

## O *GRABEN* DE PALESTINA: CONTRIBUIÇÃO À ESTRATIGRAFIA E ESTRUTURA DO ESTÁGIO RIFTE NA BACIA DO ARARIPE, NORDESTE DO BRASIL

Fátima Maria Canelas Cardoso

Orientador: Dr. Emanuel Ferraz Jardim de Sá (UFRN)  
107 p. – Dissertação (Mestrado) – Defesa 23.02.2010

**RESUMO.** O *Graben* de Palestina compõe o conjunto de depocentros com orientação NESW a ENE, da Bacia do Araripe. Esta bacia foi implantada nos terrenos pré-cambrianos da Zona Transversal, da Província Borborema, imediatamente a sul do Lineamento Patos. A mesma faz parte da província das Bacias Interiores do Nordeste, relacionadas à fragmentação do supercontinente Gondwana e abertura do Atlântico Sul. O *Graben* de Palestina apresenta orientação NE-SW e uma geometria assimétrica, condicionada pela orientação NW dos esforços de estiramento crustal eocretáceo. As suas bordas apresentam comportamento distinto. A borda SE constitui uma margem flexural, caracterizada pelo contato em não conformidade da Formação Mauriti (de idade eopaleozoica, unidade basal da bacia) com o embasamento cristalino, sendo, todavia, afetado por falhas de rejeito moderado. Já a borda NW é contínua e retilínea, marcada por falhas com rejeito significativo, que controlam o basculamento das camadas para NW. Nesse sentido, a Formação Mauriti é capeada pelas formações Brejo Santo, Missão Velha (que também ocorrem no *Horst* de Brejo Santo-Mauriti, a NW da borda falhada) e Abaiara, esta última restrita ao *graben*. A interpretação dos dados gravimétricos e de uma linha sísmica indica que a falha principal tem rejeito variável, definindo duas porções mais profundas no *graben*, nas quais a coluna sedimentar pode atingir espessuras de até 2 km. Em relação à estratigrafia na Bacia do Araripe, na área de estudo, o pacote sedimentar agrupa três tectonossequências distintas. A Tectonossequência da Sinéclise Paleozoica é composta pela Formação Mauriti, depositada por um sistema fluvial entrelaçado. Segue-se a Tectonossequência Jurássica, cujo contexto tectônico ainda discutível (início do rifte neocomiano ou sinéclise pré-rifte ?), sendo representada pela Formação Brejo Santo, originada numa planície de inundação distal de canais fluviais efêmeros. A Tectonossequência Rifte, de idade neocomiana, inclui a Formação Missão Velha, cuja seção inferior representa um sistema fluvial entrelaçado a meandrante grosso, sendo interpretada como o Trato de Sistemas Tectônico de Início do Rifte. A seção superior da Formação Missão Velha é separada da precedente por uma importante discordância. Este intervalo inferior foi originado por um sistema fluvial entrelaçado, sendo capeado pela Formação Abaiara, originada por um sistema deltaico alimentado por um sistema fluvial meandrante. Ambos correspondem ao Trato de Sistemas Tectônico de Clímax do Rifte. Na área são distinguidas falhas NE normais a oblíquas, associadas a falhas NW que constituem estruturas de transferência, e falhas com direções variando de ENE a EW, estas com predomínio de rejeitos direcionais. Os sets NE e E-W exibem evidente paralelismo com estruturas do embasamento (em especial, zonas de cisalhamento), que devem ter sido reativadas quando do rifteamento eocretáceo. As falhas com orientação próxima de E-W apresentam componente direcional dominante, sinistral, caracteristicamente presente nos segmentos reativados do Lineamento Patos e estruturas satélite. Componentes direcionais dextrais, em geral, subordinados, mas localmente também expressivos, ocorrem nas falhas cujas direções variam entre NNW a NE. No contexto descrito para o *Graben* de Palestina, os modelos clássicos em distensão ortogonal ou *pull-apart* merecem ressalvas quando de sua aplicação. O *Graben* de Palestina não está limitado, nas suas extremidades, por zonas transcorrentes E-W (como deveria ser o caso no modelo *pull-apart*), o que sugere para o mesmo um modelo próximo ao estilo clássico de abertura ortogonal, ao passo que outros depocentros vizinhos, de mesma idade (como o Semi-*graben* de Abaiara-Jenipapeiro), exibem um estilo transtraccional. Tais diferenças são controladas pela trama estrutural subjacente, do embasamento.

**ABSTRACT.** The Palestina Graben is one of the NE-trending asymmetric grabens of the Araripe Basin. This basin rests on the precambrian terrains of the Transversal Zone, Borborema Province, immediately to the south of the Patos Lineament. It is part of the Interior Basins province of Northeastern Brazil, being related to the fragmentation of the Gondwana supercontinent and the opening of the South Atlantic Ocean. The Palestina Graben trends NE-SW and presents an asymmetric geometry, controlled by the NW extensional eocretaceous strain. The graben borders display distinct geometries. The SE border is a flexural margin, characterized by the non conformity of the eopaleozoic Mauriti Formation (the oldest unit of the basin) overlying the crystalline basement, but also affected by normal faults with small displacements. On the opposite, the NW border is continuous and rectilinear, being marked by normal faults with major displacements that control the general tilting of the layers to the NW. In this sense, the Mauriti Formation is overlain by the Brejo Santo, Missão Velha (which also occurs in the Brejo Santo-Mauriti horst, to the NW of the fault border) and Abaiara formations, the latter restricted to the graben. The interpretation of available gravity data and a seismic line indicates that the main fault has a variable dip slip component, defining two deeper portions within the graben, in which the sedimentary column can reach thicknesses of up to 2 km. Regarding to the stratigraphy of Araripe Basin in the study area, the sedimentary package includes three distinct tectonosequences. The Paleozoic Synclisis Tectonosequence is composed by the Mauriti Formation, deposited by a braided fluvial system. The Jurassic Tectonosequence, whose tectonic setting is still debatable (initial stage of the Neocomian rift, or a pre-rift synclisis ?), is represented by the Brejo Santo Formation, originated in a distal floodplain related to ephemeral drainages. The Rift Tectonosequence, of Neocomian age, includes the Missão Velha Formation, whose lower section is related to a braided to meandering fluvial system, outlining the Rift Initiation Tectonic Systems Tract. The upper section of the Missão Velha Formation is separated from the latter by a major unconformity. This interval was originated by a braided fluvial system, overlain by the Abaiara Formation, a deltaic system fed by a meandering fluvial system. Both sections correspond to the Rift Climax Tectonic Systems Tract. In the area, NE-trending normal to oblique faults are associated with NW transfer faults, while ENE to E-W faults display dominant strike slip kinematics. Both NE and E-W fault sets exhibit clear heritage from the basement structures (in particular, shear zones), which must have been reactivated during the eocretaceous rifting. Faults with EW trends display a dominant sinistral shear sense, commonly found along reactivated segments of the Patos Lineament and satellite structures. Usually subordinate, dextral directional movements, occur in faults striking NNW to NE. Within this framework bearing to the Palestina Graben, classical models with orthogonal extension or pull-apart style deserve some caution in their application. The Palestina Graben is not limited, in its extremities, by E-W transcurrent zones (as it should be in the case of the pull-apart geometry), suggesting a model close to the classic style of orthogonal opening. At the same time, others, adjacent depocenters (like the Abaiara-Jenipapeiro semi-graben) display a transtensional style. The control by the basement structures explains such differences.

