



**João Pedro Pequito Correia**

Licenciado

**Contributo para a modelação 3D de horizontes  
geológicos com o auxílio de sísmica de reflexão e dados  
de sondagens e poços: um caso de estudo na Bacia  
Cenozóica do Baixo Tejo**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Geológica

Orientador: Doutor José António de Almeida, Prof. Associado,  
FCT-UNL

Presidente: Prof. Doutor José Carlos Ribeiro Kullberg

Arguente: Prof. Doutor Leonardo Azevedo Guerra Raposo Pereira

Vogal: Prof. Doutor José António de Almeida



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Abril 2017**



**João Pedro Pequito Correia**

Licenciado

**Contributo para a modelação 3D de horizontes  
geológicos com o auxílio de sísmica de reflexão e  
dados de sondagens e poços: um caso de estudo na  
Bacia Cenozóica do Baixo Tejo**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Geológica

Orientador: Doutor José António de Almeida, Prof. Associado,  
FCT/UNL

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa  
Departamento de Ciências da Terra

**Abril 2017**



# **Contributo para a modelação 3D de horizontes geológicos com o auxílio de sísmica de reflexão e dados de sondagens e poços: um caso de estudo na Bacia Cenozóica do Baixo Tejo**

Copyright © João Pedro Pequito Correia, da FCT/UNL e da UNL

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

A conclusão desta dissertação representa o culminar de uma etapa da minha vida e do meu percurso académico. Desse modo, devo um especial agradecimento a todas as pessoas e entidades que, direta ou indiretamente, contribuíram para tal.

Ao Professor Doutor José António de Almeida, a quem quero expressar a minha imensa gratidão pela oportunidade de ser seu orientando. O seu brio profissional, experiência e dedicação inigualáveis foram fundamentais para ultrapassar todos os obstáculos e desafios. O meu muito obrigado.

Ao Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG), agradeço a disponibilização dos dados e perfis sísmicos, tal como o apoio prestado durante este trabalho. Um agradecimento especial à Dr.<sup>a</sup> Judite Fernandes e Dr. João Carvalho por toda a cooperação e acompanhamento.

À Entidade Nacional para o Mercado dos Combustíveis (ENMC), pela disponibilização do seu arquivo e registos que foram auxiliares importantes no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA), pelo apoio prestado e esclarecimento de algumas questões que foram surgindo ao longo da dissertação.

À *Midland Valley* que tem em vigor um protocolo de utilização educacional com a FCT Universidade NOVA de Lisboa para o *software Move*®.

Ao Departamento de Ciências da Terra, da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, e todo o seu corpo docente e não docente, que me receberam e apoiaram ao longo destes dois anos de mestrado. Um agradecimento especial ao Professor Doutor José Carlos Kullberg, pelas revisões e sugestões prestadas, que contribuíram grandemente para o aperfeiçoamento da dissertação.

À Universidade de Évora, ao Departamento de Ciências da Terra, aos docentes, o meu especial obrigado. Que o seu futuro possa ser tão ou mais brilhante que o seu passado histórico. *”Honesto estudo com longa experiência misturado.”*

Aos meus amigos, que me acompanharam e se preocuparam ao longo de todo este percurso, incentivando-me a ir mais longe, a ser mais e melhor. Uma palavra especial para o Duarte Galhardo, Sofia Pereira, Ricardo Silva, Cláudia Raimundo, Miguel Serpa, Rúben Gonçalinho e Susana Nobre. A sua importância é imensurável.

À Maria Inês Pires, por tudo o que significa na minha vida, agradeço pelo apoio, companheirismo e motivação. A sua força e confiança permitiu-me acreditar e lutar sempre.

À minha família, pela liberdade de sonhar alto. Os seus princípios e valores são uma referência que sempre procurarei seguir. À Aida e ao Valentim, pelo apoio fundamental nestes últimos meses, um obrigado nunca será suficiente. Aos meus pais, Ana e Cândido, pelo amor, incentivo, sacrifício e apoio, o meu eterno obrigado. Aos meus avós, Teresa, Fernanda e Gabriel, responsáveis por muito do que sou, agradeço o seu carinho, lucidez e dedicação, desde sempre e para sempre. Ao meu irmão Pedro, pelo companheirismo e amizade. A sua energia contagiante, inteligência e sentido de humor foram essenciais ao longo de todos estes anos.

A todos o meu profundo e sincero agradecimento.

## Resumo

O presente trabalho tem como principal objetivo apresentar e testar uma metodologia que permita a integração de perfis sísmicos de reflexão (informação secundária ou *soft*) e dados de sondagens e poços (informação principal ou *hard*) na modelação estocástica da morfologia de horizontes geológicos. Divide-se em duas etapas principais: primeiro são geradas superfícies representativas dos horizontes, só condicionais aos dados da sísmica e, posteriormente, faz-se o condicionamento destas superfícies aos dados de sondagens e poços.

Para a geração das superfícies primárias, só condicionais aos dados da sísmica, testaram-se duas abordagens de simulação condicional: i) condicionamento a leis de distribuição regionais de cotas; ii) condicionamento a matrizes locais de desníveis.

Para efetuar o condicionamento das superfícies aos dados de sondagens e poços, calcularam-se coeficientes de correlação locais, entre as superfícies primárias e os dados das sondagens, estimaram-se por krigagem estes coeficientes de correlação locais para toda a área de estudo e, deste modo, co-simularam-se as superfícies, com condicionamento aos dados das sondagens e poços às superfícies previamente simuladas conforme os coeficientes de correlação locais.

A metodologia proposta foi testada numa zona da Bacia Cenozóica do Baixo Tejo. Foram utilizados perfis sísmicos de reflexão, provenientes de campanhas de prospeção petrolífera, realizadas na bacia durante o séc. XX, poços profundos e sondagens.

Os resultados mostram que as muitas contradições entre a informação sísmica e os dados dos poços e sondagens são resolvidas pela metodologia proposta, prevalecendo a informação principal em detrimento da informação secundária quando existem as duas em simultâneo, mas mantendo as tendências regionais capturadas pela sísmica.

**Palavras-Chave:** Modelação geológica 3D; modelação de superfícies; modelo morfológico; simulação e co-simulação sequencial direta; sísmica de reflexão; poços e sondagens; Bacia Cenozóica do Baixo Tejo.



## Abstract

The objective of the present work is to propose and test a methodology that allows the use of seismic reflection sections (soft data) and wells/deep boreholes data (hard data) for stochastic morphology modelling of sedimentary geological formations. This methodology can be divided into two main stages: in a first stage, the transition surfaces between layers are generated, constrained to the soft information and, in a second stage, these surfaces are constrained to the hard data.

For the generation of the primary transition surfaces, conditional to seismic data, two approaches of conditional simulation were tested: i) conditioning to regional elevation histograms; ii) conditioning to local slopes.

To carry out the conditioning of the previously simulated surfaces to the hard information, local correlation coefficients were calculated between the simulated surfaces in the previous step and the boreholes data. These local correlation coefficients were estimated by kriging for the entire study area and then the surfaces were co-simulated, conditional to the hard data and to the previously simulated surfaces, according to the local correlation coefficients.

The proposed methodology was tested in an area of the Lower Tagus Cenozoic Basin. Seismic reflection profiles from oil surveys developed during the 20th century, wells and deep boreholes were used in this work.

The results show the many contradictions between the seismic information and the well/ deep boreholes data are solved by the proposed methodology, with the main information prevailing over the secondary information when both simultaneously exist but maintaining the regional trends captured by the seismic.

**Key-words:** 3D geological modelling; modelling of surfaces; morphological model; direct sequential simulation and co-simulation, reflection seismic, wells and deep boreholes; Lower Tagus Cenozoic Basin.



# Índice Geral

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 Enquadramento e Objetivos .....	1
1.2 Organização da Tese .....	2
<b>2. ÁREA DE ESTUDO .....</b>	<b>3</b>
2.1 Enquadramento Geográfico.....	3
2.2 Enquadramento Geológico.....	3
2.2.1 Litoestratigrafia .....	5
2.2.2 Evolução Paleogeográfica.....	11
2.2.3 Tectónica.....	13
2.2.4 Hidrogeologia.....	13
<b>3 METODOLOGIA E FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....</b>	<b>15</b>
3.1 Estado da Arte .....	15
3.2 Estratégia da Metodologia Proposta.....	16
3.3 Informação Disponível e Pré-processamento dos Dados .....	19
3.4 Fundamentos Teóricos da Geoestatística .....	20
3.4.1 Variografia e modelo teórico.....	20
3.4.2 Estimaco geoestatística por krigagem normal e co-krigagem co-localizada.....	22
3.4.3 Simulao geoestatística .....	23
3.5 Alteraes ao Algoritmo de Simulao Sequencial Direta no Âmbito deste Trabalho... .....	26
3.5.1 Simulao de superfícies condicional a desníveis locais calculados por direo	26
3.5.2 Simulao sequencial direta condicional a leis de distribuico por regio .....	30
3.5.3 Co-simulao condicional a coeficientes de correlao locais.....	30
<b>4 CASO DE ESTUDO .....</b>	<b>33</b>
4.1 Descrio dos Dados de Partida.....	33

4.1.1	Perfis sísmicos de reflexão .....	33
4.1.2	Sondagens e poços profundos .....	37
4.2	Análise Estatística dos Dados de Partida .....	40
4.3	Variografia e Ajuste dos Modelos Teóricos.....	43
4.4	Simulação das Superfícies Condicionais à Sísmica .....	45
4.5	Simulação de Superfícies Condicionada a Orientações e Desníveis Locais .....	51
4.6	Condicionamento das Superfícies Anteriormente Simuladas aos Dados de Poço por Co-Simulação Sequencial Direta .....	54
4.6.1	Avaliação dos coeficientes de correlação locais entre as imagens simuladas condicionais à sísmica e os dados das sondagens / poços .....	54
4.6.2	Condicionamento Final por Co-simulação.....	56
4.7	Modelo Morfológico Final.....	60
4.8	Discussão dos Resultados.....	62
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>65</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>67</b>

## Índice de Figuras

Figura 2.1 - Localização da área de estudo e o seu contexto geográfico a nível nacional e regional .....	3
Figura 2.2 - Unidades morfo-estruturais da Península Ibérica. A cinzento-escuro estão representadas as bacias mesozóicas portuguesas e a cinzento claro as cenozóicas (Adaptado de Ribeiro <i>et al</i> , 1979 in Kullberg, 2000). .....	4
Figura 2.3 - Enquadramento da área de estudo no contexto geológico nacional e regional (adaptado de Brito, 2009). .....	7
Figura 2.4 - Correlação das unidades litostratigráficas do Cenozóico do setor distal da Bacia do Baixo Tejo, com destaque para as unidades Miocénicas (Kullberg <i>et al</i> , 2006). .....	9
Figura 2.5 - Corte esquemático e enquadramento regional dos horizontes modelados neste estudo e assinalados na figura por Z1, Z2 e Z3 (Adaptado de Pais <i>et al</i> , 2006). .....	10
Figura 2.6 - Reconstituições paleogeográficas das fases evolutivas da BBT, desde o Luteciano (A) até meados do Miocénico - Langhiano (D) (Pais <i>et al</i> , 2012). .....	11
Figura 2.7- Reconstituições paleogeográficas das fases evolutivas BBT, desde meados do Miocénico - Serravaliano (E) até ao Pliocénico Superior (G) (Pais <i>et al</i> , 2012). .....	12
Figura 3.1 – Fluxograma das etapas seguidas neste trabalho experimental. ....	18
Figura 3.2 – Exemplo de uma malha de células com valores locais de cotas. ....	27
Figura 3.3 – Exemplo de construção da malha local de desníveis a partir da mesma matriz de cotas para as direções N e SW. ....	27
Figura 3.4 - Índices das células do caminho aleatório gerado em duas malhas 5x5. O exemplo da esquerda válido e o direita é inválido. Por exemplo, entre outros, a passagem da célula com índice 4 para a célula com índice 5 não respeita as condições de contato. ....	28
Figura 3.5 – Visualização de uma sequência aleatória válida. Na imagem da esquerda mostram-se os resultados para as primeiras 5000 células de um total de 10000 e na imagem da direita para todas as células. A escala representa o índice de ordem de cada célula a ser simulada, a azul são as primeiras e a vermelho são as últimas. ....	29
Figura 3.6 – Para cada poço / sondagem, são seleccionados os 10 poços / sondagens mais próximos e são determinados coeficientes de correlação entre estes dados e os homólogos provenientes das superfícies previamente simuladas. ....	30

Figura 4.1 - Enquadramento geográfico das linhas sísmicas resultantes das campanhas CA – Caparica, BA79 – Montijo e BA80 - Montijo (informação cedida pela ENMC). .....	34
Figura 4.2 - Horizontes sísmicos que foram interpretados, do topo para a base: Neogénico Superior (A), Neogénico Inferior (B), Paleogénico (C), Discordância Mesozóico / Cenozóico (D), Cretácico (E), Formação de Freixial (F), Formação de Abadia (G), Formação de Montejunto (H), Formação de Candeeiros (I), Formação de Coimbra (J) e Formação da Dagorda (K).....	36
Figura 4.3 - Enquadramento geográfico das sondagens e poços profundos (dados fornecidos pelo LNEG, ENMC e FCT-UNL).....	38
Figura 4.4 - Enquadramento geográfico das linhas sísmicas resultantes das campanhas CA – Caparica, BA79 – Montijo e BA80 - Montijo (informação cedida pela ENMC). .....	40
Figura 4.5 - Box-plots das cotas extraídas dos perfis sísmicos dos três horizontes estudados (Z1=A, Z2=B, Z3=C).....	41
Figura 4.6 – Digramas de dispersão entre as cotas dos 3 horizontes estudados Z1, Z2 e Z3 e indicação dos coeficientes de correlação de Pearson. ....	42
Figura 4.7 - Variogramas experimentais e modelos teóricos de tipo Gaussiano ajustados à variável cota dos três horizontes estudados (Z1, Z2 e Z3) com os dados provenientes da sísmica. ....	44
Figura 4.8 - Variogramas experimentais e modelo teórico de tipo Esférico ajustado à variável cota do horizonte Z1 com os dados provenientes dos poços / sondagens.....	45
Figura 4.9 – Leis de distribuição cumulativa condicional da variável cota relativa aos horizontes Z1, Z2 e Z3 por região. ....	46
Figura 4.10 – Representação espacial das regiões geradas para o horizonte Z1 (imagem de cima) e para os horizontes Z2 e Z3 (imagem de baixo) respetivamente 2 e 3 regiões sobre as imagens das cartas militares do local. ....	47
Figura 4.11 – Dados de partida e resultados para o horizonte Z1: cotas do horizonte segundo os dados da sísmica, regiões implementadas, exemplo de duas imagens simuladas, imagem média das simulações e imagem da variância das simulações.....	48
Figura 4.12 – Dados de partida e resultados para o horizonte Z2: cotas do horizonte segundo os dados da sísmica, regiões implementadas, exemplo de duas imagens simuladas, imagem média das simulações e imagem da variância das simulações.....	49
Figura 4.13 – Dados de partida e resultados para o horizonte Z3: cotas do horizonte segundo os dados da sísmica, regiões implementadas, exemplo de duas imagens simuladas, imagem média das simulações e imagem da variância das simulações.....	50

Figura 4.14 – Imagem média e filtrada das simulações da cota do horizonte Z1 condicional aos dados da sísmica.....	51
Figura 4.15 – Exemplo de duas imagens de desníveis locais em metros para as direcções N e S. ....	52
Figura 4.16 - Gráfico comparativo entre o coeficiente de correlação utilizado na estimação por cokrigagem colocalizada embebida na Co-SSD e o que é obtido entre duas imagens simuladas. ....	52
Figura 4.17 – Imagens simuladas da superfície Z1 condicionais a desníveis locais obtidos a partir da imagem média das simulações anteriores.....	53
Figura 4.18 – Variograma experimental e modelo teórico relativo a uma simulação e imagens estimadas dos coeficientes de correlação locais entre as simulações das imagens condicionais à sísmica e os dados das sondagens / poços.....	55
Figura 4.19 – Exemplo de quatro imagens simuladas das superfícies condicionais à sísmica e aos dados das sondagens / poços. ....	56
Figura 4.20 - Imagem média das simulações e imagem da variância local das simulações ou indicador de incerteza local.....	57
Figura 4.21 - Histogramas, simples e cumulativo, box-plots e estatísticos da realização #25....	58
Figura 4.22 - Histogramas, simples e cumulativo, box-plots e estatísticos dos dados experimentais. ....	59
Figura 4.23 - Variogramas da simulação #1. As direcções (0,0) e (90,0) correspondem aos eixos Y e X, respetivamente.....	59
Figura 4.24 - Variogramas da simulação #19. As direcções (0,0) e (90,0) correspondem aos eixos Y e X, respetivamente. ....	60
Figura 4.25 – Três representações do modelo morfológico construído para as superfícies primárias. Sobreposição das superfícies com as sondagens e poços.....	61



## Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Tabela cronoestratigráfica para o Cenozóico da Bacia do Baixo Tejo, com a correlação entre o tempo geológico, as fases tectónicas, as sequências deposicionais e as unidades litoestratigráficas (Pais <i>et al</i> , 2010).....	6
Tabela 4.1 – Parâmetros geométricos da malha do modelo. ....	33
Tabela 4.2 - Descrição das campanhas e parâmetros dos perfis sísmicos de reflexão utilizados nesta dissertação. Perfis reprocessados pelo LNEG (Carvalho <i>et al</i> , 2016).....	34
Tabela 4.3 – Referências e profundidades atingidas pelos poços profundos incluindo a sondagem de Belverde.....	39
Tabela 4.4 - Estatísticos básicos das cotas dos perfis sísmicos e das sondagens e poços profundos nos três horizontes estudados: Intra-Neogénico Superior (Z1), Intra-Neogénico Inferior (Z2) e Topo do Paleogénico (Z3).....	41
Tabela 4.5 - Síntese dos parâmetros dos modelos teóricos dos variogramas ajustados. ....	44



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento e Objetivos

A integração e conciliação de dados, de diferentes tipos e escalas, na construção de modelos geológicos 3D, nomeadamente na componente morfologia, constitui ainda hoje um desafio para as Geociências.

A presente dissertação tem como principal objetivo o desenvolvimento de uma metodologia que permita a construção de superfícies, por representação celular, representativas de transições entre formações geológicas de natureza sedimentar (horizontes), tendo em consideração diferentes tipos de dados, nomeadamente, perfis sísmicos de reflexão, poços profundos e sondagens. O resultado é um modelo morfológico 3D de horizontes geológicos (transições entre formações geológicas), que é a etapa primordial no processo de construção de qualquer modelo geológico 3D (morfologia e propriedades). O condicionamento da informação é feito à vez, primeiro são geradas superfícies por simulações condicionais aos dados da sísmica e, posteriormente, é feito o condicionamento destas superfícies aos dados dos poços e sondagens por novas simulações (co-simulações) condicionais.

A metodologia proposta é baseada nas ferramentas geoestatísticas Simulação e Co-simulação Sequencial Direta (SSD e CoSSD), que têm como principal característica gerarem vários cenários com a mesma probabilidade de ocorrência, possibilitando: i) estimar a incerteza local da variável em estudo e; ii) obter uma imagem média, aproximada ao resultado que seria gerado por um processo de estimação por krigagem (Soares, 2006; Charifo *et al*, 2013; Sanches, 2015). Em suma, neste trabalho pretende-se contribuir com uma abordagem que permita a integração ponderada de diferentes tipos de dados na construção de um modelo de morfologia, com a garantia de que a informação principal prevalece relativamente à informação secundária.

A área estudada, que serviu como caso prático demonstrativo da metodologia proposta, tem cerca de 480 km<sup>2</sup> e localiza-se na Península de Setúbal, concelhos do Seixal, Almada e Barreiro. Do ponto de vista geológico, enquadra-se no sector distal da Bacia do Baixo Tejo (BBT). Esta bacia Cenozóica teve uma evolução complexa ao longo do tempo, resultado da interação de movimentos tectónicos, oscilações do nível do mar e condições climáticas diversas (Pais, 1998).

Esta região tem sido alvo de vários trabalhos de pesquisa ao longo dos anos, nomeadamente estudos ambientais, geológicos e hidrogeológicos. Nas últimas décadas do século XX, diferentes entidades e empresas petrolíferas (e.g. Shell, CPP, BP) realizaram campanhas de prospeção

sísmica profunda na margem esquerda do rio Tejo. Mais recentemente, foram desenvolvidos diversos estudos ambientais, baseados em métodos de análise diretos e indiretos, com o principal objetivo de avaliar o impacto da atividade da fábrica da Sociedade Portuguesa de Explosivos (SPEL), que operou durante cerca de 50 anos, entre 1949 e 1998, produzindo compostos orgânicos, tóxicos e potencialmente cancerígenos (Quental, 2011).

Neste trabalho foi utilizada informação proveniente de perfis sísmicos de reflexão, sondagens e poços profundos relativa à posição em profundidade de três horizontes geológicos: Intra-Neogénico Superior, Intra-Neogénico Inferior e Topo do Paleogénico. Estes horizontes foram identificados durante os trabalhos de interpretação dos perfis sísmicos de reflexão, realizados pelas diferentes empresas prospetoras e, mais tarde, pelo LNEG.

## **1.2 Organização da Tese**

A tese encontra-se organizada em seis capítulos. No primeiro capítulo, “Introdução”, é apresentado o enquadramento geral do estudo, com os respetivos objetivos a atingir. No segundo capítulo, denominado “Área de Estudo”, faz-se um enquadramento geográfico, geológico, hidrogeológico e tectónico-estratigráfico da Bacia do Baixo Tejo, dando-se ênfase às diferentes etapas de formação da bacia, tal como aos fatores que tiveram influência na sua evolução.

No terceiro capítulo, “Metodologia e Fundamentos Teóricos”, apresenta-se o estado da arte e uma descrição das diferentes fases de desenvolvimento do trabalho, para além de toda a fundamentação teórica necessária e inerente a um trabalho deste género.

No capítulo seguinte, “Caso de Estudo”, é apresentada a descrição dos dados utilizados, tanto os perfis de reflexão sísmica como os poços profundos e as sondagens. Esta descrição contempla um enquadramento geográfico e uma breve caracterização técnica dos diferentes tipos de dados. Ainda dentro deste capítulo, apresentam-se os estatísticos básicos dos dados e os coeficientes de correlação entre os diferentes horizontes estudados, a que se segue a análise espacial, onde são apresentados os variogramas experimentais, os modelos teóricos ajustados e as simulações e co-simulações propriamente ditas. No subcapítulo final discutem-se os resultados obtidos em cada etapa metodologia aplicada e do modelo morfológico final.

No capítulo 5, tecem-se as considerações finais sobre o trabalho no seu conjunto, concluindo-se com uma breve reflexão sobre desenvolvimentos futuros e, por último, no capítulo 6 listam-se as referências bibliográficas.

## 2. ÁREA DE ESTUDO

### 2.1 Enquadramento Geográfico

A área estudada e que motiva a proposta metodológica localiza-se no concelho do Seixal, distrito de Setúbal. Situa-se na margem esquerda do rio Tejo e é limitada a Nordeste pela Baía do Seixal. A Sul faz fronteira com o concelho de Sesimbra, enquanto a Este e Oeste é limitada pelos concelhos de Almada e Barreiro, respetivamente. Na Figura 2.1, apresenta-se o enquadramento nacional e regional, tendo como base a Carta Militar de Portugal - Folhas 442, 443, 453 e 454 - Barreiro, do Instituto Geográfico do Exército, à escala 1:25000.

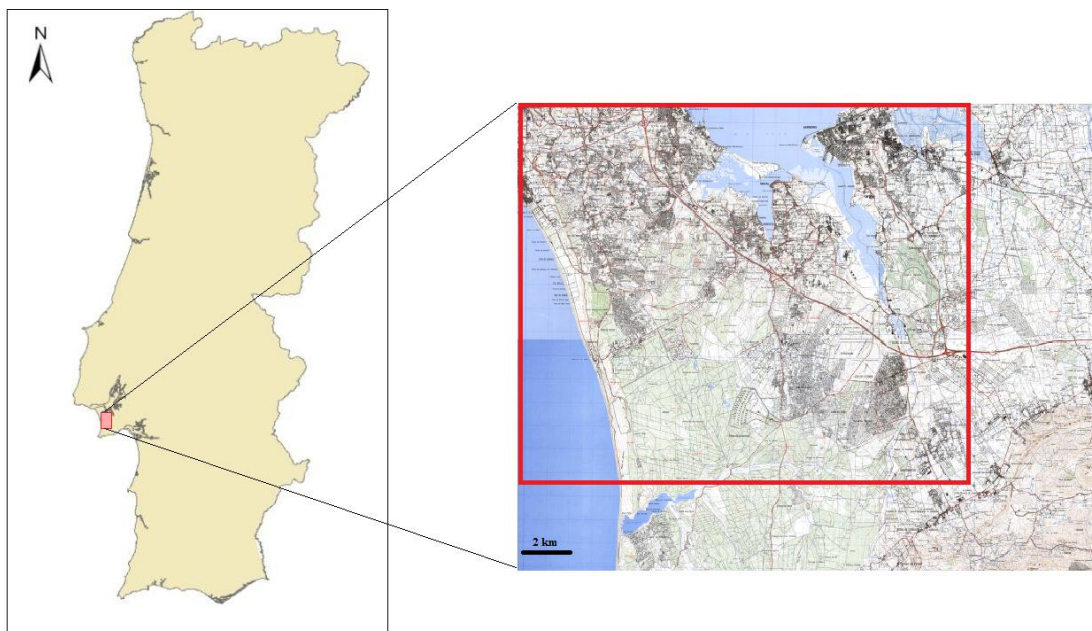


Figura 2.1 - Localização da área de estudo e o seu contexto geográfico a nível nacional e regional

### 2.2 Enquadramento Geológico

A área estudada enquadra-se no sector distal da Bacia do Baixo Tejo (BBT). Esta bacia Cenozóica, com 260 km de comprimento e 80 km de largura, estende-se em terra desde a região de Lisboa-Península de Setúbal, ultrapassando a fronteira com Espanha na área de Castelo Branco, até à zona de Placencia (Antunes *et al*, 2000; Pais *et al*, 2013). Em Portugal ocupa todo

o Ribatejo, grande parte do Alto-Alentejo e a região sul da Beira-Baixa. Esta bacia teve uma evolução complexa ao longo do tempo, resultante da interação de movimentos tectónicos, oscilações do nível do mar e condições climáticas diversas (Pais, 1998). A Figura 2.2 representa as principais unidades morfo-estruturais da Península Ibérica.

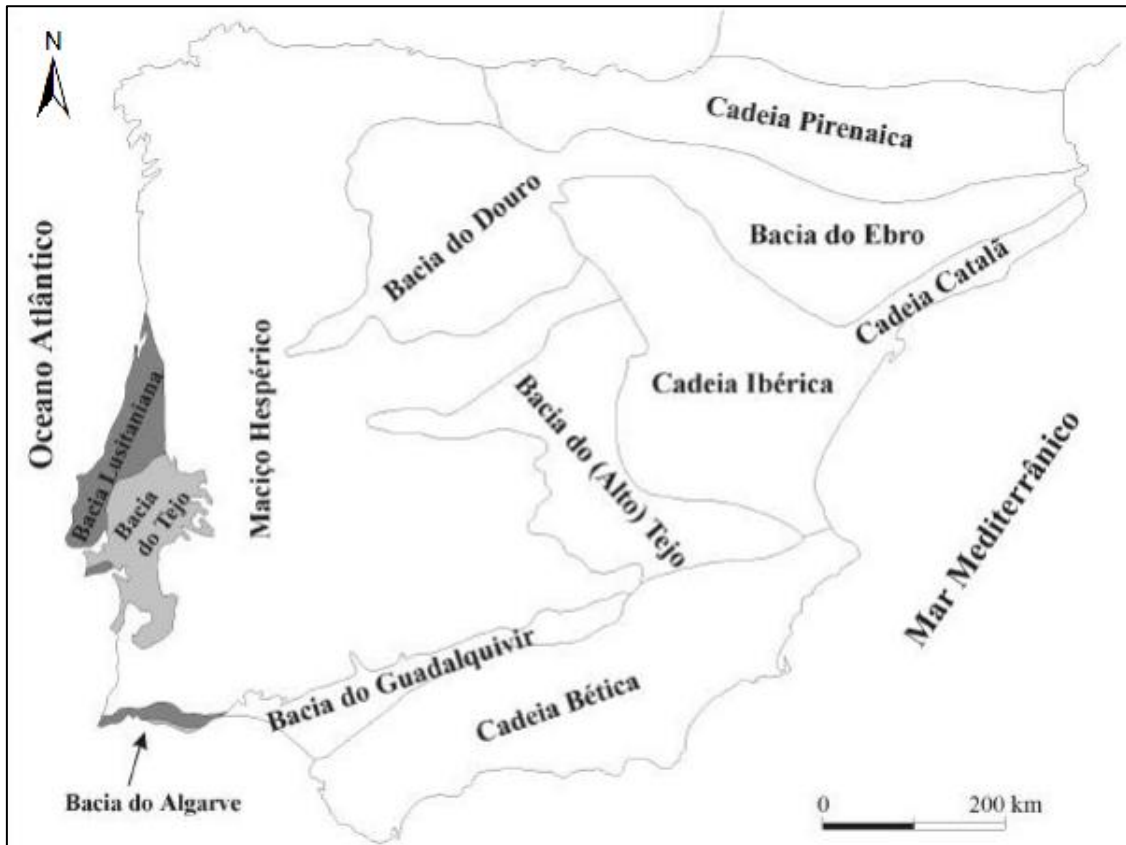


Figura 2.2 - Unidades morfo-estruturais da Península Ibérica. A cinzento-escuro estão representadas as bacias mesozóicas portuguesas e a cinzento claro as cenozóicas (Adaptado de Ribeiro *et al*, 1979 in Kullberg, 2000).

