

Modelagem e interpretação de dados magnetotelúricos da Bacia do Recôncavo

Annie Gabrielle de Oliveira Silva¹, Joelson da Conceição Batista¹, Vito Varjão Freire Clavijo¹, INCT-GP/UFBA

Copyright 2022, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica.

Este texto foi preparado para a apresentação no IX Simpósio Brasileiro de Geofísica, Curitiba, 4 a 6 de outubro de 2022. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do IX SimBGf, mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.

Resumo

Este trabalho propõe um modelo de resistividade para representar a Bacia do Recôncavo, utilizando dados magnetotelúricos (MT) restritos a uma faixa de frequência entre 0,1 Hz e 10 kHz, com intuito de identificar feições geológicas marcantes da referida bacia. Dentre as etapas deste trabalho, destacam-se as etapas de pré-processamento, processamento avançado, inversão e interpretação dos dados magnetotelúricos.

Introdução

A representação da resposta magnetotelúrica (MT) da Terra como um tensor de impedância de segunda ordem (Cantwell & Madden, 1960), explicam as interações entre os campos vetoriais eletromagnéticos (EM) naturais à medida que se difundem no interior da Terra. A distribuição espacial da condutividade elétrica das rochas produzem mudanças na amplitude, fase e direção dos campos EM à medida que estes se propagam no subsolo. Como consequência, a interpretação dessa resposta tensorial medida na superfície da Terra é altamente dependente da complexidade geométrica e propriedades físicas das estruturas e litologias em subsuperfície. Em estruturas bidimensionais (2-D), os modos transversal elétrico (TE) e transversal magnético (TM) são definidos para descrever o fluxo de corrente elétrica induzida pela passagem desses campos (Chave & Jones, 2012). Se as coordenadas dos dados coletados estiverem devidamente alinhadas com o *strike* geoeletrico, os elementos fora da diagonal principal do tensor correspondem à impedância associada a esses modos de polarização. No entanto, se os eixos coordenados não estiverem alinhados com essa orientação geoeletrica, será necessária uma rotação dos eixos para recuperar os modos padrão TE e TM. Na prática, as informações de estruturas geológicas nem sempre estão disponíveis ou são claras para assumir uma orientação de *strike* (Niasari, 2016), portanto, o sistema de coordenadas do levantamento pode resultar numa direção oblíqua ao ângulo de *strike* geoeletrico de modo que métodos adicionais de processamento serão necessários para girar os dados para o ângulo correto e tornar a modelagem 2D aplicável.

A região deste estudo está localizada na Bacia do Recôncavo, Bahia, Brasil. Em relação à exploração e produção de petróleo, esta bacia é classificada como madura, com reservas estimadas em 221,8 milhões de barris de petróleo e 5,4 bilhões de m^3 de gás (Prates &

Fernandez, 2015), sendo o seu principal sistema gerador de petróleo constituído pelos folhelhos dos membros Gomo e Tauá da Formação Candeias, com teor médio de carbono orgânico estimado em 4% (Milani & Araújo, 2003). Por sua vez, os seus principais reservatórios são constituídos por arenitos flúvio-deltaicos das Formações Marfim e Pojuca, arenitos de fácies fluvial-eólica das Formações Sergi e Água Grande, bem como turbiditos da Formação Gomo da Candeias e Membros Caruaçu da Maracangalha Formação.

Esta pesquisa constitui o resultado de uma parceria entre a UFBA e PETROBRAS para o estudo geodinâmica de Bacias tipo Rift do Estado da Bahia. Nela foi realizado o processamento e interpretação de dados magnetotelúricos, desses foram selecionados os melhores resultados assim limitando-os a faixa de frequência entre 0,1 Hz e 10 kHz (parte da faixa de Banda larga – BL e audiomagnetotelúricos – AMT). A aquisição destes dados se deu ao longo de uma transecta/perfil que atravessa a Bacia do Recôncavo na direção NW–SE, e que contém 22 estações de sondagem adquiridas com o objetivo de estudar a relação entre esta bacia sedimentar e seu embasamento contíguo.

Geologia da área de estudo

A Figura 1 exibe a localização da transecta (TR) em estudo numa direção transversal a Bacia do Recôncavo, bem como as litologias atravessadas por este perfil e descritas através da legenda ao lado. Essa TR possui aproximadamente 84,8 km de extensão, 22 estações de sondagem com espaçamentos de aproximadamente 3,9 km.