## PROBLEMAS DIRETO E INVERSO DO mCSEM 3D

**Frayzer Lima de Almeida**

Orientador: Dr. Luiz Rijo (UFPA)

135 p. – Tese (Doutorado) – Defesa 01.03.2010

**RESUMO.** Desenvolvemos algoritmos de inversão geofísica de dados de mCSEM 1D e 3D e de modelagem direta de mCSEM 3D. Na inversão geofísica de dados de mCSEM 1D, propomos funções objetivo normalizadas, que são diferentes das funções objetivo usuais descritas na literatura de inversão geofísica. Tais funções normalizadas propiciaram melhores aproximações nos resultados em comparação com os resultados propiciados pelas funções objetivo usuais da literatura geofísica. Para modelagem direta do mCSEM 3D foram usados, no domínio da frequência, os potenciais eletromagnéticos (A, F) e admitiu-se a continuidade da divergência do campo elétrico primário, para assim ser aplicado sobre estas equações o método dos elementos finitos tridimensionais a fim de se obter a solução numérica do mCSEM 3D. Desta forma, os resultados devidos à metodologia acima proposta e descrita mostraram aproximações coerentes no sentido qualitativo e quantitativo da solução do mCSEM 3D, quando comparados com as soluções numéricas da literatura do mCSEM 1D e 2D, diferentemente dos resultados observados (soluções numéricas) na literatura do mCSEM 3D, que apresentam ausência de coerência qualitativa e quantitativa em relação às soluções da literatura do mCSEM 1D e 2D e das soluções do mCSEM 3D aqui propostas. Os resultados obtidos com essa metodologia, de modelagem direta do mCSEM 3D através do método dos elementos finitos tridimensionais, podem ser considerados satisfatórios, pois a metodologia, ao ser aplicada a dados de MT 3D disponíveis na literatura, levou à convergência das soluções. Finalmente para a inversão geofísica de dados de mCSEM 3D, usou-se tanto a metodologia desenvolvida na inversão de dados do mCSEM 1D, ou seja, a função objetivo normalizada a ser minimizada segundo o método de Marquardt, quanto a metodologia desenvolvida para modelagem direta do mCSEM 3D, isto é, a resolução pelo método dos elementos finitos tridimensionais das equações de Maxwell no domínio da frequência, expressas segundo os potenciais eletromagnéticos (A, F). O código computacional desenvolvido a partir das metodologias abordadas (inversão de dados mCSEM 1D e modelagem direta de mCSEM 3D) se propõe a realizar a inversão geofísica de dados de mCSEM 3D. Os resultados obtidos com este código computacional mostraram-se satisfatórios na definição do modelo geoeletrico que representa a ocorrência de hidrocarbonetos em ambiente marinho de águas profundas.

**ABSTRACT.** We have developed specific researches on geophysical inversion of 1D and 3D mCSEM data and on direct modeling of 3D mCSEM data. Regarding the geophysical inversion of 1D mCSEM, we have used normalized objective functions that provided better approximations of the results when compared with the results provided by the usual objective functions commonly known in the literature. In the 3D mCSEM modeling case, we considered the continuity of the primary electric field divergence of the numerical solutions via 3D finite elements of the Maxwell's equations in the frequency domain, expressed according the electromagnetic potentials (A, F). The results have shown quantitative and qualitative coherent approximations of the 3D mCSEM solutions when compared with the solutions of the experiments proposed by the 1D and 2D mCSEM literature. However they differ from the results obtained in the literature considering the 3D mCSEM, in which there is a lack of qualitative and quantitative coherence when compared to the experiments of the 2D mCSEM literature and the 3D mCSEM experiments proposed here. Satisfactory results obtained so far support the 3D mCSEM modeling approach, since the Maxwell's equations in the frequency domain, expressed as electromagnetic potentials (A, F), were also applied to the 3D magnetotellurics case and the results satisfactorily converged towards known results of the 3D magnetotellurics literature. Finally, for the geophysical inversion of 3D mCSEM data, we have united parts of the development of the 1D mCSEM inversion (normalized objective function minimized by the Marquardt's method) with the 3D mCSEM modeling using electromagnetic potentials (A, F) and the numerical solution using 3D finite elements, thus giving rise to a general computing code that proposes to realize a general geophysical inversion of 3D mCSEM data. The inversion results derived by the present code have shown themselves coherent when compared with the geoelectrical model proposed to investigate hydrocarbons in deep water environments.

