



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**

IRIS PEREIRA GOMES

**A IMPORTÂNCIA DAS FRATURAS NO DESENVOLVIMENTO
DE FEIÇÕES CÁRSTICAS EM CALCÁRIOS DA FORMAÇÃO
JANDAÍRA (CRETÁCIO DA BACIA POTIGUAR),
FELIPE GUERRA – RN**

FORTALEZA

2008

FICHA CATALOGRÁFICA

Bibliotecária: Francisca Giovânia Freire Barros – CRB-3 / 911

G633i Gomes, Iris Pereira
A importância das fraturas no desenvolvimento de feições
cársticas em calcários da formação Jandaíra (cretácio da Bacia
Potiguar), Felipe Guerra – RN/ --- Fortaleza Natal, 2008.
165p.: il.
Orientador. Prof. Dr. César Ulisses Vieira Veríssimo
Dissertação (Mestrado em Geologia) --- Universidade
Federal do Ceará, Centro de Ciências. Departamento de
Geologia.

1 Geociências. 2. Geologia Regional. 3. Rio Grande do
Norte. I. Veríssimo, César Ulisses Vieira. II. Título
CDD 550

IRIS PEREIRA GOMES

**A IMPORTÂNCIA DAS FRATURAS NO DESENVOLVIMENTO
DE FEIÇÕES CÁRSTICAS EM CALCÁRIOS DA FORMAÇÃO
JANDAÍRA (CRETÁCIO DA BACIA POTIGUAR),
FELIPE GUERRA – RN**

Dissertação submetida à
Coordenação do Curso de Pós-
Graduação em Geologia, da
Universidade Federal do Ceará,
como requisito necessário para
obtenção do título de mestre.

Orientador: Prof. Dr. César Ulisses
Vieira Veríssimo

Co-orientador: Prof. Dr. Francisco
Hilário Rego Bezerra

FORTALEZA

2008

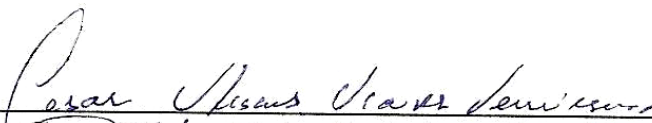
IRIS PEREIRA GOMES

**A IMPORTÂNCIA DAS FRATURAS NO DESENVOLVIMENTO DE
FEIÇÕES CÁRSTICAS EM CALCÁRIOS DA FORMAÇÃO JANDAÍRA
(CRETÁCIO DA BACIA POTIGUAR),
FELIPE GUERRA – RN**


Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Geologia, da Universidade Federal do Ceará, como requisito necessário para obtenção do título de mestre.

Aprovada em: 08 / 05 / 2008 .

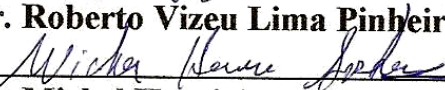
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Cesar Ulisses Vieira Verissimo - (Presidente)



Prof. Dr. Roberto Vizeu Lima Pinheiro - (Membro Externo)



Prof. Dr. Michel Henri Arthaud - (Membro Interno)

Aos professores César e
Hilário, pela amizade e
abnegação prestadas.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio.

À Petrobrás, pelo apoio financeiro e interesse científico na pesquisa.

Às Universidades Federais do Ceará e do Rio Grande do Norte, pela realização deste trabalho.

Ao CECAV/IBAMA pelas informações preciosas, em especial a Jocy B. Cruz.

À empresa Carbomil Química S/A pelas análises químicas.

A todos os professores, pelo tempo concedido e pelas valiosas sugestões ao trabalho.

Aos colegas da turma de mestrado, pelas reflexões, críticas e sugestões recebidas.

À minha família e amigos pela compreensão e paciência.

Aos meus amigos e companheiros de campo Ronaldo Freire e Igor Magalhães, pela grande ajuda.

À Isabelle da UFRN, pelas descrições petrográficas.

À Deus, pela força que fez chegar até aqui e que me fará continuar.

E aos que não mencionei, minhas sinceras desculpas.

“A felicidade aparece para aqueles
que buscam e tentam sempre.
E para aqueles que reconhecem a
importância das pessoas que
passam por suas vidas.”

(Clarice Lispector)

RESUMO

A pesquisa, a nível de mestrado, corresponde a um estudo geológico, estrutural e espeleológico da Formação Jandaíra, pertencente à Bacia Potiguar. O estudo englobou o mapeamento geológico de afloramentos de calcário, bem como a identificação de estruturas tectônicas relacionadas ao caste. A área de estudo é de 11 km², e está localizada no município de Felipe Guerra, estado do Rio Grande do Norte.

A metodologia incluiu primeiramente, uma análise por sensores remotos, em ambiente SIG, usando uma imagem Quickbird. Lineamentos tectônicos foram identificados em três afloramentos principais conhecidos como Lajedo do Arapuá. Em seguida, partiu-se para o mapeamento geológico-estrutural, no qual foram coletados em campo informações sobre as falhas e juntas, tais como: comprimento, profundidade, espaçamento lateral entre fendas (falhas e juntas), atitude, abertura das fraturas, geometria e preenchimento sedimentar. Em função desta descrição foi estabelecido um banco de dados organizado em tabelas no *software Excel*, gerando-se diagramas de rosetas e histogramas. Os dados também foram analisados usando uma modelagem matemática no *software Petbool* do Departamento de Matemática da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, *PUC-Rio*. A técnica representou, em 3D, a densidade, geometria e atitude das falhas e juntas. Por fim, foi realizada a espeleometria da Caverna Arapuá, cujos dados foram correlacionados com as características tectônicas da superfície.

Os resultados mostram que as falhas e as juntas ocorrem em três direções preferenciais: NW-SE, NE-SW e N-S. Este arranjo coincide tanto com os principais sistemas de falhas da Bacia Potiguar, como com a direção de cavernas na área de estudo. Isto indica, sobretudo, que as características do caste na Formação Jandaíra apresentam um forte controle tectônico.

ABSTRACT

The thesis is part a Master of Science degree and it corresponds to a geological, structural, and speleological study of the Jandaíra Formation in the Potiguar Basin. The study includes the geological mapping of limestone outcrops and the identification of tectonic structures and related karst features. The study area is 11 km² and is located in the municipality of Felipe Guerra, state of Rio Grande do Norte.

The methodology included first a GIS-based remote-sensing analysis using Quickbird imagery. Tectonic lineaments were identified in three main outcrops known as *Lajedo do Arapuá*. The next step comprised a structural-geological mapping of outcrops. The structural study comprised the analysis of faults and joints and the measuring of the following parameters: length, depth, width, lateral spacing between fractures (faults or joints), attitude, aperture, geometry, and sedimentary filling. The datasets were organized in the Excel software and represented in rosedigrams and histograms. The data were also analyzed using a stochastic modeling in the Petbool software from the Department of Mathematics of the Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro, PUC-Rio. This technique represented in 3D the density, geometry, and attitude of faults and joints. Finally, a speleologic study of karst (mainly caves) features was carried out. The speleologic data were correlated with tectonic features at surface.

The main results indicate that faults and fractures occur in three directions: NW-SE, NE-SW and N-S. These directions correspond to the major faults in the Potiguar basin and the direction of caves in the study area. The main result of this study indicates that karst features in the Jandaíra Formation present a strong tectonic control.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 – Mapa de localização e acesso à área de pesquisa	21
FIGURA 2.1 – Mapa de relevo do Rio Grande do Norte (IDEMA, 2005)	29
FIGURA 2.2 – Parte do relevo plano a suavemente ondulado da Chapada do Apodi	30
FIGURA 3.1 – Mapa geológico simplificado da Bacia Potiguar (Dantas, 1998)	34
FIGURA 3.2 – Carta estratigráfica da Bacia Potiguar (Araripe & Feijó, 1994 in Nogueira, 2004)	36
FIGURA 3.3 – Abertura e evolução do Atlântico Sul: A) Início da separação continental a partir de uma extensa fratura N-S no supercontinente Gondwana; B) Pólo de rotação no Nordeste do Brasil; C) Pólo de rotação deslocado para Norte do Brasil; D) Predomínio de movimento transcorrente destal; e E) Evento compressivo de direção N-S (Françolin & Szatimari, 1987 in Dantas, 1998)	41
FIGURA 3.4 – Estágios Sin-rift II (A) e Sin-rift III (B) da Bacia Potiguar (Matos, 1992b)	42
FIGURA 3.5 – Passagem do centro de espalhamento oceânico em frente à Bacia Potiguar, resultado de soerguimento seguido de erosão (A) e início de estágio de resfriamento e subsidência da Bacia Potiguar, após passagem de centro de espalhamento (B) (Cremonini & Karner, 1995)	43
FIGURA 4.1 – Sistema de fraturas tectônicas sem movimento aparente, evidenciado por juntas abertas, resultado de um afastamento das paredes das fraturas (Coord. UTM-WGS 84: 653.139/9.388.456)	48
FIGURA 4.2 – Esquema mostrando as quatro famílias de juntas sistemáticas (J_1 , J_2 , J_3 e J_4), que se cruzam (a); e a relação do elipsóide de esforços entre as fraturas de extensão e os estilólitos perpendiculares (b) e paralelos a estratificação (c)	49
FIGURA 4.3 – Juntas não tectônicas representadas por gretas de contração (Coord. UTM-WGS 84: 653.122/ 9.389.170)	49
FIGURA 4.4 – Nível de dissolução paralelo ao plano de estratificação ou S_0 , levando ao deslocamento da superfície de erosão (Coord. UTM-WGS 84: 653.122/9.389.170)	50
FIGURA 4.5 – Formas sinuosas geradas pela dissolução e cristalização do calcário, levando a formação de conjuntos de estalagmites (Coord. UTM-WGS 84: 653.151/9.389.174)	50
FIGURA 4.6 – Histograma de representação das direções das famílias de fraturas, num total de 1.286 medidas tomadas em campo: J_1 (N-S) com 27% do total de fraturas, J_2 (E-W) com apenas 18% e a menor concentração, J_3 (NE-SW) com 32% e a maior concentração e J_4 (NW-SE) com 23%	51
FIGURA 4.7 – Diagrama de roseta ilustrando as maiores concentrações dos planos de fraturas ..	52
FIGURA 4.8 – Junta primitiva, com extensão de dezenas de metros, interceptadas por juntas mais jovens, sem continuidade (Coord. UTM-WGS 84: 651.698/9.389.472)	53
FIGURA 4.9 – Sistemas de juntas exemplificando tipos de terminações: em outras descontinuidades, em rocha e quando ultrapassam os limites do afloramento (ISRM – <i>International Society for Rock Mechanic</i> , 1983)	54
FIGURA 4.10 – Histograma de classificação do comprimento das fraturas, mostrando que estas apresentam tamanhos bastante variáveis, com destaque para a família J_3 com maior concentração na categoria muito grande	55
FIGURA 4.11 – De acordo com a classificação da ISRM, <i>International Society for Rock Mechanic</i> (1983), ocorrem na área tanto juntas persistentes, com comprimento excedente aos limites de exposição da rocha, como não persistentes, com terminações em outras descontinuidades (Coord. UTM-WGS 84: 652.047/9.388.690)	55
FIGURA 4.12 – Levantamento sistemático das juntas pelo método da linha, através da medida das distâncias entre fraturas sucessivas de um mesmo conjunto (a), longo de uma linha de dez metros de comprimento (b), perpendicular a direção de cada uma das quatro famílias identificadas – J_1 , J_2 , J_3 e J_4 (Coord. UTM-WGS 84: 651.645/9.388.380 e 652.000/9.388.814)	56

FIGURA 4.13 – Histograma do espaçamento médio “e” entre fraturas sucessivas de um mesmo conjunto	57
FIGURA 4.14 – Preenchimento representado pela recristalização de calcita ocupando todo plano de fratura (Coord. UTM-WGS 84: 652.109/9.388.662)	59
FIGURA 4.15 – Sedimentos finos inconsolidados em um nível horizontal de dissolução de caverna (Coord. UTM-WGS 84: 652.431/9.388.956)	59
FIGURA 4.16 – Preenchimento na de forma rocha cataclástica ou brecha tectônica, caracterizada pela fragmentação da rocha em blocos angulosos e ausência de estrutura orientada (Coord. UTM-WGS 84: 652.047/9.388.690)	59
FIGURA 4.17 – Histograma mostrando as classes de aberturas encontradas na área, com maior concentração na categoria “muito larga” e a maior quantidade de fraturas representada pela família J ₃ . No alto, junta muito aberta (aproximadamente 10 cm de abertura)	60
FIGURA 4.18 – Mecanismos pós-deformacionais que influenciaram na abertura das descontinuidades: a) Abatimentos de blocos entupindo fraturas (Coord. UTM-WGS 84: 653.060/9.388.812); e b) Formação de lapiás evoluindo para sulcos (Coord. UTM-WGS 84: 653.122/9.389.170)	61
FIGURA 4.19 – Mecanismo pós-deformacional representado pela formação de dolina de dimensões métricas formando um importante sistema de caverna (Coord. UTM-WGS 84: 652.047/9.388.690)	62
FIGURA 4.20 – a) Pequena falha com movimentação destal, materializada pelo aparecimento de fraturas de 2ª ordem, sendo R com sentido de cisalhamento igual ao do plano principal e R' com sentido oposto a este; b) Detalhe mostrando preenchimento em forma de brechas; e c) Esquema de movimento entre o plano C e as fraturas de Riedel R e R' (Coord. UTM-WGS 84: 652.047/9.388.690)	63
FIGURA 4.21 – Histograma da orientação espacial das falhas, com maiores contrações nas direções NS, NE-SW e NW-SE	65
FIGURA 4.22 – Diagrama de roseta com representação espacial das falhas, mostrando variadas direções, que agrupando segundo concentrações N-S, NE-SW e NW-SE	65
FIGURA 4.23 – a) Método de medição da abertura e comprimento das falhas mapeadas; b) Falha classificada como cavernosa (4 m) (Coord. UTM-WGS 84: 652.303/9.389.844 e 653.672/9.388.782)	67
FIGURA 4.24 – Histograma da profundidade das falhas, com maior contração na categoria muito pequena	68
FIGURA 4.25 – Histograma mostrando a correlação entre a profundidade e a orientação espacial das falhas. Observa-se a seguintes informações: (i) não foram registradas falhas de direção E-W; (ii) a maior parte das falhas de direção N-S, enquadra-se na categoria de profundidade “pequena”; (iii) a maior parte das falhas de direção NE-SW e NW-SE, classificam-se como de profundidade “média”; e (iv) Existem fraturas na classe “muito profunda”, ao longo destas três direções preferenciais	69
FIGURA 5.1 – Mapa de afloramentos da área	75
FIGURA 5.2 – Mapa de lineamentos interpretados e mapeados, referente ao afloramento na porção norte da área	76
FIGURA 5.3 – Mapa de lineamentos interpretados e mapeados, referente ao afloramento na porção oeste da área	77
FIGURA 5.4 – Mapa de lineamentos interpretados e mapeados, referente ao afloramento na porção leste da área	78
FIGURA 5.5 – Mapa estrutural proposto por Hackspacher et al. (1985) <i>in</i> Dantas (1998) mostrando que o complexo sistema de lineamentos NE e NW se entrelaça e penetra por quase toda a Bacia Potiguar	80
FIGURA 5.6 – Diagrama de Venn apresentando os operadores <AND>, <NOT>, <OR> e <XOR>	81
FIGURA 5.7 – Representação em 3D da modelagem, mostrando profundidade, comprimento e direção das falhas (a) e juntas (b)	82

FIGURA 5.8 – Visão 3D com três planos de corte ilustrando diversas formas de interseções para as falhas (a) e juntas (b)	82
FIGURA 5.9 – Células geradas quando as estruturas são cortadas por planos de simulação na base (a), numa porção intermediária (b) e no topo (c), mostrando a densidade do terreno que foi preenchida por falhas e fraturas	83
FIGURA 5.10 - Representações do plano XY, mostrando em preto as células que foram cortadas por planos gerados pela simulação. A figura “a” representa o topo e a “b” o centro. A “c” representando a base, indica que a concentração de fraturas diminui com a profundidade e tendem para 3 direções: NW-SE, NE-SW e N-S. Podendo, portanto, desempenhar importante papel na formação de condutos em subsuperfície	84
FIGURA 6.1 – Presença de intraclasto contornado por porosidade intersticial (a); Porosidade intergrão ou entre pelóides esféricos a elipsoidais, envolvidos por matriz micrítica incipiente (b) Porosidade secundária do tipo intragrão, na qual ocorreu a dissolução do próprio grão (c); Foraminífero rotalinídeo (corpo espiralado) em matriz de calcita micrítica (d)	89
FIGURA 6.2 – Cimento em franja ao redor do grão (a); Intraclastos representados por agregado de fragmentos líticos carbonáticos, com resquícios de porosidade entre os grãos (b); Quebra de grão (c); e Porosidade intragrão (d)	90
FIGURA 6.3 – Registros fósseis representados por equinodermas (a), bivalves (b) e briozoários (c)	91
FIGURA 6.4 – Amostra de mão, exibindo porosidade incipiente, com presença de material argiloso ao redor dos poros, indicando alteração do calcário e, conseqüentemente, dissolução (a); Aglomerados de pelóides (b); Fratura preenchida por dolomita (c)	92
FIGURA 6.5 – Amostra de mão de cor creme clara, porosa (a); Recristalização secundária de calcita (b); Possíveis infiltrações de argila (c); e Foraminífero miliólídeo, evidência de ambiente marinho (d)	93
FIGURA 6.6 – Diversas formas de porosidade presente na rocha: vugular (a); intergrão (b); nas dolomitas (c) estilólito poroso (d), estilólito oxidado (e); fratura porosa (f); e fratura preenchida por produto da dissolução do calcário (g)	94
FIGURA 6.7 – Amostra de mão representando a base dos níveis cavernos (a); Fratura cimentada por cimento em mosaico (b); Limonitas e cristalização secundária de calcita (c); Porosidade vugular evoluindo do cimento (d); e Dolomitização (e)	96
FIGURA 6.8 – Amostra de mão do calcário nos níveis mais porosos, mostrando regiões intemperizadas e oxidadas (a); recristalização e dolomitização, sugerindo ser intra-clastos neomorfizado (b); <i>vugs</i> no cimento (c)	97
FIGURA 6.9 – Amostra de mão de coloração amarelada, bastante porosa (a); Porosidade vugular (b); Porosidade intercrystalina (c); Dolomita isolada (d)	98
FIGURA 6.10 – Desenho esquemático mostrando o comportamento do calcário, de acordo com a análise petrográfica. As rochas classificadas como <i>mudstones</i> são as que representam os níveis de maior porosidade, facilmente solúvel, favorável ao desenvolvimento de cavernas. O carbonato cristalino é resultado da recristalização do calcário nesses níveis cavernosos e os <i>wackestone</i> e <i>packestone</i> representam o calcário maciço	99
FIGURA 7.1 – Regiões cársticas carbonáticas do Brasil (Auler et al, 2001) Destaque em vermelho mostrando a localização da Bacia Potiguar, província espeleológica onde encontra-se insedida a área de estudo	104
FIGURA 7.2 – Mapa de ocorrência de cavernas por município de Rio Grande do Norte (CECAV, 2007)	105
FIGURA 7.3 – Abrigo da Quixabeira, caracterizado por fratura preenchida pelo colapso de blocos (Coord. UTM-WGS 84: 653.060 / 9.388.812)	106
FIGURA 7.4 – Entrada do abrigo ao longo de uma fratura, apresentando desenvolvimento apenas vertical (Coord. UTM-WGS 84: 652.941 / 9.389.024)	107
FIGURA 7.5 – Interior do abrigo, pouco desenvolvido, com pequenos espeleotemas (Coord. UTM-WGS 84: 652.941 / 9.389.024)	107

FIGURA 7.6 – Entrada da gruta, com paredes verticais da ordem de 2 m de profundidade (Coord. UTM-WGS 84: 653.068 / 9.389.096)	108
FIGURA 7.7 – Visão externa da entrada da gruta (foto direita) e detalhe mostrando pequenos estalactites (Coord. UTM-WGS 84: 653.151 / 9.389.174)	109
FIGURA 7.8 – Vista panorâmica da extensão da dolina, embora ainda não cartografada (Coord. UTM-WGS 84: 652.047 / 9.388.690)	110
FIGURA 7.9 – Sistema de fraturas radiais e circulares contornando a dolina (Coord. UTM-WGS 84: 652.047 / 9.388.690)	110
FIGURA 7.10 – Foto mostrando a parede de acesso a dolina do Xavier II, onde foram descritas 9 (nove) camadas de rocha calcária. A dolina tem profundidade de cerca de 7,5 m. (Coord. UTM-WGS 84: 651.645 / 9.388.380)	111
FIGURA 7.11 – Dolina sem formação de espeleotemas, com blocos obstruindo a cavidade. Tem cerca de 4 m de profundidade, 6 m de comprimento e 3 m abertura (Coord. UTM-WGS 84: 652.887 / 9.388.868)	112
FIGURA 7.12 – Grande dolina de aproximadamente 20 m de diâmetro, com ambiente cavernícola bem desenvolvido, cortinas de estalagmites, presença de morcegos e blocos caídos por dissolução em toda a caverna (Coord. UTM-WGS 84: 652.431 / 9.388.956)	113
FIGURA 7.13 – Caverna do Arapuá selecionada para a realização de mapeamento topográfico endocárstico	114
FIGURA 7.14 – Pequena dolina de aproximadamente 2,5 m de diâmetro, preenchida por material cavernoso, proveniente da dissolução do calcário (Coord. UTM-WGS 84: 652.303 / 9.389.844, F1)	115
FIGURA 7.15 – Pequeno abrigo, com entrada elipsoidal (1,5 x 0,60 m), encaixada ao longo de uma falha. Possui profundidade de 2 m (Coord. UTM-WGS 84: 652.365 / 9.389.844, F1)	115
FIGURA 7.16 – Gruta com cerca de 1,70 de largura, 2 m de comprimento e 3 m de profundidade, formada pelo colapso de blocos ao longo de uma falha. (Coord. UTM-WGS 84: 652.377 / 9.389.890, F3)	116
FIGURA 7.17 – Cavidade de dissolução com abertura e profundidade de 1 m, também formada ao longo de uma grande falha. (Coord. UTM-WGS 84: 652.377 / 9.389.890, F2)	116
FIGURA 7.18 – Cavidade com acesso estreito, profundidade de 11 m e presença de morcegos, o que sugere potencial para uma possível caverna (Coord. UTM-WGS 84: 653.914 / 9.388.876, F12)	117
FIGURA 7.19 – Ambiente de falhas, com desnível ou rejeito vertical de 1,20 m, provavelmente responsável pela formação de importantes cavidades subterrâneas. Este abrigo caracteriza-se pela presença de morcegos e paredes úmidas, evidenciando o processo de dissolução do calcário (Coord. UTM-WGS 84: 653.672/ 9.388.782, F10)	117
FIGURA 7.20 – Dolina com cerca de 8 m de profundidade e aproximadamente 2,8 m de diâmetro. Como se trata de um ambiente falhado, diversas feições se desenvolveram, desde dolinas, até cavernas e abismos (Coord. UTM-WGS 84: 653.672 / 9.388.782, F10)	118
FIGURA 7.21 – Abismo de 3,30 m de profundidade, largura de 2,5 m nas partes mais estreitas, chegando 7 m nas porções mais largas, com desnível vertical superior a 1 m. (Coord. UTM-WGS 84: 653.849 / 9.388.892, F11)	118
FIGURA 7.22 – Dolina com potencial cavernícola, presença de morcegos e abelhas, com profundidade e diâmetro da ordem de 5 m. (Coord. UTM-WGS 84: 653.962 / 9.388.898, F13)	119
FIGURA 7.23 – Abrigo com desenvolvimento horizontal significativo, altura da ordem de 1 m. A presença de morcegos indica potencial espeleológico (Coord. UTM-WGS 84: 653.6363 / 9.388.732, P57)	119
FIGURA 7.24 – Dolina com comprimento superior a 50 m, direção de eixo maior N-S e profundidade de aproximadamente 10 m. Em seu interior ocorre cavidade com desenvolvimento horizontal significativo, presença de morcegos e espeleotemas. A trena usada como escala mostra 1,5 m de medida. (Coord. UTM-WGS 84: 652.277 / 9.387.728, P26)	120

FIGURA 7.25 – Dolina circular com aproximadamente 20 m de diâmetro e 7 m de profundidade. No mapa geológico esta dolina assume alinhamento com outras duas dolinas, correspondentes aos pontos P10 e P26. Sua base está coberta por blocos, provavelmente decorrente do desabamento da porção superficial do terreno sobre um nível de dissolução. Não foi encontrada vida cavernícola, nem espeleotemas. (Coord. UTM-WGS 84: 651.666 / 9.387.352, P9)	121
FIGURA 7.26 – Dolina com aspecto elíptico, comprimento e largura de aproximadamente 50 m e direção de eixo maior N190° Az. Ocorre alinhada em mapa com as dolinas do P9 e P26 (Coord. UTM-WGS 84: 651.842 / 9.387.456, P10)	121
FIGURA 7.27 – Dolina com cerca de 10 m de profundidade, podendo ser considerada como um abismo. Possui 3 m de diâmetro e vida cavernícola representada por morcegos (Coord. UTM-WGS 84: 653.957 / 9.388.950, F14)	122
FIGURA 7.28 – Lavra clandestina oferecendo perigo de destruição das cavernas. (Foto a direita: Coord. UTM-WGS 84: 651.582 / 9.387.336. Foto a esquerda: Coord. UTM-WGS 84: 653.114 / 9.389.278)	123
FIGURA 7.29 – Detalhe em vermelho mostrando base de extração de petróleo em plena área de pesquisa, locada muito próxima a diversas cavernas	124
FIGURA 8.1 – Visualização ao longe da árvore que dá acesso a entrada da caverna	129
FIGURA 8.2 – Árvore que alcança a superfície através da clarabóia e auxilia na entrada à gruta ..	129
FIGURA 8.3 – Entrada vertical de fácil acesso	129
FIGURA 8.4 – Entrada com abertura e profundidade de aproximadamente 2 m	129
FIGURA 8.5 – Presença de água infiltrada proveniente do exterior da caverna	130
FIGURA 8.6 – Conduto estreito, não permitindo a passagem de um adulto até a lâmina d'água ...	130
FIGURA 8.7 – Passagem alta (cerca de 3 m)	131
FIGURA 8.8 – Passagem baixa (inferior a 1m)	131
FIGURA 8.9 – Planta baixa mostrando as galerias NW-SE e NE-SW e seus respectivos comprimentos e larguras	133
FIGURA 8.10 – Perfil esquemático NW-SE, mostrando a altura e o desnível da galeria	133
FIGURA 8.11 – Estalactites em processo de formação por gotejamento em fendas no teto	134
FIGURA 8.12 – Gotas que aos poucos se sedimentam e cristalizam em anéis, formando tubos cônicos que crescem lentamente em direção ao chão	134
FIGURA 8.13 – Estalictites em forma de bolas	134
FIGURA 8.14 – Estalagmites em processo de formação	135
FIGURA 8.15 – Estalagmite aproximadamente cilíndrica	135
FIGURA 8.16 – Maciço estalagmítico, cerca de 4m de largura por 7 m de comprimento, formado por vários gotejamentos diferentes	135
FIGURA 8.17 – Cortina de rocha, criando parede cheia de ondulações	136
FIGURA 8.18 – Fendas (a), cavidades no teto (b) e estalagmite semelhante a uma imagem sacra (c)	137
FIGURA 8.19 – Árvore na entrada da caverna (a) e raízes que alcançam seu interior (b)	138
FIGURA 8.20 – Fauna representada por animais <u>Troglóxenos</u> (utilizam a caverna como abrigo, reprodução ou alimentação. Ex.: morcegos), <u>Troglóbios</u> (vida exclusivamente cavernícola, sem pigmentação, visão atrofiada ou ausente, e órgãos olfativos sensíveis. Ex: moluscos) e <u>Troglófilos</u> (adaptados para viver toda sua vida dentro das cavernas. Ex.: aracnídeos e insetos) ..	139
FIGURA 8.21 – Ossos de um animal, bem preservados, com leve incrustação na rocha	140
FIGURA 8.22 – Elevada porosidade da rocha permitindo a ação rápida da água (a) e planos de estratificação alargados pelo escoamento da água, formando cavidades na rocha (b)	142
FIGURA 8.23 – Conformação de grandes blocos colapsados dentro da caverna pela atuação da gravidade	143

FIGURA 8. 24 – Seção longitudinal esquemática da Gruta Arapuá, ilustrando o processo de dissolução do calcário	144
FIGURA 8.25 – Metodologia aplicada no levantamento topográfico da caverna: leituras tomadas (a) e distribuição das estações (b)	146
FIGURA 8.26 – Equipe topográfica em uma base fixa no interior da caverna	147
FIGURA 8.27 – Medição de fraturas no teto da caverna	147
FIGURA 8.28 – Medida de estruturas em superfície utilizando GPS geodésico	147
FIGURA 8.29 – Modelo digital do terreno a partir de dados georeferenciados utilizando-se equipamento geodésico de precisão. A figura mostra características de um terreno ruiforme, com altos e baixos, proveniente da dissolução do calcário	148
Figura 8.30 – Diagramas de rosetas mostrando a frequência acumulada das direções levantadas em superfície com GPS Geodésico (a) e no interior da caverna (b)	149
Figura 8.31 – Distribuição, em planta, das fraturas externas da caverna, locadas com GPS geodésico	150
Figura 8.32 – Distribuição, em planta, das fraturas internas da caverna, medidas com trena e bússola	151

LISTA DE QUADROS

QUADRO 6.1 – Classificação para rochas carbonáticas proposta por Dunham (1962)	87
QUADRO 6.2 – Classificação para rochas carbonáticas proposta por Folk (1959, 1962)	87
QUADRO 8.1 – Análise química de amostras da caverna (topo, base e intermediário) e de pontos estratégicos da área, onde também ocorrem cavidades subterrâneas, coletadas em nove camadas distintas, até uma profundidade de 7,5 m, ordenadas da base para o topo	145

LISTA DE TABELAS

TABELA 4.1 – CLASSES DE COMPRIMENTO SEGUNDO ISRM – <i>INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANIC</i> , 1983	54
TABELA 4.2 – CLASSES DE ESPAÇAMENTO MÉDIO SEGUNDO ISRM – <i>INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANIC</i> , 1983	57
TABELA 4.3 – CLASSES DE ABERTURA SEGUNDO ISRM – <i>INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANIC</i> , 1983)	60
TABELA 4.4 – CLASSES DE PROFUNDIDADE SEGUNDO ISRM – <i>INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANIC</i> , 1983	68

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	.....
RESUMO	.....
ABSTRACT	.....
LISTA DE FIGURAS	.....
LISTA DE QUADROS	.....
LISTA DE TABELAS	.....
1 INTRODUÇÃO	.....
1.1 Apresentação	.....
1.2 Localização e Acesso à Área de Pesquisa	.....
1.3 Justificativa	.....
1.4 Objetivos	.....
1.4.1 Objetivo Principal	.....
1.4.2 Objetivos Específicos	.....
1.5 Metodologia da Pesquisa	.....
1.6 Aspectos Fisiográficos	.....
1.6.1 Clima	.....
1.6.2 Vegetação	.....
1.6.3 Solos	.....
1.6.4 Hidrografia	.....
1.6.4.1 Águas Superficiais	.....
1.6.4.2 Águas Subterrâneas	.....
1.7 Aspectos Sócio-Econômicos	.....
2 GEOMORFOLOGIA	.....
2.1 A Chapada do Apodi	.....
3 GEOLOGIA REGIONAL	.....
3.1 Arcabouço Estratigráfico da Bacia	.....
3.1.1 Fase <i>Rift</i> (Neocomiano/Eoaptiano)	.....
3.1.2 Fase Transicional (Neoaptiano/Eoalbiano)	.....
3.1.3 Fase de Deriva Continental (Albiano/Holoceno)	.....
3.1.3.1 Fase Transgressiva	.....
3.1.3.2 Fase Regressiva	.....
3.1.4 Magmatismo	.....
3.2 Evolução Tectônica da Bacia	.....
3.2.1 Evolução Mesozóica	.....
3.2.2 Evolução Cenozóica	.....
4 GEOLOGIA ESTRUTURAL	.....
4.1 Parâmetros Descritivos das Descontinuidades	.....
4.1.1 As Juntas	.....
4.1.1.1 Origem	.....
4.1.1.2 Orientação Espacial	.....

4.1.1.3	Persistência
4.1.1.4	Espaçamento
4.1.1.5	Abertura
4.1.2	As Falhas
4.1.2.1	Origem
4.1.2.2	Orientação Espacial
4.1.2.3	Persistência
4.1.2.4	Espaçamento
4.1.2.5	Abertura
4.1.2.6	Profundidade
4.1	Juntas x Falhas
5	ANÁLISE DE SENSOR REMOTO
5.1	Foto-interpretação da Imagem
5.1.1	Lineamentos Interpretados
5.1.2	Lineamentos Mapeados
5.1.3	Interpretação Integrada
5.2	Modelagem Boleana
6	PETROGRAFIA
6.1	Classificação e nomenclatura
6.1.1	<i>Packestone</i> intraclástico (Dunham, 1962) ou Intramicrito (Folk, 1959)
6.1.2	<i>Packestone</i> Intraclástico (Dunham, 1962) ou Intraespatito (Folk, 1959)
6.1.3	<i>Wackestone</i> Pelóidal (Dunham, 1962) ou Pelmicrito (Folk, 1959)
6.1.4	<i>Mudstone</i> bioclástico (Dunham, 1962) ou Dismicrito (Folk, 1959)
6.1.5	<i>Mudstone</i> Dolomitizado (Dunham, 1962) ou Micrito (Folk, 1959)
6.1.6	<i>Mudstone</i> Pelóidal (Dunham, 1962) ou Dismicrito Folk (1959)
6.1.7	Carbonato Cristalino (Dunham, 1962)
6.2	Interpretação da Análise Petrográfica
7	DIAGNÓSTICO ESPELEOLOGICO DA ÁREA
7.1	Breve Histórico
7.1.1	Cavernas no Brasil
7.1.2	Cavernas em Felipe Guerra
7.1.3	Cavernas Registradas Pelo CECAV.....
7.1.4	Novas Cavernas Descobertas
7.2	Impactos Ambientais
7.2.1	Indústria da Cal
7.2.2	Exploração do Petróleo
7.2.3	Assentamento Rural
7.2.4	Turistas Desconscientizados
7.3	Importância Espeleológica x Preservação
8.	ESPELEOMETRIA DA CAVERNA ARAPUÁ
8.1	Características
8.1.1	Umidade
8.1.2	Espaços Internos

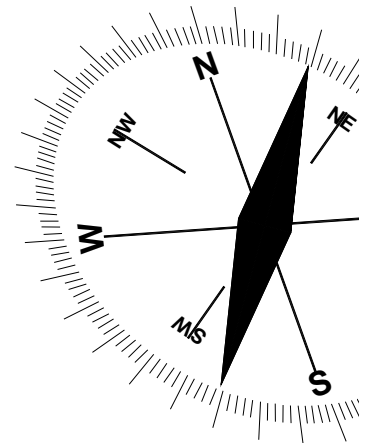
8.1.3 Espeleotemas	
8.1.4 Fauna e Flora	
8.1.5 Registros Fósseis	
8.2 Gênese	
8.3 Levantamento Topográfico da Caverna	
9. CONCLUSÕES	
10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	

ANEXO I: MAPA GEOLOGICO ESTRUTURAL E DE PONTOS

ANEXO II: TOPOGRAFIA DA CAVERNA

Capítulo 01

INTRODUÇÃO



1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

A pesquisa em apreço envolve o estudo geológico, estrutural e espeleológico de uma área localizada no município de Felipe Guerra, porção oeste da Bacia Potiguar. Na região ressaltam-se sistemas cársticos, com desenvolvimento das maiores cavernas naturais, espeleotemas e relevos ruiformes do Estado do Rio Grande do Norte, produzidos pela ação geológica da água e do tempo em rochas carbonáticas. Trata-se de um território pouco estudado e que se encontra bem preservado, tornando-se ainda mais atrativo pelo fato de constituir um desafio à novas descobertas.