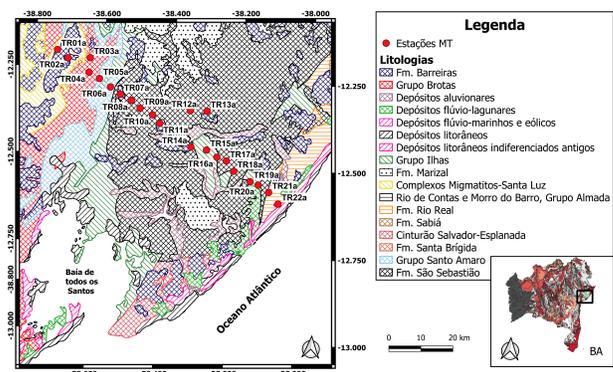


Figura 1 – Mapa geológico e localização do perfil MT utilizado.

A Bacia do Recôncavo está localizada no Nordeste do Brasil, no centro-leste da Bahia, seus limites ao norte e noroeste são marcados pelo Alto de Aporá, a oeste pela

falha de Maragogipe, ao sul pelo sistema de falhas da Barra, que a separa da Bacia de Camamu e a leste pelo sistema de falhas de Salvador. Com um território de 11500 km², sua estrutura geológica é um exemplo de bacia de rifte intracontinental abortado. O tectonismo responsável pela ruptura mesozóica do Gondwana, delimitou as placas Africana e Sul-Americana e desenvolveu alguns braços abortados de riftes, que se projetam para o interior do continente. O pacote pré-rifte (Grupo Brotas), é constituído por sedimentos continentais aluviais, fluviais, eólicos e lacustres rasos. A seção rifte é delimitada pela Falha de Salvador, a qual possui uma grande cunha de conglomerados. A seção sin-rifte é constituída por folhelhos, arenitos turbidíticos, progradações deltaicas (Formação Candeias e Grupo Ilhas) e por sistemas arenosos fluviais (Formação São Sebastião). Na fase pós-rifte, ocorreu o preenchimento da bacia com depósitos clásticos arenosos da Formação Marizal (Porsani et al., 2008).

Numa descrição sucinta a respeito das litologias atravessadas pelo perfil MT em estudo, destaca-se inicialmente a Formação Barreiras, constituída por um depósito sedimentar terciário que se estende por quase todo o litoral brasileiro (de Moura-Fé, 2008). Depósitos que se encontram recobertos, em discordância, por sedimentos areno-argilosos, com grânulos, apresentando, na base, níveis de cascalhos formados por quartzo e fragmentos de material ferruginosos, considerados depósitos pós-Formação Barreiras (Morais et al., 2006). O grupo Brotas que é constituído pelas Formações Aliança e Sergi. A Formação Aliança constitui-se de argilitos e folhelhos calcíferos castanho-avermelhados, maciços a laminados, siltitos cinza-esbranquiçados a esverdeados, arenitos calcíferos, calcários bioclásticos argilosos (grainstones) além de incluir a presença de sistema lacustre. A Formação Sergi caracteriza-se por arenitos, de granulação grossa a fina, por vezes conglomeráticos, com algumas intercalações de siltitos de coloração creme com tons avermelhados, uma característica importante desta formação é o abundante conteúdo de lenhos fósseis silicificados e concreções de sílexito (Fambrini, 2016). O Grupo Santo Amaro é subdividido em duas formações, a Formação Candeias que é composta por folhelhos, siltitos cinza-esverdeados típica de ambiente redutor e arenitos turbidíticos e a Formação Itaparica que é formada por folhelhos e siltitos de coloração cinza arroxeados a cinza esverdeados com poucas intercalações de arenito fino, depositada provavelmente em um ambiente lacustre. Depósitos eólicos também são observadas nesta formação. A Formação São Sebastião é integrada por arenitos finos a grossos, intercalados com siltitos e folhelhos, sotopostos a arenitos de coloração rosada, mal selecionados e de granulação grossa, apresentando interstratificação de folhelhos, siltitos e calcários nodulares impuros, depositados por sistemas fluviais do Barresiano ao Eoaptiano (Durval, 2017).