## O MÉTODO GPR APLICADO À LOCALIZAÇÃO DE TUBULAÇÕES UTILIZADAS NO ABASTECIMENTO DE ÁGUA NA REGIÃO URBANA DO MUNICÍPIO DE BELÉM – PARÁ

**Gerson Pompeu Pinto**

Orientador: Dr. Marcos Welby Correa Silva (UFPA)  
96 p. – Dissertação (Mestrado) – Defesa 09.03.2010

**RESUMO.** Este trabalho consistiu em avaliar a viabilidade do método GPR (*Ground Penetrating Radar*) na localização de tubulações de aço, cimento-amianto, PVC e ferro fundido, de diversos diâmetros, utilizadas pela Companhia de Saneamento do Pará (COSANPA), no abastecimento de água à população da região urbana do município de Belém-Pará. Para o alcance deste objetivo foram realizados 14 perfis em seis locais, distintos da área urbana de Belém, com o intuito de identificar 13 alvos, utilizando-se antenas de 200 MHz e 400 MHz, geralmente usadas neste tipo de levantamento. Os radargramas obtidos com o GPR permitiram identificar quase todos os alvos pesquisados. Apenas 3 dos 13 alvos, não foram plenamente identificados, ficando de fora, apenas os alvos de PVC, de pequena bitola (50 mm e 75 mm). Após o estudo concluímos que o método GPR é muito eficaz neste tipo de aplicação e que sua utilização tem grande valia na localização das redes de abastecimento de água. O que deve facilitar enormemente as obras de expansão da rede, assim como a sua manutenção.

**ABSTRACT.** This work was carried out to evaluate the feasibility of the method GPR (Ground Penetrating Radar) method to locate steel, cement-amianthus, PVC and cast iron pipes of several diameters, used by the Companhia de Saneamento do Pará (COSANPA) for water supply to the population of the urban area of Belém-Pará. To achieve this goal 14 profiles were performed at six distinct sites of Belém's urban area, in order to identify 13 targets, using the 200 MHz and 400 MHz antennas, commonly used in this type of survey. The radargrams obtained with GPR allowed identifying almost all surveyed targets. Only 3 of the 13 targets were not fully identified, leaving out only the targets of PVC of small gauge (50 mm and 75 mm). After the study, we concluded that the GPR method is very effective in this type of application and its use has great value in the location of the water supply network, what should greatly facilitate the work of expanding the network, as well as its maintenance.

## ESTUDO DE DESCONTINUIDADES CRUSTAIS NA PROVÍNCIA BORBOREMA USANDO A FUNÇÃO DO RECEPTOR

**Cesar Garcia Pavão**

Orientador: Dr. George Sand Leão Araújo de França (UnB)  
124 p. – Dissertação (Mestrado) – Defesa 19.03.2010

**RESUMO.** As estimativas das espessuras da crosta, da crosta superior e da razão  $V_p/V_s$  são essenciais para o detalhamento de estruturas e feições geológicas, além de corroborarem para o entendimento da evolução tectônica regional. O estudo da crosta usando Função do Receptor é realizado com a onda P de um telessismo que atinge uma interface, sob a estação, com um ângulo próximo à vertical. Através da deconvolução da componente horizontal pela vertical, obtém-se a Função do Receptor. O sismograma sintético da Função do Receptor possui um pico maior referente à onda P direta, seguido por picos menores da onda  $P_{sc}$ , onda P convertida em S no limite crosta superior-inferior,  $P_s$ , onda P convertida em S na descontinuidade Moho e reflexões múltiplas. Para o cálculo das estimativas de espessura crustal e razões  $V_p/V_s$ , utilizamos o procedimento HK-Stacking. As melhores estimativas são encontradas quando as três fases P,  $P_s$  e primeira múltipla, são empilhadas coerentemente. Para espessura crustal superior, utilizamos a correção *Normal Moveout* para fase  $P_{sc}$ , simulando uma incidência vertical. Analisamos um total de 7 estações sobre a Província Borborema, nordeste do Brasil. Os resultados mostram a existência do limite crosta superior-inferior em todos os sinais analisados. As estimativas de espessura, tanto para crosta como para crosta superior, mostraram duas regiões de espessamento. A primeira na região de Sobral/CE, registro da colisão da Província Borborema com o Cráton-Oeste-Africano. A segunda região de espessamento é no Planalto da Borborema, devido ao alto topográfico ali existente. Na região do *Trend* Cariris-Potiguar, localizada entre as duas regiões de espessamento, ocorre um afinamento para as duas interfaces que é coerente com os eventos de rifting que ocorreram na região.

**ABSTRACT.** The thickness estimates of the crust, the upper crust and the  $V_p/V_s$  ratio are essential to detail the structures and geologic features, besides they corroborate for the regional tectonic evolution understanding. The crust study using the Receiver Function is performed with teleseismic P-wave that reaches the interface, under the station, with an almost vertical angle. The Receiver Function is obtained through the deconvolution of the horizontal component from the vertical one. The synthetic seismogram of the Receiver function has a higher peak of direct P-waves, followed by minor peaks of  $P_{sc}$  waves, where P converted into S in the upper-lower crust limit,  $P_s$ , P-wave converted into S in the Moho discontinuity and multiple reflections. We used the HK-Stacking method for the calculation of crustal thickness estimates and  $V_p/V_s$  ratio. The best estimates are found when the three phases (P,  $P_s$  and the first multiple) are correctly stacked. The Normal Moveout correction for the  $P_{sc}$  phase was used for the upper crust thickness, simulating a vertical incidence. We analyzed a total of 7 stations on the Borborema Province in the Brazilian North-east. The results show that there is an upper-lower crust limit in all the analyzed signs. The estimated thicknesses of the crust and the upper crust shown two regions of crustal thickening. The first one in the Sobral/CE region, as a register of the Borborema Province and the Craton-West-African collision. The second one, in the Borborema Plateau, due to the topography existing there. In the Trend Cariris-Potiguar region, located between two regions of crustal thickening, there is a crustal thinning for the two interfaces that is coherent with the rifting events in the region.

