies. Este grupo foi inicialmente definido por Lepersonne (1945) e depois completado por Cahen *et al* (1946). O grupo Kalahari foi

dividido em três formações: Formação Kamina, Grés Polimorfos e as Areias do Kalahari. Referindo em concreto a província das Lundas, este grupo ocorre sob a forma de duas unidades litológicas:

- Formação das areias ocres, constituída por camadas de cascalho subjacentes a areias de tonalidades ocre e amarelo,
- Grés Polimorfos, formação composta essencialmente por conglomerados, arenitos, calcadónia e arenitos quartzíticos siliciosos (De Ploey *et al* 1968).

Eluviões de vertente (Monforte, 1993)

São criados pelo deslizamento dos níveis superiores de cascalho através de flancos de depressão. Derivam diretamente da formação Calonda ou de cascalhos do Plio-Plistocénico.

Depósitos aluviais-eluviais diamantíferos do Pós-Pliocénico

Estes depósitos estão associados ao último evento de aplanção do relevo na bacia do Congo. Este evento ocorreu após a deposição da Formação das Areias Ocres chegando mesmo a intersestrar as peneplanícies do Miocénico e do Cretácico. A partir da peneplanície do Pliocénico é possível individualizar depósitos eluvio-aluviais que podem conter diamantes: (I) cascalhos muito dispersos e clastos da formação Grés Polimorfo, (II) areias de origem eólica sobrejacentes a cascalhos outrora de planaltos com espessuras de vários metros.

Os níveis das peneplanícies da rede hidrográfica atual e sub-atual são marcados por diversos depósitos sob a forma de terraços, alguns dos quais podem ser economicamente exploráveis (Monforte, 1988).

Leitos de cascalho dos afluentes secundários (Plio-Plistocénico) (Monforte, 1993)

Consistem em resíduos aluvionares da formação Calonda. Subdividem-se, do menor para o maior valor económico, em:

- Unidades depositadas diretamente acima do substrato pré-Calonda.
- Unidades depositadas diretamente acima de conglomerados ou lentes conglomeráticas do nível de base da formação Calonda.
- Depósitos com espessura variável de arenitos ocorrentes sobre os conglomerados basais da formação de Calonda.

Após as intrusões kimberlíticas, ocorreu um período intenso de episódios tectónicos transcorrentes e extensivos, que viriam a preencher grandes depressões, seguido de diversos ciclos de erosão-sedimentação. Estes processos originaram uma espessa sequência continental que contém todas as unidades sedimentares detríticas, nomeadamente: o grupo Kwango, o grupo Kalahari e os depósitos aluvionares recentes.

Formação Calonda remobilizada, Kalahari e depósitos de planalto

Consistem no resultado da erosão e remobilização de depósitos da Formação Calonda e do grupo Kalahari que foram depositados sobre os terraços e leito dos rios. É frequente o teor em diamantes diminuir neste tipo de depósitos uma vez que nestes ocorre a introdução de areias do Kalahari e cascalho, contribuindo assim para o aumento da fração de estéril. É importante referir que caso a erosão seja dirigida para os conglomerados basais da formação Calonda, os diamantes contidos poderão migrar e ficar armazenados nas camadas de cascalho sobrejacentes dando origem a depósitos mineralizados com teores elevados.

Terraços superiores (40 aos 20 m)

- São depósitos que atingem os 40 metros e dos quais existem dúvidas acerca da origem (Leakey, 1949). Apresentam uma mistura de clastos arredondados e angulosos e assume-se que sejam o resultado da erosão de taludes e que os clastos arredondados sejam provenientes de unidades do Pré-Pliocénico (Pereira *et al*, 2003). Consistem em camadas com espessuras até três metros, depositadas pelos rios durante os processos de erosão por eles promovidos.
- Situam-se aproximadamente a 20 metros acima dos leitos dos rios atuais acima de substrato de natureza cristalina. O seu valor económico é superior ao verificado nos anteriores.

Terraços de baixo nível dos rios principais

Possuem espessuras que variam entre 0,3 e os 1,5 metros e estão assentes sobre substrato cristalino ou de laterite. A laterite é o resultado da alternância nas condições climáticas de climas chuvosos para quentes e secos. Verifica-se que entre a deposição destes terraços e a deposição dos anteriormente referidos ocorrem alterações climáticas importantes (Monforte, 1988).

3.4 Metodologia de prospeção e pesquisa de diamantes usada em Angola

A prospeção e pesquisa de diamantes têm como objetivo a procura deliberada e orientada de depósitos exploráveis de diamantes. Para que um depósito seja classificado como economicamente viável é considerada suficiente a existência de uma relação, em peso, entre o mineral diamante e o estéril de uma parte para 25 milhões. Tal sucede porque o diamante é uma espécie mineral rara e muito valiosa.

A prospeção de diamantes baseia-se na busca de indicadores de ocorrência. Como foi referido anteriormente, todos os jazigos diamantíferos formam-se com uma relação mais ou menos direto com erupções kimberlíticas, com uma ou mais etapas intermédias de formações detríticas, originadas a partir de outras por sucessivos ciclos erosivos. O diamante é um mineral quimicamente estável e extremamente duro, sendo por isso muito resistente aos ciclos erosivos descritos acima. Surge por isso, em concentrações significativas nas formações detríticas originando desta forma os depósitos secundários aluvionares. Este tipo de depósitos representa cerca de 80% da exploração mundial de diamantes (Gouveia *et al*, 1993). A prospeção orienta-se para a deteção de kimberlitos, para o conhecimento do ciclo erosivo (erosão, transporte e deposição) e para a procura dos minerais que acompanham o diamante durante esse ciclo.

Para a prospeção de kimberlitos são procurados minerais índice, indicadores ou satélites, que são os próprios minerais constituintes mais característicos dos kimberlitos, normalmente, ilmenite magnésiana, piropo e diópsido cromífero, todos com densidades superiores a três. São utilizados métodos gravimétricos de separação de materiais densos das aluviões, e são a análise e interpretação dos resultados obtidos que permitem definir as zonas potencialmente favoráveis a prospeção mais detalhada.

Um método que se revelou importante para a busca de depósitos aluvionares denomina-se de *Loaming*. Consiste na recolha de amostras de terreno aluvionar junto dos rios colectores principais ou segundo uma malha mais larga. Estas amostras são separadas em duas frações, sendo a mais fina (infra 5mm) objeto de estudo em laboratório onde, após separação gravítica, são contados os grãos de ilmenite magnésiana, piropo e diópsido cromífero. Este método pode ser adaptado de modo a adequar-se a diferentes condições geológicas, climáticas e à morfologia dos terrenos locais (Gouveia *et al*, 1993).

Após a definição das zonas potencialmente diamantíferas passa-se à fase de pesquisa, cuja finalidade é conhecer e definir a morfologia do jazigo, as variáveis que vão condicionar a sua exploração e a quantificação de recursos / reservas. Nesta fase, são realizados poços e/ou sondagens de grande diâmetro (1-2 metros), segundo uma malha pré-definida, que vai sendo apertada con-

soante os resultados. Estes trabalhos destinam-se a parametrizar o jazigo nas suas principais variáveis: relação estéril-minério (REM), geometria do jazigo, teores dos materiais mineralizados, natureza do material mineralizado e das rochas encaixantes, e níveis freáticos. Estes dados permitem calcular os recursos, associar benefícios, converter para reservas e verificar as condições de explorabilidade.

A prospeção efetuada pela DIAMANG centrou-se desde o início sobre os depósitos aluvionares. Assim, privilegiou-se a procura direta dos diamantes, o que é compreensível, uma vez que, quando a empresa iniciou a sua atividade, ainda não eram conhecidas as fontes primárias dos diamantes e os resultados da prospeção, com esta estratégia, foram sempre positivos. Os serviços de prospeção da empresa foram aumentando ao longo do tempo de modo que em cada ano as reservas minerais definidas eram sempre superiores às reservas exploradas (Gouveia *et al*, 1993). As atividades da empresa no que respeita às fases de prospeção subdividiam-se em:

Fase de reconhecimento – Trabalho ligeiro, que consistia na procura e recolha de elementos que transmitissem uma ideia genérica da geologia da região e que permitisse avaliar o seu interesse do ponto de vista diamantífero. Para tal eram procurados afloramentos rochosos, camadas de cascalho das quais eram recolhidas amostras bem como dos leitos dos cursos de água.

Fase de prospeção geral – Fase onde se pretendia fornecer dados sobre a existência ou não de diamantes em áreas devidamente localizadas. Para cada curso de água eram definidos sectores de prospeção, delimitados por dois tributários de um curso de água e, em cada sector, uma linha base, estabelecida numa das margens do rio e geralmente paralela à direção média do sector. Seguidamente, definiam-se linhas distanciadas de 400 m para execução dos poços de prospeção, e onde o espaçamento entre poços distava cerca de 100 m. Nestes poços recolhiam-se as amostras das camadas de cascalho e fazia-se o tratamento posterior.

O cascalho retirado dos poços era subdividido nas seguintes classes granulométricas por crivagem manual:

- Superior a 12,80 mm, sendo estes rejeitados;
- De 5,88 mm a 12,80 mm;
- De 3,03 mm a 5,88mm;
- De 1,09 mm a 3,03 mm;
- Inferior a 1,09 mm, também estes rejeitados.

As três classes intermédias eram submetidas a um processo de separação gravítica (jigagem) e eram-lhes atribuídos índices consoante o grau do concentrado obtido em termos do conteúdo em diamantes.

Fase de prospeção sistemática – Teria início assim que fossem descobertos diamantes. As linhas de poços passariam a ter um espaçamento de 200 m e, caso esta fase revelasse continuidade da mineralização diamantífera, os trabalhos passariam a ser mais detalhados ao apertar a malha de abertura dos poços e cálculo de teores respetivos.

Fase de prospeção de desenvolvimento – Seguindo os trabalhos realizados na fase anterior, a malha de execução passa a ter, nos rios principais, linhas espaçadas de 50 m e poços abertos com distâncias entre si de 60 m. Nos afluentes, as linhas eram espaçadas de 100 m entre si e os poços distavam 30 m ao longo dos vales; nas colinas mantinham-se a malha referida para os rios principais. Nesta fase, os índices referidos na prospeção geral e os teores eram registados em plantas cuja escala variava consoante o grau de detalhe desses trabalhos.

Relativamente aos depósitos secundários, a DIAMANG estabeleceu a seguinte classificação:

Depósitos independentes da rede hidrográfica atual:

- Depósitos da Formação Calonda – deveriam fornecer-se indicações sobre os conglomerados basais e de diferentes níveis conglomeráticos, a sua constituição e estratificação, a forma dos componentes, a sua possível origem, tamanho médio, cor, estado de alteração e ainda indicações sobre a natureza das formações que recobriam os conglomerados;
- Depósitos constituídos por mantos de cascalho e de areia cascalhenta dos planaltos – sobre os quais deviam dar-se informações semelhantes às do caso anterior;
- Eluviões de vertente.

Depósitos relacionados com a antiga atividade de cursos de água:

- Depósitos de alto terraço – surgem entre 4 a 40 m em relação ao nível da água;
- Aluviões das partes altas dos vales;
- Aluviões enchendo depressões profundas, sob a planície aluvial;
- Aluviões das partes baixas do fundo do vale.

Depósitos relacionados, direta ou indiretamente, com a atividade atual dos cursos de água:

- Cascalhos das margens e das ilhas;
- Cascalhos dos fundos dos leitos dos cursos de água.

Com os resultados da prospeção de desenvolvimento procedia-se ao cálculo das reservas mineiras de cada depósito. Era considerado um valor de corte ou *cut-off* (teor mínimo para o qual a exploração seria rentável) de 0,30 ct/m³. Deste modo, só eram calculadas as reservas de depósitos com teor igual ou superior ao valor referido (Gouveia *et al*, 1993).

3.5 Métodos de mineração e tratamento de minérios

3.5.1 Métodos de mineração de depósitos aluvionares

Os depósitos aluvionares são explorados a céu aberto com equipamentos de remoção e transporte de grande capacidade. Como referido anteriormente, um depósito é economicamente explorável se apresentar uma REM superior ou na ordem dos 1 / 25 000 000, que pressupõe que por cada quilate explorado é necessário remover cinco toneladas de cascalho. Como as aluviões mineralizadas estão por sua vez cobertas por espessas camadas de estéril, é necessário a sua remoção para se proceder, posteriormente, ao desmonte do material diamantífero. Este material é depois transportado para as lavarias onde será submetido a tratamento para a separação dos diamantes do material estéril.

Devido às enormes quantidades de material removido e trabalhado são utilizados métodos de escavação e transporte com custos unitários o mais baixo possível: desmonte hidráulico, utilização de grandes e poderosos meios mecânicos tais como *draglines*, *motoscrapers*, escavadoras e retroescavadoras, *bulldozers*, etc. Muitas explorações diamantíferas efetuadas nos leitos dos rios utilizam processos de dragagem para a escavação (Gouveia *et al*, 1993).

3.5.2 Métodos de tratamento dos minérios diamantíferos

O tratamento processa-se em duas fases: (I) a fração diamantífera de cascalho é sujeita a processos de concentração hidrográvica, obtendo-se um concentrado e um rejeitado com a maioria dos minerais leves que acompanham o diamante; (II) o concentrado é submetido a processos adicionais de tratamento baseados não só em propriedades físicas específicas do diamante como

em outras que diferenciam o diamante dos materiais que normalmente o acompanham nos concentrados.

O cimento que consolida o minério pode ser mineralogicamente distinto sendo, no entanto, geralmente argiloso. Por esta razão, a primeira operação do tratamento consiste na desagregação e lavagem, para tal, são utilizados tambores rotativos com cargas de esferas de ferro fundido e calhaus rolados (*trommel*). Posteriormente, o material é dividido consoante a sua granulometria, em três frações, sendo rejeitada a fração mais grosseira e a mais fina.

Após estas operações preliminares, o material diamantífero é submetido a uma concentração gravítica num aparelho concentrador usado exclusivamente em diamantes denominados de “*pans*” rotativas. Trata-se de equipamentos que, através de processos de separação gravítica, atuam como desengrossadores, rejeitando 98% do material com que é alimentado; apresentam uma recuperação próxima de 100%.

O concentrado obtido é constituído essencialmente por minerais pesados que acompanham o diamante. É então sujeito a uma nova etapa concentradora, através do uso de jigas ou cones de meio denso. Estes atuam como aparelhos apuradores uma vez que o seu concentrado, já muito rico, não é aprimorado de forma significativa por métodos gravíticos.

Desta forma, inicia-se uma nova fase onde o material a tratar é em muito menor quantidade e onde são reunidos numa única instalação os concentrados de diversas lavarias. Nesta fase, os principais equipamentos utilizados são mesas ou correias engorduradas, nas quais se aproveita a propriedade seletivas dos diamantes de aderirem a superfícies engorduradas sendo que tal não se verifica nos restantes minerais associados. O concentrado é finalmente submetido à operação de picagem, isto é, à escolha manual dos diamantes (Gouveia *et al*, 1993).

4 METODOLOGIA

4.1 Estado da arte

A geoestatística é um ramo das ciências da Terra que surgiu na década de 60, no *Centre de Geostatistique de Fontainebleau* da *École des Mines*, Paris, devido à necessidade de caracterizar a dispersão espacial e/ou espaço-temporal de fenômenos naturais, a partir de um conjunto discreto e limitado de observações. Desde então teve enorme expansão e, atualmente, é aplicado aos mais variados domínios das Ciências da Terra e do ambiente para a modelização de fenômenos espaciais a eles ligados (Soares, 2006) como, por exemplo, depósitos minerais, reservatórios de hidrocarbonetos e sistemas aquíferos.

Os métodos geoestatísticos recorrem a algoritmos e/ou técnicas classificadas como de estimação ou de simulação (Goovaerts, 1997). Em ambos os casos, os resultados são apresentados sobre uma malha de blocos ou células dispostas regularmente a 2D ou a 3D, dependendo do caso em estudo.

Um procedimento classifica-se como de estimação quando dá origem a um único cenário ou resultado médio. A estimação pode ser aplicada à caracterização da morfologia de um corpo geológico e ao mapeamento de litologias e teores ou outras propriedades que descrevem as características do sistema. A krigagem é a ferramenta de estimação por geoestatística e gera uma única imagem média e, por isso, atenuada da realidade e sem quantificação da incerteza. Corresponde ao cenário mais provável da variável em estudo, respeitando os critérios de não-enviesamento e de minimização da variância do erro de estimação (Caers, 2011).

Contrariamente à estimação, os procedimentos de simulação utilizam leis de probabilidade e o procedimento de Monte Carlo, ou outro equivalente, para gerar vários resultados ditos equiprováveis ou com a mesma probabilidade de ocorrência. Deste modo, para um conjunto de observações são sempre gerados vários resultados, tantos quanto o utilizador pretender, e diferentes entre si exceto no local das observações. A simulação também pode ser aplicada à morfologia ou a propriedades contínuas (Almeida, 2010).

As abordagens de estimação e simulação complementam-se e, por isso, podem e devem ser utilizadas em simultâneo. Se globalmente os quantitativos obtidos são semelhantes, a quantificação das diferenças nos resultados das simulações constitui uma medida de incerteza, e pondera a quantidade de informação disponível com a sua heterogeneidade local. Um conjunto de imagens simuladas pode ser transformado facilmente em probabilidades de ocorrência, e por isso consti-

tui uma ferramenta poderosa nos estudos de viabilidade económica e também na simulação de processos tecnológicos.

Na geoestatística existem vários métodos de simulação mas todos apresentam resultados coincidentes com os dados experimentais nas suas localizações e condicionam os resultados a um modelo de continuidade espacial e a uma lei de distribuição global (Goovaerts, 1997; Soares, 2006; Almeida, 2010). Qualquer modelo de caracterização de zonas não amostradas de um sistema tem incerteza associada. Esta pode ser vista como a quantificação do desconhecimento de uma determinada propriedade nesse local e, assim, a quantificação é feita por uma lei de distribuição local. Se a variância da lei de distribuição for baixa, querera dizer existe pouca incerteza, se a variância é alta existe mais incerteza, possivelmente explicável devido à falta de informação, informação próxima contraditória ou uma mistura de ambas (Soares, 2006; Caers, 2011).

As metodologias geoestatísticas de estimação e simulação têm sido aplicadas aos depósitos aluvionares diamantíferos de Angola.

Campos (1995) procurou modelar depósitos diamantíferos da região da Lunda Norte, Angola, ao definir os domínios a estudar de modo a beneficiar de uma maior homogeneidade na distribuição espacial da variável, utilizando uma combinação de métodos deterministas e estocásticos. Foi feita a distinção entre as diferentes camadas de cascalho, o que resultou no cálculo de modelos morfológicos e de teores distintos para cada camada. O modelo morfológico foi desenvolvido a 2D através do uso da krigagem da indicatriz, a partir da qual conseguiu calcular a média dos valores estimados e a contagem dos blocos mineralizados. Os teores foram calculados baseados nas variáveis possança de cascalho, o peso das pedras e o teor em diamantes recorrendo à krigagem da acumulação (teor de diamantes em ct/m^3 multiplicado pela possança de cascalho) e à própria possança de cascalho.