Na Bacia do Baixo Tejo podem distinguir-se três sectores individualizáveis, tanto em termos de enchimento como de evolução geológica:

- Sector distal, a sudoeste, ocupando as regiões de Lisboa e da Península de Setúbal, mais próximo da ligação ao Atlântico;
- Sector intermédio, ocupando o Ribatejo e parte do Alto Alentejo, com fácies continentais e alguns episódios salobros quando da ocorrência de níveis marinhos elevados;
- Sector proximal, a nordeste, que ultrapassa a fronteira com Espanha, apenas com fácies continentais.

Os sectores representados na Figura 2.2 correspondem aos sectores distal e intermédio. Tal como foi referido anteriormente, a área estudada localiza-se no sector distal da BBT, pelo que se considerou fundamental abordar os processos tectónico-estruturais e eustáticos que lhe deram origem, a evolução paleogeográfica e as suas características litoestratigráficas.

### **2.2.1 Litoestratigrafia**

A caracterização da litoestratigrafia da Península de Setúbal resultou de um conjunto de estudos geológicos realizados no Município de Almada. Cotter (*in* Dollfus *et al*, 1903-04) estabeleceu as divisões do Miocénico, ainda utilizadas atualmente como unidades litoestratigráficas. Choffat (1950) esquematizou e comparou as colunas estratigráficas da região de Lisboa. Antunes *et al* (1973) definiram os ciclos de transgressão e regressão, baseando-se nas características marinhas e continentais das unidades definidas previamente por Cotter. Antunes e Pais (1993) melhoraram as correlações entre a região de Almada (Península de Setúbal) e as unidades da BBT na região do Ribatejo. Foram também caracterizadas sete transgressões (T0-T6), que alternam com seis regressões (R0-R5). As correlações com a Bacia do Alto Tejo (ou Bacia de Madrid) foram estabelecidas com base nas principais descontinuidades sedimentares, e a sua cronostratigrafia foi definida pela análise da fauna fóssil (Antunes *et al*, 1987a). A análise e integração de numerosos dados líticos e biostratigráficos, permitiram a implementação de uma tabela cronostratigráfica de elevada resolução (Tabela 2.1).

A BBT funcionou em regime endorreico no Paleogénico. Acumularam-se depósitos de leques aluviais alimentados a partir dos relevos marginais, nomeadamente do maciço Hespérico e da Bacia Lusitaniana. A partir do início do Miocénico, devido à entrada do Oceano Atlântico na bacia, a sedimentação na região passou a ocorrer na interface oceano-continente. No contexto deste trabalho, serão analisadas as características litoestratigráficas para os Períodos do Paleogénico e Neogénico, sendo dada uma maior relevância às épocas que se enquadrem no modelo de superfícies desenvolvido.

Tabela 2.1 – Tabela cronostratigráfica para o Cenozóico da Bacia do Baixo Tejo, com a correlação entre o tempo geológico, as fases tectónicas, as sequências deposicionais e as unidades litoestratigráficas (Pais *et al*, 2010)

Era/Erat.	Perí./Sist.	Época/Série	Idade/Andar	Unidades faunísticas	Ma	Fase tectónica	Sector distal				
							Seq. deposicional (Unid. litostr. (Collier, 1966))	Lisboa / Almada	Península de Setúbal Litoral ocidental / Flanco norte da serra da Arrábida		
Cenozóico	Neogénico	Holocénico	Versiliano		0,01	Iberomanchega  Bética		Aluviões	Aluviões Dunas		
			Trentiano					Terraços	Terraços		
		Plistocénico	Ioniano		1,8				Formação de Marco Furado		
			Calabriano		2,6				Conglomerado de Belverde		
			Gelasiano	Vilariano	3,6				Formação de Santa Marta		
		Pliocénico	Sup. Placenciano	Rusciano	5,3				Areas de Rio da Prata ?		
			Inf. Zanciano	Turoliano	7,3						
		Miocénico	Sup. Tortoniano	Valesiano	11,6			T2 VIIIb Areas de Cabo Ruivo	Depósitos de Ribeira da Lage	Arenas e margas de Quinta do Anjo	
			Mid. Serravaliano	Astaraciano			13,7		T1 VIIa Areas de Braço de Prata	Dep. glauconíferos de Penedo	Conglomerados de Gorda Mor
									S2 VIIc Calcários de Marvila		
	Inf. Langhiano		Ortoisiano		16		S1 VIa Argilas azuis de Xabregas	Dep. detriticos de Penedo	Arenitos e biocalcarenitos de Pinhal e Castelo de Palmela		
							L1 VIc Calcários da Quinta das Conchas				
							VIb Areas do Vale de Chelas				
	Burdigaliano		Ageniano		20,4	"Arrábida" Neocastelhana	Va3 Calcários da Musgueira		Arenas de Quinta da Torre		
						B2 Va2 Areas com Plioceno miocénico					
						Va1 Calcários do Casal Vistoso					
	Paleogénico	Oligocénico	Sup. Chatiano		23		B1 IVb Areas da Quinta do Bacalhau	Biocalcarenitos e margas de Foz do Forte	Argilitos de Azeite		
			Inf. Rupeliano		34	Castelhana	IVa Argilas azuis do Azeiro				
		Eocénico	Sup. Priaboniano		56	Pré-Pirenaica	III Benco Real				
			Med. Luteciano			Neolarémida	B0 II Areas da Estefânia	Congl. e areas de F. Forte			
		Paleocénico	Sup. Tanetiano				A2 I Camadas com Venus ribeiral		Calcários margosos de Palhavã		
			Med. Selandiano				A1 I				
		Inf. Daniano					Associação IV				
						Associação III	Formação de Benfica	Formação de Benfica			
					Associação II						
					Associação I						

## Paleogénico

Os materiais provenientes do maciço Hespérico e da Bacia Lusitaniana afloram na margem da bacia, rodeando-a por completo. São constituídos, predominantemente, por depósitos grosseiros, conglomeráticos, a que se associam alguns corpos arcóscicos mais finos, crostas calcárias às vezes bastante desenvolvidas e, mesmo, alguns calcários lacustres e/ou palustres. Em Lisboa-Península de Setúbal, constituem a Formação de Benfica, com cerca de 400 metros de espessura (Zbyszewski, 1963), no sector intermédio a Formação de Monsanto, na área proximal a Formação de Cabeço do Infante e na margem sul da bacia a Formação de Vale de Guizo (Kullberg *et al*, 2006).

Choffat (1950) reportou esta formação ao Oligocénico, tendo em conta a posição entre a “formação basáltica” subjacente, alegadamente Eocénica, e o Miocénico Inferior. Novas datações de unidades eocénicas e observações de campo comprovaram o carácter heterogéneo da Formação de Benfica. Esta está assente em descontinuidade sobre o “Complexo Vulcânico de Lisboa-Mafra” (Cretácico Superior), do qual retoma materiais (Kullberg *et al*, 2006). Na parte superior, é limitada por descontinuidade, ou passa gradualmente, aos sedimentos marinhos do Miocénico

Inferior (Aquitânico). De fato, a base dos sedimentos marinhos sobrejacentes registra uma superfície transgressiva, sendo que a sua expressão estratigráfica e cronológica é muito imprecisa. Reis e Cunha (1989) referem a existência de associações de fácies com diferenciações a nível do acarreo detrítico. A estrutura vertical e lateral e a evolução sequencial indicam influência da atividade tectónica, consistente com a subsidência ocorrida na direção NE-SW, aparentemente mais intensa no topo. Reis e Cunha (1989) afirmam ainda que a diferenciação de dois episódios separados por uma descontinuidade deposicional é atribuível a uma fase orogénica, também identificada nos depósitos correspondentes noutras regiões.

### Neogénico

O Neogénico ocupa área significativa nas folhas 34-D Lisboa e 38-B Setúbal da Carta Geológica de Portugal, à escala 1:25000 (Figura 2.3).

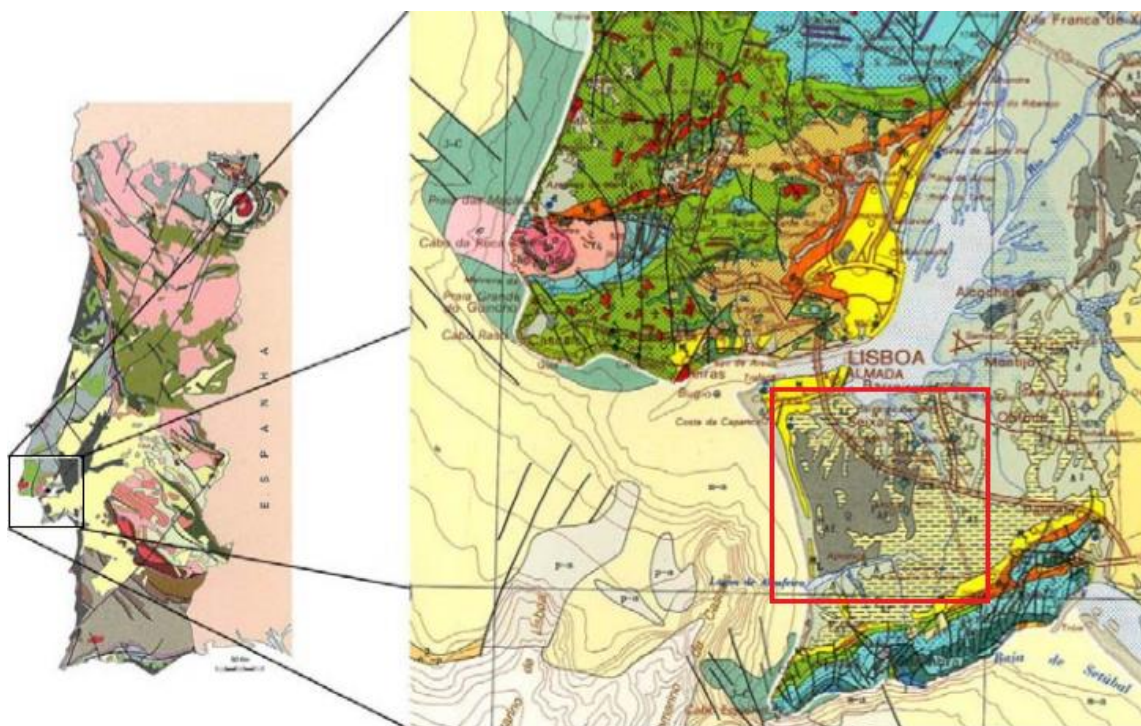


Figura 2.3 - Enquadramento da área de estudo no contexto geológico nacional e regional (adaptado de Brito, 2009).

Os últimos depósitos paleogénicos são continentais, detríticos, grosseiros, esbranquiçados e sobre eles ocorrem arenitos marinhos, avermelhados a amarelados, com datação ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) de ~ 18,8 M.a. na parte inferior e de ~ 17,5 M.a. no topo, correspondente ao Burdigaliano Inferior, aproximadamente equivalente às Divisões III e IVa do Miocénico de Lisboa-Almada (Cotter, 1956). Representam o ciclo transgressivo que culminou na Divisão IVa. Este conjunto foi dobrado e sobre ele assentam, em discordância angular no extremo Oeste do Chão da Anixa e em paraconformidade no setor Este, calcários ricos de clastos rolados de quartzo, com abundantes

rodólitos<sup>1</sup>, pectinídeos<sup>2</sup> de grandes dimensões e ouriços. A sua datação (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr) é de ~ 16,5 Ma. Sobre este conjunto existem areias finas e siltitos encimados por biocalcarenitos datados de ~ 16 M.a., correspondendo ao início do Miocénico médio, equivalente da Divisão Vb de Lisboa/Almada (Kullberg *et al*, 2006). A deformação tectónica responsável pela discordância angular data de, aproximadamente, 17 M.a. e corresponde a uma lacuna situada no final da Divisão Va2. Os conjuntos sedimentares pós discordância indicam a possibilidade de terem existido outras fases tectónicas mais recentes (Antunes *et al*, 1995). Na Figura 2.6 está representada a correlação entre as unidades litoestratigráficas do Cenozóico do setor distal da BBT. Durante o Miocénico, a evolução climática também foi caracterizada. No mar prevaleciam condições tropicais. No Burdigaliano Superior e Langhiano a temperatura atingiu o máximo, tornando-se bastante semelhante à temperatura atual do golfo da Guiné. Mais tarde, a temperatura desceu, tornando-se similar à que hoje existe nas águas marroquinas. A fauna e flora continentais apontam para uma alternância de episódios húmidos e secos, tendo o mais seco ocorrido no Langhiano (Antunes & Pais, 1984 *in* Brito, 2009).

Devido à regressão generalizada ocorrida no Pliocénico, o pré-Tejo transportou areias arcóicas que se prolongam desde o setor proximal e penetraram mesmo na Bacia de Alvalade, galgando o *horst* de Belverde - Senhor das Chagas. Na Península de Setúbal as areias são finas (Formação de Santa Marta), bem calibradas e praticamente sem leitos de calhaus. Contudo, na base, ocorrem canais cascalhentos que erodem os depósitos marinhos miocénicos, que indicam o início do processo de sedimentação fluvial. Na região do Laranjeiro, estes estratos incluem clastos de basaltos provenientes da região de Lisboa, evidenciando a existência de drenagem de N e NW para o interior da Península de Setúbal. A entrada das águas salobras na Península, referida por Azevêdo (1983), justifica a existência de argilas com gesso, macrorrestos de vegetais, ostras e *Dreissena*<sup>3</sup> no terço superior da Formação de Santa Marta. Depois, os depósitos fluviais regressaram à Península e sobre estes ocorrem conglomerados com clastos de quartzito e de quartzo, alguns facetados pelo vento. Sobre o Conglomerado de Belverde existem depósitos de leques aluviais, gerados na dependência da Serra da Arrábida, que constituem a Formação de Marco Furado. Esta é constituída por conglomerados com clastos, envolvidos por óxidos de ferro e constituídos por rochas paleozóicas, suportados por uma matriz areno-argilosa de cor vermelha (Kullberg *et al*, 2006).

---

<sup>1</sup> Rodólitos - estruturas livres compostas por ramificações de algas vermelhas coralinas, resultado do envolvimento de uma rocha, bioclasto ou qualquer outro objeto solto (Rebelo, 2010).

<sup>2</sup> Pectinídeos - família de moluscos lamelibrânquios de concha de valvas.

<sup>3</sup> *Dreissena* - espécie de molusco pertencente à família *Dreissenidae*.

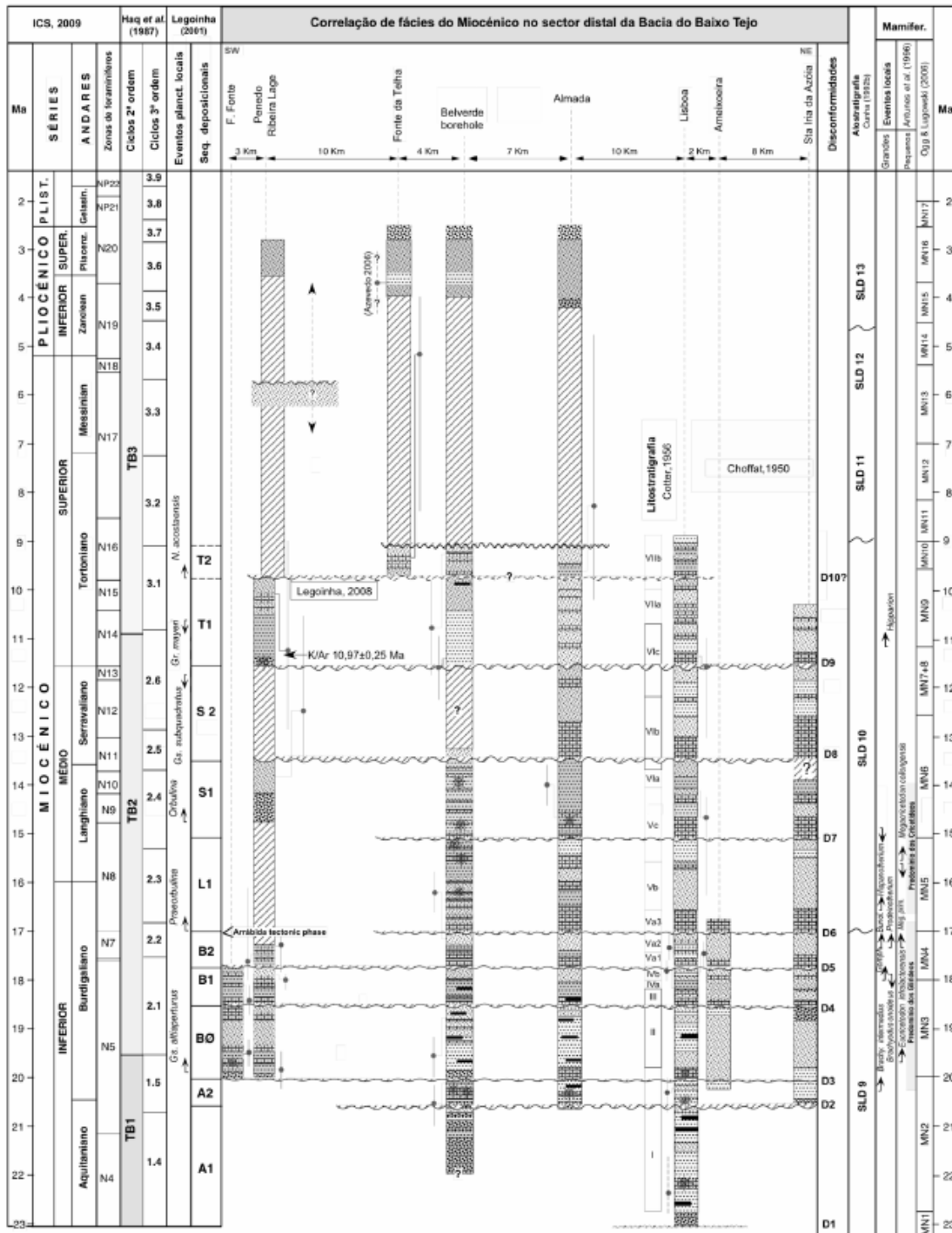


Figura 2.4 - Correlação das unidades litostratigráficas do Cenozóico do setor distal da Baía do Baixo Tejo, com destaque para as unidades Miocénicas (Kullberg *et al.*, 2006).

O Plistocénico está representado por vestígios de praias a altitudes entre 25 e 90 metros e sobre a Formação de Marco Furado desenvolvem-se extensos campos de dunas recentes, que atingem cotas na ordem dos 110 metros nos Medos de Albufeira, a Sul de Fonte da Telha. Na planície litoral, a sul de Trafaria, até à lagoa de Albufeira, existem areias eólicas e dunas longitudinais e ao longo das linhas de água existem aluviões desenvolvidas. Ao longo da linha de costa existem areias de praia e no sopé da arriba fóssil de Costa de Caparica ocorrem depósitos de vertente.

Pais *et al* (2006) publicaram um corte geológico com a orientação NNW - SE que sumariza as formações e os limites geológicos existentes na zona estuda. O corte referido encontra-se representado na Figura 2.5.

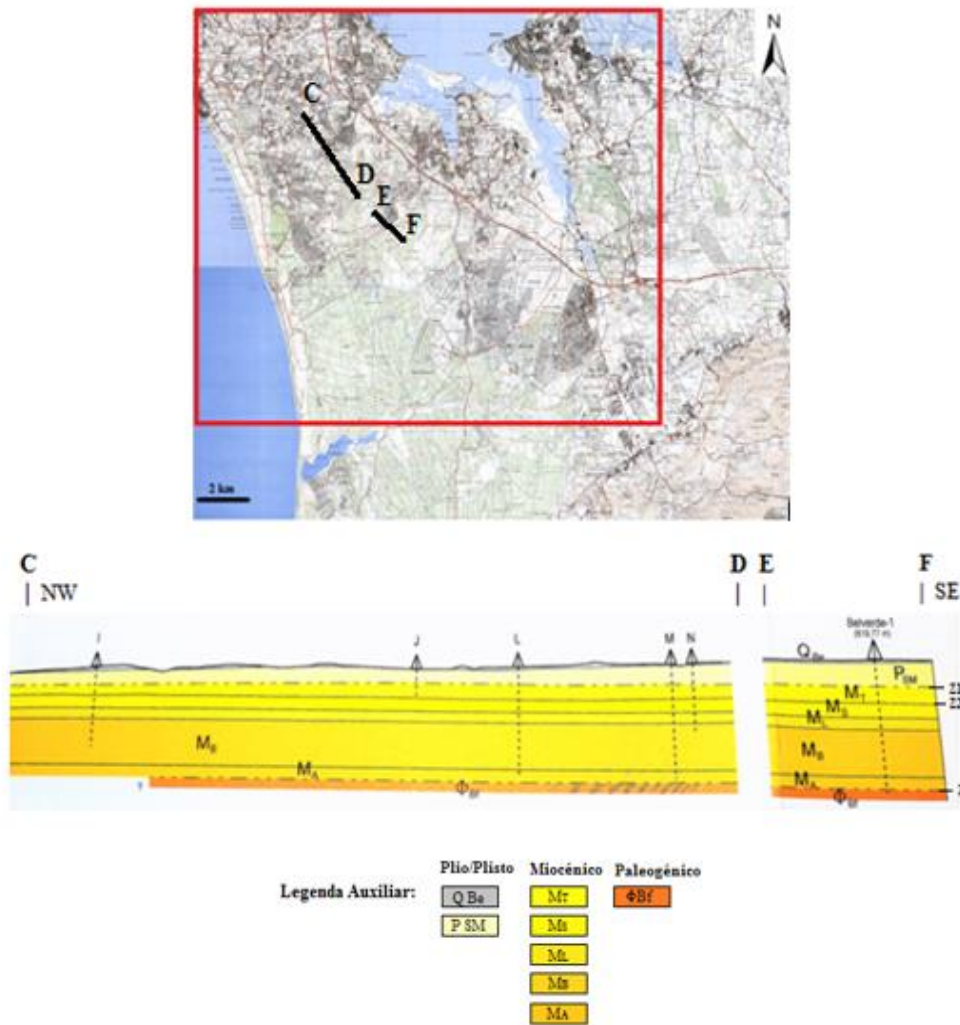


Figura 2.5 - Corte esquemático e enquadramento regional dos horizontes modelados neste estudo e assinalados na figura por Z1, Z2 e Z3 (Adaptado de Pais *et al*, 2006).

## 2.2.2 Evolução Paleogeográfica

As primeiras reconstituições paleogeográficas do sector distal da BBT foram apresentadas por Antunes (*in* Ribeiro *et al*, 1979). Novos dados, incluindo os fornecidos pelo estudo da sondagem de Belverde (Pais *et al*, 2002; Legoinha *et al*, 2002; Pais, 2004) e a caracterização de unidades alostratigráficas nos sectores intermédio e proximal possibilitaram o estabelecimento de novos mapas esquemáticos sobre a evolução paleogeográfica (Figuras 2.6 e 2.7). Em meados do Eocénico iniciou-se o enchimento sedimentar, sendo que a transição para a etapa de incisão ocorreu a partir do Pliocénico. A sedimentação na região ocorreu na interface oceano-continente a partir do momento em que o Atlântico invadiu a bacia no Aquitaniano, início do Miocénico, com oscilações da linha de costa dependentes das variações eustáticas e dos efeitos tectónicos. Kullberg *et al* (2000) afirmam que a primeira entrada do mar se deu a sul, tendo definido um golfo estreito e pouco penetrativo. A água quente promoveu a instalação de recifes de corais que definiram uma barreira orientada N-S e a Arrábida constituiu uma ilha desde a sua elevação no Burdigaliano Superior ( $\approx$  de 17 Ma). A penetração do mar na bacia definiu golfos mais ou menos extensos conforme o nível eustático, a subsidência e os acarreios sedimentares. O Miocénico marinho da parte distal da BBT termina no Tortoniano Médio, com evidência de fácies litorais, correspondentes a canais de maré e ocorrência de tempestitos.

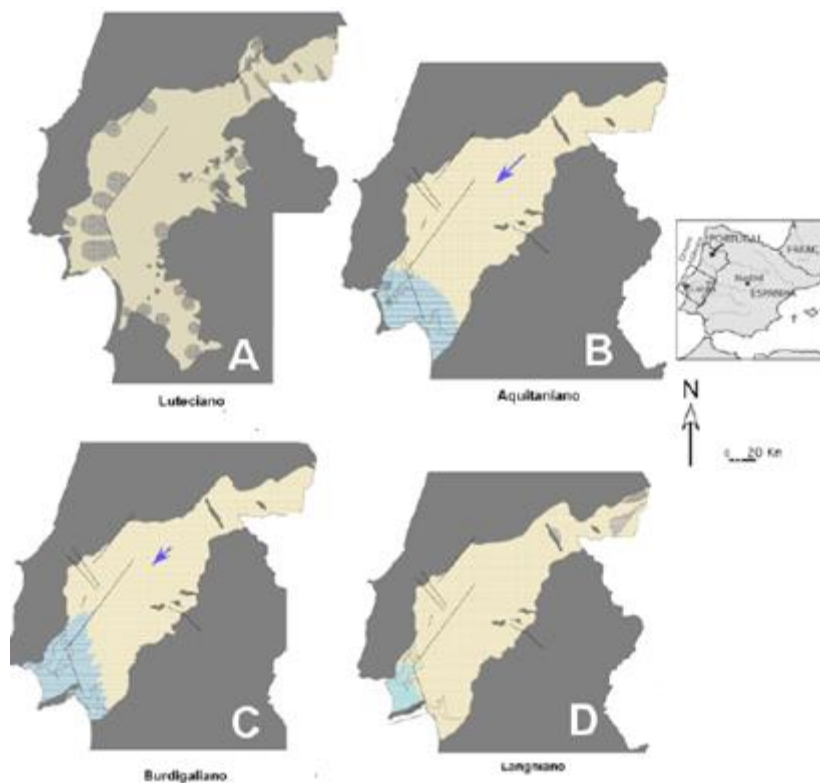


Figura 2.6 - Reconstituições paleogeográficas das fases evolutivas da BBT, desde o Luteciano (A) até meados do Miocénico - Langhiano (D) (Pais *et al*, 2012).

No Pliocénico houve progradação generalizada, o que levou à acumulação de areias provenientes de Espanha. Estas areias constituem a Formação de Santa Marta, já caracterizada no subcapítulo anterior.

Posteriormente, no Pliocénico Superior (Placenciano), há um aumento da energia do rio provocado pelo levantamento de relevos. Esta situação vai potencializar o transporte e acumulação de mantos de cascalheiras que se estendem até ao litoral atual. Este episódio marca a passagem do Pliocénico para o Plistocénico.