Já o Grupo Ilhas compõe-se de arenitos finos a siltitos, mal selecionados, localmente bastante argilosos, com frequentes intercalações de siltitos e folhelhos, a porção superior caracteriza-se, de uma maneira geral, por arenitos, folhelhos, siltitos e calcários criptocristalinos

intercalados (Passe, 2015). Os depósitos lagunares são formados desde o início da última transgressão até o atual, por areia e siltes argilosos ricos em matéria orgânica (de Jesus et al., 2008). A Formação Rio Real é integrada por um conjunto de gnaisses-migmatíticos representados em larga escala por biotita ortognaisses de composição granodiorítica-granítica. Salienta-se a presença de fenocristais deformados e estirados de feldspatos, desenvolvendo a textura augen (Oliveira, 2014). Por fim, o perfil atravessa os Depósitos litorâneos indiferenciados antigos.

Geofísica

O método MT é uma metodologia geofísica eletromagnética de investigação passiva que emprega variações naturais dos campos eletromagnéticos terrestres (campos **E** e **B** ortogonais) para estudar as características geolétricas dos materiais em subsuperfície (Tikhonov, 1950). Por meio desse, pode-se entender a distribuição de resistividade (ou condutividade) elétrica com a profundidade. Um fluxograma que mostra um resumo do tratamento dos dados associados a esta pesquisa é ilustrado na Figura 2.

Processamento de dados magnetotelúricos 2D

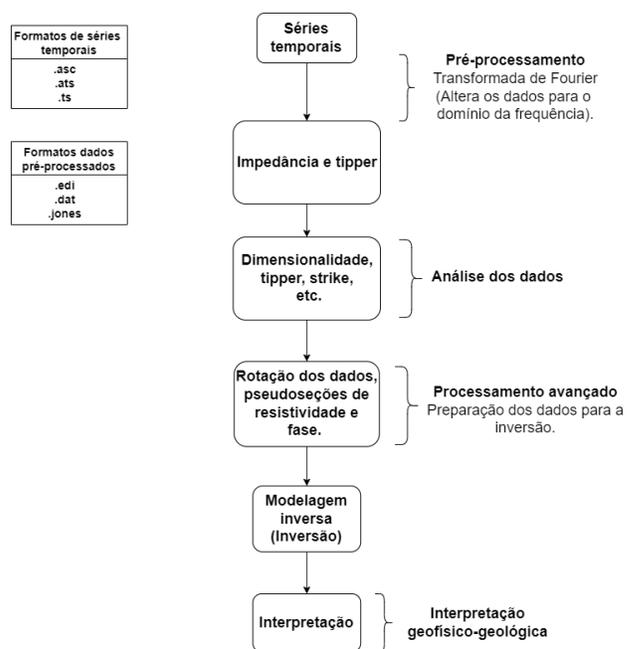


Figura 2 – Diagrama de processamento e interpretação de dados magnetotelúricos 2D.

Os dados foram adquiridos utilizando o equipamento receptor V8 da *Phoenix Geophysics*. Inicialmente os dados MT adquiridos no domínio do tempo (séries temporais) foram transformados para o domínio da frequência com a aplicação da transformada de Fourier, na etapa de pré-processamento e utilizando o software da PHOENIX MT-editor. Nesse estágio, o objetivo é estudar o comportamento do dado por meio de gráficos

de resistividade e fase (escolher as melhores faixas de frequência para eliminar as faixas ruidosas), fazer a estimativa do tensor de impedância (o qual fornece uma ideia do contraste de resistividade no meio geológico) e realizar análise dimensional (etapa necessária para determinar qual o melhor modelo empregado para a interpretação destes dados: se 1D, 2D ou 3D (Martí et al., 2009)). O estudo da dimensionalidade por meio do skew, tipper e da metodologia dos invariantes rotacionais da matriz de impedância (Martí et al., 2009) também fizeram parte dessa etapa. Na Figura 3, a dimensionalidade é identificada através de intervalos, onde a cor amarela representa uma indeterminação na dimensão, a azul representa dados 1D, a vermelha dados 2D e a preta dados 3D. Nesse aspecto, verificou-se que os dados possuem um caráter bem variado. Para frequências abaixo de 4,7Hz a dimensionalidade é predominantemente 3D, para frequências maiores que 4,7Hz oscilam, predominantemente, entre 2D e 1D.