Para a estimação de depósitos aluviais de diamantes, Valente (1999) comparou métodos geoestatísticos com o método de Sichel e os métodos empíricos. Este estudo foi realizado na mesma área do presente caso de estudo. O método geoestatístico utilizado foi a krigagem normal sempre que foi possível calcular variogramas e proceder ao seu ajustamento. Neste estudo não foram modelados variogramas das variáveis nº de pedras e tamanho das pedras. Tal foi justificado devido à natureza geológica da mineralização e com amostragem insuficiente que permitisse detetar as camadas de cascalho. O método empírico consistia na estimativa da densidade superficial média por médias móveis e multiplicações pela área dos blocos. Ainda nesse estudo concluiu-se que, contrariamente ao método de Sichel, a krigagem permite analisar as características morfológicas do estéril e do cascalho sendo por isso o melhor método para o efeito.

O método empírico usado apresenta enviesamento nos resultados obtidos devido aos conceitos inerentes ao método. O método de Sichel revelou ser o melhor para estimar o conteúdo diamantífero e os respetivos valores.

Almeida *et al*, (1994, 1997) apresenta uma metodologia para a modelação geoestatística da morfologia e dos quilates em diamantes; relativamente aos quilates apresenta-se um procedimento para a estimação do peso total em diamantes por classes de dimensão dos diamantes. A abordagem recorre ao conceito de controlo zonal, ou seja, a estimação das variáveis de quantidade tem em conta a morfologia das zonas diamantadas que é modelada em primeiro lugar por uma abordagem da indicatriz.

Outro estudo centrado no NE Angolano foi o de Rodrigues *et al* (2000), onde se refere que os principais modelos geológicos de diamantes nos depósitos eluvio-aluvionares do NE de Angola se devem ao conhecimento empírico acumulado ao longo de décadas de prospeção e exploração de jazigos diamantíferos aluvionares levados a cabo pela DIAMANG. O principal critério de prospeção é a granulometria, mais concretamente no cascalho. A análise de distribuição dos diamantes nas camadas não era considerada importante e a exploração era realizada considerando as áreas de influência dos poços de amostragem que apresentassem teores diamantíferos considerados economicamente interessantes. Neste estudo foi desenvolvido, com base em dados da DIAMANG das cotas dos conglomerados basais da Formação Calonda, um modelo morfológico do substrato rochoso, usando o método geoestatístico da krigagem, de modo a verificar até que ponto as estruturas do substrato influenciam a concentração de diamantes recuperada pelas sondagens. O estudo concluiu que, não sendo o único fator responsável pela presença de diamantes, não deixa de ser um dos fatores mais decisivos para a concentração dos mesmos.

4.2 Métodos Usados

Neste subcapítulo descreve-se a metodologia utilizada para abordar o caso de estudo de modelação de um depósito diamantífero no NE de Angola.

A informação de partida consiste num conjunto de poços verticais, de diâmetro variável, onde estão registadas as espessuras e possanças das litologias atravessadas (estéril ($E_e(x)$), cascalho ($P_c(x)$), rocha base) e, para cada interseção com a litologia cascalho, o número de pedras e o peso em diamantes. Como é conhecida a possança e a área de cada amostra (ou seja o volume de amostra), as variáveis de valor absoluto número de pedras e peso das pedras na amostra foram convertidas em variáveis de valor relativo e são estas as que são modeladas: número de pedras por m^3 ($N_d(x)$) e peso em diamantes por m^3 ($W_d(x)$).

Com base nos dados de partida, e porque as possanças de cascalho são variadas e os quantitativos de diamantes não estão desagregados dentro da camada de cascalho, geraram-se as variáveis acumulação do número de pedras ($A_{nd}(x)$), e acumulação de teores ($A_{wd}(x)$). Numa localização x_i , para um troço de cascalho com possança $P_c(x_i)$ e número de pedras $N_d(x_i)$, a acumulação do número de pedras é calculada pelo produto:

$$A_{nd}(x_i) = N_d(x_i) \cdot P_c(x_i)$$

E do mesmo modo para o peso em diamantes:

$$A_{wd}(x_i) = W_d(x_i) \cdot P_c(x_i)$$

Na abordagem desenvolvida, quer a 2D quer a 3D, a modelação é feita para as variáveis espessura total de estéril ($E_e(x)$), possança de cascalho ($P_c(x)$), acumulação do número de pedras ($A_{nd}(x)$), e acumulação de teores ($A_{wd}(x)$). Uma vez conhecidos os estimadores destas variáveis, quer por simulação quer por estimação, a passagem ao número de pedras por m^3 e peso em pedras por m^3 é feita pelos seguintes quocientes:

$$[N_d(x_i)]^* = \frac{[A_{nd}(x_i)]^*}{[P_c(x_i)]^*}$$

e

$$[W_d(x_i)]^* = \frac{[A_{wd}(x_i)]^*}{[P_c(x_i)]^*}$$

A metodologia proposta a 3D está sintetizada no fluxograma da figura 4.1, na parte mais à direita. Como já referido, a metodologia proposta é a 3D, mas para efeitos de validação compararam-se com os resultados de uma abordagem clássica a 2D.

Na avaliação a 3D consideraram-se dois cenários, um onde a modelação termina na camada de base e outro onde a modelação é mais conservadora e termina na profundidade de todas as sondagens mesmo as que não atingiram o substrato.

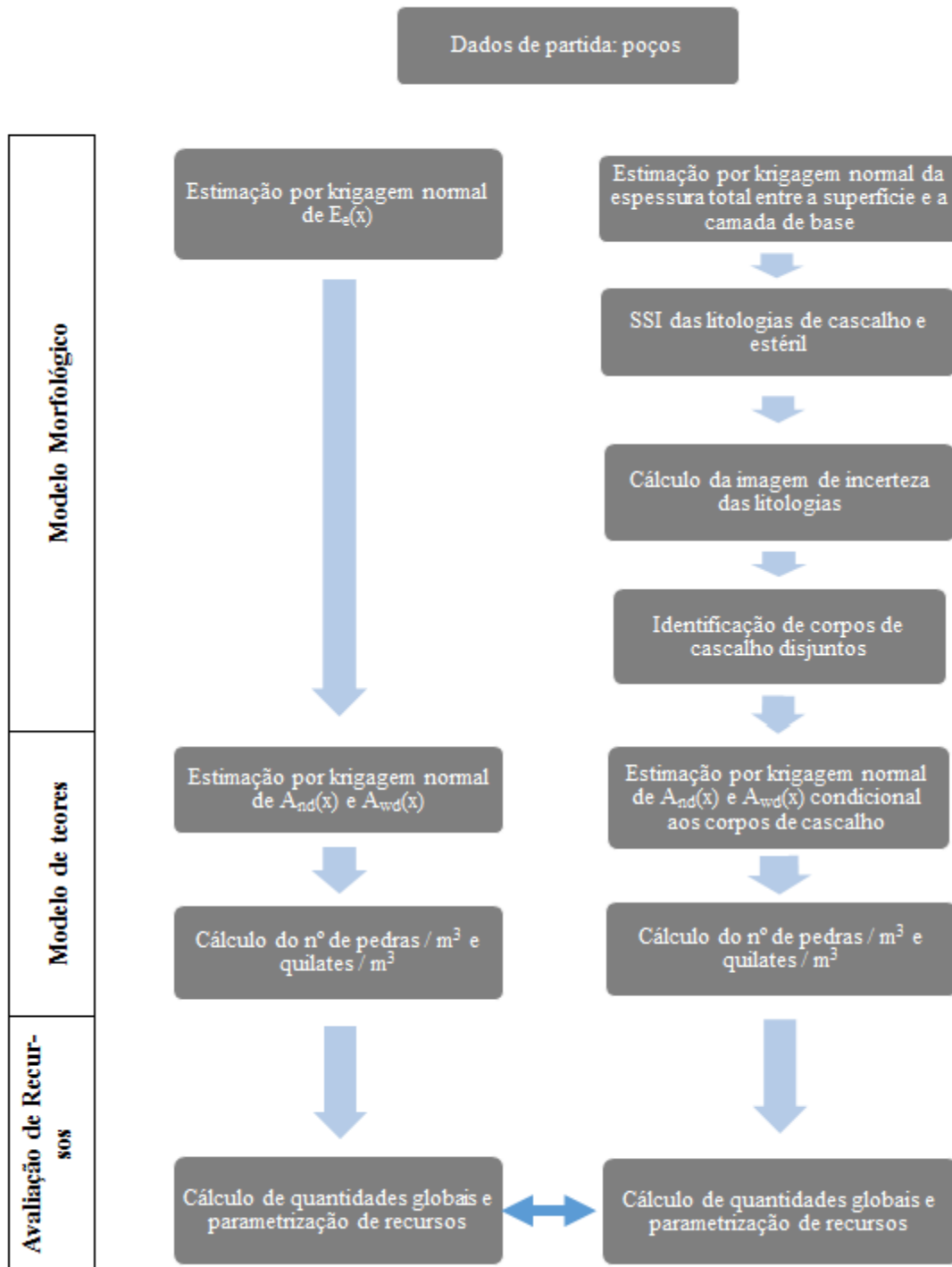


Figura 4.1 – Fluxograma das etapas levadas a cabo na construção dos modelos 2D (à esquerda) e 3D (à direita).

4.2.1 Construção do modelo a 2D

Na abordagem a 2D, as camadas de estéril e cascalho foram trabalhadas separada e independentemente. Refira-se que cada poço pode ter uma ou várias camadas de estéril ou de cascalho mas, na abordagem a 2D, se existirem várias camadas intercaladas do mesmo tipo as espessuras são modeladas por total.

Assim, em cada localização x_i dos poços, calcularam-se a espessura total de estéril, a possança total de cascalho e as acumulações relativas em número de pedras e quilates. Trata-se de uma modelação a 2D, onde o 3D é representado por uma variável (espessura total de estéril ou possança total de cascalho). Não foram feitos testes de optimização da malha de blocos, tendo-se adoptado pela dimensão lateral de 10 metros que se achou ser adequada à mineração por escavadoras de pequeno / médio porte.

De seguida, para estas quatro variáveis de estudo foram calculados variogramas experimentais, ajustados modelos teóricos e estimados os respetivos valores numa malha rectangular de blocos que envolve toda a área de estudo. Foi digitalizada uma área envolvente para restringir o cálculo dos quantitativos à imediação das sondagens. Tal como referido, os quantitativos da acumulação foram transformados nas variáveis relativas número de pedras e peso em diamantes.

Os resultados estimados permitem apresentar os quantitativos médios e totais de estéril, cascalho, número de pedras e peso total de pedras; permitem ainda apresentar imagens mostrando as zonas onde são espectáveis os valores mais altos e os mais baixos. Os quantitativos são ainda comparados com os calculados por médias dos dados de partida.

É importante referir que esta abordagem a 2D possui limitações, em primeiro lugar não mostra a variação em profundidade quando ocorrem várias camadas de cascalho e também não mostra a incerteza, porque foi utilizada uma metodologia de estimação. Todavia achou-se útil proceder à modelação a 2D para efeitos de validação do modelo a 3D, também porque os quantitativos resultado dos dois modelos têm de ser da mesma ordem de grandeza.

4.2.2 Construção do modelo a 3D

O modelo a 3D compreende a construção de um modelo da morfologia, onde são discriminadas as litologias estéril e cascalho, a que se segue o modelo de quantidades / teores condicionados à morfologia. Nesta abordagem, a malha de blocos foi discretizada em profundidade com a resolução de 0,20 metros, mantendo-se na horizontal a dimensão de 10 metros de lado.

4.2.2.1 Construção do modelo morfológico a 3D

O modelo morfológico tem dois objectivos, primeiro delimitar em profundidade o depósito em estudo, entre a chamada camada base e a superfície do terreno e, em segundo lugar, distinguir entre as ocorrências de estéril e cascalho (modelo binário). Por estas razões, o modelo morfológico condiciona o modelo da quantidade de diamantes.

A construção inicia-se com a estimação, por krigagem normal, da espessura total entre a superfície do terreno e a camada base, ou seja, a soma das espessuras parciais das camadas sucessivas de estéril e cascalho. Para efeitos da modelação a 3D, considerou-se que a camada base é uma superfície de cota zero ou de referência.

Esta estimação foi feita em duas sub-etapas. Primeiro seleccionaram-se os poços que atingiram a camada base, somaram-se as espessuras das camadas de estéril e cascalho destes poços, e fez-se uma primeira estimação da espessura total. De seguida, cruzaram-se os valores estimados com os restantes poços e, nalguns casos, verificou-se que a espessura estimada era inferior à do poço. Seleccionaram-se então estes poços (que são muito poucos), adicionaram-se ao conjunto inicial de poços que atingiram a camada base e fez-se uma segunda estimação das espessuras. Este procedimento garante que a espessura estimada nunca é inferior à observada nos poços, podendo até ser superior se os poços não atingirem o substrato.

A modelação a 3D propriamente dita inicia-se logo depois de construído este modelo de espessuras totais. Em termos do referencial na vertical, a camada de base assume-se como plana e de cota zero, donde todas as restantes observações são reposicionadas com base neste pressuposto.

Para se proceder à modelação, a informação litológica das sondagens foi cruzada com os horizontes da malha de blocos de 10m x 10m x 0,2m, tendo-se classificado cada troço de sondagem numa variável proporção ($P(x)$) de acordo com a ocorrência de estéril e cascalho. Se um troço de 0,2m é totalmente de estéril considera-se $P(x_i) = 0$; se for totalmente de cascalho considera-se $P(x_i) = 1$; nos outros casos considera-se a proporção do comprimento de cascalho no troço de 0,2 metros.

Seguidamente calcularam-se os variogramas experimentais a 3D desta variável $P(x)$, ajustaram-se os respectivos modelos teóricos e geraram-se cenários por Simulação Sequencial da Indicatriz (SSI). A simulação inicia-se nos blocos que contém as observações, onde se convertem, por Monte Carlo, os valores das proporções observadas $P(x)$ numa variável indicatriz; depois a simulação prossegue como habitualmente de forma sequencial percorrendo todos os nós (blocos). A geração de várias imagens é função da geração de caminhos aleatórios distintos.

Depois de geradas várias imagens, calculam-se a imagem média e a imagem da incerteza (entropia) que reflete as diferenças entre as imagens simuladas. Para gerar a imagem média, é calculada a média dos valores simulados em cada bloco, seguidamente é calculada a média global dos valores médios calculados em cada bloco (proporção global de cascalho no volume estudado) e, finalmente, convertem-se os valores médios calculados bloco a bloco na variável binária pretendida (estéril ou cascalho) de forma a respeitar tanto a proporção global das duas litologias como as maiores proporções locais (Soares, 2006).

Nesta abordagem, o volume de estudo é superior ao do modelo a 2D, porque considera um volume entre a superfície e a camada de base, mesmo nas sondagens que não atingiram a camada de base. Trata-se de uma abordagem que pode ser designada de optimista.

Para se poder comparar resultados entre os modelos 2D e 3D, e para se considerar um quantitativo dito mais conservador com o que se conhece das sondagens (sem efeitos de extrapolação em profundidade), somaram-se as espessuras de estéril e cascalho do modelo a 2D e subtraiu-se esta espessura total à superfície que representa o relevo. O resultado é a manutenção da superfície da camada de base como superfície de referência e a geração de um novo volume este praticamente igual ao do modelo a 2D (só não é exatamente igual devido ao particionamento do espaço em blocos).

A figura 4.2 mostra a relação conceptual entre estas superfícies e os poços numa vista de perfil, onde a superfície do terreno é representada a cor cinza, a superfície da camada base está a vermelho e a superfície que delimita inferiormente o modelo com base em todas as sondagens esta a cor azul. Refira-se que os mesmos resultados da SSI são cruzados com estes dois volumes ditos optimista e conservador obtendo-se duas avaliações com quantitativos distintos.

4.2.2.2 Construção do modelo de teores a 3D

Nesta etapa pretende-se construir um modelo das quantidades de diamantes, em número de pedras e quilates, condicional à litologia de cascalho que é o resultado do modelo morfológico.

A construção do modelo de teores a 3D é limitada pelos dados disponíveis nos poços, que não dispõem de observações regulares dos quantitativos de diamantes em profundidade, e apresentam os resultados acumulados por cada camada de cascalho intersetada. Assim, para utilizar os valores em profundidade com a resolução de 0,2 metros, poder-se-iam repetir os valores nos troços de 0,2 m coincidentes com cada camada de cascalho, o que na prática pouco acrescentaria ao modelo 2D anterior. O cálculo de variogramas a 3D também seria inviável devido ao carácter errático das pedras.

