

Caracterização de sistemas de paleocavernas colapsadas usando atributos GPR

João Andrade dos Reis Júnior, David Lopes de Castro, Francisco Pinheiro Lima Filho
Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica (PPGG) - UFRN

Copyright 2013, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 26-29, 2013.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

Although the origin and evolution of collapsed paleocaves have been extensively studied and understood, the characterization of the internal geometry of these karst systems still needs more research. The high porosity and permeability present in collapsed paleocaves play an essential role for the imaging of karst reservoirs based on near surface geophysical methods. Such petrophysical properties cause a significant increase in electrical resistivity and decrease in dielectric constant in relation to the limestone bedrock. In this context, a detailed GPR survey was conducted in a collapsed paleocave exposure in the Potiguar Basin (NE – Brazil). Mathematical operators, such as instantaneous, frequency, amplitude and geometry attributes, were applied to GPR data in order to better understand and mapping the paleocaves in depth. The resulting radargrams helped to recognize the electromagnetic response of the collapsed paleocaves, as well as highlighted the numerous fractures caused by the collapse of paleocave roof and walls.

1. Introdução

Sistemas de paleocavernas constituem importantes classes de reservatórios carbonáticos oriundos de processos cársticos (Loucks e Anderson, 1985). Sabe-se que nestes tipos de reservatórios, o colapso de cavernas provoca o surgimento de inúmeras heterogeneidades deposicionais que afetam significativamente a porosidade e a permeabilidade nesse sistema cárstico, bem como provocam a compartimentação de reservatórios de água subterrânea e de hidrocarbonetos.

O entendimento e desenvolvimento de cavernas são relativamente bem discutidos na literatura (White, 1988; Loucks, 1999, 2001). Contudo, ainda existem poucos dados sobre a estrutura interna 3D de sistemas de paleocavernas colapsadas em reservatórios carbonáticos (Loucks et al., 2004). De fato, perfis de sísmica de reflexão combinados com perfis de poços nem sempre fornecem bons resultados na caracterização de reservatórios carbonáticos complexos em 3D (Forte et al., 2012).

O GPR vem demonstrando ser a tecnologia bastante promissora para o imageamento raso de formações carbonáticas com alta resolução em relação a outras técnicas não invasivas. Vários autores têm utilizado o GPR no mapeamento e caracterização de fraturas e falhas (Pipan

et al., 2003), na detecção de cavernas e feições cársticas (Al-fares et al., 2002; Chamberlain et al., 2000); em imageamento estratigráfico (Davis & Annan, 1989); e em estudos de afloramentos calcários análogos a reservatórios de hidrocarbonetos (Reyes Perez et al. 2003; Takayama et al., 2008; Jesus et al., 2012; Forte et al., 2012).

A análise de atributos é a técnica de interpretação de dados geofísicos oriunda da sísmica, que pode ser utilizada em dados GPR (De Castro et al., 2012). Segundo Chopra & Marfurt (2005), o atributo sísmico é a medida da quantidade de uma característica de interesse, englobando todas as quantidades derivadas do dado sísmico, ou do dado GPR, como no caso deste trabalho. A utilização de atributos na interpretação de seções de GPR é bem recente (Cassidy, 2009). Exemplos desse tipo de aplicação pode ser encontrada em alguns trabalhos, como Geerdes & Young (2007), Böniger & Tronicke (2010), Forte et al. (2012) e De Castro et al. (2012).

Neste trabalho, é relatada uma abordagem prática da utilização de atributos GPR na caracterização de paleocavernas colapsadas em um afloramento carbonático, localizado próximo a Quixeré, NE do Ceará (Fig. 1). O referido afloramento é constituído de inúmeros eventos cársticos que originaram paleocavernas colapsadas (Fig. 2). Foram testados alguns dos atributos sísmicos conhecidos para analisar e extrair informações úteis nos dados de GPR, melhorando a interpretação das paleocavernas colapsadas, bem como as caracterizando geofisicamente. Foram empregados atributos Instantâneos, de Amplitude, atributos relacionados com a Frequência, de medidas de Coerência e de Geometria.