## MIGRAÇÃO POR EQUAÇÃO DE ONDA EM MEIOS ANISOTRÓPICOS COM CORREÇÃO DE AMPLITUDE

**Daniela Rêgo Amazonas**

Orientador: Dr. Jessé Carvalho Costa (UFPA)

85 p. – Tese (Doutorado) – Defesa 30.03.2010

**RESUMO.** Este trabalho discute dois aspectos da migração em profundidade através da continuação para baixo dos campos de onda: o tratamento de modos evanescentes e a correção da amplitude dos eventos migrados. Estes dois aspectos são discutidos em meios isotrópicos e para uma classe de meios anisotrópicos. Migrações por diferenças finitas (FD) e por diferenças finitas e Fourier (FFD) podem ser instáveis em meios com forte variação lateral de velocidade. Estes métodos utilizam aproximações de Padé reais para representar o operador que descreve a propagação de ondas descendentes. Estas abordagens não são capazes de tratar corretamente os modos evanescentes, o que pode levar a instabilidades numéricas em meios com forte variação lateral de velocidade. Uma solução possível para esse problema é utilizar aproximação de Padé complexa, que consegue melhor representar os modos evanescentes associados às reflexões pós-críticas, e neste trabalho esta aproximação é utilizada para obter algoritmos FD e híbrido FD/FFD estáveis para migração em meios transversalmente isotrópicos com eixo de simetria vertical (VTI – do inglês *Vertical Transversely Isotropic*), mesmo na presença de forte variação nas propriedades elásticas do meio. A estabilidade dos algoritmos propostos para meios VTI foi validada através da resposta ao impulso do operador de migração e pela sua aplicação na migração de dados sintéticos, em meios fortemente heterogêneos. Métodos de migração por equação de onda em meios heterogêneos não tratam corretamente a amplitude dos eventos durante a propagação. As equações de onda unidirecionais tradicionais descrevem corretamente apenas a parte cinemática da propagação do campo de onda. Assim, para uma descrição correta das amplitudes deve-se usar as equações de onda unidirecionais de amplitude verdadeira. Em meios verticalmente heterogêneos, as equações de onda unidirecionais de amplitude verdadeira podem ser resolvidas analiticamente. Em meios lateralmente heterogêneos, essas equações não possuem uma solução analítica. Mesmo soluções numéricas tendem a ser instáveis. Para melhorar a compensação de amplitude na migração, em meios com variação lateral de velocidade, é proposta uma aproximação estável para solução da equação de onda unidirecional de amplitude verdadeira. Esta nova aproximação é implementada nas migrações *split-step* e diferenças finitas e Fourier (FFD). O algoritmo *split-step* com correção de amplitude foi estendido para meios VTI. A migração pré- e pós-empilhamento de dados sintéticos, em meios isotrópicos e anisotrópicos, confirmam o melhor tratamento das amplitudes e estabilidade dos algoritmos propostos.

**ABSTRACT.** Standard real-valued finite-difference (FD) and Fourier finite-difference (FFD) migrations cannot handle evanescent waves correctly, what can lead to numerical instabilities in the presence of strong velocity variations. A possible solution to these problems is the complex Padé approximation, that avoids problems with evanescent waves by a rotation of the branch cut of the complex square root, and we apply it to the acoustic wave equation for vertical transversely isotropic (VTI) media to derive more stable FD and hybrid FD/FFD migrations. Our analysis of the dispersion relation of the new method indicates that they can provide stable migration results with less artifacts, and higher accuracy at steep dips. These conclusions are confirmed by the numerical impulse responses of the migration operator, and by the migration of synthetic data in strongly heterogeneous VTI media. Wave-equation migration in heterogeneous media, using standard one-way wave equations, can only describe correctly the kinematic of the propagation. For a correct description of amplitudes, we must use the so called true-amplitude one-way wave equations. In vertically inhomogeneous media, the resulting true-amplitude one-way wave equations can be solved analytically. In laterally inhomogeneous media, these equations are much harder to solve, and even numerical solutions tend to suffer from instabilities and other artifacts. We present an approach to circumvent these problems by implementing approximate solutions based on the one-dimensional analytic amplitude modifications. We use these approximations to modify split-step and Fourier finite-difference migrations in such a way that they take better care of migration amplitudes. Simple synthetic data examples demonstrate the recovery of true migration amplitudes. Applications to the SEG/EAGE Salt model, and to the Marmousi data, show that the method improves amplitude recovery in the migrated images. We also show that the method for amplitude correction can be applied to migration algorithm for VTI media, and the algorithm was applied to the HESS synthetic data.

## **INVESTIGAÇÕES AMBIENTAL E FORENSE COM OS MÉTODOS GEOFÍSICOS RADAR DE PENETRAÇÃO DO SOLO, POLARIZAÇÃO INDUZIDA E ELETRORRESISTIVIDADE NO CEMITÉRIO DO TAPANÃ, BELÉM/PARÁ**

**Clistenes Pamplona Catete**

Orientador: Dra. Lúcia Maria da Costa e Silva (UFPA)

89 p. – Dissertação (Mestrado) – Defesa 01.04.2010

**RESUMO.** Os cemitérios são considerados fontes potenciais de contaminação da água subterrânea. Desde que o uso da geofísica no mapeamento do nível hidrostático (NH) se tornou uma ferramenta muito importante para o monitoramento ambiental, tem sido possível verificar as áreas adequadas ou inadequadas para sepultamentos nos cemitérios. Por outro lado, o uso da geofísica na localização de cavidades subterrâneas e túneis clandestinos podem ser de utilidade para a ciência forense. Neste trabalho, foram aplicados métodos geofísicos para mapeamento do NH em um cemitério e encontrar estruturas enterradas relacionados com a ciência forense. O Radar de Penetração do Solo (GPR) foi utilizado no mapeamento do NH em todo o cemitério do Tapanã, enquanto a Polarização Induzida (IP) e a Eletrorresistividade foram aplicadas em um campo de teste construído naquele cemitério para estudos forense, ambiental e resgate. Os resultados obtidos com o GPR mostraram que a profundidade do NH no cemitério do Tapanã varia de 7 m, na parte mais alta do terreno, a 1 m, na parte mais baixa. O IP evidenciou melhor o enterramento de um corpo do que um túnel. A Eletrorresistividade foi eficaz, tanto para a localização do corpo enterrado, quanto do túnel, com uma melhor definição do túnel. Os métodos apresentaram bons resultados, mesmo com a presença da camada de intemperismo rica em argila, que normalmente ocorre na região amazônica.