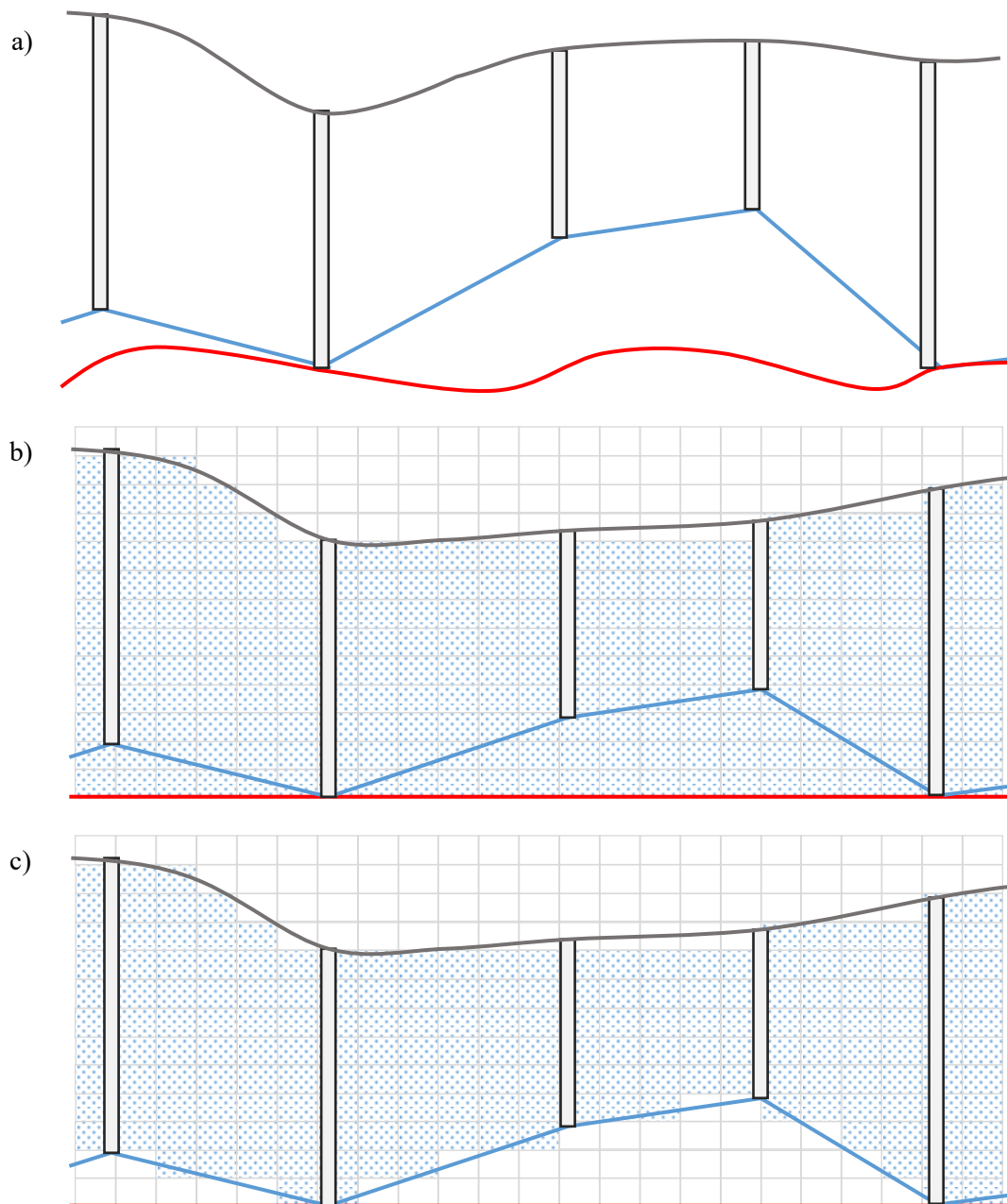


Figura 4.2 – Representação conceptual das sondagens e superfícies de referência do modelo a 3D, superfície do terreno a cor cinza, camada base a cor vermelha e superfície da base das sondagens a cor azul: (a) referencial original; (b) referencial transformado onde a camada base é transformada em plano e identificação dos blocos a 3D do modelo optimista; (c) idem ao anterior mas com identificação dos blocos do modelo conservador.

Mesmo assim, para aproveitar os valores distintos de teores que ocorrem nas várias camadas de cascalho identificadas nos poços em profundidade, propõe-se o seguinte procedimento:

- 1) No modelo morfológico a 3D (onde se considera apenas o modelo otimista ou o mais volumoso), que representa as litologias de estéril e cascalho, identificar e numerar os objectos (com K – número de objectos) disjuntos de tipo cascalho que se podem constituir.
- 2) Gerar K novos referenciais de células a 2D, lateralmente coincidentes com os anteriores.
- 3) Cruzar os dados das sondagens com estes K referenciais, e extrair as variáveis condicionais por objecto: possança de cascalho ($P_c(x_i | k_j, j = 1, \dots, K)$), acumulação de número de pedras ($A_{nd}(x_i | k_j, j = 1, \dots, K)$) e acumulação do peso ($A_{wd}(x_i | k_j, j = 1, \dots, K)$).
- 4) Calcular variogramas das variáveis possança e acumulação, estimar estas variáveis por krigagem e recalculá-las para as variáveis originais número de pedras e peso.
- 5) Colocar os valores estimados na malha a 3D de blocos.
- 6) Avaliar e apresentar quantitativos, quer sobre a forma de tabelas quer sob a forma de imagens de teores.

Importa mencionar dois aspectos: (I) O procedimento proposto mostrou a vantagem de se poder construir um modelo 3D de teores compatível com a informação reportada nas sondagens, assim como permitiu correlacionar teores entre troços de cascalho de diferentes sondagens no caso das múltiplas interseções com camadas de cascalho. Este facto é comprovado no cálculo dos variogramas dos teores, que mantém uma qualidade semelhante ao do modelo a 2D. (II) Para que os resultados se mantenham estáveis no cálculo inverso do número de pedras e quilates a partir das acumulações, optou-se por estimar por krigagem normal a possança de cascalho em cada um destes novos referenciais e não utilizar os valores que poderiam ser calculados com base na imagem média da SSI.

4.3 Fundamentos teóricos dos métodos geoestatísticos utilizados

4.3.1 Continuidade espacial

As ferramentas de quantificação da continuidade espacial desempenham um papel fulcral na geoestatística pois permitem (Pereira, 1981; Soares, 2006): (1) a caracterização do modo como se dispersam espacialmente as características de um recurso, através da quantificação da continuidade espacial e da anisotropia, sendo esta etapa conhecida como análise estrutural; (2) ponderar a influência dos dados conhecidos nas etapas de inferência com a estimação e/ou a simulação.

O variograma $\gamma(h)$ é a ferramenta tradicional da geoestatística para quantificar a continuidade espacial. É calculado pela semi média do quadrado das diferenças entre pares de valores observados ($Z(x)$ e $Z(x + h)$), sendo $N(h)$ o número de pares de pontos considerados para a mesma classe angular separada da distância h :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{a=1}^{N(h)} [Z(x_a) - Z(x_a + h)]^2$$

O variograma (e também a covariância espacial) correspondem a medidas médias da correlação entre duas variáveis aleatórias. Os parâmetros de estacionaridade são constituintes fundamentais dos modelos geoestatísticos uma vez que, deste modo, a correlação de variáveis pode ser medida pela covariância e pelo variograma pois a correlação não depende da localização das variáveis mas sim da distância entre elas. A correlação entre amostras permite, por sua vez, medir a continuidade espacial ou dispersão das variáveis caracterizadoras de um recurso natural.

Após o cálculo do variograma, para diferentes passos h , é necessário modelizá-los por uma função teórica. Para tal, os valores dos variogramas experimentais são ajustados por uma curva atenuada média, função de um número reduzido de parâmetros que quantifiquem a continuidade espacial de uma variável. Ajustar um variograma é o mesmo que inferir um andamento de $\gamma(h)$ representativo para toda a área e para toda a gama de valores de h , a partir dos valores conhecidos experimentalmente.

Esta etapa é muito importante uma vez que faz a síntese das características estruturais do fenómeno espacial (grau de dispersão, continuidade, anisotropias, etc.) numa interpretação única e coerente.

Estas funções devem fornecer soluções estáveis no posterior cálculo dos ponderadores dos estimadores lineares. Para tal, os variogramas devem assumir valores positivos para qualquer distância. Esta condição de positividade dos modelos limita, *a priori*, a escolha das funções interpoladoras dos valores experimentais dos variogramas. Deste modo, dentro das funções definidas positivas consideram-se habitualmente o modelo esférico e o exponencial que são os utilizados no capítulo do caso de estudo. Estes modelos podem ser combinados por somas, normalmente, por não mais de duas funções.

Modelo esférico – consiste numa função polinomial com dois parâmetros, um patamar C (limite superior para o qual tendem os valores do variograma com o aumento dos valores de h) e a amplitude (distância a partir da qual os valores de $\gamma(h)$ param de crescer e são iguais a um pa-

tamar que é normalmente coincidente com a variância de $Z(x)$, medindo por isso a distância a partir da qual os valores de $Z(x)$ deixam de estar correlacionados).

$$\gamma(h) = \begin{cases} C \left[1,5 \frac{h}{a} - 0,5 \frac{h^3}{a^3} \right] & \text{para } h \leq a \\ C & \text{para } h > a \end{cases}$$

Modelo Exponencial – é uma função também com dois parâmetros – amplitude e patamar - sendo este último o valor para o qual o variograma tende assintoticamente.

$$\gamma(h) = C [1 - e^{-3h/a}]$$

Neste modelo, o valor da amplitude a é a distância em que o modelo atinge cerca de 95% do patamar: $\gamma(a) = 0,95C$.

Teoricamente o valor do variograma é nulo para $h = 0$. Na prática há um valor mínimo de h entre amostras para o qual pode ser quantificado o valor de $\gamma(h)$. Quando esse valor mínimo é elevado significa que há uma grande variabilidade à pequena escala, isto é, referente às menores distâncias entre amostras ou observações, e pode acontecer que $\gamma(h)$ não tenda para zero quando h tende para zero. Este fenómeno ocorre quando há uma inflexão ou descontinuidade no andamento do variograma a uma escala não captada pelas amostras, isto é, entre h e h_{min} . Nestas situações, o variograma é modelizado por uma ordenada na origem igual a uma constante C_0 a que se atribui o termo “efeito pepita”.

A modelização do efeito pepita por uma constante diferente de zero reflete somente o desconhecimento do fenómeno àquelas escalas face ao aumento da incerteza que se verificará num processo de estimação seguinte.

4.3.2 Estimação por krigagem

A krigagem é uma família de interpoladores utilizada na geoestatística, que inclui variantes estacionárias e não estacionárias. Trata-se de um termo utilizado pela primeira vez por Matheron (1965). A krigagem da indicatriz é a aplicação deste estimador a variáveis de tipo indicatriz como sejam as utilizadas na modelação da morfologia em fenómenos espaciais.

A krigagem abrange dois fatores

- O fator da distância estrutural entre amostras e o ponto a estimar pois quanto mais próximas estiverem as amostras do ponto a estimar, maior será o seu peso no estimador.
- O fator de desagregação originado pela matriz de covariâncias entre as amostras, quanto mais correlacionadas estiverem as amostras, maior o efeito de agrupamento ou redundância e menor será o seu peso individual na construção do estimador.

Quando as amostras são independentes, isto é, quando estão de tal modo afastadas umas das outras e já não exibem correlação espacial, os ponderadores dependem somente das covariâncias entre as amostras e o ponto a estimar. Neste caso, o único fator que intervém para a estimação será o fator distância estrutural.

4.3.2.1 Krigagem normal

A krigagem normal é uma combinação linear do conjunto de n observações vizinhas de um local a estimar x_0 : $Z(x_a)$, $a = 1, \dots, n$

$$[Z(x_0)]^* = \sum_{a=1}^n \lambda_a Z(x_a)$$

que cumpre os dois critérios em relação ao erro de estimação $\varepsilon(x_0) = [Z(x_0)]^* - Z(x_0)$: (i) não enviesamento $E\{\varepsilon(x_0)\} = 0$ e (ii) variância de estimação mínima $\min\{\text{var}(\varepsilon(x_0))\}$.

A variável $Z(x)$ designa uma qualquer variável contínua, como um teor, uma variável indicatriz ou a probabilidade de pertença.

Krigagem simples

Trata-se de uma variante de krigagem que assume que a média de $Z(x)$ na localização a estimar x_0 é conhecida e igual a m :

$$[Z(x_0)]^* - m = \sum_{a=1}^N \lambda_a [Z(x_a) - m]$$

4.3.3 Simulação geoestatística

É uma família de métodos usados para gerar conjuntos de imagens do fenómeno espacial em estudo e, em todas elas, são reproduzidos os estatísticos de variabilidade espacial, tais como: histograma (lei de distribuição da variável em estudo) e variograma ou covariância espacial, quantificados pelas amostras ou observações (Goovaerts, 1997).

O comportamento extremo simultâneo do conjunto de pontos de um mapa só é possível através de várias realizações da distribuição conjunta no espaço dos valores do atributo. Deste modo, os resultados da simulação não só fornecem a imagem mais provável das características de um recurso, mas também um conjunto de imagens equiprováveis com a mesma variabilidade espacial dos valores experimentais.

Para a simulação de variáveis binárias como as tratadas neste caso de estudo utilizou-se a Simulação Sequencial da Indicatriz (SSI).

O princípio da simulação sequencial geoestatística é simples e baseia-se no condicionamento sucessivo à informação existente na vizinhança dos pontos a simular, que é obtido, tanto pelos valores experimentais, como pelos valores simulados nas iterações anteriores. Este procedimento é realizado em passos sequenciais sucessivos, e de acordo com a relação de Bayes:

$$F(Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_N) = F(Z_1) F(Z_2|Z_1) F(Z_3|Z_1, Z_2) \dots F(Z_N|Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_{N-1})$$

Considere-se a lei de distribuição conjunta de N variáveis aleatórias, e n valores condicionantes experimentais, $F(N) = (Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_N|n)$. O processo de simulação genérico de $F(N)$ é passível de ser resumido nas seguintes etapas:

- i. Simulação de um valor z_1 , considerando a função de distribuição cumulativa $F = (Z_1|n)$, a partir de um caminho aleatório, escolhido sobre o campo geométrico em estudo. Uma vez realizada a simulação de z_1 , o valor obtido é adicionado ao conjunto de informação condicionante, para os subseqüentes passos de simulação, passando n a $n + z_1$;
- ii. Simulação de um novo valor z_2 a partir da lei condicional Z_2 , tendo por base os $(n + 1)$ valores condicionantes. Finda a simulação de z_2 , os dados condicionantes passam a ser actualizados para $(n + 2) = (n + 1) + z_2$;
- iii. Repetição do processo sequencial até se proceder à simulação completa das N variáveis.

Saliente-se que, as N variáveis aleatórias dependentes $Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_N$, podem ser correspondentes à mesma característica, espacialmente referenciada nos N nós do campo espacial em es-

tudo. Caso se considerem os n valores condicionantes iniciais como correspondentes aos valores experimentais, então $F(N) = (Z(x_1), Z(x_2), Z(x_3), \dots, Z(x_N)|(n))$.

No entanto, é no desconhecimento das N funções cumulativas condicionais, em casos práticos, que se centra a dificuldade de aplicação da simulação sequencial.

$$\begin{aligned} & \text{prob}\{Z(x_1) < z|(n)\} \\ & \text{prob}\{Z(x_2) < z|(n+1)\} \\ & \text{prob}\{Z(x_3) < z|(n+2)\} \\ & \quad \vdots \\ & \text{prob}\{Z(x_N) < z|(n+N-1)\} \end{aligned}$$

É a necessidade do conhecimento destas funções que limita a aplicação prática destes algoritmos. No entanto, Journel e Alabert, 1989, consideram a utilização da krigagem como a ferramenta adequada na estimativa dessas funções, particularmente a krigagem multigaussiana para a simulação sequencial gaussiana (SSG) e a krigagem de indicatriz para a SSI.

Para a aplicação da SSI, os dados originais podem representar variáveis contínuas ou categóricas, que são transformadas, segundo o formalismo da indicatriz, e constituem os dados de entrada para este algoritmo de simulação, que pode ser sintetizado nos seguintes passos (Soares, 1998):

- i. Para uma localização x_1 escolhida aleatoriamente dentro do volume V , cálculo da probabilidade de pertença à litologia cascalho pelo estimador de krigagem da indicatriz:

$$[I(x_1)]^* = \text{prob}\{x_1 \in X_{\text{Cascalho}}\}^*$$

- ii. Geração de um valor aleatório, com lei uniforme e distribuído no intervalo $[0,1]$, que determinará o valor simulado em x_1 . Se $s \leq [I(x_1)]^*$ então x_1 é simulado como de litologia cascalho (um – 1), caso contrário é simulado como de litologia estéril (zero – 0).
- iii. Os valores entretanto simulados, $I(x_1)$ são adicionados ao conjunto condicionante para a simulação dos restantes blocos. O processo sequencial é repetido até se proceder à simulação da totalidade dos blocos em que foi discretizado o volume V .

4.3.4 Análise da entropia das imagens binárias simuladas

Para caracterizar a incerteza de um conjunto de imagens binárias simuladas utilizou-se uma medida de incerteza designada por entropia da distribuição das probabilidades locais $H(x)$ (Goo-vaerts, 1997; Almeida, 2010), que pode ser definida para um conjunto de K litologias (onde $p_k^*(x)$ é a média dos valores simulados para cada bloco x do volume V) do seguinte modo:

$$H(x) = \sum_{k=1}^K [-\ln p_k^*(x)] p_k^*(x)$$

A medida entropia varia entre 0 (pontos onde não existe incerteza, locais dos poços) e $\ln K$. Pode ser apresentada com valores entre 0 e 1 se dividida por $\ln K$:

$$H_R(x) = \frac{H(x)}{\ln K}$$

5 CASO DE ESTUDO

5.1 Apresentação dos dados

O estudo levado a cabo incide sobre o cálculo de recursos de diamantes de um depósito aluvial localizado na região Lunda Norte, em Angola. A área de estudo tem a dimensão aproximada de 40 ha e é envolvente ao rio Chambuage, que por sua vez é afluente do rio Luachimo. Este local terá sido explorado durante as décadas de 60 e 70 pela empresa DIAMANG.

Para efetuar a campanha de prospeção foram projetadas linhas, designadas de *linhas de base*, ao longo das quais foram realizados poços e delimitados sectores de exploração. Estas linhas de base são tendencialmente perpendiculares à direção do rio Chambuage (E-W) (Figura 5.1), e justificam-se com o conhecimento de que os depósitos aluviais diamantíferos ocorrem relacionados com a rede hidrográfica, tanto a antiga como a atual. As linhas de base 1, 1.5, 2, 2.5 e 3 são exceções, uma vez que foram projetadas na perpendicular a um tributário do rio Chambuage. Tal pode justificar-se com uma possível concentração de pedras em redor destes tributários, descoberta durante uma fase de prospeção anterior. As linhas de base 17 e 16 estenderam-se para além da área amostrada, possivelmente para conhecer-se a extensão da Formação Calonda.

Os dados utilizados foram recolhidos durante campanhas de prospeção efetuadas nas décadas de 50 e 60 do século passado. Foram efetuados 149 poços de prospeção de secção circular e interpretados/representados os *logs* de sondagem. Para cada poço foram disponibilizados, uma folha excel com os seguintes itens: código do poço; código da linha de base; coordenadas X e Y num referencial local; diâmetro e área do poço; espessuras de material atravessado, fazendo distinção entre estéril e cascalho; rocha constituinte da camada de base; número de pedras recuperadas por intervalo de cascalho; peso total das pedras recuperadas; observações adicionais. A localização dos poços pode ser vista numa planta em papel à escala 1:1000 com a localização das linhas de base, poços e principais linhas de água (Figura 5.1).

Dos 149 poços de sondagem, cinco foram interrompidos e não contribuem com informação. Os restantes 144 poços perfuraram espessuras variáveis de estéril e cascalho até atingirem o nível freático ou o substrato.

A situação mais comum é ocorrer uma alternância de estéril / cascalho (ocorre em 113 dos 144 poços, 78,5%), no entanto, alguns poços interseam duas ou mesmo três intercalações estéril / cascalho (Figura 5.2), respetivamente, 27 e 4 ocorrências nos 144 poços. A ocorrência de duas ou três intercalações é mais frequente na região sul do Rio Chambuage.