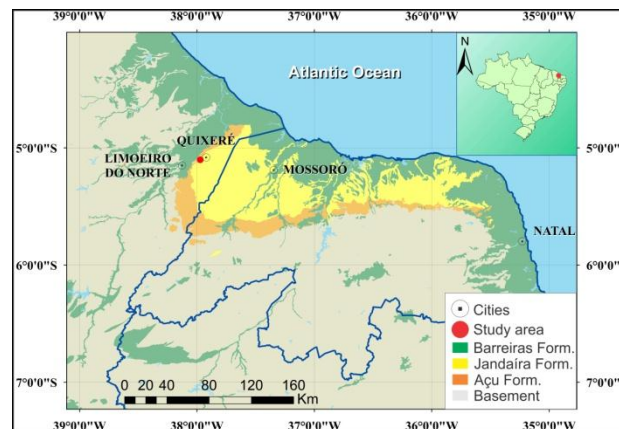


Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo, próximo a Quixeré - CE.

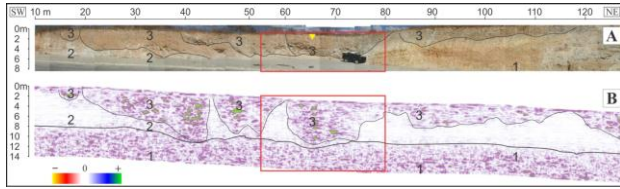


Figura 2 - Correlação entre as feições identificadas em fotomosaico (A) com a seção GPR (B): 1 - calcário; 2 - calcário alterado; 3 - paleocavernas colapsadas (tufas/espeleotemas); retângulo vermelho - paleocaverna de referência; triângulo amarelo - CMP 3.

2. Metodologia

Os dados GPR foram adquiridos com um equipamento SIR-3000 (GSSI Inc.), em uma janela temporal de 220 ns e com 50 traços por metro. Foram adquiridos 1259 m de linhas GPR 2D e 2570 m de linhas distribuídas em duas malhas regulares (3D), com afastamento de 0,5 m entre as linhas (Fig. 3). Também foram realizados cinco levantamentos de ponto médio comum (*common mid point* – CMP), executados com antenas bi-estáticas de 80 MHz para análise de velocidades de propagação das ondas eletromagnéticas, e assim estimar a constante dielétrica das paleocavernas colapsadas. As antenas foram afastadas inicialmente em 1,0 m, sendo as mesmas gradativamente espaçadas em 0,2 m para cada nova leitura até aberturas máximas da ordem de 35 m.

O processamento dos dados de GPR objetivou buscar a melhor representação visual das respostas geofísicas para as feições estudadas, tendo como referência os perfis adquiridos paralelos ao corte de estrada. As etapas de processamento foram: remoção do tempo zero; atenuação de ruídos coerentes (*background removal*); *dewow*; remoção do ganho dado na aquisição; ganho *energy decay*; filtro passa-banda; correção topográfica e conversão tempo/profundidade. Os dados GPR processados foram inseridos em ambiente virtual 3D e aplicados os diversos atributos descritos a seguir.

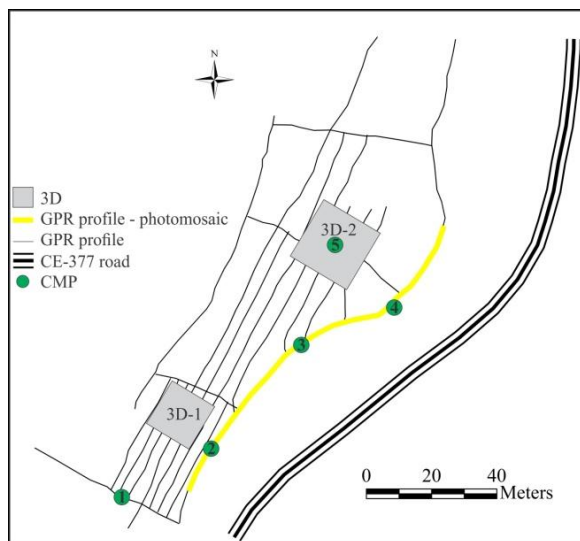


Figura 3 – Localização das linhas geofísicas levantadas na região de Quixeré (CE).

2.1. Parametrização do sinal geofísico

Para uma interpretação mais consistente dos dados de GPR, foi utilizado um fotomosaico da exposição vertical das paleocavernas colapsadas ao longo da escarpa da rodovia. Foram estabelecidas correlações no padrão de resposta do perfil GPR realizado paralelamente ao corte de estrada, a aproximadamente 2 m da escarpa (Fig. 3), e as paleocavernas identificadas no afloramento.