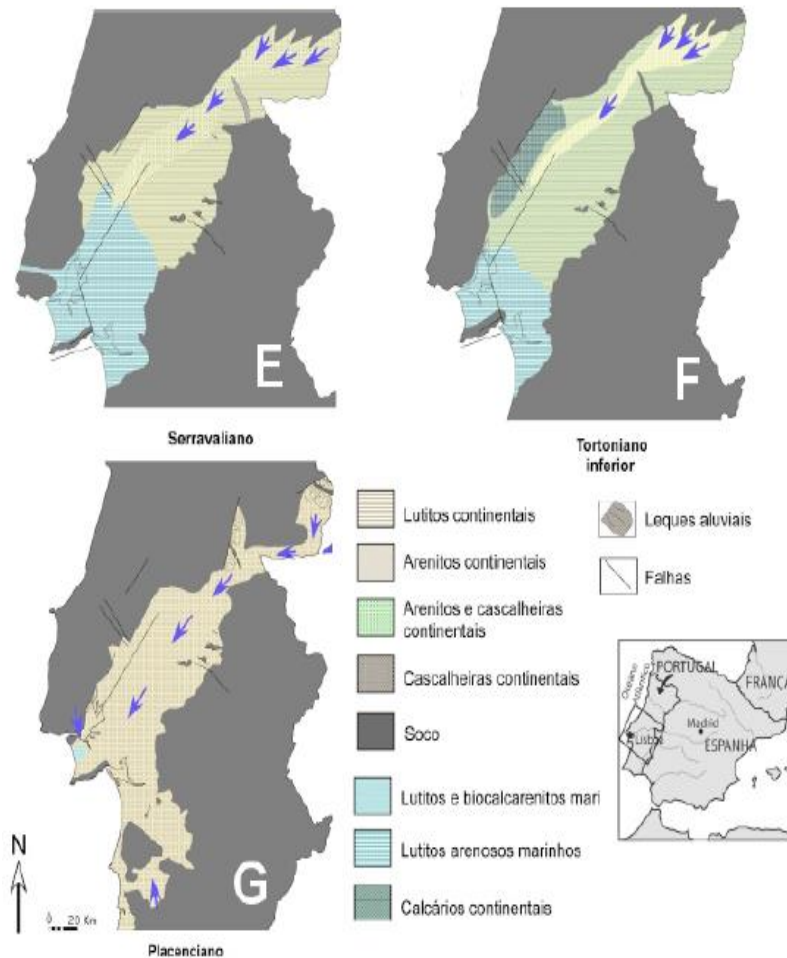


Figura 2.7- Reconstituições paleogeográficas das fases evolutivas BBT, desde meados do Miocénico - Serravaliano (E) até ao Pliocénico Superior (G) (Pais *et al*, 2012).

Após este acontecimento, verificou-se uma inversão da rede de drenagem, provocada pela subsidência da península para NE. Esta subsidência aliada a fenómenos de natureza tectónica levaram ao desvio do Tejo para a posição atual, passando-se para um ambiente de sedimentação diversificado. Por fim, tanto o clima como as condições de larga parte da zona costeira passaram a ser favoráveis à deposição de grandes unidades de areias eólicas (Quental, 2011).

### 2.2.3 Tectónica

É dominada por uma tectónica frágil, controlada pela ativação de acidentes tectónicos do soco Mesozóico e Paleozóico (Almeida *et al*, 2000). Ribeiro *et al* (1979) referem a existência de campos de forças distensíveis durante o Mesozóico, ocorrendo inversão tectónica no Cenozóico. Esta inversão provocou a formação de relevos marginais que condicionaram a formação de áreas tectónica e geograficamente deprimidas, favoráveis à evolução e deposição de sedimentos na BBT.

A Bacia do Baixo Tejo é interpretada como uma bacia ante-país, gerada na dependência de um regime compressivo que desencadeou inversão tectónica da Bacia Lusitaniana, em resultado da convergência do continente africano relativamente ao bloco continental ibérico (Ribeiro *et al*, 1979; Curtis, 1999; Kullberg *et al*, 2000). A discriminação de diferentes fases de inversão tectónica neogénica fundamenta-se em dados provenientes da Cadeia Orogénica da Arrábida, localizada na Folha 38–B Setúbal, da Carta Geológica de Portugal, onde se verificam dois impulsos tectónicos compressivos principais, o intra-Burdigaliano e o pós-Tortoniano (Ribeiro *et al*, 1979; Kullberg *et al*, 2000).

A zona vestibular do Tejo é caracterizada por uma atividade sísmica importante que, defende Cabral (1995), está diretamente relacionada com estruturas profundas, destacando-se a denominada falha do Tejo. Esta falha, de orientação provável N30E, é mal conhecida e pouco estudada pois encontra-se coberta por aluviões e outros depósitos recentes.

### 2.2.4 Hidrogeologia

Os sedimentos que constituem a bacia servem de suporte a um sistema aquífero que integra, juntamente com o da margem direita e com o das aluviões do Tejo, uma grande unidade hidrogeológica (Almeida *et al*, 2000, Pais *et al*, 2006). Considera-se que as aluviões do Tejo, incluindo a zona do estuário, são as áreas de descarga dos sistemas aquíferos subjacentes.

Os principais cursos de água provenientes do Maciço Hespérico cortam as formações terciárias através de vales largos e pouco profundos. As direções predominantes da rede de drenagem são NE-SW ou SE-NW, alternando para E-W em terrenos quaternários.

O sistema aquífero é formado por várias camadas porosas, em geral confinadas ou semi-confinadas. Vários autores (Simões, 1998; Almeida *et al*, 2000; Pais *et al*, 2006) afirmam que as mudanças significativas nas condições hidrogeológicas são causadas pelas frequentes variações laterais e verticais das fácies litológicas e que a passagem das formações continentais miocénicas para as marinhas é gradual. Desta complexidade litológica e estrutural, resulta um conjunto

alternante de camadas aquíferas separadas por outras de permeabilidade baixa ou muito baixa (aquítardos e aquíclusos), nalguns locais com predomínio de uma ou outra classe de formações hidrogeológicas.

As características do sistema variam em função da importância das camadas pliocénicas e da constituição e espessura das formações miocénicas. Assim, segundo Almeida *et al* (2000), na Península de Setúbal o sistema é constituído por um aquífero superior livre, instalado nas camadas do topo do Pliocénico e depósitos detríticos mais recentes, sobrejacente a um aquífero confinado, multicamada, que tem como suporte as camadas de base do Pliocénico e camadas greso-calcárias atribuídas ao Helveciano Superior. O mesmo autor defende que, subjacente a este conjunto, separado por formações margosas espessas, existe outro aquífero confinado, também multicamada, tendo por suporte formações greso-calcárias da base do Miocénico.

A recarga destes aquíferos é feita principalmente por infiltração direta nos depósitos detríticos quaternários e pliocénicos, que cedem parte desta infiltração às formações mais profundas do Pliocénico. Estes, por sua vez, cedem parte dessa recarga às formações miocénicas subjacentes, por drenância. Estas formações também recebem água diretamente, nos locais onde afloram (Pais *et al*, 2006; Quental, 2011).

## 3 METODOLOGIA E FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 3.1 Estado da Arte

A Modelação Geológica 3D (MG3D) constitui-se como uma importante ferramenta de investigação dentro das Geociências, permitindo interpretação, armazenamento, comunicação e divulgação de informação. Permite ainda a integração de diferentes tipos de informação (cartografia, poços, geofísica, geoquímica, entre outros), provenientes de diversas fontes, incrementando o intercâmbio entre diferentes áreas científicas (Ferreira & Almeida, 2010).

Um modelo geológico 3D é uma construção tridimensional em computador que representa a forma e as propriedades de um objeto geológico, ou conjunto de objetos, num determinado volume. A sua representação varia consoante o objetivo pretendido, estando também associada uma interpretação pericial e/ou estatística, para além do que é amostrado e observado no campo. A grande vantagem destes modelos reside no facto de poderem ser atualizados e reinterpretados, sendo possível avaliar diferentes cenários e contextos geológicos.

Na MG3D, o resultado final está dependente da maior ou menor abundância e dispersão dos dados disponíveis. De facto, se as funções aleatórias forem a base do modelo escolhido, estes dois aspetos vão condicionar o processo de estimação ou simulação de valores da variável nas zonas não amostradas (Soares, 2006). A adaptabilidade de um modelo ao caso de estudo pode ser mais ou menos objetiva, dependendo do propósito para o qual foi desenvolvido.

Nas Ciências da Terra utilizam-se algoritmos de inferência espacial que podem ser classificados como deterministas ou estocásticos, e nestes últimos incluem-se os geoestatísticos. Um algoritmo é considerado determinista quando resulta num único resultado para um conjunto de dados de entrada e também quando os resultados não têm implícita uma abordagem probabilística. A estimação de propriedades numa malha de blocos a partir de informação pontual com o inverso do quadrado da distância é um exemplo de um procedimento determinista. Por outro lado, os procedimentos estocásticos utilizam leis de probabilidade, podendo gerar o resultado mais provável ou um conjunto de soluções com a mesma probabilidade de ocorrência (Goovaerts, 1997).

A geoestatística envolve um conjunto de ferramentas muito utilizadas hoje em dia na construção de modelos geológicos, quer da morfologia quer das propriedades de interesse. Tem conhecido diferentes fases na sua história no que diz respeito ao seu corpo metodológico, condicionadas pelas particularidades dos campos de aplicação. De forma genérica, as ferramentas disponíveis permitem caracterizar a dispersão espacial e espaço-temporal de grandezas ou variáveis regionalizadas que definem a quantidade e a qualidade dos recursos naturais. Atualmente, a sua

gama de aplicações é muito vasta, incluindo avaliação de massas e depósitos minerais, reservatórios de petróleo, sistemas ambientais, aquíferos e geotecnia (Soares, 2006).

A geoestatística terá surgido, na década de 60, no *Centre de Geostatistique de Fontainebleau da École des Mines*, em França. Aqui foram criados os primeiros modelos para abordar problemas ligados aos recursos geológicos como fenómenos espaciais e surgiram os respetivos fundamentos teóricos: o variograma como medidor de continuidade espacial; a anisotropia espacial; a variabilidade à pequena escala ou efeito de pepita; a estimação por krigagem; e simulação (Isaaks & Srivastava, 1989).

A construção de um modelo geológico tridimensional, que combine informação a diferentes escalas e resoluções espaciais (sísmica, sondagens, cartografia, poços), segue um procedimento metodológico transversal às diferentes áreas de aplicação, que se inicia pela modelação da morfologia a que se seguem as propriedades de interesse. Para a caracterização da morfologia utilizam-se superfícies inferidas por krigagem, co-krigagem, simulação ou co-simulação da variável regionalizada cota ou profundidade. Todas estas ferramentas respeitam os dados de partida.

A principal diferença de resultados entre estimação ou simulação reside no fato em que na estimação é obtido um modelo único que é não enviesado e minimiza a variância do erro de estimação. Por outro lado, a simulação permite obter várias imagens com a mesma probabilidade de ocorrerem e com a mesma variabilidade espacial dos valores experimentais, sendo que a análise conjunta das imagens simuladas é uma poderosa ferramenta de análise quantitativa da incerteza local (Goovaerts, 1997, Soares, 2006).

### **3.2 Estratégia da Metodologia Proposta**

Como já foi referido anteriormente, a metodologia proposta nesta dissertação tem como finalidade a construção de um modelo morfológico 3D de três horizontes geológicos numa área da Bacia Cenozóica do Baixo Tejo, tendo como base a informação obtida nas sondagens, poços profundos e perfis de sísmica de reflexão.

A informação disponível pode ser classificada em dois tipos, por um lado temos informação dita secundária que, por ser interpretada, dá uma indicação aproximada do posicionamento das transições entre as unidades geológicas modeladas (horizontes) e, por outro, temos a informação principal que é a proveniente dos poços e sondagens onde a profundidade dos horizontes é observada, sendo por isso mais fidedigna. Face aos dados disponíveis, adotou-se uma estratégia

em duas grandes etapas, primeiro modelar superfícies condicionais aos perfis sísmicos e depois condicionar estas superfícies aos dados dos poços. Cada superfície é representada por uma malha 2D de células com o atributo cota.

Uma das vias possíveis para a construção de um modelo morfológico deste tipo é proceder primeiro à krigagem normal da variável cota (ou profundidade) conforme está disponível nos perfis sísmicos e depois fazer uma co-krigagem co-localizada ou uma krigagem com deriva externa para condicionar aos dados dos poços e sondagens ou, então, fazer uma estimação dos resíduos entre os dados da sísmica e os dados das sondagens. Estas abordagens de estimação não permitem caracterizar a incerteza local, e também não dariam os melhores resultados para uma variável que é amostrada por linhas e é não estacionária porque a área de estudo tem a forma de uma bacia.

Para obviar estas questões e obter um modelo morfológico de melhor qualidade, foi necessário seguir uma abordagem diferente e com aspetos inovadores, tendo em mente que o principal objetivo é combinar da melhor forma possível os dois tipos de informação. Como a sísmica é uma informação interpretada e depois é convertida de tempo para espaço, a tendência regional da forma deverá ser imposta no modelo, mas, o posicionamento final das superfícies, deverá ter em conta prioritariamente os dados dos poços profundos e sondagens.

Para tal, desenvolveu-se uma metodologia que combina algoritmos de simulação sequencial em duas grandes etapas (ver fluxograma da Figura 3.1), primeiro são geradas superfícies condicionais aos dados dos perfis sísmicos e depois estas superfícies são corrigidas, ou condicionadas, aos dados dos poços e sondagens.

Para a geração das primeiras superfícies, somente condicionais aos perfis sísmicos, testaram-se duas abordagens: a primeira onde as superfícies são geradas por simulação e co-simulação condicional só aos perfis sísmicos a segunda onde as superfícies são co-simuladas condicionais a orientações e desníveis locais dos horizontes sem ter em conta, explicitamente, as cotas extraídas dos perfis sísmicos.

Para a primeira abordagem (Figura 3.1, variante do lado esquerdo), e para contornar a questão de não estacionaridade da variável cota na área de estudo, digitalizaram-se regiões, determinaram-se leis de distribuição regionais e condicionais da variável cota e simularam-se (ou co-simularam-se) as cotas dos horizontes em estudo. A opção por simulação ou co-simulação é decidida horizonte a horizonte, em função da quantidade de dados disponíveis e da correlação entre os horizontes. Utilizou-se uma versão modificada da SSD e da CoSSD para utilizar leis de distribuição regionais ao invés de uma lei de distribuição global.

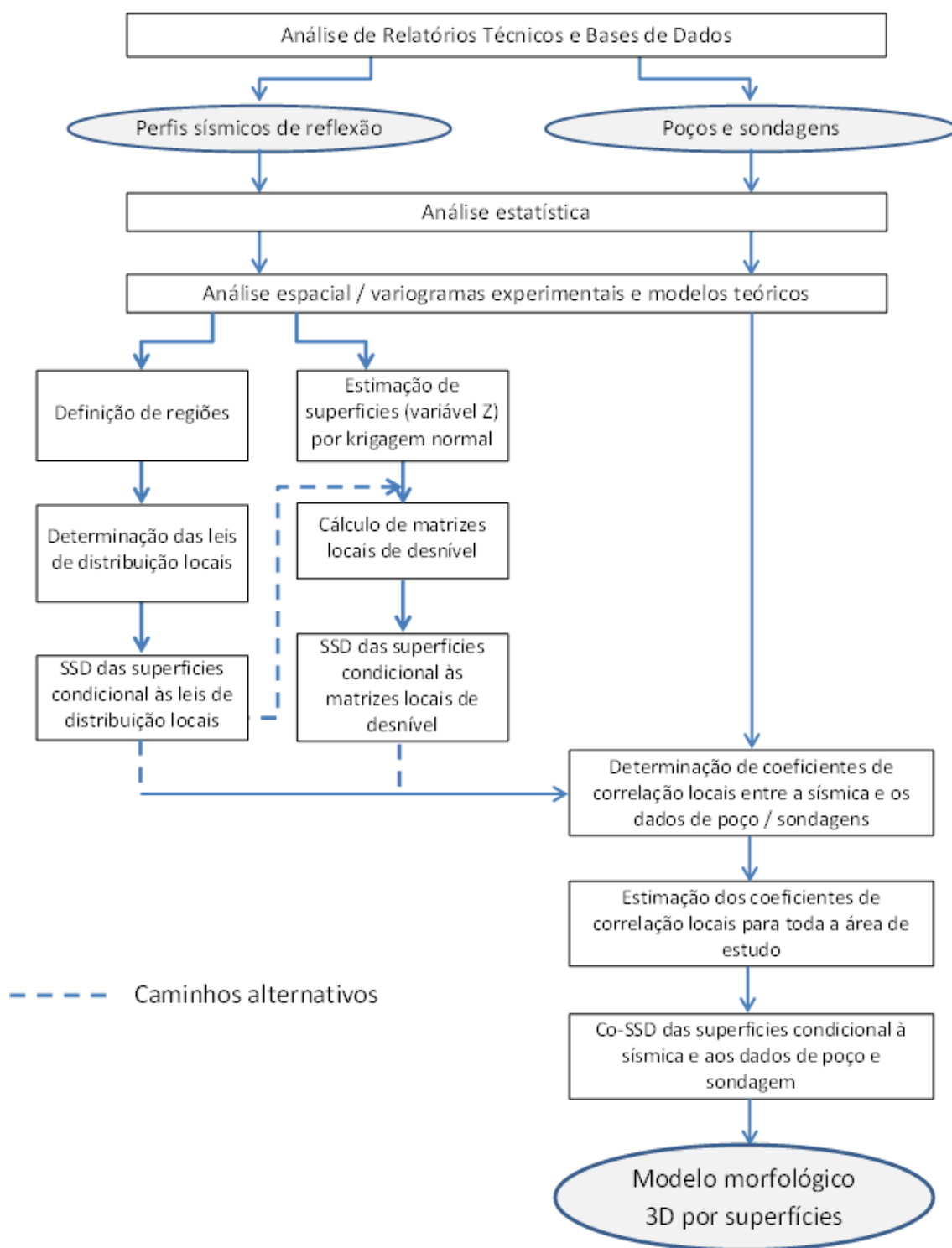


Figura 3.1 – Fluxograma das etapas seguidas neste trabalho experimental.

Para a abordagem alternativa (Figura 3.1, variante do lado direito), o condicionamento à sísmica só tem em conta os desníveis locais (ou declives) por direção de uma morfologia aproximada (por isso atenuada) que tenha sido obtida por interpretação da sísmica, ao invés dos valores de cota propriamente ditos. A ideia é que a forma regional dos horizontes pode ser extraída dos perfis sísmicos, mas o seu posicionamento na vertical não é conhecido com rigor em toda área de estudo. Para executar esta abordagem, e como não existe nenhuma interpretação para a área em estudo com base na sísmica, utilizou-se como ponto de partida uma superfície de referência calculada a partir da média filtrada das imagens simuladas obtidas na alternativa anterior. Para esta superfície de referência, calcularam-se matrizes locais de desnível segundo as 8 direções definidas pelas malhas de células: N, NE, E, SE, S, SW, W e NW. Estas 8 matrizes contêm toda informação local da forma dos horizontes, e permitem reconstruir a forma inicial do horizonte sem qualquer informação adicional. Seguidamente, e tendo só em conta estas 8 matrizes de desníveis, são co-simuladas novas superfícies, correlacionadas com a superfície de referência, utilizando uma versão modificada da Co-SSD e onde o estimador local da cota é a co-krigagem co-localizada. A variável secundária é calculada em cada iteração e é condicionada aos valores obtidos nas iterações anteriores.

Para o condicionamento das superfícies primárias aos dados dos poços e sondagens, calcularam-se coeficientes de correlação entre a sísmica e os dados de poço, estimaram-se por krigagem normal estes coeficientes de correlação para a área de estudo e co-simularam-se as superfícies finais condicionais aos dados dos poços e sondagens e às superfícies primárias.

Os procedimentos particulares de cada simulação e as alterações feitas no código relativamente ao procedimento usual de simulação e co-simulação sequencial direta (SSD e CoSSD) constituem tarefas relevantes neste trabalho, e são descritas nos subcapítulos seguintes. No final analisaram-se os resultados obtidos e para uma visualização conjunta 3D importaram-se as superfícies modeladas para o *software* Move®.

### **3.3 Informação Disponível e Pré-processamento dos Dados**

Os dados dos perfis sísmicos, sondagens e poços profundos cedidos pelo LNEG e pela ENMC exigiram trabalho prévio de consulta exaustiva, seleção e uniformização. Os dados relativos aos poços profundos datados da década de 50 do século passado estavam na forma original, pelo que foi necessário selecionar e transcrever informação dos *logs* em papel para ficheiros Excel®. Foi também necessário converter as coordenadas para o sistema *Hayford-Gauss, Datum Lisboa - IGeoE*, para trabalhar toda a informação no mesmo referencial. Posteriormente, foram selecionados os dados que se enquadram na zona estudada e nos objetivos, e que são as

coordenadas X, Y e a profundidade convertida em cotas (variável estudada) dos três horizontes trabalhados.

Depois de ultrapassada esta fase de preparação dos dados, iniciou-se uma análise estatística aos dados dos perfis sísmicos e dos poços / sondagens. Calcularam-se estatísticos básicos (média, mínimos, máximos, desvios-padrão, variâncias e coeficientes de assimetria) e representaram-se *box-plots* conjuntos das cotas para os três horizontes. Em termos de análise bivariada quantificou-se a correlação entre as cotas dos três horizontes trabalhados, que são o horizonte mais superficial (interface Pliocénico – Miocénico – Z1), o subjacente (interface Miocénico Superior - Miocénico Intermédio – Z2) e o horizonte mais profundo (interface Miocénico Inferior – Paleogénico – Z3). Os resultados desta análise bivariada têm influência nas fases seguintes, pelo que se existirem correlações estas devem ser tidas em conta na geração de cada superfície.

Seguidamente, e antes das simulações das superfícies, foi necessário estudar e modelar a continuidade espacial da variável cota de cada horizonte, quer para os dados da sísmica quer para os dados dos poços profundos e sondagens. Recorreu-se à variografia e ao ajuste dos modelos teóricos mais adequados a cada caso.

### **3.4 Fundamentos Teóricos da Geoestatística**

As variáveis modeladas por metodologias geoestatísticas podem ser categóricas ou contínuas (Goovaerts, 1997; Soares, 2006) e, neste caso de estudo, as três superfícies (horizontes geológicos) foram modeladas pelas respetivas cotas (variável contínua).

Um fluxograma geoestatístico inclui sempre uma análise de continuidade espacial a que se segue o ajuste de um modelo teórico e um processo de inferência espacial, por estimação ou simulação (Goovaerts, 1997).

#### **3.4.1 Variografia e modelo teórico**

Para estudar a continuidade espacial de um determinado fenómeno não é suficiente analisar os estatísticos básicos dos dados experimentais, devendo-se também estudar e quantificar a sua continuidade espacial. Existem vários elementos estruturantes que permitem quantificar a continuidade espacial, todavia na geoestatística usa-se tradicionalmente uma estatística designada por variograma que é calculada através da estrutura elemento biponto. O biponto permite medir vários parâmetros de análise espacial como sejam a amplitude e o grau de anisotropia, ou seja, a

forma como a continuidade dos dados varia nas diferentes direções do espaço (Goovaerts, 1997; Soares, 2006).

Nesta análise estatística utilizam-se a posição de pares de pontos,  $Z(x)$  e  $Z(x+h)$ , onde  $h$  é cada vetor que liga os dois pontos do par. Para diferentes vetores  $h$ , pode-se medir a continuidade espacial pelo estimador do variograma (semivariograma). Para um conjunto de dados experimentais é calculado pela média do quadrado da diferença entre  $Z(x)$  e  $Z(x+h)$ :

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

onde  $N(h)$  é o número de pares de pontos considerados para cada comprimento do vetor  $h$  ou passo.

A representação gráfica dos valores do variograma experimental em função da distância (módulo do vetor  $h$ ) permite avaliar diferentes características (Isaaks & Srivastava, 1989; Goovaerts, 1997, Soares, 2006):

- Amplitude ( $a$ ) – É a distância máxima de correlação entre as amostras. Corresponde à noção intuitiva de zona de influência de uma amostra
- Patamar ( $C_I$ ) - Representa a variância da variável em estudo e reflete a sua dispersão;
- Efeito Pepita ( $C_o$ ) – Verifica-se quando a interseção entre a curva média e o eixo das ordenadas ocorre num valor acima da origem. Quantifica a presença de erros de amostragem e variabilidade a distâncias não reconhecidas pelo espaçamento da amostragem

Uma vez calculados os valores dos variogramas para diferentes passos  $h$ , com base num conjunto de amostras de uma determinada área, é necessário proceder ao ajustamento com funções teóricas. Estas funções são curvas atenuadas médias, e dependem de um número reduzido de parâmetros que em conjunto quantificam a continuidade espacial de  $Z(x)$ . Ajustar o variograma através de uma curva média é inferir um andamento de  $\gamma(h)$  representativo para toda a área e para todos os valores de  $h$ , assim como resumir as suas principais características estruturais como, por exemplo, os padrões de continuidade espacial e anisotropias, tendo como base os valores conhecidos experimentalmente. Esta etapa é fundamental e permite adicionar ao modelo conhecimento pericial e interdisciplinar que se tem sobre o fenómeno estudado.

As funções ou modelos a utilizar no ajustamento são limitadas e têm de ser definidas positivas. Destacam-se os modelos esférico, exponencial e gaussiano (Goovaerts, 1997; Soares, 2006).

**Modelo esférico** – é um dos mais utilizados sendo parametrizado por um patamar  $C$  e uma amplitude  $a$ . Tem a seguinte expressão que é um polinómio de grau 3:

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

**Modelo exponencial** – este modelo utiliza os mesmos parâmetros do modelo anterior ( $C$  e  $a$ ), sendo que neste caso o variograma tende assintoticamente para o valor do patamar. A expressão deste modelo consiste em:

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

**Modelo Gaussiano** – o modelo gaussiano é um modelo muitas vezes utilizado para modelar fenómenos extremamente contínuos, resultantes na maior parte das vezes de variáveis interpretadas. A expressão que o define é:

$$\gamma(h) = C \left[ 1 - e \left( -\frac{3h}{a} \right)^2 \right]$$

Tal como no modelo exponencial, o modelo gaussiano atinge o patamar assintoticamente e a amplitude ( $a$ ) é aproximadamente igual à distância atingida a 95% do patamar (Isaaks e Srivastava, 1989). O que caracteriza este modelo é seu comportamento parabólico perto da origem típico de variáveis extremamente contínuas.

### 3.4.2 Estimação geoestatística por krigagem normal e co-krigagem co-localizada

A estimação é uma ferramenta que permite inferir valores de variáveis em localizações que não foram amostradas. O estimador geoestatístico é denominado krigagem (Soares, 2006) e existem muitas variantes deste estimador conforme a informação disponível (só primária, primária e secundária, e ainda segundo a densidade da informação secundária). De entre os métodos de estimação disponíveis, o mais usual é a krigagem normal (*ordinary kriging*).

A krigagem normal é um estimador BLUE (*best linear unbiased estimator*) que para inferir uma variável  $Z$  numa localização  $x_0$  com base em  $N$  observações  $Z(x_j)$  recorre à seguinte ponderação:

$$Z(x_0)^* = \sum_{j=1}^N w_j Z(x_j), \text{ com } j = 1, 2, \dots, N$$

Trata-se de uma combinação linear dos  $N$  valores vizinhos observados que cumpre dois critérios em relação ao erro de estimação,  $\mathcal{E}(x_0) = Z(x_0)^* - Z(x_0)$ : o não enviesamento (imposição de que o desvio global médio entre os valores estimados e os valores reais, desconhecidos, seja nulo) e a minimização da variância de estimação (definida como a variância dos desvios entre os valores estimados e os valores observados).

Quando na estimação, para além das observações disponíveis na variável a estimar, se pretende utilizar informação de uma variável auxiliar ou secundária  $Y$  que é conhecida em todas as localizações a estimar, recorre-se ao estimador co-krigagem co-localizada. A ponderação é feita atribuindo também um ponderador à variável auxiliar  $Y$  na localização a estimar que depende da correlação entre as variáveis principal  $Z$  e auxiliar  $Y$ :

$$Z(x_0)^* = \sum_{j=i}^N w_j Z(x_j) + w \cdot Y(x_0) \text{ com } j = 1, 2, \dots, N$$

### 3.4.3 Simulação geoestatística

Ao contrário dos modelos de estimação, que têm por objetivos obter a imagem mais provável das características estudadas de um determinado recurso, os modelos de simulação fornecem um conjunto de imagens equiprováveis com a mesma variabilidade espacial e estatística dos valores experimentais. A reprodução da variabilidade do fenómeno em estudo nas imagens simuladas é obtida através da função de distribuição de  $Z(x)$  [ $-F_Z(Z) = \text{prob}\{Z(x) < z\}$ ], que garante a frequência das classes do histograma, e o variograma  $\gamma(h)$ , que reproduz a continuidade espacial de  $Z(x)$  (Goovaerts, 1997, Soares, 2006).