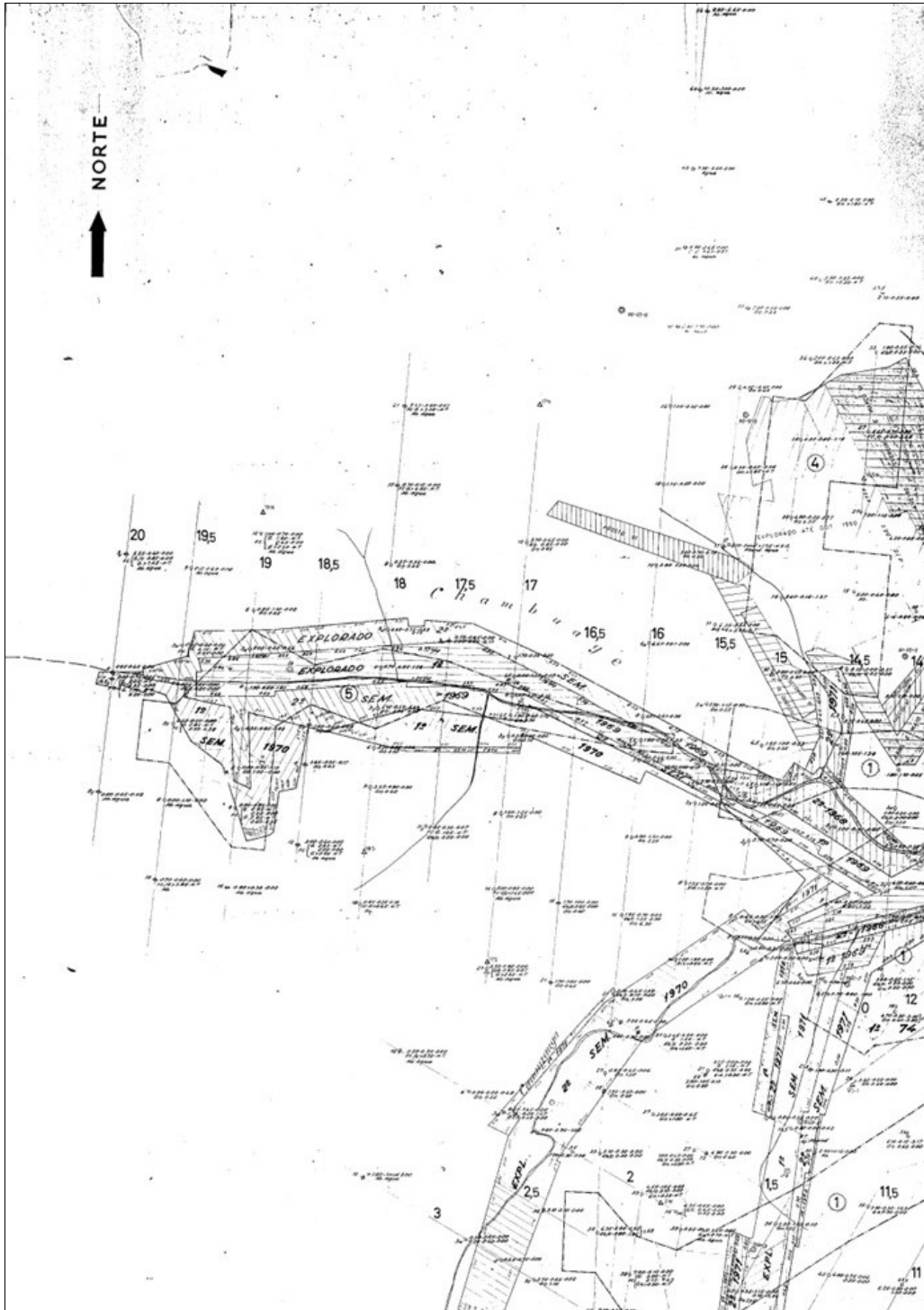


Figura 5.1 – Planta da área de estudo, seguindo uma imagem da original da DIAMANG. Escala original: 1:1000.

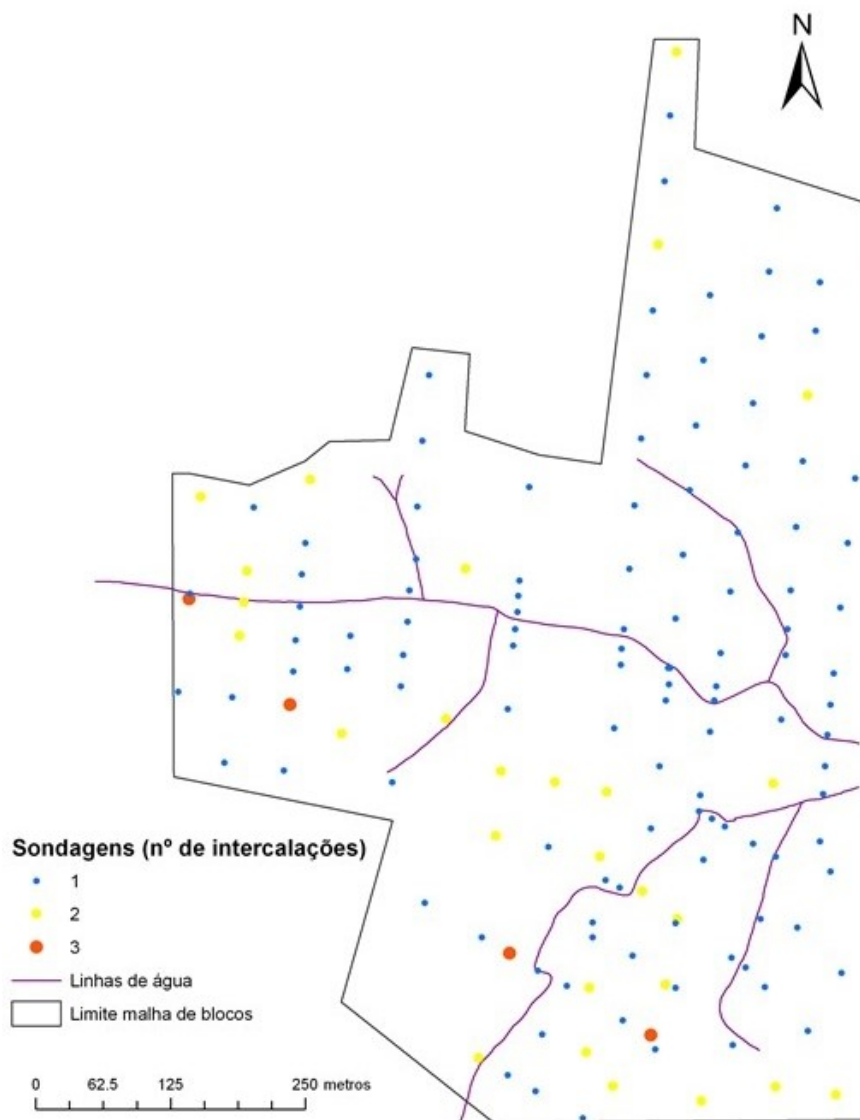


Figura 5.2 – Representação dos poços de sondagem enquadrados com as linhas de água principais e o limite da malha de blocos. Cada poço está representado pelo número de intercalações estéril / cascalho, que pode ser 1, 2 ou 3.

O estéril é muito possivelmente proveniente de terrenos de cobertura e areias do Grupo Kalahari e Grés Polimórfico. Os diamantes que nas camadas de cascalho resultaram de diversos ciclos de remobilização sofridos pela Formação Calonda.

A atividade do rio Chambuage e dos seus tributários terá libertado os diamantes da Formação Calonda que viriam depois a ser concentrados e depositados no cascalho subjacente. O substrato rochoso da camada base possui, em termos gerais, natureza cristalina sendo composto essencialmente por rochas do tipo gnaiss (Valente *et al*, 1999).

Para a construção dos modelos 2D e 3D do depósito foram definidas duas malhas de blocos enquadadas com a localização dos poços e com a mesma dimensão no plano XY de 10 metros cada (Tabela 5.1). Na malha de blocos a 3D adotou-se uma resolução vertical de 0,2 m e um número de blocos equivalente à máxima espessura amostrada que corresponde a cerca de 16 m. Na tabela 5.1 sintetizam-se os parâmetros geométricos das malhas de blocos 2D e 3D.

Tabela 5.1 – Parâmetros geométricos das malhas de blocos 2D e 3D que serviram de suporte aos modelos morfológico e de teores.

Eixo coordenado	X	Y	Z
Dimensão do bloco (m)	10	10	0,2
Nº de blocos	64	100	80
Coordenada do primeiro bloco	75	5	0,1

Para restringir os modelos 2D e 3D à área envolvente dos poços, foi digitalizada uma poligonal fechada e selecionados os blocos que estão no seu interior. Do total de 6400 blocos no plano horizontal, estão contidos 3886 blocos no interior da poligonal, que contabilizam a área total de 388 600 m².

5.2 Estatísticos básicos

No desenvolvimento dos modelos morfológicos e de teores a 2D trabalharam-se quatro variáveis distintas, duas morfológicas e duas de quantidade / teor. Para o modelo morfológico foram definidas duas variáveis: a espessura total de estéril e a possança total de cascalho. Estas variáveis morfológicas foram calculadas somando as espessuras parciais, quer de estéril quer de cascalho, identificadas em cada poço.

Para o desenvolvimento dos modelos de teores definiram-se, também, duas variáveis: o número de pedras por unidade de volume de cascalho (m³) e o peso total de diamantes também por unidade de volume de cascalho (m³). Para definir estas variáveis foi necessário calcular, previamente, o volume de material extraído de cada poço de sondagem (área do furo multiplicada pela possança de cascalho). Na tabela 5.2 e nos gráficos da figura 5.3 mostram-se os estatísticos básicos destas variáveis e os respetivos histogramas e *box-plots*.

Tabela 5.2 – Estatísticos básicos das quatro variáveis usadas na construção do modelo morfológico a 2D.

Estatísticas de (...)		Espessura estéril (m)	Possança cascalho (m)	Nº pedras / volume (m ³)	Peso (quilates) / volume (m ³)
Amostras	Nº poços	144	144	144	144
Posição central	Média	2,9	0,85	0,54	0,39
	Mediana	2,00	0,60	0,00	0,00
Dispersão	Mínimo	0,00	0,10	0,00	0,00
	Máximo	15,55	6,10	5,00	4,76
	Desvio padrão	2,62	0,82	0,92	0,79
	Coefficiente variação	0,91	0,97	1,69	2,02
	Q ₃ -Q ₁	3,12	0,65	0,64	0,42
Assimetria	Coefficiente assimetria	1,82	3,36	2,50	2,78

Os estatísticos básicos e os histogramas e *box-plots* das quatro variáveis mostram que:

- As espessuras de estéril são superiores às possanças de cascalho, da ordem das 3 vezes, sendo a espessura de estéril mais elevada de 15,55 metros e a possança de cascalho de 6,1 metros;
- Os coeficientes de variação (medida da dispersão) são praticamente iguais para a espessura de estéril e possança de cascalho, sendo da ordem do dobro para as variáveis número de pedras e peso em quilates por unidade de volume. Estes valores são indicativos da qualidade da estimação que é esperada para estas variáveis.
- Todas as variáveis possuem observações estatisticamente anómalas à direita, quer de primeira quer de segunda ordem;
- As leis de distribuição destas variáveis são todas assimétricas positivas, sendo a variável possança de cascalho a mais assimétrica.
- As variáveis número de pedras e o peso total em quilates apresentam mais de metade de zeros (ver gráficos da figura 5.3 dos histogramas cumulativos, a mediana destas variáveis é zero). Estes valores são espectáveis devido à forma disseminada como se localizam os diamantes nos depósitos aluviais, com muitas não ocorrências.

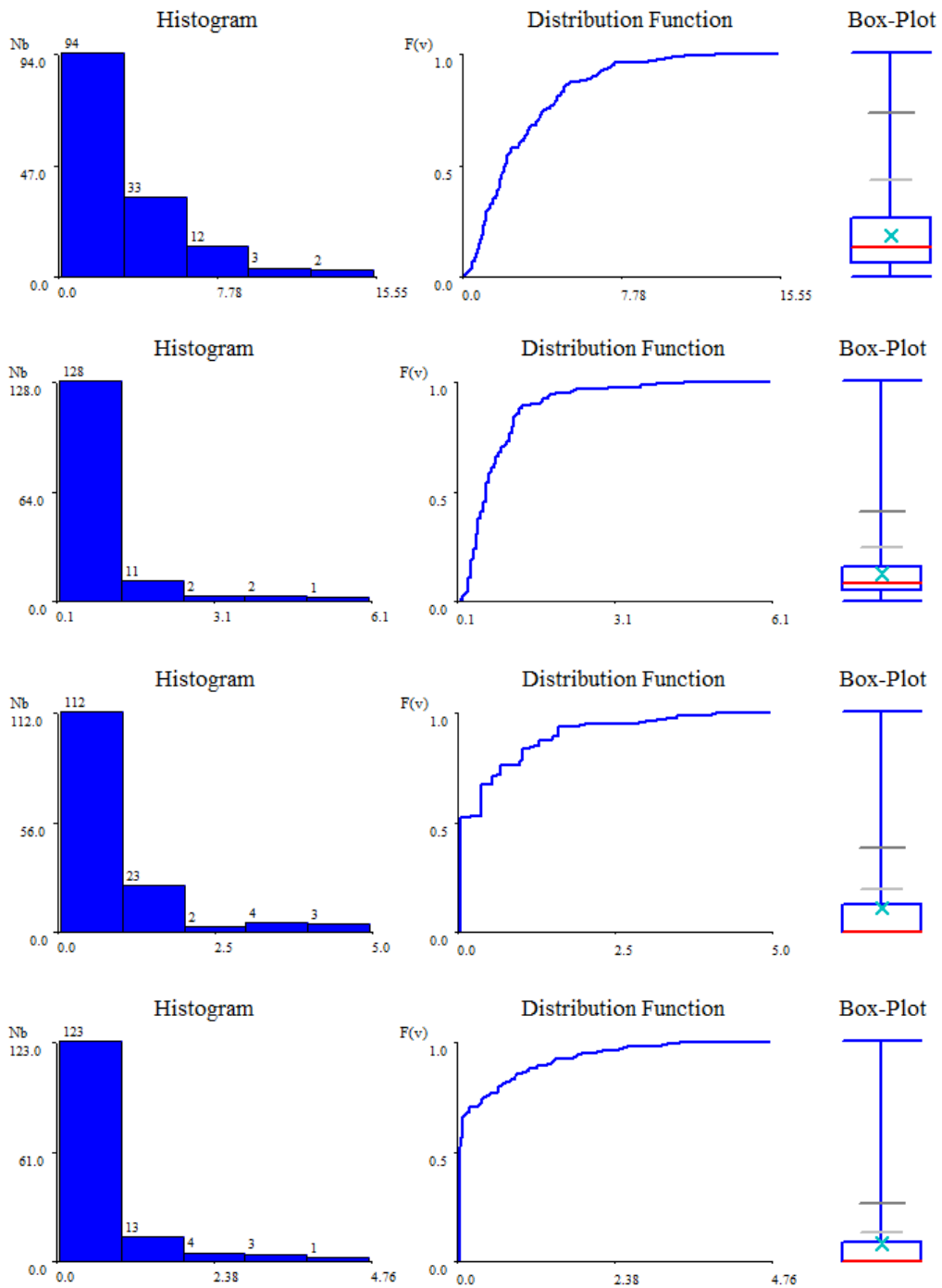


Figura 5.3 – Histograma simples, histograma cumulativo e *box-plot* referente às variáveis do modelo 2D: espessura de estéril, possança de cascalho, nº de pedras / (m³) e peso em quilates / (m³).

5.3 Modelo 2D

O modelo 3D é o objetivo principal deste estudo, no entanto, o caso de estudo inicia-se pela realização de um modelo a 2D por krigagem normal que tem como objetivo fornecer valores glo-

bais que serão utilizados como referência e comparação dos resultados a obter pelo modelo 3D. Compreende dois sub-modelos, um para a morfologia e outro para o n° pedras / teores.

5.3.1 Modelo morfológico

O modelo morfológico a 2D do depósito foi construído por estimativa das variáveis espessura total de estéril e possança total de cascalho. Na figura 5.4 mostram-se em planta estes valores na localização dos poços. Parece existir uma tendência para que as espessuras de estéril e as possanças de cascalho sejam mais baixas na proximidade das linhas de água, e cresçam com o aumento da distância em particular para norte. Esta tendência não é todavia consistente porque a correlação linear entre as duas variáveis é de 0,34.

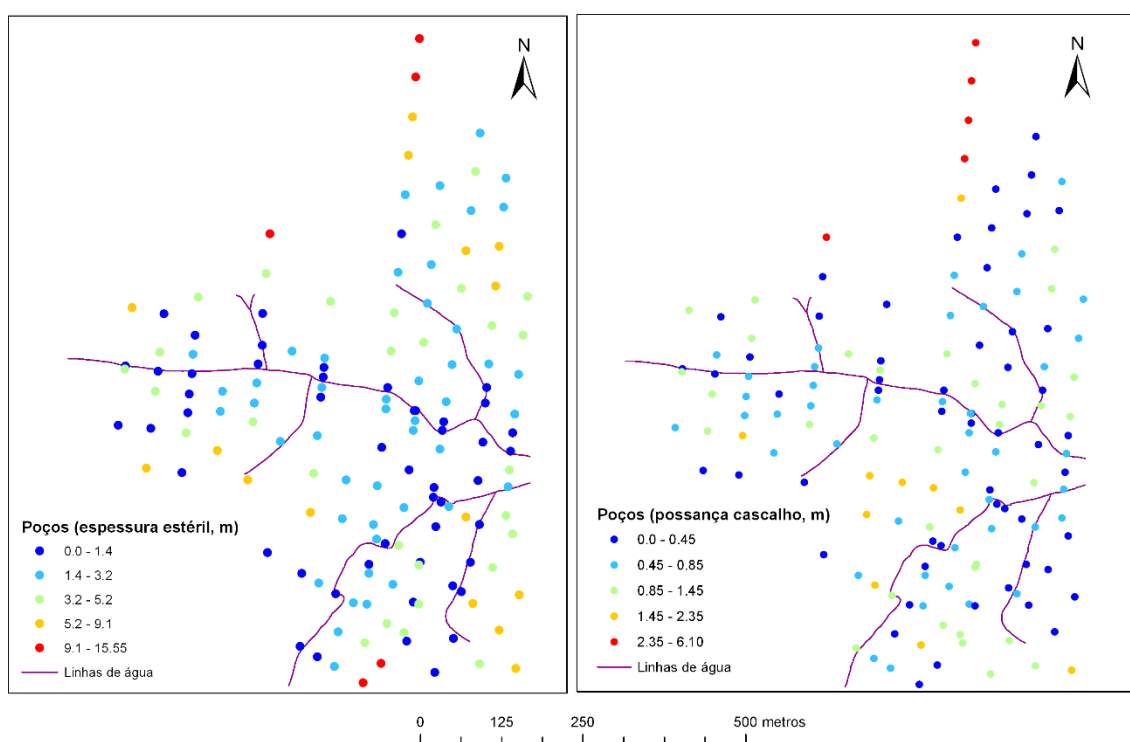


Figura 5.4 – Distribuição espacial dos poços legendados em função da espessura total de estéril (esquerda) e possança total de cascalho (direita).