O presente trabalho, realizado através de uma parceria entre a Universidade Federal do Ceará e a Universidade Federal Rio Grande do Norte, com o subsídio do Projeto Poro-Vugs, financiado pela Petrobrás, pretende contribuir com informações geológicas acerca das rochas calcárias fraturadas da região, acreditando na grande importância da estruturação frágil no controle da paisagem cárstica.

1.2 Localização e Acesso à Área de Pesquisa

O estudo concentra-se na localidade de Arapuá, no município de Felipe Guerra, Estado do Rio Grande do Norte (Figura 1.1).

O município de Felipe Guerra situa-se no Oeste Potiguar, na microrregião Chapada do Apodi. Limita-se com os municípios de Governador Dix-Sept Rosado a leste, Apodi a oeste e Caraubas a sul. Abrange uma área total de 282 km², inseridos nas folhas Apodi (SB.24-X-C-VI) e Quixeré (SB.24-X-C-III), editadas na escala 1:100.000 pela Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste – SUDENE (1982).

O acesso à sede do município, a partir de Fortaleza, pode ser efetuado através de rodovias pavimentadas em boas condições de tráfego. Inicialmente toma-se a BR-116 até o cruzamento com a BR-304, seguindo-se por esta até o município de Mossoró, finalizando o roteiro pela BR-405 até o município de Felipe Guerra, e

deste, percorrendo-se cerca e 17 km em vias vicinais até a área de pesquisa(Figura 1.1).

A área alvo do estudo abrange 11 km², na qual foi realizado um mapeamento geológico na escala 1:10.000, estando definido pelos seguintes vértices, segundo coordenadas UTM – WGS 84 (Figura 1.1):

- V1 (650.750/9.390.150);
- V2 (654.500/9.390.150);
- V3 (654.500/9.387.200); e
- V4 (650.750/9.387.200).

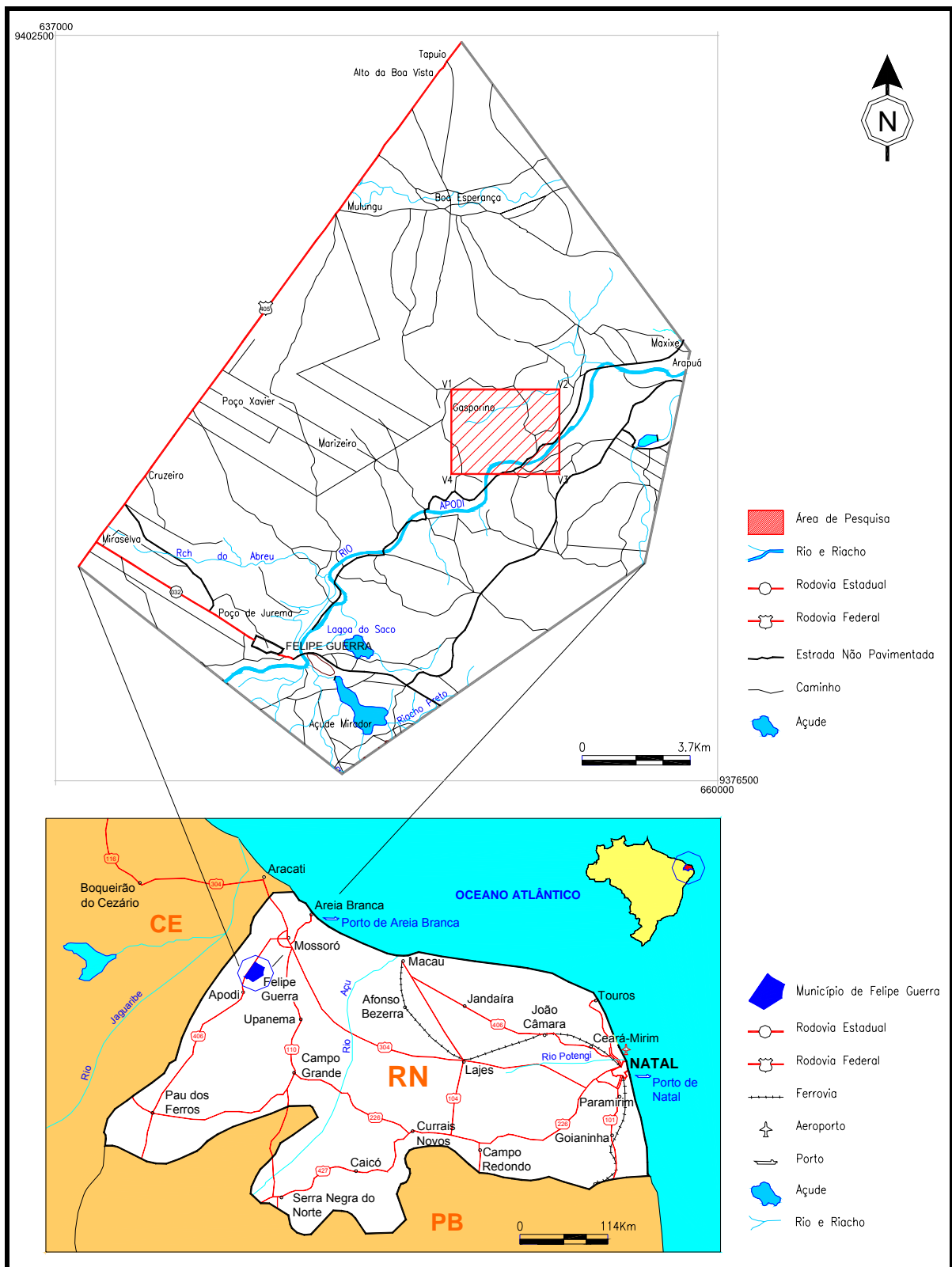


FIGURA 1.1 – Mapa de localização e acesso à área de pesquisa.

1.3 Justificativa

Cerca de 7% do território brasileiro é ocupado por rochas carbonáticas, representando uma importante paisagem do país (Karmann, 2003). Hoje muitos grupos de pesquisadores promovem investigações geológicas acerca do carste da Bacia Potiguar como um todo, contribuindo com significativa quantidade de dados sobre sua história evolutiva.

No município de Felipe Guerra são encontradas as maiores cavidades subterrâneas do Estado do Rio Grande do Norte. Atualmente existem 88 cavernas e 41 abrigos cadastrados pelo Centro Nacional de Estudo, Prospecção e Manejo de Cavernas – CECAV/IBAMA. A área foi escolhida por possuir grande quantidade de cavernas, fato este que permite a correlação dos dados levantados em superfície com os de subsuperfície.

A Universidade Federal do Ceará – UFC, ciente da necessidade de um maior direcionamento de pesquisas voltadas aos terrenos carbonáticos fraturados, pretende através deste trabalho, contribuir com interpretações acerca do controle tectônico sobre a formação de potenciais espeleológicos da região. É neste contexto que o presente projeto, além de cumprir as obrigações de uma dissertação de Mestrado em Geologia, também fornece dados científicos essenciais de uma área carente de conhecimento geológico.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo Principal

O estudo teve como objetivo principal determinar a importância das fraturas na formação de feições cársticas e suas implicações para a gênese das cavernas do calcário Jandaíra, no município de Felipe Guerra – RN.

1.4.2 Objetivos Específicos

Para alcançar estes fins, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Realizar mapeamento geológico das rochas aflorantes;
- Identificar e estabelecer relações entre o controle das estruturas na

- gênese das cavernas existentes na área;
- Descrever o potencial espeleológico da área, localizando as cavidades já identificadas e as novas ocorrências de cavernas, com intuito de serem alvos de futuras pesquisas;
 - Executar a topografia subterrânea da caverna mais representativa da área;
 - Sistematizar os dados geológicos estruturais coletados em um inventário descritivo básico;
 - Alimentar com informações uma “Base de Dados Georreferenciados das Cavidades Subterrâneas” encontradas;
 - Descrever petrologicamente e classificar a microporosidade o calcário;
 - Caracterizar a composição química do calcário em seus diferentes níveis no interior das cavernas; e
 - Confeccionar mapa espeleológico da caverna topografada na escala de 1:200 e mapas de caráter geológico-estrutural e de pontos na escala de 1:10.000 da área com um todo, acoplando-os ao documento final do trabalho, a dissertação de mestrado.

1.5 Metodologia da Pesquisa

A sistemática aplicada para a execução do referido projeto, constou inicialmente da pesquisa de material bibliográfico sobre a geologia da Bacia Potiguar.

Em seguida, realizou-se a análise em imagem de sensores remotos da área, cedida pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA, para uma pré-análise estrutural.

Concluída esta fase, desenvolveram-se quatro etapas de campo, no período de janeiro a agosto de 2007, para o reconhecimento e mapeamento geológico da área, totalizando vinte e quatro dias efetivos de campo, ocorridos em fases alternadas de seis dias. As três primeiras viagens tiveram a finalidade de identificar e cartografar os diversos sistemas de juntas e falhas, segundo parâmetros descritivos, tais como: persistência, orientação espacial, espaçamento e abertura.

Concomitantemente ao mapeamento geológico também foram feitas descrições das cavernas, além da coleta e seleção de amostras para análises petrográficas, químicas e da porosidade do calcário.

Em função deste estudo foi estabelecido um banco de dados para correlacionar a influência dessas estruturas na formação de superfícies de dissolução e, conseqüentemente, no desenvolvimento de cavidades. Por fim, para encerrar a etapa de campo, numa quarta viagem, foi selecionada uma das cavernas encontradas para o levantamento de sua topografia subterrânea, enquadrando-as dentro do contexto geológico regional.

Os trabalhos de campo intercalaram-se aos de escritório de acordo com a programação elaborada para o projeto, a fim de possibilitar a consolidação dos dados obtidos no terreno. Com o término das viagens a campo, a pesquisa voltou-se à elaboração dos mapas geológicos e de pontos e a preparação de amostras para análises laboratoriais.

Em laboratórios foram realizadas as seguintes atividades:

- (i) análises petrográficas e da microporosidade do calcário em 30 lâminas delgadas, confeccionadas no laboratório de petrografia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Para a realização destas seções delgadas, tornou-se necessária a aplicação de técnicas de impregnação com resina plástica azul, para melhor definir a porosidade; e
- (ii) análises químicas realizadas em 12 amostras, no laboratório da Carbomil Química S/A, de acordo com a norma técnica NBR 6473 – Cal Virgem e Cal Hidratada (2003), para quantificar óxidos de cálcio (CaO), magnésio (MgO) e sílica (SiO₂).

Finalmente, os subsídios de campo e laboratório permitiram a composição de um banco de dados, após junção das informações coletadas. Esses dados, devidamente integrados e tratados, possibilitaram a elaboração do documento final, a presente dissertação.

1.6 Aspectos Fisiográficos

1.6.1 Clima

O município possui clima do tipo quente e semi-árido, com irregularidades nas precipitações, decorrentes da má distribuição do regime das chuvas.

Apresenta umidade relativa média anual de 68%, com apenas dois tipos de estações: uma seca, durante os meses de junho a dezembro e outra chuvosa nos meses de janeiro a maio, com máximas pluviométricas em março e abril. As precipitações em média variam de 600 a 750 mm anuais e as temperaturas oscilam entre 23°C (média das mínimas) e 29°C (média das máximas), com média anual em torno de 26°C (IDEMA, 2005).

1.6.2 Vegetação

Quanto à formação vegetal, surgem dois tipos predominantes:

1. Caatinga Hiperxerófila – também conhecida como caatinga arbórea aberta. Caracteriza-se por possuir vegetação de caráter seco com abundância de cactáceas e plantas de porte baixo, distribuídas irregularmente em áreas pediplanadas. As espécies mais comuns são: catingueira, feijó, mororó, jurema preta, mofumbo, pinhão roxo, facheiro, faveleiro, xique-xique, imbuzeiro e marmeleiro; e
2. Carnaubal – vegetação natural onde a espécie predominante é a palmeira ou carnaúba. Os carnaubais são espaçados e habitam ambientes de solos argilosos, aluviões e margens de rios, com capacidade de suportar lugares alagados e elevados teores de salinidade, o que é comum na região da caatinga (IDEMA, 2005).

1.6.3 Solos

Segundo IDEMA (2005), os solos que ocorrem na região são classificados como: chernossolos e solos aluviais.

Os chernossolos (rendzinas), localizados na Chapada do Apodi, são solos alcalinos rasos, moderado à imperfeitamente drenados, derivados do calcário. A

marcante presença de fragmentos calcários constitui forte potencial de nutrientes para as plantas.

Os solos aluvionares são pouco desenvolvidos, originados de deposições recentes de natureza diversa. São medianamente profundos e encontram-se ao longo das margens do rio Apodi.

1.6.4 Hidrografia

1.6.4.1 Águas Superficiais

Felipe Guerra encontra-se totalmente inserido nos domínios da Bacia Hidrográfica do Rio Apodi-Mossoró, que o atravessa na direção SW-NE. Seus principais tributários são os rios: do Alazão, do Meio, do Abreu e Preto. Não existem na região açudes de grande porte e todos os cursos d' água são intermitentes. Entretanto, podem ser citados como reservatórios de água, a Barragem Mirador (685.000m³/comunitário) e a lagoa do Saco (CPRM, 2005).

1.6.4.2. Águas Subterrâneas

Segundo a CPRM – Serviço Geológico do Brasil (2005), o município de Felipe Guerra está inserido no Domínio Hidrogeológico Intersticial e Cárstico-Fissural. O Domínio Intersticial é composto de rochas sedimentares da Formação Açú e dos Depósitos Aluvionares. O Domínio Cárstico-fissural é constituído pelos calcários da Formação Jandaira.

O município consta da existência de 39 pontos d' água, sendo todos poços tubulares. O uso da água destina-se ao consumo doméstico primário (consumo humano para beber) e secundário (consumo humano para uso geral), agrícola, animal e outros usos.

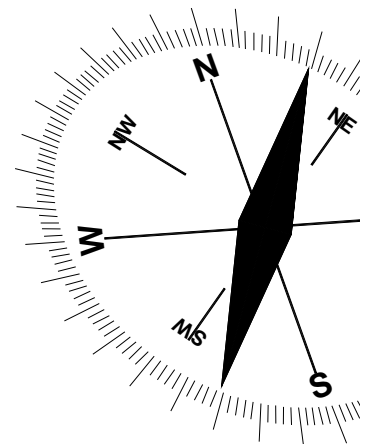
1.7 Aspectos Sócio-Econômicos

Segundo o censo de 2000, o município de Felipe Guerra tem uma população total residente de 5.534 habitantes, com densidade demográfica de 19,62 hab/km².

As principais atividades econômicas são: agropecuária, extração de petróleo e gás natural, extrativismo e comércio. Em relação à infra-estrutura, o município dispõe de hotéis, pousadas, agência bancária, correios, hospitais, escolas de ensino municipal e estadual, abastecido de água potável e energia elétrica (IDEMA, 2005).

Capítulo 02

GEOMORFOLOGIA



2 GEOMORFOLOGIA

Segundo IDEMA (2005) existem grandes variedades de formas de relevo no Domínio Rio Grande do Norte, as principais são: Planície Costeira, Planícies Fluviais, Tabuleiros Costeiros, Depressão Sub-Litorânea, Planalto da Borborema, Depressão Sertaneja, Chapada do Apodi e Chapada da Serra Verde (Figura 2.1).

A integração entre processos tectônicos e mudanças climáticas que ocorreram ao longo de milhões de anos é de fundamental importância para a composição histórica do relevo. A unidade geomorfológica de abrangência do presente trabalho corresponde Chapada do Apodi. Segue-se com uma breve descrição de suas características, bem como das formações calcárias presentes na área e possíveis configurações futuras.

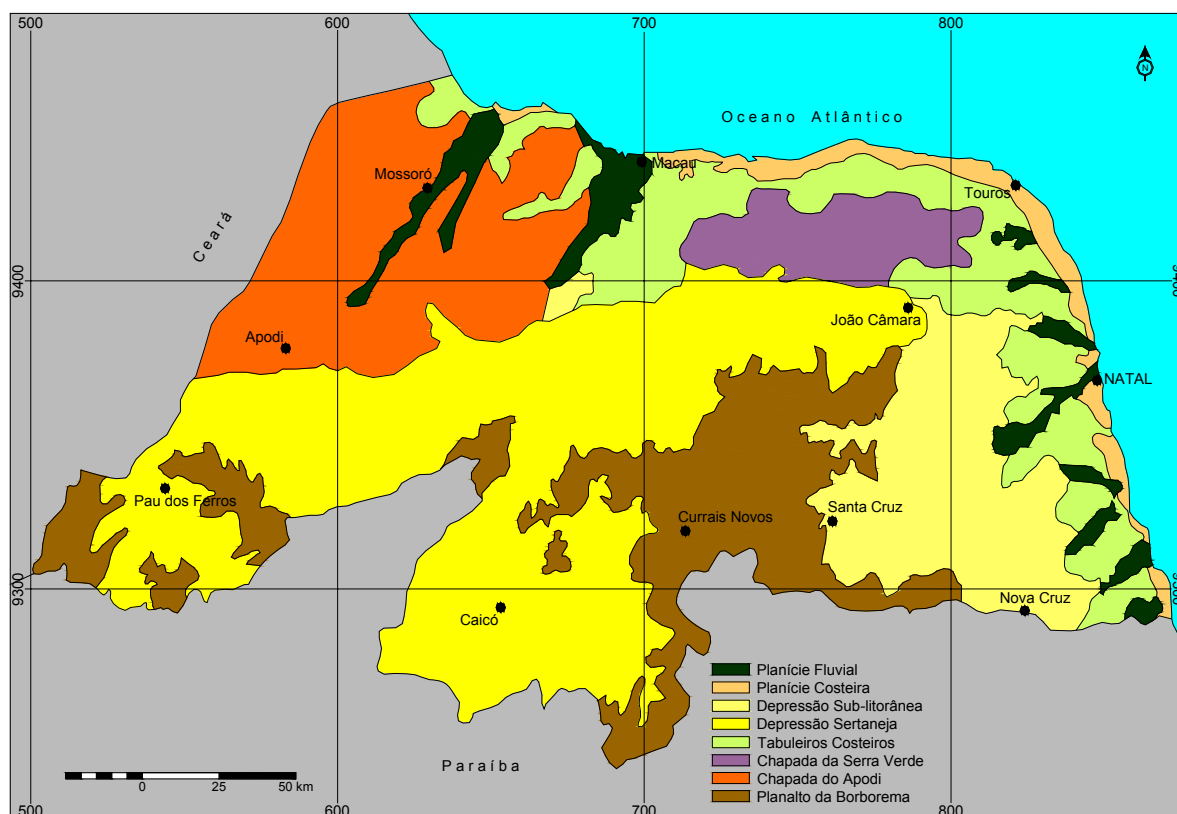


FIGURA 2.1 – Mapa de relevo do Rio Grande do Norte (IDEMA, 2005).

2.1 A Chapada do Apodi

Feição geológica que se estende entre os cursos inferiores dos rios Jaguaribe e Açu, sendo atravessada pelo Rio Apodi. Caracteriza-se por constituir relevo plano a suavemente ondulado, com cotas entre 10 a 150 m de altitude, aumentando gradativamente do litoral para o interior, com maior elevação à oeste (Figura 2.2). Apresenta superfície bem conservada, capeada por calcários pertencentes à Formação Jandaíra (Tutoriano-Capaniano). O topo é levemente rampeado para Norte, conferindo ao relevo um aspecto cuestiforme, com drenagem não concentrada devido a grande permeabilidade das rochas calcárias. Esse relevo monótono possui alguns vales abertos, de direção principal NNE-SSW, correspondendo à lineamentos estruturais do embasamento cristalino (vales dos rios Apodi-Mossoró e Piranhas Açu) e vales de menor expressão, com orientação aproximada N-S. Estes vales de menor expressão as vezes cruzam as estruturas regionais de maneira transversal (PROASNE, 2006).



FIGURA 2.2 – Parte do relevo plano a suavemente ondulado da Chapada do Apodi.

A área onde se concentra o estudo compreende um relevo cárstico formado por lapiás, dolinas, cavernas e estruturas ruiformes produzidas pela ação geológica da água subterrânea e superficial sobre rochas solúveis (calcários). Serão descritos aqui diversas formas cársticas presentes na área, desde o exocarste ao endocarste. O primeiro representa os relevos superficiais e o segundo caracteriza as formas subterrâneas de domínio da espeleologia.

Observa-se que o relevo exocárstico é resultado, na maioria das vezes, da evolução do endocarste (abatimentos). No domínio das formas exocársticas destacam-se as feições negativas, como dolinas e as formas recentes de pequena dimensão, como lapiás.

As dolinas são depressões fechadas e típicas na paisagem, geralmente do tipo abatimento, com configuração circular ou elíptica, de dimensões métricas tanto em diâmetro como em comprimento.

As lapiás são caneluras de espessura centimétrica, que sulcam a superfície da rocha cárstica. Na área são vistos campos de lapiás, que correspondem a grandes superfícies recobertas por lapiesamento. O canalículo ocorre em forma de “V”, com comprimentos métricos e padrão retangular, em paralelo ao intenso sistema de fraturamento existente na área.

O endocarste é caracterizado pelo ambiente subterrâneo, com cavernas ornamentadas por exuberantes espeleotemas (colunas, cortinas, estalactites e estalagmites). Na área a morfologia desses condutos é controlada por uma hierarquia de influências, dentre as quais estão, principalmente, a hidrologia subterrânea, o grau de solubilidade da rocha e o seu padrão estrutural.

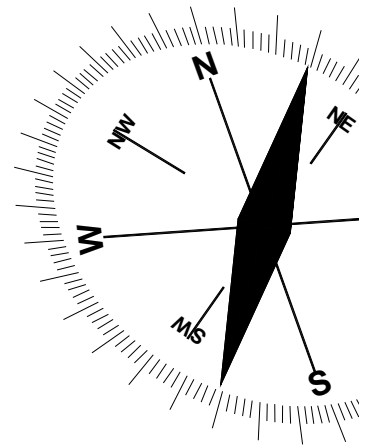
Em cada uma das fases evolutivas de uma caverna, tem-se um tipo característico da morfologia. Na sua fase inicial, predomina a corrosão. Para exercer a ação corrosiva a água necessita estar impregnada de CO₂, e de tempo, pois uma circulação rápida produz erosão e não corrosão.

Com a erosão aparecendo, a caverna aumenta suas dimensões, dando início à fase *juvenil*, Quando se começa a produzir galerias e a água circula livremente, surge a morfologia de afundamento, onde a caverna atinge sua *maturidade*. Nessa etapa, a água, com grande poder dissolvente, chega às fendas carregando carbonato de cálcio suficiente para iniciar as primeiras formas de reconstrução, as estalactites. As estalagmites vêm em seguida, pois dependem da circulação inferior. A caverna entra na sua última fase evolutiva, originando a morfologia senil, com abundantes espeleotemas.

Segundo Kohler *in* Guerra e Cunha (1998), a evolução de um carste no tempo leva a sua dissolução total e absoluta. Trata-se de um processo dinâmico enquanto houver água e rocha. Assim a evolução de uma paisagem cárstica não é um fenômeno estático. O processo tem seu nascimento e desenvolvimento até alcançar a maturidade, quando entra em estado destrutivo até desaparecer.

Capítulo 03

GEOLOGIA REGIONAL



3 GEOLOGIA REGIONAL

O presente estudo encontra-se localizado no contexto geológico da Bacia Potiguar, extremo nordeste do Brasil. Diversos trabalhos abordam sua história evolutiva, mas muitos aspectos ainda não foram explicados com satisfação.

Segundo *Françolin & Szatmari (1989) in Dantas (1998)*, a Bacia Potiguar é uma bacia sedimentar do tipo *rift* originada pela fragmentação do supercontinente *Gondwana*. Teve início ao final do Jurássico, estando sua origem diretamente ligada a formação do Atlântico Sul.

O domínio de abrangência da Bacia Potiguar é de 48.000 km², englobando parte dos estados do Rio Grande do Norte e Ceará. Trata-se de uma região de transição entre o continente e o oceano, com porção emersa de 21.500 km² e submersa de 26.500 km², estendendo-se até a isóbata de -2000 m. Desenvolveu-se sobre um substrato de rochas pré-cambrianas pertencentes à Província Borborema, limitando-se ao sul e oeste com rochas do embasamento cristalino, ao norte e leste com o Oceano Atlântico (Figura 3.1).

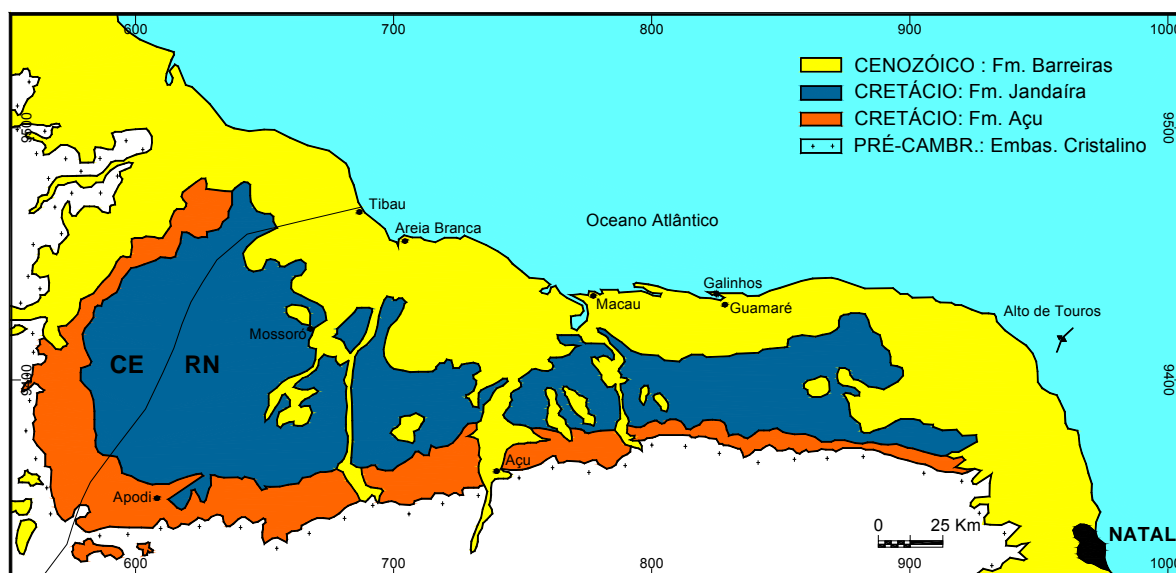


FIGURA 3.1 – Mapa geológico simplificado da Bacia Potiguar (Dantas, 1998).

3.1 Arcabouço Estratigráfico da Bacia

Atualmente, a coluna estratigráfica mais utilizada é aquela elaborada por Araripe & Feijó (1994) *in* Nogueira (2004), que dividiram a Bacia Potiguar em três grupos, distribuídos da base para o topo da seguinte forma (Figura 3.2):

- (i) Grupo Areia Branca – predominantemente siliciclástico, engloba as Formações Pendência, Pescada e Alagamar.
- (ii) Grupo Apodi – com significativo aumento de rochas carbonáticas para o topo, é representado pelas Formações Açú, Ponta do Mel, Jandaíra e Ubarana.
- (iii) Grupo Agulha – de composição siliciclástica e carbonática, constituído pelas Formações Ubarana, Guamaré, Tibau e Barreiras.

O preenchimento sedimentar da bacia está intimamente relacionado com as diferentes fases de sua evolução tectônica, das quais são reconhecidas pelo menos três importantes estágios em resposta à dinâmica das placas tectônicas ocorridas durante o início da fragmentação do *Gondwana*. Estes estágios foram denominados de: fase rift, fase transicional e fase de deriva continental. A história teve início no Neocomiano e cada uma dessas fases foi responsável, respectivamente, pela deposição sedimentar das megassequências continental, transicional e marinha (Chang *et al*, 1992 *in* Pessoa Neto, 2003).

3.1.1 Fase *Rift* (Neocomiano/Eoaptiano)

Caracteriza-se por um regime tectônico rúptil distensivo, com afinamento crustal e formação de *grabens* assimétricos. Nesta fase desenvolveram-se bacias tipo *rift* intracontinentais controlados por grandes falhas normais e de transferência, definindo meio *grabens*. Neste período foram gerados todos os sistemas de *riffts* cretáceos do nordeste brasileiro, também descrito como um período tectônico marcado por altas taxas de subsidência e extensão litosférica.

Na Bacia Potiguar, esta fase é representada por uma megassequência continental formada pelos sedimentos das Formações Pendência e Pescada.

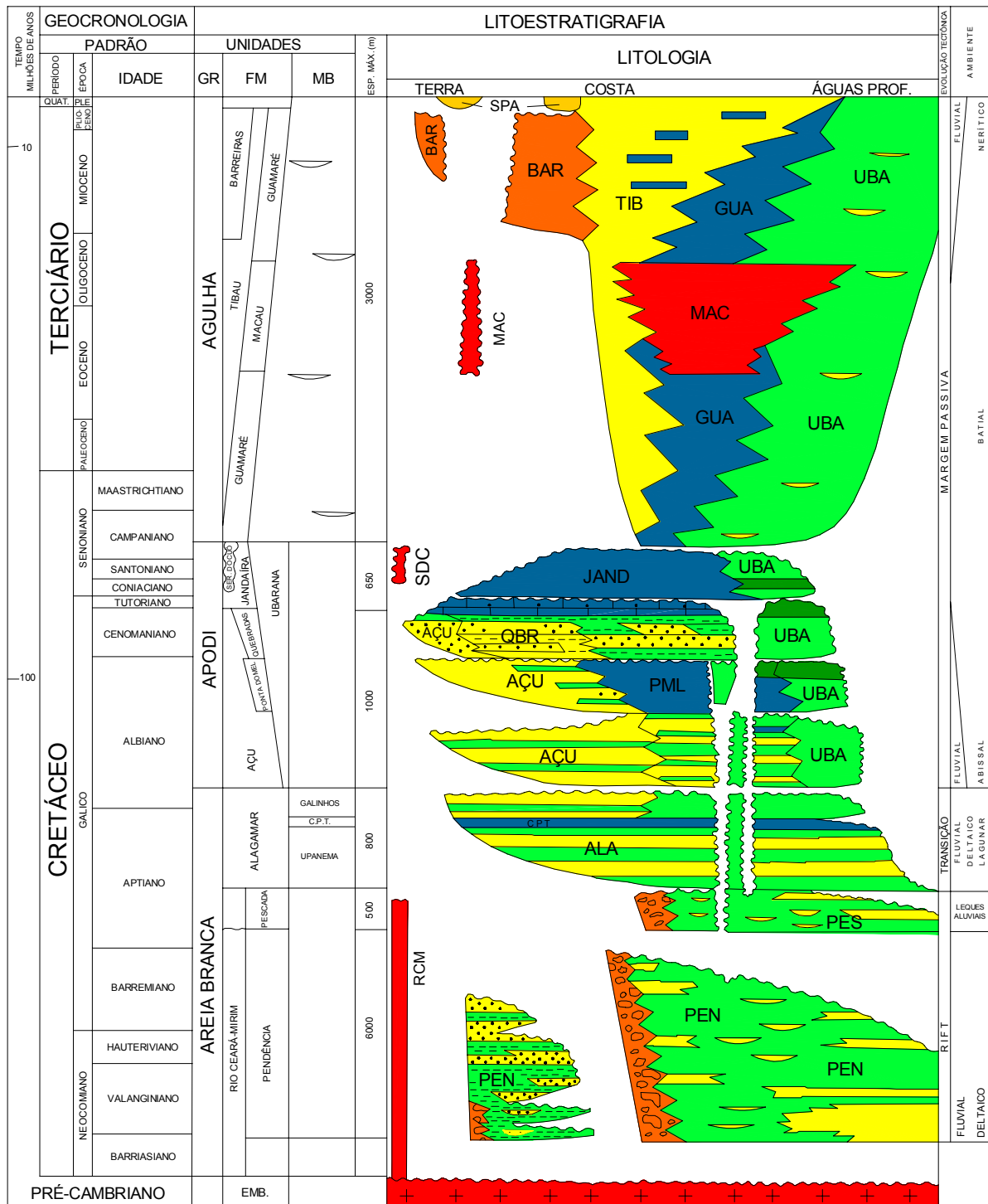


FIGURA 3.2 – Carta estratigráfica da Bacia Potiguar (Araripe & Feijó, 1994 in Nogueira, 2004).

Ao longo dos grandes *grabens* formados depositaram-se, discordantemente, sobre o embasamento cristalino, conglomerados de escarpa de falha, folhelhos lacustres e arenitos flúvio-deltaicos, que constituem a Formação Pendência. Estima-se que estes sedimentos atinjam espessuras de até 6000 m, tendo como contato superior a Formação Pescada na porção submersa, representada por uma cunha clástica composta de arenitos intercalados a folhelhos e siltitos depositados em sistema de leques aluviais (Dantas, 1998).

3.1.2 Fase Transicional (Neoptiano/Eoalbiano)

Este estágio foi marcado por um período de relativa quietude tectônica, caracterizado por subsidência termal lenta e generalizada, devido ao início do processo de resfriamento da litosfera previamente distendida e aquecida na fase *rift*. Depositou-se a megasequência transicional representada pelos sedimentos da Formação Alagamar, subdividida nos Membros Upanema (arenitos fluvio-deltaicos, intercalados à calcários e folhelhos), Camadas Ponta do Tubarão (folhelhos pretos e calciludito ostracoidal em sistema lagunar) e Galinhos (argilitos).

A espessura desta formação é de aproximadamente 800 m, tendo como contato discordante inferior o embasamento cristalino e as Formações Pendência e Pescada.

Dantas (1998) sugere que a primeira incursão marinha na bacia tenha ocorrido nesta fase (Dantas, 1998).

3.1.3 Fase de Deriva Continental (Albiano/Holoceno)

Corresponde a uma sedimentação marinha franca, controlada por um regime tectônico de subsidência termal e compensação isostática, típica de margem continental passiva (Chang *et al*, 1992 *in* Pessoa Neto, 2003).

Durante a deriva o preenchimento foi marcado por duas fases, uma transgressiva e outra regressiva, que compreende a megasequência sedimentar marinha franca.

3.1.3.1 Fase Transgressiva

A fase transgressiva se estende do Albiano ao Eocampaniano, formada por uma sedimentação desde sistemas fluviais até ambiente marinho profundo, passando por plataforma carbonática. A deposição teve início com os sedimentos da Formação Açú, composta de conglomerados, arenitos e siltitos de sistemas fluvial e deltáico-estuarino. Em direção ao mar, a Formação Açú grada lateralmente para as Formações Ponta do Mel e Ubarana.

A Formação Ponta do Mel ocorre apenas na porção submersa da bacia, com espessura da ordem de 650 m. É constituída por calcarenitos oncolíticos com bioclastos, arenitos e calciluditos intercalados a folhelhos.

A Formação Ubarana, por sua vez, é formada por folhelhos, siltitos, calcilutitos, arenitos, diamictitos, conglomerados e olistolitos. Fazem parte também desta formação pelitos intercalados a arenitos, que foram denominados de Membro Quebradas e ocorrem sobrepostos a Formação Ponta do Mel.

O apogeu desta transgressão foi marcado pelo afogamento dos sistemas fluviais da Formação Açú e pela implantação da ampla plataforma carbonática designada de Formação Jandaíra.

A Formação Jandaíra é composta por calcarenitos com bioclóstos e calciluditos, depositados em ambiente de planície de maré, laguna rasa, plataforma e mar aberto, com espessura máxima de 650 m. Repousa concordantemente sobre a Formação Açú e Membro Quebradas, apresentando contato superior com as Formações Tibau, Guamaré e Ubarana, estando esta última interdigitada também, lateralmente (Nogueira, 2004).

3.1.3.2 Fase Regressiva

A fase regressiva consiste em sistemas de leques costeiros e bancos carbonáticos, instalados a partir do Neocampaniano, estendendo-se até o Holoceno.