Na seção GPR (Fig. 2b), é possível a identificação da geometria de algumas paleocavernas correlacionadas com o fotomosaico (Fig. 2a), sendo possível perceber a boa coincidência das geometrias entre os perfis. Nota-se ainda a presença de refletores de alta amplitude causados pelo forte contraste da constante dielétrica, existente entre as tuvas/espeleotemas e as rochas calcárias encaixantes. Esse fato pode ser comprovado na CMP-3 (triângulo amarelo na Fig. 4), realizada sobre uma das paleocavernas colapsadas visualizadas no afloramento (Fig. 2a). Através da análise de velocidade da CMP-3, foi possível estimar a constante dielétrica média das paleocavernas colapsadas (tuva/espeleotema) igual a 5, enquanto que para o calcário foi estimado um valor de 8,5.

Na Figura 2b é possível distinguir os calcários são e alterado das paleocavernas colapsadas (tuvas/espeleotemas). O primeiro é caracterizado por refletores paralelos de baixa amplitude, enquanto o segundo por refletores curtos, com amplitude variando de baixa a média. Já as tuvas/espeleotemas são caracterizadas por refletores paralelos de alta amplitude, circundados por refletores com alta amplitude, porém com padrões geométricos mais caóticos.

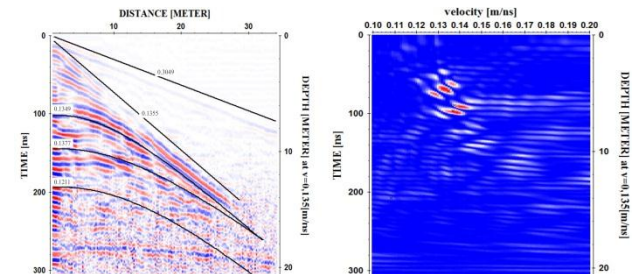


Figura 4 - CMP-2 realizada sobre a paleocaverna de referência.

2.2. Atributos GPR

Paleocaverna de referência

Nesta etapa do trabalho, tentou-se extrair dos dados GPR, através de atributos de Frequência, Amplitude, Similaridade e Geometria, informações que permitissem a melhor identificação de paleocavernas colapsadas nos dados reais, caracterizando suas estruturas internas, bem como fraturas relacionadas a processos cársticos e dissoluções. Estas características das paleocavernas podem estar associadas com altos contrastes causados pela presença de zonas de alta porosidade, bem como pela presença das tuvas representadas por refletores horizontalizados de alta amplitude.

Atributos Instantâneos

A Figura 5 ilustra a aplicação dos atributos Instantâneos de Amplitude, Fase e Frequência na área teste. A Amplitude Instantânea (Fig. 5B) se mostrou bastante sensível a variações na amplitude, ocasionadas por mudanças na impedância eletromagnética das unidades rochosas em subsuperfície. No caso estudado, acredita-se que se deve ao aumento na porosidade preenchida por ar devido à presença da paleocaverna (tufas/espeleotemas), compreendida na região de 6 a 23 m, com até 10 m de profundidade. Já a Fase Instantânea (Fig. 5C) não se identifica de forma clara o limite da paleocaverna de referência, como quando aplicado em seções GPR horizontais (*time-slice*), mostrando que este atributo apresenta melhor resultado quando aplicado em *time-slices*. O atributo Frequência Instantânea (Fig. 5D) mostra a presença de anomalias na faixa da frequência central da antena (200 MHz) nas regiões correspondentes aos refletores de maior amplitude visualizadas na Figura 5A, possivelmente devido a maior porosidade destas áreas.

Amplitude

Nas Figuras 5E e 5F, é possível visualizar tanto o atributo de Energia como o Traço de Hilbert-Energia, respectivamente. Nos dois casos, percebe-se a individualização das paleocavernas colapsadas com relação ao calcário encaixante. O Traço de Hilbert-Energia gera um aspecto de auto-relevo no radargrama. Esta metodologia é conhecida como Técnica Volume de Amplitudes, desenvolvida por Bulhões (1999) para a obtenção de mapas de variação lateral de sismofácies utilizando-se a média RMS ou a média dos Valores Absolutos das Amplitudes. Essa técnica costuma ser usada para uma melhor visualização da geometria dos reservatórios. Vale salientar que em ambos os atributos, as regiões de maior energia encontram-se nas áreas onde ocorrem altos valores de resistividade e baixos valores da constante dielétrica, identificadas localmente como as paleocavernas colapsadas.