Foram calculados variogramas experimentais e ajustados modelos teóricos para as duas variáveis morfológicas (figuras 5.5 e 5.6, e tabela 5.3). Optou-se pelo cálculo de variogramas omnidirecionais uma vez que, do ponto de vista geológico, não se verifica uma direção tendencial no que te toca à ocorrência das diferentes litologias (estéril e cascalho). Realça-se que os poços foram efetuados tendencialmente ao longo de linhas de base, assim, calcular um variograma na

direção destas linhas poderá resultar numa continuidade espacial mais significativa do que na direção perpendicular, apenas pelo efeito de estarem disponíveis mais pares de amostras para vários passos e não devido à disposição das litologias na natureza.

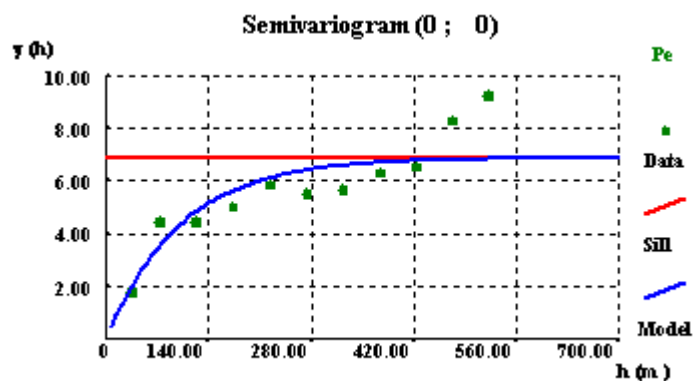


Figura 5.5 – Variograma experimental da variável espessura de estéril e modelo teórico de tipo exponencial ajustado.

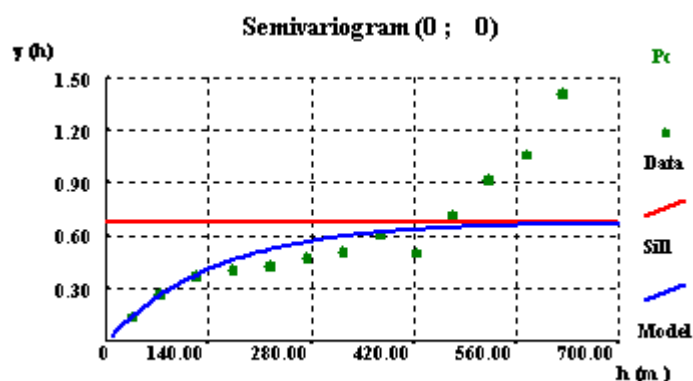


Figura 5.6- Variograma experimental da variável possança de cascalho e modelo teórico de tipo exponencial ajustado.

Tabela 5.3 – Parâmetros dos modelos teóricos ajustados aos variogramas experimentais das variáveis espessura de estéril e possança de cascalho.

	Espessura de estéril	Possança de cascalho
C_0 (efeito de pepita)	0	0
Modelo teórico	Exponencial	Exponencial
C_1	6,877	0,676
a_1 (m)	300	450

Os variogramas experimentais mostram uma tendência bem definida sem efeito de pepita. Estas duas variáveis apresentam continuidade espacial considerável tendo em conta a dimensão da área de estudo, tendo sido ajustadas por funções teóricas do tipo exponencial com 300 e 450 metros.

Seguidamente estimaram-se por krigagem normal estas duas variáveis morfológicas, constituindo o modelo morfológico 2D. Na figura 5.7 mostram-se as imagens estimadas destas variáveis já delimitadas pela área envolvente dos poços.

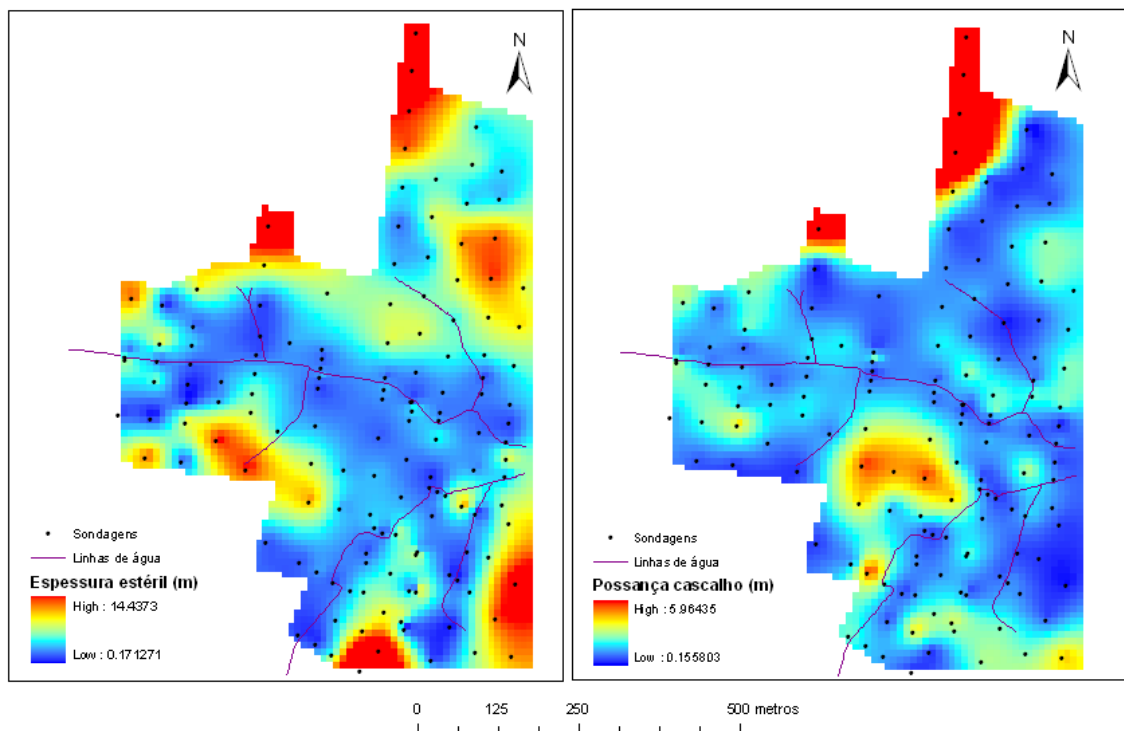


Figura 5.7 – Imagens estimadas por krigagem normal das variáveis espessura de estéril e possança de cascalho.

Estes mapas mostram que os valores de espessura mais baixos ocorrem na proximidade das linhas de água, em particular o Rio Chambuage. Relativamente à espessura de estéril, os valores mais elevados ocorrem em pelo menos seis localizações pontuais; já relativamente à possança de cascalho, os maiores valores ocorrem nas regiões mais a norte e aqui são coincidentes com os maiores valores da espessura de estéril.

5.3.2 Modelo de teores

A fase seguinte do modelo a 2D passa por estimar as variáveis número de pedras e peso total das pedras por unidade de volume (m^3). Tal como descrito no capítulo da metodologia, como estas variáveis são quantificadas para possanças de cascalho diferentes em cada poço, a estimação deve ser feita para a variável auxiliar acumulação; após a estimação, os mapas estimados destas variáveis acumulação de número de pedras e acumulação de peso são divididos pelo mapa estimado da possança de cascalho, tendo como resultado as variáveis relativas. Na figura 5.8 representam-se estas duas variáveis de acumulação na localização dos poços.

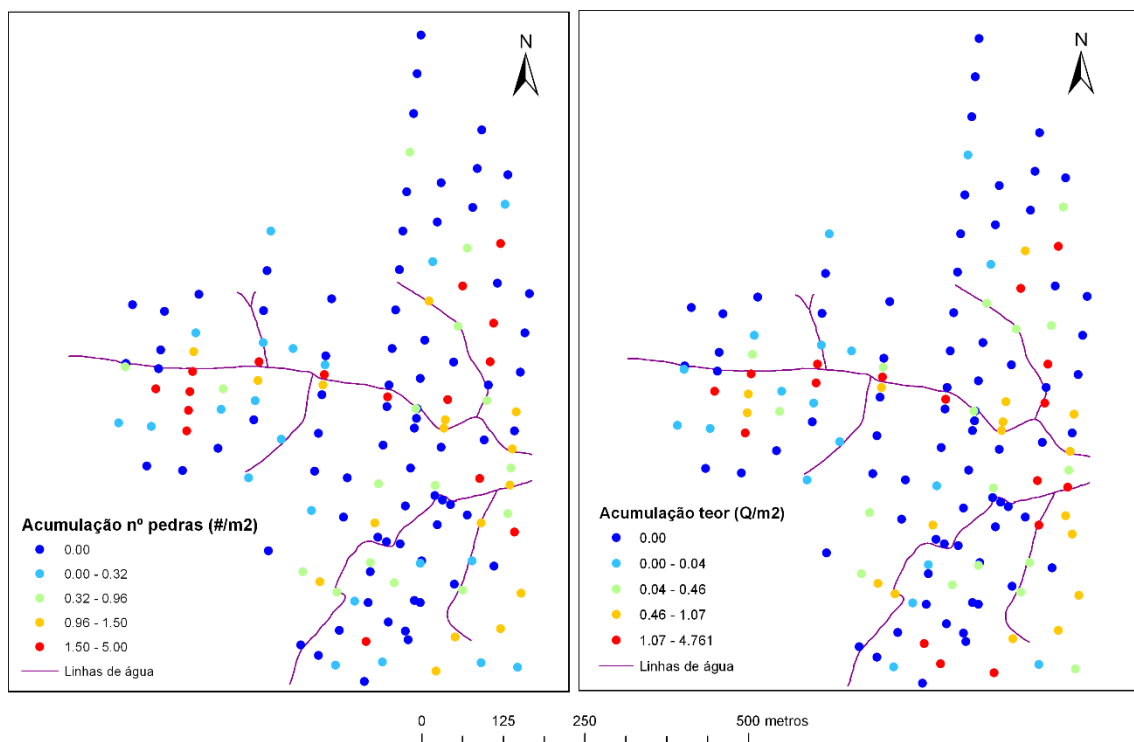


Figura 5.8 - Distribuição espacial dos poços legendados em função do valor da acumulação de pedras e do peso.

A representação de valores da figura 5.8 mostra que os valores nulos e os não nulos ocorrem dispersos por toda a área sem qualquer tendência. Os valores mais elevados de acumulação de pedras não coincidem totalmente com os valores mais elevados de peso porque a dimensão das pedras é muito variável. A correlação linear de Pearson entre estas duas variáveis é de 0,75 o que representa uma correlação média-alta.

Para estas duas variáveis de acumulação foram calculados os respetivos variogramas experimentais (ver Figuras 5.9 e 5.10). Manteve-se a opção do cálculo de variogramas omnidirecio-

nais para, como foi referido anteriormente, se obter uma visão da continuidade espacial das variáveis que seja representativa da realidade e não influenciada pela amostragem orientada por linhas de base.

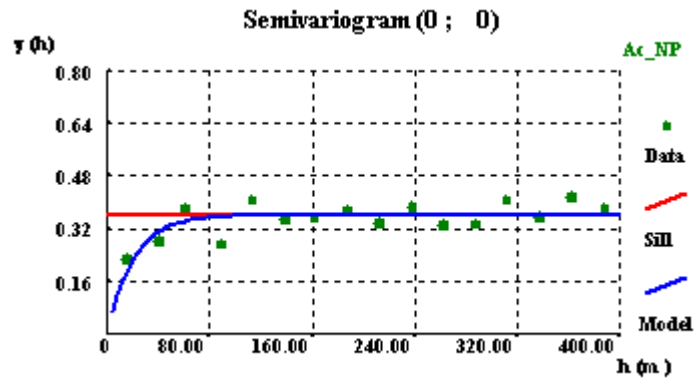


Figura 5.9 – Variograma experimental da variável acumulação do número de pedras e modelo teórico de tipo exponencial ajustado.

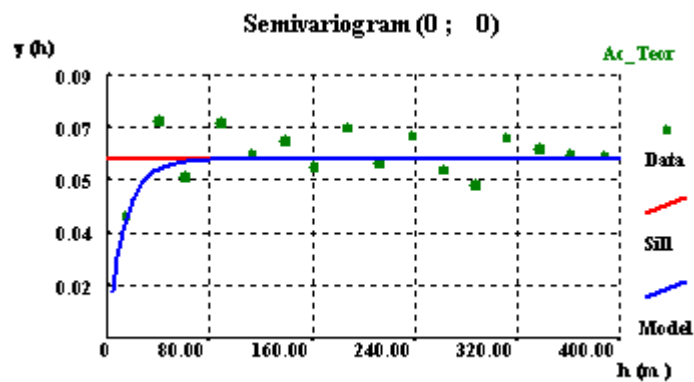


Figura 5.10 - Variograma experimental da variável acumulação do peso total das pedras e modelo teórico de tipo exponencial ajustado.

Tabela 5.4 – Parâmetros dos modelos teóricos ajustados aos variogramas experimentais das variáveis acumulação número de pedras e acumulação de teor.

	Acumulação do n° pedras	Acumulação de teor
C_0 (efeito de pepita)	0	0
Modelo teórico	Exponencial	Exponencial
C_1	0,361	0,061
a_1 (m)	60	40

Como se pode constatar, a Tabela 5.4 mostra que a continuidade espacial destas variáveis acumulação é muito inferior à verificada nas variáveis espessura de estéril e possança de cascalho, utilizadas na construção do modelo morfológico. As figuras 5.9 e 5.10 mostram também que os pontos do variograma experimental têm maior dispersão até atingirem o patamar, em especial o da acumulação de teor. Refira-se que no cálculo destes variogramas experimentais foi introduzido um valor de corte a cada variável, tendo-se retirado três observações para a variável acumulação do número pedras e uma observação para a acumulação de teores. Em conjunto, estes resultados refletem a natureza disseminada e errática à pequena escala das ocorrências diamantíferas nos depósitos aluviais.

Estas variáveis acumulação também foram estimadas a 2D por krigagem normal, constituindo o modelo de teores. Refira-se, que embora as duas variáveis tenham uma correlação linear média-alta, não foi utilizada a krigagem com informação secundária (estimação de uma variável utilizando outra como secundária) porque as duas variáveis estão amostradas exatamente nos mesmos locais. Na figura 5.11 mostram-se as imagens estimadas destas variáveis já delimitadas à área envolvente dos poços assim como do resultado da divisão pela possança de cascalho.

As duas imagens estimadas da acumulação, e em particular a acumulação do teor, mostram que existem valores muito baixos lado a lado com valores mais elevados, facto que revela o carácter mais errático da ocorrência dos diamantes.

As imagens que resultam da divisão pela possança de cascalho mantêm, no essencial, a localização dos valores altos e baixos. Ao longo do Rio Chambuage são observados valores elevados de nº de pedras e quilates alternados com outros mais baixos o que realça o carácter mais errático destas variáveis, comparativamente às variáveis morfológicas.

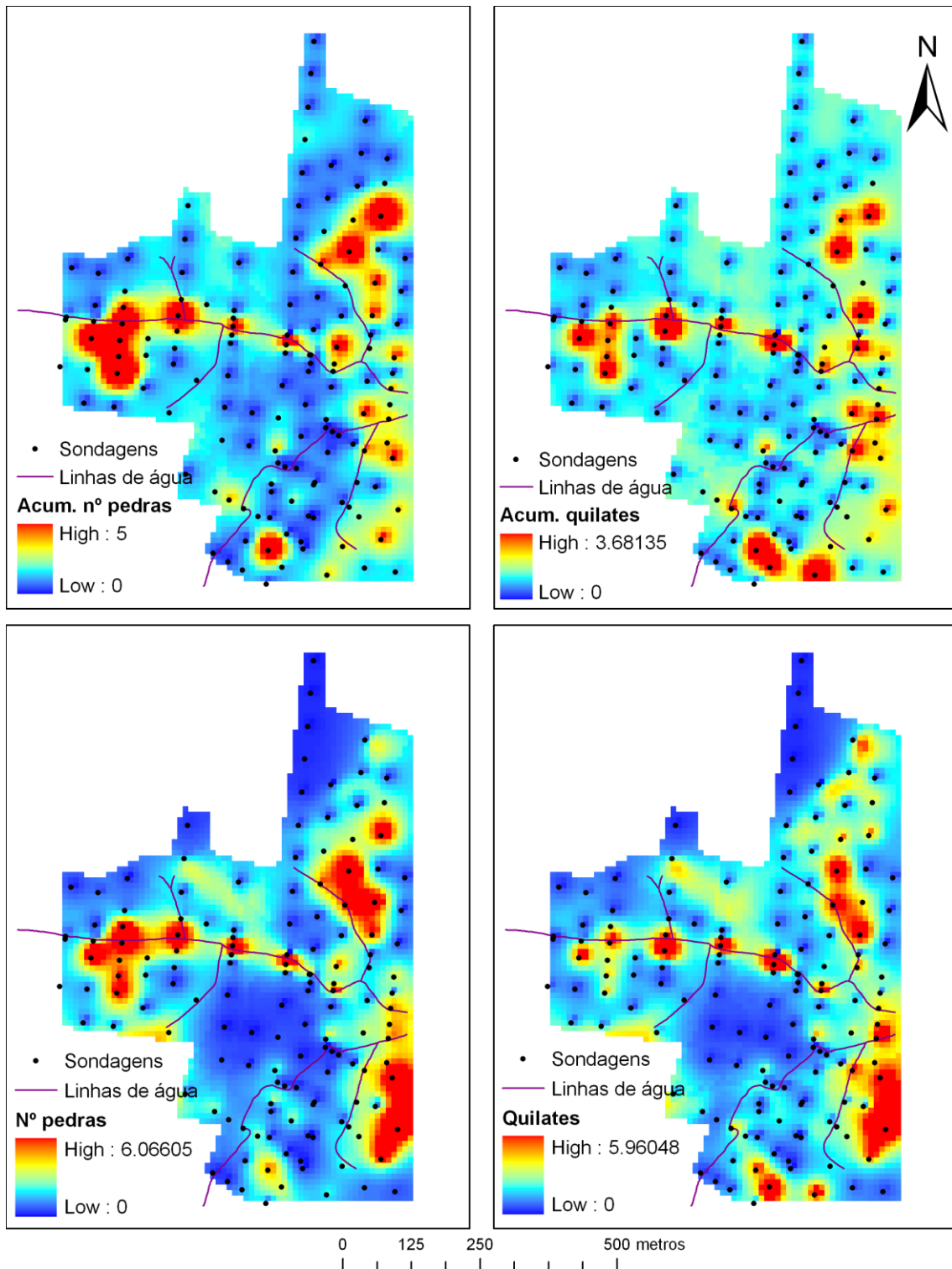


Figura 5.11 – Imagens estimadas por krigagem normal das variáveis acumulação do número de pedras e acumulação de teor (parte superior) e resultado da divisão destas imagens pelos valores estimados da posição de cascalho (parte inferior).