**ABSTRACT.** The cemeteries are considered potential sources of underground water contamination. Since the use of geophysics in the mapping of the hydrostatic level (HL) has become a very important tool in the environmental monitoring, it makes possible to verify the adequate or inadequate areas for burials in cemeteries. In the other hand, the localization of underground clandestine hollows and tunnels, can be of utility for the Forensic Science. In this work, geophysical methods were applied for mapping the HL in a cemetery and to find buried structures related to the Forensic Science. Ground Penetrating Radar (GPR) was used in the mapping of the HL in the whole Tapanã cemetery, while the resistivity and induced polarization (IP) methods were applied on a test site built in that cemetery for forensic, environmental and rescue related geophysical studies. The results with the GPR showed that the HL depth in the Tapanã cemetery varies from 7 m, at high topographic levels, to 1 m, at low topographic levels. The IP was sensible to the presence of a body buried in a shallow hollow as the clandestine hollows are and showed only fair results for a tunnel. The resistivity was effective for both the buried body and the tunnel, with better definition of the tunnel. The methods gave good results even within the weathering layer rich in clay that normally occurs in the Amazon region.

## INVERSÃO LINEAR DE ANOMALIAS DO GEOIDE DA PROVÍNCIA BORBOREMA: VARIÇÃO COMPOSICIONAL OU PERTURBAÇÃO TÉRMICA NO MANTO?

**Carlos Alberto Moreno Chaves**

Orientador: Dra. Naomi Ussami (IAG/USP)

163 p. – Dissertação (Mestrado) – Defesa 06.04.2010

**RESUMO.** As anomalias residuais do geóide da Província Borborema (BORB), resultantes da remoção da componente de grau e ordem 10 do modelo geopotencial EGM2008 expandido até o grau e ordem 360, são positivas e com amplitude máxima de 10 metros. Após a remoção dos efeitos crustais (massas topográficas, sedimentos e topografia da Moho) as anomalias do geóide resultantes associadas às variações de densidade na crosta inferior e no manto superior tornam-se negativas, com amplitude de  $-33$  metros. Com a finalidade de modelar as anomalias do geóide negativas e estimar a distribuição de densidade causadora das anomalias, desenvolveu-se um algoritmo computacional de inversão linear 3-D que utiliza um funcional de estabilidade conhecido como "Ridge Regression". O algoritmo foi testado em três situações geológicas distintas para validar a implementação computacional e o algoritmo. No processo de inversão dos dados de anomalia do geóide, utilizou-se como modelo inicial as estimativas de máxima profundidade e extensão lateral da fonte, além de uma distribuição de densidade estimada por inversão linear utilizando a camada equivalente. Os resultados indicam que a crosta inferior e o manto superior da Província Borborema apresentam contrastes de densidade negativos (variando entre  $-20 \text{ kg.m}^{-3}$  e  $-80 \text{ kg.m}^{-3}$ ), ou seja, com densidade menor do que o manto superior adjacente (Cráton São Francisco e Bacia do Parnaíba) e manto subjacente sob a BORB. A região com distribuição de densidade predominantemente mais baixa estende-se de 17 km a 78 km. Seria esta variação de densidade de origem térmica ou composicional? A integração dos resultados deste trabalho com dados geofísicos, geoquímicos e geológicos independentes sugere que a causa principal seja térmica e reforçando, também, os resultados sismológicos de que o limite litosfera-astenosfera encontra-se, aproximadamente a 82 km de profundidade.

**ABSTRACT.** Residual geoid anomalies of the Borborema Province (BORB), after subtracting the degree and order 10 component from the EGM2008 global geopotential model expanded up to degree and order 360, are positive and with maximum amplitude of 10 meters. The removal of the crustal effects (topographic masses, sediments and Moho topography) isolates the geoid anomalies associated with the density variations in the lower crust and upper mantle, and the anomalies become negative, with amplitude of  $-33$  meters. In order to model the negative geoid anomalies and to estimate the density distribution causing the anomalies, we developed a 3-D linear inversion algorithm using a functional stability known as "Ridge Regression". The algorithm was tested in three different geological situations to validate the implementation and the computational algorithm. In the initial stage of the geoid anomaly inversion estimates of maximum depth and lateral extension together with an initial density distribution obtained using an equivalent layer linear inversion were used. The results indicate that the lower crust and upper mantle of the Province Borborema have negative density contrasts (between  $-20 \text{ kg.m}^{-3}$  e  $-80 \text{ kg.m}^{-3}$ ) relative to the surrounding mantle (São Francisco Craton and Parnaíba Basin) and BORB lower mantle. The region with lower density extends from 17 km to 78 km. Is the density variation due to thermal or compositional causes? The integration of present results with independent geophysical, geochemical and geological data suggests that the main cause of density decrease is thermal and also supports the seismological observation that the lithosphere-asthenosphere boundary is situated at about 82 km depth.



## CARACTERIZAÇÃO ISOTÓPICA DE ÁGUA DE FORMAÇÃO DE UM CAMPO DE PETRÓLEO DA BACIA DO RECÔNCAVO

**Danilo Ribeiro de Sá Teles**

Orientador: Dr. Antônio Expedito Gomes de Azevedo (UFBA)