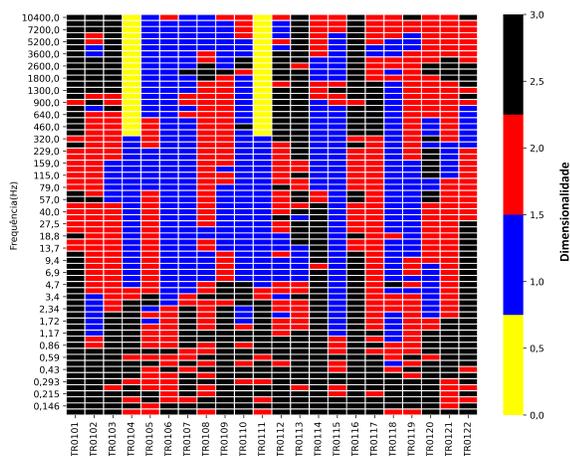


Figura 3 – Interpretação da dimensionalidade dos dados a partir da metodologia de Martí et al. (2009)

A Figura 4, mostra os valores calculados do skew (β) que mensura a assimetria do tensor de impedância e que pode ser usado para inferir a dimensionalidade inerente de estruturas elétricas (Caldwell et al., 2004). Altos valores de $|\beta| > 3^\circ$ (elipses em tons amarelados) indicam estruturas geológicas 3D enquanto ângulos $|\beta| < 3^\circ$ (elipses em tons azuis) sugerem formações 1D, 2D ou quase 2D. Seu valor não muda com a rotação das coordenadas (Vozoff, 1991). Na Figura 4, observa-se que, na faixa de período de 10^{-1} s e 10^{-4} s, o skew apresenta um comportamento majoritariamente 2D. Portanto, destes resultados assumiu-se a aplicação de modelagem 2D para a interpretação dos dados utilizados nesta pesquisa, que será posteriormente aplicada após a sua decomposição.

A direção para a qual a resistividade elétrica é invariante é denominada strike geológico. Sua análise, por meio do diagrama de rosetas (Figura 5), indica seus valores e direções preferenciais utilizando três diferentes metodologias. O strike encontrado pela metodologia dos

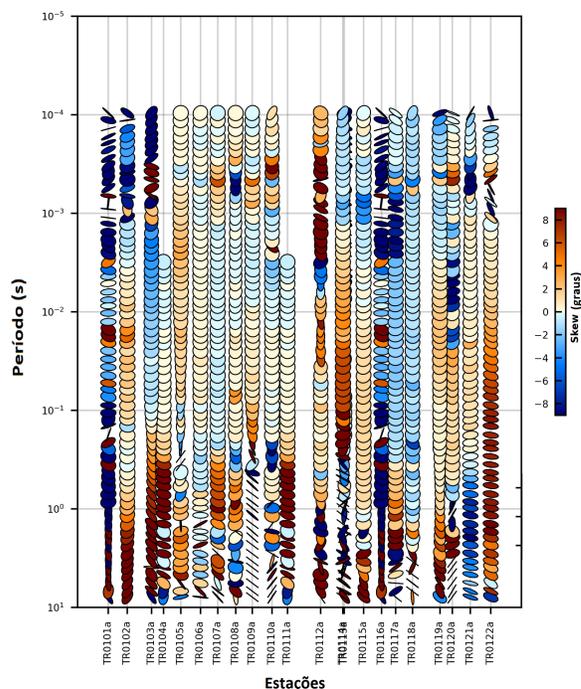


Figura 4 – Análise de dimensionalidade com base no skew.

tensores de impedâncias invariantes (Weaver et al., 2000), é dado por 85° com sua direção variando entre NW, NE e NS. A análise do tensor de fase (PT) é um método para a obtenção do strike geológico que possui uma ambiguidade de $\pm 90^\circ$, e para resolver esse problema, pode-se utilizar os valores do tipper strike. Para os dados apresentados, o azimuth de PT indica um strike dominante de aproximadamente $7,5^\circ$ NE ou $7,5^\circ$ NW e o tipper strike indica duas possíveis direções de um quadrantes, aproximadamente $67,5^\circ$ NE ou $67,5^\circ$ NW.

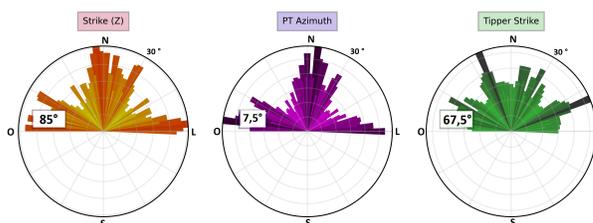


Figura 5 – Análise dos strike preferenciais estimados pelos tensores de impedâncias invariantes, do tensor de fase azimuth e do Tipper Strike.