5.3.3 Apresentação de quantitativos dos recursos

Tabela 5.5 – Tabela com os principais quantitativos relativos ao depósito em estudo: volumes de estéril e cascalho, número de pedras e peso em quilates. Estes resultados foram calculados com base nas observações (poços) e nos mapas estimados por krigagem (modelo morfológico e de teores a 2D).

	Valores médios de espessura ou possança (m)		Estimativa do volume (m ³)	
	Poços	Krigagem	Poços x Área	Krigagem
Espessura estéril	2,896	3,145	1 125 386	1 222 264
Possança cascalho	0,847	0,895	329 144	347 758
Valores médios (# / m³)				
	Valores médios (# / m ³)		Nº pedras no depósito	
	Poços	Krigagem	Poços x Volume	Krigagem
Nº de pedras	0,643	0,582	211 640	202 395
Valores médios (quilates / m³)				
	Valores médios (quilates / m ³)		Quilates no depósito	
	Poços	Krigagem	Poços x Volume	Krigagem
Quilates	0,446	0,403	146 798	140 146

As estimações anteriores permitiram calcular os seguintes quantitativos globais (recursos) que se apresentam na tabela 5.5 onde se apresentam os resultados relativos a quantidades de estéril e cascalho, nº de pedras e peso em quilates, quer em valores médios quer em quantitativos totais para todo o volume em estudo. Para cada variável apresentam-se duas estimativas, uma calculada com as médias dos dados experimentais e outra com os valores estimados por krigagem. A área considerada são os 388 600 m² referidos anteriormente. Em todos os casos a diferença de valores ronda no máximo os 10%, o que se deve ao efeito de desagrupamento da krigagem.

Os resultados mostram que:

- As estimativas por krigagem da espessura e possança são ligeiramente mais elevadas do que com a média dos dados experimentais, já no caso das variáveis nº de pedras e peso total é inferior. Este facto pode dever-se a existirem amostras próximas com valores

elevados de espessuras e valores baixos de nº de pedras e teores e também a efeitos de extrapolação.

- Os volumes totais de estéril são cerca de 4x superiores aos volumes totais de cascalho, concretamente no caso dos valores estimados por krigagem as proporções de estéril e cascalho são 77,85% e 22,15%, respetivamente;
- O peso médio de cada pedra calculado com os valores observados ou com os valores estimados ronda os 0,69 quilates / pedra.
- Estes resultados verificam uma relação estéril minério superior ao valor mínimo de rentabilidade económica apresentado anteriormente de 1/25 000 000.

5.4 Modelo 3D

O modelo 3D, tal como o modelo 2D, envolve a construção de dois sub-modelos, um para a morfologia e outro para os teores. Na construção do modelo a 3D utilizou-se a mesma malha do modelo 2D para o plano horizontal e uma resolução vertical de 0,2 m.

5.4.1 Modelo morfológico

A construção do modelo morfológico consiste na modelação a 3D das litologias estéril e cascalho com uma variável indicatriz. Tal como referido no capítulo da metodologia, para a geração do envelope superior e inferior considerou-se a camada de base como uma superfície de referência transformada em plano horizontal sendo a espessura do modelo a que é observada desde a superfície até à camada de base em cada local. Para definir a espessura do modelo consideraram-se duas estratégias, uma dita *otimista* que é baseada numa estimacão por krigagem da espessura total só com os poços que atingem a camada base e outra dita *conservadora* onde a espessura total é a observada nos poços. Para o cenário conservador, os valores da espessura total do modelo são provenientes do modelo 2D (soma da espessura de estéril e possança de cascalho); para o modelo otimista, os valores da espessura total resultam de uma nova estimacão por krigagem normal feita só com os dados dos poços que atingem a camada base.

No entanto, após esta estimacão observou-se existirem locais cujas espessuras estimadas eram inferiores às obtidas em alguns poços que não atingiram a camada de base.

Assim, foi necessário corrigir as espessuras estimadas, fazendo-se uma nova estimacão incluindo desta vez as espessuras dos poços onde se detetaram estas inconsistências.

Para a estimacão por krigagem da espessura total entre a camada base e a superfície do terreno determinaram-se estes valores nos poços (um valor por poço), calcularam-se variogramas experimentais desta variável, e ajustou-se um modelo teórico. Na figura 5.12 mostra-se o variograma experimental assim como a funco teórica ajustada de tipo exponencial com 150 metros de amplitude.

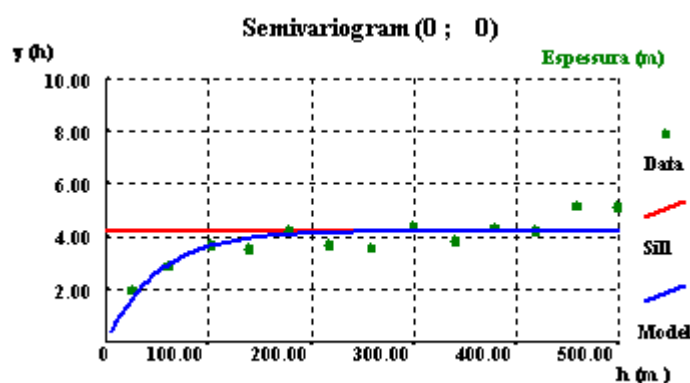


Figura 5.12 – Variograma experimental da variável espessura total entre a superfície e a camada de base e modelo teórico exponencial ajustado.

Na figura 5.13 mostram-se as duas estimativas da espessura total, à esquerda a que resulta da soma dos modelos 2D (estimativa conservadora) e  direita a que resulta da estimacão por krigagem da espessura total (estimativa otimista). Refira-se que a estimativa otimista tem valores de espessura sempre mais elevados ou iguais aos da estimativa conservadora, porque na estimativa otimista foram retirados os poços que não atingem a camada base. Em termos dos volumes totais, o cenário conservador tem o volume total de 1 570 022 m³ e o cenário otimista tem o volume total de 1 695 967 m³ (mais 125 945 m³ ou 8%).

Seguidamente construiu-se o modelo binário por SSI das duas litologias estéril e cascalho a 3D. O modelo foi gerado para toda a malha de blocos tendo-se delimitado no final o modelo pelas espessuras optimista e conservadora.

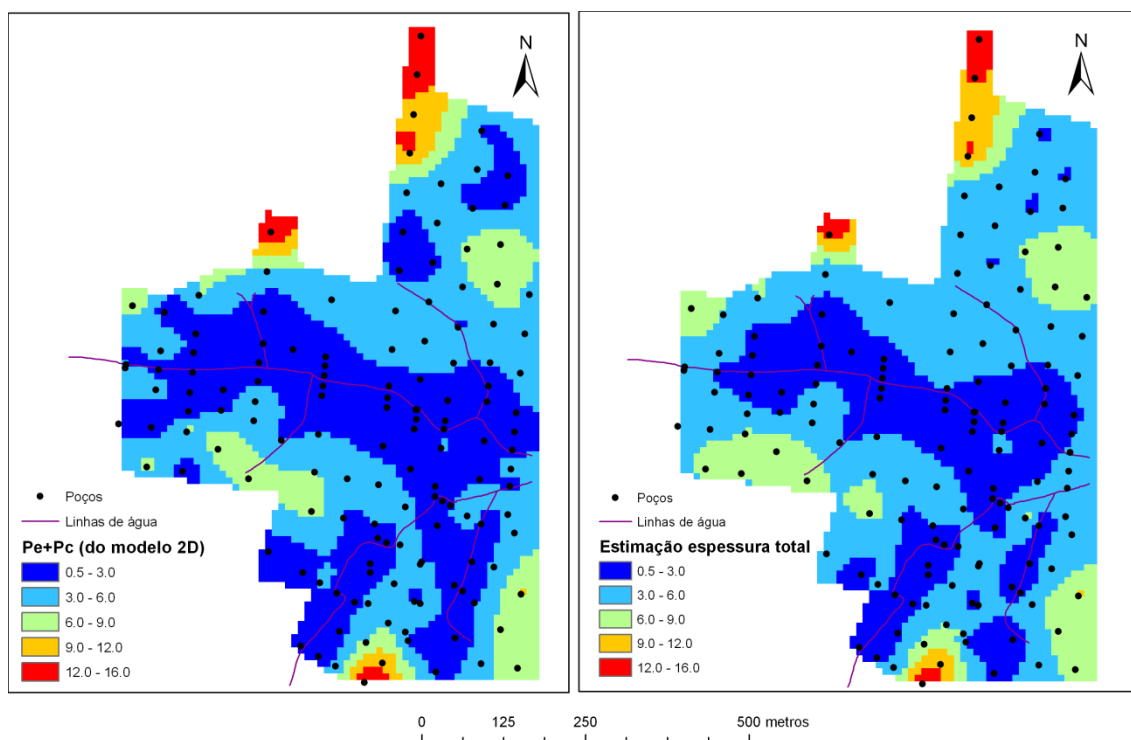


Figura 5.13 – Imagens da espessura total do modelo: (esquerda) cenário conservador, resulta da soma da espessura estimada de estéril e da possança estimada de cascalho, ambas do modelo 2D; (direita) cenário otimista, resulta da estimativa da espessura total entre a superfície e a camada de base.

Para o estabelecimento da variável indicatriz nos poços (informação condicionante na simulação) subdividiu-se a espessura amostrada dos poços em troços de 0,2 m, coincidentes com a partição imposta pela malha de blocos a 3D na vertical, e determinou-se a proporção de poço que pertence a cada litologia (estéril ou cascalho). Se a fração é totalmente composta por estéril, a variável indicatriz assume o valor 0, se for de cascalho assume o valor 1, e nos troços de transição assume um valor entre 0 e 1 consoante a proporção. Ao todo foram identificados 2709 troços de 0,2 metros; a proporção de cascalho observada é de 22,3 % e a de estéril é 77,7%.

Seguidamente calcularam-se os variogramas experimentais desta variável indicatriz (litológica), nas direções horizontal e vertical. Para o variograma horizontal foi ajustado um modelo tipo exponencial com 50% de efeito de pepita; já para a direção vertical foi ajustada uma estrutura exponencial. Como a versão do software utilizada não permite que o efeito de pepita possa ser aplicado apenas numa direção, optou-se por ajustar um modelo composto por duas estruturas na direção horizontal mas onde a primeira estrutura tem uma amplitude igual à dimensão do bloco; na prática é como se nesta direção existisse uma estrutura desconhecida (não amostrada) a uma escala inferior à do bloco. Os variogramas e os modelos teóricos podem ser visualizados na figura 5.14 e na tabela 5.6.

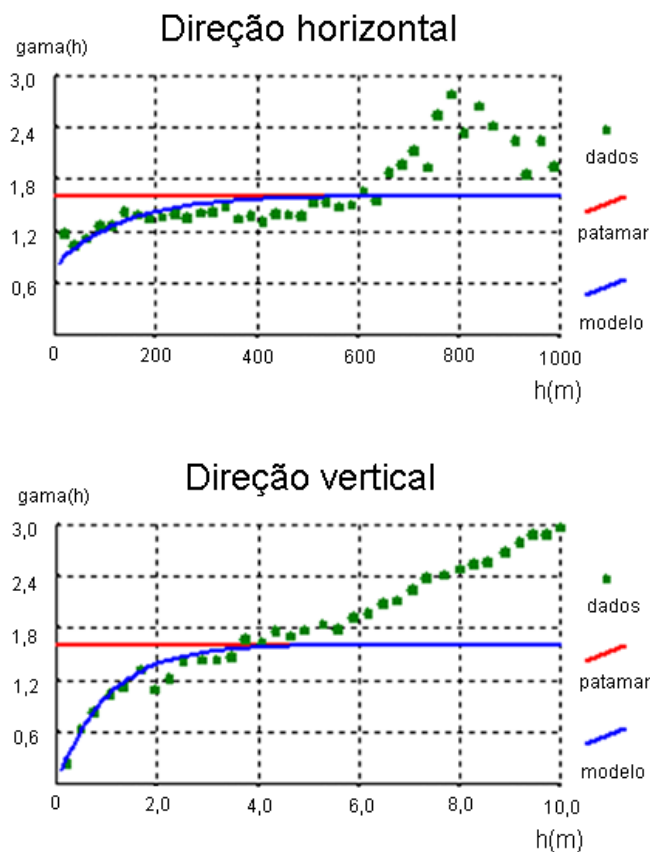


Figura 5.14 – Variograma experimental da variável indicatriz nas direções horizontal e vertical e modelo teórico de tipo exponencial ajustado.

Tabela 5.6 – Parâmetros dos modelos teóricos ajustados aos variogramas experimentais da variável indicatriz nas direções horizontal e vertical.

		Direção horizontal	Direção vertical
C ₀ (efeito de pepita)		0	0
1ª estrutura	Modelo teórico	Exponencial	Exponencial
	C ₁	0,080	0,161
	a ₁ (m)	10	3
2ª estrutura	Modelo teórico	Exponencial	
	C ₂	0,081	
	a ₂ (m)	400	

Como esta variável exibe uma fração significativa de caráter errático, para explorar corretamente o espaço de incerteza foram simuladas 500 realizações ou cenários equiprováveis.

Para validar as simulações calcularam-se os variogramas experimentais de uma das realizações, assim como observaram-se algumas imagens dos resultados e calcularam-se as proporções de cascalho e estéril. Na figura 5.15 mostram-se os variogramas experimentais de uma das realizações para as três direções ortogonais comprovando que as imagens reproduzem o modelo pretendido.

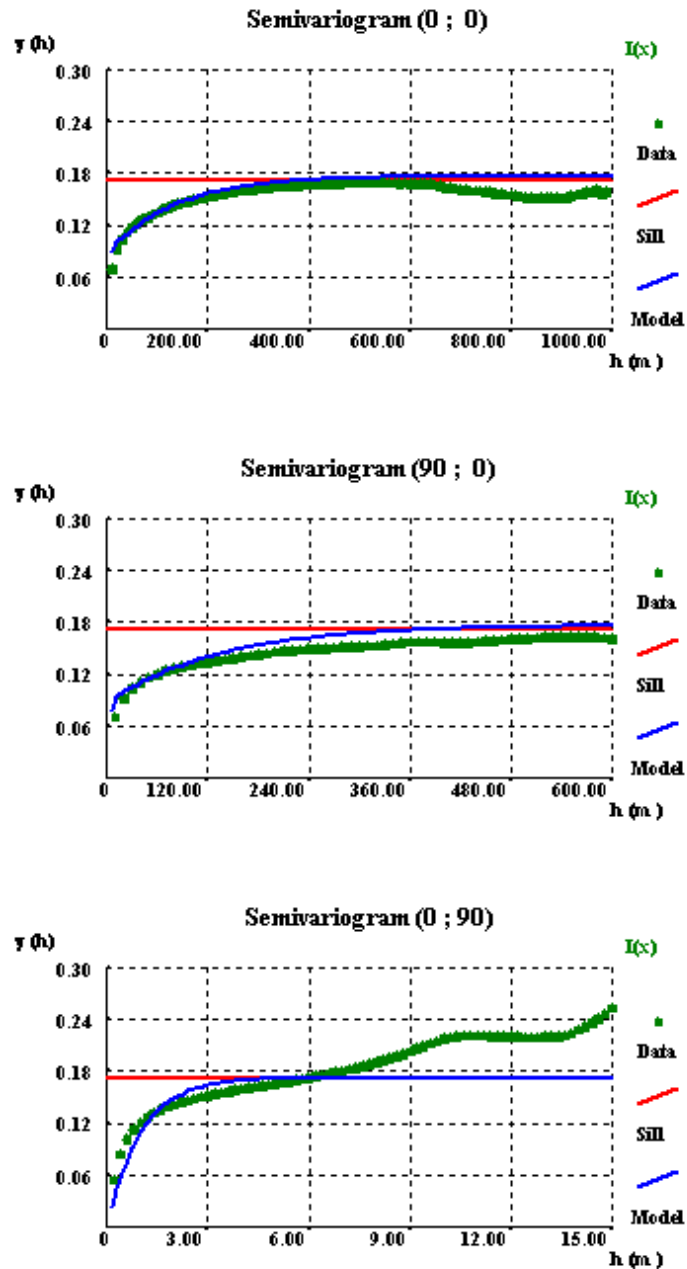


Figura 5.15 – Variogramas experimentais de uma realização das litologias de estéril e cascalho onde é possível observar a reprodução dos modelos teóricos de variogramas.

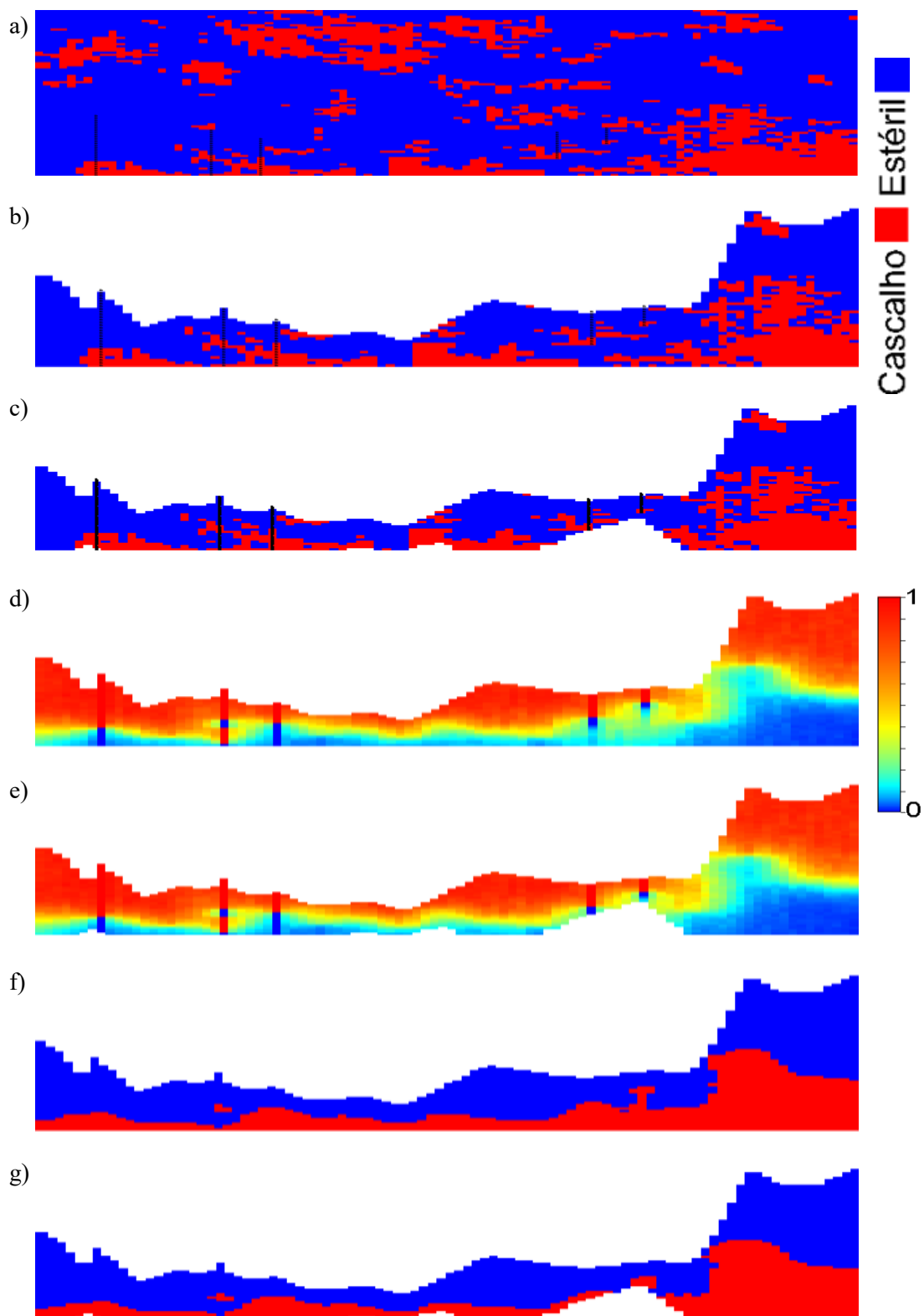


Figura 5.16 – Imagens no perfil 44 NS ilustrando as várias etapas da modelação 3D das litologias estéril e cascalho: a) realização gerada por SSI; b) delimitação com a camada base e a superfície do terreno (cenário optimista); c) delimitação com a espessura total equivalente à do modelo 2D (cenário conservador); d) e e) valores médios das simulações, ou probabilidade de pertença à camada de estéril; f) e g) probabilidades transformadas para as litologias estéril e cascalho.

