

CONTROLE ESTRUTURAL DO SISTEMA CÁRSTICO EPIGENÉTICO NA FORMAÇÃO JANDAÍRA, BACIA POTIGUAR

Mikaelle Araujo CARNEIRO¹; Francisco Hilário Rego BEZERRA¹; Carlos César Nascimento da SILVA²; Rubson Pinheiro MAIA³; Caroline Lessio CAZARIN⁴

- (1) Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Campus Universitário. Departamento de Geologia. Cx. Postal 1596. Lagoa Nova. CEP 59078-970, Natal-RN. Endereços eletrônicos: mikaellearaujo7@gmail.com; bezerrafh@geologia.ufrn.br.
- (2) Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Campus Universitário Lagoa Nova, Departamento de Geofísica, Laboratório de Geofísica Aplicada, Sala 29. CEP 59078-970, Natal, RN, Brasil. Endereço eletrônico: carloscesar@geofisica.ufrn.br.
- (3) Departamento de Geografia, Bloco 911, Centro de Ciências. Campus do Pici, Universidade Federal do Ceará. CEP: 60455-760 Fortaleza, CE. Endereço eletrônico: rubsonpinheiro@yahoo.com.br.
- (4) Centro de Pesquisas e Desenvolvimento (CENPES). Av. Horácio Macedo, 950 - Cidade Universitária. CEP: 21941-915 - Ilha do Fundão. Rio de Janeiro-RJ. Endereço eletrônico: cazarin@petrobras.com.br.

Introdução
Aspectos da Formação Jandaíra
Aspectos da Área de Pesquisa
Materiais e Métodos
Controle Estrutural do Sistema Cárstico no Lajedo do Rosário
Análise das Cavidades em Relação às Estruturas Tectônicas
Conclusão
Agradecimentos
Referência Bibliográfica
Lista de Figuras

RESUMO - Este trabalho focou sobre os efeitos das fraturas na morfogênese do carste epigênico na Formação Jandaíra, Bacia Potiguar. A Formação Jandaíra é uma plataforma carbonática Turoniana-Campaniana que se desenvolveu durante a fase pós-rifte da margem Equatorial, durante a separação entre as placas Africana e Sul-americana. Esta unidade é a principal exposição de rochas carbonáticas Cretáceas em bacias sedimentares brasileiras e abriga um grande número de cavernas e outras feições cársticas. O carste epigênico ocorre em carbonatos fraturados submetidos à dissolução química. A metodologia deste estudo compreendeu o uso de imagens de veículo aéreo não tripulado (VANT) e o mapeamento de campo de um amplo afloramento e de cavernas. A área de estudo é o Lajedo Rosário, um afloramento com 1,5km x 0,5km de dimensões, localizado na parte sul da bacia. Os resultados indicam quatro principais direções de fraturas onde ocorre carstificação: NS, EW, ENE-WSW e NW-SE. As estruturas cársticas ocorrem ao longo de sete padrões estruturais: falhas *step-over*, fraturas em *echelon*, interconexão de fraturas, no centro de fraturas, ao término de fraturas, dendrítica e padrão misto. Esses padrões estruturais favorecem a concentração de fraturas e, portanto, a dissolução e o desenvolvimento cárstico. Estes resultados podem ser de grande valia para explicar os sistemas cársticos em outras unidades carbonáticas.

Palavras-chave: Estrutural, Cavidades, Ambientes Cársticos, Formação Jandaíra, Bacia Potiguar.

ABSTRACT - This work focused on the effects of fractures in the morphogenesis of epigenic karst in the Jandaíra Formation, Potiguar Basin. The Jandaíra Formation is a Turonian-Campanian carbonate platform that developed during the post-rift phase of the Equatorial margin, during the drift between the South American and African plates. This unit is the major exposed Cretaceous carbonate unit in Brazilian sedimentary basins, and it hosts a large number of caves and other karst features. The epigenic karst occurs in fractured carbonates undergoing chemical dissolution. The methodology of this study comprised the use of unmanned aerial vehicle (UAV) imagery and field mapping of a large outcrop and caves. The study area is the Lajedo Rosário, a 1.5 km x 0.5 km outcrop in the southern part of the basin. The results indicate four main trend of fractures, where karstification occurs: NS, EW, ENE-WSW, and NW-SE. The karst structures occur along seven structural patterns: *step-over* faults, *en echelon* fractures, interconnection of fractures, at the center of fractures, at the termination of fractures, dendritic, and mixed pattern. These structural patterns favor fracture concentration and, therefore, dissolution and karst development. These findings may be of value to explain karst systems in other carbonate units.

Keywords: Structural, Cavities, Karstic Environments, Jandaíra Formation, Potiguar Basin.

INTRODUÇÃO

Os sistemas cársticos epigenéticos em rochas carbonáticas são o resultado da dissolução de rochas por águas ácidas durante o tempo geológico. O resultado desta dissolução contínua é um complexo sistema de porosidade

em diversas escalas. É crescente o número de estudos que mostram qual o controle geológico da dissolução. Em vários casos, este controle tem sido relacionado a estruturas tectônicas. No Brasil, vários sistemas cársticos têm sido

descritos (Auler et al., 2009). Diversos trabalhos sobre espeleologia têm sido apresentados sobre o carste brasileiro, envolvendo aspectos como idade, paleoclima, morfologia (Cruz et al., 2010; Auler et al., 2009). Entretanto, pouco se conhece sobre os controles espacial e geométrico destes sistemas e que fatores orientam a dissolução e a formação de cavernas.

O presente trabalho tem o objetivo de analisar o papel de falhas e juntas, aqui simplificadas como fraturas, na formação do carste epigênico, ou seja, aquele ligado com a ação de água meteórica. A execução dessa pesquisa teve como motivação principal,

conhecer os diferentes comportamentos estruturais das fraturas a fim de relacioná-las com a morfologia das cavernas para, em seguida, obter dados que identifiquem os pontos em que se concentra a dissolução cárstica. Foi escolhido como exemplo a Formação Jandaíra na Bacia Potiguar, Nordeste do Brasil. Esta unidade é um excelente alvo de estudo, pois apresenta 91,47 % das 563 cavernas conhecidas atualmente no Rio Grande do Norte. Desse total, 191 estão localizadas no município de Felipe Guerra, porção centro-sul da Bacia (Cruz et al., 2010), área do presente trabalho.