A deposição da seqüência fluvio-marinha regressiva iniciou-se após forte evento erosivo em resposta a um soerguimento causado por uma anomalia térmica. Esta estaria associada a passagem de um centro de espalhamento da cadeia meso-

oceânica na margem equatorial, em frente à bacia ou induzido termicamente pela presença de uma pluma mantélica.

O registro sedimentar desta grande regressão na bacia iniciou com a deposição da Formação Timbau, constituída por arenitos grossos e leques costeiros, com contatos gradacionais ou discordantes em suas porções superior e inferior. Esta seqüência também envolveu a deposição da Formação Guamaré, formada por calcarenitos e calcilitos de plataforma e taludes carbonáticos, apresentando contatos laterais com as Formações Tibau em direção ao continente e Ubarana em direção ao mar. A seqüência é finalizada por sedimentos do Grupo Barreiras, de idade Terciária e depósitos eólicos, aluvionares e *beachrocks*, de idade Quaternária (Nogueira, 2004).

3.1.4 Magmatismo

Associados à evolução da Bacia Potiguar ocorrem três eventos de vulcanismos. O primeiro evento magmático conhecido como Formação Rio Ceará Mirim (Jurássico à Cretáceo inferior), está relacionado à gênese do *rift* na bacia. Tal magmatismo ocorre na forma de diques de diabásio toleíticos com forte orientação E-W, na borda sul da Bacia Potiguar, adjacente ao embasamento cristalino e apresentando idades entre 120 e 140 Ma.

Na porção centro-sul da Bacia Potiguar, intercalados aos sedimentos da Formação Açú, afloramentos de soleiras de diabásio, com tendência alcalina e de idade da ordem de 83 ± 6 Ma, caracterizam o evento magmático conhecido como Serra do Cuó (Santoniano à Campaniano).

Outro evento magmático conhecido como Formação Macau (Terciário) ocorre intercalado aos sedimentos das Formações Ubarana, Guamaré e Tibau. É representado por derrames *necks* e *plugs* de olivinas-basalto afaníticos, diabásios e vulcânicas associadas, com pulsos datados de 45 a 29 Ma. A espessura destes derrames atinge até 1.500 m em determinadas regiões, evidenciando sua grande magnitude (Dantas, 1998).

3.2 Evolução Tectônica da Bacia

Muitos são os modelos geodinâmicos propostos por pesquisadores que tentam explicar a história evolutiva da bacia. Diversos estudos apontam um período de tempo que vai do Mesozóico ao Cenozóico.

3.2.1 Evolução Mesozóica

Dois modelos que explicam a origem da Bacia Potiguar no Cretáceo são os mais apontados. Um deles refere-se a explicação dada por Françolin & Szatmari (1987), que sugerem uma rotação horária do Continente Sul-Americano em relação ao Africano, gerando compressão e distensão.

Estes autores defendem a idéia de que em meados do Jurássico Superior o supercontinente Gondwana teria iniciado uma fragmentação ao sul, originando uma grande fratura que se prolongou para norte, concomitantemente a um movimento divergente E-W, formando um pólo de rotação no NE brasileiro, ocasionando movimentos compressivos e distensivos.

Após rompimento de toda a crosta continental, houve a separação E-W entre a América do Sul e a África, gerando um cisalhamento lateral dextral e permitindo a entrada do mar (Figura 3.3). Fato este que causou a transgressão marinha, atingindo todas as bacias da margem equatorial brasileira (Dantas, 1998).

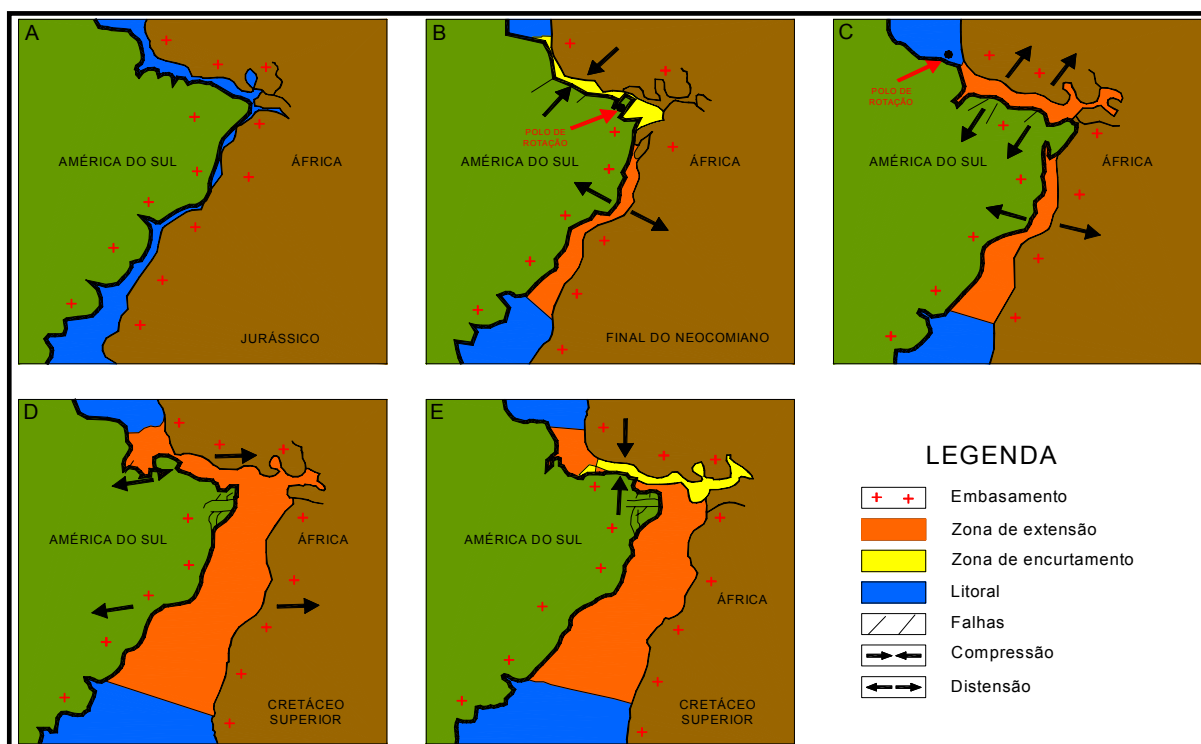


FIGURA 3.3 – Abertura e evolução do Atlântico Sul: A) Início da separação continental a partir de uma extensa fratura N-S no supercontinente Gondwana; B) Pólo de rotação no Nordeste do Brasil; C) Pólo de rotação deslocado para Norte do Brasil; D) Predomínio de movimento transcorrente destal; e E) Evento compressivo de direção N-S (Fraçolin & Szatimari, 1987).

Por outro lado, em contraposição a primeira conjectura, Matos (1992b) sugere uma hipótese alternativa, baseada numa evolução puramente extensional de direções NW-SE e E-W, dividida em três estágios: *sin-rift* I, II e III.

Na fase *sin-rift* I iniciaram-se estágios distensivos, gerando extensas depressões, com formação de bacias rasas a partir do seu preenchimento. Na fase subsequente, *sin-rift* II, desenvolveram-se *rifts* resultantes de extensões máximas (WNW-ESE), associadas a grandes fraturas na porção superior da crosta. E finalmente, a fase *sin-rift* III corresponde a extensão propriamente dita, configurando a geometria final da margem leste da América do Sul, resultante da mudança dos esforços distensivos WNE-ESE (fase *sin-rift* II) para E-W (Figura 3.4).

Este mesmo autor sugere ainda que o *Rift* Potiguar teve início no Neocomiano-Barresiano e não no Jurássico Superior, como sugerido por França & Sztatmari (1987).

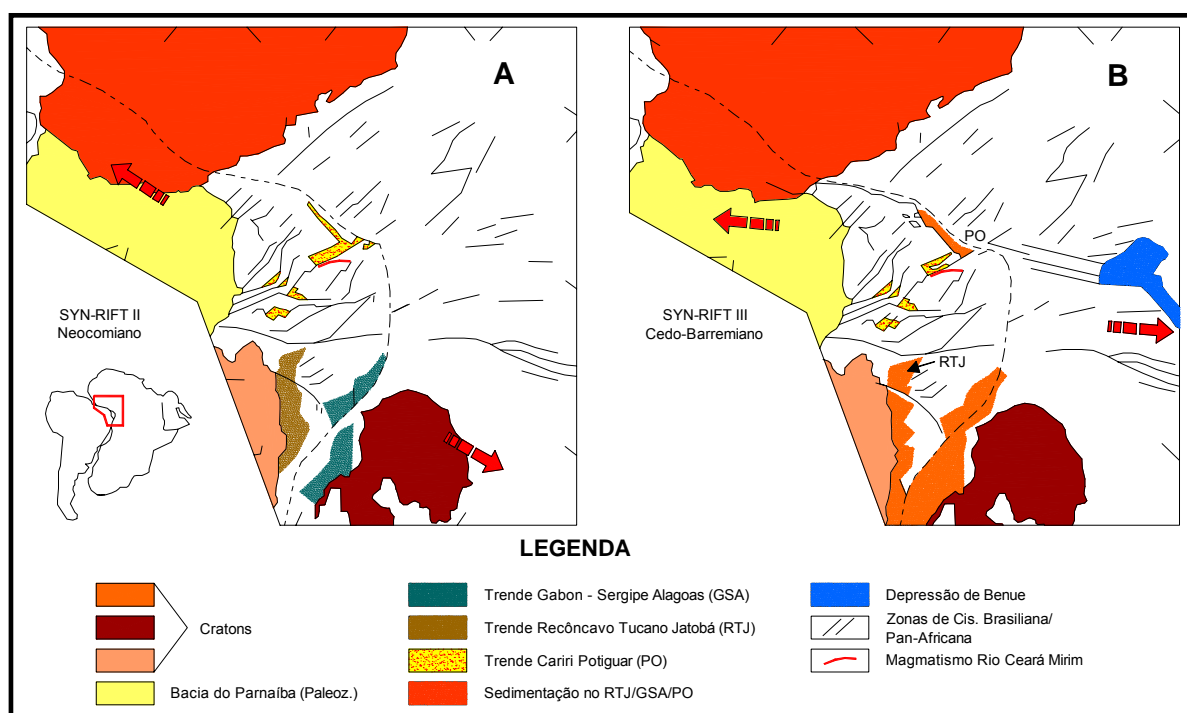


FIGURA 3.4 – Estágios Sin-rift II (A) e Sin-rift III (B) da Bacia Potiguar (Matos, 1992b).

3.2.2 Evolução Cenozóica

A Era Cenozóica do nordeste brasileiro, apesar de muito estudada, ainda não tem sua evolução completamente definida. Um evento marcante ocorrido na passagem do Mesozóico para o Cenozóico na Bacia Potiguar refere-se aos diques de diabásio que compõem a Formação Serra do Cuó, cujas conseqüências levaram ao soergimento de vários estratos da Formação Jandaíra, provocando dissecação e erosão (Dantas, 1998).

A literatura também dá ênfase a uma discordância de alcance regional denominada pré-Ubarana, com idade Mesocampaniana. Sua origem deve-se a erosão causada por soergimento termal da crosta continental quando da passagem de um centro de espalhamento oceânico ao longo da margem equatorial brasileira

(Figura 3.5). Este evento forneceu energia suficiente capaz de reativar diversas falhas pré-existentes, além de causar intenso processo erosivo de ampla abrangência (Araripe & Feijó, 1994 *in* Nogueira, 2004 e Cremonini & Karner, 1995).

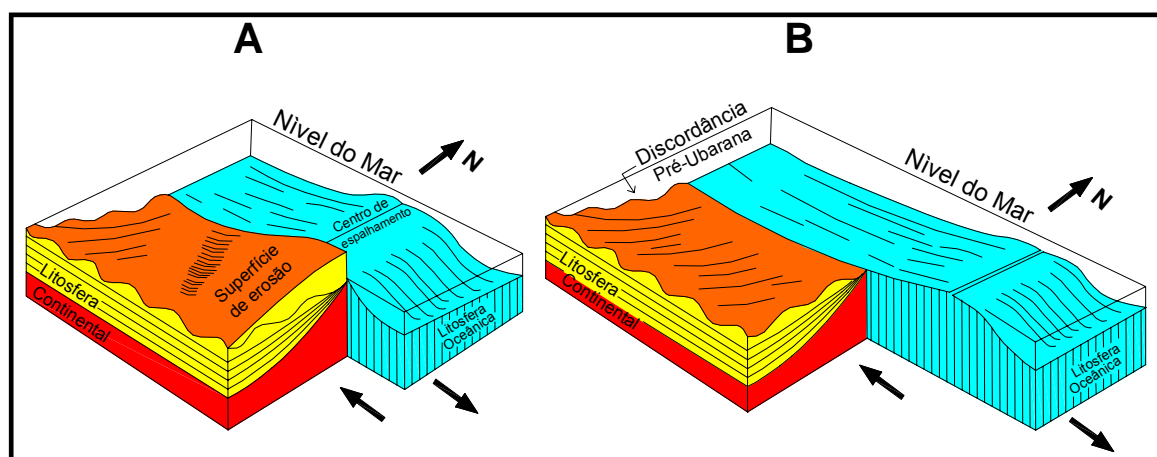


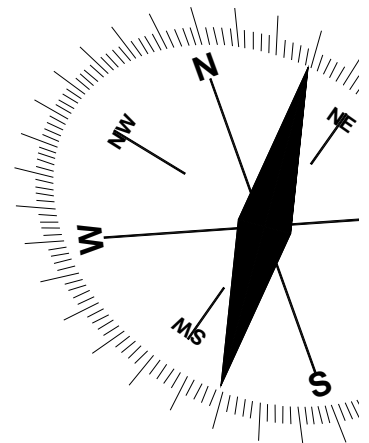
FIGURA 3.5 – Passagem do centro de espalhamento oceânico em frente à Bacia Potiguar, resultado de soerguimento seguido de erosão (A) e início de estágio de resfriamento e subsidência da Bacia Potiguar, após passagem de centro de espalhamento (B) (Cremonini & Karner, 1995).

Na Era Cenozóica não ocorreram tectonismos de grande expressividade como a formação dos *rifts* mesozóicos. No entanto sua história é marcada por reativações de importantes falhamentos como o Sistema de Falhas de Carnaubais e Afonso Bezerra, além de dobramentos significativos e ascensão de magmas (Sial, 1975).

Durante o Quaternário, eventos geológicos, têm despertado interesse de geocientistas voltados a estudos neotectônicos, principalmente no litoral do Rio Grande do Norte, onde a reativação da estruturação pré-existente estaria refletindo nos processos da sedimentação costeira (Bezerra *et al*, 2001, 2005).

Capítulo 04

GEOLOGIA ESTRUTURAL



4 GEOLOGIA ESTRUTURAL

A finalidade da Geologia Estrutural aplicada é descrever e entender as modificações estruturais, ou simplesmente a deformação das rochas, que pode ser considerada como a mudança da forma e posição do conjunto rochoso crustal em resposta a atuação de esforços numa determinada direção.

As feições estruturais encontradas na área de estudo são reflexos do comportamento geotectônico regional, resultado de eventos deformacionais rúpteis, característicos de regime crustal superficial.

Três afloramentos foram previamente definidos para a realização do mapeamento geológico e análise estrutural. A técnica empregada no estudo envolveu a identificação de diversas famílias de juntas e falhas.

Para a caracterização das juntas, foram tomadas atitudes, ou orientação dos planos e em seguida, ao longo de 10 metros foram medidos o espaçamento entre descontinuidades, a abertura das fraturas e o comprimento das mesmas. No caso das falhas, também foram medidos os mesmo parâmetros, incluindo a profundidade, mas de forma diferente por serem estruturas muito maiores que as juntas. A partir da extremidade da descontinuidade, a cada metro foi determinada a leitura da abertura até o final da estrutura. O espaçamento, em função das longas distâncias (geralmente superior a 100 m), foi medido utilizando-se imagem de satélite. Já o parâmetro profundidade foi tomado apenas como uma medida relativa, uma vez que as fraturas e dolinamentos são bloqueadas por desabamentos, mascarando sua real profundidade. Desta forma foi então estabelecido um banco de dados para correlacionar a influência dessas estruturas na formação de superfícies de dissolução e conseqüentemente, desenvolvimento de cavernas.

Antes de relatar dados de campo é importante lembrar que o termo fratura engloba todas as deformações acompanhadas de uma ruptura da rocha. A deformação é definida como não penetrativa e se desenvolve sob condições crustais superficiais. No entanto, existe uma subdivisão para o termo fratura em função do movimento ao longo do plano de ruptura, diferenciando as juntas das falhas. Juntas são fraturas que não apresentam movimento paralelo ao plano de ruptura, podendo

ser abertas, fechadas ou preenchidas. As falhas, ao contrário das juntas, apresentam movimento paralelo ou oblíquo ao plano de ruptura (*Arthaud, 2002*).

Baseado nas observações de campo percebe-se que todo o calcário aflorante mostra-se fortemente deformado por estruturas frágeis, isto é, essencialmente marcado por ruptura das rochas, principalmente falhas e juntas, ou simplesmente fraturas.

4.1 Parâmetros Descritivos das Descontinuidades

Nos maciços rochosos da área estudada, as estruturas de interesse à investigação aplicada foram descontinuidades, cujas propriedades mais importantes são: origem, orientação espacial, persistência ou continuidade, espaçamento, natureza do preenchimento, abertura, profundidade e conectividade entre elas.

A determinação do comportamento das fraturas é de fundamental importância na avaliação do seu desenvolvimento, uma vez que são planos de fraqueza que podem ser favoráveis à formação de estruturas maiores.

Com o mapeamento geológico, verificou-se que essas propriedades de natureza geológica se expressam com significativa variabilidade espacial mesmo em um único maciço rochoso.

Os parâmetros geológicos utilizados abordam uma visão da influência do fraturamento no comportamento mecânico do maciço, na resistência a deformação, na permeabilidade, na porosidade e na formação de cavidades de subsuperfície, as cavernas.

O estudo estatístico das juntas e falhas foi baseado na utilização de histogramas e diagramas de roseta, respectivamente, através dos *softwares excel* e *stereonet*, a partir de um banco de dados geológico organizado em tabelas, englobando todas as medidas obtidas em campo. De forma mais detalhada segue-se com a descrição das juntas e falhas, envolvendo cada uma das propriedades anteriormente citadas.

4.1.1 As Juntas

O reconhecimento geológico possibilitou observar que as juntas apresentam, freqüentemente, padrão geométrico sistemático em toda área selecionada, mostrando que seu controle assume um comportamento regional.

O estudo das juntas nos levantamentos estruturais regionais é de fundamental importância em pesquisas geológicas, por motivos diversos:

- i. Do ponto de vista geotécnico, as juntas por serem planos de menor coesão, podem evoluir para planos de movimento. No caso de terreno cárstico, existe ainda a possibilidade da formação de cavernas, ou seja, cavidades naturais subterrâneas com dimensões que permitem acesso ao ser humano e constituem atrativos para pesquisadores;
- ii. Quanto a metalogênese, estas descontinuidades representam caminhos preferenciais para percolação de fluidos mineralizadores ou petrolíferos.
- iii. Hidrogeologicamente falando, as juntas também desempenham papel fundamental na dinâmica de aquíferos, seja como área de recarga ou uma eventual poluição.

A partir da análise em campo foram identificadas quatro famílias ou conjunto de juntas (J_1 , J_2 , J_3 e J_4), que se cruzam e exibem distribuição planoparalela em toda extensão dos afloramentos, podendo assim ser classificadas como sistemáticas (Figura 4.1). No entanto, surgem ocasionalmente juntas com distribuição irregular de pequena extensão.

4.1.1.1 Origem

Quanto a origem, estas estruturas se desenvolvem tanto sob condições tectônicas como não tectônicas e ocorrem de maneira bastante expressiva em todos os afloramentos calcários presentes na área.

As juntas de origem tectônicas são representadas por fraturas de extensão com planos verticais, sem movimento aparente, representadas por fraturas abertas, resultado do afastamento das paredes destas (Figura 4.1). Assumem formas

tabulares ou em veios e algumas vezes ocorrem preenchidas por minerais de calcita.

Associadas a estas feições, ocorrem também juntas estilolíticas como consequência da dissolução por pressão de minerais de calcita, mostrando aspecto suturado, com picos milimétricos.

Em campo, são reconhecidos estilólitos tanto perpendiculares ao plano de acamamento, como paralelos a estes, respectivamente, tectônicos e não tectônicos. No primeiro caso, assumem expressão apenas local, pouco freqüentes, e estando ligados a uma compressão formando planos não horizontais. No segundo caso, mostram-se mais freqüentes e estão aliados à compactação da bacia, na qual a sobrecarga dos sedimentos gerou planos estilolíticos paralelos a estratificação e com picos verticais.



FIGURA 4.1 – Sistema de fraturas tectônicas sem movimento aparente, evidenciado por juntas abertas, resultado de um afastamento das paredes das fraturas (Coord. UTM-WGS 84: 653.139/9.388.456).

Fazendo-se associação entre as juntas de extensão e as estilolíticas, foi possível identificar o campo de esforços, em determinados locais, no qual σ_3 está perpendicular ao plano das juntas de extensão e corresponde a um esforço de tração, enquanto σ_1 está perpendicular as juntas estilolíticas e ligado a um esforço de compressão (Figura 4.2).

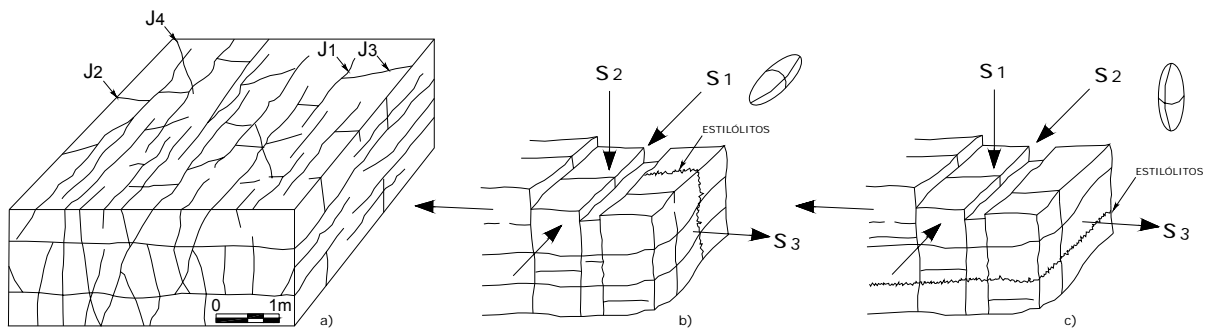


FIGURA 4.2 – Esquema mostrando as quatro famílias de juntas sistemáticas (J_1 , J_2 , J_3 e J_4), que se cruzam (a); e a relação do elipsóide de esforços entre as fraturas de extensão e os estilólitos perpendiculares (b) e paralelos (c) a estratificação.

As juntas não tectônicas são representadas por gretas de contração que se formaram devido a retração de material sedimentar muito fino (*mudstone*) através da perda de água por evaporação subaérea (Figura 4.3). É também comum encontrar na área níveis de dissolução paralelos ao plano de estratificação ou S_0 , levando ao deslocamento da superfície de erosão (Figura 4.4), e em alguns casos, a formação de dolinas e cavernas com desenvolvimento de espeleotemas.



FIGURA 4.3 – Juntas não tectônicas representadas por gretas de contração (Coord. UTM-WGS 84: 653.122/ 9.389.170).



FIGURA 4.4 – Nível de dissolução paralelo ao plano de estratificação ou S_0 , levando ao deslocamento da superfície de erosão (Coord. UTM-WGS 84: 653.122/9.389.170).

Ocorre ainda, associado aos níveis de dissolução acima citados, o surgimento de dobras não tectônicas, ou seja, que não foram formadas por esforços de compressão, mas pela dissolução e cristalização da calcita, originando conjuntos de estalagmites de formas sinuosas (Figura 4.5).



FIGURA 4.5 – Formas sinuosas geradas pela dissolução e cristalização do calcário, levando a formação de conjuntos de estalagmites (Coord. UTM-WGS 84: 653.151/9.389.174).

4.1.1.2 Orientação Espacial

As juntas encontradas na área de pesquisa distribuem-se espacialmente segundo orientações preferenciais, agrupando-se em sistemas ou famílias, denominadas de J_1 , J_2 , J_3 e J_4 , respectivamente, segundo as direções N-S, E-W, NE-SW e NW-SE. A partir da atitude dos diferentes conjuntos de descontinuidades, ficou registrado por meio de diagramas, o percentual referente a cada família em relação a um total de 1.286 medidas tomadas em campo. Os conjuntos distribuem-se da seguinte forma (Figura 4.6):

- i. A família de juntas de direção N-S, identificadas como J_1 , representa 27% do total de fraturas, a segunda maior concentração;
- ii. As juntas de direção E-W, denominadas de J_2 , representam 18% do total de fraturas, a menor concentração;
- iii. As juntas de direção NE-SW, classificadas como J_3 , representam a maior concentração de fraturas, com 32% do total; e
- iv. As juntas de direção NW-SE, denominadas de J_4 , surgem com 23% do total de medidas, sendo a terceira maior família.

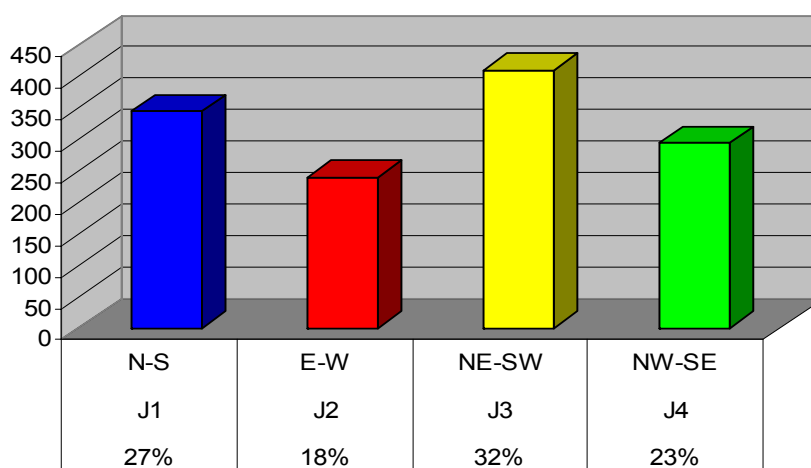


FIGURA 4.6 – Histograma de representação das direções das famílias de fraturas, num total de 1.286 medidas tomadas em campo: J_1 (N-S) com 27% do total de fraturas, J_2 (E-W) com apenas 18% e a menor concentração, J_3 (NE-SW) com 32% e a maior concentração e J_4 (NW-SE) com 23%.

O gráfico anterior mostra que as quatro famílias de fraturas se cruzam nas mais variadas direções, havendo destaque para a família de direção NE-SW, ou J_3 , representando 32% do total de 1.286 medidas, sendo que as demais famílias, embora menos expressivas, mas presentes nos afloramentos, não podem ser descartadas da investigação.

Uma outra maneira de visualizar este complexo de fraturas que se cruzam foi feita utilizando o diagrama de rosetas, que ilustra as maiores concentrações dos planos de descontinuidades que ocorrem na área. Este gráfico confirma a existência das quatro orientações anteriormente citadas, onde a família de juntas J_3 surge com o maior número de fraturas, enquanto a família de juntas J_2 é a menos expressiva (Figura 4.7). É importante ressaltar que todos os planos apresentam mergulhos verticais.

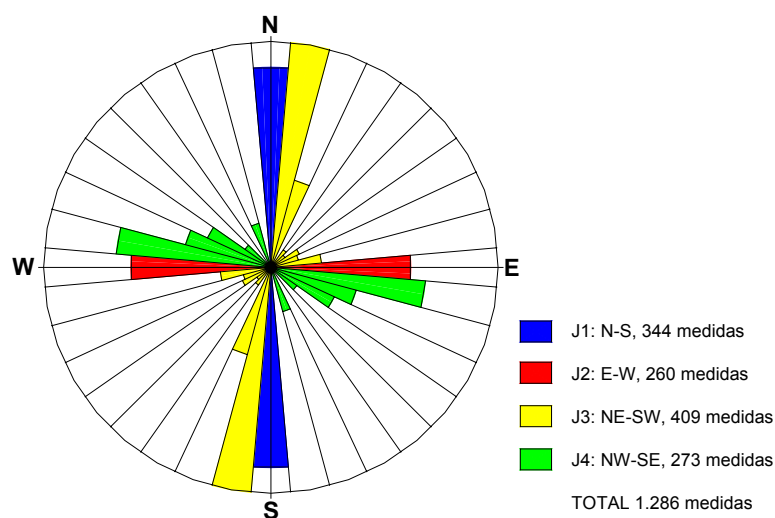


FIGURA 4.7 – Diagrama de roseta ilustrando as maiores concentrações dos planos de fraturas.

4.1.1.3 Persistência

Persistência ou continuidade de uma fratura é um parâmetro ligado ao tamanho da estrutura e está intimamente associado à orientação e dimensão da superfície rochosa. A maioria das juntas contidas nos afloramentos estudados ocorre perpendicularmente a superfície de acamamento e assumem distribuição geralmente retangular. Porém surgem ainda juntas geradas pela separação de estratos,

formando níveis de dissolução, em alguns casos, com desenvolvimento de espeleotemas.

Em campo, as juntas menos persistentes são também as mais recentes, pois tendem a se interromper nas estruturas maiores, não havendo continuidade, o que induz que as juntas mais persistentes são as mais antigas, ou primitivas (Figura 4.8).



FIGURA 4.8 – Junta primitiva, com extensão de dezenas de metros, interceptadas por juntas mais jovens, sem continuidade (Coord. UTM-WGS 84: 651.698/9.389.472).

Assim, aquelas discontinuidades terminadas em outras discontinuidades, na própria rocha matriz, foram consideradas como mais jovens. Por outro lado, as fraturas com comprimento excedente aos limites de exposição da rocha, foram

classificadas como mais antigas (Figura 4.9). Estas são de grande extensão, cerca de dezenas de metros, com abertura entre suas paredes chegando a mais de 50 cm, em algumas situações sendo aceitas como falhas.

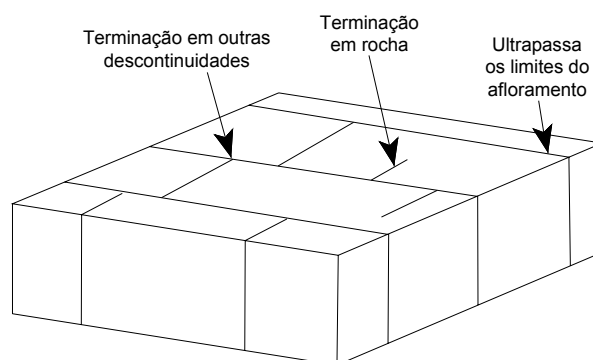


FIGURA 4.9 – Sistemas de juntas exemplificando tipos de terminações: em outras descontinuidades, em rocha e quando ultrapassam os limites do afloramento (ISRM – *International Society for Rock Mechanic*, 1983).

De acordo com a classificação da ISRM (*International Society for Rock Mechanic*, 1983), o comprimento das fraturas para as quatro famílias de juntas, apresenta tamanhos bastante variáveis, com destaque para as juntas J_3 , apresentando maior concentração na categoria “muito grande”. Em outras palavras, os dados de campo mostram que estas fraturas (J_3) são as de caráter mais contínuo, com comprimentos superiores a 20 metros. Enquanto que os outros três grupos (J_1 , J_2 e J_4), a maior parte das fraturas, apresentam comprimentos variando de 1 a 3 m, classificando-se, em sua maioria, como “pequenas” (Tabela 4.1; Figuras 4.10 e 4.11).

TABELA 4.1 – CLASSES DE COMPRIMENTO SEGUNDO ISRM – *INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANIC* (1983).

COMPRIMENTO (m)	DESCRIÇÃO
< 1 m	Muito Pequena
1 a 3 m	Pequena
3 a 10 m	Média
10 a 20 m	Grande
> 20 m	Muito Grande

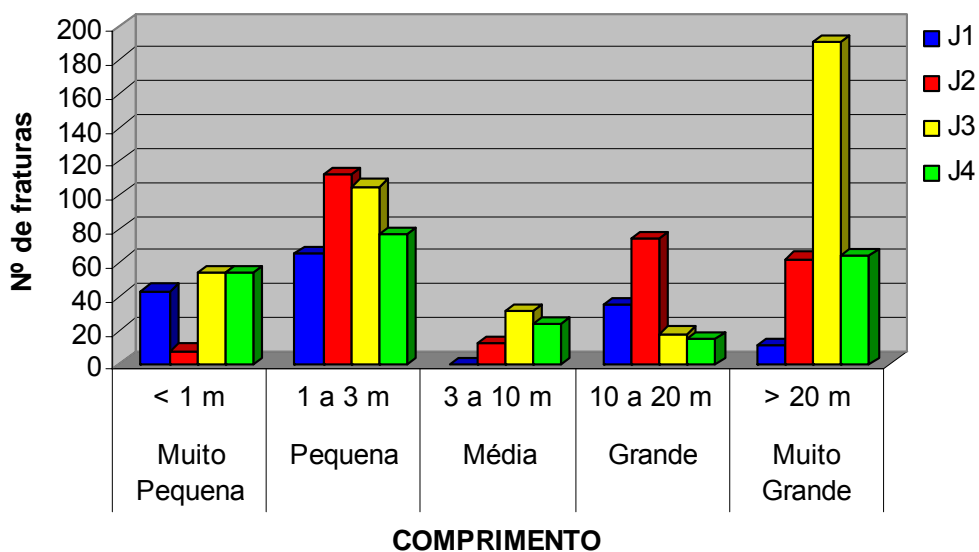


FIGURA 4.10 – Histograma de classificação do comprimento das fraturas, mostrando que estas apresentam tamanhos bastante variáveis, com destaque para a família J₃ com maior concentração na categoria muito grande.

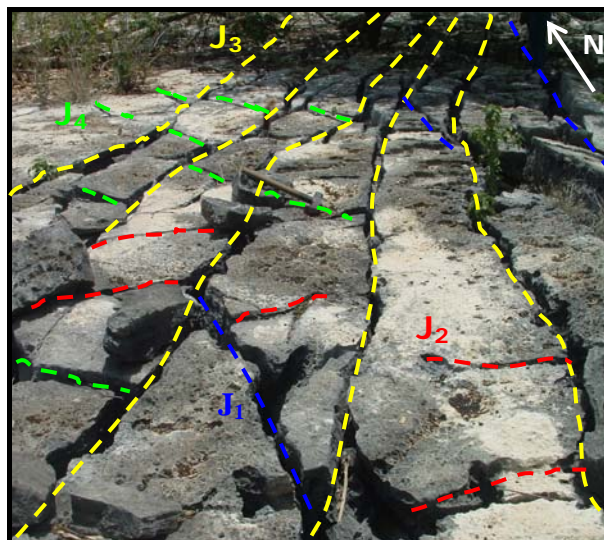


FIGURA 4.11 – De acordo com a classificação da ISRM, *International Society for Rock Mechanic* (1983), ocorrem na área tanto juntas persistentes, com comprimento excedente aos limites de exposição da rocha, como não persistentes, com terminações em outras discontinuidades (Coord. UTM-WGS 84: 652.047/9.388.690).

4.1.1.4 Espaçamento

O espaçamento é a distância perpendicular entre dois planos consecutivos de descontinuidades pertencentes a uma mesma família.

Para o levantamento sistemático das juntas dos afloramentos optou-se pelo método da linha, por sua simplicidade de execução e aplicabilidade. Em sentido amplo, o espaçamento baseou-se na média aritmética das distâncias entre fraturas sucessivas de um mesmo conjunto, ou seja, obtendo-se medidas ao longo de uma linha de dez metros de comprimento, perpendicular a direção de cada uma das quatro famílias identificadas – J_1 , J_2 , J_3 e J_4 (Figura 4.12).



FIGURA 4.12 – Levantamento sistemático das juntas pelo método da linha, através da medida das distâncias entre fraturas sucessivas de um mesmo conjunto (a), longo de uma linha de dez metros de comprimento (b), perpendicular a direção de cada uma das quatro famílias identificadas – J_1 , J_2 , J_3 e J_4 (Coord. UTM-WGS 84: 651.645/9.388.380 e 652.000/9.388.814).