Frequência

Nas Figuras 5G e 5H é possível visualizar a aplicação dos atributos Amplitude Espectral Máxima e Fator Q na paleocaverna de referência. A Amplitude Espectral Máxima mostra que as maiores amplitudes da frequência dominante estão compreendidas na paleocaverna de referência, devido ao grande contraste da constante dielétrica nas mesmas. O atributo Fator Q mostra que as paleocavernas apresentam maiores valores locais de Q, o que de fato está relacionado à menor atenuação da onda EM nesta região em comparação a rocha calcária encaixante. Esse resultado corrobora com a hipótese apresentada neste trabalho de que as paleocavernas são mais porosas que a rocha calcária, e ainda que esses poros estejam totalmente ou mesmo parcialmente preenchidos por um material mais resistivo e de menor constante dielétrica que a rocha calcária encaixante, no caso estudo, acredita-se que seja o próprio ar preenchendo os vazios. Conclusão semelhante é proposta por McBride et al. (2012). Seções geoeletricas realizadas sobre as paleocavernas mostram que elas são mais resistivas que a rocha calcária.

Geometria

A Figura 5I mostra a aplicação da similaridade na paleocaverna teste, sendo as regiões escuras relacionadas à baixa similaridade, que por sua vez representa fraturas no material rochoso. Já na Figura 5J é mostrada a sobreposição do radargrama original em amplitude sobre o atributo de Similaridade. Percebe-se claramente o destaque das fraturas na seção de amplitude quando aplicado a Similaridade. Um realce ainda maior é conseguido aplicando o atributo Traço de Hilbert na Similaridade (Fig. 5K), gerando um aspecto de auto-relevo das fraturas.

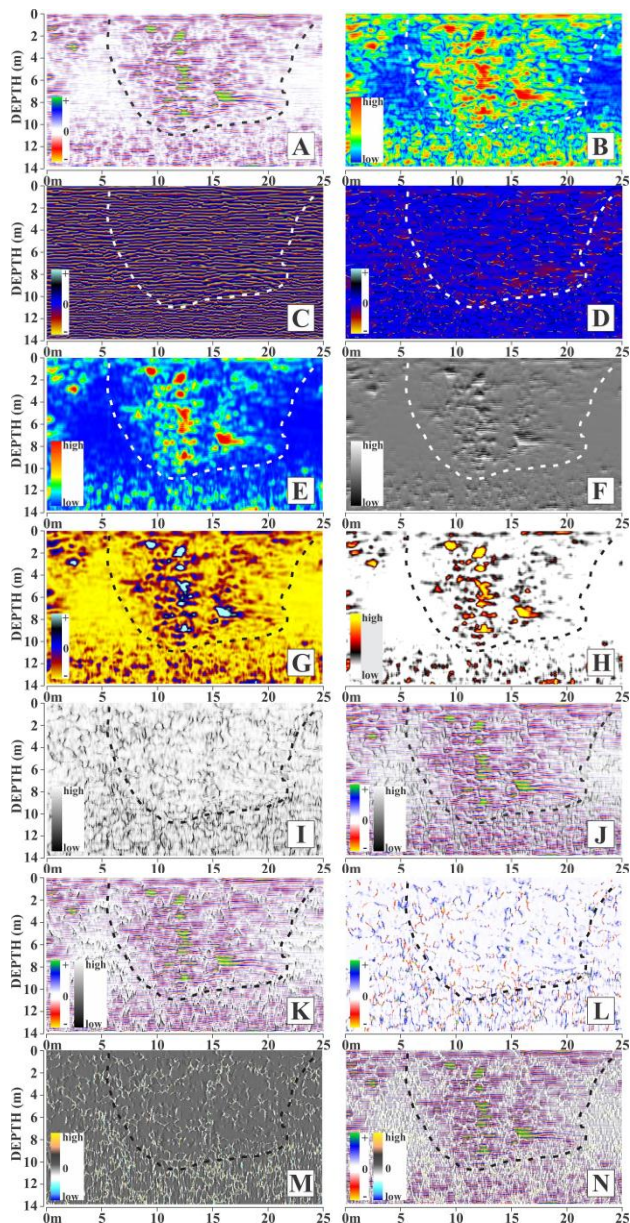


Figura 5 - Atributos GPR aplicados à paleocaverna de referência: A - Radargrama original; B - Amplitude Instantânea; C - Fase instantânea; D - Frequência Instantânea; E - Energia; F - Traço de Hilbert/Energia; G - Amplitude Espectral Máxima; H - Fator de Qualidade; I - Similaridade; J - Sobreposição do atributo de

Similaridade sobre o radargrama original; K - Sobreposição do Atributo Traço de Hilbert/Similaridade sobre o radargrama original; L - Steering; M - Atributo *Curvatureness*; N - Atributo de Curvatura sobreposto ao radargrama original.