Na figura 5.16 mostram-se várias imagens no perfil 44 NS ilustrando as várias etapas da modelação 3D das litologias estéril e cascalho; na figura 5.17 mostram-se no mesmo perfil as imagens da entropia (medida de incerteza); na figura 5.18 mostra-se uma representação 3D do modelo morfológico optimista. Na tabela 5.7 comparam-se os volumes totais de estéril e cascalho e a relação entre os volumes de estéril e cascalho entre os modelos 2D e 3D.

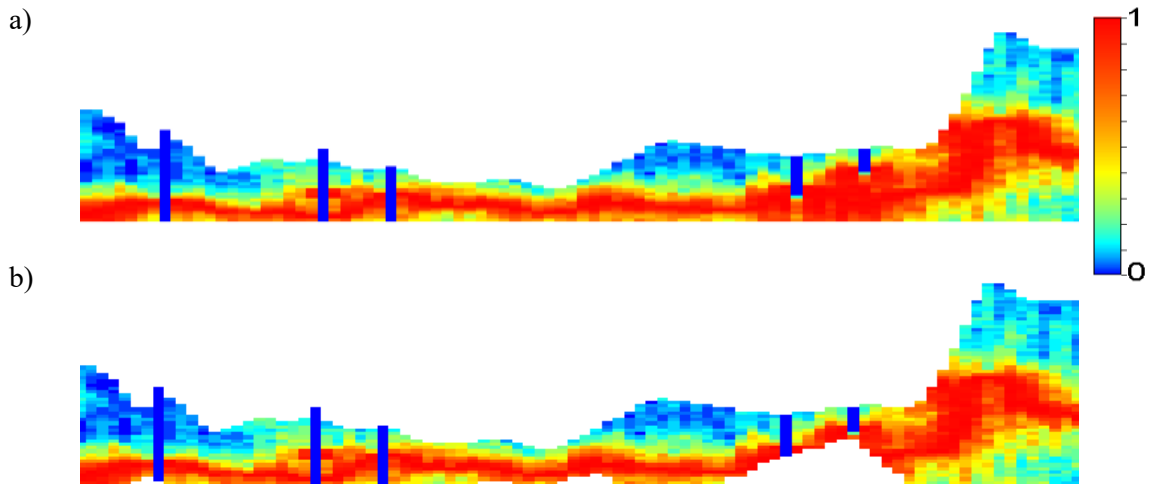


Figura 5.17 – Imagens no perfil 44 NS ilustrando a entropia ou medida de incerteza das imagens simuladas: a) cenário otimista; b) cenário conservador.

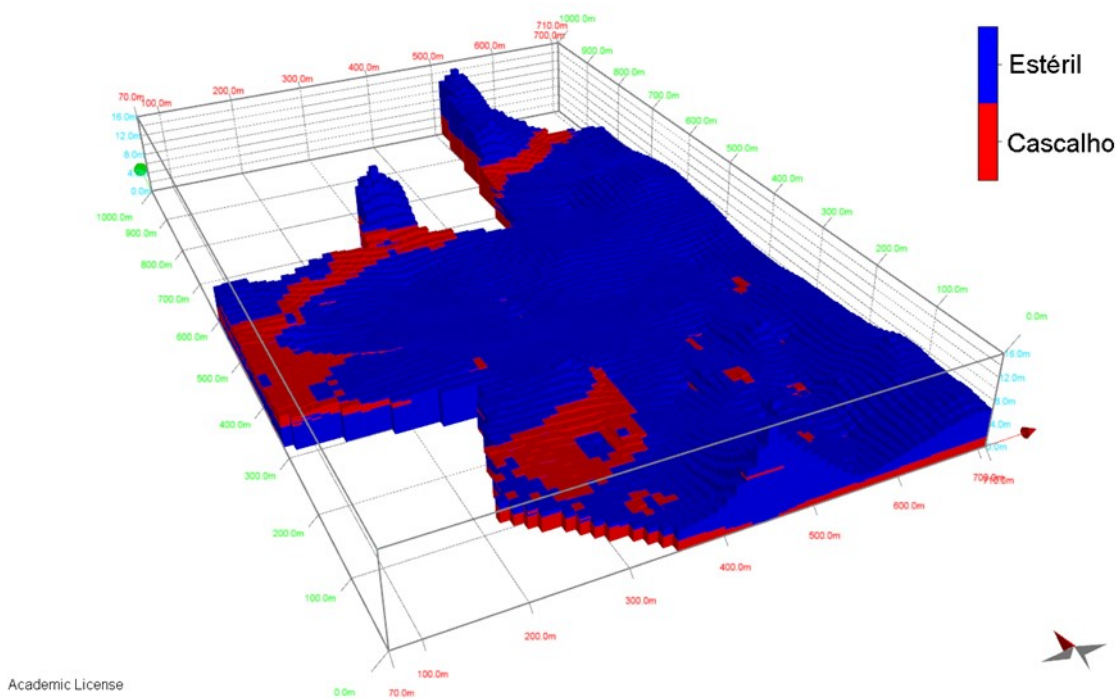


Figura 5.18 – Representação 3D do modelo morfológico no cenário optimista.

Tabela 5.7 – Comparação de volumes totais de estéril e cascalho e relação entre os volumes de estéril e cascalho entre os modelos 2D e 3D.

		Modelo 2D	Modelo 3D		
			Conservador	Otimista	% dif
Volume total (m ³)	Estéril	1 222 264	1 223 820	1 319 200	+7,8%
	Cascalho	347 758	349 240	376 480	+7,8%
	Total	1 570 022	1 573 060	1 695 680	+7,8%
Relação entre os volumes de estéril e cascalho		3,51	3,50	3,50	-

Observando as figuras e a tabela é possível verificar que:

- É notório o aumento do volume total no modelo 3D otimista (mais cerca de 7,8%) comparativamente à abordagem mais conservadora. Como foi referido no capítulo 4, tal comportamento era expetável uma vez que o modelo conservador é sempre menor ou pelo menos igual na vertical do que o modelo otimista.
- Quando comparados os volumes parciais de estéril e cascalho dos modelos a 3D, verifica-se que ambas as variáveis têm um aumento na mesma proporção. Por essa razão, a relação estéril-cascalho manteve-se praticamente igual nos modelos a 2D e a 3D, assim como nas duas variantes do modelo 3D. Isto justifica-se com o fato da proporção original ter sido imposta nas extrapolações efetuadas com a SSI da qual resulta o modelo morfológico.
- Existe uma ligeira diferença nos volumes obtidos nos modelos 2D e 3D conservador onde os volumes obtidos do último são cerca de 0,2% superiores aos obtidos para o modelo 2D. Esta diferença é devida ao particionamento do espaço em blocos e à classificação dos blocos que estão contidos entre as superfícies.
- Nas figuras 5.16 d) a g) observa-se que as zonas não incluídas pelo modelo 3D conservador correspondem a zonas de extrapolação às quais está associada elevada incerteza. Deste modo, é possível afirmar-se que uma parte dos volumes do modelo otimista constituem um cenário especulativo, mas onde a proporção dos volumes de estéril e cascalho se mantem. Estas figuras e os volumes associados validam a necessidade, discutida no capítulo 4, da construção de um modelo mais restritivo e com menos incerteza associada.

- Verifica-se que a zona de maior incerteza está na transição entre as litologias de estéril e cascalho, e ocupa uma espessura razoável o que é consequência do modelo de variograma ter cerca de metade do patamar representado por uma estrutura com amplitude de 10 m.

5.4.2 Modelo de teores

A construção do modelo de teores a 3D foi baseada no cenário otimista do modelo morfológico a 3D, isto é, aquele que se desenvolve até à camada base. Tal como explicado no capítulo 4, em primeiro lugar foram identificados, no modelo morfológico, os corpos contíguos de cascalho, sendo que depois se procedeu à estimação por krigagem normal a 2D das variáveis possança de cascalho, acumulação do número de pedras e acumulação dos teores. No final calcularam-se as variáveis relativas número de pedras e quantidades em diamante dividindo as estimativas da acumulação pela estimativa da possança de cascalho.

Ao todo foram identificados 20 corpos disjuntos de tipo cascalho, sendo que um apresenta o volume mais significativo com 17 146 blocos de um total de 18 824 blocos; dois apresentam volumes de 681 e 533 blocos; os restantes 17 apresentam volumes mais residuais e correspondem por isso a corpos sem conexão entre poços. Na figura 5.19 mostram-se quatro perfis N-S onde são visíveis estes corpos de cascalho; na tabela 5.8 listam-se o volume e o número de sondagens de cada corpo de cascalho.

Seguidamente cruzaram-se os dados das sondagens com os corpos de cascalho, onde para cada intersecção determinou-se, por sondagem, a possança de cascalho, a acumulação de número de pedras e a acumulação de teor. Para cada intersecção ficaram registadas as coordenadas X e Y dos poços e um valor de Z fíctício que designa o índice do corpo de cascalho (1, 2, ... 20). Este rearranjo do ficheiro de dados permite que o cálculo dos variogramas destas variáveis e a estimação seja independente corpo a corpo, e também que as 20 estimações possam ser feitas de uma vez. Na tabela 5.9 mostram-se os parâmetros dos variogramas ajustados a estas variáveis e nas figuras 5.20 a 5.22 os variogramas experimentais e os modelos teóricos ajustados a estas variáveis. Estas três variáveis foram estimadas por krigagem normal para toda a área de estudo, calcularam-se o número de pedras e os quilates condicionais ao corpo de cascalho e cruzaram-se as imagens calculadas destas variáveis com os corpos de cascalho tendo-se obtido as imagens finais a 3D. Na figura 5.23 mostram-se no mesmo perfil 44 NS a imagem média das litologias e as imagens estimadas do número de pedras por m³ e dos quilates também por m³.

Tabela 5.8 – Lista de corpos de cascalho, com o respetivo número de blocos, volume (m³) e número de interseções por sondagens.

Corpo de cascalho	Número de blocos	Volume m³	Nº de intersecções por sondagens
1	17 146	342 920	127
2	1	20	1
3	18	360	1
4	6	120	1
5	130	2 600	1
6	8	160	1
7	59	1 180	1
8	681	13 620	9
9	21	420	1
10	1	20	1
11	105	2 100	1
12	533	10 660	1
13	4	80	1
14	1	20	1
15	6	120	1
16	88	1 760	2
17	2	60	1
18	9	180	1
19	3	60	1
20	2	40	1

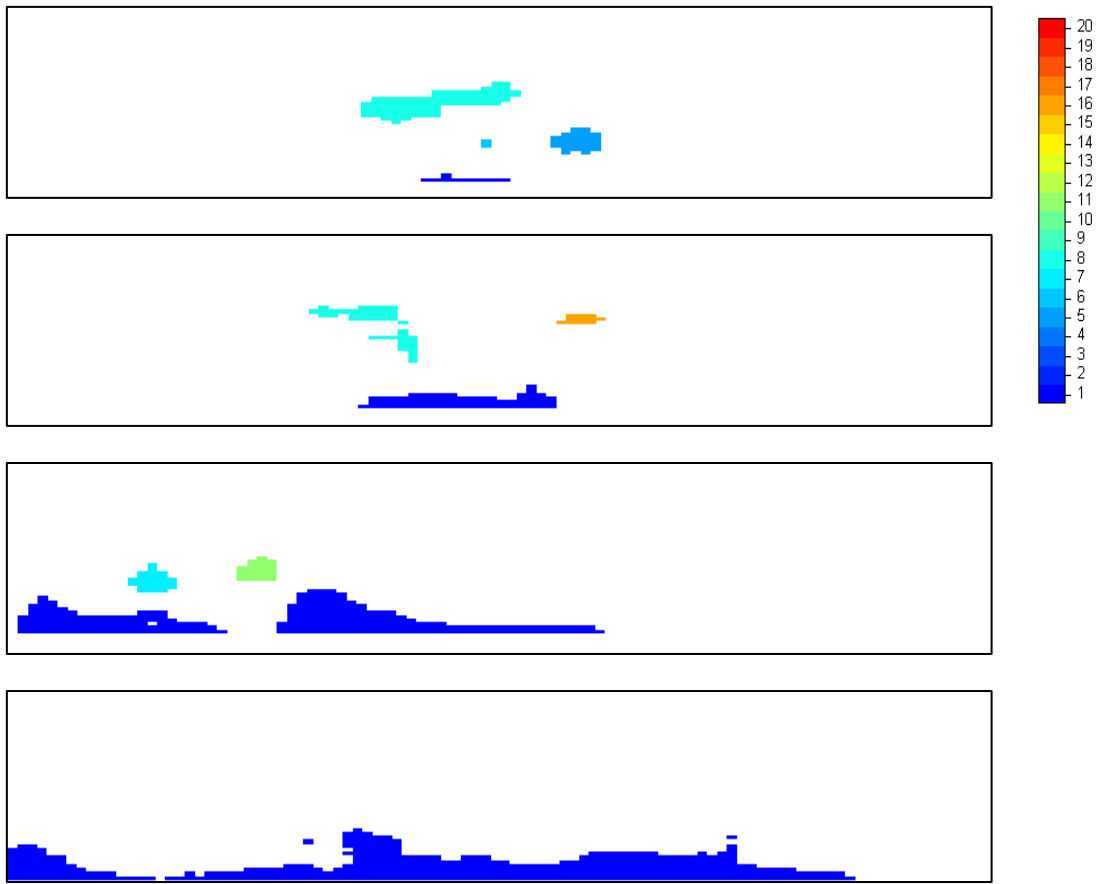


Figura 5.19 – Imagens dos corpos de cascalho disjuntos representados em quatro perfis centrais orientados NS. O corpo de cascalho de maior dimensão é o número um e está representado na base do modelo em todos os perfis com cor azul-escuro.

Tabela 5.9 – Parâmetros dos modelos teóricos ajustados aos variogramas experimentais condicionais por corpo de cascalho das variáveis possança de cascalho, acumulação do número de pedras e acumulação de teor.

		Possança de cascalho	Acumulação do número de pedras	Acumulação do teor
C_0 (efeito de pepita)		0	0	0
1ª estrutura	Modelo teórico	Exponencial	Exponencial	Exponencial
	C_1	0,630	0,809	0,263
	a_1 (m)	450	40	40

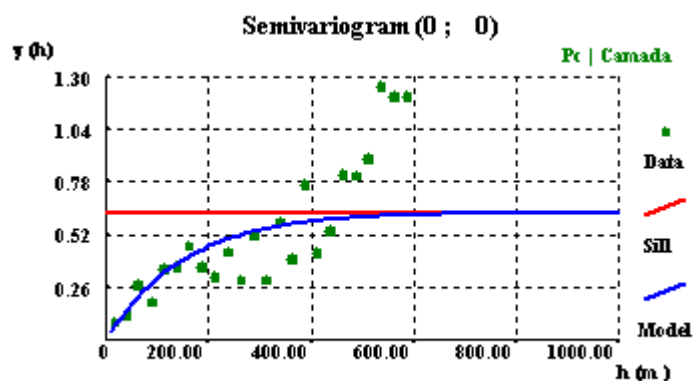


Figura 5.20 – Variograma experimental da variável possança de cascalho condicional por corpo de cascalho e modelo teórico ajustado de tipo exponencial.

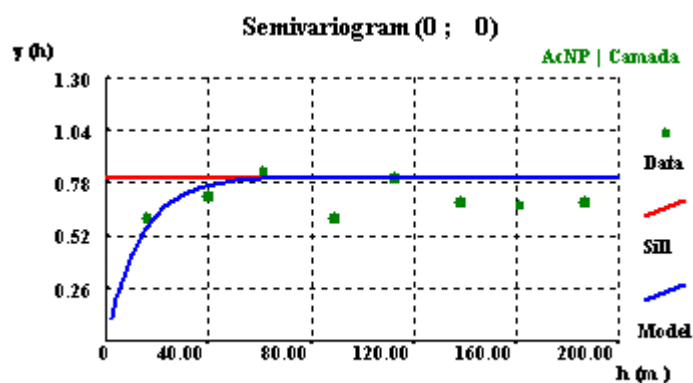


Figura 5.21 – Variograma experimental da variável acumulação do número de pedras condicional por corpo de cascalho e modelo teórico ajustado de tipo exponencial.

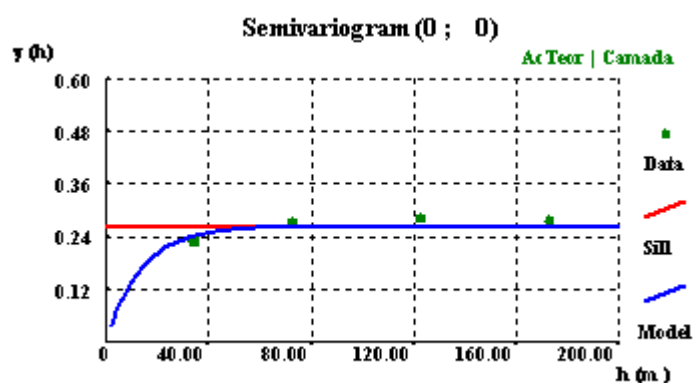


Figura 5.22 – Variograma experimental da variável acumulação de teor condicional por corpo de cascalho e modelo teórico ajustado de tipo exponencial.