Tendo em vista a grande variabilidade dimensional dos dados, a variação dos valores calculados das direções do strike são justificáveis. Assim sendo e sabendo que se a condutividade regional da estrutura for aproximadamente 2D, o tensor de fase será simétrico a um de seus eixos principais alinhados paralelamente ao eixo do strike da estrutura regional (Caldwell et al., 2004). Visto que as direções na Bacia do Recôncavo pouco se afastam de

30° NE (Porsani et al., 2008), e que esta direção possui representatividade nas análises apresentadas na Figura 5, o strike geoeletrico aqui escolhido foi de 30° NE, direção utilizada para a decomposição destes dados nos modos TE e TM.

Escolhido o modelo bidimensional para a interpretação, na fase de processamento avançado, empregou-se o software MTPY (Kirkby et al., 2019), um pacote escrito em Python para o tratamento, processamento e imageamento de dados magnetotelúricos. Os dados então foram rotacionados para a direção do strike geoeletrico, resultando nas pseudoseções de resistividade aparente e fase (Figura 6). A Figura 6 contém as pseudoseções dos modos TE (XY) e TM (YX), demonstrando assim as variações laterais e verticais da resistividade em subsuperfície. Tais variações indicam a existência de regiões pouco resistivas na parte central desse perfil.

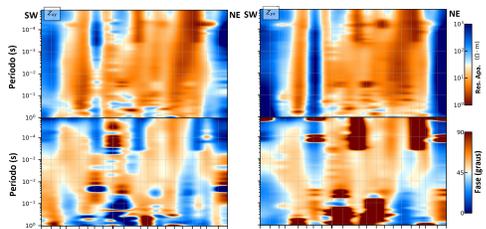


Figura 6 – Pseudoseções de resistividade aparente e fase, modo TE (XY) e TM (YX).

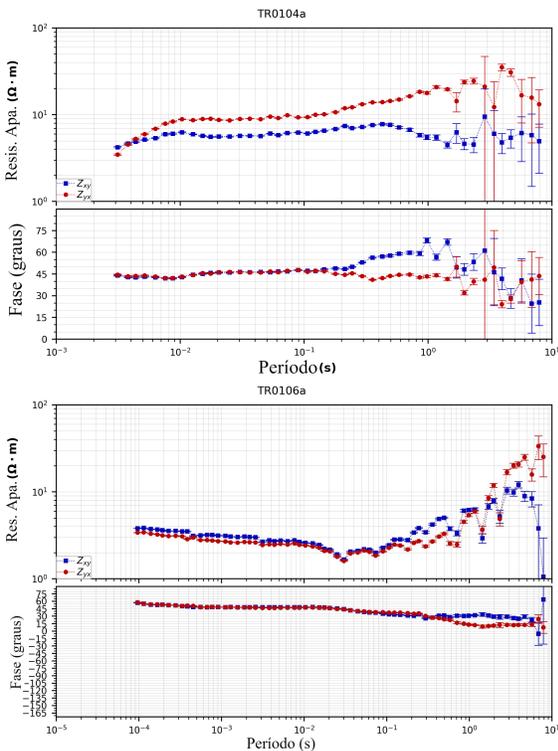


Figura 7 – Curvas de resistividade aparente e fase das estações de sondagem TR0104a e TR0106a.

Uma amostra da qualidade dos dados processados pode ser observada na Figura 7 através das curvas de resistividade aparente e fase (módulo e fase dos tensores de impedância – Z_{xy} e Z_{yx}) das estações TR0104a e TR0106a. Após esses estágios, os dados foram preparados para a inversão e posterior interpretação dos resultados obtidos.

Para a realização da modelagem inversa bidimensional, utilizou-se o software OCCAM2D (deGroot Hedlin & Constable, 1990), um software que realiza a inversão conjunta para os modos TE e TM e gera modelos suavizados. A metodologia aplicada nesta fase é a inversão suavizada ('smooth inversion method') na qual a resistividade é distribuída e é constante para determinados números de blocos, e sua suavização será obtida por meio de iteração computacional.