ASPECTOS DA FORMAÇÃO JANDAÍRA

A Bacia Potiguar está localizada no extremo nordeste brasileiro, ocorrendo em sua maior parte no Estado do Rio Grande do Norte e, parcialmente, no Estado do Ceará. A bacia abrange uma área de aproximadamente de 48.000 km², sendo que 21.500 km² encontram-

se emersos e 26.500 km² submersos (Bertani et al., 1989). No contexto tectônico, a Bacia Potiguar compreende três estágios principais: rifte, regime transicional e drifte (Souza, 1982). A Formação Jandaíra faz parte do estágio drifte (Bertani et al., 1989).

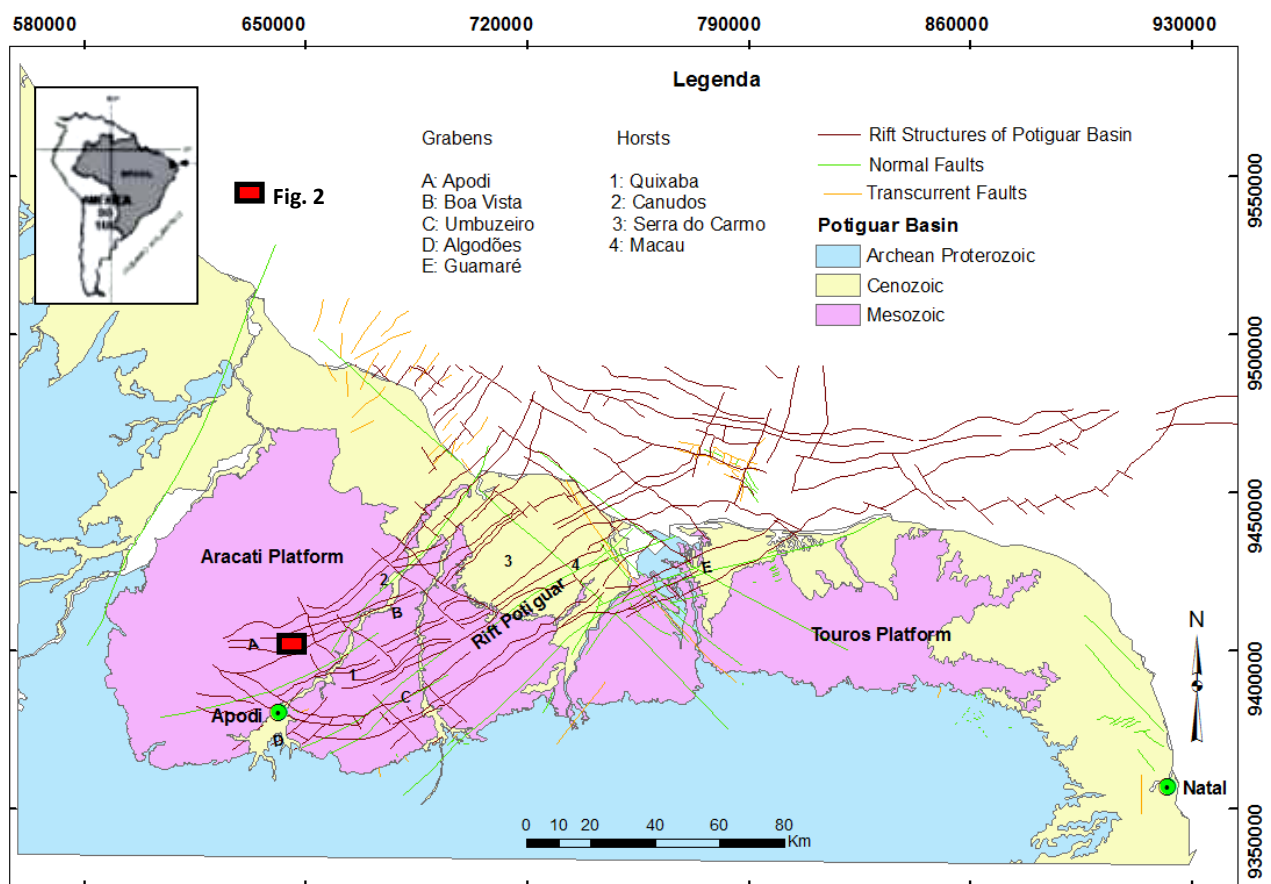


Figura 1. Mapa geológico simplificado da Bacia Potiguar ilustrando a localização da área de trabalho (Modificado de Angelim et al., 2006).

A Formação Jandaíra aflora em toda a área de estudo, onde se encontra intensamente carstificada, erodida e parcialmente recoberta

por depósitos aluviais-eluviais. O aquífero desenvolvido nesse tipo de rocha é do tipo cárstico-fissural livre.

MATERIAS E MÉTODOS

A pesquisa foi desenvolvida numa área composta apenas por rochas carbonáticas no Lajedo do Rosário. O Lajedo do Rosário se localiza na margem esquerda do rio Apodi-Mossoró, e segue a direção NE do mesmo. O lajedo tem em torno de 1,5 km de extensão (no sentido NE-SW) e 500 m (no sentido N-S) de largura, está na proximidade do Distrito de Passagem Funda e a 9 km a nordeste do Município de Felipe Guerra.

Foram obtidas imagens aéreas a partir de um veículo aéreo não tripulado (VANT), que sobrevoou imageando parte do Lajedo do Rosário. O VANT gera imagens com pixel de 1,2 cm. Além disso, foram exploradas 17 cavernas no total, das quais 9 estão inseridas no Lajedo do Rosário, e apenas 8 cavernas estão contidas na área fotografada pelo VANT.

O trabalho de campo foi realizado através de levantamentos sistemáticos em superfície e subsuperfície nas cavernas do Lajedo do Rosário. Foram coletadas com o auxílio de uma bússola do tipo Brunton medidas de juntas, veios preenchidos por calcita e falhas. Para obter as coordenadas dos pontos alvos, como entrada e saída das cavernas, foi feito o uso de

um GPS do tipo *Garmin eTrex*. Os dados extraídos em campo foram processados com os softwares *ARCGIS* versão 10.2 e *Global Mapper* versão 9. Esses softwares foram utilizados para traçar os lineamentos nas ortofotos e delimitar os contornos das cavidades e, por fim, gerar um mapa de lineamentos e cavidades. Também utilizou-se o software *Georient* 32 versão 9 para a confecção dos diagramas de rosetas, com base nas medidas de azimute e no comprimento das juntas, desta forma gerando diferentes categorias de estruturas em função de suas dimensões.