A Figura 5L mostra o *steering* com o mergulho dos refletores correspondentes a região da paleocaverna de referência. A partir das informações do *steering*, foi aplicado o atributo Curvatura *Curvatureness* (Fig. 5M). Percebe-se que a resposta deste atributo é bem semelhante ao atributo de Similaridade, o que de fato está relacionado à presença das fraturas do colapso da paleocaverna, bem como pelas regiões de contato entre os clastos oriundos das paredes e tetos das paleocavernas. Já na Figura 5N é mostrado, a título de melhor visualização, a aplicação do Traço de Hilbert sobre o atributo *Curvatureness* sobreposto ao radargrama original em amplitude, gerando assim, como quando aplicado sobre o atributo de Similaridade, um aspecto de auto-relevo das fraturas e regiões de contato entre os clastos.

3. Resultados e discussões

3.1. Perfis 2D

O atributo Energia foi escolhido para ser aplicado sobre todas os perfis 2D adquiridos no afloramento estudado. Foi aplicada ainda a técnica de isosuperfície sobre o atributo Energia, de forma que se pudesse mapear tridimensionalmente em subsuperfície a geometria de todas as paleocavernas colapsadas no afloramento estudado.

O atributo Energia realçou o padrão da resposta GPR das paleocavernas colapsadas. A Figura 6 mostra todos os perfis 2D com este atributo. As regiões de alta energia (amarelo e vermelho) correspondem as paleocavernas colapsadas, enquanto que as regiões de baixa energia (verde e azul), a rocha calcária encaixante. A partir do padrão de resposta de energia, foi possível distinguir quais seriam as regiões de paleocavernas colapsadas, pelo fato de estas apresentarem elevado contraste de impedância eletromagnética.

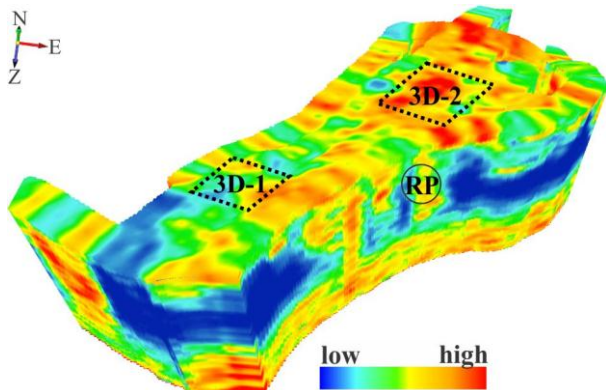


Figura 6 - Atributo Energia dos perfis 2D. As paleocavernas são identificadas como sendo as regiões de alta energia (vermelho), enquanto o calcário é identificado como sendo as regiões de baixa energia (azul). Os quadrados correspondem às regiões onde foram realizadas as duas malhas 3D's. RP: Paleocaverna de referência.

Para uma visualização com mais detalhe, as Figuras 7A e 7B mostram a área sul do afloramento, onde o atributo Energia foi aplicado juntamente com isosuperfícies, con-

tornado os altos valores de energia. A Figura 7B mostra as geometrias tridimensionais das paleocavernas em outro ângulo. Constata-se que nesta região as paleocavernas são menores e bem mais individualizadas. Inclusive, as 3 paleocavernas identificadas na Figura 7B, serão bem mais detalhadas adiante no 3D-1.

Já as Figuras 7C e 7D mostram a área norte do afloramento, onde há um grande sistema de paleocavernas colapsadas mais adensadas que na área sul. O levantamento 3D-2 está sobre uma parte que corresponde a uma região de alta energia (vermelho), que será mais detalhado adiante.

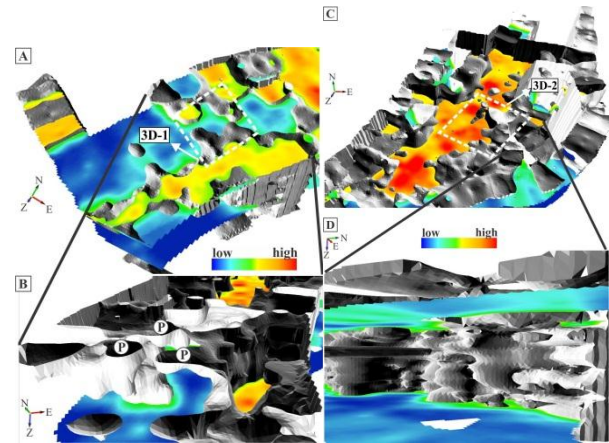


Figura 7 - Isosuperfícies do atributo Energia, identificando as geometrias internas das paleocavernas colapsadas. A - Região sul do afloramento com a localização da malha 3D-1; B - Detalhes das geometrias internas das paleocavernas (P). C - Região norte do afloramento com a identificação da malha 3D-2; D - Detalhes das geometrias internas das paleocavernas.