Se considerarmos o conjunto de valores simulados  $Z^s(x)$ , e  $Z(x_a)$ ,  $x_a = 1, \dots, n$ , os  $n$  valores experimentais, uma imagem simulada deve cumprir os seguintes requisitos:

1. Histograma dos dados :  $\text{prob}\{Z(x_a) < z\} = \text{prob}\{Z^s(x) < z\}$ ;
2. Variogramas:  $\gamma(h) = \gamma^s(h)$ ;
3. Coincidência espacial dos valores dos dados com os valores simulados  $Z(x_a) = Z^s(x_a)$ .

Estes três requisitos garantem a influência dos valores amostrados nos mapas simulados, sendo que esta é determinada pela maior ou menor continuidade patente nos modelos dos variogramas.

A Simulação Sequencial é uma das principais famílias de ferramentas de simulação e engloba vários algoritmos, como a Simulação Sequencial Gaussiana (SSG), a Simulação Sequencial da Indicatriz (SSI) e a Simulação Sequencial Direta (SSD) (Soares, 2006; Nunes, 2008; Nunes & Almieda, 2010; Alves, 2012).

O princípio teórico baseia-se na aplicação da relação de *Bayes* em passos sucessivos. Esta relação pode ser generalizada para um conjunto de variáveis:

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

Consideremos uma função conjunta de  $N$  variáveis aleatórias e  $n$  dados experimentais condicionantes iniciais  $F(N) = (Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_N|(n))$ . O processo que permite obter um conjunto de valores  $z_1, \dots, z_N$  de  $F(N)$ , pode resumir-se nos seguintes passos (Soares, 2006):

1. Simulação de um valor  $z_1$  a partir da função de distribuição cumulativa  $F(Z_1|(n))$ . Este valor simulado condiciona os subsequentes passos de simulação, passando os dados condicionantes a  $\{n + 1\} = \{n\} \cup \{z_1\}$ ;
2. Simulação de  $z_2$  da distribuição condicional  $F(Z_2|(n + 1))$ , com base nos  $\{n + 1\}$  valores condicionais. Estes passam a ser atualizados para  $\{n + 2\} = \{n + 1\} \cup \{z_2\}$ .
3. Repetição deste processo sequencial para a simulação das  $N$  variáveis.

O conjunto das  $N$  variáveis aleatórias dependentes  $(Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_N)$  podem representar a mesma grandeza referenciadas no espaço nas diferentes posições da malha do mapa a simular. Considerando os  $n$  valores condicionantes correspondentes aos diferentes valores experimentais  $Z_\alpha$ ,  $\alpha = 1, \dots, n$ , a função conjunta fica  $F(N) = (Z(x_1), Z(x_2), Z(x_3), \dots, Z(x_{xN})|(n))$ . Este método de simulação exige o conhecimento das  $N$  funções de distribuição cumulativa condicionais:

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

Segundo Soares (2006), a principal limitação deste algoritmo é o conhecimento destas funções nas aplicações práticas. Journel & Alabert (1989) consideraram a krigagem como a ferramenta adequada para a estimativa destas funções, nomeadamente, a krigagem multiGaussiana para a SSG e a krigagem da indicatriz para a SSI.

A SSD é um desenvolvimento recente dos algoritmos de simulação geoestatísticos, e tem a vantagem de não exigir a transformação da variável original para uma lei de distribuição Gaussiana. Quando um histograma é bastante assimétrico, os variogramas da variável experimental dificilmente são reproduzidos nas imagens simuladas, este facto agrava-se quando se utilizam variáveis auxiliares, que também são transformadas (Caers, 2000; Soares, 2006). Também quando se faz uma co-simulação, é muito mais fácil trabalhar com as variáveis originais ao invés de variáveis transformadas.

O seu desenvolvimento baseou-se no conceito de que se as leis de distribuição locais são centradas no estimador de krigagem simples com variância condicional local igual à variância da krigagem, então as covariâncias espaciais ou variogramas são necessariamente reproduzidos nos mapas finais simulados (Caers, 2000). Contudo, este método não solucionava a questão da reprodução do histograma da variável, que é uma das exigências essenciais dos modelos de simulação. Esta foi uma das maiores limitações iniciais na aplicação da SSD.

Tendo como base os princípios introduzidos por Journel (1994), Soares (2001) sugeriu uma nova abordagem, que possibilitou ultrapassar as condicionantes já referidas. Essa abordagem baseia-se na utilização das médias e variâncias locais estimadas por krigagem simples para reamostrar a lei de distribuição global, ao invés de as utilizar para definir as leis de distribuição local, como acontece na SSG. A nova função,  $F'_Z(Z)$ , resultante da reamostragem da função inicial de distribuição global  $F_Z(Z)$ , tem os intervalos “centrados” na média local e uma amplitude que respeita a variância condicional local.

Um dos métodos para definir os intervalos e obter os valores simulados  $z^s(x_0)$  a partir de  $F'_Z(Z)$  é seleccionar de um subconjunto de  $n$  valores contíguos  $z(x_i)$  do histograma experimental global, no qual a média e a variância dos valores são iguais à média local  $[z(x_0)^*]$  e à variância  $\sigma_{ks}^2(x_u)$  estimadas, respetivamente:

$$[z(x_0)^*] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z(x_i) \quad \text{e} \quad \sigma_{ks}^2(x_u) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [z(x_i) - z(x_0)^*]^2$$

Outro método, também descrito por Soares (2001), é definir uma função auxiliar, nomeadamente uma lei de distribuição Gaussiana apenas para reamostrar dos intervalos da lei de distribuição global  $F_Z(Z)$ . Sucintamente, a aplicação da SSD para uma variável  $Z(x)$  segue as seguintes etapas:

1. Definição de um percurso aleatório que passe por todas as células ( $x_0$ ) existentes na área a simular;

2. Estimaco por krigagem simples da mdia local  $[z(x_0)^*]$  e da varincia local do erro de krigagem  $\sigma_{ks}^2(x_0)$  condicionadas aos valores experimentais e aos valores previamente simulados;
3. Definio do intervalo para a reamostragem da lei de distribuico global  $Z(x)$ , utilizando a transformaco Gaussiana:  $G([y(x_0)]^*, \sigma_{ks}^2(x_0))$ , em que  $[y(x_0)]^* = \varphi([y(x_0)]^*)$ , sendo  $\varphi$  a transformada para valores Gaussianos da varivel a simular;
4. Gerao do valor simulado  $z^s(x_0)$ :
  - a. Gerao de um valor  $p$  a partir de uma lei de distribuico uniforme  $U[0,1]$ ;
  - b. Gerao de um valor  $y^s$  de  $G([y(x_0)]^*, \sigma_{ks}^2(x_0))$ ;
  - c. Retorno do valor simulado  $z^s(x_0) = \varphi^{-1}(y^s)$ ;
5. Retorno a 2, até todas as células estarem simuladas.

Este algoritmo reproduz o variograma e o histograma da varivel contínua, sendo que, segundo o mesmo autor, a sua principal vantagem é permitir a Co-SSD, sem que seja necessrio a transformaco das variveis originais. Se estiver a ser feita uma Co-SSD, o estimador de krigagem simples mencionado na etapa (2) para a estimaco da mdia e varincia locais do erro de krigagem é substituído pela variante mais adequada: co-krigagem simples com deriva externa, co-krigagem simples com médias locais ou co-krigagem simples co-localizada.

### **3.5 Alteraces ao Algoritmo de Simulao Sequencial Direta no Âmbito deste Trabalho**

#### **3.5.1 Simulao de superfícies condicional a desníveis locais calculados por direo**

Tal como referido anteriormente, uma das vertentes testadas é a simulao das superfícies dos horizontes condicionais aos perfis sísmicos,  $Z_i^S(x), i = 1, 2, 3$ , tendo como informao condicionante matrizes de desnível calculadas a partir de uma superfície média ou de referência dos horizontes. Estas matrizes resultam da diferena de cotas entre o valor de cada célula e os 8 valores vizinhos (respetivamente nas direes N, NE, E, SE, S, SW, W e NW). A diferena de cotas traduz os desníveis por direo, e a direo com a maior diferena de cotas representa a direo de maior inclinao. Na Figura 3.2 mostra-se um exemplo de uma matriz de cotas de uma superfície e na Figura 3.3 duas matrizes de desnível calculadas para as direes norte (N) e sudoeste (SW).

78	80	82	80	77
77	82	84	80	80
75	82	83	81	80
72	81	81	80	79
71	78	78	77	77

Figura 3.2 – Exemplo de uma malha de células com valores locais de cotas.

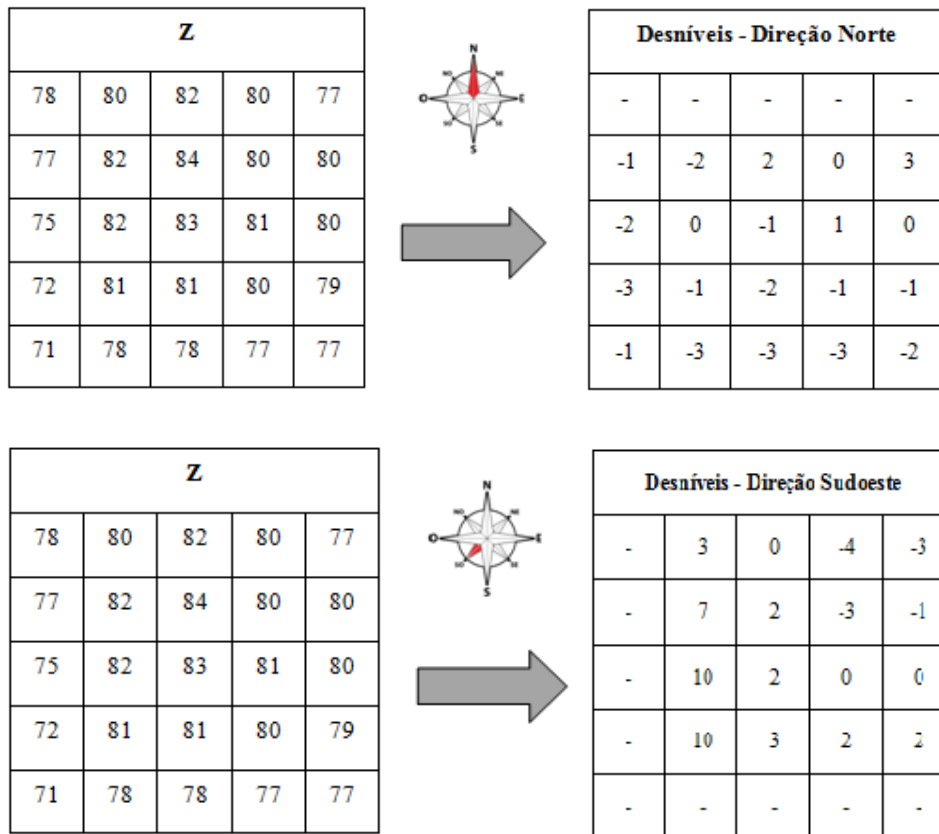


Figura 3.3 – Exemplo de construção da malha local de desníveis a partir da mesma matriz de cotas para as direções N e SW

Com esta informação de desníveis procede-se à SSD com uma versão modificada de SSD original. A primeira modificação consiste na geração do caminho aleatório. Para impor desníveis ao longo das iterações, é necessário em cada iteração calcular a cota média da célula a ser simulada, de forma a que este valor seja utilizado como informação secundária na simulação dessa célula. Ou seja, a informação secundária é calculada para cada célula a simular em cada iteração e depende, obviamente, dos resultados obtidos nas iterações anteriores. Para tal é necessário que a simulação

progrida a partir de uma célula inicial de forma semelhante a uma “mancha de óleo”, de modo que cada célula a ser simulada tenha sempre pelo menos uma célula vizinha já simulada nas iterações anteriores.

Na Figura 3.4 ilustram-se duas malhas com 5 por 5 células que exemplificam duas situações de progressão das iterações de uma simulação, uma válida, a da direita, e outra inválida, a da esquerda, em que a sequência dos índices das células não respeita o pressuposto da contiguidade.

17	21	22	25	23
10	11	15	16	24
5	6	9	14	19
2	3	7	13	20
1	4	8	12	18

22	21	12	6	5
25	19	14	16	8
10	11	15	17	13
2	3	7	20	18
1	4	9	24	23

Figura 3.4 - Índices das células do caminho aleatório gerado em duas malhas 5x5. O exemplo da esquerda válido e o da direita é inválido. Por exemplo, entre outros, a passagem da célula com índice 4 para a célula com índice 5 não respeita as condições de contato.

Na Figura 3.5 estão representados, sob a forma de imagens, a sequência de progressão da simulação para uma área de maior dimensão; as células a cor azul são as primeiras a serem simuladas a que se seguem as células de cor verdes, amarelas, laranjas e vermelhas.

Um caminho aleatório gerado desta forma garante que cada célula a simular é sempre contígua a uma ou várias células simuladas anteriormente. Esta condição restritiva é importante para evitar conflitos de resultados pois, caso contrário, em determinado estágio de evolução da simulação, uma célula poderia ser condicionada por duas ou mais com informações de desnível contraditórias, pondo em causa a fluidez e validade deste procedimento.

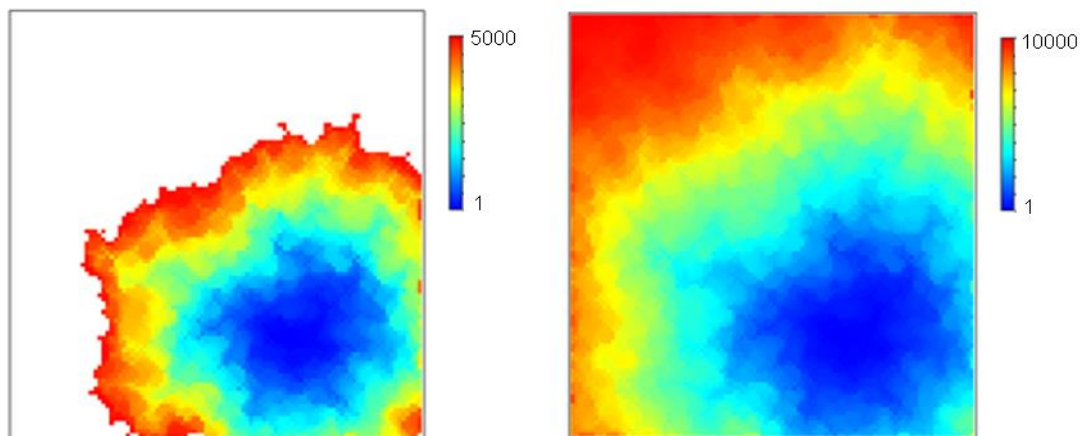


Figura 3.5 – Visualização de uma sequência aleatória válida. Na imagem da esquerda mostram-se os resultados para as primeiras 5000 células de um total de 10000 e na imagem da direita para todas as células. A escala representa o índice de ordem de cada célula a ser simulada, a azul são as primeiras e a vermelho são as últimas.

Então, para fazer a SSD:

- I) Para a primeira célula a ser simulada, o valor gerado para a cota pode ser extraído do da informação de partida;
- II) Estimar, para cada célula a simular, o valor da informação secundária que será utilizado na segunda célula e seguintes, selecionam-se os seus valores vizinhos já simulados nas iterações anteriores e, para cada direção das 8 com valores, calcula-se um valor mais provável. Se for encontrado só um valor preenchido (como, por exemplo, na simulação da segunda célula), o valor da informação secundária a utilizar é esse, caso existam vários valores faz-se a sua média e esse o valor da informação secundária a considerar.
- III) Estimação, por co-krigagem co-localizada, do valor médio e da variância de krigagem na célula a simular. O algoritmo recorre a um coeficiente de correlação entre a informação principal e a informação secundária, de forma ajustar a maior ou menor variabilidade dos resultados, que se traduz em respeitar mais ou menos a superfície de referência que é proposta. Seguindo a mesma linha de raciocínio, quanto maior for o coeficiente de correlação (mais próximo de um), menor será a variância dos resultados, ou seja, menor será a dispersão dos valores simulados comparativamente à forma da superfície de partida. O valor do coeficiente de correlação deve ser testado empiricamente face a um objetivo.

### 3.5.2 Simulação sequencial direta condicional a leis de distribuição por região

A SSD condicional a leis de distribuição por região é uma alteração em que em vez de se amostrar uma lei de distribuição global  $Z(x)$  ao longo da simulação, faz-se a subdivisão da área em estudo em  $r$  regiões ( $R(x)$ ), determinam-se as leis de distribuição condicionais  $Z(x) | R_i(x), i = 1, \dots, r$  e ao longo da simulação faz-se a amostragem da lei condicional da região atribuída à célula a simular  $x_0$ .

### 3.5.3 Co-simulação condicional a coeficientes de correlação locais

No condicionamento das superfícies primárias aos dados de sondagens e poços utiliza-se a CoSSD onde são utilizados coeficientes de correlação locais entre os dados de poço e sondagens e as superfícies previamente simuladas. O conceito desenvolvido para determinação destes coeficientes está representado na Figura 3.6.

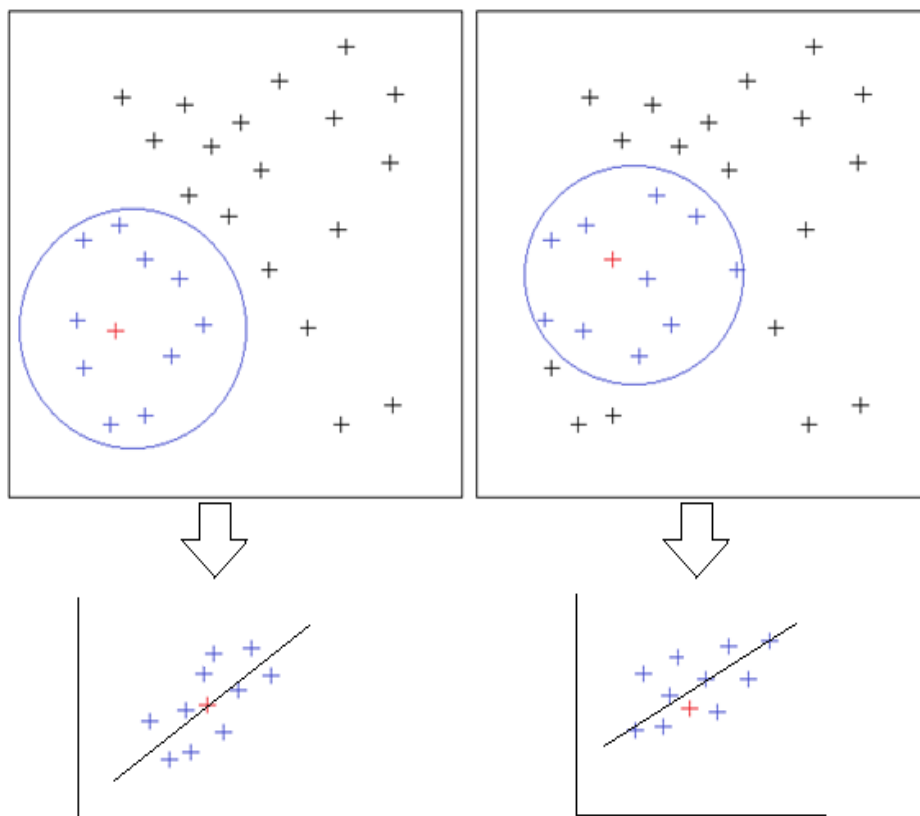


Figura 3.6 – Para cada poço / sondagem, são selecionados os 10 poços / sondagens mais próximos e são determinados coeficientes de correlação entre estes dados e os homólogos provenientes das superfícies previamente simuladas.

Para cada poço / sondagem (representados na Figura 3.6 por uma cruz), são selecionados os 10 poços / sondagens mais próximos e são determinados coeficientes de correlação entre estes dados e os homólogos provenientes das superfícies simuladas. O valor calculado fica alocado à localização do poço onde se apoiou a seleção (cruz a vermelho na Figura 3.6). O processo repete-se para todas as localizações dos poços e sondagens e, de seguida, estimam-se por krigagem estes coeficientes de correlação locais para toda a área de estudo. Tal como já foi referido anteriormente, este mapa estimado de coeficientes de correlação irá ponderar na simulação a influência da informação secundária no resultado final.



## 4 CASO DE ESTUDO

Neste capítulo apresentam-se os dados de partida e os resultados enquadrados nas diferentes etapas da metodologia seguida e apresentada na Figura 3.1.

### 4.1 Descrição dos Dados de Partida

Para o desenvolvimento e construção do modelo de superfícies apresentado neste trabalho foram utilizados dois tipos de dados: perfis sísmicos de reflexão (informação dita secundária ou *soft*) e *logs* de sondagens e poços profundos (informação dita principal ou *hard*).

As Bases de Dados foram compiladas e organizadas de forma a permitirem fácil integração num Sistema de Informação Geográfica (SIG) e nas aplicações da geoestatística, procedendo-se à seleção detalhada da informação a utilizar e posterior conversão para o mesmo sistema de coordenadas. Nos próximos subcapítulos, descrevem-se os dados de partida.

A área de estudo está delimitada pelas coordenadas militares (104000, 170000) e (128000, 190000), ou seja, perfaz a dimensão de 24 km por 20 km. Para a construção do modelo adotou-se uma quadrícula células quadradas com 50 metros de lado, a que correspondem 400 linhas por 480 colunas, totalizando 192000 células. Na tabela 4.1 sintetizam-se os parâmetros geométricos da malha do modelo que é constituído por 3 redes de células a 2D (representação de 3 superfícies).

Tabela 4.1 – Parâmetros geométricos da malha do modelo.

Direcção	Nº células	Coordenadas		Dimensão (m)
		Início (m)	Fim (m)	
<b>OX</b>	480	104000	128000	50
<b>OY</b>	400	170000	190000	50

#### 4.1.1 Perfis sísmicos de reflexão

Entre 1954 e 1979, a margem esquerda do rio Tejo foi alvo de várias campanhas de prospeção sísmica profunda, resultando numa enorme quantidade de dados sísmicos. Estes dados foram adquiridos em seis campanhas, denominadas “Tejo”, “Samora”, “BarreiroCPP”, “Barreiro”, “Montijo” e “Caparica”. De todos os perfis existentes, foram seleccionados os que se enquadram na zona estudada (Tabela 4.2 e Figura 4.1).

Tabela 4.2 - Descrição das campanhas e parâmetros dos perfis sísmicos de reflexão utilizados nesta dissertação. Perfis reprocessados pelo LNEG (Carvalho *et al.*, 2016).

Referência da campanha	Perfis	Empresa	Ano	Fonte sísmica	Offset range (m)	Nominal CMP coverage
CA - Caparica	CA1 CA2 CA3 CA4 CA5 CA6	CGG	1979	Vibroseis	120–1530	24
BA79 - Montijo	B79-1 B79-2 B79-3 B79-6	CGG	1979	Vibroseis	120–1530	24
BA80 - Montijo	BA80-1 BA80-2 BA80-3 BA80-4 BA80-5 BA80-6	CGG	1980	Vibroseis	120–1530	24

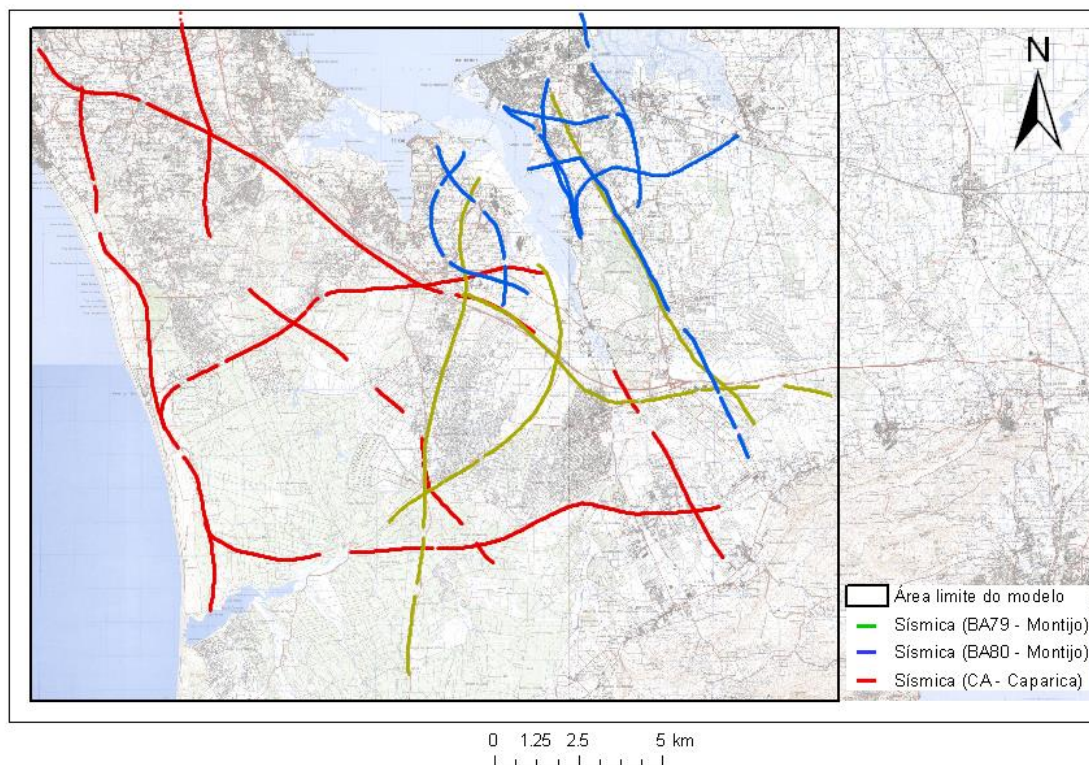


Figura 4.1 - Enquadramento geográfico das linhas sísmicas resultantes das campanhas CA – Caparica, BA79 – Montijo e BA80 - Montijo (informação cedida pela ENMC).

Ao longo do tempo, e no âmbito de teses académicas e diversos projetos, o LNEG reprocessou muitos dos perfis sísmicos, melhorando significativamente a sua qualidade. As campanhas do Barreiro e Montijo foram reprocessadas pela empresa *DECO Geophysical*, tal como a linha 6 da campanha Caparica (Pinto, 2011). Algumas das etapas do reprocessamento incluíram a introdução da informação da geometria local, edição dos traços, o *mute* das primeiras chegadas, filtragem e correção da elevação, *Dip-moveout* (DMO) e conversão ao *datum* plano, desconvolução e/ou branqueamento espectral, análise de velocidade, correção das estáticas residuais e, por último, a migração em tempo. Após o processo de *stacking*, foram aplicados filtros às variáveis no tempo, filtros de coerência e FK. Em conjunto, estas etapas permitiram diminuir o nível de ruído e melhorar significativamente a visibilidade dos refletores. Para uma análise mais detalhada dos métodos aplicados no reprocessamento dos perfis sísmicos de reflexão é aconselhada a consulta de alguma bibliografia específica, nomeadamente Carvalho (2003), Salisbury & Snyder (2000) e Ylmaz (1987).

Os trabalhos e artigos referem que o processo de interpretação destes perfis sísmicos baseou-se nos conceitos e princípios da sismostratigrafia desenvolvidos na década de 1970 por R. Mitchum e P.Vail. Alguns destes conceitos assentam nos seguintes pressupostos (Pinto, 2011):

- a) A sedimentação é um processo cíclico;
- b) O contraste abrupto da impedância acústica produz reflexões sísmicas, sendo estas paralelas a superfícies de estratificação e discordâncias;
- c) As reflexões têm um significado cronostratigráfico.

A consideração destes pressupostos implicou que os padrões e empilhamento estratigráfico fossem analisados dentro de um contexto temporal. Estes padrões desenvolvem-se de modo a interagirem com o processo de acomodação de sedimentos e sedimentação, refletindo combinações de tendências deposicionais que incluem progradação, retrogradação, agradação e *downcutting* (Carvalho, 2003). Mitchum *et al* (1977) afirmam que as discordâncias e as suas conformidades correlativas constituem o principal critério na determinação dos limites de uma sequência deposicional, pois indicam um período de erosão ou de não sedimentação.

Os perfis sísmicos permitiram identificar onze horizontes geológicos, desde o Intra-Neogénico Superior, mais recente, até ao horizonte mais antigo, correspondente à Formação Dagorda. No âmbito desta dissertação foram selecionados para a construção do modelo os três horizontes geológicos mais superficiais (do mais recente para o mais antigo): Intra-Neogénico Superior (A), Intra-Neogénico Inferior (B) e o topo do Paleogénico (C) (ver exemplo de um perfil sísmico na Figura 4.2).