Nesse estudo o assunto abordado serão as cavidades geradas pela dissolução cárstica. Tendo como base essa definição, foram analisadas 1.290 cavidades, incluindo 241 dolinas, 98 uvalas (dolinas colmatadas), 219 sumidouros, 724 condutos horizontais (vales cársticos) e 8 cavernas. Os vales cársticos estão inseridos nas próprias estruturas e são as maiores cavidades presentes no Lajedo, com tamanhos que variam de 50m a 155m. Estas estruturas cársticas têm uma correlação geométrica e espacial com as fraturas (Fig. 3).

CONTROLE ESTRUTURAL DO SISTEMA CÁRSTICO NO LAJEDO DO ROSÁRIO

O Lajedo do Rosário foi subdividido em 3 domínios que apresentam comportamentos distintos com base nos três *sets* de fraturas. O Domínio 1 é composto por 2548 lineamentos, boa parte dos quais na direção E-W. O Domínio 2 é composto por 4326 lineamentos, parte dos

quais tem um orientação N-S e ENE. O Domínio 3 possui 1980 lineamentos com *trend* principal para NW e secundariamente para NE, N, WNW. A partir desses dados o mapa da Fig. 2 foi gerado.

ANÁLISE DAS CAVIDADES E SUA RELAÇÃO COM FRATURAS

As cavidades foram analisadas de acordo com o comportamento das fraturas. Por simplificação, será usado o termo fratura para definição de falhas e juntas, havendo a sua distinção quando necessário. Na área de estudo as fraturas apresentam direções ENE, WNW, E-W e N-S. A investigação identificou seis tipos de feições estruturais e um tipo de feição

atectônica ao longo das quais a carstificação ocorre: (1) falhas com *step-over*, (2) interconexão de fraturas, (3) centro das fraturas, (4) terminação das fraturas, (5) fraturas *en echelon*, (6) padrão dentrítico e (7) padrão misto. A seguir, listam-se cada um destes padrões.

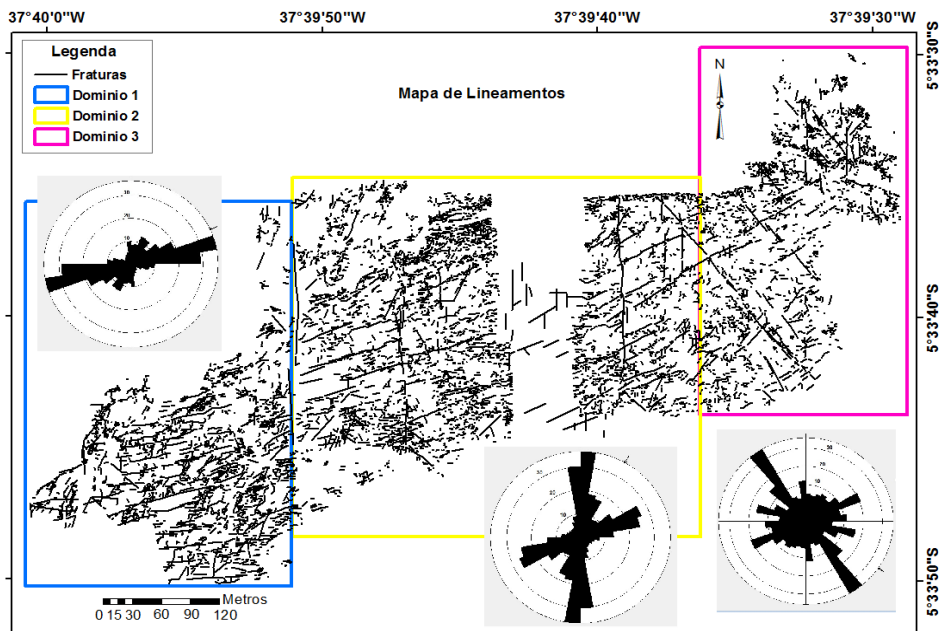


Figura 2. Mapa de lineamentos do Lajedo do Rosário com rosetas indicando a direção preferencial das fraturas.

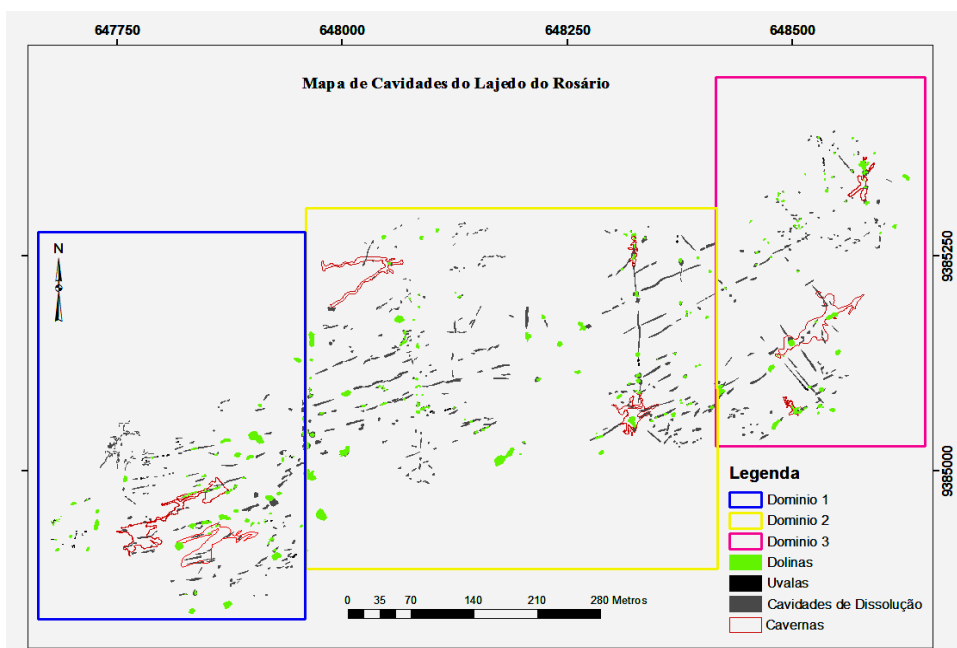


Figura 3. Mapa de cavidades (dissolução) observadas em superfície e cavernas. A figura corresponde à mesma área do Lajedo do Rosário apresentada na Figura 2.

Step-over

As fraturas do tipo *step-over* podem formar zona de distensão (*pull apart*) ou contração (*compressive jog*). Falhas com *step-over* do tipo *pull apart* são encontradas próximas à borda oeste do Domínio 2. Esse padrão gera uma carstificação de dissolução, com uma abertura de tamanho variado de 1,2 m a 1,5 m é representado pela própria falha de direção ENE,

que serviu como conduto de percolação de fluido. As falhas *step-over* do tipo *compressive jog* possuem direção ENE e são encontradas na borda leste do Domínio 1. Esse padrão gera uma carstificação com formação de dolinas, com uma abertura de 2,8 m de largura por 4,3 m de comprimento. Exemplos de *step-overs* e seu esquema de formação são apresentados nas (Figs. 4 e 5).