3.2. Malhas 3D's

A partir das análises dos resultados anteriores, foram aplicados os atributos de Energia, Similaridade, Curvatura, Traço de Hilbert/Curvatura e Traço de Hilbert/Similaridade na malha 3D-1. Para a malha 3D-2, foi criado um cubo de similaridade para o mapeamento das fraturas presentes nas paleocavernas colapsadas. No cubo de Energia 3D-1 (Figura 8A), é possível distinguir regiões de alta energia relacionadas às paleocavernas colapsadas, bem como áreas de menor energia correspondentes ao calcário. Estas paleocavernas identificadas com maior detalhe neste 3D são as mesmas interpretadas nas Figuras 7A e 7B.

A Figura 8B mostra uma seção horizontal de Similaridade correspondente a 7 m de profundidade. Notam-se áreas com altos e baixos valores de similaridade. As regiões de alta similaridade (branco) são interpretadas como as paleocavernas ou mesmo o calcário encaixante. Já as faixas de baixa similaridade (preto) estão marcando o limite das paleocavernas. Um realce destes limites ocorre quando se aplica o atributo Traço de Hilbert sobre a Similaridade (Fig. 8C). Já na *time-slice* com o atributo *Curvatureness* (Fig. 8D), pode-se notar a semelhança nas respostas do atributo Similaridade, delimitando as paleocavernas. Estas regiões são ainda mais realçadas com o atributo Traço de Hilbert/*Curvatureness* (Fig. 8E).

Na Figura 8F é mostrado a *time-slice* de energia sobreposta ao atributo Traço de Hilbert/*Curvatureness*. As regiões de maior energia são circundadas pelos altos valores de curvatura, o que de fato está relacionado aos limites das paleocavernas colapsadas. Por último, as isosuperfícies de Energia destacam as geometrias das paleocavernas imageadas (Figs. 8G e 8H).

No levantamento 3D-2 foi criado um cubo de similaridade. A aplicação deste atributo não distinguiu limites de paleocavernas distintas, como identificado no cubo 3D-1. Tal resposta nos leva a concluir que este cubo 3D não imageou claramente algum limite de paleocavernas. Provavelmente, a área coberta por este levantamento está inserida no domínio de uma ampla paleocaverna, como constatado na Figura 7.

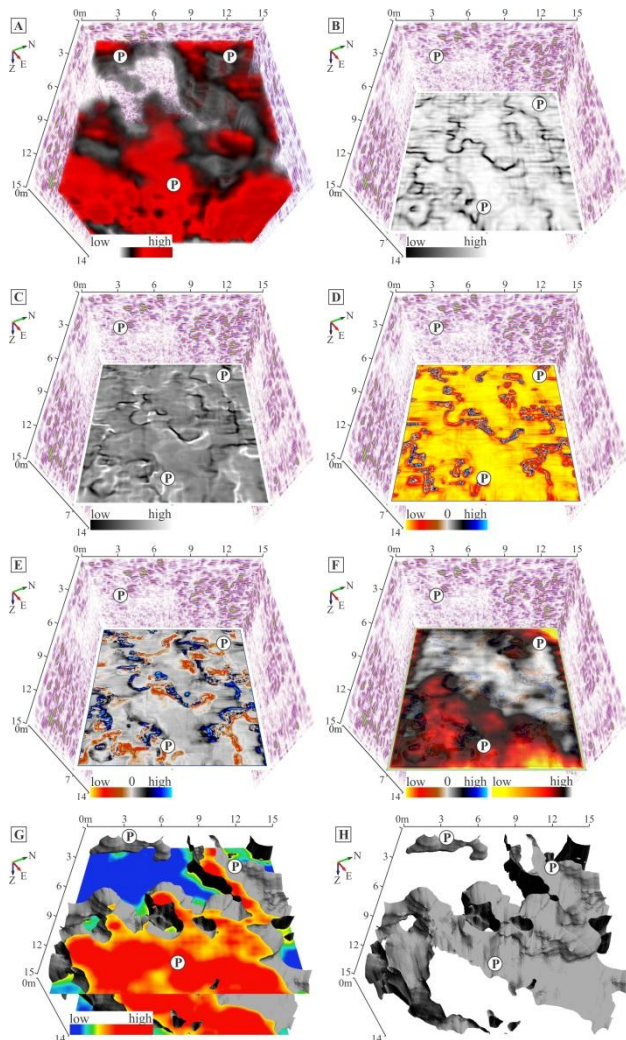


Figura 8– Atributos aplicados ao bloco 3D-1, realçando as assinaturas GPR nas paleocavernas (P): A - Cubo de Energia; B - Similaridade; C - Traço de Hilbert/Similaridade; D - *Curvatureness*; E - Traço de Hilbert/*Curvatureness*; F - Energia sobreposto ao Traço de Hilbert/*Curvatureness*; G - Energia contornado por isosuperfícies; H - Isosuperfícies representando tridimensionalmente a geometria das paleocavernas.