Interpretação dos dados

Após a realização da etapa de inversão bidimensional foram gerados três modelos de variação da resistividade em subsuperfície, com profundidades de 10 km, 15 km e 30 km, respectivamente. O modelo de 15 km foi utilizado para a interpretação da bacia em estudo (Figura 8).

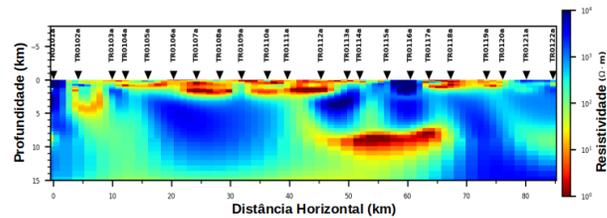


Figura 8 – Modelo de resistividade para 15 km de profundidade.

Na Figura 9, foram identificadas feições estruturais características de estruturas de bacias sedimentares do tipo rift, tais como falhamentos normais e reversos, além da identificação de um depocentro principal, que parece ter uma profundidade máxima em torno de 9 m, excedendo os 6 km de profundidade, conforme mencionado em (Magnavita et al., 2005).

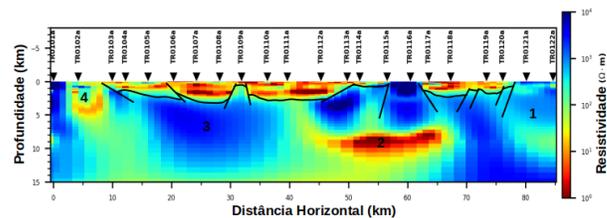


Figura 9 – Modelo de resistividade interpretado para 15 km de profundidade. Zonas 1 e 2, respectivamente, referem-se a distorção referente a proximidade do oceano e uma região anômala de condutividade.

Além das interpretações já mencionadas, a Figura 9

mostra uma resumida interpretação abaixo da Bacia, indicado pela numeração de quatro zonas mais profundas em destaque:

- Zona 1, em sua porção NE, zona predominantemente resistiva e interpretada como o embasamento granulítico e cuja presença de uma porção com condutividade relativamente alta, pode ser devido a distorções laterais gerada pela elevação lateral de condutividade nas proximidades da crosta oceânica (estações 21a e 22a);
- Zona 2, zona condutora e entre as estações 012a e 018a (com $\approx 2\Omega m$) que representa um substrato mais condutivo estando a ≈ 9 km de profundidade e que pode estar associada a uma parte do embasamento enfraquecido ou ser devido a presença de pedaços da crosta oceânica.
- Zona 3, zona mais resistiva e entre as estações 03a e 11a (com $\approx 10^4\Omega m$) que pela sua composição pode estar associado ao embasamento crustal.
- Zona 4, zona mais rasa e mais condutiva (estações 01a a 03a) que novamente pode estar associada ao embasamento crustal enfraquecido.

No entanto, para conclusões mais concisas a respeito dos pontos levantados neste artigo, será necessário uma investigação mais detalhada e que contemple a utilização de informações correlatas de outras fontes.

Conclusões

Foram obtidos resultados coerentes com trabalhos anteriores, sendo possível identificar estruturas características da Bacia do Recôncavo, seu depocentro e zonas condutivas e resistivas correlatas, através dos uso de dados magnetotélúricos processados e interpretados na presente pesquisa. Essa relevância científica, além de proporcionar um maior entendimento sobre uma área de importância exploratória, incentiva novas pesquisas com objetivo de entender a presença de anomalias condutivas e correlacioná-las com suas respectivas estruturas geológicas.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Petrobrás pelo apoio financeiro, ao PIBIC/UFBA pela bolsa de iniciação científica, ao Centro de Pesquisa em Geofísica Geologia da Universidade Federal da Bahia e ao Institutos Nacionais de Ciência e Tecnologia - Geofísica do Petróleo pelo apoio estrutural e logístico, ambos indispensáveis, à realização desta pesquisa.

Referências

Caldwell, T. G., Bibby, H. M. & Brown, C., 2004. The magnetotelluric phase tensor, *Geophysical Journal International*, vol. 158(2): 457–469.

Cantwell, T. & Madden, T., 1960. Preliminary report on crustal magnetotelluric measurements, *Journal of Geophysical Research*, vol. 65(12): 4202–4205.

Chave, A. D. & Jones, A. G., 2012. *The magnetotelluric method: Theory and practice*, Cambridge University Press.