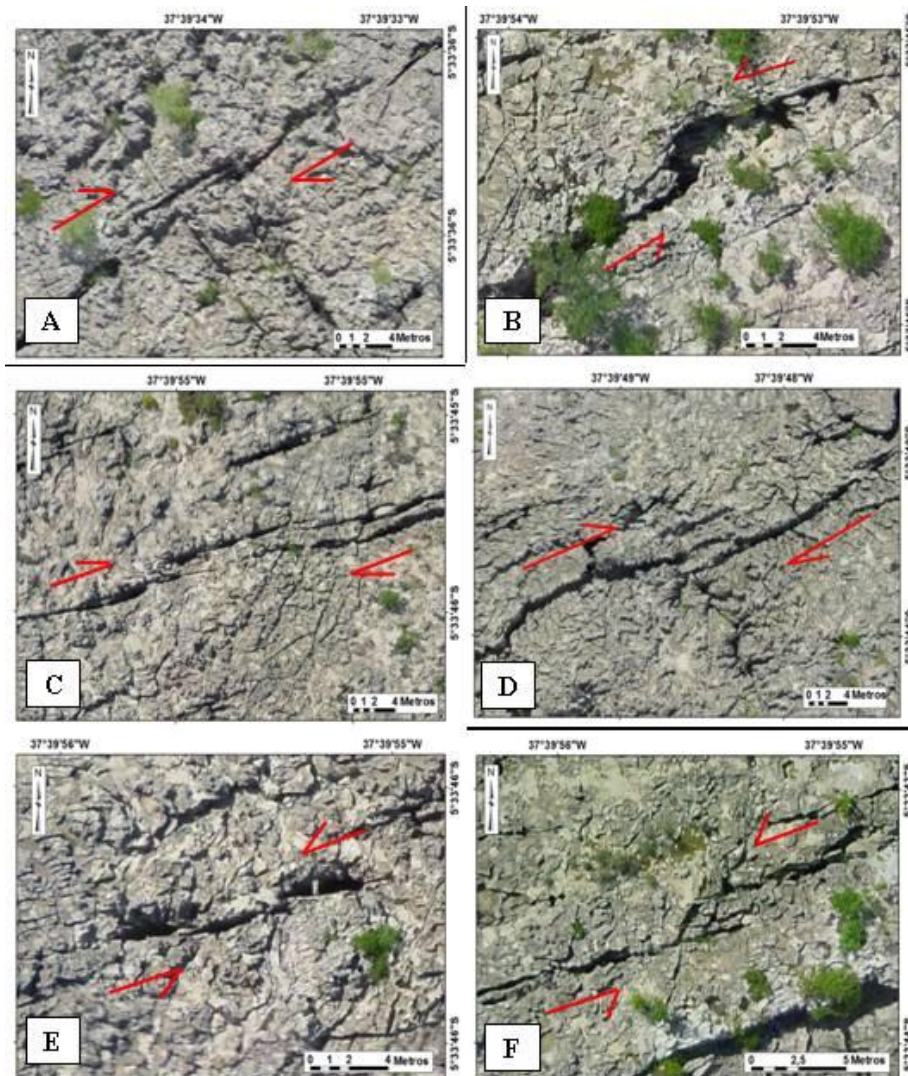


Figura 4. *Step-overs* compressoriais e distensionais observados em campo.

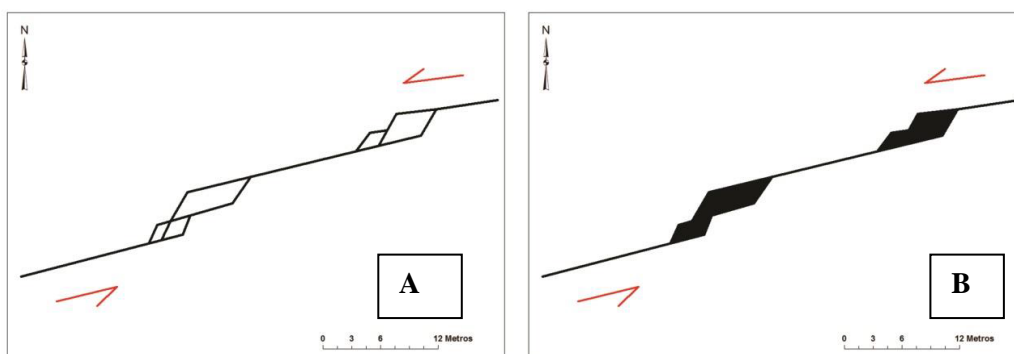


Figura 5. (A) *Step-over* distensional e (B) local de formação do carste ao longo da estrutura. Esquema feito a partir da Fig. 4B.

INTERSEÇÃO DE FALHAS-JUNTAS

A interconexão de fraturas é uma das feições estruturais mais comuns no Lajedo do Rosário. As feições que surgem através desse tipo de carstificação geralmente são cobertas pela vegetação. (Fig. 6). No Lajedo do Rosário foram observados dois tipos de interconexão: ortogonais e conjugadas (ângulo agudo de 60°

entre os sets). As fraturas ortogonais são comuns no extremo leste do lajedado, mais precisamente no Domínio 3, pois as mesmas possuem direção ENE e NNW. As fraturas conjugadas ocorrem no centro do Domínio 2 (Figs. 7 e 8).