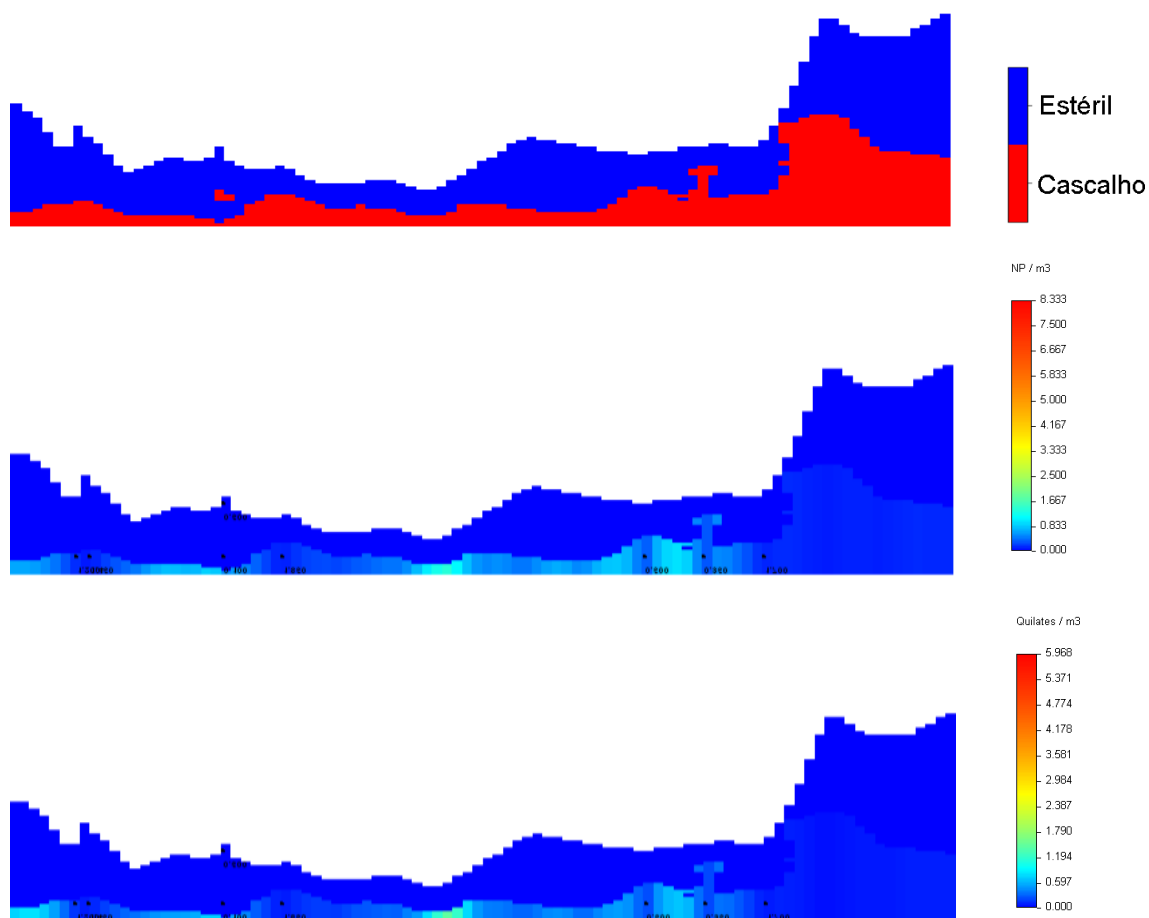


Figura 5.23 – Imagens do perfil 44 NS da morfologia das litologias de estéril e cascalho, número de pedras e quilates por m³ condicionais por corpo de cascalho.

Na tabela 5.10 comparam-se o número de pedras e quilates totais obtidos nos modelos 2D e nas duas variantes do modelo 3D. Para construir a informação desta tabela, os valores do modelo 2D foram sujeitos a uma majoração da mesma ordem de grandeza da verificada no modelo 3D otimista de modo a tornar possível a comparação de resultados.

Tabela 5.10 – Comparação do número de pedras e quilates obtidos nos modelos 2D e nas duas variantes do modelo 3D.

Quantitativos totais no depósito de:	Modelo 2D krigagem	Modelo 2D krigagem + (7,8%)	Modelo 3D krigagem condicional
Número de pedras	202 395	218 181	238 073
Quilates	140 146	151 077	162 107

5.5 Discussão de resultados

Os volumes obtidos nos modelos a 2D e a 3D estão em linha com o que é razoável neste tipo de depósitos aluvionares, onde um mineral muito valioso está fortemente disseminado. O fato de a proporção entre o estéril e o cascalho rondar as 4x não torna, de forma alguma, o depósito desinteressante do ponto de vista económico, visto que se trata de um depósito diamantífero.

Ao longo do estudo verificou-se que as variáveis morfológicas apresentam variogramas experimentais com maiores amplitudes e também são muito mais fiáveis do que os das variáveis de teor. Este fato é antecipado nos resultados da análise univariada, onde os coeficientes de variação são muito menores nas variáveis morfológicas assim como os de assimetria. Já os variogramas experimentais da variável indicatriz são fiáveis mas exibem uma fracção de aleatoriedade à pequena escala próxima de metade do paramar na direcção horizontal.

Quando se comparam as médias dos dados dos poços com os dos modelos observam-se algumas diferenças que são o resultado da desagregação espacial levada a cabo pela krigagem e pela simulação, reponderando o peso e a influência de conjuntos de amostras muito próximas. Em todos os casos, verifica-se que os resultados dos modelos a 2D e a 3D são semelhantes, desde que comparados dentro do mesmo envelope.

A opção de delimitar a morfologia através de duas perspectivas distintas (uma mais optimista e outra dita conservadora) mostrou ser útil para compreender a geologia do depósito. Ambas apresentam vantagens e desvantagens, no entanto, é de se salientar que o modelo morfológico optimista demonstra potencial para dar suporte a um estudo económico uma vez que a camada de base é muito regular.

Tal como foi evidenciado nalguns testes efectuados, as variáveis acumulação de quilates e de número de pedras não permitiram o cálculo e a modelação de variogramas a 3D, e todos os resultados mostraram variogramas erráticos na direcção horizontal. Tal já era expectável devido ao carácter errático associado à ocorrência de diamantes em depósitos aluvionares. Além disso, apesar de se ter conhecimento do número de pedras recuperadas por poço não se sabe a profundidade exata a que estas foram recuperadas, apenas o intervalo de profundidades. Por estas duas razões, e para apresentar um modelo msotrando a variação dos teores em profundidade, propõe-se uma metodologia específica para a modelação a 3D das variáveis de teor, que é baseada no estabelecimento de correlações entre camadas de cascalho identificadas nos poços e suportada numa análise preliminar de identificação de corpos de cascalho disjuntos extraídos de um modelo morfológico.

Nos dados que foram fornecidos, são apenas apresentados o número total de pedras e o peso total em quilates por troço de cascalho, ou seja, não é possível conhecer o peso de cada pedra recuperada nem estabelecer leis estatísticas de distribuição da frequência da dimensão das pedras.

6 CONCLUSÕES

Nesta dissertação foi proposta uma metodologia que contribuísse para a inovação da concepção de modelos geoestatísticos a 3D aplicados à caracterização de depósitos aluvionares diamantíferos.

No caso de estudo desenvolveram-se duas abordagens uma a 2D e outra a 3D. A abordagem a 2D está assente na krigagem normal e este é de fato o melhor estimador quando se pretendem apresentar valores globais conferindo um termo de comparação e controlo de qualidade dos resultados obtidos e também onde não é relevante o mapeamento da incerteza. Já quando se pretende a construção de um modelo morfológico de alta resolução, assente numa malha de blocos a 3D, e também se pretende associar incerteza a SSI passa a ser a técnica geoestatística mais adequada.

É importante referir que os dados fornecidos determinaram a escolha das ferramentas e o desenho da metodologia e destacam-se três lacunas: (1) Não era conhecida a cota da boca dos poços, e então assumiu-se que a camada base funcionava como um plano de referência para o estabelecimento de correlações espaciais na horizontal. Este pressuposto funcionou, e em todos os testes levados a cabo, os melhores variogramas na horizontal foram obtidos neste referencial. (2) Não existem registos de número e peso das pedras a intervalos regulares, mas apenas acumulados por camada de cascalho o que torna impossível quantificar a continuidade espacial a 3D das variáveis de teor na direcção horizontal e na vertical. Por esta razão acumularam-se as camadas de cascalho na modelação a 2D e propõe-se uma metodologia que transforma o 3D em vários horizontes a 2D (cada horizonte é representado por um corpo de cascalho). (3) Não é apresentada a discriminação dos quilates por pedra recuperada o que tornou impossível associar uma qualquer lei de distribuição de peso / frequência.

Conclui-se assim que, apesar das limitações impostas pelas bases de dados mais antigas, esta metodologia permitiu o estabelecimento de um modelo geológico de alta resolução a 3D assim como a quantificação do número de pedras e quilates totais contribuindo assim como uma importante alternativa para modelação deste tipo de depósitos. O melhoramento desta metodologia poderá contribuir para uma maior valorização económica para estes depósitos.

No futuro estes métodos poderão ser aplicados em estudos de viabilidade de casos de estudo atuais para, deste modo, conferir a sua eficácia e corrigir quaisquer aspetos passíveis de serem melhorados.

7 REFERÊNCIAS

- Almeida, J. A., Soares, A., Mariano, A. C. & Albuquerque, A. (1994) Zonal Control of Reserves Estimation of a Diamond Alluvial Deposit, Proceedings of the Conference on Mining Geostatistics, South Africa.
- Almeida, J., Soares, A. & Albuquerque, A. (1997) Zonal control to estimate classes of histograms: application to a diamond alluvial deposit, In E.Y. Baafi and N.A. Schofield editors, Geostatistics Wollongong'96, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2: 658-669, ISBN: 0-7923-4494-4 (HC).
- Almeida, J. A. (2010) Stochastic simulation methods for characterization of lithoclasses in carbonate reservoirs. *Earth Science Reviews*, 101, pp. 250-270.
- Andrade, C. F. (1953a) - Subsídios para o conhecimento da Geologia da Lunda. *Compo Diam. Angola*, Diamang, Publicações Culturais, Lisboa, pp. 17.
- Andrade, C. F. (1953b) - On the age of the so called "Lunda Stage" in the diamondiferous region of Northern Angola. (A suplement to *Diamond Deposits in Lunda*, Imprensa Moderna, 1954: 1-8); *Boletim Sociedade Geológica de Portugal*, vol. XI, pp. 69-74.
- Andrade, C. F. (1954) - On the oldest diamondiferous sedimentary rocks found in the northeast Lunda and mentioned in "*Diamond Deposits in Lunda*". *Com. Serv. Geol. Portugal*, T. XXXV, pp. 5-10
- Caers, J. (2011) *Modeling uncertainty in the Earth Sciences*. Wiley-Blackwell, pp. 229.
- Cahen, L., Jamote, A., Lepersonne, J., Mortelmans, G. (1946) État actuel des connaissances relatives à la stratigraphie des Systèmes du Kalahari et du Karroo au Congo Belge. *Serv. Geol. Congo Belge, Ruanda Urundi. Bul.*, 1-2 (2), pp. 257-289.
- Cahen, L. (1983) Brèves précisions sur l'age des Groupes Cretaciques post-Wealdien (Loia, Bokungu, Kwango) du Bassin intérieur du Congo (Republique du Zaire). *Mus. Roy. Afri. Centr., Tervuren (Belg.), Dép. Geol. Min., Rapp. Ann. 1981-1982*, pp. 61-72.
- Campos, B. (1995) *Caracterização e Avaliação Geoestatística de Recursos Diamantíferos em Depósitos de Origem Aluvionar*, Tese de Mestrado, IST
- Chambel, L., Reis, M., & Caetano, L. (2013) *One century of Angolan diamonds*.
- Chambel, L. (2016) *Dados, figuras e tabelas não publicados até ao momento*.

- De Ploey, J.; Lepersonne, J. & Stoops, G. (1968) - Sédimentologie et origine des sables de la série des "Grés Polimorphes" (Système du Kalahari) au Congo Occidental. Mus. Roy. Afr. Centr., Tervuren, Belgique, *Ann. Ser., In 8° Sc. Geol*, pp. 61.
- Delville, R. (1961) Teoria Geral do Graben de Lucapa. *Rel. Inéd. Comp. Diam. De Angola*.
- Delville, R. (1973) Le problème de l'origine de certains diamants detritiques de l'Afrique Centrale et plus particulièrement de la Formation Calonda d' Angola. *Rel. Inéd. Comp. Diam. de Angola*.
- Fipke, C. E.; Gurney, J. J. & Moore, R. O. (1995) - Diamond exploration techniques emphasising indicator mineral geochemistry and Canadian examples. *Geological Surv. of Canada Bull.*, 423, pp. 86.
- Goovaerts, P. (1997) Geostatistics for Natural Resources Evaluation. Oxford University Press, New York, pp. 480.
- Gouveia, J., Moncada, P., Monteiro, J., Neto, M. (1993) Riquezas Minerais de Angola. FIM DE SÉCULO EDIÇÕES, pp. 143-180.
- Gurney, J. J. (1989) Diamonds. In: Ross, J. Ed., "Kimberlites and Related Rocks", Geological Society Australia, Spec. Publication N° 14, Blackwell Sci. Publ., Oxford, pp. 935-965.
- Gurney, J. J., Helmstaedt, H. H., Richardson, S. H., Shirey, S. B. (2010) Diamonds through time. *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists*, pp. 689–712.
- Journal A. G., Alabert F. (1989) Non-Gaussian Data Expansion in the Earth Sciences, *Terra Nova*, 1, pp. 123-134
- Kirkley, M. B., Gurnay, J. J. & Levinson, A. A. (1992) Age, origin and emplacement of diamonds: a review of scientific advances in the last decade. *Bull. Canadien des Mines*, Vol. 85, n° 956, pp. 48-57.
- Leakey, L. S. B. (1949) Subsídios para a História, Arqueologia e Etnografia dos Povos da Lunda. "Tentative study of the Pleistocene Climatic Changes and Stone - Age Culture Sequence in Northeastern Angola". Companhia de Diamantes de Angola (Diamang), Publicação Cultural. n° 4, Dundo.
- Lepersonne, J. (1945) - La Stratigraphie du Système du Kalahari et du Systeme du Karroo au Congo Occidental. Serv. Geol. Congo Beige, Ruanda, Urundi, *Bul.* 1, pp. 27-50.
- Matheron G. (1965) Les Variables Regionalisées et Leur Estimation, Paris, Masson & Cie.

- Meyer, H. O. A. (1985) Genesis of diamond: a saga. *Amer. Mineral.*, Vol. 7, pp. 344-355.
- Meyer, H. O. A. (1987) Inclusions in diamonds. In: Nixon, P. H. Ed., "Mantle Xenoliths ", John Willey, New York, pp. 501-522.
- Mitchell, Roger H. (1986). *Kimberlites Mineralogy, Geochemistry, and Petrology*, Plenum Press, New York.
- Monforte, A. (1970) A tectónica lineamentar e a reparticao espacial e genética das fontes primárias de diamantes. *Bol. Servo Geol. Minas de Angola, Luanda*, pp. 17-22.
- Monforte, A., Reis, B. & Pereira, E. (1979) - Nota preliminar sobre a descoberta de conglomerados da Serie Kwango, na região de Makongonio (Gabão). *Com Servo Geol. Portugal, T.*, 65, pp. 201-204.
- Monforte, A. (1988) O Diamante em Angola. Nas rochas kimberlíticas e nos jazigos secundários. Tomo I - *Geologia Geral*. Sociedade Portuguesa de Empreendimentos, Lisboa, pp. 104.
- Monforte, A. (1993) Os jazigos de diamante em Angola, a problemática da sua prospecção: evolução e perspectivas. Sociedade Portuguesa de Empreendimentos (Policopiado).
- Pearson D. G., Shirey S.B. (1999) Isotopic dating of diamonds. In D.D. Lambert and J. Ruiz, Eds., *Reviews in Economic Geology: Application of Radiogenic Isotopes to Ore Deposit Research and Exploration*. Society of Economic Geologists, pp. 143–171.
- Pearson D. G., Wittig N. (2008) Formation of Archaean continental lithosphere and its diamonds; the root of the problem. *Journal of Geological Society, London*
- Pereira H. G. (1981) *Análise Estrutural e seus Reflexos na Avaliação Económica de Recursos minerais*, Tese de Doutoramento, IST.
- Pereira, E., Rodrigues, J., & Reis, B. (2003) Synopsis of Lunda geology, NE Angola. *Comunicações do Instituto Geológico e Mineiro*, 90, pp. 189–212.
- Reis, B., (1972) Nota preliminar sobre a distribuição dos quimberlitos em Angola e seu controlo estrutural. *Mem. Not., Universidade de Coimbra*, 73, pp. 3-12.
- Reis, B., Pereira, E., Rodrigues, J. & Góis, J. (2000) Economic potencial of Calonda Formation basal gravels: future target on diamond mining in Angola. Poster 31.º Congresso Internacional de Geologia, Brasil.

- Rodrigues, J. F. (1993) Contribuição para a prospeção geológica-mineira do diamante na Lunda (Lucapa, NE Angola): Possíveis perspectivas de atualização. Relatório de estágio profissionalizante, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, pp. 74.
- Rodrigues, J., Góis, J., Reis, Bernardo, Pereira, E. (2000) Haverá Futuro para os diamantes de aluvião no NE de Angola?, 14, pp. 55-63
- Shirey, S. B., Cartigny, P., Frost, D. J., Keshav, S., Nestola, F., Nimis, P., Walter, M. J. (2013). Diamonds and the Geology of Mantle Carbon. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, pp. 355–421.
- Shirey, S., & Shigley, J. (2003) Recent Advances In Understanding the Geology of Diamonds, 49 (April), pp. 145–151.
- Soares, A. (1998) Sequential Indicator Simulation with Correction for Local Probabilities, *Mathematical Geology*, vol. 30, nº 6, pp. 761-765.
- Soares, A. (2006) *Geoestatística para as Ciências da Terra e do Ambiente*. IST Press, 2ª edição pp. 14-73.
- Valente, J., Cardoso, L. C., Cardoso, M., & Silva, E. A. (1999) Ore Reserve Estimation of Alluvial Diamond Deposits.
- Tappert, R. Tappert, M.C. (2011) *Diamonds in Nature: A Guide to Rough Diamonds*. Springer Verlag, Heidelberg, Germany.