Assim, temos que:

$$e = l / n,$$

onde: e – Espaçamento médio

l – Comprimento da linha

n – Quantidade de fraturas por intervalo de comprimento.

Para representar graficamente os resultados foi utilizada a seguinte terminologia, como mostra a Tabela 4.2, segundo ISRM (1983):

TABELA 4.2 – CLASSES DE ESPAÇAMENTO MÉDIO SEGUNDO ISRM –
INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANIC, 1983.

ESPAÇAMENTO (m)	DESCRIÇÃO
< 0,02 m	Extremamente Pequeno
$0,02 \leq e < 0,06$ m	Muito Pequeno
$0,06 \leq e < 0,20$ m	Pequeno
$0,20 \leq e < 0,60$ m	Moderado
$0,60 \leq e < 2,00$ m	Grande
$2,00 \leq e < 6,00$ m	Muito Grande
$e \geq 6,00$ m	Extremamente Grande

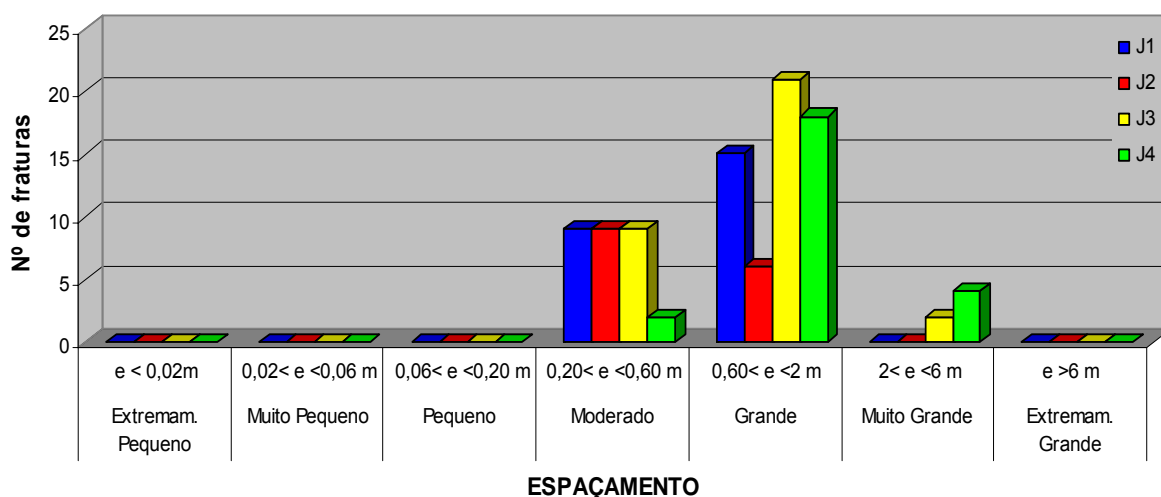


FIGURA 4.13 – Histograma do espaçamento médio “e” entre fraturas sucessivas de um mesmo conjunto.

O gráfico anterior mostra que as fraturas possuem espaçamentos variando desde moderado a muito grande. Observa-se que apenas as fraturas J_3 e J_4 chegam a alcançar a classificação de espaçamento muito grande, mas assim como a família J_1 apresentam maior concentração na categoria grande. Já a família J_2 enquadra-se melhor na classe de espaçamento moderado (Figura 4.13). Assim, nota-se que J_3 e J_4 formam conjuntos de fraturas com espaçamentos maiores que as juntas J_1 e J_2 .

4.1.1.5 Abertura

A abertura das juntas é uma característica muito importante quando se pretende estudar a percolação de água no interior de maciços rochosos por diversos motivos, seja pela finalidade hidrogeológica, comportamento estrutural ou mecânico e, no caso de relevo cárstico, o potencial espeleológico.

Por definição, a abertura é entendida como o espaço, vazio ou preenchido, que separa as paredes de uma fratura. Este preenchimento pode ser água, sedimentos ou mineralizações que ocupam o plano da descontinuidade.

Nas juntas em questão, algumas vezes o preenchimento que ocorre ocupando todo plano da fratura, está representado pela recristalização de calcita, cuja fonte deve-se ao processo de intemperismo da própria rocha-mãe (Figura 4.14). Em outros casos, surgem sedimentos finos inconsolidados, que se distribuem na base de algumas juntas ou em níveis horizontais de dissolução das cavernas (Figura 4.15).

Nas falhas o preenchimento ocorre de forma discreta e irregular, formando rochas cataclásticas, ou brechas tectônicas (Figura 4.16). Estas rochas são resultados do atrito ocorrido pelo deslocamento de blocos fraturados, que provocou a partição da rocha em fragmentos angulosos de tamanhos variáveis, sem estrutura orientada. Características estas que indicam formação em profundidades relativamente rasas da crosta, onde predominam condições de deformação rúptil.



FIGURA 4.14 – Preenchimento representado pela recristalização de calcita ocupando todo plano de fratura (Coord. UTM-WGS 84: 652.109/9.388.662).



FIGURA 4.15 – Sedimentos finos inconsolidados em um nível horizontal de dissolução de caverna (Coord. UTM-WGS 84: 652.431/9.388.956).



FIGURA 4.16 – Preenchimento na forma rocha cataclástica ou brecha tectônica, caracterizada pela fragmentação da rocha em blocos angulosos e ausência de estrutura orientada (Coord. UTM-WGS 84: 652.047/9.388.690).

A *International Society for Rock Mechanics* – ISRM (1983), com o intuito de usar critérios para a caracterização da abertura de descontinuidades estruturais, elaborou uma seqüência de limites dimensionais, como mostra as terminologias da tabela abaixo (Tabela 4.3).

TABELA 4.3 – CLASSES DE ABERTURA SEGUNDO ISRM –
INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANIC, 1983.

ABERTURA (cm)	DESCRIÇÃO
0	Compacta ou Fechada
$0 < A \leq 1$ cm	Aberta
$1 < A \leq 10$ cm	Muito larga
$10 < A \leq 100$ cm	Extremamente Larga
$A > 100$ cm	Cavernosa

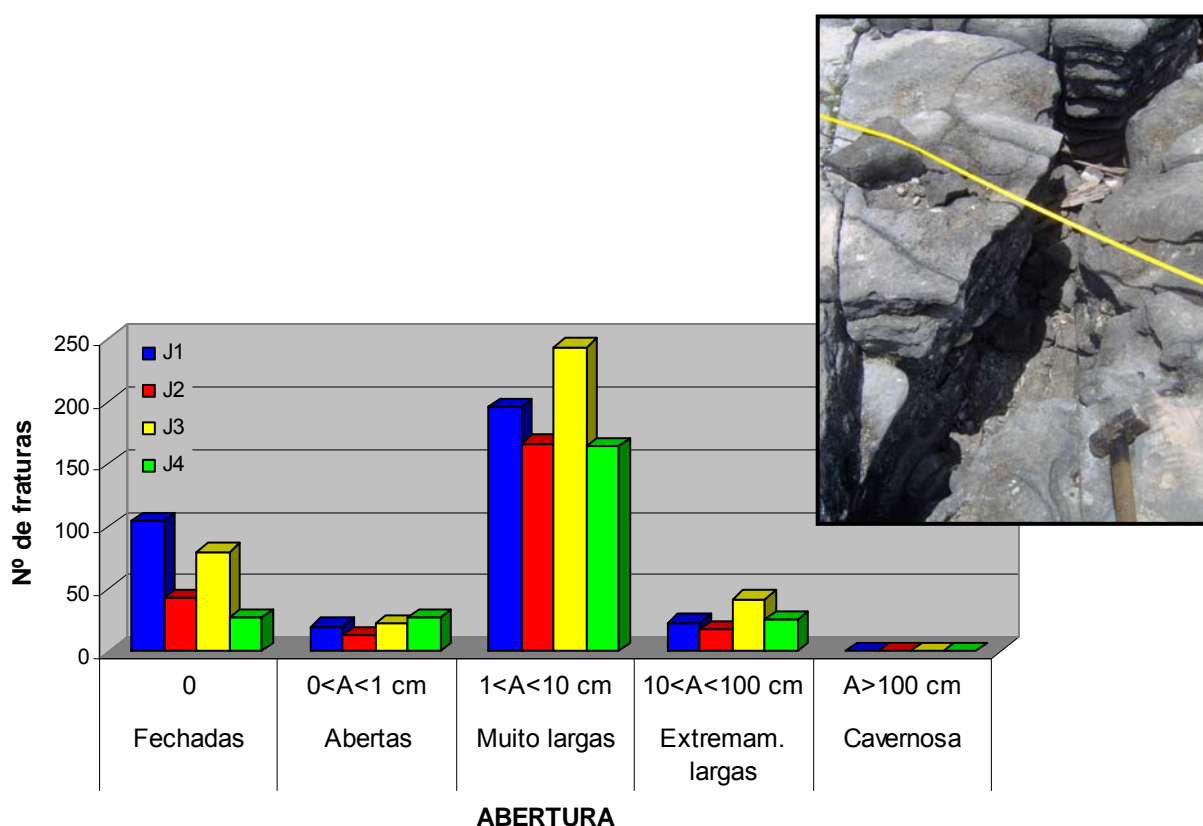


FIGURA 4.17 – Histograma mostrando as classes de aberturas encontradas na área, com maior concentração na categoria “muito larga” e a maior quantidade de fraturas representada pela família J₃. No alto, junta muito aberta (aproximadamente 10 cm de abertura).

Conforme essa divisão em classes, na área estudada as aberturas das fraturas variam desde “fechadas” até “extremamente abertas”, com maior concentração na categoria “muito larga”, sendo ainda a maior quantidade de fraturas representada pela família J₃ (Figura 4.17).

Percebe-se em campo que o sistema fraturado, embora primário, aos poucos vem sendo modificado por estágios posteriores a sua formação, ou seja, mecanismos pós-deformacionais influenciam na abertura das discontinuidades. Dentre estes mecanismos, principalmente por se tratar de litotipos carbonáticos, está a dissolução do próprio calcário, manifestando-se das seguintes formas:

- i. Freqüentes abatimentos de blocos entupindo fraturas (Figura 4. 18a);
- ii. Formação de lapiás evoluindo para sulcos (Figura 4. 18b); e
- iii. Dentre os mais marcantes estão as dolinas, alguns com desenvolvimento horizontal formando importantes cavernas. Por vezes estas dolinas são de grande expressão, podendo ser vistas até mesmo nas imagens de satélites (Figura 4. 19).

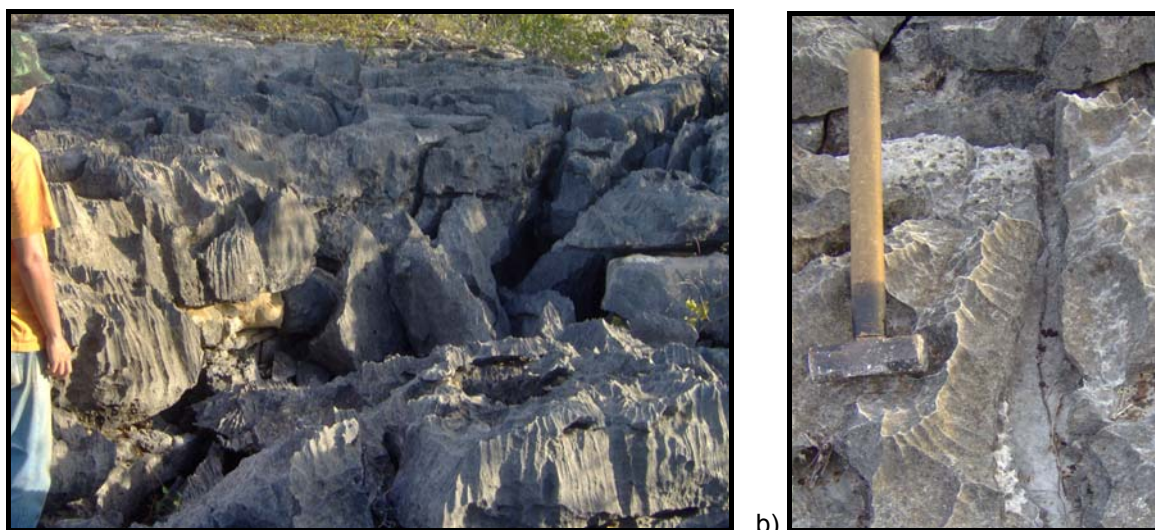


FIGURA 4.18 – Mecanismos pós-deformacionais que influenciaram na abertura das discontinuidades: a) Abatimentos de blocos entupindo fraturas (Coord. UTM-WGS 84: 653.060/9.388.812); e b) Formação de lapiás evoluindo para sulcos (Coord. UTM-WGS 84: 653.122/9.389.170).



FIGURA 4.19 – Mecanismo pós-deformacional representado pela formação de dolina de dimensões métricas formando um importante sistema de caverna (Coord. UTM-WGS 84: 652.047/9.388.690).

4.1.2 As Falhas

Na área de estudo, estas feições, mesmo em menor quantidade que as juntas, são demonstrações fundamentais da atividade tectônica no nível crustal superior, onde as rochas apresentam comportamento frágil associado a um deslocamento diferencial ao longo da superfície de ruptura.

De forma regional, sabe-se que as falhas desempenham papel importante na evolução da Bacia Potiguar, unidade geológica onde está inserida a presente pesquisa. São estruturas que atuam no controle da sedimentação e no modelado atual do relevo. Possuem também, grande importância em obras de captação de água subterrânea, e principalmente petróleo e gás, por terem servido como condutos para a migração de hidrocarbonetos na bacia, por isso tão importante é o seu estudo.

Estas feições foram reconhecidas em campo por pequenas falhas com movimentação transcorrente dextral, materializados tanto por preenchimento em

forma de brechas (Figura 4.20b), quanto pelo aparecimento de fraturas de segunda ordem, também conhecidas como fraturas de *Riedel* ou simplesmente *R* e *R'* (Figura 4.20a). As fraturas *R* formam um ângulo de 15° com o plano principal de cisalhamento *C* e funcionam como indicador cinemático do movimento, apresentando sentido de cisalhamento idêntico ao do plano principal. Por outro lado, as fraturas *R'* formam um ângulo de 115° com o plano principal e seu sentido é oposto ao do cisalhamento principal (Figura 4.20c). Estes planos são de pequena extensão e apresentam um aspecto escalonado (Figura 4.20a).

As falhas encontradas indicam um regime tectônico do tipo transcorrente, ou seja, caracterizadas por mergulhos verticais, σ_1 e σ_3 horizontais e movimento relativo paralelo ao plano de falha. Não foram visualizadas estrias, talvez estes indicadores tenham sido dissolvidos pela ação da água.

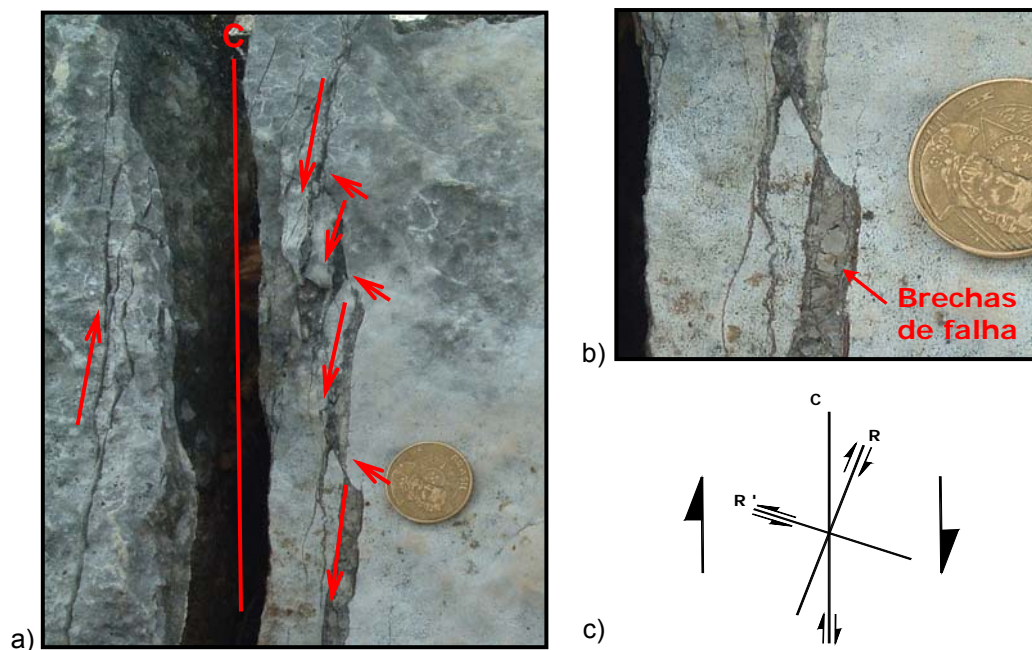


FIGURA 4.20 – a) Pequena falha com movimentação destal, materializada pelo aparecimento de fraturas de 2ª ordem, sendo *R* com sentido de cisalhamento igual ao do plano principal e *R'* com sentido oposto a este; b) Detalhe mostrando preenchimento em forma de brechas; e c) Esquema de movimento entre o plano *C* e as fraturas de *Riedel* *R* e *R'* (Coord. UTM-WGS 84: 652.047/9.388.690).

4.1.2.1 Origem

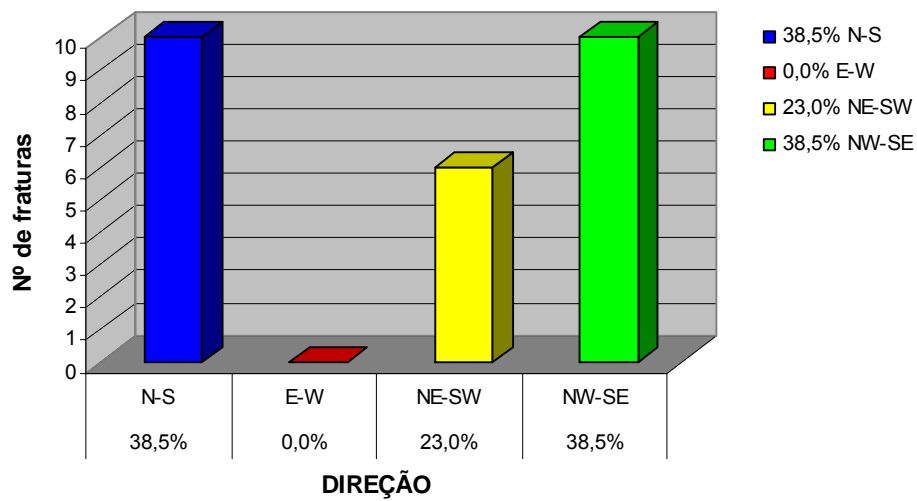
Toda a trama estrutural da Bacia Potiguar está ligada a evolução da margem continental brasileira. O rifteamento crustal que gerou a Bacia Potiguar no Cretáceo Inferior ocorreu quando as placas Sul-Americana e Africana ainda estavam unidas. O arcabouço estrutural da bacia é marcado por feições morfoestruturais, relacionadas com os grandes eventos que a afetaram. A fase de estiramento crustal e rifteamento é basicamente representada por grabens de direção NE-SW na porção emersa da bacia e NW-SE na porção submersa. O final do rifteamento crustal foi marcado por peneplanização regional dos sedimentos depositados durante o estágio rift, dando início ao estágio pós-rift, que durante sua evolução ocorreram diversas reativações tectônicas (Matos, 1992; Cremonini, 1995).

No geral, a evolução da Bacia Potiguar é marcada por importantes falhamentos de extensão regional, tais como o Sistema de Falhas de Carnaubais - SFC, de direção NE a ENE, que define o *graben* central da bacia através de rejeitos normais de até 5 km, bem como o Sistema de Falhas de Afonso Bezerra - SFAB, de direção NW. Segundo Hackspacher *et al.* (1985) *in* Dantas (1998), estes complexos sistemas de lineamentos NE e NW se entrelaçam e penetram por quase toda a bacia.

4.1.2.2 Orientação Espacial

As falhas, em comparação com as juntas, são estruturas maiores em todos os aspectos, seja em relação ao comprimento, espaçamento ou abertura. No que diz respeito a orientação espacial, a técnica de descrição foi a mesma usada para as juntas, ou seja, tomou-se apenas a direção do plano, uma vez que o mergulho foi considerado vertical.

Observa-se que estas estruturas ocorrem em três direções, que num total de 26 medidas, concentrações segundo orientação N-S (38,5%), NW-SE (38,5%) e NE-SW (23,0%) (Figuras 4.21 e 4.22). Não foram encontradas falhas com direção E-W.



4.21 – Histograma da orientação espacial das falhas, com maiores contrações nas direções NS, NE-SW e NW-SE.

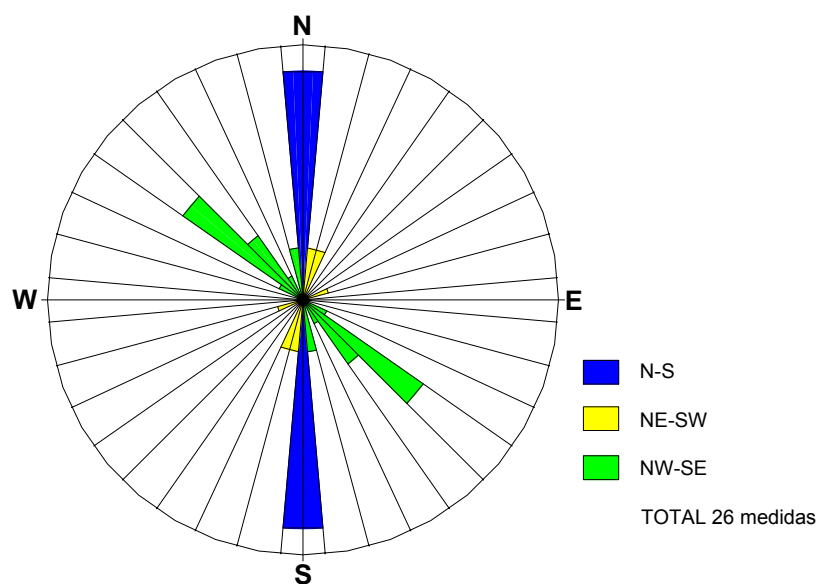


FIGURA 4.22 – Diagrama de roseta com representação espacial das falhas, mostrando variadas direções, que agrupando segundo concentrações N-S, NE-SW e NW-SE.

4.1.2.3 Persistência

O parâmetro persistência em se tratando das falhas é facilmente observado. Estas estruturas estendem-se por dezenas e até centenas de metros, possíveis de serem visualizadas em imagem de satélite, o que decorre de uma influência regional.

Além de exibirem grandes tamanhos, em comparação às juntas, as falhas também atingem profundidades expressivas, superiores a 10 metros, atravessando vários estratos.

Em campo o comprimento destas falhas foi grosseiramente quantificado pela observação do tamanho do traço da descontinuidade ao longo do plano de exposição. De acordo com comprimento modal do traço sugerido pela *International Society for Rock Mechanics – ISRM (1983)*, as falhas na área variam de 26 a 131 metros, enquadrando-se todas na categoria de persistência muito grande (> 20 metros).

Freqüentemente, o comprimento das descontinuidades é superior a superfície exposta da rocha, revelando, portanto um caráter estimativo dos valores adotados. As dificuldades e incertezas envolvidas nos processos de medição no campo, devem ser levadas em consideração, pois grande parte das falhas localizam-se em afloramentos de difícil acesso, caracterizado por estruturas profundas e lapiás muito desenvolvidos.

4.1.2.4 Espaçamento

As falhas, ao contrário das juntas, ocorrem mais afastadas uma da outra. Por esse motivo foram submetidas a uma técnica de descrição diferente das juntas.

Em imagem de satélite foram plotados e traçados todos os planos de falhas mapeadas e interpretadas. Em seguida o parâmetro espaçamento foi determinado pela medida em mapa daquelas estruturas próximas entre si. Desta forma as distâncias obtidas podem ser consideradas dados de sensoriamento remoto, ou seja, captação de informações da superfície terrestre sem o contato direto (ANEXO 01).

A partir da interpretação destes dados percebe-se que as falhas apresentam espaçamentos diversos, desde métricos a centenas de metros, variando entre 5 a 314 metros.

4.1.2.5 Abertura

A técnica aplicada para a descrição da abertura das falhas também se desenvolveu de forma diferente da utilizada para as juntas. A abertura foi medida a cada metro ao longo do plano das falhas, de uma extremidade a outra, fazendo-se uma média dos valores obtidos (Figura 4.23a).

As falhas que recortam a área de pesquisa apresentam abertura variando entre 21 cm até maior que 4 m, enquadrando-se na definição de fraturas muito abertas a cavernosas (Tabela 4.3) de acordo com as classes adotadas pela *International Society For Rock Mechanics*, ISRM – 1983. Em alguns casos, associados a estas estruturas, surgem colapsos de blocos, formando dolina de extensões métricas e importante potencial cavernícola (Figura 4.23b).

Acredita-se que estas grandes aberturas podem ser resultantes não só da dissolução do calcário, mas também por deslocamentos das discontinuidades evidenciados pelo aparecimento de fraturas de *Riedel* e brechas de falha, que funcionam como indicadores de cisalhamento (Figura 4.20).



FIGURA 4.23 – a) Método de medição da abertura e comprimento das falhas mapeadas; b) Falha classificada como cavernosa (4 m) (Coord. UTM-WGS 84: 652.303/9.389.844 e 653.672/ 9.388.782).

4.1.2.6 Profundidade

O parâmetro profundidade foi analisado apenas nos planos de falhas, por serem estruturas maiores e permitirem a medição direta com trema. Em campo estas falhas apresentam-se bloqueadas por desabamentos ou por sedimentos inconsolidados, o que induz uma medição aferida, uma vez que não se alcançou a base propriamente dita do plano de falha.

O levantamento consistiu em tomar medidas da profundidade ao longo da falha, fazendo-se uma média aritmética desses valores. De acordo com as classes determinadas pela *International Society For Rock Mechanic* – ISRM, 1983 (Tabela 4.4), na área existe uma predominância de estruturas de “pequena profundidade”, menor que 1m. No entanto, também existem fraturas consideradas “muito profundas”, com profundidades superiores a 4 m (Figura 4.24). Em campo correspondem a falhas com profundidades variando de 5 até 11 m.

TABELA 4.4 – CLASSES DE PROFUNDIDADES SEGUNDO ISRM – *INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANIC*, 1983.

PROFUNDIDADE (m)	DESCRIÇÃO
$\leq 1m$	Pequena
$1 < a \leq 2$	Média
$2 < a \leq 4$	Profunda
$> 4m$	Muito Profunda
$\leq 1m$	Pequena

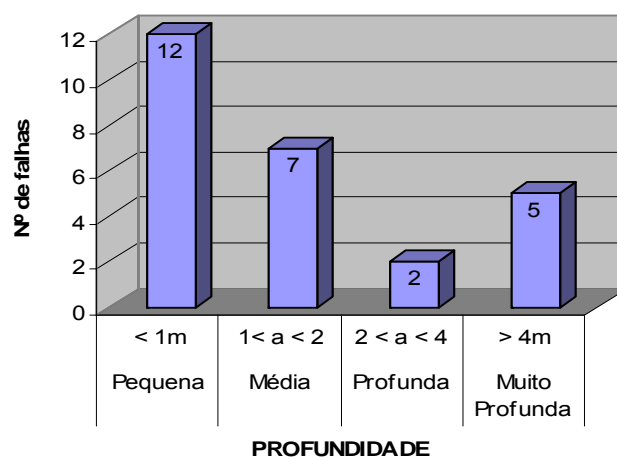


FIGURA 4.24 – Histograma da profundidade das falhas, com maior contração na categoria muito pequena.

Fazendo-se uma correlação entre a profundidade das fraturas e a orientação espacial destas, observa-se que não foram registradas falhas de direção E-W e que a maior parte das falhas de direção N-S, enquadra-se na categoria de profundidade “pequena”, enquanto que as de direção NE-SW e NW-SE, classificam-se como de profundidade “média”. Vale ressaltar a existência de fraturas na classe “muito profunda”, ao longo destas três direções preferenciais (Figura 4.25).

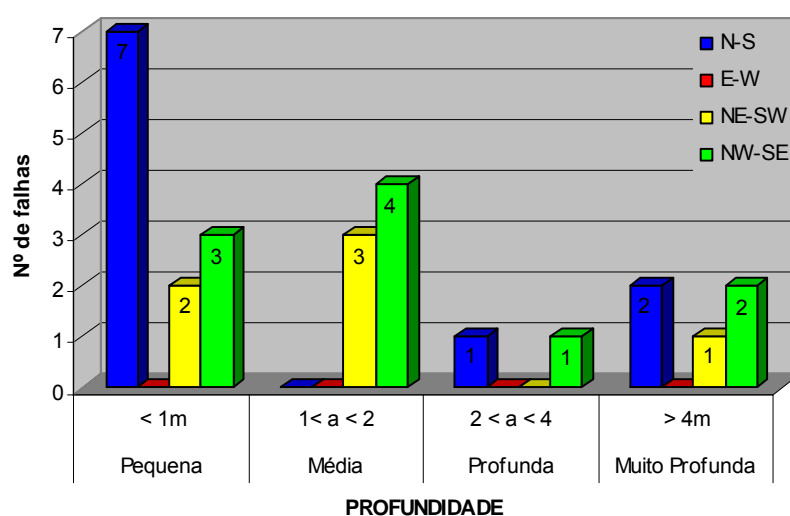


FIGURA 4.25 – Histograma mostrando a correlação entre a profundidade e a orientação espacial das falhas. Observa-se a seguintes informações: (i) não foram registradas falhas de direção E-W; (ii) a maior parte das falhas de direção N-S, enquadra-se na categoria de profundidade “pequena”; (iii) a maior parte das falhas de direção NE-SW e NW-SE, classificam-se como de profundidade “média”; e (iv) Existem fraturas na classe “muito profunda”, ao longo destas três direções preferenciais.

4.2 Juntas x Falhas

Os procedimentos acima relatados das juntas e falhas permitiram aperfeiçoar o traçado das estruturas na área de pesquisa, demonstrando que o sistema comporta-se como enxames de lineamentos, envolvendo carstificação, abatimento de blocos, formação de dolinas e cavernas.

As juntas são de origem tectônica (fraturas de extensão e estilolíticas) e não tectônica (gretas de contração); classificadas segundo sua orientação espacial como J_1 (N-S), J_2 (E-W), J_3 (NE-SW) e J_4 (NW-SE); das quais as fraturas J_3 são as de

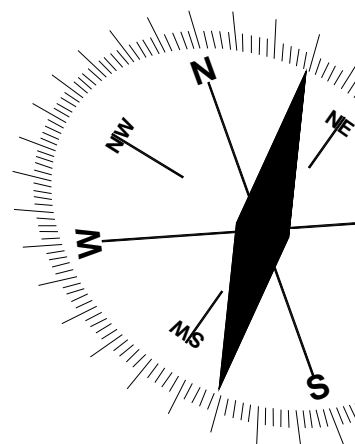
caráter mais contínuo e com comprimentos superiores a 20 metros. Os outros três grupos (J_1 , J_2 e J_4), são menos persistentes, com a maior parte das fraturas, variando de 1 a 3 m de comprimento. O estudo mostra ainda que as juntas possuem espaçamentos oscilando entre moderado (J_2), grande (J_1) e muito grande (J_3 e J_4) e quanto ao parâmetro abertura podem ocorrer desde fechadas até cavernosas, ou mesmo preenchidas.

As falhas, em comparação as juntas, são maiores em todos os aspectos: comprimento e espaçamento da ordem de centenas de metros, e abertura e profundidades métricas. Ocorrem em três direções, N-S, NW-SE e NE-SW, estando sua origem ligada a evolução da margem continental brasileira. Suas profundidades variam de “pequena”, onde predominam as de direção N-S, até “muito profundas”, ao longo destas três direções preferenciais.

Com base no presente estudo, voltado a deformação em nível superficial, percebe-se a grande importância da estruturação no controle da paisagem, destacando-se as direções N-S, NE-SW e NW-SE, uma vez que a concentração dessas fraturas na área, favorece a ação da água em esculpir a rocha, atribuindo-lhe forte tendência à formação de cavernas e desenvolvimento de espeleotemas.

Capítulo 05

ANÁLISE DE SENSOR REMOTO



5 ANÁLISE DE SENSOR REMOTO

A técnica de sensoriamento remoto tem se tornado cada vez mais, parte do nosso dia-a-dia. Do ponto de vista científico imagens de satélite coletadas por sensores remotos têm servido de fontes de dados para estudos e levantamentos geológicos, acima de tudo estruturais. Representam uma das melhores formas de monitoramento local e regional, voltado ao estudo da deformação em nível superficial e seu controle na paisagem, devido sua eficiente visão sinóptica.

O Sensoriamento Remoto é a captação à distância de dados da superfície terrestre sem o contato direto (*Loch, 1989*). É uma tecnologia que oferece vasto arsenal de produtos caracterizados por imagens espaciais de diferentes resoluções. Atualmente, o método é utilizado em diversos campos de conhecimento, dentre os quais destacam-se estudos geológicos, ambientais, florestais e oceanográficos. Fatores como a rapidez, eficiência e periodicidade na aquisição de imagens são as principais vantagens da sua utilização em ciências como a geologia, a agronomia, a cartografia, o urbanismo, etc.

O uso desta tecnologia resulta em uma grande quantidade de dados, representados na forma de imagens digitais, que aliadas a capacidade de interpretação do sistema visual humano, permite identificar feições da superfície terrestre. O presente estudo integra a interpretação da imagem de satélite com o levantamento de dados em afloramento, contribuindo com o estudo estrutural do terreno.

5.1 Foto-interpretação da Imagem

Este tipo de abordagem é essencial para esclarecer a participação das estruturas no controle da geometria de cavidades subterrâneas.

Para a realização da pesquisa foi utilizada uma imagem *Quickbird*, adquirida junto ao Centro Nacional de Estudo, Prospecção e Manejo de Cavernas – CECAV/IBAMA. Trata-se de uma imagem de satélite de alta resolução, da ordem de 60 cm na banda pancromática, o que possibilita elevada qualidade na obtenção da

imagem.

Três afloramentos foram previamente definidos para a interpretação geológica das estruturas (Figura 5.1). Diversos grupos (famílias) de lineamentos foram reconhecidos na área, tanto em campo como na imagem de satélite. Os mesmos correspondem a expressão superficial dos sistemas de falhas e juntas ali existentes.

A técnica permitiu aperfeiçoar o traçado de estruturas na área, demonstrando que as mesmas comportam-se como enxames de lineamentos nas mais variadas direções. Este trabalho relaciona o arcabouço fraturado dos maciços rochosos (lineamentos mapeados e interpretados em imagem de satélite) com a ocorrência de cavidades subterrâneas, as cavernas.

5.1.1 Lineamentos Interpretados

Por definição, LINEAMENTO é uma feição linear mapeável, simples ou composta, contínua ou descontínua, da superfície terrestre, cujas partes estão alinhadas em arranjo retilíneo ou suavemente curvo, refletindo a disposição em sub-superfície (Madrucci, 2003).

O estudo consistiu no reconhecimento de feições lineares, pela interpretação em tela, fornecida pelo aumento da imagem *Quickbird* até o limite do visível, ou seja, sua resolução máxima. Na área, estes elementos são em geral constituídos por segmentos retilíneos ou suavemente curvilíneos, por vezes escalonados, com comprimento individual da ordem de dezenas de metros (Figura 5.2, 5.3 e 5.4).

5.1.2 Lineamentos Mapeados

A foto-interpretação geológica da imagem auxiliou na identificação das feições estruturais relacionadas às fraturas (falhas e juntas) e morfo-estruturas (cavernas, dolinas e abrigos). Porém foi necessária a utilização conjunta dos dados de sensoriamento remoto com trabalhos de medição em campo, para uma análise mais confiável.

Após a foto-interpretação em tela foram adicionadas todas as estruturas coletadas em campo consideradas como falhas. A partir daí a investigação revelou

um forte controle estrutural sobre a formação de cavidades subterrâneas, uma vez que estas apresentam as mesmas direções das fraturas de maior frequência na sua área de abrangência.