A aplicação dos atributos de Similaridade (Fig. 9A) e Traço de Hilbert/Similaridade (Fig. 9B) possibilitou a identificação de inúmeras fraturas, ocasionadas pelo

colapso da paleocaverna. Regiões de contato entre os clastos oriundos das paredes e tetos das paleocavernas são também destacadas por estes atributos nos radarogramas longitudinais e transversais. Este último, inclusive, realça ainda mais essas regiões. Adicionalmente, na Figura 9B é mostrado um pequeno cubo central de similaridade com regiões de baixa similaridade, ou seja, as fraturas e contatos dos clastos das paleocavernas colapsadas.

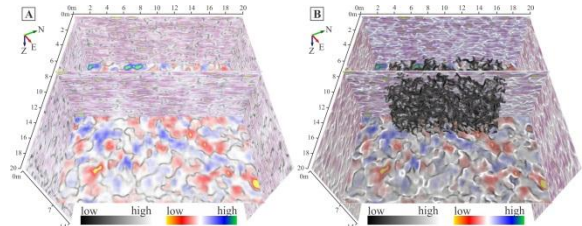


Figura 9 – Atributos aplicados ao bloco 3D-2: A - Similaridade; B - Traço de Hilbert/Similaridade com cubo de similaridade interno, representando as fraturas.

4. Conclusões

Os dados GPR, sobretudo com a aplicação de atributos, possibilitaram a identificação decimétrica da geometria interna de paleocavernas colapsadas, caracterizadas por refletores de alta amplitude, paralelos e contínuos, representando as tufas, e refletores de alta amplitude e caóticos, representando os espeleotemas e restos fraturados do teto das paleocavernas.

Os atributos Amplitude, Fase e Frequência Instantânea, Energia e Traço de Hilbert/Energia contribuíram para individualizar inúmeras paleocavernas colapsadas em função de suas assinaturas eletromagnéticas distintas em relação ao calcário.

Os atributos de Similaridade e *Curvatureness* possibilitam realçar as inúmeras fraturas e regiões de contato entre os clastos ocasionadas pelo colapso do teto e das paredes das paleocavernas, bem como o limite de paleocavernas individuais.

Os atributos relacionados à frequência possibilitaram distinguir de forma clara as paleocavernas da rocha calcária encaixante. O Fator Q mostra altos valores para as paleocavernas e baixos valores para o calcário, o que implica dizer que as paleocavernas atenuam menos o sinal EM em relação a rocha calcária encaixante. Esse resultado corrobora de forma indireta com a hipótese apresentada neste artigo sobre a maior porosidade das paleocavernas em relação à rocha calcária encaixante. Acredita-se que esse fato ocorra devido as paleocavernas serem mais porosas que a rocha calcária, e, ainda, que esses poros estão preenchidos por um material mais resistivo e de menor constante dielétrica com relação à rocha calcária, como o ar, fazendo com que as paleocavernas atenuem menos o sinal EM, tendo um fator de qualidade mais elevado. Percebeu-se ainda que de todos os atributos testados, os relacionados à Amplitude e a Geometria foram os que melhor identificaram a geometria das paleocavernas.

Por último, o atributo Energia juntamente com a técnica de isosuperfície possibilitaram imagear tridimensional-

mente as geometrias das paleocavernas colapsas, permitindo assim, o desenvolvimento de um modelo estático 3D das paleocavernas colapsas. Estes modelos podem ser utilizados como parâmetro para a construção de modelos de sólidos digitais de afloramentos análogos a reservatórios do tipo paleocaverna colapsada. No modelo gerado, constatou-se que a região sul apresenta paleocavernas colapsadas mais individualizadas, enquanto que a área norte apresenta paleocavernas de maior dimensão e mais adensadas.

Agradecimentos

Os autores agradecem à empresa dGB Earth Sciences pela concessão da licença educacional do *software* Opendtect v 4.4.4. A Petrobrás pelo apoio financeiro ao projeto "Imageamento digital de afloramentos carbonáticos em paleocavernas colapsadas". J.A. Reis Júnior é bolsista CAPES e D.L. Castro bolsista de produtividade do CNPq.