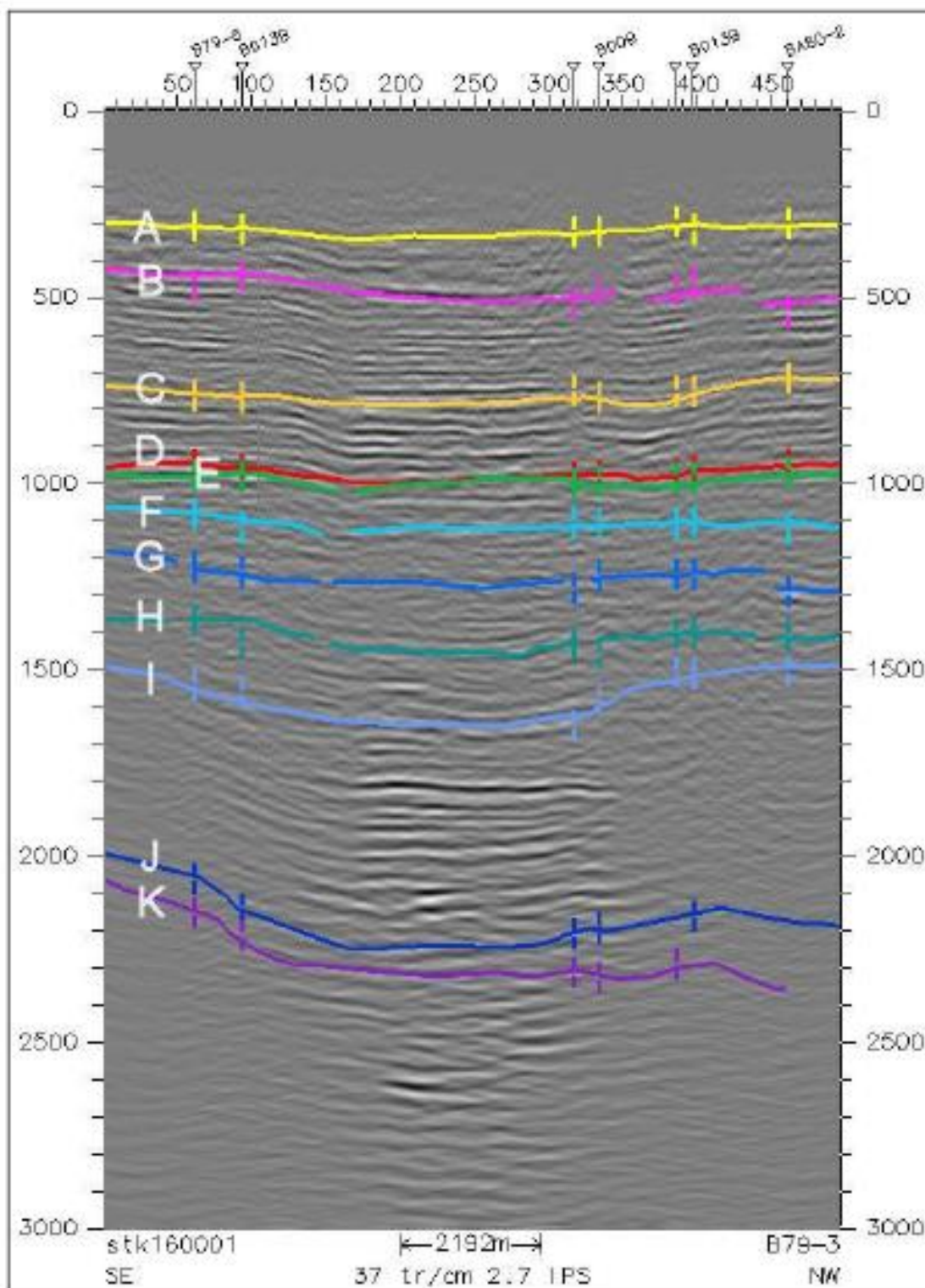


Figura 4.2 - Horizontes sísmicos que foram interpretados, do topo para a base: Neogénico Superior (A), Neogénico Inferior (B), Paleogénico (C), Discordância Mesozóico / Cenozóico (D), Cretácico (E), Formação de Freixial (F), Formação de Abadia (G), Formação de Montejunto (H), Formação de Candeeiros (I), Formação de Coimbra (J) e Formação da Dagorda (K).

Estes 3 horizontes caracterizam-se por:

#### **Horizonte A (Z1) - Intra-Neogénico Superior**

É um dos primeiros refletores que se consegue identificar devido à geometria e características deste método de aquisição, onde os primeiros 100 metros mais superficiais não são visíveis. Corresponde a uma passagem para calcários perto do topo do Miocénico Superior, ou seja, corresponde à transição entre o Miocénico e o Pliocénico.

#### **Horizonte B (Z2) – Intra-Neogénico Inferior**

É o segundo refletor identificado, e apresenta uma continuidade razoável apesar das variações laterais comuns neste tipo de horizontes, que são interrompidos com alguma frequência. Corresponde à transição do Miocénico Inferior (Burdigaliano) para o Miocénico Médio (Langhiano).

#### **Horizonte C (Z3) – Paleogénico**

Este horizonte é bastante contínuo e corresponde à transição entre os últimos depósitos paleogénicos, continentais, detríticos e grosseiros para os depósitos marinhos da base do Miocénico (Aquitano). As descontinuidades que se verificam nos perfis sísmicos nem sempre estão relacionadas com a variação lateral dos refletores e das estruturas geológicas. Existem outros fatores que podem causar estas descontinuidades, como, por exemplo, a existência de obstáculos durante a aquisição de dados. Outra situação relatada é o surgimento de falsas estruturas causado pela geometria curvilínea dos perfis. No caso dos perfis utilizados, já reprocessados, estes problemas estão minimizados.

Estes 3 horizontes em cada perfil foram disponibilizados como linhas poligonais (sequências de pontos) com o valor da profundidade (distância à superfície). Como o modelo a desenvolver neste trabalho foi construído em cotas, transformou-se esta medição de profundidade para cotas (coordenada Z), utilizando um MDT (Modelo Digital de Terreno) como superfície de referência.

### **4.1.2 Sondagens e poços profundos**

A informação geológica principal da zona de estudo foi obtida através de 81 sondagens curtas e 5 poços profundos existentes na zona estudada (ver Figura 4.3 e Tabela 4.3). A bibliografia consultada permitiu avaliar a complexidade da geologia local e regional, nomeadamente ao nível das litologias que ocorrem entre cada horizonte (diretamente relacionadas com o ambiente em

que ocorreu a deposição) e quais as que são típicas dos momentos de transição. Este aspeto foi fundamental na definição das cotas de cada horizonte em cada sondagem e na posterior validação do modelo final obtido.

As 81 sondagens resultaram de diversos trabalhos desenvolvidos a partir da década de 90, sendo que a maioria foi realizada no âmbito de projetos geoambientais com o intuito de se estudar qual o impacte das indústrias na região.

A existência dos poços profundos permitiu, para além da calibração e auxílio na interpretação dos perfis sísmicos de reflexão à data da sua execução, avaliar e compreender a geologia a uma escala espaço-temporal mais alargada. Estes poços foram realizados por empresas de prospeção petrolífera, à exceção da Sondagem de Belverde, que foi realizada no âmbito do projeto *POCTI* 32345, cujo principal objetivo foi o reconhecimento do Neogénico do sector distal da Bacia do Baixo Tejo.

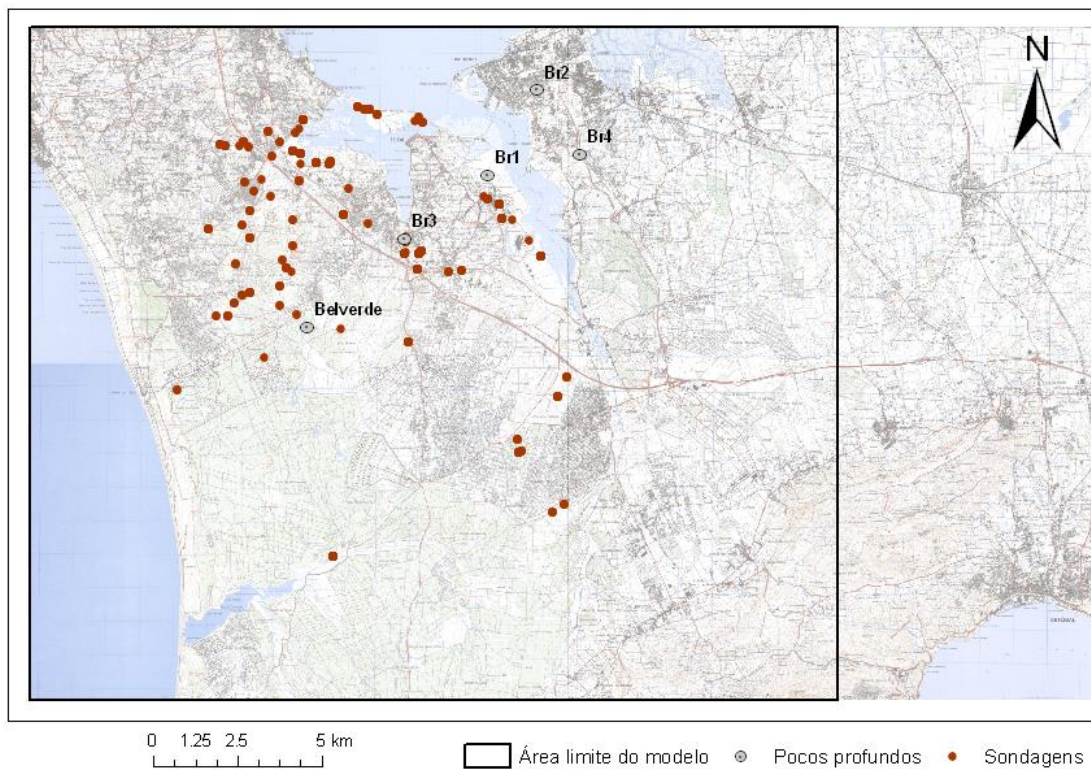


Figura 4.3 - Enquadramento geográfico das sondagens e poços profundos (dados fornecidos pelo LNEG, ENMC e FCT-UNL).

Tabela 4.3 – Referências e profundidades atingidas pelos poços profundos incluindo a sondagem de Belverde.

<b>Nome do poço profundo</b>	<b>Referência</b>	<b>Profundidade atingida (m)</b>
Barreiro 1	Br1	3611
Barreiro 2	Br2	2425
Barreiro 3	Br3	2606
Barreiro 4	Br4	2833
Sondagem de Belverde	Blv	620

Segundo a CPP, a escolha da localização dos poços profundos resultou da análise dos dados provenientes das prospeções gravimétrica e sismográfica na margem esquerda do Tejo. Segundo os relatórios dos poços, os detritos e testemunhos não apresentam indicações de acidentes tectónicos, não havendo, portanto, lacunas ou repetições devido a falhas. O objetivo destes poços foi avaliar o potencial da região em hidrocarbonetos.

Um dos problemas evidenciados após a análise dos relatórios dos poços profundos é o fato de, devido à grande profundidade e variedade de formações atravessadas, não ter sido possível estudar a micropaleontologia de um número suficiente de amostras que permitisse estabelecer, em alguns casos, rigorosamente, os limites das diversas formações. Portanto, as divisões foram estabelecidas tendo em conta a paleontologia pontualmente estudada, e com base nas variações de fácies já conhecidas da bacia geológica.

Assim, verificou-se que no Pliocénico são predominantes as areias arcósicas brancas e acastanhadas com algumas intercalações argilosas, e sem vestígios de fauna. A divisão entre o Pliocénico e o Miocénico Superior (Tortoniano) é definida no primeiro nível marinho com presença de fauna, nomeadamente *Ostreas*. A abundante fauna e microfauna encontrada são idênticas à fauna encontrada em alguns afloramentos Miocénicos amplamente estudados nos arredores de Lisboa. As divisões dentro do Miocénico foram impossíveis de realizar dada a ausência de um estudo detalhado da microfauna. Deste modo, os relatórios não contemplam uma divisão clara entre o Miocénico Superior, Médio e Inferior.

A base do Miocénico foi definida à profundidade onde se verificou uma mudança nítida da fácies marinha para continental. Esta mudança é caracterizada pelo surgimento de margas avermelhadas gresosas, que marcam uma deposição em regime misto. O Paleogénico caracteriza-se pelo aparecimento de depósitos grosseiros, conglomeráticos, a que se associam alguns corpos arcósicos mais finos e crostas calcárias às vezes bastante desenvolvidas.

## 4.2 Análise Estatística dos Dados de Partida

Previamente à análise estatística procedeu-se à transformação de profundidades dos horizontes para cotas. Na figura 4.4 mostra-se a área de estudo devidamente enquadrada com o MDT que serviu de base à transformação.

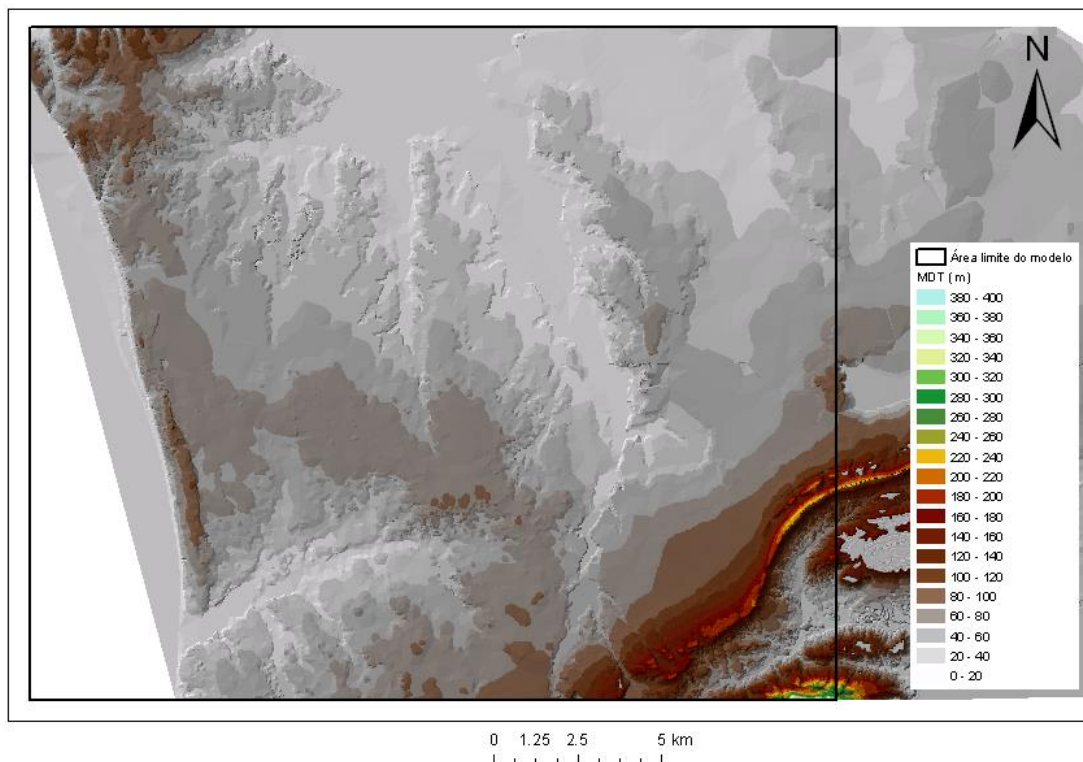


Figura 4.4 - Enquadramento geográfico das linhas sísmicas resultantes das campanhas CA – Caparica, BA79 – Montijo e BA80 - Montijo (informação cedida pela ENMC).

A análise estatística dos dados de partida incluiu os seguintes estatísticos básicos: mínimos, máximos, média, desvio padrão, variância, coeficiente de assimetria e quartis das cotas dos três horizontes para os dois conjuntos de dados. A síntese dos resultados obtidos está representada na Tabela 4.4 assim como *box-plots* das cotas para os dados da sísmica (Figura 4.5). Esta análise facilitou a compreensão do comportamento dos horizontes na área estudada, orientando as etapas posteriores de simulação. Em termos de análise bivariada apresentam-se diagramas de dispersão das cotas dos 3 horizontes estudados para os dados sísmicos (Figura 4.6).

Em primeiro lugar importa referir a escassez de dados provenientes das sondagens e dos poços profundos ao nível do segundo e terceiro horizontes (Z2 e Z3). Da totalidade dos dados principais, 93,478% dizem respeito à interface Pliocénico – Miocénico Superior (Z1), 1,087% à interface Miocénico Superior – Miocénico Médio (Z2) e 5,435% à interface Miocénico Inferior –

Paleogénico (Z3). Relativamente aos dados sísmicos, todos os horizontes estão representados em todos os perfis sísmicos com uma resolução semelhante.

Tabela 4.4 - Estatísticos básicos das cotas dos perfis sísmicos e das sondagens e poços profundos nos três horizontes estudados: Intra-Neogénico Superior (Z1), Intra-Neogénico Inferior (Z2) e Topo do Paleogénico (Z3).

Parâmetros / horizontes	Intra-Neogénico Superior (Z1)		Intra-Neogénico Inferior (Z2)		Topo do Paleogénico (Z3)		
	Perfis sísmicos	Sondagens e poços	Perfis sísmicos	Sondagens e Poços	Perfis Sísmicos	Sondagens e Poços	
Mínimo	-343,993	-268,300	-584,542	-162,000	-942,692	-968,3	
Máximo	99,215	-24,000	56,537	-162,000	-132,514	-537	
Média	-234,156	-96,444	-440,914	-162,000	-676,423	-795,642	
Desvio Padrão	77,069	43,133	98,602	-	167,501	144,594	
Variância	5939,625	1860,435	9722,437	-	28056,551	20907,39	
Coefficiente de Skewness	1,062	-0,860	1,350	-	0,803	0,777669	
Q <sub>1</sub>	-296,162	-120,750	-506,433	-162,000	-857,587	-864	
Q <sub>3</sub>	-195,084	-68,000	-392,733	-162,000	-570,837	-765,71	
Dados	Nº	-	86	-	1	-	5
	%	-	93,478%	-	1,087%	-	5,435%

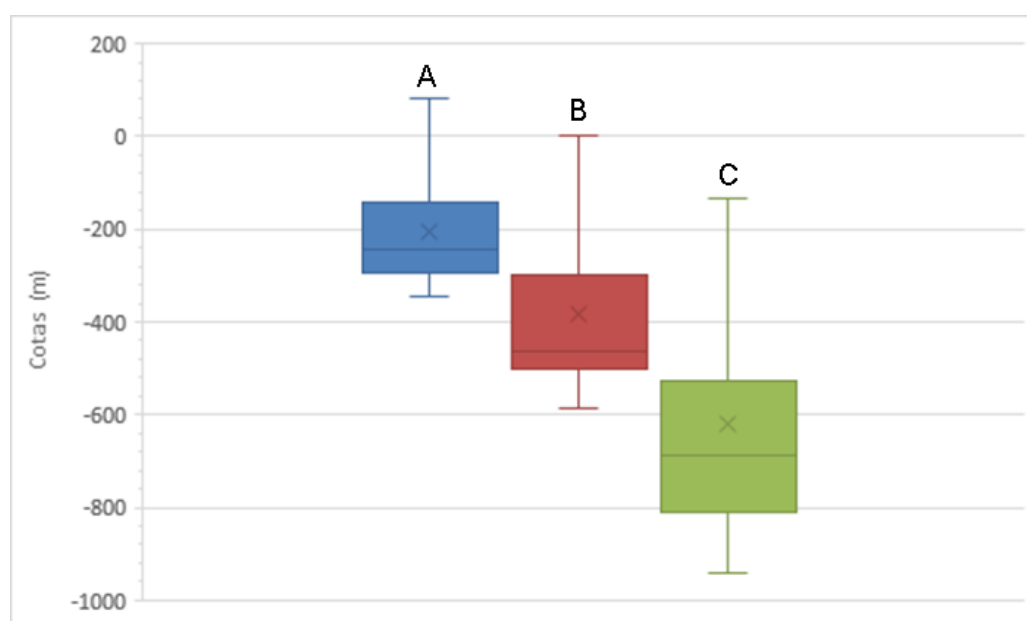


Figura 4.5 - Box-plots das cotas extraídas dos perfis sísmicos dos três horizontes estudados (Z1=A, Z2=B, Z3=C).

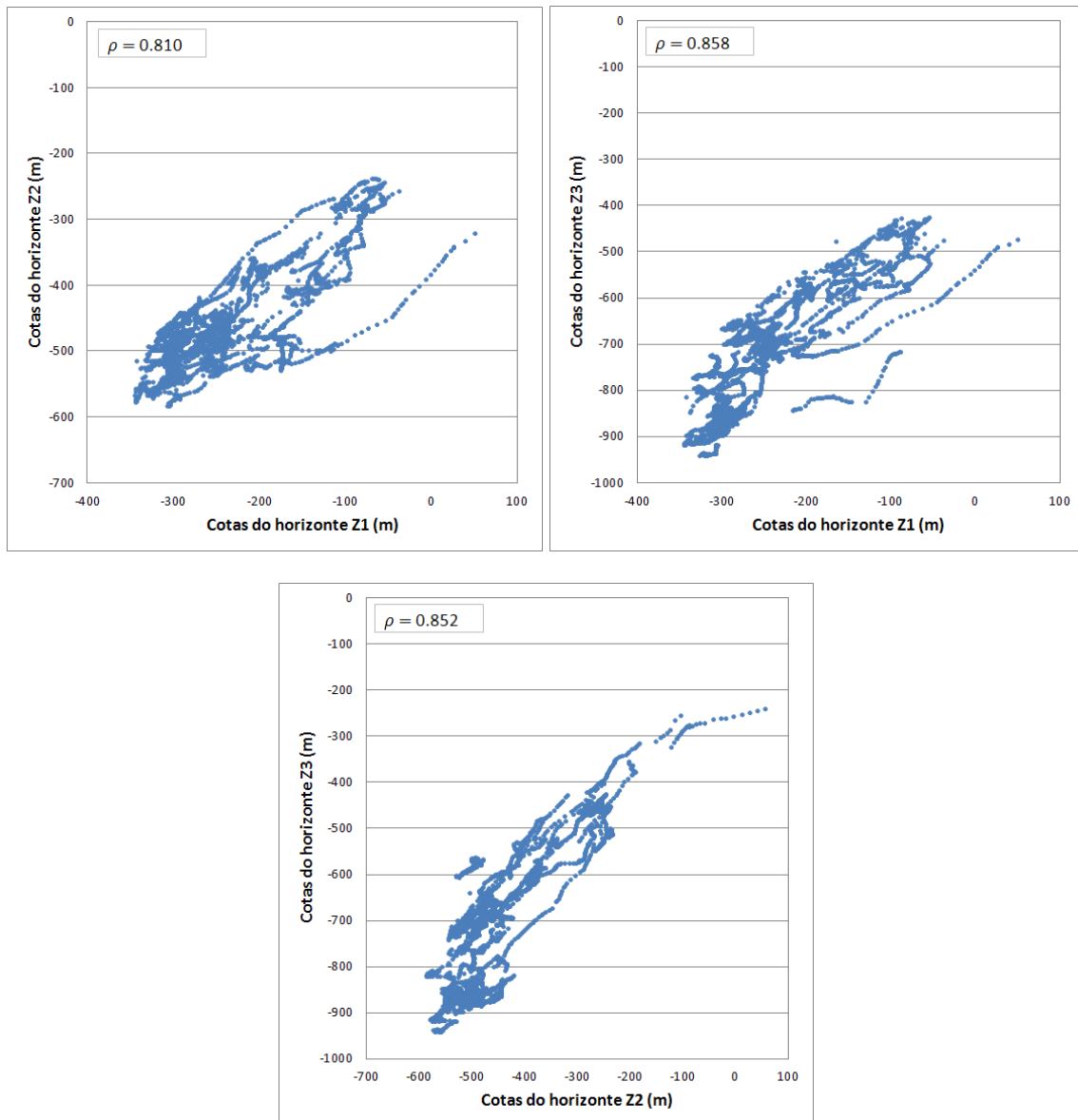


Figura 4.6 – Digramas de dispersão entre as cotas dos 3 horizontes estudados Z1, Z2 e Z3 e indicação dos coeficientes de correlação de *Pearson*.

A tendência nos valores mínimos, máximos e médias corresponde às expectativas, ou seja, há um aumento da profundidade quando se comparam os parâmetros do horizonte mais superficial (Z1), com os dos horizontes subjacentes (Z2 e Z3). Importa assinalar que se observam grandes discrepâncias entre a média nos dois tipos de dados, nomeadamente no horizonte A que contém a maior parte dos dados. Assumindo que a interpretação dos dados dos poços / sondagens é mais fidedigna, esta discrepância pode ser devida à interpretação da sísmica ou, simplesmente devido ao posicionamento dos dados relativamente aos dados da sísmica.

As medidas de dispersão são bastante influenciadas pelas características estruturais e morfológicas da região. Deste modo, é notório o impacto das cotas relativas a duas zonas completamente distintas: uma bastante profunda (associadas a um presumível anticlinal) e outra

com cotas mais altas, localizada perto da Serra da Arrábida. Este fato justifica os valores relativamente elevados do desvio-padrão nos três horizontes e com aumento em profundidade.

O coeficiente de *Skewness* (assimetria) é positivo para todos os dados dos perfis sísmicos, o que indica que predominam valores baixos e médios e existem alguns valores mais elevados que desequilibram o histograma. Essa assimetria é igualmente visível nos *box-plot* representados na Figura 4.5.

Em termos de análise bivariada estudou-se a correlação linear entre as cotas dos três horizontes conforme expressos pela sísmica. O grau de correlação entre as cotas dos horizontes é elevado, tal como se pode verificar nos gráficos da Figura 4.6 e nos coeficientes de correlação de Pearson sempre superiores a 0,800 ( $\rho_{Z1Z2} = 0,810$ ;  $\rho_{Z2Z3} = 0,852$ ;  $\rho_{Z1Z3} = 0,858$ ). Estes valores indicam que as superfícies são predominantemente paralelas, e não existem na área estudada zonas onde os horizontes apresentem comportamentos muito diferentes, ou seja, não houve fenômenos geológicos ou geomorfológicos que alterassem de forma significativa o comportamento específico de um horizonte numa determinada região, comparativamente aos horizontes contíguos.

Como os horizontes não estão todos igualmente amostrados nos perfis sísmicos, estes níveis de correlação recomendam que, primeiro, seja simulada a camada com maior número de dados (neste caso o horizonte mais superficial – Z1), e depois sejam co-simuladas as camadas subjacentes Z2 e Z3 impondo estes graus de correlação com cada camada sobrejacente.

### 4.3 Variografia e Ajuste dos Modelos Teóricos

Foram calculados variogramas experimentais direcionais e omnidirecionais para a variável cota dos três horizontes estudados para os dados dos perfis sísmicos e para os dados dos poços profundos e sondagens (neste caso só para o horizonte mais superficial). Os resultados dos variogramas e os modelos teóricos ajustados apresentam-se nas Figuras 4.7 e 4.8. Na Tabela 4.5 sintetizam-se os parâmetros dos modelos ajustados para todos os horizontes. Os estudos de variografia foram desenvolvidos com o auxílio do geoMS (*Geostatistical Modeling Software*).

Os dados de sísmica como são processados têm tendência a ter um comportamento muito contínuo para a pequena distância à qual se ajusta melhor o modelo teórico de tipo Gaussiano. De fato, o ajustamento é muito satisfatório nos primeiros pontos do variograma, ou seja, nos pontos mais próximos entre si. Para efeitos de simulação, e para obviar o inconveniente de muitas vezes o sistema de krigagem dar indeterminado com este modelo de variograma, introduziu-se um muito ligeiro efeito pepita nos ajustamentos dos três horizontes.

Tabela 4.5 - Síntese dos parâmetros dos modelos teóricos dos variogramas ajustados.