5.1.3 Interpretação Integrada

O tratamento integrado aplicado permitiu delinear diversas direções, havendo maior destaque para as NE-SW, NW-SE e N-S. Lineamentos com direção E-W têm pouca ou quase nenhuma participação no traçado dos sistemas. Por outro lado, os lineamentos NW-SE e NE-SW coincidem com a topografia da caverna mapeada. Conforme se observa, isso significa que a presença destas estruturas, aliadas a outros fatores, como grau de abertura, persistência e profundidade, exerce forte controle e influencia direta na formação destas cavidades subterrâneas (Figura 5.2, 5.3 e 5.4).

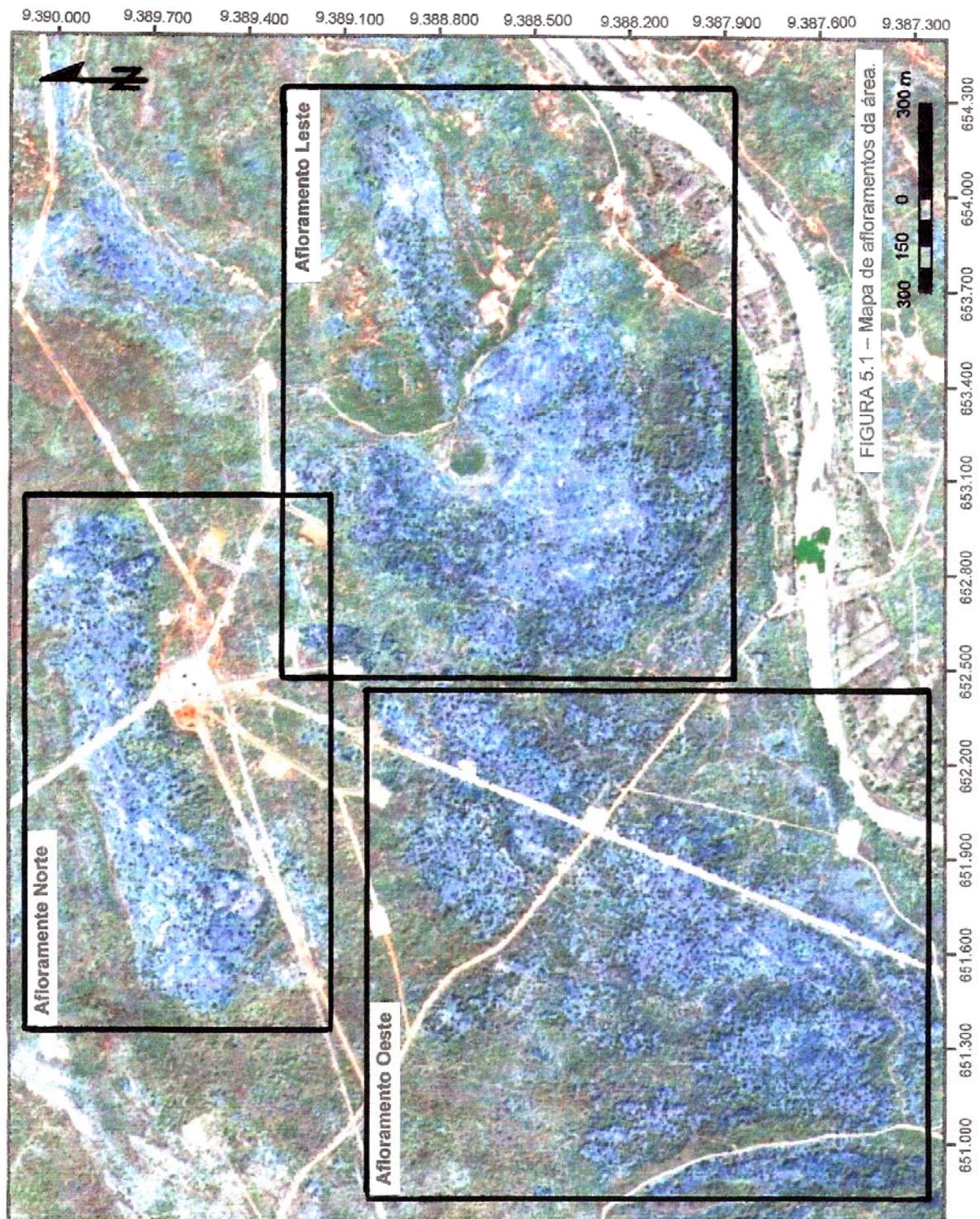


FIGURA 5.1 -- Mapa de afloramentos da área.

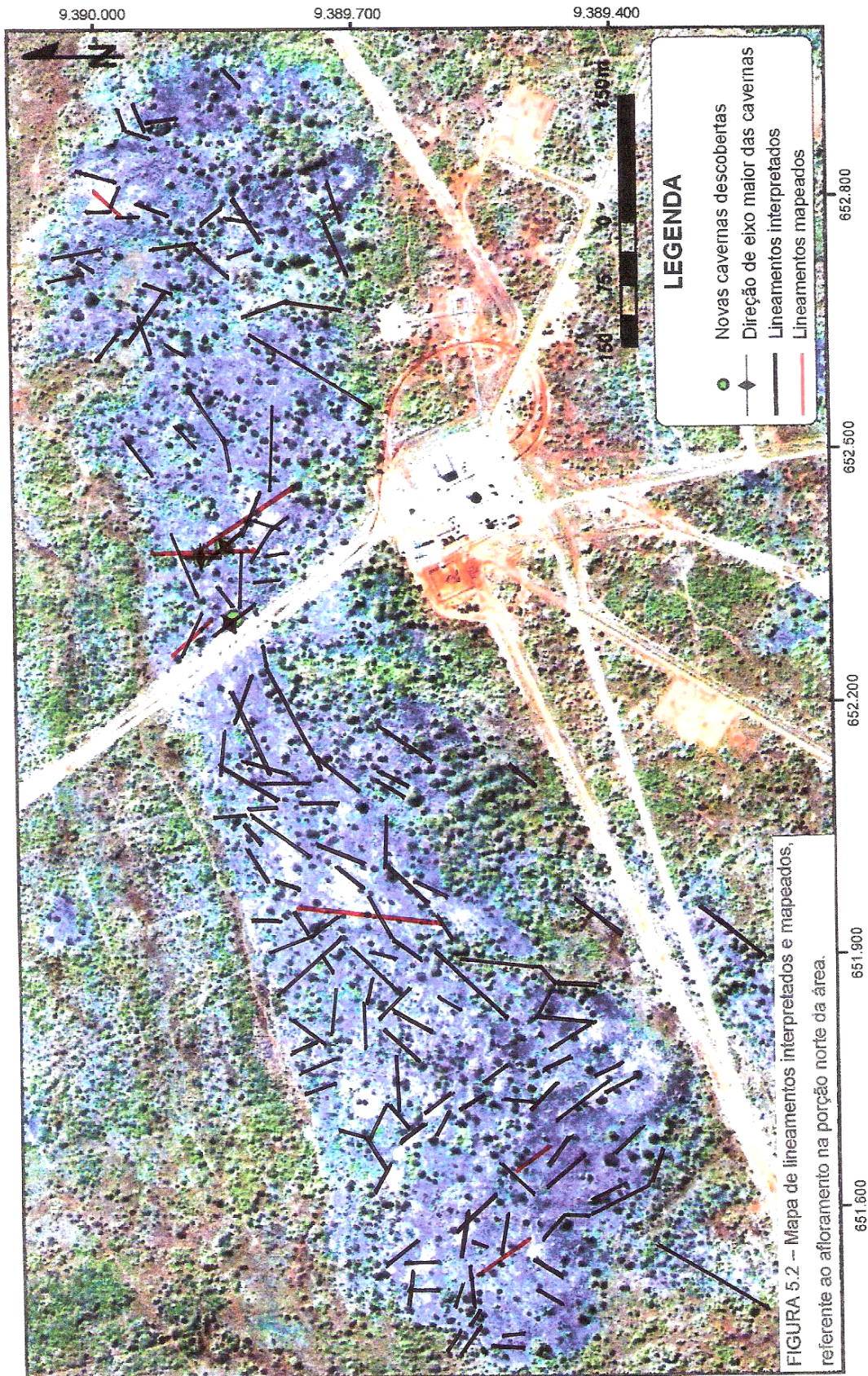


FIGURA 5.2 -- Mapa de lineamentos interpretados e mapeados, referente ao afloramento na porção norte da área.

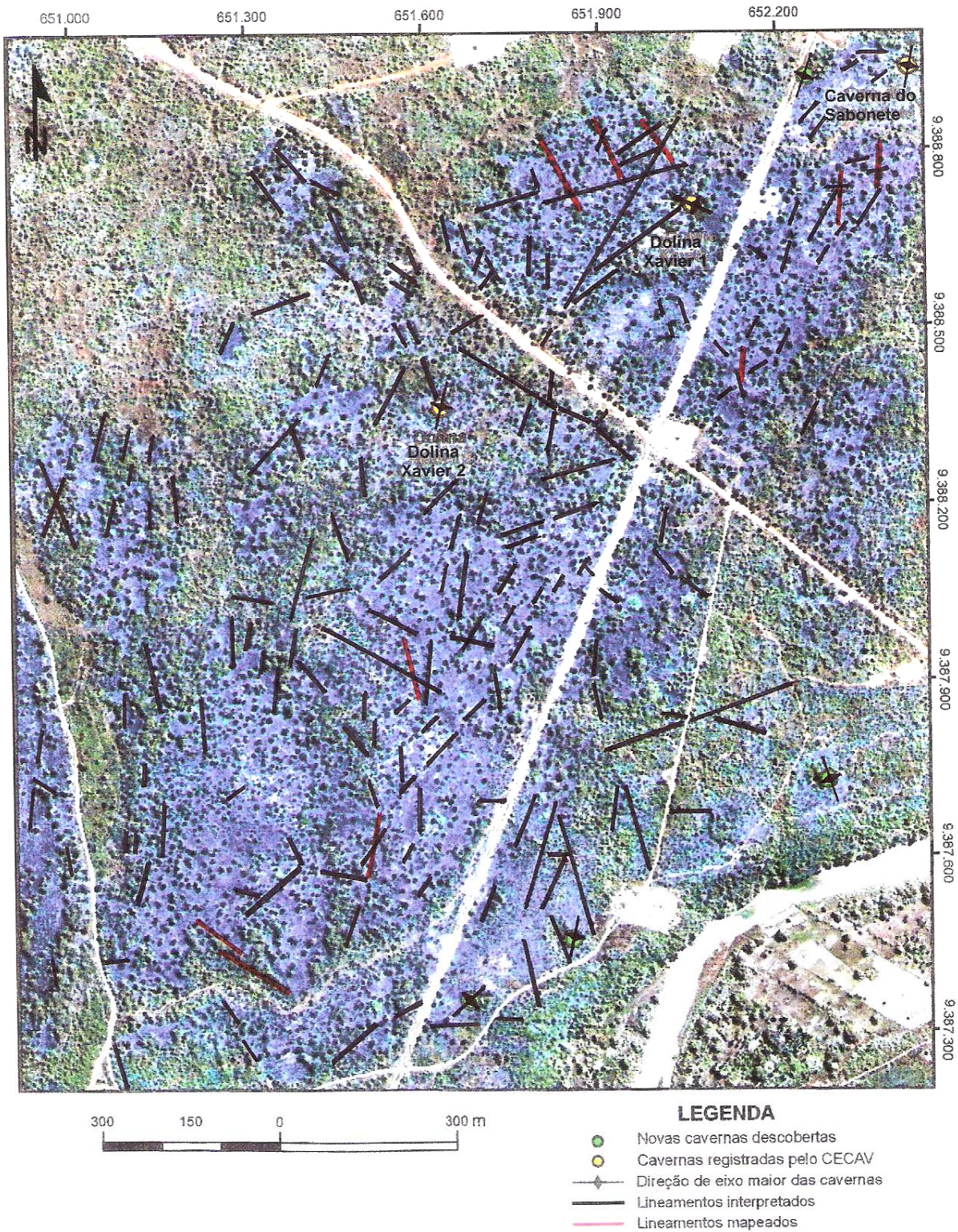


FIGURA 5.3 – Mapa de lineamentos interpretados e mapeados, referente ao afloramento na porção oeste da área.

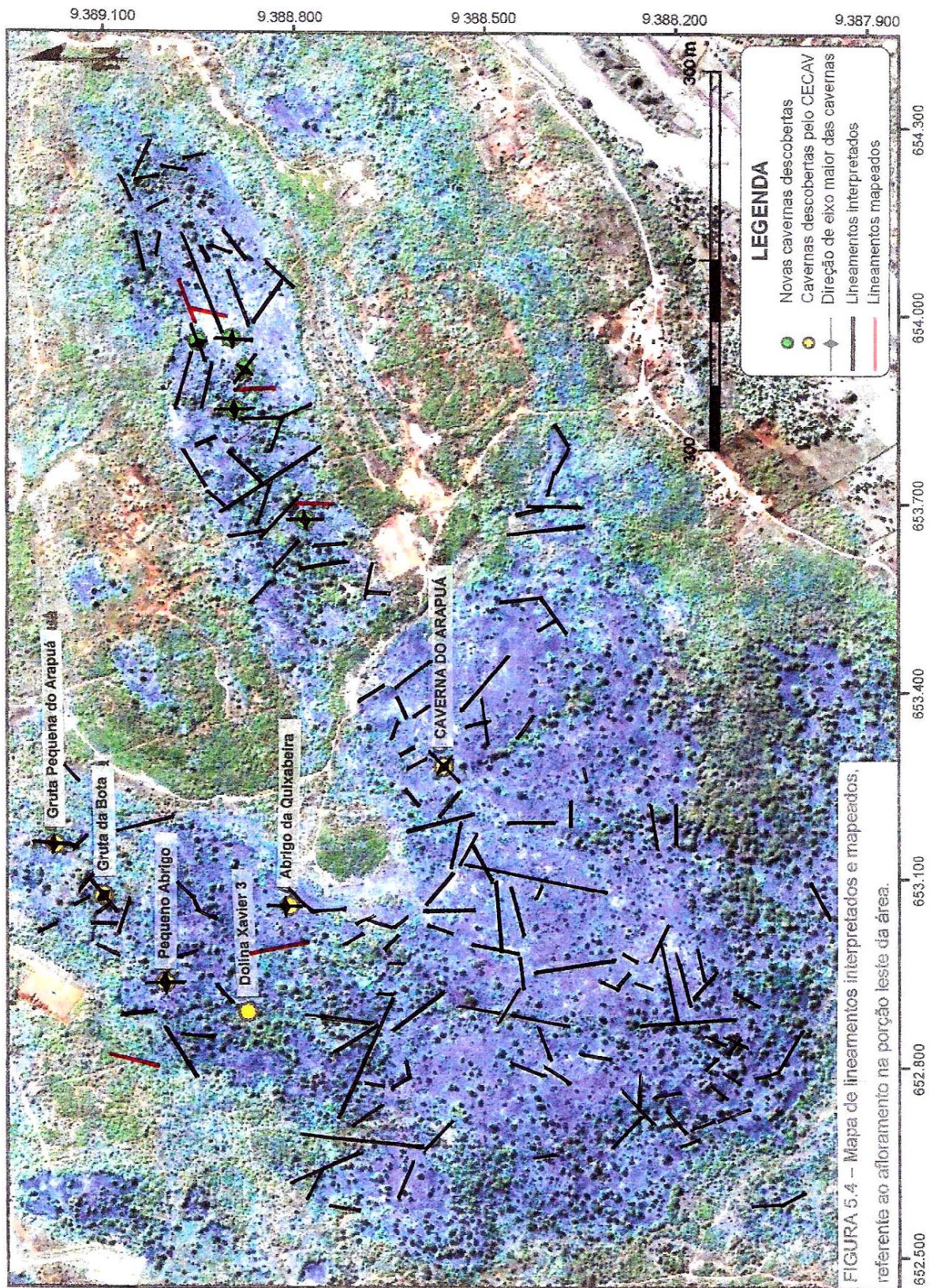


FIGURA 5.4 – Mapa de lineamentos interpretados e mapeados, referente ao afloramento na porção leste da área.

Como observado, o acervo de estruturas exerce nítida influência na formação de abrigos e dolinas por meio do colapso de blocos ao longo das direções preferenciais, N-S, NE-SW e NW-SE (Figura 5.2, 5.3 e 5.4). Além disso, fazendo-se uma integração do mapeamento estrutural do terreno com o contexto geológico regional descrito em trabalhos prévios, percebe-se que essas feições assumem também as mesmas direções de importantes sistemas de falhas que fazem parte da história tectônica da Bacia Potiguar.

Estudos realizados por Dantas (1998) mostram que os Sistemas de Falhas de Carnaubais (SFC) e de Afonso Bezerra (SFAB) formam um conjunto de falhas paralelas, com características geométricas, estruturais e tectônicas semelhantes, definindo dois sistemas orientados de acordo com as direções NE-SW e NW-SE, respectivamente.

Segundo Hackspacher *et al.* (1985) *in* Dantas (1998), a Falha de Carnaubais é bem delimitada por métodos geofísicos, enquanto que a Falha de Afonso Bezerra compõe um extenso lineamento, facilmente identificado por sensoriamento remoto. Estes mesmos autores reconheceram um complexo sistema estrutural onde os lineamentos NE e NW se entrelaçam e penetram por quase toda a Bacia Potiguar (Figura 5.5).

A partir de pesquisa bibliográfica acoplada aos dados de campo e da imagem orbital, verifica-se que a deformação a qual as rochas da região foram submetidas, resulta da superposição de estruturas regionais, uma vez que as descontinuidades mapeadas seguem as mesmas orientações que as interpretadas por este estudo e por diversos autores, tais como, Cypriano & Nunes (1968) *in* Nogueira (2004), Hackspacher *et al.* (1985) *in* Dantas (1998), entre outros.



FIGURA 5.5 – Mapa estrutural proposto por Hackspacher *et al.* (1985) *in* Dantas (1998) mostrando que o complexo sistema de lineamentos NE e NW se entrelaça e penetra por quase toda a Bacia Potiguar.

Destarte, pode-se dizer que a análise da imagem orbital permitiu reconhecer que a série de lineamentos interpretados coincide em parte, não só com o arranjo local, mas também com todo sistema estrutural da Bacia Potiguar.

Com base nessa estruturação, supõe-se que esses lineamentos (NE-SW, NW-SE e N-S), são correspondentes a falhas encontradas na área mapeada e que essas famílias de fraturas são reflexos de uma tectônica de expressão regional.

5.2 Modelagem Boleana

Existem hoje numerosos SIGs em operação e, certamente, todos eles têm em comum a capacidade de desempenhar operações de superposição. Todos os dados acima relatados também foram analisados conjuntamente em ambiente SIG. O ponto de partida para executar as funções de SIG aqui apresentados foi a

organização de um banco de dados geológicos. Informações coletadas em imagem de satélite e em campo, tais como, comprimento, orientação espacial e profundidade das fraturas, organizadas em tabelas, foram enviadas ao Departamento de Matemática da *Pontifical Catholic University*, por intermédio de Marcos Lage, pesquisador da PUC. Estes dados originaram modelamentos matemáticos, ou Modelagem Boleana, empregando-se o software *Petbool*, gerando gráficos em três dimensões e fornecendo uma visão da intensidade de fraturamento em superfície e subsuperfície da área de pesquisa.

Segundo Silva (2003) a lógica booleana ou modelagem booleana é muito usada em SIG, pois permite analisar rapidamente áreas que possuem simultaneidades ou conectividades utilizando-se de quatro operadores: OR (uniões), AND (interseções), NOT (negações) e XOR (exclusões), como mostra o diagrama de Venn (Figura 5.6).

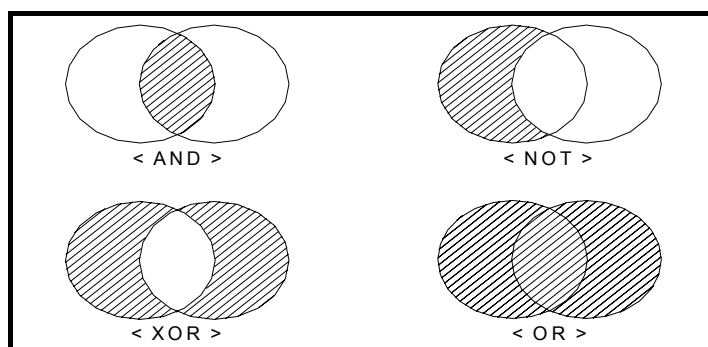


FIGURA 5.6 – Diagrama de Venn apresentando os operadores <AND>, <NOT>, <OR> e <XOR>.

Os parâmetros analisados na modelagem foram: profundidade das falhas, comprimento e o ângulo em relação ao norte (Figura 5.7). O domínio foi cortado por três planos que ilustram diversas formas de interseções (Figura 5.8). Desta maneira, através de superposição de dados que ocupam a mesma área georeferenciada, ou seja, o mesmo lugar no espaço, gerou-se células do domínio de modelagem, que são marcadas quando as estruturas são cortadas por planos de simulação (Figura 5.9).

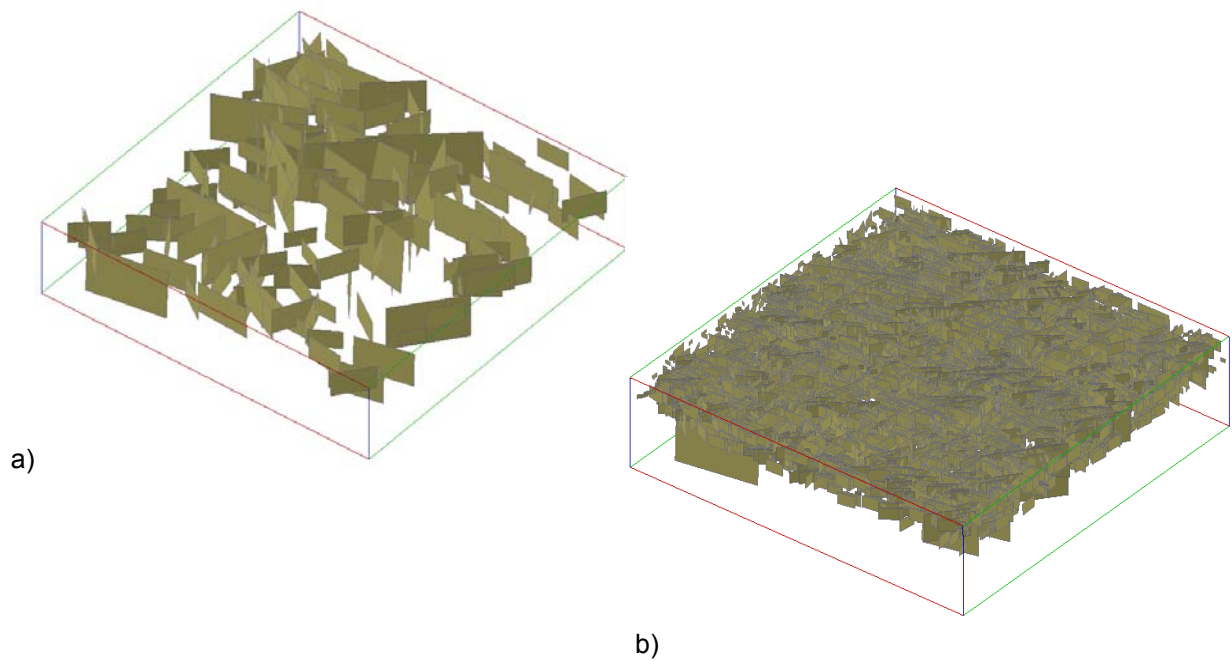


FIGURA 5.7 – Representação em 3D da modelagem, mostrando profundidade, comprimento e direção das falhas (a) e juntas (b).

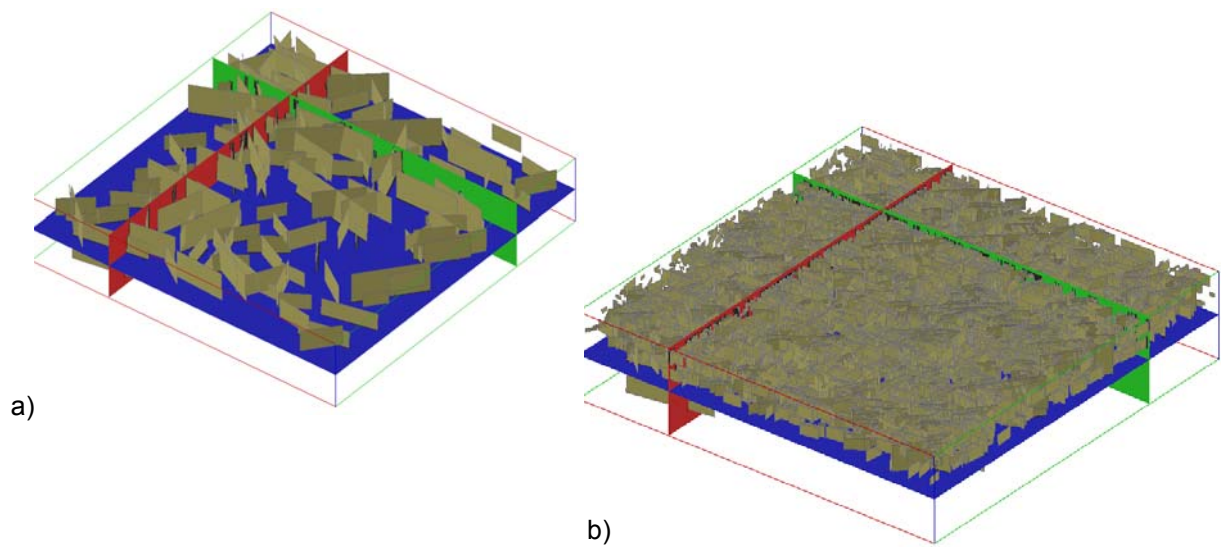


FIGURA 5.8 – Visão 3D com três planos de corte ilustrando diversas formas de interseções para as falhas (a) e juntas (b).

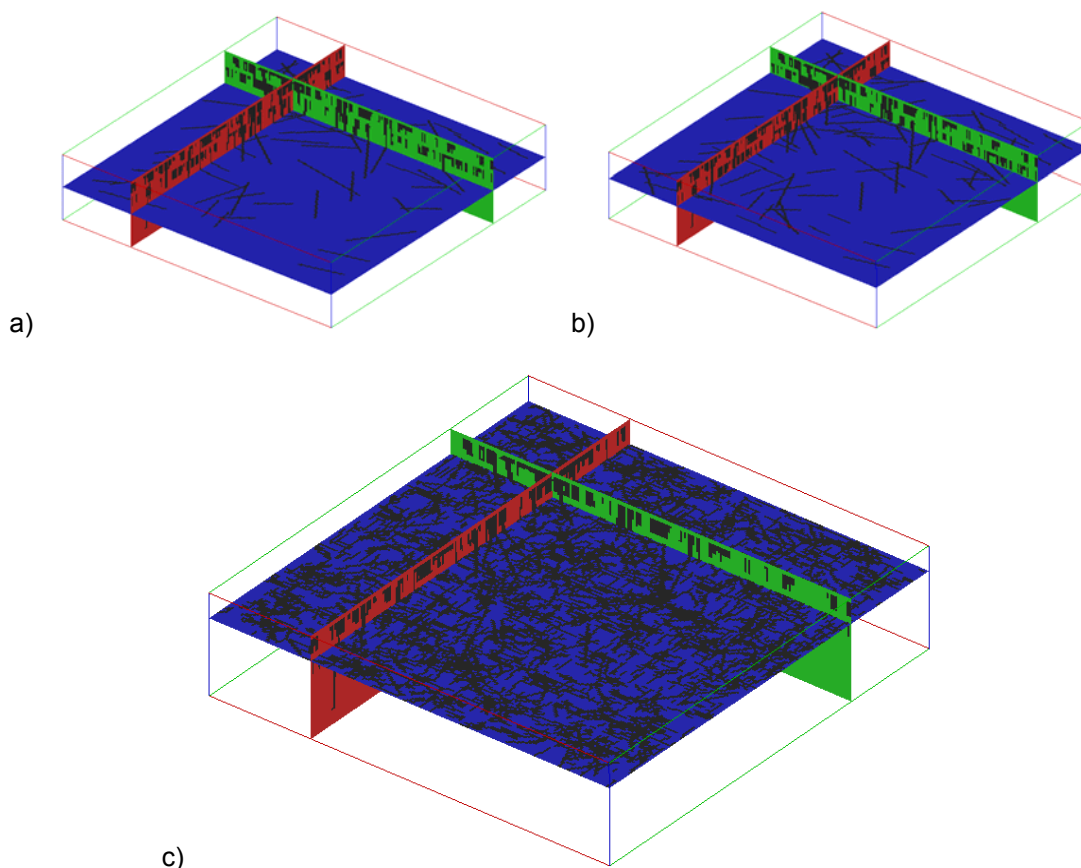


FIGURA 5.9 – Células geradas quando as estruturas são cortadas por planos de simulação na base (a), numa porção intermediária (b) e no topo (c), mostrando a densidade do terreno que foi preenchida por falhas e fraturas.

As figuras abaixo são representações do plano XY e mostram em preto as células que foram cortadas por planos gerados pela simulação (Figura 5.10). A figura “a” representa o topo, a “b” representa o centro e a “c” a base. Observa-se que a concentração de fraturas diminui com a profundidade, onde algumas fraturas alcançam estratos mais profundos que outras.

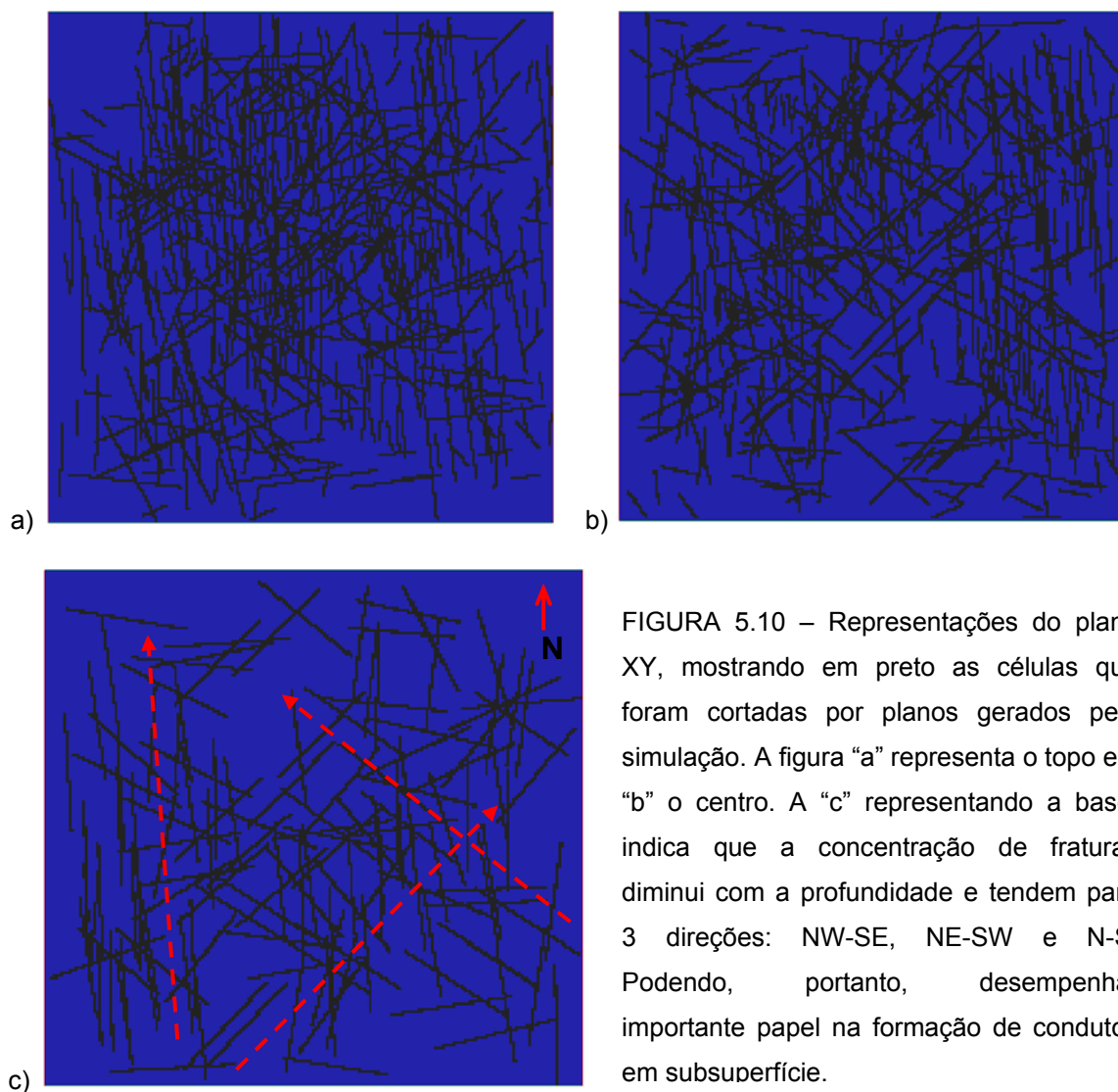
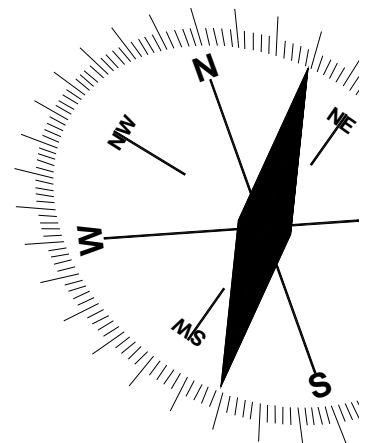


FIGURA 5.10 – Representações do plano XY, mostrando em preto as células que foram cortadas por planos gerados pela simulação. A figura “a” representa o topo e a “b” o centro. A “c” representando a base, indica que a concentração de fraturas diminui com a profundidade e tendem para 3 direções: NW-SE, NE-SW e N-S. Podendo, portanto, desempenhar importante papel na formação de condutos em subsuperfície.

Embora pareçam não seguir uma orientação preferencial bem marcada, é possível distinguir na figura “c” que existem 3 tendências de direções: NW-SE, NE-SW e outra aproximadamente N-S. Todas essas tendências se repetem nas demais formas de representações das fraturas. Aliado ao fator profundidade, como visto no capítulo anterior, podem estas, portanto, estar desempenhando importante papel na formação de condutos em subsuperfície.

Capítulo 06

PETROGRAFIA



6 PETROGRAFIA

Como dito anteriormente, o trabalho se prende à investigação de rochas calcárias pertencentes ao cretáceo da Bacia Potiguar. Para ser classificada como calcária, a rocha deve conter pelo menos 50% de minerais de carbonato de cálcio – CaCO_3 (Williams *et. al.*, 1970). Segundo análises químicas, o calcário da área é essencialmente calcítico, com cerca de 97,9%, em média, de CaCO_3 (Quadro 8.1). Dado que essas rochas são praticamente monominerálicas, guardam, por conseguinte, composição simples, mas texturas extremamente diversas. A complicação está no fato de não apresentarem um único modo de deposição, podendo ser vistas numa mesma seção delgada, texturas de origem múltipla, com componentes tanto ortoquímicos, como aloquímicos.

Os componentes ortoquímicos são representados por aqueles de precipitação química direta, não sofreram transporte, dividindo-se em: micrita, ou mosaico carbonático microcristalino e esparita, correspondendo a preenchimentos por cristais de carbonato maiores que 30 μm (Giannini, 2003). Enquanto que os componentes aloquímicos são fragmentos de carbonato de cálcio que, antes de sua formação, foram transportados e depositados como clastos (Protero e Schwab, 1996; Dourado, 1989). Eles são representados por:

- i) Fósseis ou restos orgânicos em geral (bioclastos);
- ii) Agregados orgânicos de origem fecal (*pellets*);
- iii) Agregados concêntricos de origem inorgânica (oolitos); e
- iv) Fragmento do próprio calcário removido dentro da mesma bacia de deposição (intraclastos).