Durval, L. G. d. L., 2017. Caracterização estratigráfica da formação Marizal (K) na Serra do Tonã, Sub-bacia do Tucano Norte, NE do Brasil, Master's Thesis, Universidade Federal de Pernambuco.

Fambrini, N. V. G.-G. J. O. E. P. E. S. A., G.L.1, 2016. Sequência de início de rifte (grupo brotas) da bacia de jatobá: resultados preliminares, in: *Anais do 48º Congresso Brasileiro de Geologia: As geotecnologias e o século XXI*, São Paulo, vol. 48, 2168.

deGroot Hedlin, C. & Constable, S., 1990. Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data, *Geophysics*, vol. 55(12): 1613–1624.

de Jesus, R. S., Santana, L. S., da Rosa, I. L. F. & Hadlich, G. M., 2008. Análise geomorfológica preliminar da área da bacia de todos os santos e entornos, ba, in: *Produtos do sensoriamento remoto, modelagem, geoprocessamento e suas contribuições para a geomorfologia*, Belo Horizonte (BH).

Kirkby, A. L., Zhang, F., Peacock, J., Hassan, R. & Duan, J., 2019. The mtpy software package for magnetotelluric data analysis and visualisation, *Journal of Open Source Software*, vol. 4(37): 1358.

Magnavita, L. P., Silva, R. R. d., Sanches, C. P. et al., 2005. Field trip guide of the reconcavo basin, ne brazil; guia de campo da bacia do reconcavo, ne do brasil, *Boletim de Geociencias da Petrobras*, vol. 13.

Martí, A., Queralt, P. & Ledo, J., 2009. Waldim: A code for the dimensionality analysis of magnetotelluric data using the rotational invariants of the magnetotelluric tensor, *Computers & Geosciences*, vol. 35(12): 2295–2303.

Milani, E. J. & Araújo, L. d., 2003. Recursos minerais energéticos: Petróleo, Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil: 541–576.

Morais, R. M. O. d., Mello, C. L., Costa, F. d. O. & Santos, P. d. F., 2006. Fácies sedimentares e ambientes deposicionais associados aos sepósitos da formação barreiras no estado do rio de janeiro, *Geologia USP. Série Científica*, vol. 6(2): 19–30, doi:10.5327/S1519-874X2006000300004, URL <https://www.revistas.usp.br/guspsc/article/view/27421>.

de Moura-Fé, M. M., 2008. Histórico dos estudos sobre a formação barreiras: uma luz no passado desvenda as lacunas do presente, in: *Epistemologia da geomorfologia*, Belo Horizonte (BH).

Niasari, S. W., 2016. A short introduction to geological strike and geo-electrical strike, in: *AIP Conference Proceedings*, AIP Publishing LLC, vol. 1755, 100002.

Oliveira, E. M. d., 2014. Petrografia, litogeoquímica e geocronologia das rochas granulíticas da parte norte do cinturão salvador-esplanada-boquim, bahia-sergipe.

Passe, J., 2015. Teores naturais de metais em solos das Bacias Sedimentares do Recôncavo e do Tucano Sul como subsídio ao estabelecimento de valores de referencias de qualidade, Ph.D. Thesis, Dissertação de Mestrado): Bahia, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia 85p.

Porsani, M. J. et al., 2008. Relatório final: Estudo dos sistemas petrolíferos das bacias do recôncavo, tucano e jatobá, Tech. rep., Universidade Federal da Bahia (UFBA).

Prates, I. & Fernandez, R., 2015. Bacia do recôncavo sumário geológico e setores em oferta, Décima Terceira Rodada de Licitações. Brasil: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Available at: Available at: http://rodadas.anp.gov.br/arquivos/Round_13/areas_oferecidas_r13/Sumarios_Geologicos/Sumario_Geologico_Bacia_Reconcavo.R13.pdf. Acessado em: Maio, vol. 20: 2022.

Tikhonov, A., 1950. On determining electrical characteristics of the deep layers of the earth's crust, in: Doklady, Citeseer, vol. 73, 295–297.

Vozoff, K., 1991. Electromagnetic methods in applied geophysics: Volume 2, application, parts a and b, Society of Exploration Geophysicists, 641–711.

Weaver, J. T., Agarwal, A. K. & Lilley, F., 2000. Characterization of the magnetotelluric tensor in terms of its invariants, Geophysical Journal International, vol. 141(2): 321–336.