Variável	C <sub>0</sub>	Estrutura		
		a - Amplitude (m)	C <sub>1</sub> - Patamar	Modelo
Cotas horizonte Z1	0,05	10500	25000	Gaussiano
Cotas horizonte Z2	0,05	9200	4800	Gaussiano
Cotas horizonte Z3	0,05	9200	7500	Gaussiano

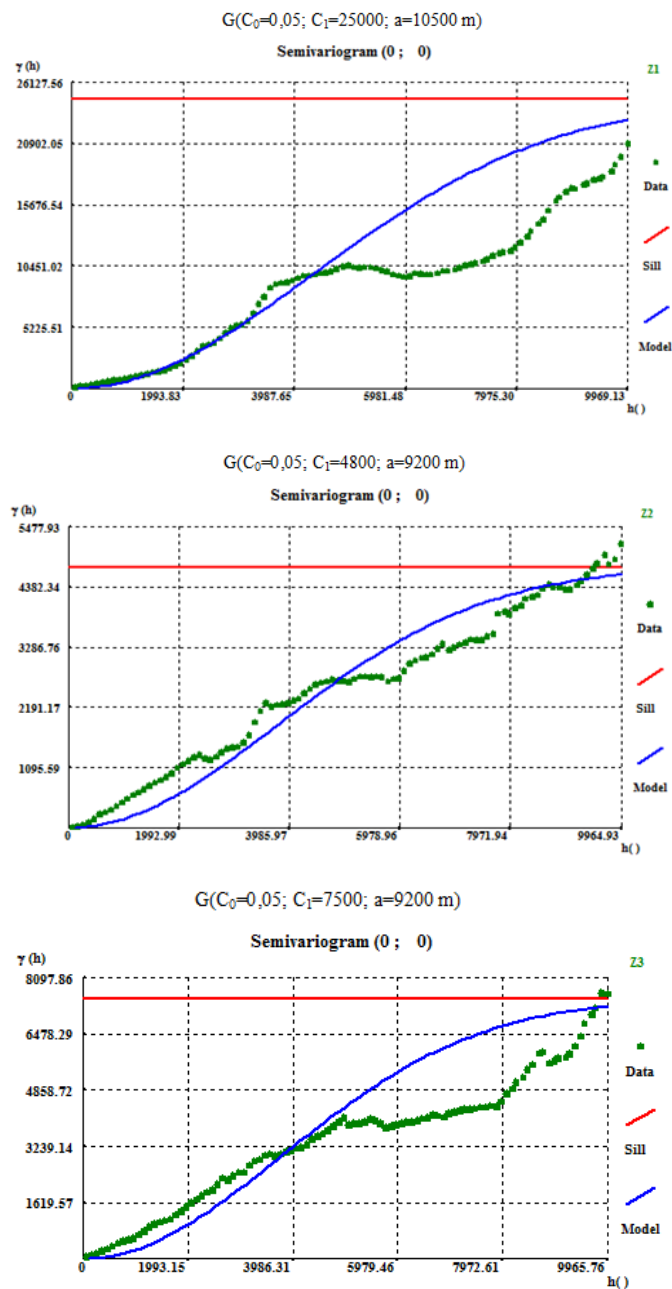


Figura 4.7 - Variogramas experimentais e modelos teóricos de tipo Gaussiano ajustados à variável cota dos três horizontes estudados (Z1, Z2 e Z3) com os dados provenientes da sísmica.

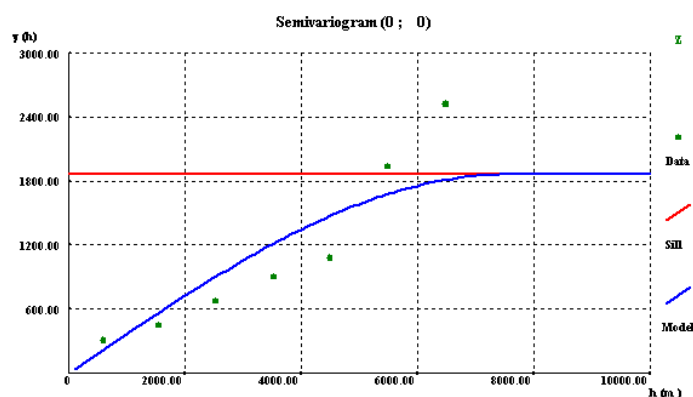


Figura 4.8 - Variogramas experimentais e modelo teórico de tipo Esférico ajustado à variável cota do horizonte Z1 com os dados provenientes dos poços / sondagens.

Já no que se refere aos dados dos poços profundos e sondagens foi considerado um modelo de tipo esférico isotrópico com 7500 metros de amplitude para a variável cota relativamente ao horizonte A. Dada a limitação de dados, para os horizontes Z2 e Z3 não foi possível calcular variogramas experimentais com os dados dos poços / sondagens, e também para estes dois horizontes não é feito o condicionamento aos dados *hard*.

#### 4.4 Simulação das Superfícies Condicionais à Sísmica

Esta tarefa destina-se a gerar os primeiros modelos das três superfícies (Z1, Z2 e Z3) condicionais aos dados da sísmica. Foram geradas 100 imagens de cada horizonte e calculadas a imagem média e a da variância.

A observação das cotas ao longo dos perfis sísmicos mostra que na região estudada as superfícies formam uma bacia, pelo que a variável cota das superfícies é não estacionária de 1ª ordem. Para impor esta forma geométrica não estacionária, optou-se por subdividir a área de estudo em regiões.

Para os horizontes mais profundos, Z2 e Z3, foram definidas três regiões (I, II e III) dado que a distribuição espacial dos dados é semelhante em ambos os casos. Para o horizonte Z1 foram definidas apenas duas regiões (I e II), onde a II é coincidente com a região III e a região I corresponde à unificação das regiões I e II de Z2 e Z3. Este horizonte Z1 apresenta menor quantidade de dados, comparativamente aos outros horizontes, nomeadamente a Este e a Sul da zona de estudo. Também, e porque o horizonte Z1 tem menos dados do que os restantes, optou-se por co-simular este horizonte utilizando o Z2 como referência e a correlação calculada anteriormente de  $\rho_{12} = 0,81$ . Em síntese, simularam-se por SSD os horizontes Z2 e Z3 com leis

de distribuição regionais (3 regiões) e co-simulou-se por CoSSD o horizonte Z1 com leis de distribuição regionais (2 regiões) tendo por referência o horizonte Z2.

Na Figura 4.9 mostram-se as leis condicionais das cotas das três superfícies às 2 e 3 regiões consideradas, e na Figura 4.10 mostram-se em planta a geometria das regiões nos dois casos.

Nas Figuras 4.11 a 4.13 mostram-se os resultados das simulações por horizonte nas seguintes imagens: cotas do horizonte segundo os dados da sísmica, regiões implementadas, exemplo de duas imagens simuladas, imagem média das simulações e imagem da variância das simulações.

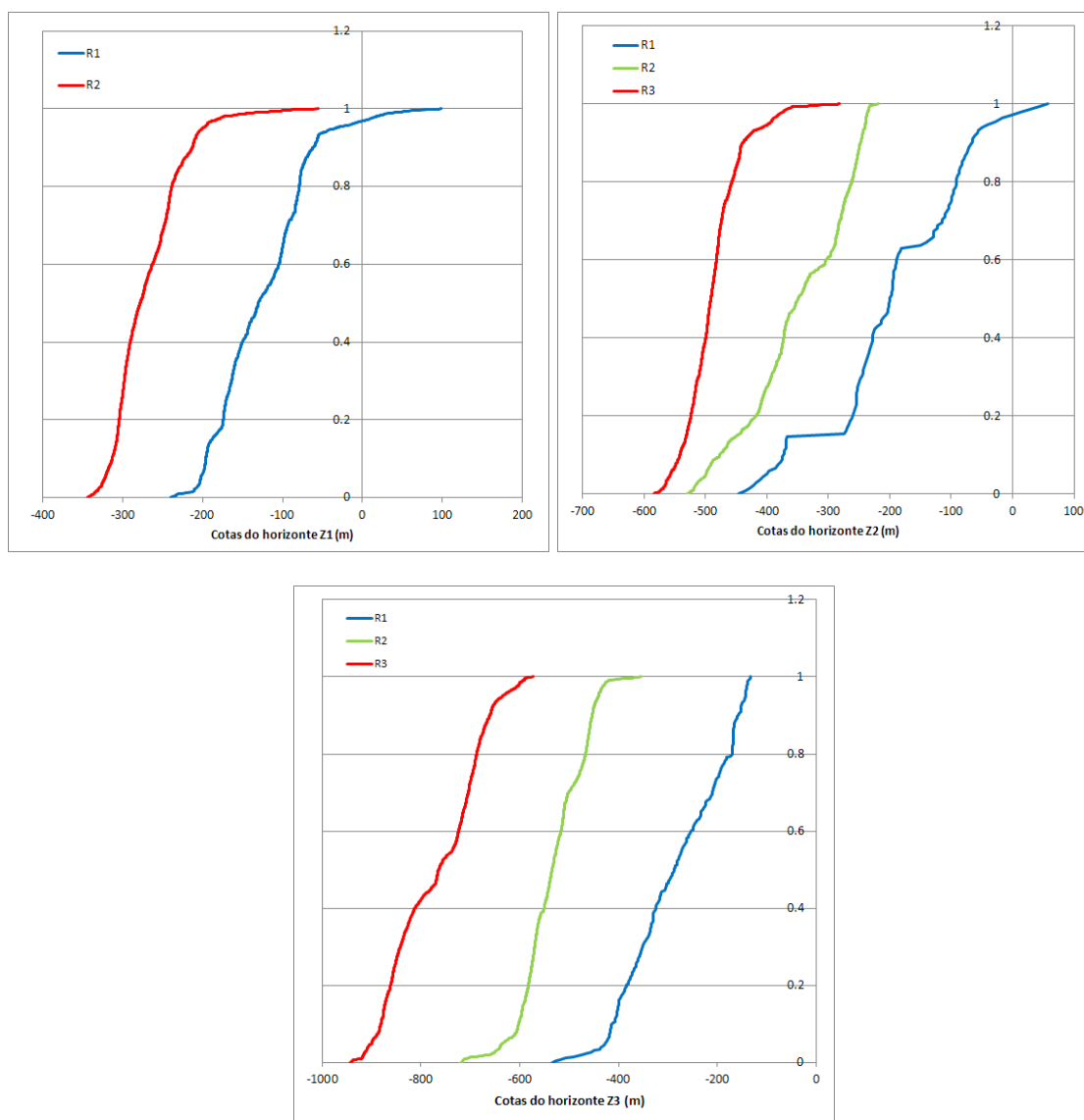


Figura 4.9 – Leis de distribuição cumulativa condicional da variável cota relativa aos horizontes Z1, Z2 e Z3 por região.

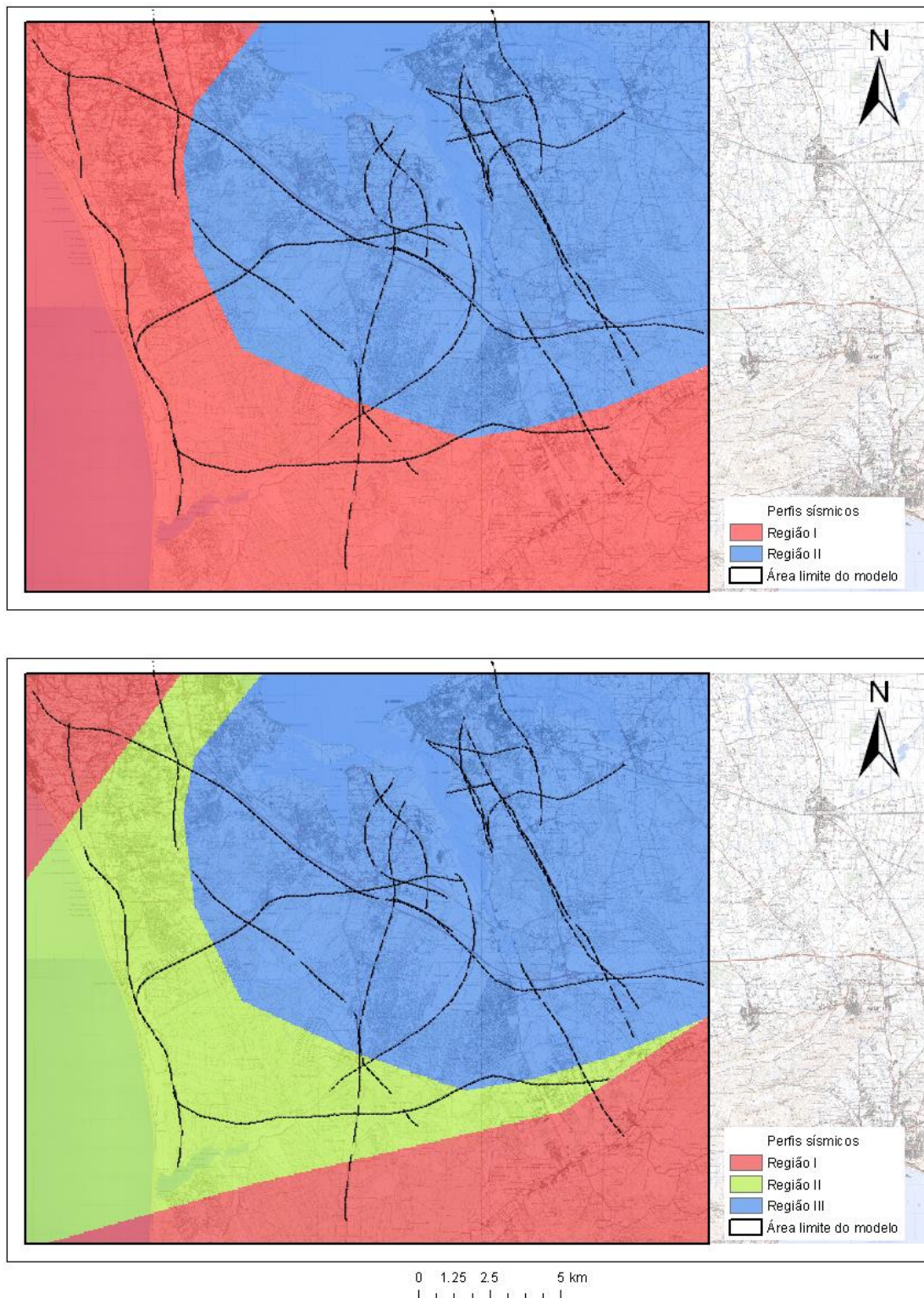


Figura 4.10 – Representação espacial das regiões geradas para o horizonte Z1 (imagem de cima) e para os horizontes Z2 e Z3 (imagem de baixo) respetivamente 2 e 3 regiões sobre as imagens das cartas militares do local.

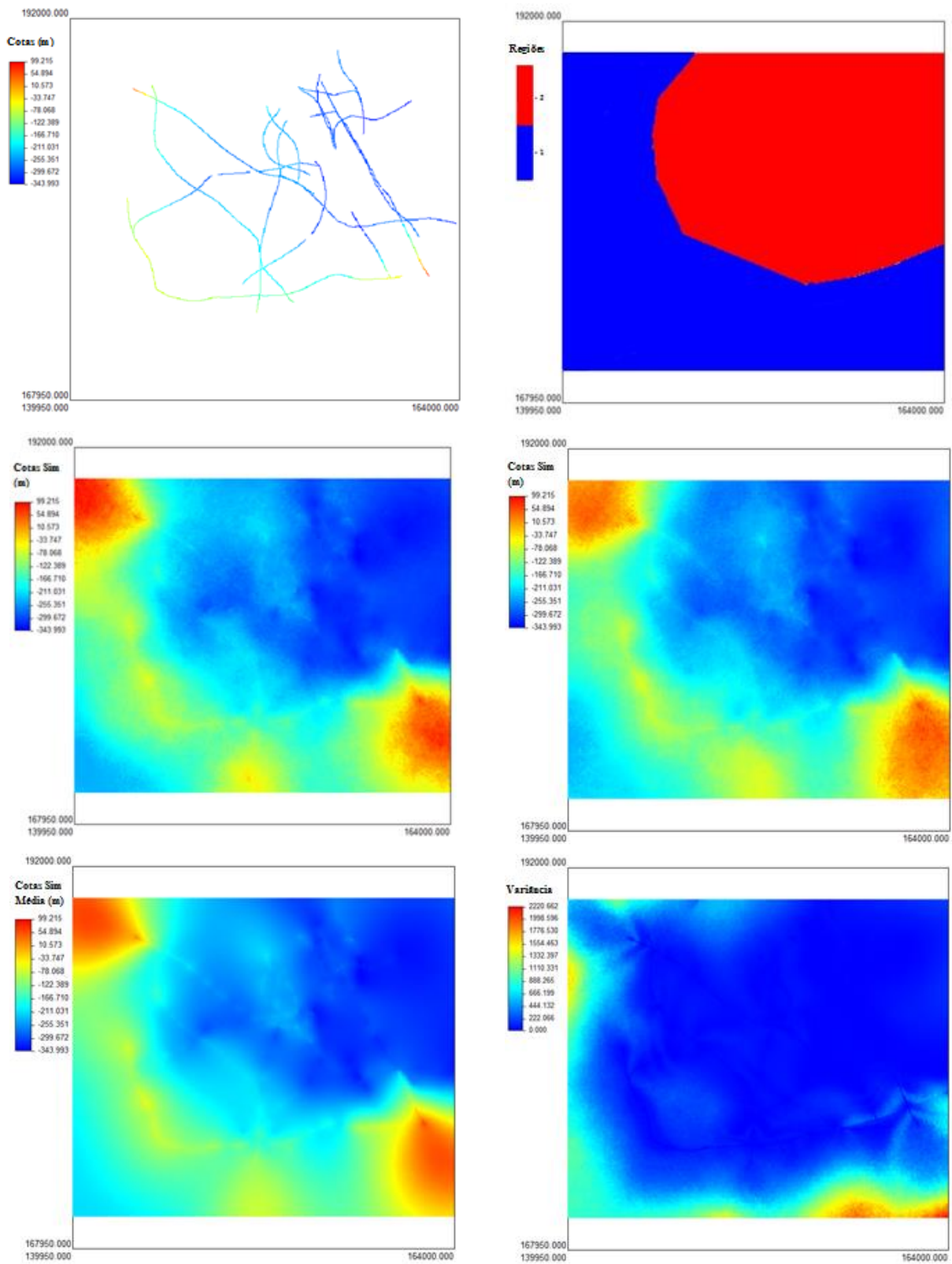


Figura 4.11 – Dados de partida e resultados para o horizonte Z1: cotas do horizonte segundo os dados da sísmica, regiões implementadas, exemplo de duas imagens simuladas, imagem média das simulações e imagem da variância das simulações.

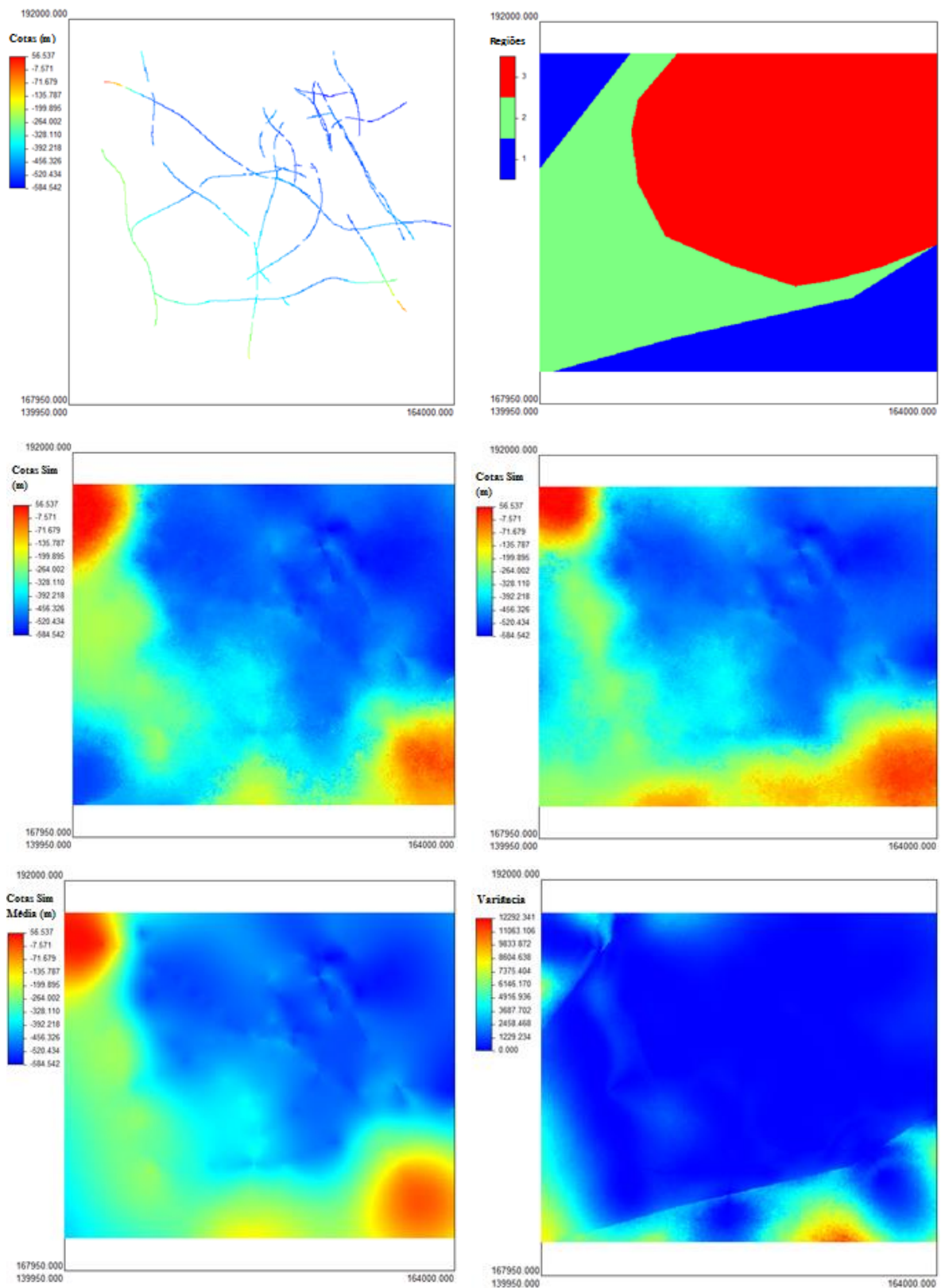


Figura 4.12 – Dados de partida e resultados para o horizonte Z2: cotas do horizonte segundo os dados da sísmica, regiões implementadas, exemplo de duas imagens simuladas, imagem média das simulações e imagem da variância das simulações.

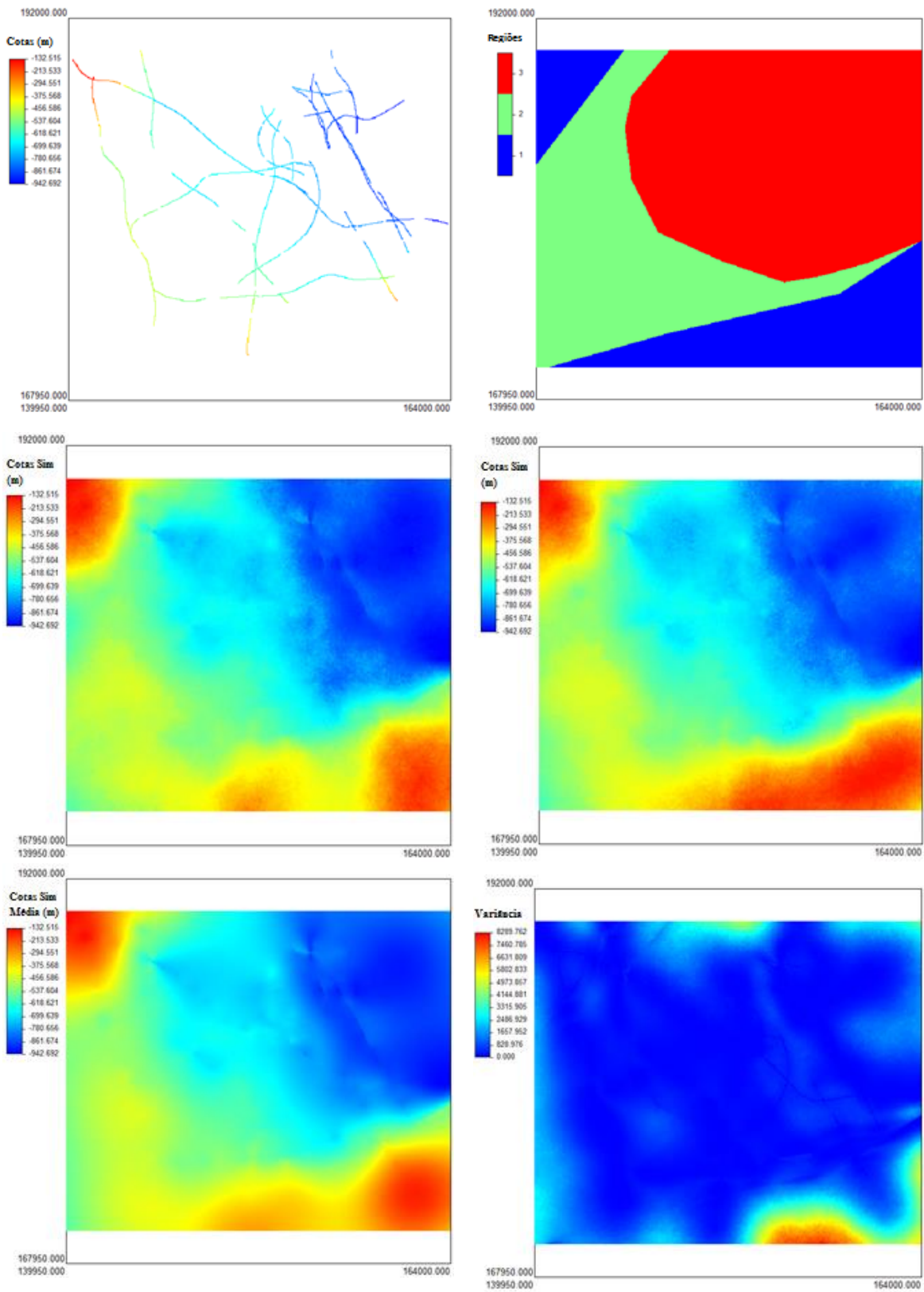


Figura 4.13 – Dados de partida e resultados para o horizonte Z3: cotas do horizonte segundo os dados da sísmica, regiões implementadas, exemplo de duas imagens simuladas, imagem média das simulações e imagem da variância das simulações.

## 4.5 Simulação de Superfícies Condicionada a Orientações e Desníveis Locais

Nesta etapa testou-se a simulação de superfícies condicional a orientações locais e desníveis ao invés de condicional a observações pontuais. Na prática, pretendeu-se testar a geração superfícies condicionais a morfologias pré-definidas (por exemplo, a de uma bacia ou de um anticlinal) e não a medições pontuais. Trata-se de uma situação recorrente quando se utilizam dados de sísmica, onde a sua interpretação fornece uma razoável informação da morfologia global, mas onde localmente existe incerteza posicional.

Para este teste utilizou-se como ponto de partida a imagem média das simulações anteriormente obtidas (ver imagem média da Figura 4.11, canto inferior esquerdo) (equivalente a uma estimação por krigagem normal) tendo-se ainda aplicado um filtro de média móvel de 10x10 com o intuito de atenuar a imagem da forma. Como se trata de um teste, simularam-se apenas superfícies para a primeira camada (Z1). A imagem média filtrada pode ser consultada na Figura 4.14.