A análise petrográfica se fez mediante a observação microscópica de 30 lâminas delgadas, submetidas a tingimento e impregnação. A finalidade de método consiste na melhor visualização dos constituintes e da porosidade da rocha. Preocupou-se em selecionar aquelas amostras mais representativas do calcário presente na área de pesquisa.

6.1 Classificação e nomenclatura

As classificações mais utilizadas e aceitas internacionalmente são as de Dunham e Folk (1962). Ambos baseiam-se na proporção de constituintes ortoquímicos e aloquímicos, diferenciando-se pelo fato de que Dunham impõe a textura deposicional original (Quadro 6.1) e Folk acrescenta a relação entre os 4 tipos de aloquímicos (Quadro 6.2).

QUADRO 6.1 – Classificação para rochas carbonáticas proposta por Dunham (1962).

Componentes originais não unidos organicamente durante a deposição				Componentes originais organicamente unidos durante a deposição	Textura deposicional não reconhecível
Com matriz micrítica		Sem matriz micrítica			
Suporte de matriz (grãos flotantes)		Suporte de grãos (grãos em contato)			
Menos de 10% de aloquímicos	Mais de 10% de aloquímicos				
MUDSTONE	WACKESTONE	PACKSTONE	GRAINSTONE	BOUNDSTONE	CARBONATO CRISTALINO

QUADRO 6.2 – Classificação para rochas carbonáticas proposta por Folk (1959, 1962).

ROCHAS ALOQUÍMICAS (mais de 10% de aloquímicos)	Mais de 25% de intracristalinos		Menos de 25% de intraclastos			
	-		Mais de 25% de oolitos	Menos de 25% de oolitos		
			-	Relação de fósseis e <i>pellets</i>		
				Maior de 3:1	Entre 3:1 – 1:3	Menor de 1:3
	Mais micrita que esparita	INTRAMICRITA	OOMICRITA	BIOMICRITA	BIOPELMICRITA	PELMICRITA
Mais esparita que micrita	INTRAESPARITA	OOESPARITA	BIOESPARITA	BIOPELESAPARITA	PELESAPARITA	
ROCHAS ORTOQUÍMICAS (menos de 10% de aloquímicos)	Aloquímicos entre 1 e 10%				Menos de 1% de aloquímicos	
	Aloquímicos mais abundantes				MICRITA DISMICRITA se a micrita está parcialmente recristalizada a esparita.	
	Intraclastos	Oolitos	Fósseis	<i>Pellets</i>		
	MICRITA C/ INTRACLASTOS	MICRITA C/ OOLITOS	MICRITA C/ FÓSSEIS	MICRITA C/ PELLETS		

Com o estudo ao microscópio foram identificados quatro variações da rocha, segundo o critério de Dunham (1962): (1) *wackestone*, (2) *packstone*, (3) *mudstone* e (4) carbonato cristalino.

Os três primeiros tipos contêm lama (*mud*), que Dunham define como silte ou grãos de argila, enquanto os **carbonatos cristalinos** não contêm lama, e referem-se a calcários no qual a textura deposicional original é indefinida (Prothero & Schwab, 1996). **Mudstones** são também conhecidos como calcilutitos ou lamas carbonáticas, que correspondem a rochas carbonáticas com mais de 90% de matriz micrítica (Giannini, 2003). Essas lamas se acumulam em áreas de águas tranqüilas, não afetadas por ondas, marés ou correntes oceânicas fortes, típico de ambiente de plataforma profunda. Por fim, **wackestone** e **packstone** são fácies transicionais entre as lamas de baixa energia e os *grainstones* de alta energia. Acumulam-se em ambientes plataformais de clima quente onde a energia das correntes não foi suficiente para remover toda a lama existente, mais distantes da borda da plataforma ou em porções mais profundas, onde há certa proteção. Em área de energia alta são organicamente aglutinados, muitos formados por pelotas fecais (Sugio, 1980).

6.1.1 *Packstone* intraclástico (Dunham, 1962) ou Intramicrito (Folk, 1959)

Ao microscópio a rocha apresenta granulometria de 0,25 mm a 2,10 mm, variando de areia média a muito grossa, pobremente selecionada, energia alta, com empacotamento normal a apertado. Apresenta contatos predominantemente flutuantes, sendo comuns contatos pontuais, surgindo alguns suturados e côncavo-convexo raros.

É formada por 25% de matriz micrítica, 5% de cimento calcítico em mosaico, 10% de porosidade intergrão e 70% de constituintes aloquímicos. Destes constituintes, cerca de 62% são intraclastos (Figura 6.1c), 30% pelóides (Figura 6.1b), 5% foraminífero milíolideo, 2% bivalve e 1% foraminífero rotalínideo (Figura 6.1d).

A porosidade, embora pouca, predomina a do tipo *vugs* ou intergrãos, seguidos de intragrãos e estilólitos porosos (Figura 6.1a, b,c) .

Como evento diagenético pode ser considerada a seguinte seqüência: micritização, compactação mecânica/química, cimentação, dolomitização e dissolução.

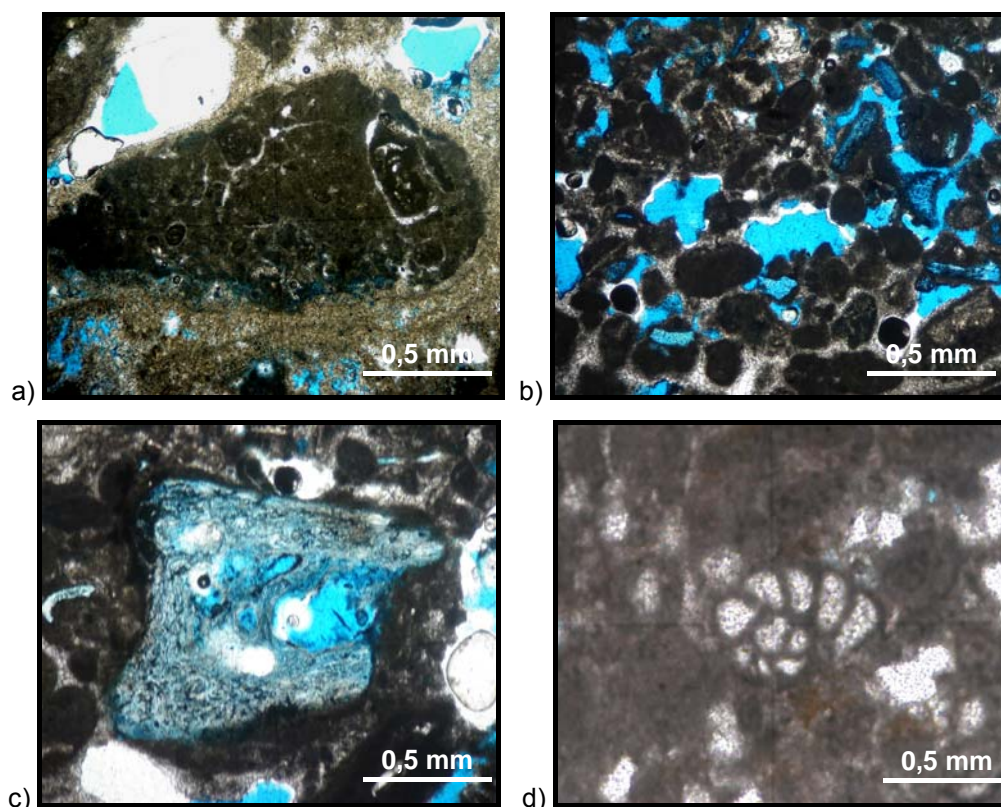


FIGURA 6.1 – Presença de intraclasto contornado por porosidade intersticial (a); Porosidade intergrão ou entre pelóides esféricos a elipsoidais, envolvidos por matriz micrítica incipiente (b); Porosidade secundária do tipo intragrão, na qual ocorreu a dissolução do próprio grão (c); Foraminífero rotalinídeo (corpo espiralado) em matriz de calcita micrítica (d).

6.1.2 *Packestone* Intraclástico (Dunham, 1962) ou Intraesparito (Folk, 1959)

Em campo estas rochas correspondem a níveis imediatamente acima de cavidades de dissolução. Tratam-se de rochas que, a olho nu e ao microscópico, apresentam porosidade praticamente ausente (no máximo 5%), podendo ser do tipo intergrão (Figura 6.2b), móldica, intragrão (Figura 6.2d) e microestillólitos.

Sua granulometria é de 0,14 mm a 1,10 mm, variando desde areia fina até muito grossa, com grãos pobremente selecionados. Formam empacotamento

apertado, com contatos predominantemente pontuais, sendo comum encontrar contatos retos e côncavo-convexo, além alguns contatos flutuantes.

Em lâmina é formada por 20% de matriz micrítica, 30% de cimento calcítico em mosaico mesocristalino fino ao redor de equinodermas ou em franja (Figura 6.2a) e 50% de constituintes aloquímicos. Destes, 70% são representados por intraclastos, 5% por pelóides, 6% equinodermas, 10% bivalves, 3% alga verde, 2% alga vermelha, 1% briozoário e 1% miliólídeo, 1% foraminífero e 1% gastrópode (Figura 6.3a, b, c). Foram encontrados alguns microestilólitos e grãos quebrados (Figura 6.2c).

O processo diagenético pode ser definido da seguinte forma: micritização, seguida de compactação mecânica, cimentação em franja e de calcita em mosaico, neomorfismo de bioclastos, dolomitização e dissolução.

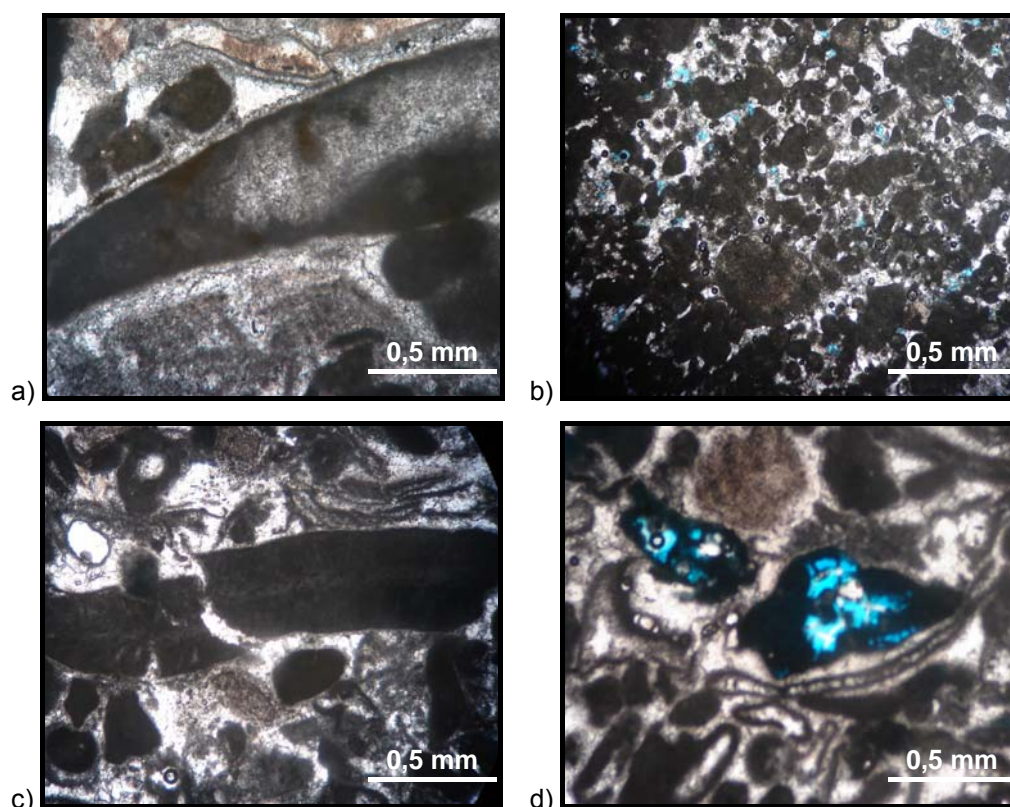


FIGURA 6.2 – Cimento em franja ao redor do grão (a); Intraclastos representados por agregado de fragmentos líticos carbonáticos, com resquícios de porosidade entre os grãos (b); Quebra de grão (c); e Porosidade intragrão (d).

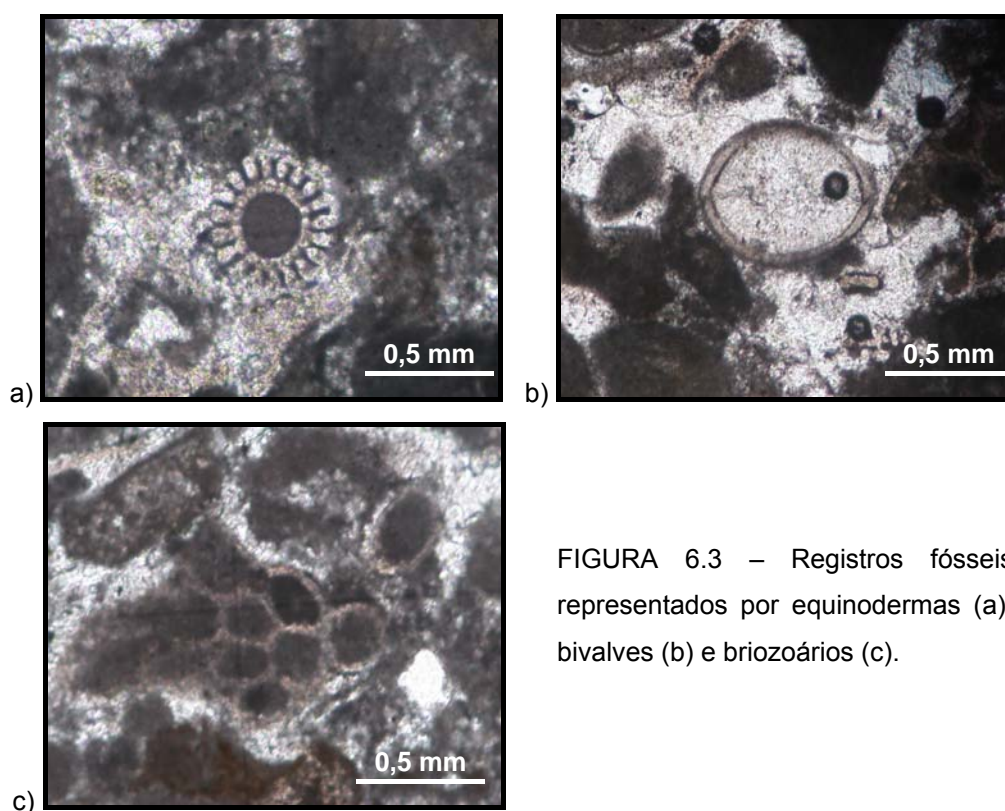


FIGURA 6.3 – Registros fósseis representados por equinodermas (a), bivalves (b) e briozoários (c).

6.1.3 *Wackestone* Pelóidal (Dunham, 1962) ou *Pelmicrito* (Folk, 1959)

No campo corresponde a um estrato imediatamente acima de um nível cavernoso, estando cerca de 6 m de profundidade. Macroscopicamente a rocha mostra-se maciça, bastante densa e com pequenos cristais disseminados de calcita. Também é visível o processo de dissolução do calcário, embora bem menos intenso que o da camada inferior. Nos poros ocorrem material argiloso, produto da alteração do calcário (Figura 6.4a).

Ao microscópio a granulometria ou tamanho médio dos pelóides é de 0,10 mm (Figura 6.4b), com características de energia baixa. Possui cerca de 30% de constituintes, representados por: pelóides (80%) e intraclastos (20%). A matriz corresponde 65% em lâmina, sendo do tipo deposicional com aspecto grumoso e o cimento aproximadamente 5% na forma de calcita microcristalina.

A porosidade ocorre em fraturas, algumas destas surgem obliteradas por

dolomitização (Figura 6.4c). Os eventos diagenéticos são: cimentação, neomorfismo, dolomitização e dissolução.

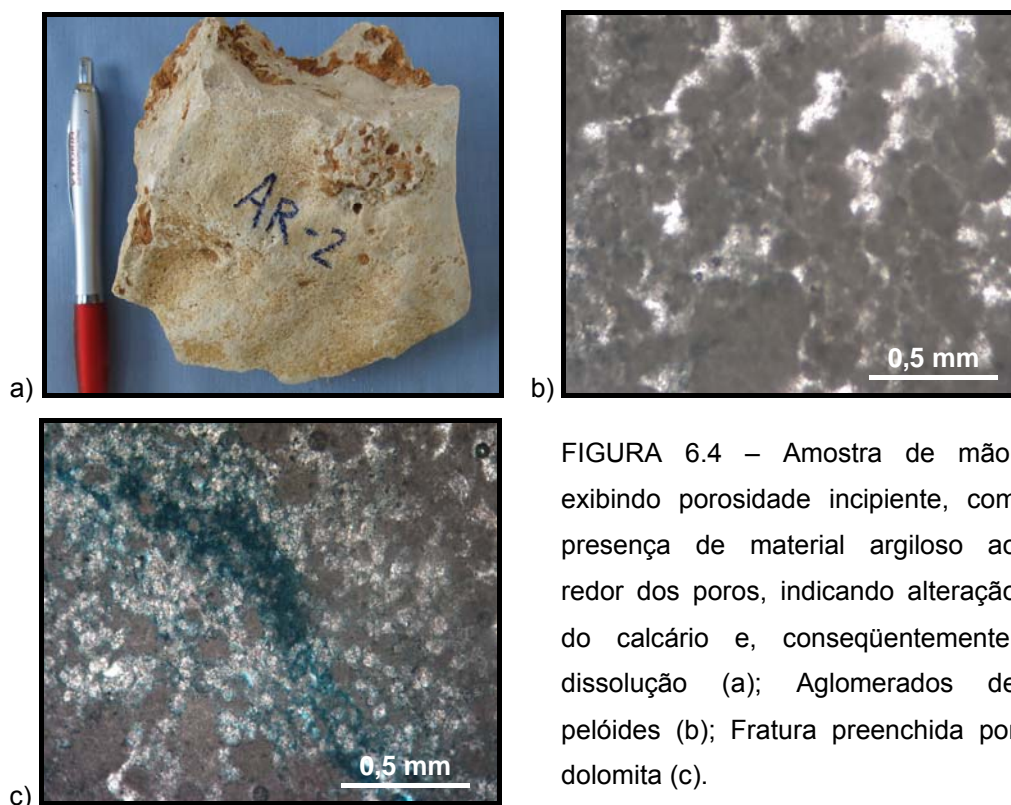


FIGURA 6.4 – Amostra de mão, exibindo porosidade incipiente, com presença de material argiloso ao redor dos poros, indicando alteração do calcário e, conseqüentemente, dissolução (a); Aglomerados de pelóides (b); Fratura preenchida por dolomita (c).

6.1.4 *Mudstone* bioclástico (Dunham, 1962) ou Dismicrito (Folk, 1959)

Representa um estrato com aspecto cavernoso, bem desenvolvido, que ocorre a 2,5 m da superfície, com aproximadamente 0,70 m de espessura e tamanho das cavidades em torno de 0,50 m. São níveis porosos, de cor creme clara, com porções arenosas. Em algumas lâminas, rochas desses tipos (*mudstones*) apresentam-se bastante intemperizadas, parecendo alterar-se para um solo carbonático (caliche). Surgem também recristaliação secundária de calcita e possíveis infiltrações de argila (Figura 6.5a, b, c).

Em seção delgada, esta rocha apresenta poucos grãos, com tamanho médio da ordem de 0,3mm, cujo contato, seleção e empacotamento são indefinidos. Seus constituintes correspondem 7%, em lâmina, representados por foraminíferos

miliolídeos (60%) (Figura 6.5d), pelóides (33%), gastrópodes (<1%), oóides (2%) e intraclastos (5%). A maior parte da rocha, cerca de 90%, é formada por uma matriz deposicional e siltica, com recristalização em alguns pontos. O cimento, representando apenas 3% da rocha, constitui-se de calcita em mosaico micro a mesocristalino, algumas vezes quase totalmente substituído por dolomita.

A porosidade surge de diversas formas: ora *vugular*, ora intergrãos, ou ainda nas regiões dolomitizadas, como também ao longo de estilólitos e fraturas, às vezes preenchidas por um material friável ou como produto de dissolução do próprio calcário (Figura 6.6).

O evento diagenético ocorreu por meio de cimentação de calcita em mosaico, seguido de neomorfismo, dolomitização, dissolução (porosidade) e oxidação, em ambiente de baixa energia.

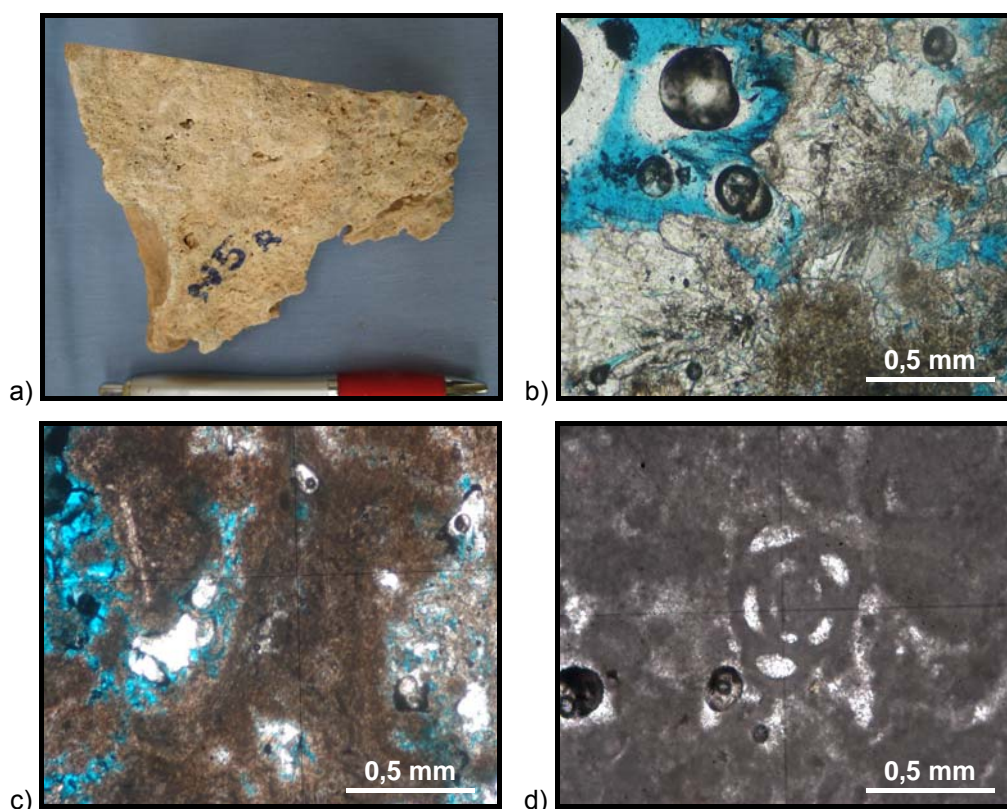


FIGURA 6.5 – Amostra de mão de cor creme clara, porosa (a); Recristalização secundária de calcita (b); Possíveis infiltrações de argila (c); e Foraminífero miliolídeo, evidência de ambiente marinho (d).

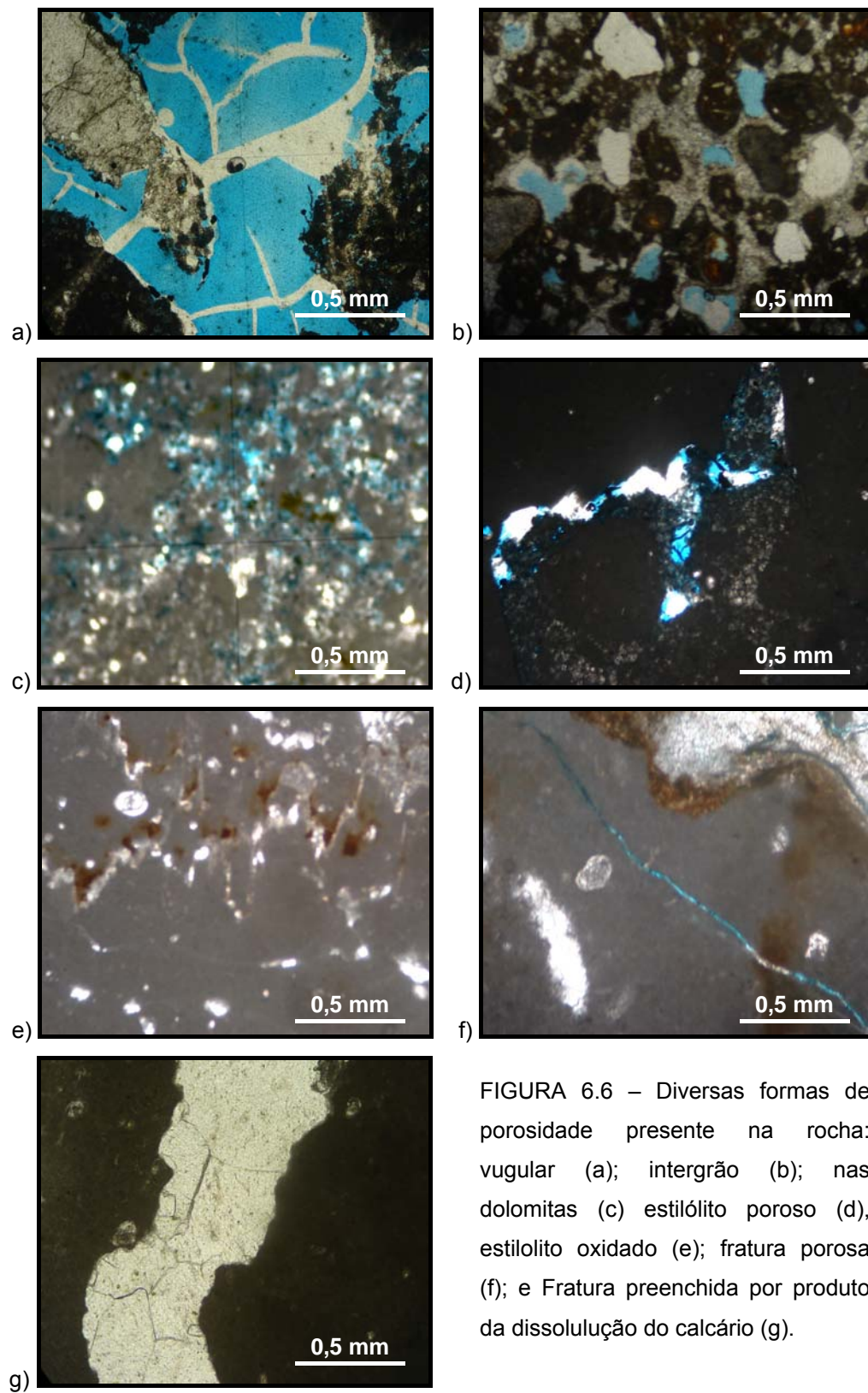


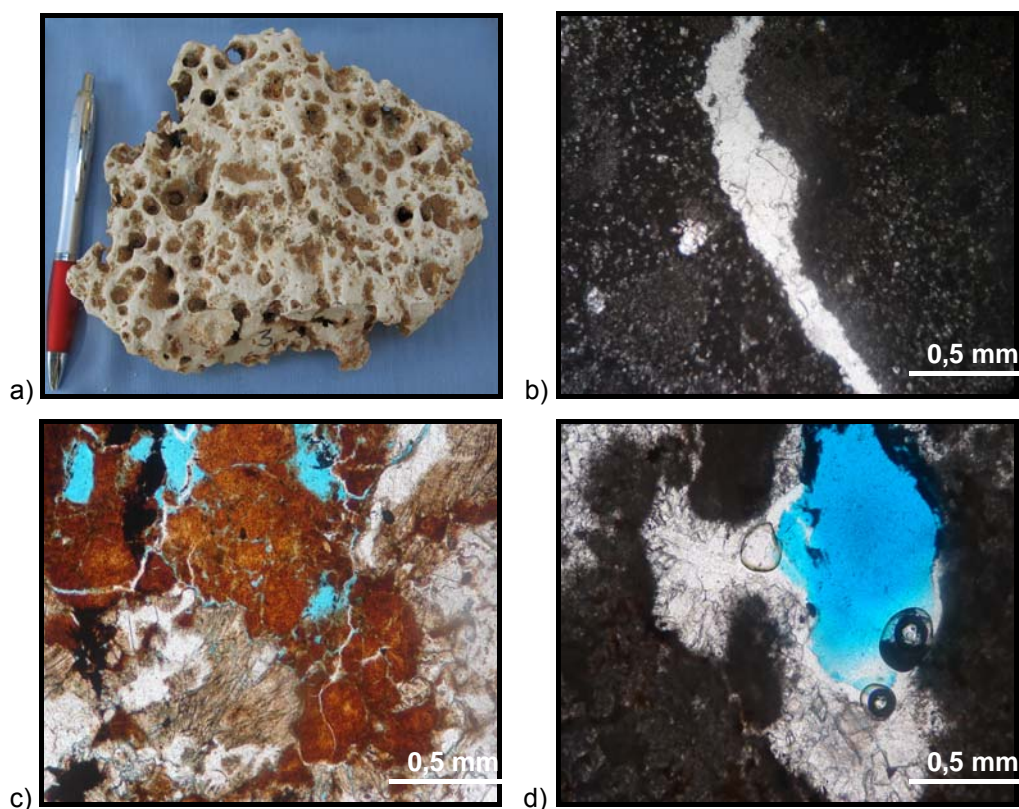
FIGURA 6.6 – Diversas formas de porosidade presente na rocha: vulgar (a); intergrão (b); nas dolomitas (c) estilólito poroso (d), estilólito oxidado (e); fratura porosa (f); e Fratura preenchida por produto da dissolução do calcário (g).

6.1.5 *Mudstone* Dolomitizado (Dunham, 1962) ou Micrito (Folk, 1959)

Esta rocha corresponde em campo ao nível mais inferior de estratificação, no qual existem cavidades com características de caverna propriamente dita, onde é grande o processo de dissolução, com formação de espeleotemas (estalactites e estalagmites). Este nível está a 7,5 m de profundidade e nele percebe-se certa umidade no piso, indicando que a caverna encontra-se em pleno desenvolvimento (Figura 6.7a).

Petrograficamente, apresenta granulometria média de 0,30 mm (miliólídeos) a 1,0 mm (intraclastos). É constituída por intraclastos e miliólídeos (cerca de 1% da lâmina), matriz deposicional (95%) e cimento de calcita em mosaico mesocristalino (2%). Numa pequena porção da lâmina (2%) também surgem limonitas e cristalização secundária de calcita, com porosidade ocorrendo entre os grãos de calcita ou vugs evoluindo do cimento (figura 6.7b, c, d).

O evento diagenético é marcado por cimentação, dolomitização (Figura 6.7e), dissolução, dedolomitização e oxidação.



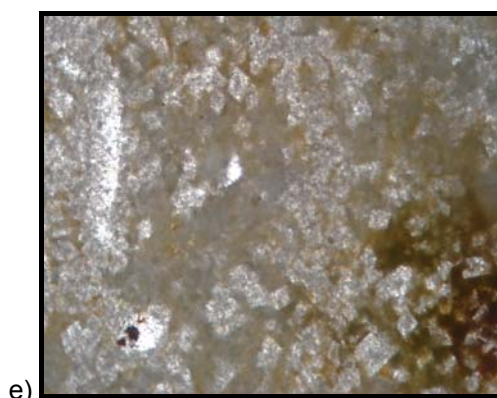


FIGURA 6.7 – Amostra de mão representando a base dos níveis cavernos (a); Fratura cimentada por cimento em mosaico (b); Limonitas e cristalização secundária de calcita (c); Porosidade vugular evoluindo do cimento (d); e Dolomitização (e).

6.1.6 *Mudstone* Pelóidal (Dunham, 1962) ou Dismicrito Folk (1959)

Corresponde a um nível cavernoso, bem desenvolvido, a 1,5 m da superfície, com aproximadamente 0,70 m de estrato e tamanho das cavidades em torno de 0,25 m. Trata-se de um estrato bastante poroso, muito intemperizado, com regiões alteradas, oxidadas e recristalização secundária de calcita (Figura 6.8a).

A análise microscópica mostra que a rocha é formada por 98% de matriz deposicional; 2% de cimento, com calcita em mosaico preenchendo os espaços porosos, na maioria dos casos sofrendo processo de recristalização e dolomitização, sugerindo ser intraclastos neomorfizados (Figura 6.8b); e apenas 1% de constituintes dispersos, representados por: miliolídeos (10%), intraclastos (10%) e pelóides (80%).

A porosidade ocorre no cimento alterado, evoluindo para vugs (Figura 6.8c). Os eventos diagenéticos são cimentação de calcita em mosaico, dolomitização, dissolução e dedolomitização.

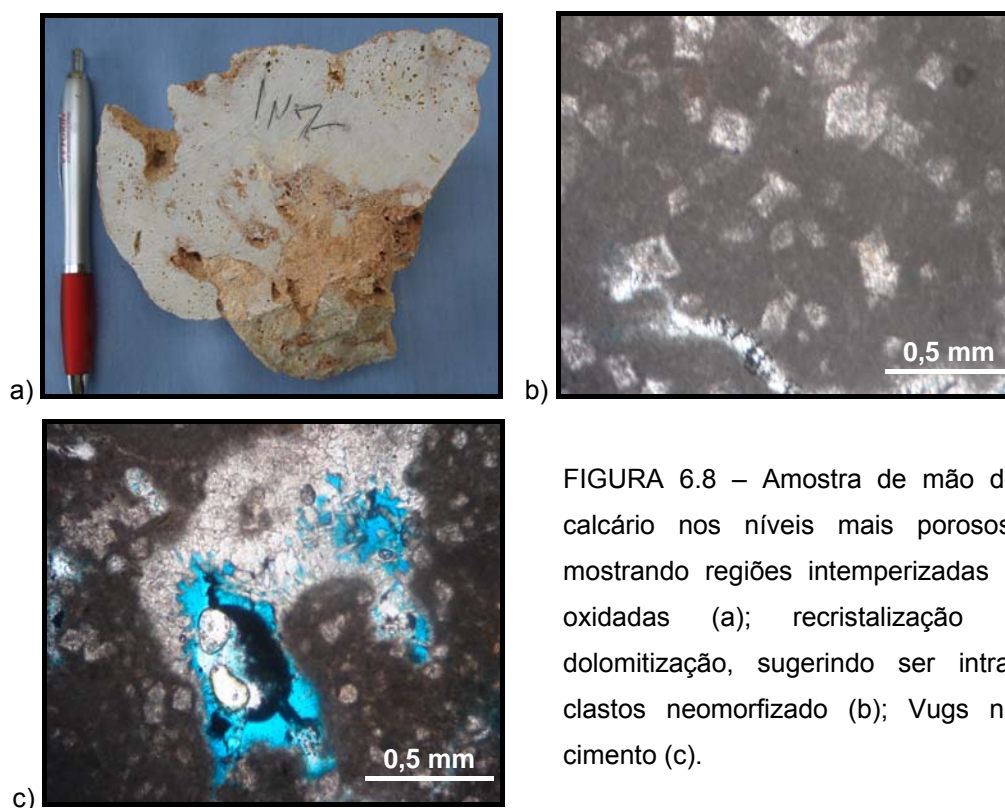


FIGURA 6.8 – Amostra de mão do calcário nos níveis mais porosos, mostrando regiões intemperizadas e oxidadas (a); recristalização e dolomitização, sugerindo ser intraclastos neomorfizado (b); Vugs no cimento (c).

6.1.7 Carbonato Cristalino (Dunham, 1962)

Em amostra de mão, exibe uma coloração amarelada e é bastante porosa. Trata-se de um nível cavernoso, de cor relativamente avermelhada, devido a alteração do material (Figura 6.9a). Ocorre entre duas camadas maciças a uma profundidade de 4,5 m.