64 p. – Dissertação (Mestrado) – Defesa 13.04.2010

**RESUMO.** Esse trabalho apresenta um estudo das características físico-químicas e isotópicas de Águas de Formação de um Campo de Petróleo, visando avaliar sua evolução, interação com as rochas reservatório e interconexão em subsuperfície. Para isto, analisou-se a composição isotópica do hidrogênio e do oxigênio da Água de Formação de determinados níveis de extração deste campo, utilizando um total de 13 amostras em 10 poços diferentes, situados em profundidade que variaram de 450 metros a 1800 metros, drenando 4 níveis diferentes de produção. Devido à alta concentração de sais totais dissolvidos foi desenvolvido e aperfeiçoado um método de tratamento de amostras hipersalinas, de forma que o excesso de solutos nas águas amostradas fosse extraído possibilitando a análise isotópica das mesmas. Os resultados obtidos para a condutividade elétrica variaram entre 99,5 mS/cm e 168,7 mS/cm correspondentes a 79600 mg/L e 135000 mg/L para concentração de sais dissolvidos. A medida do pH, que variou entre 5,9 e 7,5 evidencia um caráter neutro e ligeiramente ácido das amostras. Notou-se também, uma evolução da composição isotópica das amostras em função da profundidade, observando-se um enriquecimento em isótopos pesados de hidrogênio e oxigênio em direção aos níveis mais profundos, possivelmente causado pela interação água-rocha, potencialmente pelo acréscimo de temperatura característico nos níveis mais profundos, e pelo longo período de residência dessas águas. A profundidade de 1450 a 1520 metros, nível de produção de 7 dos 10 poços amostrados, verifica-se pouca variação da composição isotópica e da condutividade elétrica, indicando homogeneidade das amostras neste nível do reservatório. No nível mais raso, situado a 450 metros abaixo da superfície, obteve-se as menores concentrações de sólidos dissolvidos e dos valores do  $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$  que apresentam valores similares aos encontrados na água do mar, possivelmente representando a água que entrou na formação durante a sedimentação da bacia.

**ABSTRACT.** This work report physicochemical and isotopic analysis of formation water collected from a petroleum field of the Recôncavo Basin aiming at evaluating the evolution, rock-water interaction and interconnection in subsurface. It was analyzed the hydrogen and oxygen isotopic composition of 13 samples from 10 wells, produced from depths varying from 450 to 1800 meters and draining 4 different production levels. To overcome the high concentration of dissolved salts it was developed a salt extraction process by cryogenic distillation to permit the isotopic analysis. The electrical conductivity ranged from 99.5 to 168.7 mS/cm, corresponding to total dissolved salts in the range of 79600 to 13500 mg/L. The pH varied from 5.9 to 7.5 showing the neutral character and subtle acidic character of the samples. It was observed an enrichment of deuterium and oxygen  $-18$  with the depth of production zone, probably due to the water-rock interaction potentially increased by the higher temperature of the deeper levels and longer residence times. The samples from the production zone at the depths between 1450 to 1520 m, drained by 7 of the 10 wells sampled, show a small range in isotopic composition and electric conductivity, indicating homogeneity in this level of the reservoir. In the shallow level about 450 m the values of  $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$  and electrical conductivity are lower, with isotopic composition similar to the sea water, possibly representing the original water that entered the reservoir during the sedimentation of the basin.

## MODELAGEM E IMAGEAMENTO 2.5D NO DOMÍNIO DO TEMPO ATRAVÉS DE DIFERENÇAS FINITAS

**Francisco de Assis Silva Neto**

Orientador: Dr. Jessé Carvalho Costa (UFPA)  
86 p. – Tese (Doutorado) – Defesa 16.04.2010

**RESUMO.** A modelagem 2.5D consiste em simular a propagação do campo de ondas em 3D em meios com simetria de translação em uma direção. Nesta tese esta abordagem é formulada para meios elásticos e anisotrópicos com classe de simetria arbitrária e a geometria de aquisição não precisa coincidir com um plano de simetria do meio. A migração por reversão no tempo do campo de ondas é formulada e implementada através de diferenças finitas 2.5D. Para reduzir os efeitos de retro-espalhamento e melhorar a recuperação da amplitude dos eventos migrados, propomos uma nova condição de imagem para migração reversa no tempo baseada na análise assintótica da condição de imagem clássica por correlação cruzada. Experimentos numéricos indicam que a migração reversa no tempo 2.5D com a nova condição de imagem proposta, melhora a resolução da imagem em relação à migração reversa no tempo 2D e reduz acentuadamente os ruídos causados por retro-espalhamento.

**ABSTRACT.** This thesis discusses modeling and imaging of seismic wavefields in 2.5D using finite-differences to solve numerically the wave equation. Modeling in 2.5D is extended to anisotropic elastic media with an arbitrary class of symmetry. The sources of the wavefield are generalized to simulate of explosive, dipole and double-couple distributions. The acquisition geometry is not required to coincide with a symmetry plane. Reverse time migration in 2.5D is implemented in conjunction with a new imaging condition based on the asymptotic analysis of the classical correlation imaging condition. The new imaging condition is designed to improve the amplitudes in reverse time migration (RTM) images, and to reduce back-scattering artifacts. Numerical experiments indicate that 2.5D RTM improves the resolution of the migrated images when compared to its 2D counterpart, and that the proposed imaging condition was effective improving the amplitudes and reducing back-scattering artifacts.

## **ESTUDO COMPARATIVO ENTRE ESTEREOTOMOGRAFIA E TOMOGRAFIA DA ONDA NIP: APLICAÇÃO EM DADOS SINTÉTICOS E REAIS**

**José Ribamar Praxedes Filho**

Orientador: Dr. German Garabito Callapino (UFPA)

86 p. – Dissertação (Mestrado) – Defesa 16.04.2010

**RESUMO.** A determinação de um acurado modelo de velocidades é um requisito fundamental para a realização do imageamento sísmico. Métodos novos como a estereotomografia pré-empilhamento e a tomografia da onda NIP são ferramentas poderosas e bastante sugestivas para este propósito. Basicamente, a estereotomografia pré-empilhamento se baseia no conceito de eventos localmente coerentes interpretados como reflexões primárias e associados com pares de segmentos de raios, que têm um mesmo ponto de reflexão em profundidade. Na tomografia da onda NIP um evento sísmico é representado por uma onda hipotética NIP, que está relacionada a um ponto de reflexão em profundidade. Os atributos da onda NIP são determinados no decorrer do Empilhamento de Superfície de Reflexão Comum (empilhamento CRS). Este trabalho tem como objetivo, fazer um estudo comparativo de ambos os métodos de determinação do modelo de velocidades em profundidade. Assim, é realizada uma revisão dos fundamentos teóricos de ambos os métodos tomográficos, destacando as principais diferenças e aplicando estas aproximações em um dado sintético e em um dado real marinho (linha sísmica 214-2660 da Bacia do Jequitinhonha). Para avaliar os modelos de velocidades encontrados pelas aproximações, foi utilizada a migração pré-empilhamento em profundidade do tipo Kirchhoff e também as famílias de imagem comum (CIG). Os resultados mostraram que ambos os métodos tomográficos fornecem modelos de velocidades representativos. Contudo, constatou-se que a estereotomografia tem melhor desempenho em meios com variações laterais de velocidades, porém, aplicável somente em dados pré-empilhados com alta razão sinal/ruído.