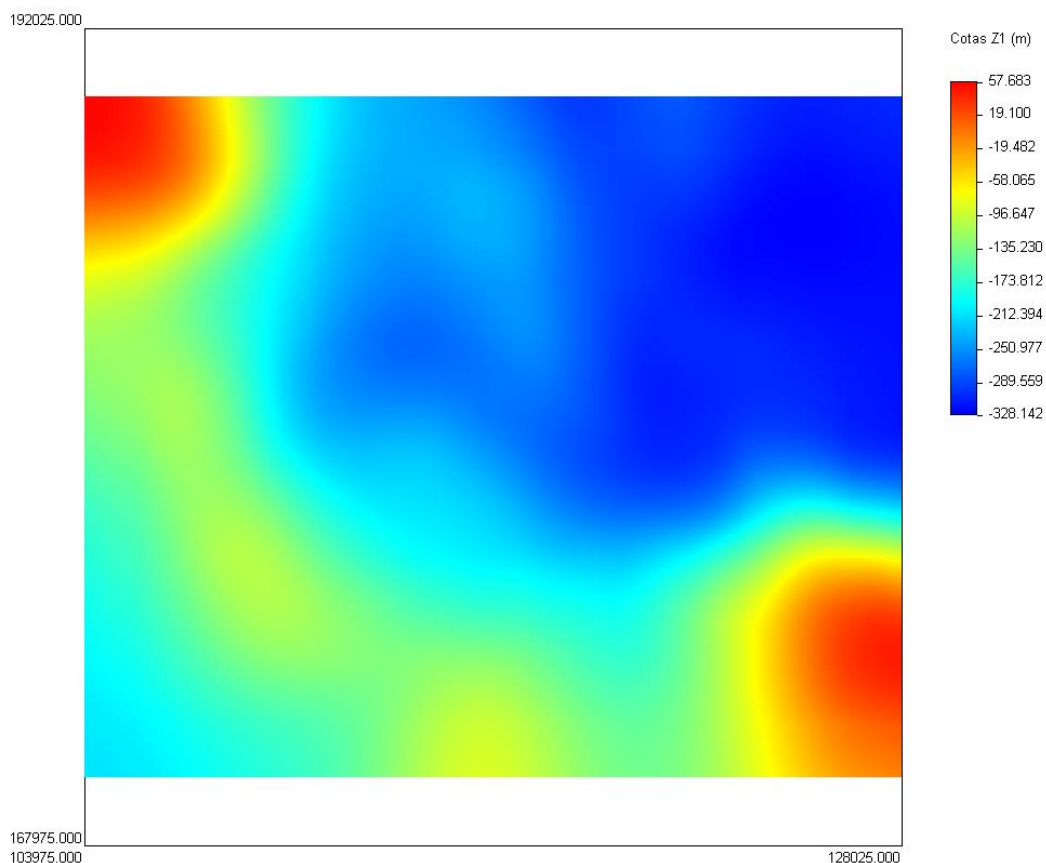


Figura 4.14 – Imagem média e filtrada das simulações da cota do horizonte Z1 condicional aos dados da sísmica.

Para esta imagem média foram calculadas as matrizes de desníveis para as 8 direções definidas pelas células vizinhas de cada célula (resultam 8 matrizes). Na figura 4.15 mostram-se, a título de exemplo, duas imagens de desníveis para as direções N e S.

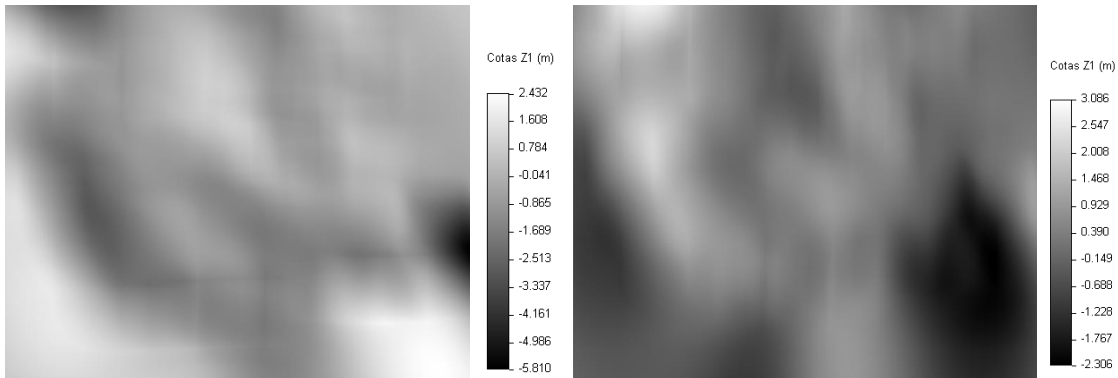


Figura 4.15 – Exemplo de duas imagens de desníveis locais em metros para as direções N e S.

Na execução das simulações testaram-se vários coeficientes de correlação, todavia sempre elevados. Observa-se que os resultados são muito sensíveis a ligeiras diminuições do coeficiente de correlação; por exemplo, quando é considerado um coeficiente de correlação de 0,9997 (ainda muito alto) o resultado são imagens simuladas com correlações de 0,95, ou seja, já são imagens com algumas diferenças. No gráfico da Figura 4.16 estão representados alguns coeficientes de correlação testados e o resultado na correlação entre pares de imagens simuladas, existindo claramente um fator de escala.

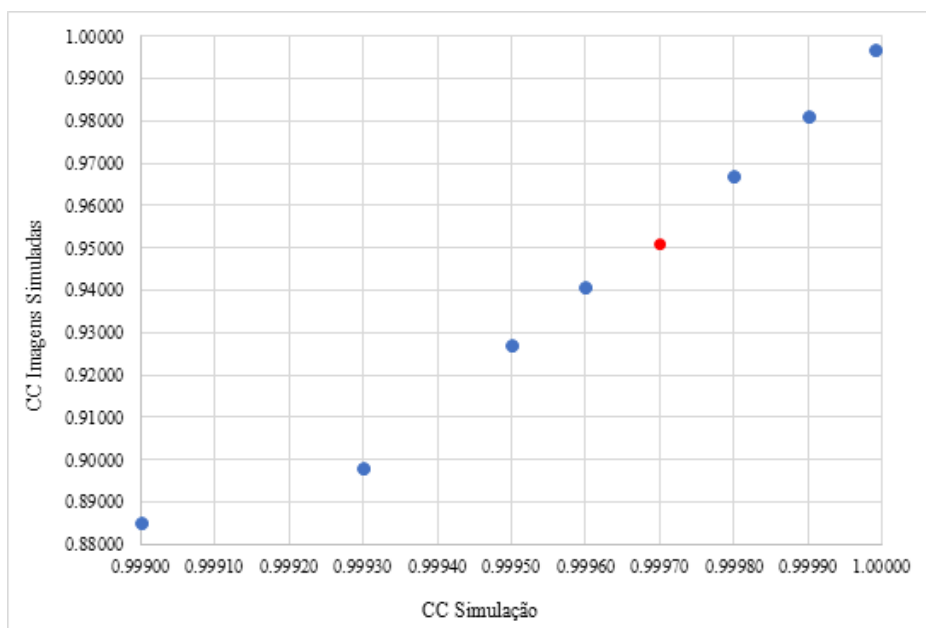


Figura 4.16 - Gráfico comparativo entre o coeficiente de correlação utilizado na estimação por cokrigagem colocizada embebida na Co-SSD e o que é obtido entre duas imagens simuladas.

Os resultados mostram ainda que para valores inferiores aos mostrados no gráfico as imagens simuladas geram artefactos, que são resultantes de que quando é simulado um valor ligeiramente diferente aos restantes este valor é propagado na direção onde é gerado e a imagem final aparece com bandas em forma de raios a partir da célula que é o início da simulação. Todavia para valores mais altos conseguem-se simular imagens diferentes, e com isso explora-se o espaço de incerteza. Refira-se que quando é utilizado um coeficiente de correlação de um todas as imagens simuladas obtidas são iguais à imagem de referência, o que confirma que o procedimento está bem implementado.

A título de exemplo, na Figura 4.17 estão representadas 4 realizações obtidas com o coeficiente de correlação 0,9997 cujo resultado são imagens simuladas com coeficiente de correlação médio de 0,95.

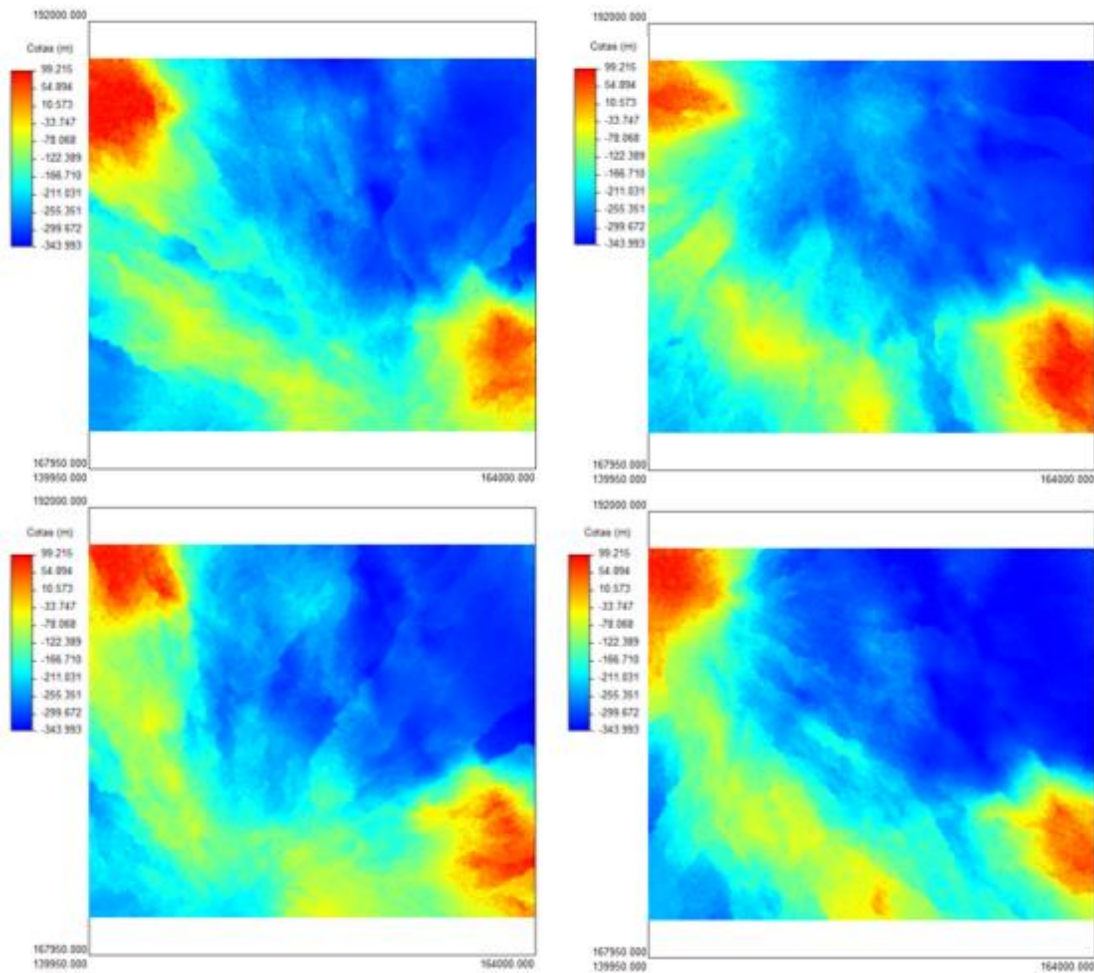


Figura 4.17 – Imagens simuladas da superfície Z1 condicionais a desníveis locais obtidos a partir da imagem média das simulações anteriores.

As simulações respeitam os histogramas dos dados de partida e o zonamento em forma de bacia. Existe assim campo de utilização para esta técnica sempre que apenas esteja disponível uma superfície de referência média. Todavia, neste caso de estudo optou-se por selecionar as superfícies obtidas na primeira simulação ao invés destas.

## **4.6 Condicionamento das Superfícies Anteriormente Simuladas aos Dados de Poço por Co-Simulação Sequencial Direta**

Tal como no ponto anterior, e também devido à falta de dados de poços e sondagens nos horizontes Z2 e Z3 (ver subcapítulo 4.2 – Análise Estatística dos Dados de Partida) foi decidido aplicar o condicionamento apenas ao primeiro horizonte (Z1). No primeiro momento foi necessário avaliar os coeficientes de correlação locais e, para tal, seguiu-se o procedimento explicado no capítulo da metodologia. Seguidamente simularam-se 3 realizações condicionais a cada imagem simulada anteriormente. No final apresentam-se a imagem média das simulações e a imagem da variância (imagem da incerteza local). Em termos de validação, foram calculados estatísticos básicos e variogramas das imagens simuladas e comparados com os homólogos dos dados de partida.

### **4.6.1 Avaliação dos coeficientes de correlação locais entre as imagens simuladas condicionais à sísmica e os dados das sondagens / poços**

Para os dados de cada sondagem / poço são calculados coeficientes de correlação locais entre os valores do poço mais os dados dos 10 poços mais próximos, e o valor homólogo de cada uma das 100 superfícies primárias simuladas. Posteriormente faz-se a estimação por krigagem normal destes valores para toda a área de estudo (ao todo são feitas 100 estimações, uma por cada simulação). Calcularam-se variogramas experimentais para os resultados obtidos por algumas simulações tendo-se optado por utilizar um modelo esférico com 3500 metros de amplitude. A figura 4.18 mostra um dos variogramas experimentais e respetivo modelo teórico e duas imagens estimadas relativas a duas realizações de superfícies primárias. Refira-se que os variogramas experimentais são muito parecidos para todas as simulações.

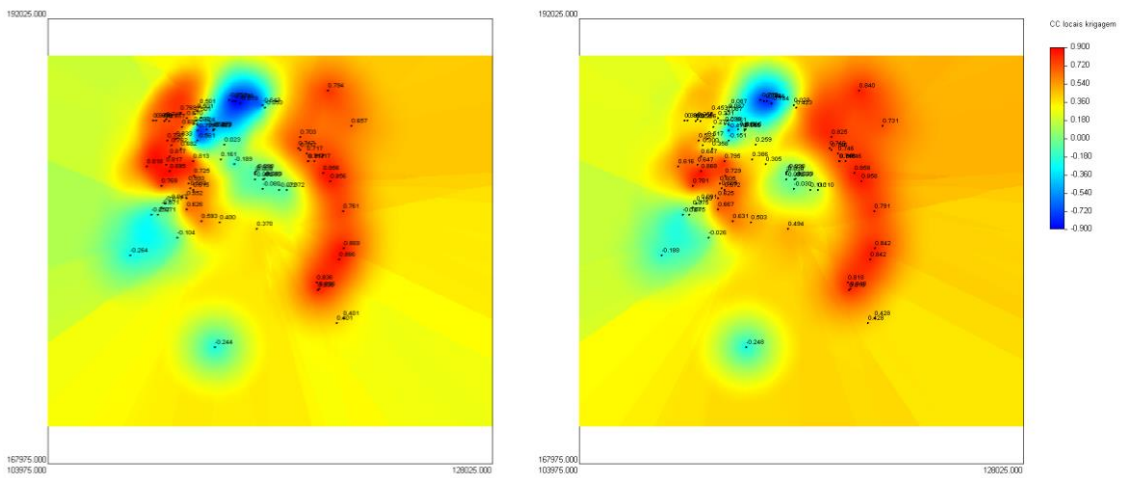
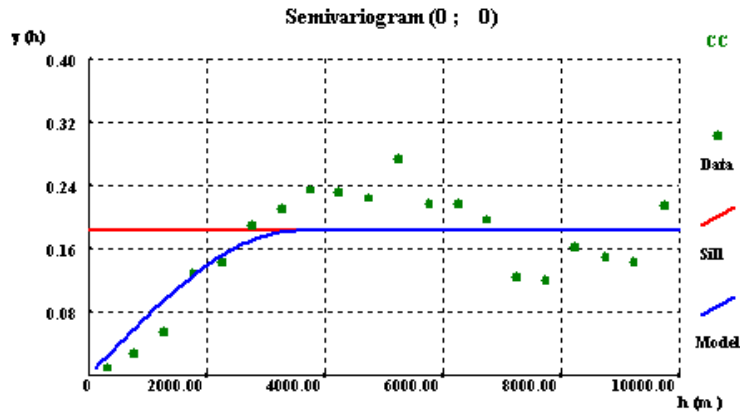


Figura 4.18 – Variograma experimental e modelo teórico relativo a uma simulação e imagens estimadas dos coeficientes de correlação locais entre as simulações das imagens condicionais à sísmica e os dados das sondagens / poços.

Estas imagens permitem verificar as áreas onde a correlação entre a sísmica e os dados das sondagens / poços são maiores e menores, ou seja, o grau de coerência entre estas duas fontes de informação. Refira-se que as correlações apenas têm em conta a relação contextual dos valores, podendo ter-se uma correlação muito elevada com uma diferença grande (no caso de existir um erro posicional, mas não da forma). A zona onde o coeficiente de correlação é maior coincide com a localização dos poços profundos, precisamente porque estes foram utilizados como auxiliares na calibração da campanha da prospeção sísmica. Observa-se uma pequena zona onde o coeficiente de correlação é elevado, mas negativo, o que releva que existem contradições da forma como se se tratasse de um espelho. Para a periferia os valores baixam gradualmente sendo esta descida mais acentuada para sudoeste onde existem poços com baixa correlação.

#### 4.6.2 Condicionamento Final por Co-simulação

O procedimento de condicionamento que falta é feito por CoSSD, onde a informação secundária são as superfícies já simuladas e a informação primária são os dados das sondagens e poços. Na Figura 4.19 seguinte estão representadas quatro das trezentas simulações.

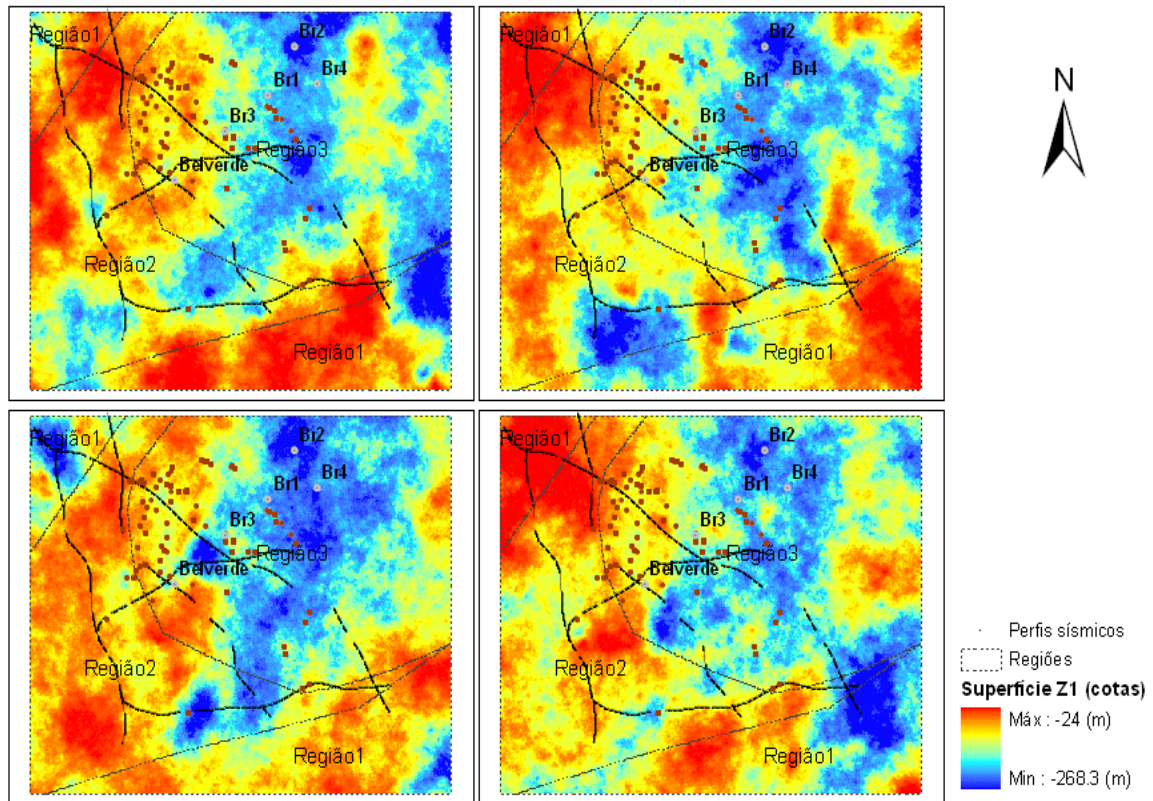


Figura 4.19 – Exemplo de quatro imagens simuladas das superfícies condicionais à sísmica e aos dados das sondagens / poços.

Tal como já foi referido anteriormente, as imagens simuladas apresentam cenários equiprováveis e devem respeitar tanto os estatísticos como a continuidade espacial dos dados. Na Figura 4.20 estão representadas a imagem média e a imagem da variância das realizações que é um indicador da incerteza local.

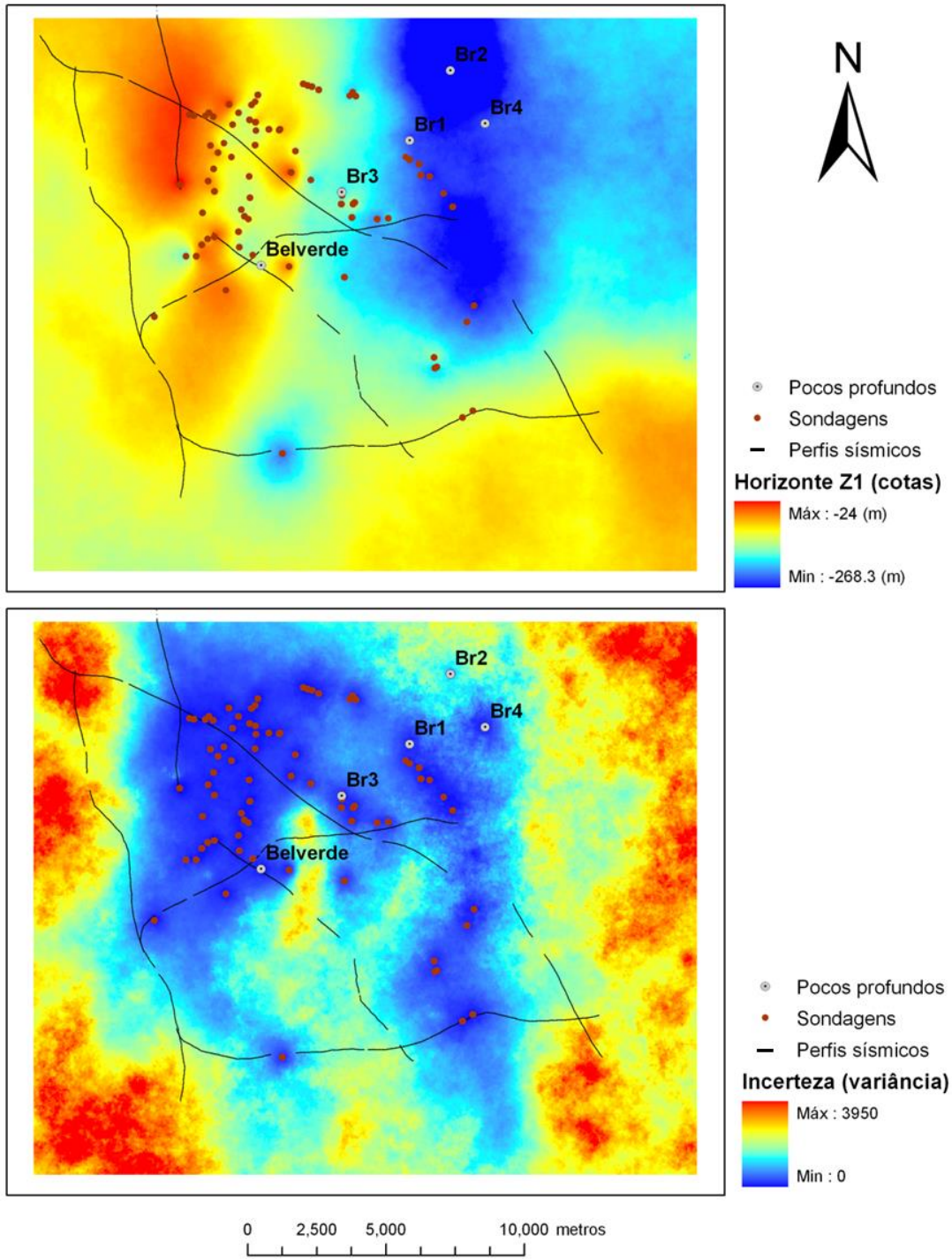


Figura 4.20 - Imagem média das simulações e imagem da variância local das simulações ou indicador de incerteza local.

A análise da imagem média das simulações permite verificar alguns aspetos relevantes como, por exemplo, a influência dos dados principais na simulação. Os valores da variância são, tal como seria de esperar, menores nas zonas onde existem dados de poço e sondagens (onde está a informação direta) e maiores nas zonas mais afastadas. A validação das simulações seguiu os itens comumente utilizados:

- Verificação visual e local da coincidência entre valores experimentais e simulados;
- Comparação dos estatísticos dos dados experimentais e das imagens simuladas;
- Análise da continuidade espacial das simulações e comparação com os dados de partida.

Estes itens assentam nos pressupostos teóricos da simulação e na coerência entre as imagens simuladas e o modelo conceptual da realidade. A verificação visual e local dos valores experimentais nas imagens simuladas consiste no cruzamento dos dados principais com algumas imagens simuladas. Em todos os casos foi possível conferir a coerência dos valores experimentais e os valores simulados nas mesmas localizações.

O segundo item consiste na análise e comparação dos estatísticos dos dados experimentais e das imagens simuladas. Na Figura 4.21 estão representados os histogramas e os estatísticos dos dados de partida e na Figura 4.22 os de uma realização. A sua análise permite verificar que estes foram respeitados parcialmente na simulação, verificando-se uma diminuição da variância devido ao condicionamento às superfícies primárias.

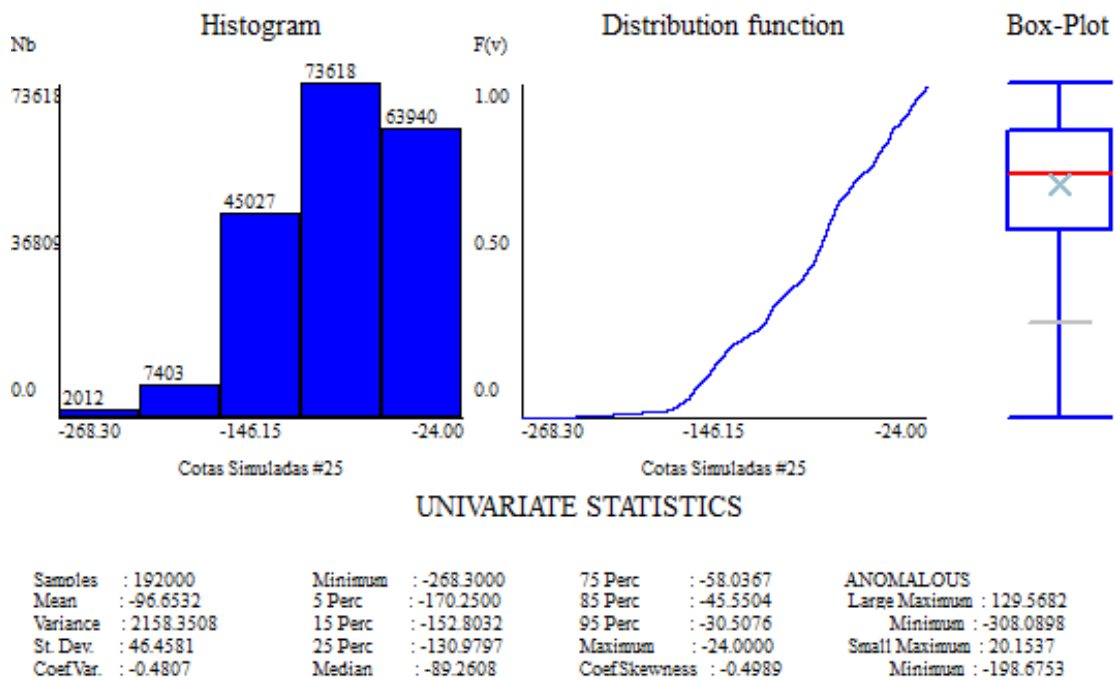


Figura 4.21 - Histogramas, simples e cumulativo, box-plots e estatísticos da realização #25

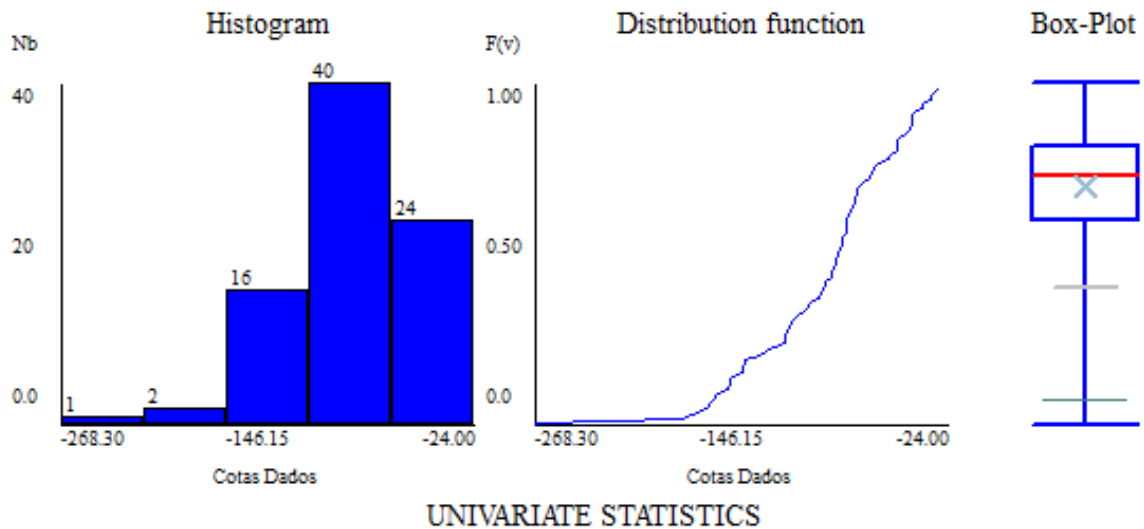


Figura 4.22 - Histogramas, simples e cumulativo, box-plots e estatísticos dos dados experimentais.