Ao microscópio, esta rocha apresenta grande parte de suas características, como granulometria, contatos, seleção, empacotamento, constituintes e matriz, ausentes. É formada exclusivamente por um cimento, constituído 100% por calcita em mosaico médio. A porosidade mais comum é do tipo intracristalina, podendo ser também na forma de vugs e intercristalina (Figura 6.9b, c). O evento diagenético é dado simplesmente por cimentação da calcita em mosaico e dolomitização.

Em lâmina delgada apresenta-se como um carbonato cristalino bastante alterado, que sofreu intemperismo. Os cristais de calcita mostram aspecto sujo

alterando sua cor para um marrom claro. Foram encontradas algumas dolomitas isoladas (Figura 6.9d). O tamanho desses cristais varia de micro a mesocristalino.

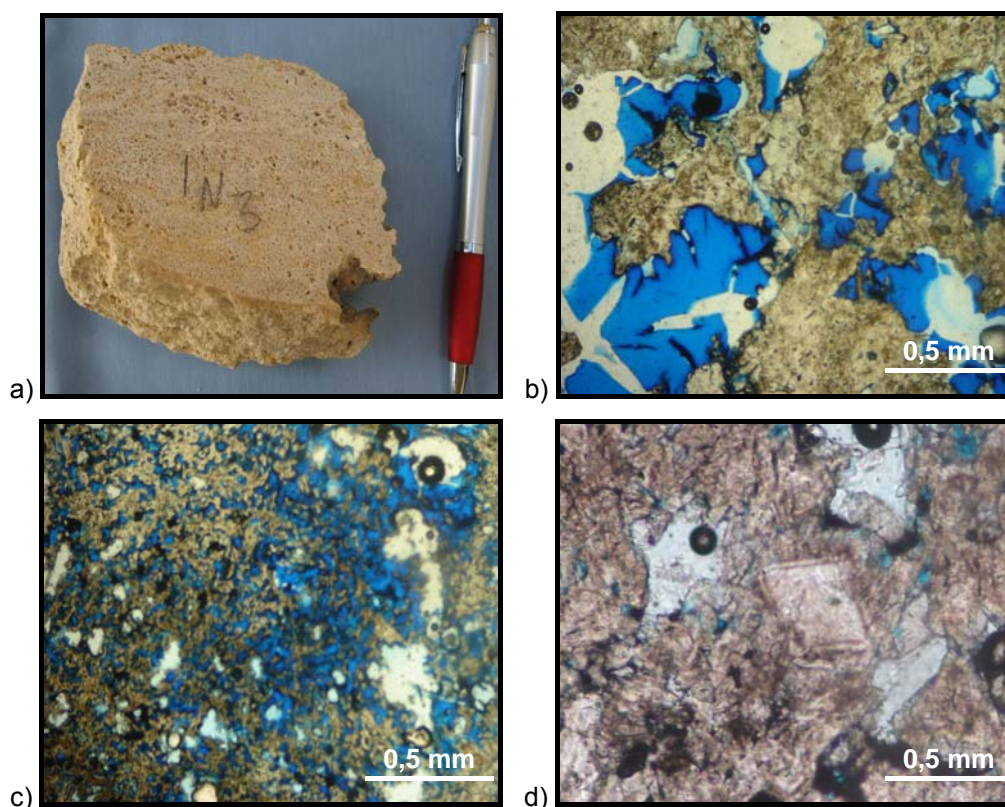


FIGURA 6.9 – Amostra de mão de coloração amarelada, bastante porosa (a); Porosidade vugar (b); Porosidade intercrystalina (c); Dolomita isolada (d).

6.2 Interpretação da Análise Petrográfica

Com a análise petrográfica nota-se que as rochas classificadas como *mudstones* são as que apresentam maior porosidade. Geralmente, evoluindo a partir do cimento calcítico, facilmente solúvel, em todos os casos levando à formação de vugs, ou porosidade entre os grãos.

Estas rochas representam os níveis cavernosos, que são porções bastante intemperizadas, onde é evidente a alteração, com regiões oxidadas e presença de material friável argiloso. Por outro lado, o carbonato cristalino é o produto da dissolução e recristalização do calcário nesses níveis cavernosos, enquanto que os

wackestones e packstones correspondem a níveis distintos do calcário maciço, representando o teto e a base daqueles facilmente solúveis (Figura 6.10).

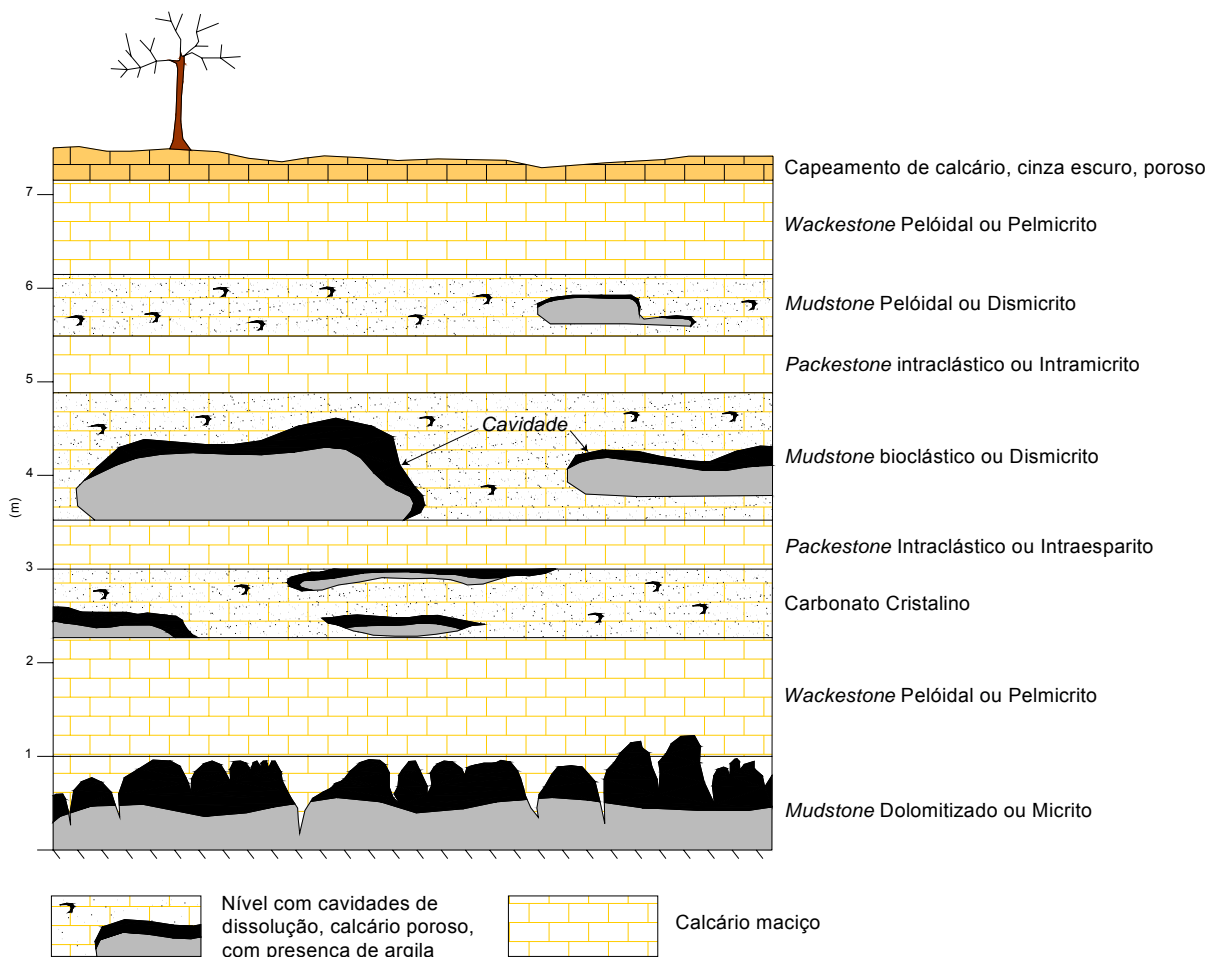


FIGURA 6.10 – Desenho esquemático mostrando o comportamento do calcário, de acordo com a análise petrográfica. As rochas classificadas como *mudstones* são as que representam os níveis de maior porosidade, facilmente solúvel, favorável ao desenvolvimento de cavernas. O carbonato cristalino é resultado da recristalização do calcário nesses níveis cavernosos e os wackestone e packstone representam o calcário maciço.

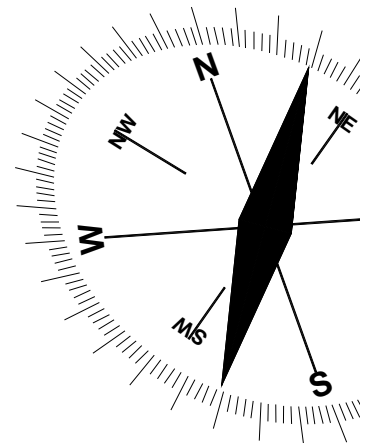
Percebe-se ainda ao microscópio que o calcário em seus diferentes níveis, desde a superfície até a profundidade de 7,5 m, apresenta porosidade de diversas formas: vugular ou intergrão, intragrão, ao longo de estilólitos e em fraturas.

Acredita-se que estas últimas são o ponto de partida para o desenvolvimento das demais formas de microporosidade.

É através das fraturas que a água inicia sua atuação de desagregação lenta e contínua da rocha, passando, a longo prazo, de microporosidade à cavidades subterrâneas.

Capítulo 07

DIAGNÓSTICO ESPELEOLÓGICO DA ÁREA



7 DIAGNÓSTICO ESPELEOLÓGICO DA ÁREA

7.1 Breve Histórico

Por definição, o termo caverna (do latim *cavus*, buraco) é um nome genérico dado a toda cavidade natural rochosa, independente de sua morfologia, que permite no mínimo a entrada de um ser humano adulto. Em alguns casos essas cavidades também podem ser chamadas de grutas ou abismos. Gruta (do latim *grupta*, corruptela de *crypta*) é toda caverna de desenvolvimento preferencialmente horizontal e superior a 20 m, enquanto que abismo é toda caverna com desenvolvimento preferencialmente vertical e superior a 10 m (www.geocites.com).

Espeleologia é a ciência que tem por princípios a procura, exploração, observação e interpretação das cavernas, levando em conta seu processo de formação, ambiente e relação com o mundo externo, visando definir critérios para sua preservação e assim, promover o uso racional destas. Originária do grego "*spelaiion*" (cavernas) e "*logos*" (estudo), a espeleologia objetiva o uso sustentável do ambiente cavernícola por intermédio de mecanismos que efetivamente contribuam para a sua conservação (www.geocities.com).

O estudo das grutas depende de um conjunto de ciências, envolvendo aspectos genéticos, estruturais, morfológicos, químicos, físicos, meteorológicos, geomorfológicos, de fauna e flora cavernícola, além de oferecer ajuda à paleontologia e à arqueologia.

As grutas exercem fascinação ao ser humano. Sua beleza natural e científica atrai a curiosidade, desejosa de compreender a natureza de suas formações e os múltiplos fenômenos associados, responsáveis pelo seu aparecimento. As cavernas representam o berço dos nossos antepassados e constituem um patrimônio de inestimável valor científico e cultural.

7.1.1 Cavernas no Brasil

Dentre todos os países sul-americanos, o Brasil é o que possui o maior potencial em terrenos de cavernas. O território nacional reúne o ingrediente básico para a existência de cavernas, que são as rochas solúveis.

Ao delimitar as regiões potencialmente à existência de cavernas no mapa geológico do país, nota-se que dentre as rochas propícias a formarem grutas, os carbonatos (calcários e dolomitos) se sobressaem. Apesar de mais de 90% das cavernas conhecidas em todo o mundo se desenvolverem em calcários e dolomitos, no Brasil, devido a fatores climáticos, arenitos e quartzitos são também susceptíveis a estas formações (Auler *et al*, 2001).

Como a maior parte das cavernas do Brasil está associada à rochas carbonáticas, a estimativa do potencial espeleológico do país pode ser fornecida pela extensão de ocorrência dessas rochas, que se concentram em sua maior parte no leste e nordeste (Figura 7.1).

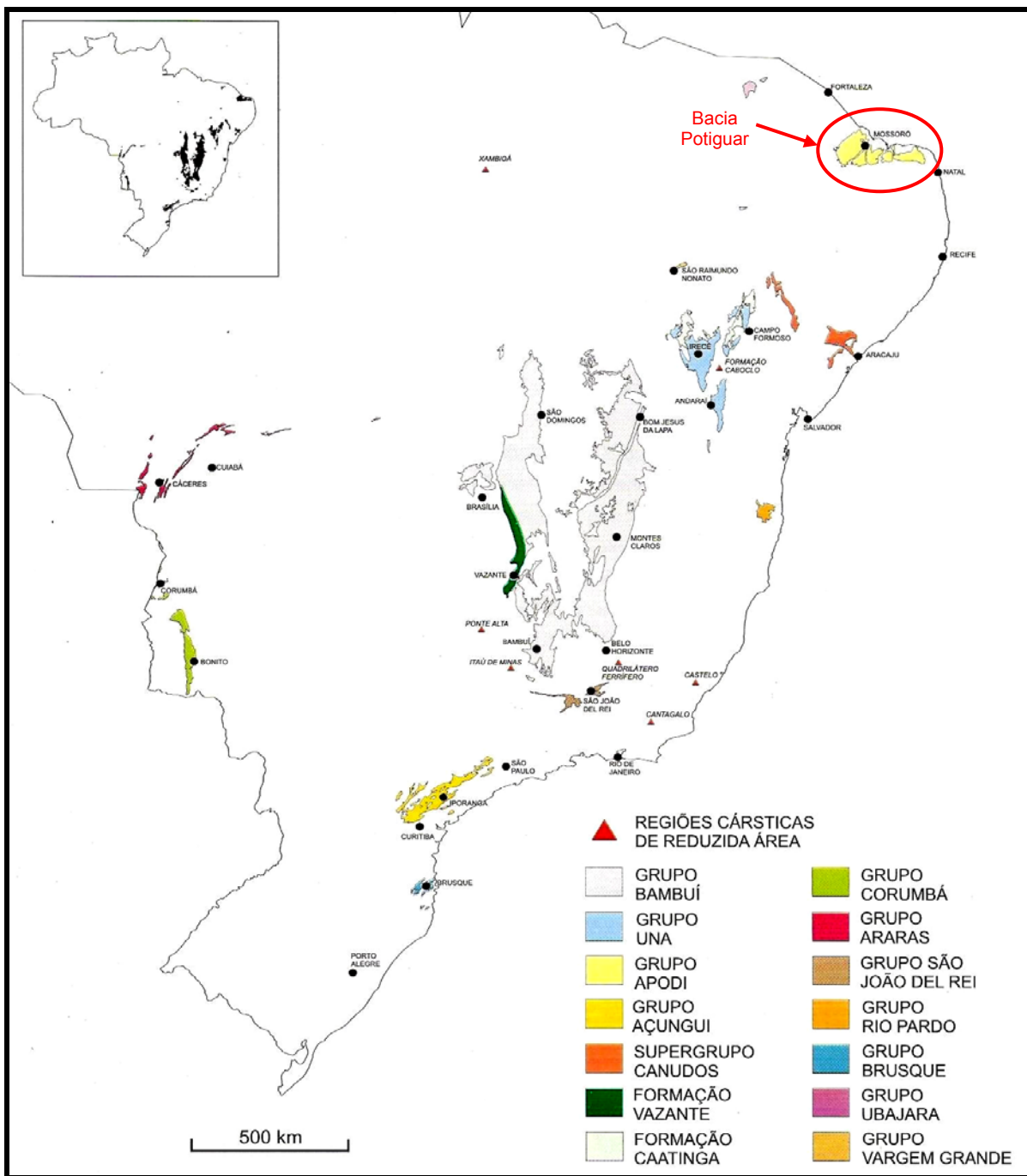


FIGURA 7.1 – Regiões cársticas carbonáticas do Brasil (Auler *et al*, 2001). Destaque em vermelho mostrando a localização da Bacia Potiguar, província espeleológica onde encontra-se insedida a área de estudo.

7.1.2 Cavernas em Felipe Guerra

A maior área de carbonatos dos estados do nordeste brasileiro (à exceção da Bahia) são os calcários cretáceos do Grupo Apodi, que se estendem por boa parte no Rio Grande do Norte. Atualmente, a Base de Dados Georeferenciadas de Cavidades Naturais Subterrâneas do estado, gerenciado pelo núcleo do CECAV, tem registrado 219 cavidades (157 cavernas, 42 abrigos e 20 abismos) (Figura 7.2).

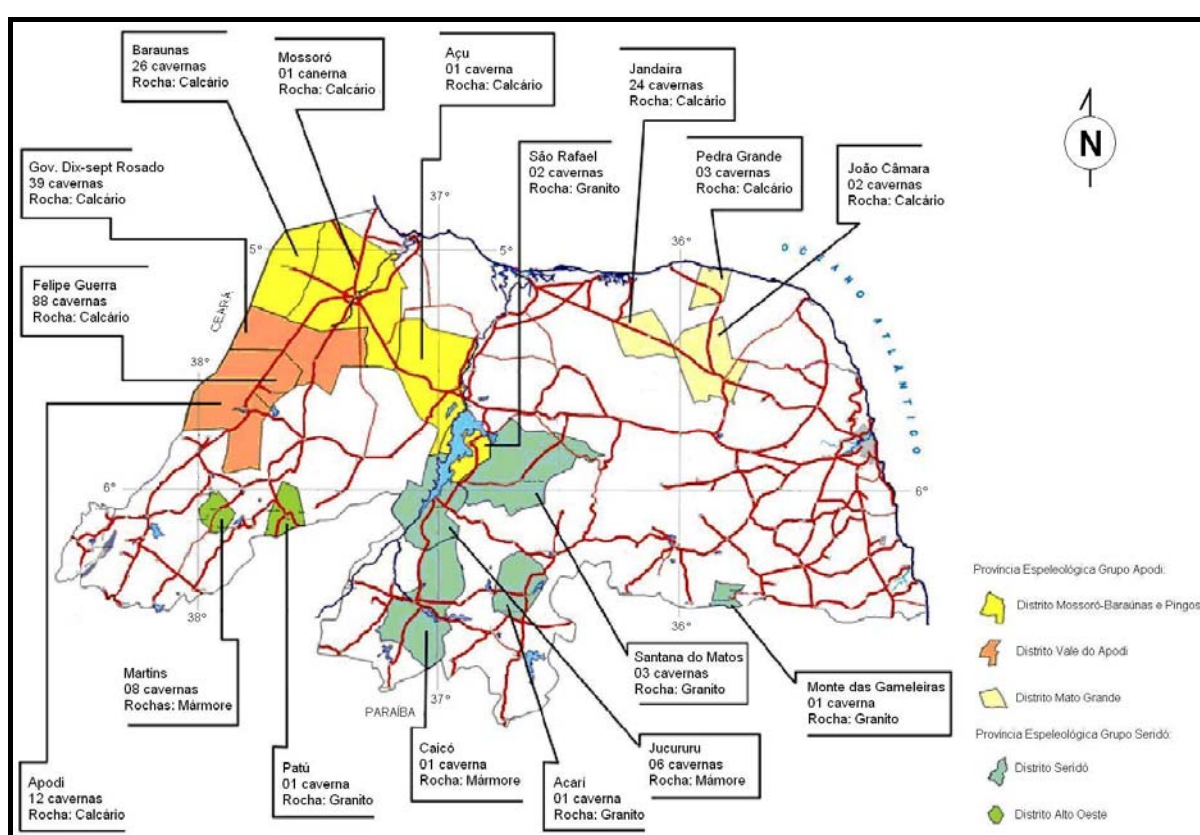


FIGURA 7.2 – Mapa de ocorrência de cavernas por município de Rio Grande do Norte (CECAV, 2007).

Em Felipe Guerra, município que possui as maiores concentrações de cavernas do Estado, e onde se encontra a área de pesquisa, estão catalogadas 88 cavidades (77 cavernas e 41 abrigos), muitas com topografia ainda não realizada e com desenvolvimentos da ordem de 500 metros.

Na área do presente estudo, foram registrados pelo CECAV 9 cavidades (2 abrigos, 2 grutas, 3 dolinas e 2 cavernas), com área de abrangência variável, desde 20 até mais de 100 metros de extensão.

Com o mapeamento realizado por este trabalho, esses números foram acrescidos de mais 14 descobertas, perfazendo 23 cavidades só na área estudada (ANEXO 01) e totalizando 102 cavidades no município de Felipe Guerra.

De forma a proporcionar um panorama do potencial espeleológico da área, seguiu-se então com uma breve descrição de todas as cavidades geológicas encontradas, desde as registradas pelo CECAV até as novas descobertas:

7.1.3 Cavernas Registradas Pelo CECAV

(i) ABRIGO DA QUIXABEIRA

Atualmente, este abrigo parece estar associado uma grande fratura de direção 5° Az, preenchida por blocos soltos, provavelmente devido a desabamentos mais recente em subsuperfície que fechou a entrada do abrigo (Figura 7.3).



FIGURA 7.3 – Abrigo da Quixabeira, caracterizado por fratura preenchida pelo colapso de blocos (Coord. UTM-WGS 84: 653.060 / 9.388.812).

(ii) PEQUENO ABRIGO

Este abrigo é uma pequena cavidade sem espeleotemas e sem fauna cavernícola. Não existe desenvolvimento horizontal, apenas vertical, com aproximadamente 1,7 m de profundidade. Está distribuído ao longo de uma fratura de direção 180° Az (Figura 7.4 e 7.5).



FIGURA 7.4 – Entrada do abrigo ao longo de uma fratura, apresentando desenvolvimento apenas vertical (Coord. UTM-WGS 84: 652.941 / 9.389.024).



FIGURA 7.5 – Interior do abrigo, pouco desenvolvido, com pequenos espeleotemas (Coord. UTM-WGS 84: 652.941 / 9.389.024).

(iii) GRUTA DA BOTA

Trata-se de uma cavidade com abertura em forma de poço, mostrando-se pouco desenvolvida, mas relativamente profunda com cerca de 2 metros de profundidade e 0,60 m de largura, controlada por uma fratura de direção NE-SW (Figura 7.6).



FIGURA 7.6 – Entrada da gruta, com paredes verticais da ordem de 2 m de profundidade (Coord. UTM-WGS 84: 653.068 / 9.389.096).

(iv) GRUTA PEQUENA DO ARAPUÁ

Caracterizada por uma pequena dolina com forma poligonal, formada pelo colapso de blocos ocasionados pela interseção de duas fraturas perpendiculares, com direções N-S (eixo maior da dolina) e E-W. Aparentemente seu desenvolvimento é pequeno, com profundidade em torno de 2 m. Surgem ainda discretas cortinas de estalagmites ao longo dessas fraturas, evidenciando formação recente (Figura 7.7).

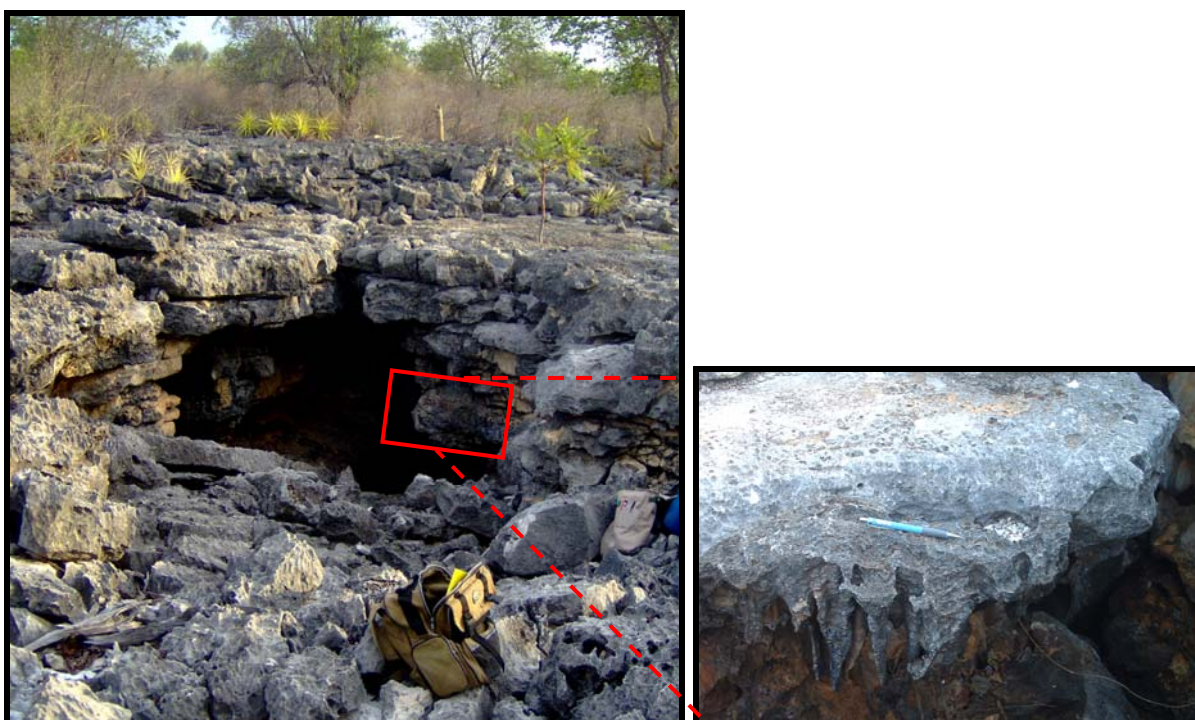


FIGURA 7.7 – Visão externa da entrada da gruta e detalhe mostrando pequenos estalactites (Coord. UTM-WGS 84: 653.151 / 9.389.174).

(v) DOLINA DO XAVIER I

Corresponde a uma grande dolina associada a abatimento de blocos devido a existência de uma caverna abaixo da superfície. Suas dimensões chegam a atingir cerca de 50 m de diâmetro e profundidade (Figura 7.8). Com o dolinamento formou-se um sistema de fraturas radiais e circulares contornando a cratera (Figura 7.9). Podem ser observadas ao longe muitas estalactites, no entanto sua dimensão interna ainda é uma incógnita, pois a elevada profundidade e a existência de abelhas impossibilitaram a exploração desprovida de instrumentos e equipe especializada.



FIGURA 7.8 – Vista panorâmica da extensão da dolina, embora ainda não cartografada (Coord. UTM-WGS 84: 652.047 / 9.388.690).

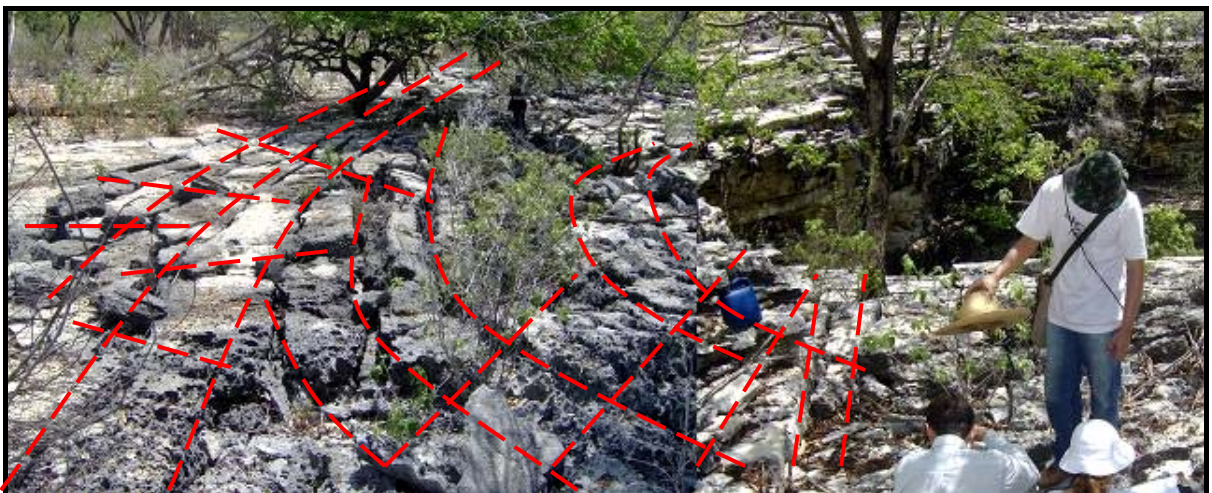


FIGURA 7.9 – Sistema de fraturas radiais e circulares contornando a dolina (Coord. UTM-WGS 84: 652.047 / 9.388.690).

(vi) DOLINA DO XAVIER II

Outra dolina, entretanto menor que a anterior. Esta apresenta níveis de dissolução alternados a níveis mais compactos e tem seu desenvolvimento predominante, ou eixo maior, ao longo da direção 10° Az. Sua exploração apenas é possível com o uso de técnicas verticais de escalada. Assim, foram definidas 9 (nove) camadas, que juntas constituem um desenvolvimento vertical de 7,50 m de altura. A camada mais superior é também a mais maciça, com espessura de 1,30 m. Abaixo desta, a porosidade da rocha aumenta, ocorrendo intercalações entre camadas com estratificação cruzada (0,70 m), níveis maciços (0,70 m) e níveis cavernosos. Estes últimos variam em espessuras, desde 0,60 m nas porções mais superiores, até 2 m na base, onde a ornamentação é composta de cortinas, estalactites, estalagmites e escorrimentos, a maioria com dimensões métricas (Figura 7.10). Seu interior, assim como a Dolina do Xavier I, também é desconhecido.



FIGURA 7.10 – Foto mostrando a parede de acesso a dolina do Xavier II, onde foram descritas 9 (nove) camadas de rocha calcária. A dolina tem profundidade de cerca de 7,5 m. (Coord. UTM-WGS 84: 651.645 / 9.388.380).

(vii) DOLINA DO XAVIER III

Esta dolina possui eixo maior segundo direção 5° Az. Não apresenta formação de espeleotemas e nem indícios de vida cavernícola. Existem blocos soltos obstruindo a cavidade e vestígios de ossos não fossilizados de um animal de porte médio, possivelmente caprino. O desenvolvimento vertical é de cerca de 4 m de profundidade, com comprimento e abertura da ordem de 6 e 3 m, respectivamente (Figura 7.11).



FIGURA 7.11 – Dolina sem espeleotemas, com blocos obstruindo a cavidade, Tem cerca de 4 m de profundidade, 6 m de comprimento e 3 m abertura (Coord. UTM-WGS 84: 652.887 / 9.388.868).

(viii) CAVERNA DO SABONETE

Localizada no interior de uma dolina de aproximadamente 20 m de diâmetro, controlada pela interseção de três família de fraturas (N-S, NE-SW e NW-SE), mas com desenvolvimento preferencial ao longo da direção NS. Possui acesso fácil e profundidade média de 7 m. Seu interior observado apenas superficialmente apresenta ambiente cavernícola bem desenvolvido, com cortinas de estalagmites de até 1,5 m, presença de morcegos e blocos caídos do teto por dissolução e gravidade (Figura 7.12).



FIGURA 7.12 – Dolina de aproximadamente 20 m de diâmetro, com ambiente cavernícola bem desenvolvido, cortinas de estalagmites, presença de morcegos e blocos caídos por dissolução em toda a caverna (Coord. UTM-WGS 84: 652.431 / 9.388.956).

(ix) CAVERNA DO ARAPUÁ

Dentre estas cavidades, a caverna do Arapuá foi selecionada para a realização de mapeamento topográfico endocárstico, por propiciar fáceis condições de acesso, possuir galerias com extensões consideráveis (superior a 50 m), dotada de um ambiente cavernícola típico, bem ornamentado, além da ausência de abelhas e outro animais peçonhentos (Figura 7.13).

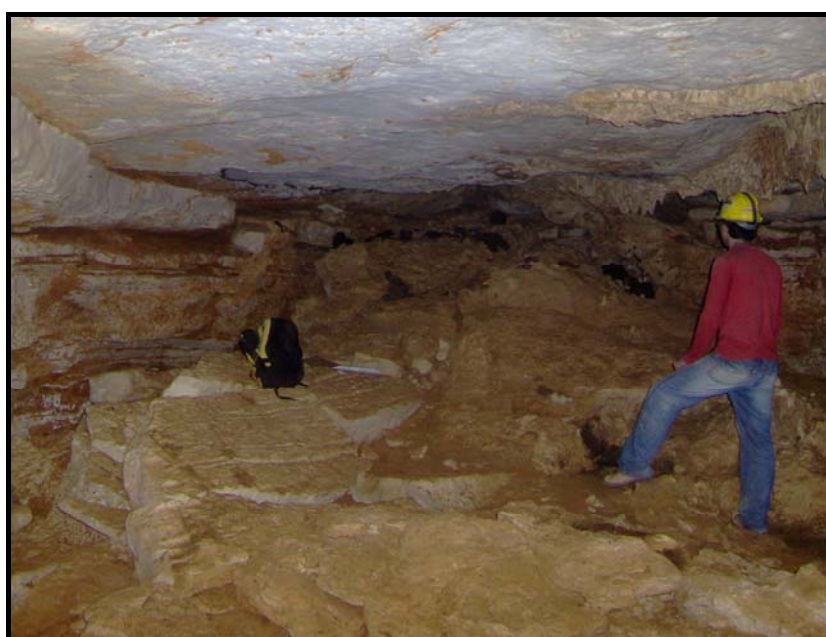


FIGURA 7.13 – Caverna do Arapuá selecionada para a realização de mapeamento topográfico endocárstico.

7.1.4 Novas Cavernas Descobertas

Apesar de algumas destas grutas não apresentarem complexidades, grandes extensões ou mesmo riqueza em suas formações, merecem destaque pelo simples fato de existirem, podendo fazer parte do acervo de cavernas encontradas, mas não mapeadas, consideradas como importantes alvos para futuras explorações.

Algumas são apenas pequenas dolinas de colapso de 2 ou 3 metros de diâmetro, por vezes preenchidas superficialmente, mas que podem guardar dissoluções subterrâneas. Outras se caracterizam por estarem aliadas as formações

de falhas, mostrando desenvolvimento tanto vertical como horizontal, além de fauna cavernícola (Figuras 7.14 à 7.27).



FIGURA 7.14 – Pequena dolina de aproximadamente 2,5 m de diâmetro, preenchida por material cavernoso, proveniente da dissolução do calcário (Coord. UTM-WGS 84: 652.303 / 9.389.844, F1).



FIGURA 7.15 – Pequeno abrigo, com entrada elipsoidal (1,5 x 0,60 m), encaixada ao longo de uma falha. Possui profundidade de 2 m (Coord. UTM-WGS 84: 652.365 / 9.389.844, F1).



FIGURA 7.16 – Gruta com cerca de 1,70 m de largura, 2 m de comprimento 3 m de profundidade, formada pelo colapso de blocos ao longo de uma falha. (Coord. UTM-WGS 84: 652.377 / 9.389.890, F3).



FIGURA 7.17 – Cavidade de dissolução com abertura e profundidade de 1 m, também formada ao longo de uma falha. (Coord. UTM-WGS 84: 652.377 / 9.389.890, F2).



FIGURA 7.18 – Caverna com acesso estreito, profundidade de 11 m e presença de morcegos, o que sugere potencial para uma possível caverna (Coord. UTM-WGS 84: 653.914 / 9.388.876, F12).



FIGURA 7.19 – Ambiente de falhas, com desnível ou rejeito vertical de 1,20 m, provavelmente responsável pela formação de cavidades subterrâneas. Este abrigo caracteriza-se pela presença de morcegos e paredes úmidas, evidenciando o processo dissolução do calcário (Coord. UTM-WGS 84: 653.672/ 9.388.782, F10).



FIGURA 7.20 – Dolina com cerca de 8 m de profundidade e aproximadamente 2,8 m de diâmetro. Como se trata de um ambiente falhado, diversas feições se desenvolveram, desde dolinas, até cavernas e abismos (Coord. UTM-WGS 84: 653.672 / 9.388.782, F10).



FIGURA 7.21 – Abismo de 3,30 m de profundidade, largura de 2,5 m nas partes mais estreitas, chegando 7 m nas porções mais largas, com desnível vertical superior a 1 m. (Coord. UTM-WGS 84: 653.849 / 9.388.892, F11).



FIGURA 7.22 – Dolina com potencial cavernícola, presença de morcegos e abelhas, com profundidade e diâmetro da ordem de 5 m. (Coord. UTM-WGS 84: 653.962 / 9.388.898, F13).