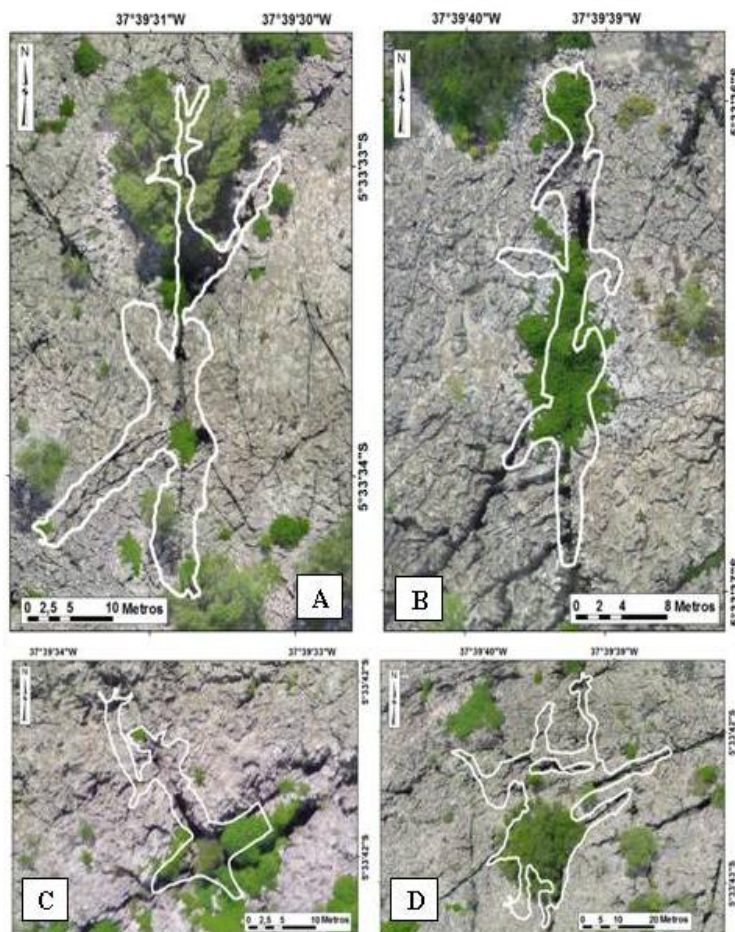


Figura 6. Padrões de interseção de fraturas no Lajedo do Rosário, formando dolinas e cavernas.

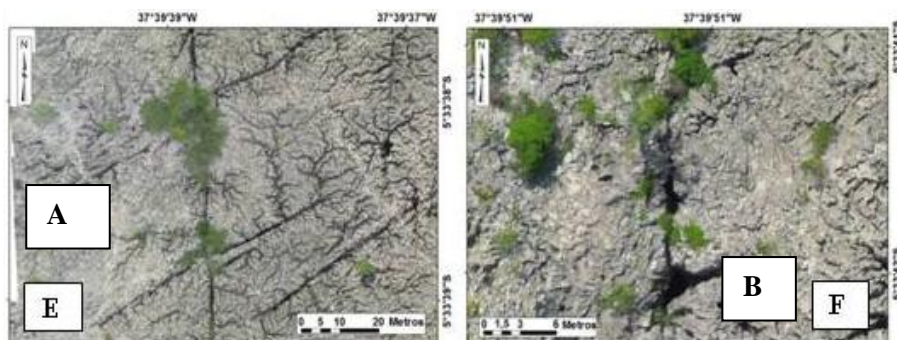


Figura 7. Esquema de interseção de fraturas (juntas ou falhas) e a concentração do carste no seu entorno é visto na figura anterior. (A) interseção de fraturas e (B) locais preferenciais de carstificação ao longo de encontro de fraturas.

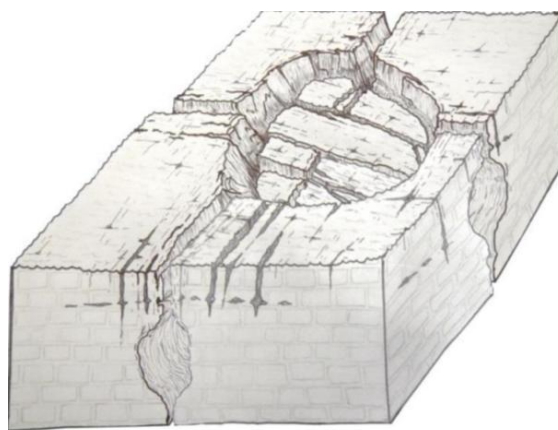


Figura 8. Esquema com a formação de uma dolina no encontro de duas fraturas.

CENTRO DAS FRATURAS

Esse tipo de carstificação ocorre em toda área de estudo. A carstificação no centro das fraturas se desenvolve através de um processo semelhante ao de formação de uvalas, ou seja, a presença de fraturas abertas ao longo da qual

ocorre a percolação da água. (Fig. 9). Este tipo de estrutura provavelmente está relacionada ao maior rejeito, e consequente fraturamento, no centro de falhas (Fig. 10).

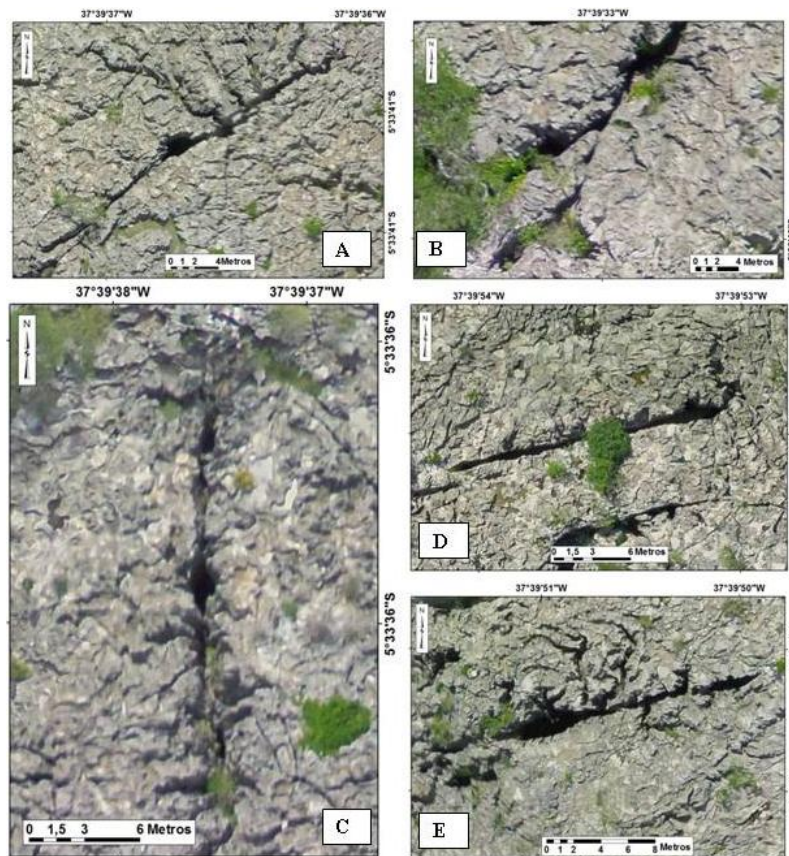


Figura 9. Dissolução em forma elíptica no centro de fraturas (A, B, E) e na terminação de falha (D).