Referências

- Al-fares, W., Bakalowicza, M., Guérinc, R., Dukhan, M., 2002. Analysis of the karst aquifer structure of the Lamalou area (Hérault, France) with ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics* 51, 97–106.
- Böniger, U. & Tronicke, J. 2010. Improving the interpretability of 3D GPR data using target-specific attributes: application to tomb detection. *Journal of Archaeological Science*, 37: 360–367.
- Bulhões, E. M., 1999, Técnica "Volume de Amplitudes". In: SBGF / 6° Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, Rio de Janeiro, Anais.
- Cassidy, N. J., 2009. Ground Penetrating Radar data processing, modelling and analysis. In: JOL HM. (Ed.). *Ground Penetrating Radar Theory and Applications*. Elsevier, New York, p. 141-176.
- Chamberlain, A.T., Andrew, T.C., William, S., Chis, P., Roslyn, C., 2000. Cave detection in limestone using ground penetrating radar. *Journal of Archaeological Science* 27, 957–964.
- Chopra, S. & Marfurt, K. J., 2005. Seismic attributes — A historical perspective. *Geophysics*, 70 (5): 3SO–28SO.
- Davis, J.L., Annan, A.P., 1989. Ground penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting* 37, 531–551.
- De Castro, D. L.; Lima Filho, F. P.; Reis Júnior, J. A.; Teixeira, W. L. E. & SILVA, V. A. Aplicação de técnicas avançadas de aquisição, processamento e interpretação em levantamento GPR 3D: Exemplo em dunas inativas. Artigo aceito em 02/2013 pela Revista Brasileira de Geofísica, 32 p.
- Forte, E.; Pipan, M.; Casabianca D., Di Cuia, R. & Riva, A., 2012. Imaging and characterization of a carbonate hydrocarbon reservoir analogue using GPR attributes. *Journal of Applied Geophysics*, in press, 12 p.
- Geerdes, I., Young, R.A., 2007. Spectral decomposition of 3D GPR data from an alluvial environment. *The Leading Edge*, 1024-1030.
- Jesus, T.E.S.; Reis JR, J. A.; de Castro, David L.; Lima Filho, F.P. Imageamento digital de paleocavernas colapsadas com ground penetrating radar. *Geologia USP. Série Científica*, v. 12, p. 71-84, 2012.
- Loucks, R. G., 2001, Modern analogs for paleocave-sediment fills and their importance in identifying paleocave reservoirs: Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions, v. 46, p. 195 – 206.
- Loucks, R. G., 1999, Paleocave carbonate reservoirs: Origins, burial-depth modifications, spatial complexity, and reservoir implications: *AAPG Bull.*, 11, 1795–1834.
- Loucks, R. G., P. Mescher, & G. A. McMechan, 2004: Three-dimensional architecture of a coalesced, collapsed-paleocave system in the Lower Ordovician Ellenburger Group, Central Texas.- *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 88, 545-564.
- Loucks, R. G., & Anderson, J. H., 1985, Depositional facies, diagenetic terranes, and porosity development in Lower Ordovician Ellenburger Dolomite, Puckett field, west Texas, in Roehl, P. O., and Choquette, P. W., Eds., *Carbonate petroleum reservoirs*: Springer-Verlag: 19–38.
- Mcbride, J. H.; Guthrie, W. S.; Faust, D. L.; Nelson, S. T. A structural study of thermal tufas using ground-penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics*, v. 81, p. 38-47, 2012.
- Pipan, M., Forte, E., Dal Moro, G., Sugan, M., Finetti, I., 2003. Integrated Vertical Radar Profiles (VRP) and Multi-Fold GPR for Site Characterization. 2nd International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR), 14–16 May 2003. Delft, The Netherlands. 125–129.
- Reyes-Pérez, Y.A., 2003. Caracterização da geometria de depósitos sedimentares na Borda Sudoeste da Bacia Potiguar. 81p. Dissertação (Mestrado) - Centro de Ciências Exatas e da Terra, UFRN, Natal.
- Takayama, P., Menezes, P., Travassos, J., 2008. High-Resolution 3D GPR imaging of carbonate analogue reservoirs. *Proceedings of 33rd International Geological Congress*, August 6–14, 2008, Oslo, pp. 234–237.
- White, W. B. 1988. *Geomorphology and hydrology of karst terrains*: New York, University Press, 464 p.