**ABSTRACT.** The determination of an accurate velocity model is a fundamental requirement for the seismic imaging. New methods, such as prestack stereotomography and poststack NIP wave tomography, are powerful and very suggestive tools for this task. The prestack stereotomography is basically based on the concept of locally coherent events interpreted as primary reflections which are associated with ray segments linked through the same reflection point in depth. In NIP wave tomography a seismic event is represented by a hypothetical NIP wave associated with a reflection point in depth. The NIP wave attributes are determined during Common Reflection Surface (CRS) procedure. The objective of this work is to compare both methods of velocity model determination in depth. Then, a review of the theoretical foundations of both tomographic methods are made, considering its main differences, and then applied to a synthetic data and a real marine dataset (seismic line 214-2660 of the Jequitinhonha Basin, Brazil). In order to evaluate the velocity models determined by these two approximations, the data were prestack depth migrated using the Kirchhoff algorithm and also generated Common Image Gathers (CIG). The results have shown that both tomographic methods yield representative velocity models. However, it was noticed that the velocity model estimated by stereotomography behaved better in laterally varying media, but only applied in prestack data with a high signal-to-noise ratio.

## IMAGEAMENTO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA A PARTIR DE DADOS ELETROMAGNÉTICOS MULTIFREQUÊNCIA, ARRANJO COPLANAR HORIZONTAL

**Ricardo Luiz Barbalho**

Orientador: Dr. Hédison Kiuity Sato (UFBA)  
58 p. – Dissertação (Mestrado) – Defesa 23.04.2010

**RESUMO.** O processo de interpretação de dados obtidos em levantamentos eletromagnéticos é frequentemente feito através da comparação com dados produzidos por modelos teóricos ou de escala reduzida. No intuito de contribuir para a interpretação desse tipo de levantamento, este trabalho produz e analisa perfis de condutividade elétrica no plano  $xz$  através de simulações computacionais de um modelo geológico teórico composto por uma esfera condutora imersa num semiespaço infinitamente resistivo sob um arranjo horizontal coplanar. A metodologia empregada faz a inversão das impedâncias de acoplamento mútuo ( $Z/Z_0$ ) em condutividades aparentes e as associa a um ponto de maior influência no plano  $xz$ , gerando uma grade de dados que permite, por sua vez, construir os perfis 2D. Para o processamento dos dados FDEM no arranjo adotado, foi necessário reescrever a expressão de  $Z/Z_0$  como uma expansão em série de Taylor para reduzir erros nos cálculos computacionais para pequenos valores do número de indução, resultado conseguido para  $\theta < 10^{-2}$ , intervalo em que os erros são sempre menores que 1%. A avaliação das coordenadas do ponto de maior influência em condições limítrofes ( $\theta \ll 1$  e  $\theta \gg 1$ ) confirma a existência de uma linha limite com mergulho de  $26,57^\circ$ , abaixo da qual não é possível observar as anomalias, e a necessidade de se ter números de indução muito altos quando o alvo é um corpo raso, o que implica em condições específicas, como frequências maiores que 10 kHz, distâncias  $TX-RX$  muito grandes ou condutividades muito altas, o que, nas aplicações práticas dos métodos CSAMT, não é usual. Os perfis obtidos mostram também que a posição horizontal das imagens geradas por corpos mais profundos são deslocadas na direção contrária a do transmissor quando se associa a medição a um ponto diretamente abaixo do receptor. Dessa forma, a correção horizontal utilizada, apesar de deslocar um pouco as imagens dos corpos mais rasos na direção do transmissor, produz resultados muito melhores para corpos mais profundos.

**ABSTRACT.** The process of interpreting the data obtained from electromagnetic surveys is often made by comparison with data produced by theoretical or reduced scale models. To contribute to the interpretation of this kind of survey, this work produces and evaluates electrical conductivity profiles in  $xz$  plane through computational simulations of a theoretical geological model consisting of a conducting sphere immersed in an infinitely resistive half-space under a horizontal coplanar loops array. The used methodology performs the inversion of mutual coupling impedances ( $Z/Z_0$ ) in apparent conductivities and associates them to points of greatest influence in the  $xz$  plane, creating a grid of data that produces a 2D profile. For FDEM data processing under the adopted array, it was necessary to rewrite the expression  $Z/Z_0$  as an expansion in Taylor series to reduce errors in the computational calculations for small number of induction, result accomplished for  $\theta < 10^{-2}$ , where errors are always lower than 1%. The evaluation of the coordinates of the point of greatest influence on limiting conditions ( $\theta \ll 1$  and  $\theta \gg 1$ ) confirms the existence of a boundary line with a deep angle of  $26.57^\circ$ , below of which it is not possible observe anomalies, and the need to have induction numbers very high when the target is a shallow body, which implies specific conditions, such as frequencies above 10 kHz, distances  $TX-RX$  very large or very high conductivities, which in practical applications of the CSAMT methods, is unusual. Profiles obtained also show that the horizontal position of the deeper bodies images are displaced in the opposite direction of the transmitter when the measurement is associated with a point directly below the receiver. Thus, the horizontal correction proposed, although slightly offset images of the shallower bodies toward the transmitter, produces much better results for deeper bodies.