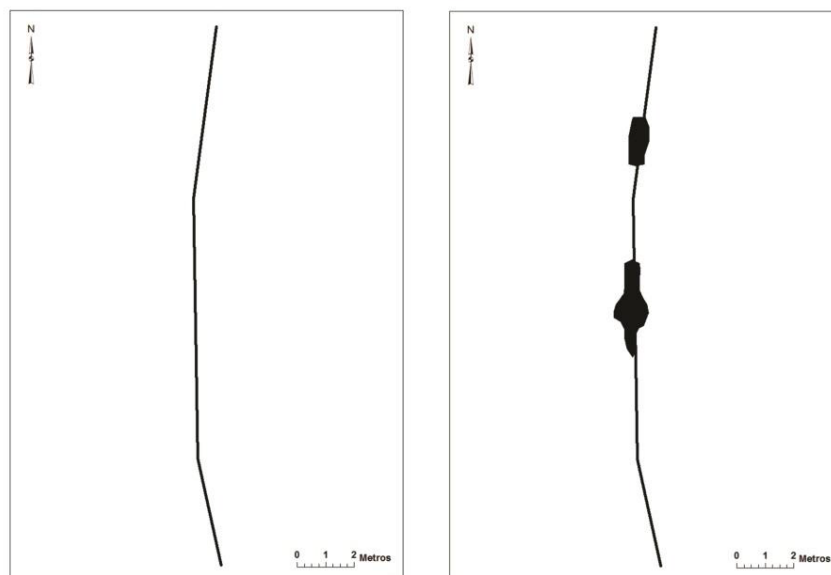


Figura 10. (A) Fratura e (B) desenvolvimento de carstificação no centro da mesma. Esquema feito a partir da Fig. 9C.

TERMINAÇÃO DE FRATURAS

As terminações de falhas apresentam fraturas de *Riedel* (R) e de distensão (T). Estas fraturas se concentram nessas terminações, formando estruturas chamadas de rabo-de-

cavalo (*horse tail*). O local, dado a concentração de fraturas, é ideal para a percolação de fluídos e formação do carste. (Fig. 11).

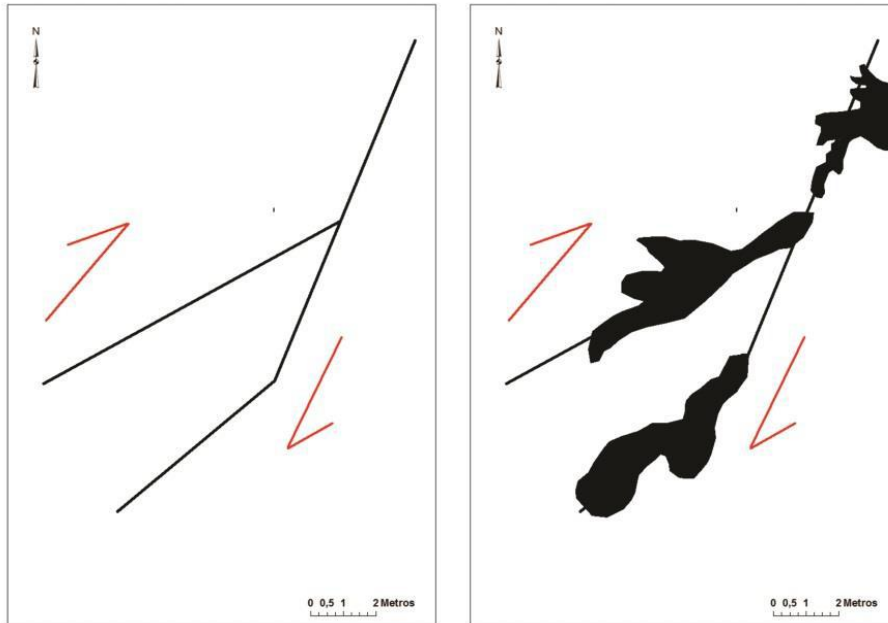


Figura 11. (A) *Horse tail* e (B) formação de carste no encontro de fraturas na terminação de falha. Desenvolvido a partir da Fig. 9B.

FRATURAS DO TIPO *EN ECHELON*

Fraturas *en échelon* são estruturas que se distribuem paralelas umas às outras, de forma escalonada, dispendo-se cada um obliquamente

em relação à faixa na que estão inseridos (Figs. 12 e 13).

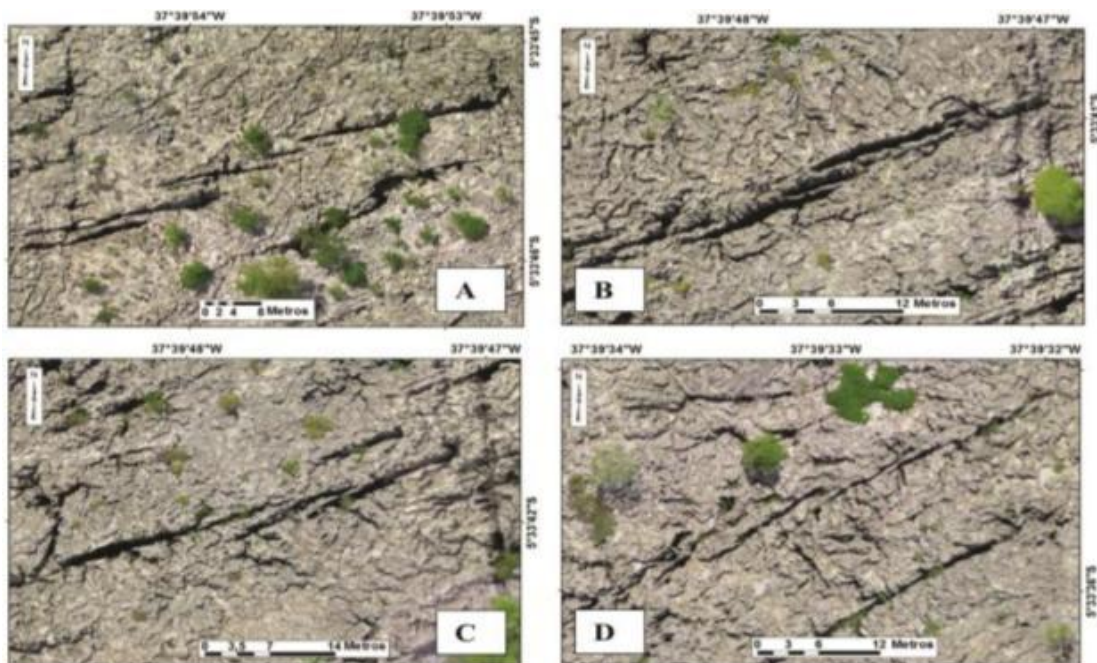


Figura 12. Exemplos de fraturas *en echelon* no Lajedo do Rosário.