O terceiro item de validação consistiu na comparação dos variogramas das imagens simuladas com o modelo ajustado aos dados experimentais. Foram selecionadas duas simulações ao acaso (realizações #1 e #19) e, aos respectivos variogramas, ajustou-se o modelo teórico utilizado no variograma dos dados experimentais. Nas figuras 4.23 e 4.24 estão representados os variogramas bidirecionais das simulações ajustados ao modelo teórico dos dados experimentais.

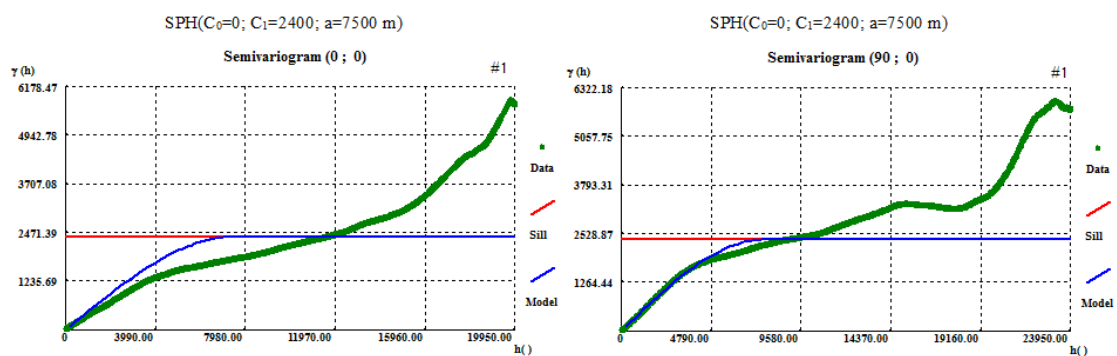


Figura 4.23 - Variogramas da simulação #1. As direções (0,0) e (90,0) correspondem aos eixos Y e X, respectivamente.

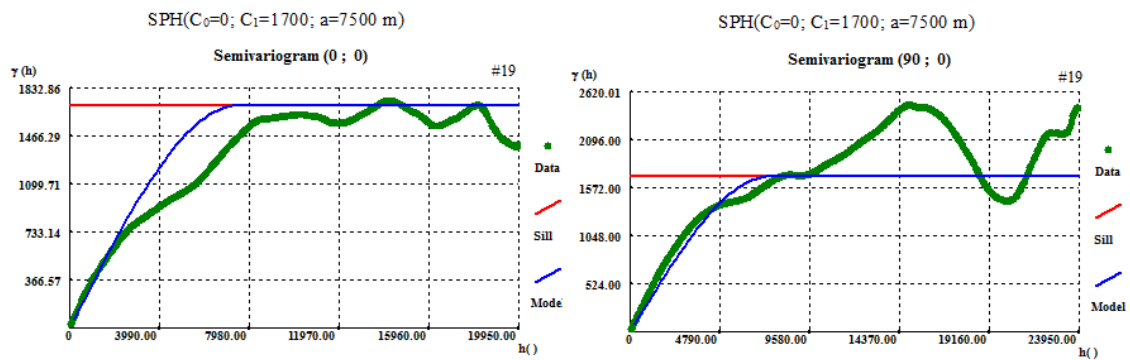


Figura 4.24 - Variogramas da simulação #19. As direções (0,0) e (90,0) correspondem aos eixos Y e X, respectivamente.

Globalmente, é possível verificar que os modelos teóricos ajustados são bem reproduzidos nas simulações. Uma característica particular que persiste ligeiramente nos variogramas das simulações é a componente contínua de pequena escala típica do modelo gaussiano utilizado na simulação regionalizada das primeiras superfícies.

Após a análise dos três itens de qualidade é possível concluir que do ponto de vista do cumprimento dos requisitos do algoritmo da simulação sequencial, as imagens obtidas são consideradas válidas.

## 4.7 Modelo Morfológico Final

Por último, importaram-se as superfícies primárias obtidas, as linhas representativas das sondagens e o MDT para o *software* Move ® e visualizou-se o conjunto obtido. Na figura 4.25 estão representadas as três vistas mais interessantes do modelo morfológico primário.

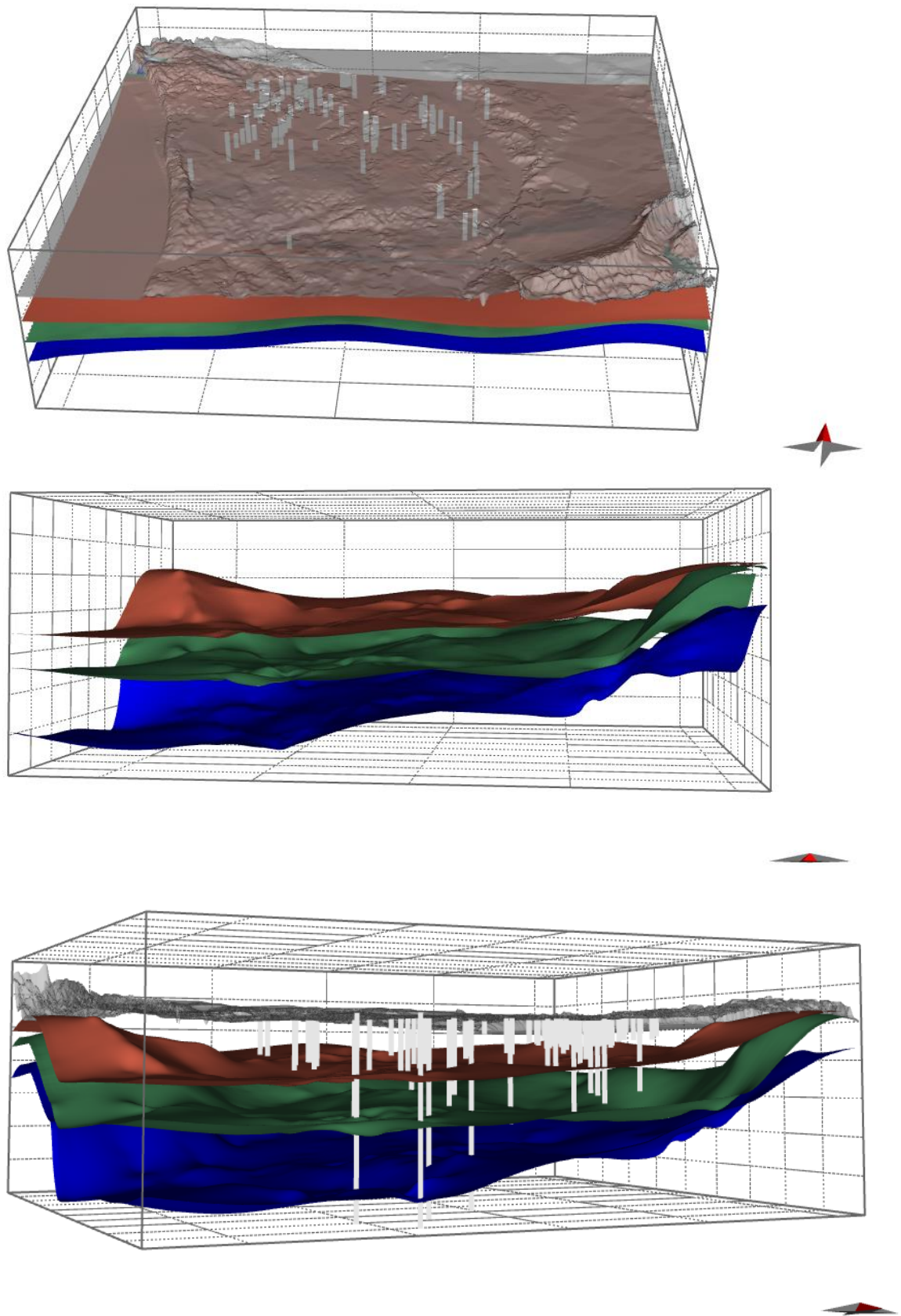


Figura 4.25 – Três representações do modelo morfológico construído para as superfícies primárias. Sobreposição das superfícies com as sondagens e poços.

A análise deste modelo que é o primário, só com a informação da sísmica, permite verificar que o modelo é coerente e coincide com um modelo conceptual em forma de bacia. Para além disso, são identificáveis algumas características morfológicas já previstas anteriormente, como por exemplo, a existência de um sinclinal (Sinclinal de Albufeira) na região.

No capítulo seguinte são discutidos os resultados de todas as etapas realizadas anteriormente.

## 4.8 Discussão dos Resultados

A análise estatística dos dados de partida confirmou o expectável relativamente à tendência nos valores mínimos, máximos e médias dos 3 horizontes estudados, ou seja, há um aumento da profundidade quando se comparam os parâmetros do horizonte mais superficial (Z1), com os dos horizontes subjacentes (Z2 e Z3). Mais uma vez, importa referir as discrepâncias entre as médias nos dois tipos de dados (*hard* e *soft*), nomeadamente no horizonte A que contém a maior parte dos dados. Observando-se a distribuição espacial das sondagens e dos poços profundos é possível verificar que a maioria das sondagens se localiza fora da zona menos profunda da estrutura. Este aspeto, aliado à subjetividade inerente à interpretação da sísmica, justifica a discrepância entre a média dos dois tipos de dados.

Devido à limitada quantidade de informação proveniente dos dados principais nas superfícies Z2 e Z3, decidiu-se aplicar a segunda fase de condicionamento apenas à superfície Z1. Da totalidade dos dados principais, 93,478% dizem respeito à interface Pliocénico – Miocénico Superior (Z1), 1,087% à interface Miocénico Superior – Miocénico Médio (Z2) e 5,435% à interface Miocénico Inferior – Paleogénico (Z3).

Para a construção do modelo morfológico da área de estudo foi necessário ter em consideração as características muito particulares dos dados de partida, nomeadamente ao nível dos dados secundários (sísmica), que se apresentavam segundo alinhamentos resultantes da digitalização de linhas sísmicas e com uma distribuição espacial muito heterogénea. Estas propriedades exigiram algumas adaptações aos procedimentos, referidas em capítulos anteriores, de que se destacam:

- Geração das primeiras superfícies só condicionais à sísmica, recorrendo à simulação e não à estimação por krigagem, tal como poderia ser considerado em casos mais gerais. Esta alternativa foi implementada porque a krigagem gerava artefactos acentuados, nomeadamente nas zonas extrapoladas e perto das extremidades das linhas sísmicas.
- Subdivisão da área de estudo em regiões, de forma a melhor condicionar as simulações à não estacionariedade dos dados à média e com isso a gerar superfícies com a forma

conceptualmente aceite de bacia. Esta divisão foi implementada também devido à distribuição heterogénea dos dados. Para os horizontes Z2 e Z3 foram definidas três regiões; já para o horizonte Z1 foram definidas duas regiões, dado evidenciar menos dados (fator que também exigiu a co-simulação deste horizonte com as realizações de Z2).

O procedimento de simulação condicional aos desníveis locais (ângulo e inclinação locais) tem potencialidades para ser utilizado em casos de estudo com menos informação disponível e onde apenas exista um esboço conceptual da morfologia.

As imagens resultantes do condicionamento aos coeficientes de correlação locais permitem verificar as áreas onde a correlação entre a sísmica e os dados dos poços e sondagens são maiores e menores. Na prática, esta correlação traduz o grau de coerência entre estas duas fontes de informação. A zona onde o coeficiente de correlação é maior coincide com a localização dos poços profundos, dado a utilização destes na calibração durante a campanha da prospeção sísmica profunda. Tal como foi referido em 4.6.1, observou-se uma zona onde o coeficiente de correlação é elevado, mas negativo, o que releva que existem contradições na forma geométrica da estrutura, como se se tratasse de um espelho. Nas zonas periféricas os valores baixam gradualmente, sendo esta descida mais acentuada para sudoeste onde existem poços com baixa correlação.

Quanto aos resultados obtidos nas simulações finais condicionadas às superfícies primárias e aos dados de partida, é possível concluir os seguintes aspetos:

- Os valores da variância são, tal como seria de esperar, menores nas zonas onde existem dados e maiores nas zonas mais afastadas. Embora não seja claramente visível, os valores da variância também têm em conta os dados da sísmica.
- São cumpridos os três itens de verificação na simulação estocástica: coincidência entre valores experimentais e simulados; respeito pelos estatísticos dos dados nas imagens simuladas; reprodução dos modelos teóricos ajustados nas simulações. As imagens obtidas são, deste modo, consideradas válidas.



## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A conciliação e integração ponderada de diferentes tipos de dados, de diferentes fontes e escalas, representa um grande desafio na construção de um modelo geológico tridimensional. Nesse sentido, neste trabalho experimental pretendeu-se contribuir com o desenvolvimento de uma metodologia que permita a geração de superfícies representativas de transições entre formações geológicas de natureza sedimentar (horizontes), tendo em consideração diferentes tipos de dados, nomeadamente, perfis sísmicos de reflexão, poços profundos e sondagens.

A metodologia desenvolvida e aplicada revelou-se adequada na integração dos dados de partida utilizados e permitiu a obtenção de resultados satisfatórios. Contudo, é necessário ter em conta que foram assumidas simplificações, umas das quais é, por exemplo, a digitalização da sísmica. Para além disso, os dados da sísmica utilizados resultam de uma transformação de tempo para espaço, transformação essa que tem também uma incerteza associada.

Os resultados obtidos têm o potencial de ser utilizados em vários domínios das geociências, como sejam a identificação de zonas com potencial geotérmico, geologia estrutural, ambiental, hidrogeologia, armazenamento de CO<sub>2</sub>, entre outros.

O desenvolvimento deste trabalho e a análise dos resultados sugerem que se façam os seguintes estudos experimentais adicionais em trabalhos futuros:

- Revisitar o processamento e a calibração da sísmica, nomeadamente refazer a transformação dos perfis de tempo para espaço considerando os perfis em conjunto de forma a evitar discrepâncias entre perfis quando se faz uma representação conjunta;
- Integração e conciliação de informação pericial, como, por exemplo, geração de um modelo conceptual ou esboço da bacia a partir da sísmica e dos dados de poço;
- Testar a simulação condicional a desníveis provenientes de um modelo conceptual noutros contextos;



## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida, C., Mendonça, J. J. L., Jesus, M. R., & Gomes, A. J. (2000). Sistemas Aquíferos de Portugal Continental. Sistema aquífero: Bacia do Tejo-Sado/Margem Esquerda (T3). Instituto da Água, Lisboa.

Almeida, J. (1999). Use of geostatistical models to improve reservoir description and flow simulation in heterogeneous oil fields, Tese de Doutoramento, IST-UTL, 163p.

Almeida, J.A. (2010). Stochastic simulation methods for characterization of lithoclasses in carbonate reservoirs. *Earth–Science Reviews* 101, 250-270.

Alves, F. (2012). Inversão Estocástica de Sísmica 3D Post-Stack e Dados de Poço para a Caracterização de Reservatórios e Modelação de Propriedades. Faculdade de Ciência e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa. 101 p.

Antunes, M.T.; Legoinha, P.; Cunha, P. P. & Pais, J. (2000). High resolution stratigraphy and miocene facies correlation in Lisbon and Setúbal Peninsula (Lower Tagus basin, Portugal). *Ciências da Terra (UNL)*, 14 pp. 183-190

Antunes, M.T.; Legoinha, P.; Cunha, P. P.; Pais, J. & Nascimento, A. (1995). Evolução da Bacia do Baixo Tejo (Lisboa e Península de Setúbal, Portugal) no Burgaliano e Langhiano. Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico, Porto, pp 19 -23.

Antunes, M.T; Calvo, J. P.; Hoyos, M.; Morales, J.; Ordoñez, S.; Pais, J. & Sese, C. (1987). Ensayo de correlacion entre el Neogeno de las areas de Madrid y Lisboa (cuencas alta e baja del rio Tejo). *Com. Serv. Geol. Portugal, Lisboa*, 73 (1/2), pp. 85 - 102

Antunes, M. T. & Pais, J. (1984). Climate during Miocene in Portugal and its evolution. *Paléob. Contin., Montpellier*, XIV (2): 75-89.

Antunes, M.T., Ginsburg, L., Torquato, J.R. & Ubaldo, M. (1973)- Âge couches à mammifères de la basse vallée du Tage (Portugal) et de la Loire moyenne (France). *CR. Acad. Sc. Paris, sér. D*, 277: 2313-2316.

Amaral, H. I. F. Gama, A. C., Gonçalves, C., Fernandes, J., Batista, M. J., & Abreu, M. (2016). Long-term TNT and DNT contamination: 1-D modeling of natural attenuation in the vadose zone: case study, Portugal. *Environmental Earth Sciences*, 75(1), 1–15.

Azevedo, M. T. (1983). Sinclinal de Albufeira - Evolução Pós-miocénica e reconstituição paleogeográfica. Dissertação de Doutoramento, Ed. C.E.G da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 321 p.

- Barreiras, N. M. (2009). Contribuição para a caracterização e modelação hidrogeológica do concelho do Seixal. Faculdade de Ciências e Tecnologia a Universidade Nova de Lisboa. 184 p.
- Brito, S. (2009). História da terra durante os últimos 65 ma: exemplos portugueses com interesse para o ensino. Tese de Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 259 p.
- Cabral, J. (1995). Neotectónica em Portugal Continental. Memórias do Instituto Geológico e Mineiro, Lisboa, 31, 265 p.
- Caers, J. (2000). Direct sequential indicator simulation. 6th International Geostatistics Congress, 2000 Cape Town.
- Carvalho, J. (2003). Sísmica de alta resolução aplicada à prospecção, geotecnia e risco sísmico. Tese de doutoramento, Universidade de Lisboa, 250 pp.
- Charifo, G. (2012). Modelação de depósitos minerais amostrados por suportes irregulares. O caso de estudo do depósito de Farim-Saliquinhé na Guiné-Bissau. Tese de Doutoramento em Engenharia Geológica, Universidade Nova de Lisboa. Lisboa. 135 p.
- Choffat, P. (1950). Géologie du Cénozoïque du Portugal. Comun. Serviços Geológicos de Portugal. Lisboa. Suplemento ao Torno XXX. 182 p.
- Cotter, J. C. B. (1956). O Miocénico marinho de Lisboa. Com. Serviços Geológicos de Portugal. Lisboa. Suplemento ao T. XXXVI, 174 p.
- Curtis, M.L. (1999). Structural and kinematic evolution of a Miocene to Recent sinistral restraining bend: the Montejunto massif, Portugal. *Journal of Structural Geology*, 21, 39-54.
- Dollfus, G. F.; Cotter, J. C. B. & Gomes, J. P. (1903-04). Mollusques tertiaires du Portugal. Planches de Cephalopodes. Gastéropodes et Pélecypodes laissées par Pereira da Costa, accompagnées d'une explication sommaire et d'une esquisse géologique. Mem. Com. Serv. Geol. Portugal. Lisboa. 120 p.
- Ferreira, A. M., & Almeida, J. A. (2010). A modelação geológica 3D como ferramenta de apoio na prospecção de pegmatitos litiníferos, CICEGe, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. 15–18 p.
- Goovaerts, P. (1997). *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*, Oxford University Press, 483 p.
- Hagedoorn, J. G. (1959). The plus-minus method of interpreting seismic refraction sections, *Geophysical Prospecting*, 158 – 182.

- Isaaks, E. H. & Srivastava, R. M. (1989). *An Introduction to Applied Geostatistics*. Oxford University Press, New York, 592 p.3
- Carvalho, J. (2003). *Sísmica de alta resolução aplicada à prospecção, geotecnia e risco sísmico*. Tese de Doutoramento, Universidade de Lisboa, 250 p.
- Journel, A.G. & Alabert, F.G. (1989). Non Gaussian data expansion in the earth sciences. *Terra Nova* 1, 123-134.
- Journel, A. G. (1994). Modeling uncertainty: some conceptual thoughts. *Geostatistics for the Next Century*. Ed. Dimitrakopoulos, Kluwer: Academic Pub
- Legoinha, P., Lúcia, S., Pais, J., Ferreira, J., Amado, A. R. & Ribeiro, I. (2002). Miocene lithological, foraminiferal and palynological data from the Belverde borehole (Portugal). XVIII Jornadas de Paleontología. DCT-FCT/UNL. Lisboa. 8 p.
- Lomholt, S., Rasmussen, E.S., Andersen, C., Vejbaek, O.V., Madsen, L. & Steinhardt, H. (1995) - Seismic Interpretation and Mapping of the Lusitanian Basin, Portugal, Contribution to the MILUPOBAS project, EC Contract n°. JOU2-CT94-0348, DGU Service report n°. 65, *Serviços Geológicos da Dinamarca*, 70 p.
- Kearey P., Brooks, M. e Hill, I. (2002). *An Introduction to Geophysical Exploration*. Blackwell Publishing, 262 p.
- Kullberg, J. C, Terrinha, P., Pais, P, Reis & Legoinha (2006) – Arrábida e Sintra: dois exemplos de tectónica pós-rifting da Bacia Lusitaniana. In *Geologia de Portugal no contexto da Ibéria* (R. Dias, A. Araújo, P. Terrinha & J. C. Kullberg, Eds.). Univ. Évora, pp. 369- 396.
- Kullberg, J. C. (2000). *Evolução tectónica Mesozóica da Bacia Lusitaniana*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, I Volume, 361 p.
- Kullberg, M.C., Kullberg, J.C. & Terrinha, P. (2000). Tectónica da Cadeia da Arrábida. In: *Tectónica das regiões de Sintra e Arrábida*. Mem. Geociência, Museu Nacional de História Natural., Universidade de Lisboa, II Volume, 3584 p.
- Matias, F. (2010). *Modelação 3D de um Subsector das Mineralizações Auríferas de Casas Novas, Montemor-o-Novo*. Tese de Mestrado em Engenharia Geológica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 121 p.
- Mitchum, R. M., Jr., Vail, P. R. & Thompson, S.(1977). Seismic stratigraphy and global changes of sea-level. The depositional sequence as a basic unit for stratigraphic analysis. In: Payton, C. E. (ed.), *Seismic Stratigraphy – Applications to Hydrocarbon Exploration*. American Association of Petroleum Geologists Memoir 26, 53–62.

- Nunes, R. F. (2008). Paralelização dos Algoritmos Simulação Sequencial Gaussiana, Indicatriz e Directa. Tese de Mestrado em Engenharia Geológica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- Nunes, R. & Almeida, J. A. (2010). Parallelization of sequential Gaussian, indicator and direct simulation algorithms. *Computers and Geosciences*, 36, 1042-1052.
- Pais, J. (1998) – Evolução da parte terminal do setor distal da Bacia do Baixo Tejo durante o Miocénico, Departamento de Ciências da Terra, UNL, Lisboa.
- Pais, J., Lopes, C. S., Legoinha, P., Ramalho, E., Ferreira, J., Ribeiro, I., Amado, A. R., Sousa, L., Torres, L., Baptista, R., & Pena dos Reis, R. (2003) - Sondagem de Belverde (Bacia do Baixo Tejo, Península de Setúbal, Portugal), Departamento de Ciências da Terra, UNL, Lisboa.
- Pais, J. (2004). The Neogene of the Lower Tagus Basin (Portugal). *Revista Espanhola de Paleontologia*, 19 (2): 229-243.
- Pais, J., Moniz, C., Cabral, J., Cardoso, J., Legoinha, P., & Machado, S. (2006). - Notícia Explicativa da Folha 34-D Lisboa da Carta Geológica de Portugal, na escala 1/50 000. Departamento de Geologia, INETI - Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação., Lisboa.
- Pais, J., Cunha, P.P. & Legoinha, P. (2010). Litostratigrafia do Cenozóico de Portugal. In Neiva, J.M.C., Ribeiro, A., Victor, L. M., Noronha, F. & Ramalho, M. (edit.) – Ciências Geológicas: Ensino e Investigação. Vol. I: 365-37.
- Pais, J., Cunha, P.P., Pereira, D., Legoinha, P., Dias, R., Moura, D., Silveira, A.B., Kullberg, J.C., González-Delgado, J.A. (2012) - The Paleogene and Neogene of Western Iberia (Portugal): A Cenozoic Record in the European Atlantic Domain. Springer Berlin Heidelberg, 158 p.
- Pais, J., Cunha, P., Legoinha, P., Dias, R., Pereira, D., Ramos, A., (2013) - Paleogénico e Neogénico das Bacias do Douro (sector ocidental), Mondego, Baixo Tejo e Alvalade. In: R. Dias, A. Araújo, P. Terrinha, J.C. Kullberg, (Eds) - Geologia de Portugal no contexto da Ibéria. Escolar Editora, Lisboa, 1100 p.
- Palmer, D., (1980). The generalized reciprocal method seismic refraction interpretation, Soc. Expl. Geophy, Tulsa.
- Pereira, H.G., (1979). Introdução às variáveis regionalizadas. Técnica, Número 451/452, Volume XL, Janeiro/Fevereiro/Março, Lisboa. pp. 89-96
- Pinto, C. D (2011). Identificação de Estruturas com Potencial Sismogénico na Região do Vale Inferior do Tejo. Tese de Mestrado. Universidade de Évora. 128 p.

- Quental, P. (2011). Modelos Geológicos Estocásticos 3D e Interface para Modelos de Simulação de Fluxo. Aplicação à Área Subjacente da Antiga Fábrica da SPEL; Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. 73 p.
- Rebelo, A. F. (2010). Paleontologia de algas calcárias. Tese de mestrado. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. 86 p
- Reis, R. B. P. & Cunha, P. (1989). Comparasion de los rellenos terciarios en dos regiones del borde occidental del Macizo Hesperico (Portugal Central). Paleogeografia de la Meseta norte durante el Terciário. Stv. Geol. Salman. vol. esp. 5, pp. 253 - 272
- Reynolds, J. M. (1997). An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. Wiley, 796 p.
- Ribeiro, A., Antunes, M. T., Ferreira, M. P., Rocha, R. B., Soares, A. F., Zbyszewsky, G., Moitinho de Almeida, F., Carvalho, D., & Monteiro, J. H. (1979). Introduction à la Géologie Générale du Portugal. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.
- Ribeiro, A., Kullberg, M.C., Kullberg, J.C., Manuppella, G. & Phipps, S.(1990). A review of Alpine tectonics in Portugal: Foreland dataachment in basement and cover rocks. Tectonophysics, 184, pp - 357-366
- Sanches, A (2015). Integração de dados de sondagens e desmontes para a construção de um modelo geológico de um depósito mineral filoniano. Tese de Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 108 p.
- Simões, M. (1998). Contribuição para o Conhecimento Hidrogeológico do Cenozóico na Bacia, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, Monte de Caparica, II Volume.
- Soares, A. (2001). Direct Sequential Simulation and Cosimulation. Mathematical Geology. 33(8), 911-926
- Soares, A. (2006). Geoestatística para as Ciências da Terra e do Ambiente, IST Press. Lisboa, 214p.
- Walker, D., J., (1983). Final Report. Seismic Interpretation. Lusitanian basin, Portugal, Report nº 22391 for Petrogal, Lisboa (Portugal).
- Westerhausen H (1956). Report on Reflection and Refraction Seismic Investigations carried out in South Tejo Basin for Companhia dos Petróleos de Portugal and Mobil Exploration Company Lisbon (Portugal).
- Ylmaz, Ö (1987). Seismic Data Processing, Investigations in Geophysics, 2, S. M. Doherty (Ed.), Soc. Explor. Geophys., 526 p.

Zbyszewski, G. (1963). Carta Geológica dos arredores de Lisboa a escala 1/50 000, Notícia explicativa da folha 4 (Lisboa). Serviços Geológicos de Portugal, Direção Geral de Minas e Serviços Geológicos, Lisboa. 93 p.