## ESTUDO DOS EFEITOS TOPOGRÁFICOS NOS DADOS ELETROMAGNÉTICOS MULTIFREQUÊNCIA E EMPREGO NOS DADOS

**Zoukanéri Ibrahim Moumouni**

Orientador: Dr. Hédison Kiuity Sato (UFBA)

73 p. – Dissertação (Mestrado) – Defesa 07.05.2010

**RESUMO.** Esta dissertação tem como objetivo estudar o efeito da topografia do terreno nos dados eletromagnéticos à multifrequência, com o intuito de suprir informações teóricas que melhorem a precisão da interpretação dos dados do campo. Analisa-se também esse efeito nos dados EM obtidos no campo de Araçás (Bahia, Brasil). Considera-se um dipolo magnético vertical sobre um semiespaço isotrópico e homogêneo para modelagem direta. Conseguiu-se determinar a matriz de transformação  $\tilde{T}$  e sua inversa  $\tilde{T}^{-1}$ , que contém as informações sobre uma superfície inclinada acima da qual é estendida a bobina transmissora em relação a um plano horizontal. Obteve-se, a expressão geral do campo magnético ( $H_x$ ) no plano inclinado, o que possibilitou realizar simulações tomando em conta a geometria das bobinas (azimute, mergulho), e avaliar a magnitude de erro devido à topografia, analisando a variação da impedância mútua ( $Z/Z_0$ ) com respeito ao número de indução ( $\theta$ ). Deduziu-se, através de três casos analisados, que ângulos de inclinação da ordem de 5 a 10° de inclinação do dipolo transmissor não afetam os dados adquiridos. A maior influência da topografia é causada pela diferença de altitude entre transmissor e receptor. A análise dos dados do campo de Araçás mostra que o efeito topográfico aparece em curtas distâncias transmissor-receptor com grandes diferenças de altitude. À medida que aumentamos a separação do transmissor ao receptor, o efeito topográfico diminui progressivamente, ao mesmo tempo em que a razão sinal ruído diminui e torna o sinal indistinguível a partir de 2000 m de separação transmissor-receptor. Propôs-se um modelo inicial de multicamadas para a modelagem eletromagnética dessa área. O modelo foi deduzido a partir da interpretação dos dados de sondagens elétricas e de perfis geofísicos de poços da área, cedidos pela Petrobras.

**ABSTRACT.** This research aims to study the effect of terrain topography in the multi-frequency electromagnetic data in order to improve, with theoretical information, the accuracy of field data interpretation. We also discuss this effect in the data of the field of Araçás (Bahia, Brazil). We assumed a vertical magnetic dipole on an isotropic and homogeneous half-space. It was determined the transformation matrix  $\tilde{T}$  and its inverse  $\tilde{T}^{-1}$ , which summarizes information about the sloping surface over the transmitting coil is extended. We also obtained a general expression of the magnetic field ( $H_x$ ) on the inclined surface that made possible to do simulations taking into account the geometry of the coil (azimuth and dip), and to assess the magnitude of error due to topography, analyzing the variation of mutual impedance ( $Z/Z_0$ ) with respect to the induction number ( $\theta$ ). It is deduced, by means of three cases examined, that tilt angles of up to about 5 to 10° of the dipole axis does not affect the acquired data. The main influence of the topography is caused by the difference in altitude of the transmitter and receiver. The analysis of Araçás field data showed that by increasing the transmitter-receiver separation, the topographic effect gradually decreases, but the signal-to-noise ratio decreases and the signal becomes indistinguishable from above 2000 m of transmitter-receiver separation. It is proposed an initial model of multilayer for the area. This model was deduced from the interpretation of electrical sounding data and the well logs data supplied by Petrobras.

## MAPAS DE IMPEDÂNCIA ELÁSTICA NO RESERVATÓRIO NAMORADO, BACIA DE CAMPOS

**José Sampaio de Oliveira**

Orientador: Dr. Jorge Leonardo Martins (ON)

88 p. – Dissertação (Mestrado) – Defesa 17.05.2010

**RESUMO.** O conceito de impedância elástica tem sido utilizado em geofísica de exploração para calibrar e inverter dados sísmicos. Nesse trabalho, usamos perfis geofísicos de 39 poços verticais da região central do reservatório Namorado na Bacia de Campos para construir mapas de impedância elástica isotrópica e anisotrópica – aproximação TIV (i.e., transversalmente isotrópico vertical) para o intervalo sedimentar estudado. A reconstrução de perfis incompletos e a estimativa de perfis de ondas P e S foram necessárias para calcular os perfis de impedância elástica isotrópica e anisotrópica. Durante a estimativa de velocidades de ondas S, três métodos foram usados com o objetivo de avaliar o desempenho de cada um em situações genéricas. Usando a técnica de Backus, estimamos as rigidezas TIV equivalentes para a formação que contém o reservatório Namorado. Para construir os mapas de impedância elástica isotrópica e anisotrópica, uma metodologia de interpolação se fundamentou num interpolador de distância inversa com ponderação quadrática acoplado com um esquema de raio de procura para seleção dos pontos de controle. Embora uma grande porção do intervalo sedimentar estudado apresentou comportamento predominantemente de rochas isotrópicas, análise dos mapas resultantes revelou um intervalo litológico caracterizado principalmente por camadas delgadas induzindo anisotropia TIV fraca.

**ABSTRACT.** The elastic impedance concept have been used in geophysical exploration to calibrate and invert seismic data. In this work, we used geophysical well logs of 39 vertical wells from the central region of the Namorado reservoir in Campos Basin to construct isotropic and anisotropic elastic impedance maps – VTI approximation (i.e., vertically transverse isotropy) for the studied sedimentary interval. The reconstruction of incomplete well logs and estimation of P- and S-wave logs were necessary to calculate isotropic and anisotropic elastic impedance logs. During estimation of S-wave velocities, three methods were evaluated in order to verify the performance of each one under generic situations. Using Backus-averaging technique, we estimated the equivalent VTI stiffnesses for the formation in which the reservoir is embedded. To construction the isotropic and VTI elastic impedance maps, an interpolation methodology relied on an inverse-distance square-weighted interpolator coupled with a search radius scheme for selecting the required control points. Although a large portion of the studied sedimentary interval predominantly behaves as isotropic rocks, analysis of the resulting maps revealed a lithologic interval characterized mainly by thin layers inducing weak VTI anisotropy.