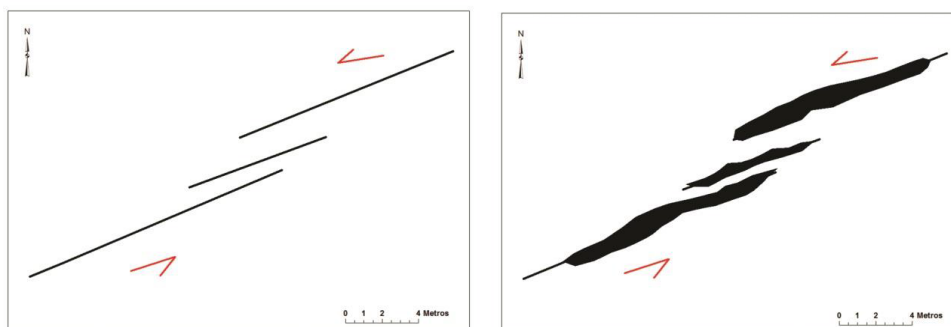


Figura 13. Esquema da dissolução cárstica em torno da estrutura. (A) Fraturas *en echelon* e (B) local preferencial para a formação de carste ao longo das fraturas. Esquema desenvolvido a partir da Fig. 12A.

PADRÃO DENDRÍTICO

O padrão dendrítico é a forma de uma árvore (do grego dendros) que as linhas de água tomam no decorrer do seu percurso sobre um substrato sub-horizontal e homogêneo. Este tipo de carstificação geralmente se desenvolve em

rochas de resistência uniforme. É um padrão faciológico que é capturado por fraturas, que tende a limitar a passagem da água em superfície. (Figs. 14 e 15).

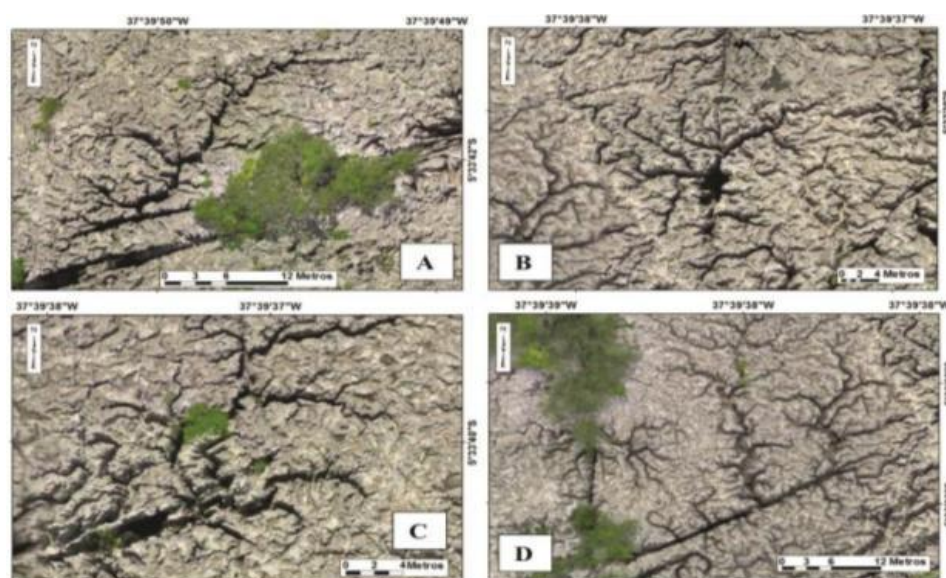


Figura 14. Exemplos de padrão dendrítico no Lajedo do Rosário, que são capturados por fraturas.



Figura 15. Esquema de fraturas e padrão dendrítico que se formou adjacente, onde o sistema cárstico é desenvolvido. Esquema desenvolvido a partir da Fig. 14D.

PADRÃO MISTO

A carstificação do tipo mista se desenvolve quando há a junção de mais de um tipo de carstificação apresentado anteriormente (Figs. 16 e 17). Esse somatório de processos de estruturas, onde se desenvolvem sistemas cársticos, geralmente é formado por quatro tipos de carstificação. São elas: *step-over*, *en*

echelon, nas extremidades das fraturas e na interligação das fraturas. Mais de um tipo de carstificação ocorre na superfície de algumas cavernas localizadas no extremo oeste do Lajedo do Rosário. Este padrão misto é refletido em subsuperfície e no próprio contorno de cavernas.

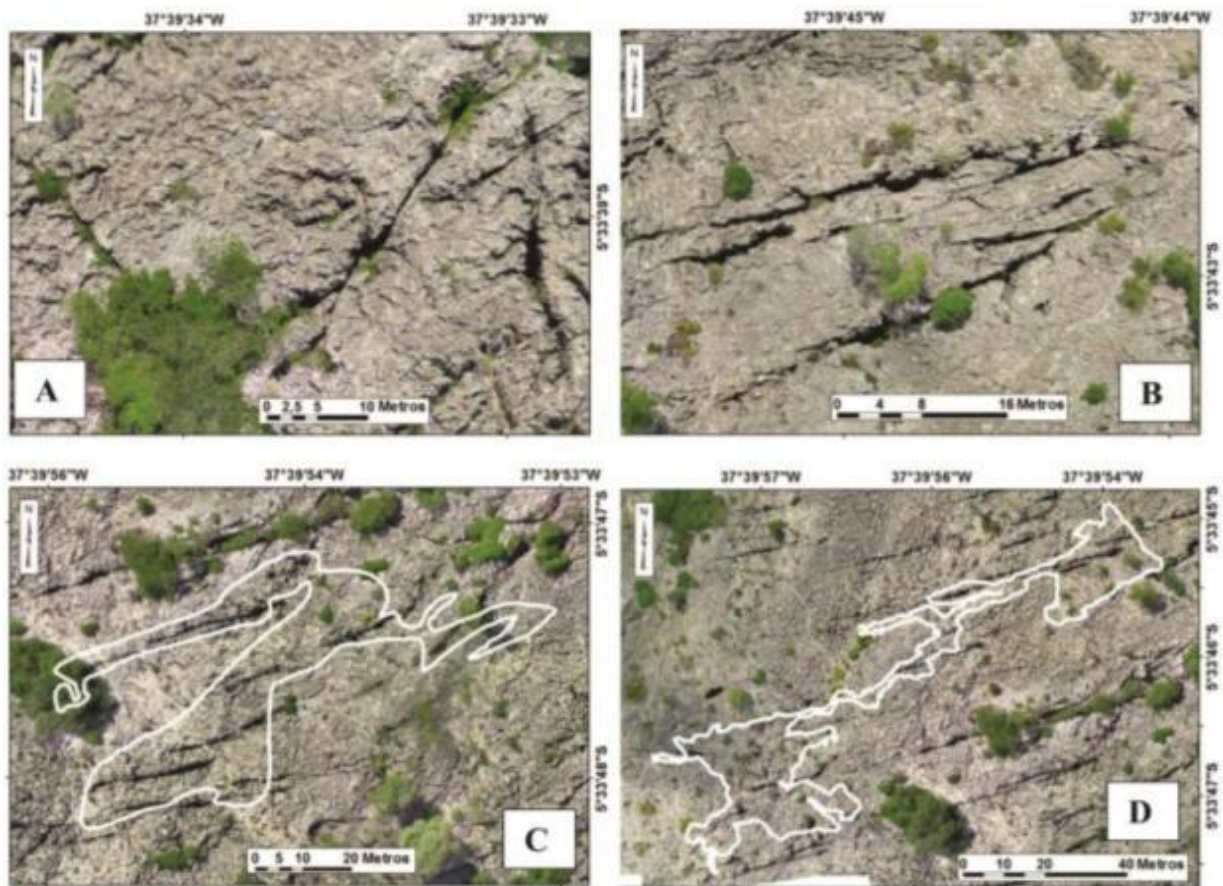


Figura 16. Exemplos de estruturas mistas (compostas), onde o sistema cárstico se desenvolve.

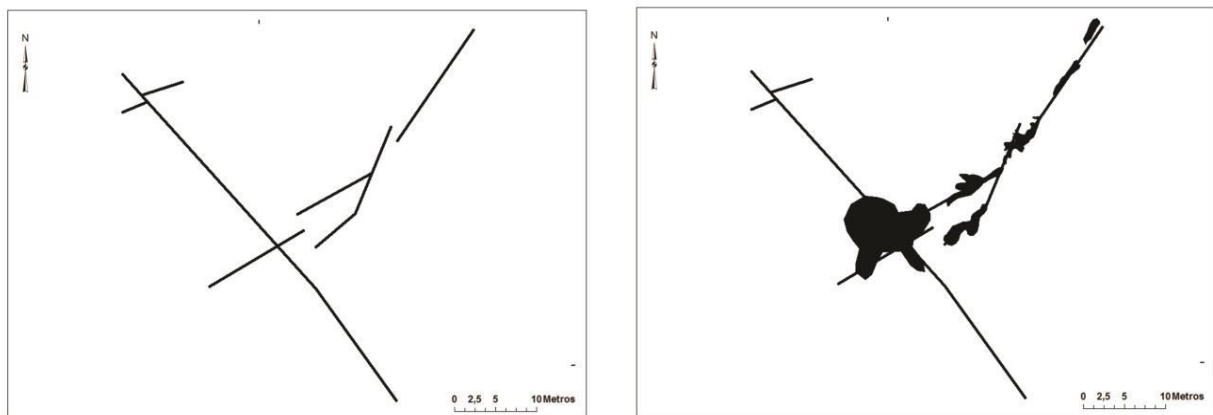


Figura 17. Esquema de formação de sistema misto. (A) Estrutura de encontro de fraturas e terminação de falhas e (B) locais preferenciais de formação de carste na estrutura mista. Esquema desenvolvido a partir da Fig. 16A.

CONCLUSÃO

O processo de carstificação epigênica foi observado ao longo de falhas e juntas, aqui simplificadas num mapa de lineamentos como fraturas. Há um claro condicionamento das fraturas no Lajedo do Rosário, mesmo em diferentes domínios estruturais. A dissolução cárstica ocorre em seis tipos de estruturas tectônicas e um tipo de estrutura atectônica onde há concentração de fraturas e, por

consequência, concentração de dissolução: (1) falhas com *step-over*, (2) interconexão de fraturas, (3) centro das fraturas, (4) terminação das fraturas, (5) fraturas em *echelon*, (6) padrão dentrítico e (7) padrão misto. Sugere-se que estes padrões podem ter implicação na formação do carste em outros sistemas carbonáticos.

AGRADECIMENTOS

Este artigo é resultado de pesquisa desenvolvida ao nível de mestrado pelo 1º autor no Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, com apoio da CAPES pela concessão da bolsa de pesquisa. Os autores agradecem ao projeto PoroCarste, à Petrobras e ao Centro de Pesquisas e Desenvolvimento da Petrobras (CENPES). Agradecem ainda ao Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMbio), Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (Cecav) e ao Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA). É feito ainda um agradecimento especial a Giovanni Bertotti e Kevin Bisdom (Delft University of Technology), parceiros no projeto acima citado, pelas aquisições das imagens do VANT. Os autores agradecem ao editor da revista e aos três revisores anônimos do trabalho pelas contribuições que o engrandeceram enormemente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AULER, A. S.; SMART, P.L.; WANG, X.; PILO, L. B.; EDWARDS, R. L.; CHENG, H. 2009. Cyclic sedimentation in Brazilian caves: Mechanisms and palaeoenvironmental significance. *Geomorphology* (Amsterdam), 106:142-153.
2. CRUZ, J.B.; BENTO, D. M.; BEZERRA, F. H. R.; FREITAS, J. I.; CAMPOS, U. P., SANTOS, D. J. Diagnóstico Espeleológico do Rio Grande do Norte. **Revista Brasileira de Espeleologia**, v. 01, p. 01-24, 2010.
3. ANGELIM, L.A.A., NESI, J.R., TORRES, H.H.F., MEDEIROS, V.C., SANTOS, C.A., VEIGA JÚNIOR, J.P., MENDES, V.A., 2006. Geologia e Recursos Minerais do Estado do Rio Grande do Norte. Texto Explicativo dos Mapas Geológico e de Recursos Minerais do Estado do Rio Grande do Norte. Escala 1:500.000. Recife: CPRM/FAPERN, 2006, 233p.
4. BERTANI, R. T.; COSTA, I. G.; MATOS, R. M. D., 1989. Evolução tectonosedimentar, estilo estrutural e habitat do petróleo na Bacia Potiguar. In: RAJA GABAGLIA, G. P. & MILANI, E. J. (Coordenadores.), **Origem e evolução de bacias sedimentares**. Rio de Janeiro / Petrobras, p. 291-310.
5. SOUZA, S. M. **Atualização da litoestratigrafia da bacia Potiguar**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 32, 1982, Salvador, Bahia: Sociedade Brasileira de Geologia, Anais, 1982, v. 5, p. 2392-2406.

*Manuscrito recebido em: 09 de Outubro de 2014
Revisado e Aceito em: 27 de Abril de 2015*