FIGURA 7.23 – Abrigo com desenvolvimento horizontal significativo, altura da ordem de 1 m. A presença de morcegos indica potencial espeleológico (Coord. UTM-WGS 84: 653.6363 / 9.388.732, P57).



FIGURA 7.24 – Dolina com comprimento superior a 50 m, direção de eixo maior N-S e profundidade de aproximadamente 10 m. Em seu interior ocorre cavidade com desenvolvimento horizontal significativo, presença de morcegos e espeleotemas. A trena usada como escala mostra 1,5 m de medida. (Coord. UTM-WGS 84: 652.277 / 9.387.728, P26).



FIGURA 7.25 – Dolina circular com aproximadamente 20 m de diâmetro e 7 m de profundidade. No mapa geológico esta dolina assume alinhamento com outras duas dolinas, correspondentes aos pontos P10 e P26. Sua base está coberta por blocos, provavelmente decorrente do desabamento da porção superficial do terreno sobre um nível de dissolução. Não foi encontrada vida cavernícola, nem espeleotemas. (Coord. UTM-WGS 84: 651.666 / 9.387.352, P9).



FIGURA 7.26 – Dolina com aspecto elíptico, comprimento e largura de aproximadamente 50 m e direção de eixo maior N190° Az. Ocorre alinhada no mapa geológico com as dolinas dos pontos P9 e P26 (Coord. UTM-WGS 84: 651.842 / 9.387.456, P10).

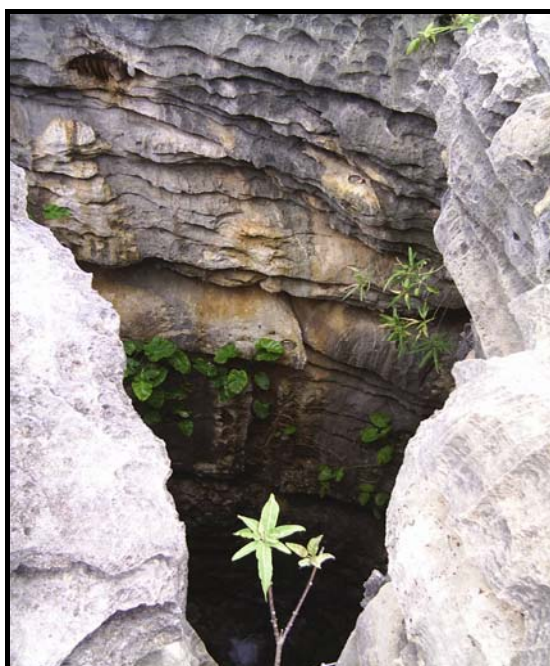


FIGURA 7.27 – Dolina com cerca de 10 m de profundidade, podendo ser considerada como um abismo. Possui 3 m de diâmetro e vida cavernícola representada por morcegos (Coord. UTM-WGS 84: 653.957 / 9.388.950, F14).

7.2 Impactos Ambientais

Como dito anteriormente o município de Felipe Guerra é rico em cavernas, e estas têm enorme importância para a região. Além de fazerem parte de um ecossistema peculiar, muitas pessoas vivem do turismo devido a beleza natural das cavernas locais. Mesmo assim inúmeros são os conflitos sofridos pelo Patrimônio Espeleológico Potiguar, dentre os quais podem ser citados: a indústria da cal, a exploração do petróleo, os assentamentos rurais e os turistas desconscientizados.

7.2.1 Indústria da Cal

É uma das principais fontes de renda do município. Segundo Carvalho e Leite (2000) *in* CECAV (2007), existem 106 unidades ativas, distribuídas em 17

municípios. Juntas empregam cerca de 939 pessoas e produzem mensalmente 7.000 toneladas de cal.

De acordo com o CECAV a atividade mineira ameaça 27,40% das cavernas conhecidas do Rio Grande do Norte. Essas empresas atuam sob autorização do Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM e do IBAMA. Quando se é registrado algum dado direto às cavernas, são aplicadas multas como forma de punição, embora o detrimento causado seja irreversível.

Na área estudada não foi observada influência de potenciais produtores de cal, mas freqüente é a ocorrência de pequenas empresas clandestinas, que também oferecem perigo de destruição das cavernas, uma vez que não são fiscalizadas (Figura 7.28).



FIGURA 7.28 – Lavra clandestina oferecendo perigo de destruição das cavernas. (Foto a direita: Coord. UTM-WGS 84: 651.582 / 9.387.336. Foto a esquerda: Coord. UTM-WGS 84: 653.114 / 9.389.278).

7.2.2 Exploração do Petróleo

Segundo a Empresa de Consultoria e Planejamento Ambiental Ltda – ECOPLAM *in* CEVAV (2007), o estado do Rio Grande do Norte, até 2006 foi o segundo maior produtor de petróleo e gás natural do País. Possui reserva de 410 milhões de barris de petróleo e 133 milhões de gás natural na Bacia Potiguar. O fator

preocupante é que uma margem de 58,90% das cavernas do Estado encontra-se em áreas de extração de petróleo, englobando inclusive toda a área de pesquisa (Figura 2.29).



FIGURA 7.29 – Detalhe em vermelho mostrando base de extração de petróleo em plena área de pesquisa, locada muito próxima a diversas cavernas.

7.2.3 Assentamento Rural

Dados do INCRA *in* CECAV (2007) mostram que existem 393 projetos de assentamento rural no Estado. A ocupação territorial tem causado aumento abrupto de danos às áreas de influência de cavernas neles localizados.

Destacam-se como conflitos ambientais a retirada de madeira nativa para confecção de carvão, lenha e estaca; a caça predatória de animais silvestres; e a visitação desordenada às cavernas e sítios arqueológicos da região.

Atualmente 48 cavernas do Estado, 21,92% do total, encontram-se em áreas de assentamento rural, 23 delas em região de conflito direto. Foi constatado por observações empíricas de órgãos competentes de fiscalização, que após o processo de ocupação (cerca de 1150 famílias), houve de imediato um aumento no número de pessoas a visitar as grutas, danificando-as com pichações e quebra de

espeleotemas, além da grande quantidade de lixo deixado em locais não apropriados (CECAV, 2007).

7.2.4 Turistas Desconscientizados

Outro fato negativo é que alguns turistas ainda visitam os ambientes cavernícolas, não os respeitando como deveriam. O respeito que lhe é merecido, começa a ser reconhecido quando se compreende a importância da sua formação, tanto do ponto de vista histórico, quanto para todo o ecossistema envolvido. É possível conscientizar as pessoas explicando que cada espeleotema demora milhares de anos para ser formado, e muitos ainda arrancam um “pedacinho de lembrança”, que leva mais de centenas de anos para se reconstituir, ou não se reconstitui.

7.3 Importância Espeleológica x Preservação

As cavernas sempre exerceram fascínio à humanidade, desde a pré-história, quando o homem as utilizavam para abrigar-se; até o presente, despertando interesse no ramo da espeleologia. De maneira adequada, estes ambientes podem ser usufruídos de várias formas:

- (i) **Prática do lazer** – podem funcionar como importante fonte de atividades economicamente viáveis, tais como áreas recreativas, esportivas e de contemplação, desde que sejam respeitadas regras mínimas de proteção do ambiente;
- (ii) **Ocorrência de água** – as cavernas exercem importante papel no armazenamento estratégico de água, com as zonas de recarga de aquíferos;
- (iii) **Estudos científicos** – investigação em diversos campos do conhecimento, como pesquisas geológicas, possibilitando estudar a origem, formação e sucessivas transformações da litologia local e do paleoclima;

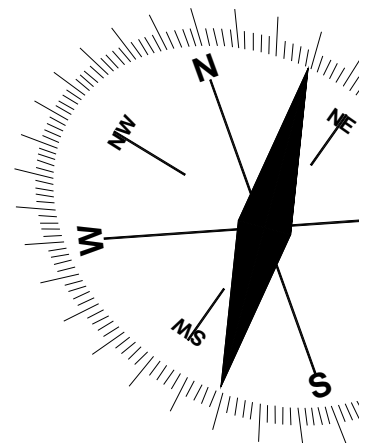
- (iv) **Hospedeira de minerais raros** – protegem e conservam minerais de beleza rara, como a aragonita em forma de flor, dentre outras formações geológicas;
- (v) **Sítios arqueológicos e paleontológicos associados** – conservam de forma eficiente, interessantes informações de vida pretérita através de testemunhos da evolução humana (artefatos e pinturas rupestres) e fósseis (restos vegetais e animais); e
- (vi) **Fauna e flora** – propiciam eficiente abrigo servindo de *habitats* de espécies endêmicas e ameaçadas de extinção.

É importante ressaltar que as cavernas são ambientes frágeis, onde a parte biótica e recursos abiótico (ar, água e rocha) agem de maneira harmônica e equilibrada.

A conservação de sítios espeleológicos e suas respectivas áreas de influência têm como objetivo a preservação destes sistemas ecológicos, sensíveis e diferenciados. Por isso é importante a sustentabilidade desse ambiente, na tentativa de garantir que mais pessoas, no futuro, também possam desfrutar dessas áreas.

Capítulo 08

ESPELEOMETRIA DA CAVERNA ARAPUÁ



8. ESPELEOMETRIA DA CAVERNA ARAPUÁ

Localizada no município de Felipe Guerra, a caverna Arapuá, embora não seja a maior cavidade da área, é a mais representativa, facilitando a produção de informações de um todo a partir desta. Portanto, este patrimônio espeleológico presente em plena área de estudo contribuiu para a interpretação geral das cavernas a partir da coleta, processamento e análise de dados do mapeamento espeleológico. A sistemática da pesquisa segue com a descrição endocárstica e exocárstica desta caverna, ou seja, um estudo mais detalhado da sua situação atual.

Entende-se por Mapeamento Espeleológico o conjunto de medidas de ângulos e distâncias que possibilitam a construção de um mapa (planta baixa), com sessões longitudinais (perfis) e transversais (cortes), que define a visão da caverna em três planos de projeções diferentes: comprimento-x, largura-y e altura-z. A partir deste mapeamento foi possível obter-se a configuração do arcabouço espeleológico interior da caverna.

8.1 Características

A caverna Arapuá possui entrada vertical, com abertura e profundidade de aproximadamente 2 m, cuja descida é facilitada por uma árvore que ultrapassa a clarabóia e alcança a superfície (Figura 8.1 à 8.4). É dotada de formações ornamentais, muitas das quais se deve à presença de água esculpindo seu interior. O ambiente cavernícola é caracterizado pela umidade e pela ausência de luz parcial (próximo a clarabóia de entrada) e total (ao longo das galerias).



FIGURA 8.1 – Visualização da árvore que dá acesso a entrada da caverna.



FIGURA 8.2 – Árvore que alcança a superfície através da clarabóia e auxilia na entrada à gruta.



FIGURA 8.3 – Entrada vertical de fácil acesso.



FIGURA 8.4 – Entrada com abertura e profundidade de aproximadamente 2 m.

8.1.1 Umidade

Não existem cursos d'água em meio a suas galerias de acesso, por isso o ambiente pode ser considerado como pouco úmido, porém é verificada a presença de água infiltrada proveniente do exterior (Figura 8.5). Isso significa que os espeleotemas ainda estão em processo de formação ou crescimento. Existe ainda uma pequena lâmina d'água com acesso indisponível, ao final de um conduto estreito, não permitindo a passagem de um adulto (Figura 8.6). Nada pode ser

afirmado quanto sua profundidade, mas a hipótese de um ponto de saída de água subterrânea é válida.



FIGURA 8.5 – Presença de água infiltrada proveniente do exterior da caverna.



FIGURA 8.6 – Conduto estreito, não permitindo a passagem de um adulto até a lâmina d'água.

8.1.2 Espaços Internos

A caverna é dotada de duas importantes galerias que somadas, correspondem a 88 metros de desenvolvimento interno. Uma está disposta segundo direção a NE-SW, com comprimento de 33 metros; outra, mais ampla, ocorre ao

longo da direção NW-SE, com extensão de 54 metros (Figura 8.9). Em alguns pontos são largas e altas (superior a 10 e 3 metros, respectivamente), permitindo caminhada em pé (Figura 8.7). Mas quando estreita e muito baixa (inferior a 1 metro) exigem que se rasteje (Figura 8.8). Também podem ser percebidos desníveis de ângulos com pequena inclinação, tanto positivos como negativos, sendo o maior deles de -35° (Figura 8.10).



FIGURA 8.7 – Passagem alta (cerca de 3 m).



FIGURA 8.8 – Passagem baixa (inferior a 1m).

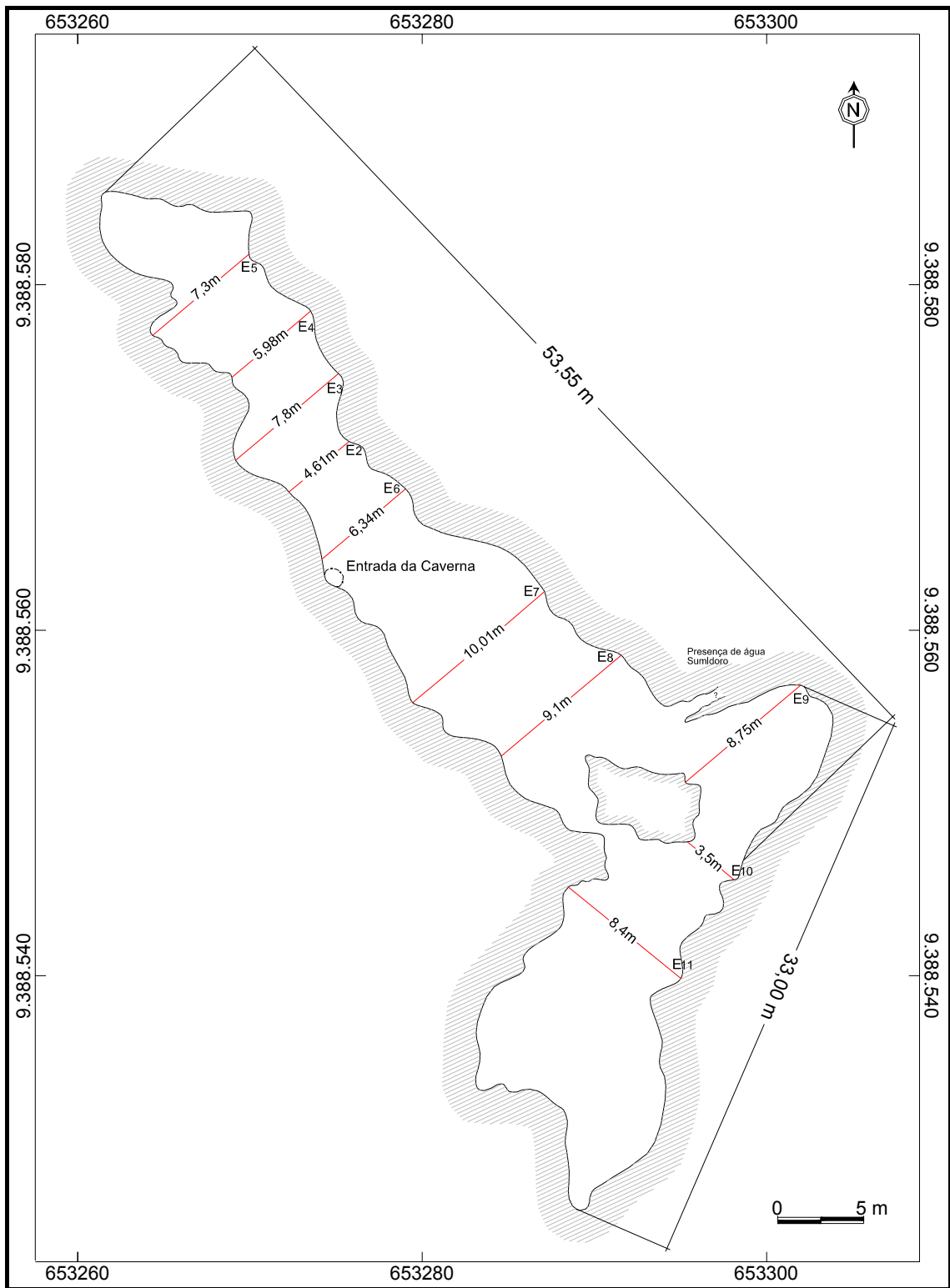


FIGURA 8.9 – Planta baixa mostrando as galerias NW-SE e NE-SW e seus respectivos comprimentos e larguras.

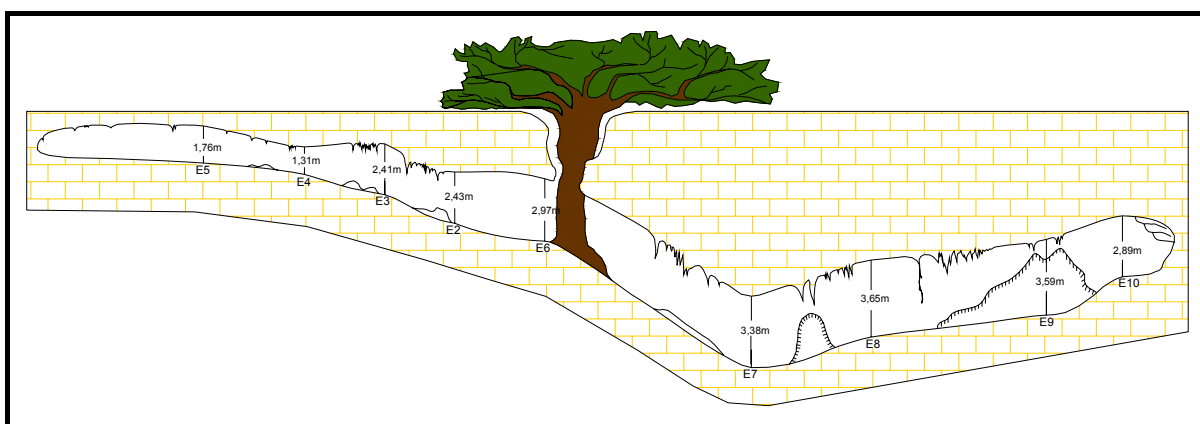


FIGURA 8.10 – Perfil esquemático NW-SE, mostrando a altura e o desnível da galeria.

8.1.3 Espeleotemas

A etimologia da palavra “espeleotema” deriva do grego *espelaion* (caverna) e *thema* (depósito). No interior da caverna, os espeleotemas são resultados da carstificação construtiva, ou seja, os minerais que foram removidos das camadas superiores da rocha e dissolvidos na água, se cristalizaram e criaram diversos tipos de formações no teto, paredes e piso. Isso ocorre porque a água rica em carbonato de cálcio ao entrar em contato com a atmosfera da caverna, libera gás carbônico, tornando a solução mineral super-saturada, provocando precipitação (*Karmam in Teixeira, 2003*). Estas formações são resultados de gotejamentos por frestas no teto, por deslocamento da água através da porosidade das paredes e teto (exsudação) e também por sedimentação e decantação em poças. Basicamente, as formações observadas foram:

- **Estalactites:** cuja formação se deve ao gotejamento através de fendas no teto (Figura 8.11). A gota em seu percurso, forma anéis que se sedimentam e cristalizam. Esses anéis aos poucos se juntam uns aos outros, formando tubos cilíndricos que crescem lentamente em direção ao chão (Figura 8.12). Em geral exibem formas cônicas com diâmetros variáveis, desde milimétricos á centimétricos, agrupadas em conjuntos.

Também podem ser vistas formas especiais, como estalactites em forma de bolas (Figura 8.13).



FIGURA 8.11 – Estalactites em processo de formação por gotejamento em fendas no teto.



FIGURA 8.12 – Gotas que aos poucos se sedimentam e cristalizam em anéis, formando tubos cônicos que crescem lentamente em direção ao chão.



FIGURA 8.13 – Estalactites em forma de bolas.

- Estalagmites: estas, ao contrário da anterior, crescem verticalmente em direção ao teto, devido o lento acúmulo da seqüência de gotas que vão ao chão, precipitando uma sobre a outra (Figura 8.14). Assumem diversos formatos e dimensões métricas. A maior delas apresenta

cerca de 4 m de largura por 7 m de comprimento, quase impedindo a passagem da galeria. Esta estalagmite provavelmente se formou por vários gotejamentos diferentes, formando um maciço estalagmítico ou acumulação de contato de calcário (Figura 8.16). Existem também estalagmites aproximadamente cilíndricas (Figura 8.15).



FIGURA 8.14 – Estalagmites em processo de formação.



FIGURA 8.15 – Estalagmite cilíndrica.



FIGURA 8.16 – Maciço estalagmítico, cerca de 4m de largura por 7 m de comprimento, formado por vários gotejamentos diferentes.

- Colunas: são formações caracterizadas por uma estalactite e uma estalagmite que se encontraram durante seus desenvolvimentos, entre o teto e o chão (Figura 8.16).
- Cortinas: são feições que surgem na caverna onde o teto é inclinado, mais especificamente nas proximidades da estação 4 (E4). Nestes casos a água não goteja, ela escorre sempre pelo mesmo caminho ao longo do teto, criando uma parede de rocha cheia de ondulações (Figura 8.17).



FIGURA 8.17 – Cortina de rocha, criando parede cheia de ondulações.

Diversas outras formações são encontradas, por exemplo, há uma variedade de testemunhos da ação da água, tais como fendas e cavidades no teto, além de uma estalagmite semelhante a uma imagem sacra (Figura 8.18).



FIGURA 8.18 – Fendas (a), cavidades no teto (b) e estalagmite semelhante a uma imagem sacra (c).

8.1.4 Fauna e Flora

O *habitat* no interior das cavernas é conhecido por *hipógeo* (subterrâneo), em oposição ao meio *epígeo* (externo). No caso da caverna Arapuá o meio hipógeo é quase totalmente desprovido de iluminação natural, salvo o trecho iluminado da entrada da caverna. Além da iluminação, existem outros fatores que tornam o ambiente cavernícola muito diferente do exterior, como variação de temperatura, umidade e presença de gases que ocorrem em concentrações mais elevadas.

A ausência de luz impede o crescimento de vegetação fotossintetizante. Por esse motivo a flora é inexistente. No entanto surgem raízes que penetram as fraturas e alcançam o interior da caverna; e na sua entrada, devido a presença parcial da luz do sol, cresceu uma árvore de porte médio (Figura 8.19a e b).

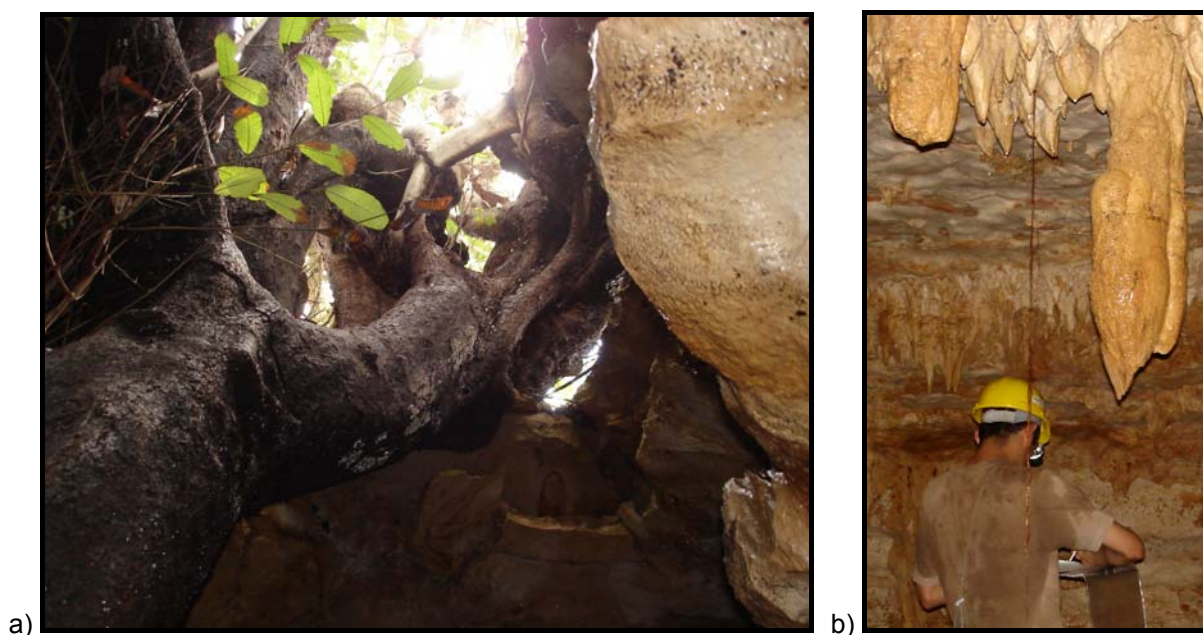


FIGURA 8.19 – Árvore na entrada da caverna (a) e raízes que alcançam seu interior (b).

Quanto a fauna, alguns animais usam a caverna como abrigo. De acordo com seus hábitos foram encontrados três grupos (Figura 8.20):

- Troglóxenos: são animais que utilizam a caverna como abrigo, reprodução ou alimentação, mas saem para realizar outras etapas de suas vidas. Este grupo é representado pelos morcegos;
- Troglóbios: tratam-se de espécies que se especializaram para a vida dentro das cavernas. A maioria não possui pigmentação e podendo ter visão atrofiada ou ausente, auxiliados por órgãos olfativos muito sensíveis;
- Troglófilos: essas espécies são suficientemente adaptadas para viver toda sua vida dentro das cavernas, mas nada impede que vivam igualmente bem fora dela, podendo ser citados escorpionídeos e insetos.

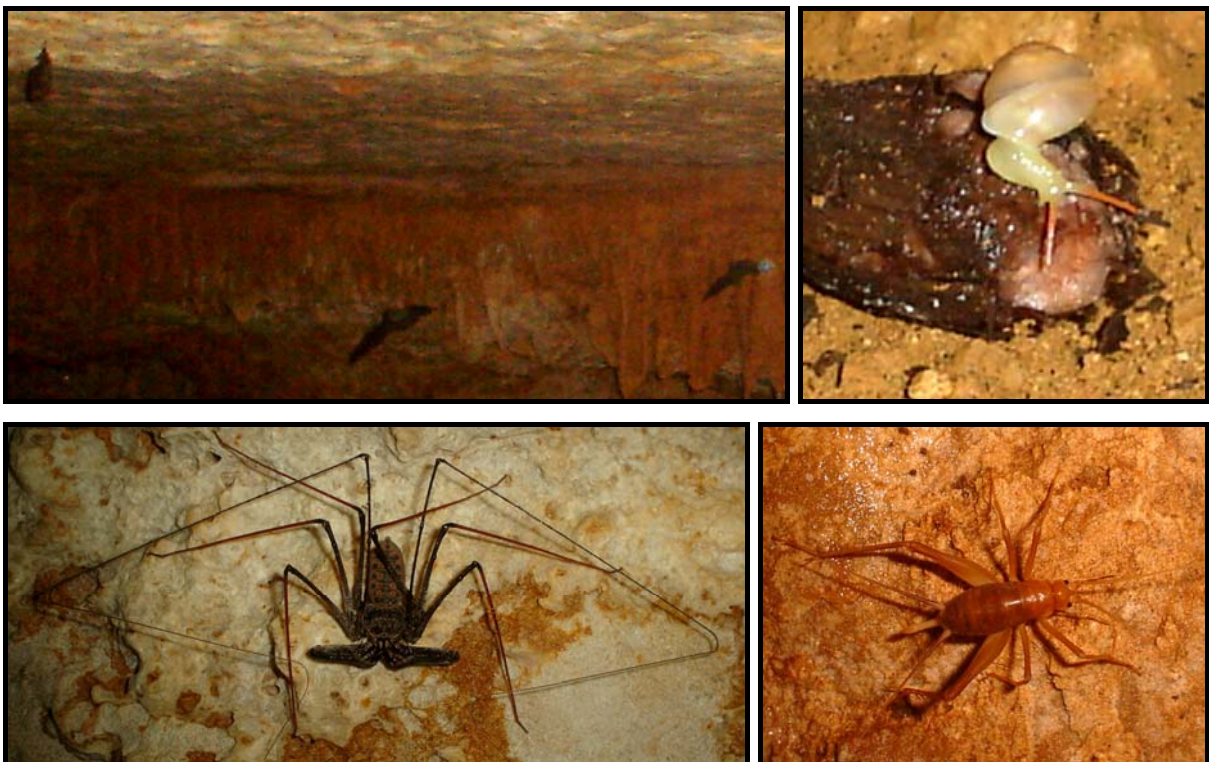


FIGURA 8.20 – Fauna representada por animais Troglóxenos (utilizam a caverna como abrigo, reprodução ou alimentação. Ex.: morcegos), Troglóbios (vida exclusivamente cavernícola, sem pigmentação, visão atrofiada ou ausente, e órgãos olfativos sensíveis. Ex.: moluscos) e Troglófilos (adaptados para viver toda sua vida dentro das cavernas. Ex.: escorpionídeos e insetos).

8.1.5 Registros Fósseis

Na caverna Arapuá onde se localiza a estação topográfica 11 (Mapa Topográfico – ANEXO 02) foram encontrados registros de um animal (ossos), bem preservados, posicionados diretamente sobre o piso da gruta, já mostrando sinais de mineralização por CaCO_3 , com leve incrustação na rocha. Essa superficial mineralização dos ossos sugere idade pouco recuada no tempo. Constitui importante registro biológico que pode fornecer informações sobre o comportamento animal na região (Figura 8.21).

Não deve ser descartada a possibilidade de achados paleontológicos futuros já que existem registros de fósseis da megafauna pleistocênica no interior de ravinas em calcários da Formação Jandaíra, localizada no Lajedo de Soledade, em Apodi (Santos *et al.*, 2002).



FIGURA 8.21 – Ossos de um animal, bem preservados, com leve incrustação na rocha.

8.2 Gênese

O litotipo alvo da pesquisa é o calcário da Formação Jandaíra, pertencente à Bacia Potiguar. O calcário é uma rocha sedimentar, isto é, forma-se através de “restos animais” sob pressão. No caso desta Formação, o calcário formou-se pelo acúmulo de carapaças e ossos de animais marinhos, depositados em ambiente marinho raso e, com o tempo, compactados. Com o movimento das placas tectônicas, essas camadas de calcário emergiram dando origem ao que é hoje a Formação Jandaíra.

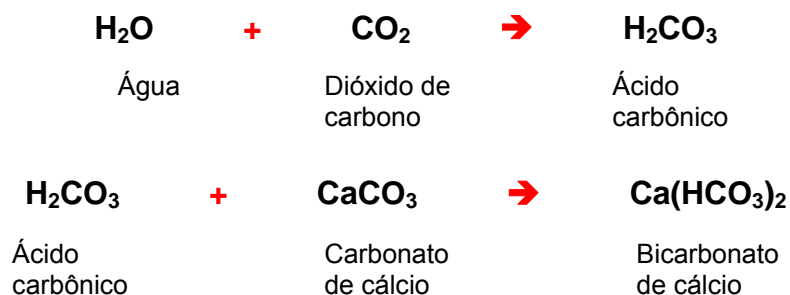
Toda história evolutiva da Bacia Potiguar, conseqüentemente da Formação Jandaíra, é marcada por intensas atividades tectônicas, as quais originaram um complexo sistema de falhas. Fazendo-se analogia entre o sistema de falhamentos da área de pesquisa e da Bacia Potiguar, é possível arriscar na hipótese de que a formação da caverna pode estar relacionada a estas estruturas. Esta idéia é evidenciada pela direção das galerias principais, que coincide com a orientação da maior parte das falhas da área e com o *trend* estrutural regional, ou seja, distribui-se nas direções NW-SE e NE-SW.

Certamente, aliado ao fator estrutural, as cavernas se formaram porque o calcário é uma rocha frágil à acidez. Um leve ácido o dissolve facilmente e ao encontrar um ambiente extremamente fraturado e poroso, aos poucos foram surgindo cavidades subterrâneas.

Consta ainda na literatura, que o desenvolvimento de qualquer caverna deve-se ao processo chamado carstificação (trabalho químico e mecânico da água sobre terrenos fraturados, constituídos por rochas solúveis). Na caverna Arapuá, atribuída à paisagem cárstica, estão também a alta permeabilidade e porosidade da rocha, que permitem o escoamento rápido da água e por se tratar de uma rocha calcária, o agente químico acelera o processo de formação (Figura 8.22).

A dissolução do calcário ocorre através de reações químicas entre o dióxido de carbono dissolvido na água e o oxigênio, além de diversos ácidos e produtos orgânicos provenientes do solo. A água da chuva transporta para a superfície da terra o dióxido de carbono presente na atmosfera, transformando-se em ácido

carbônico. Este, por sua vez, reage com o carbonato de cálcio (CaCO_3), transformando-se em bicarbonato de cálcio – $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ – solúvel e levado pelas águas (Figura 8.23).



Essa água, circulando pelas fendas e planos de estratificação, alarga lentamente todo o sistema de juntas, formando cavidades na rocha (Figura 8.22). Os espaços porosos, condutos e vazios continuam sendo modelados pela ação dessas soluções químicas e exercem, até hoje, importante papel no ornamento da caverna.

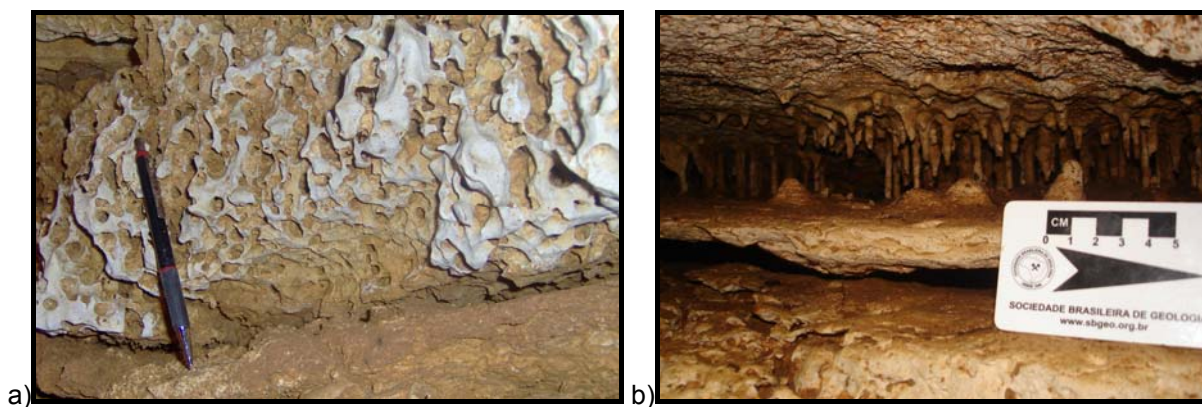


FIGURA 8.22 – Elevada porosidade da rocha permitindo a ação rápida da água (a) e planos de estratificação alargados pelo escoamento da água, formando cavidades na rocha (b).

Os agentes físicos, embora considerados mínimos, merecem citação pelo trabalho que desempenham, tais como: o arraste de partículas e o impacto causados pelo escoamento das águas, geram desagregação; e a gravidade atua indiretamente na conformação de grandes blocos colapsados dentro da caverna (Figura 8.24).



FIGURA 8.24 – Conformação de grandes blocos colapsados dentro da caverna pela atuação da gravidade.

Análises químicas realizadas em amostras representativas do calcário em nove níveis diferentes, até uma profundidade de 7,5 m e dentro da caverna, mostram que o mesmo é muito puro. O índice de carbonato de cálcio (CaCO_3) em média é de 97,9%, enquanto que o carbonato de magnésio (MgCO_3) é de apenas 1%, sendo o restante representado por outros elementos e resíduos insolúveis (Quadro 8.1). Isso significa que o material é bastante calcítico e pouco dolomítico, isto é, a rocha tende a se dissolver mais facilmente com a água e, conseqüentemente, a área é extremamente favorável a formação de cavernas.

QUADRO 8.1 – Análise química de amostras da caverna (topo, base e intermediário) e de pontos estratégicos da área, onde também ocorrem cavidades subterrâneas, coletadas em nove camadas distintas, até uma profundidade de 7,5 m, ordenadas da base para o topo.

AMOSTRA	RI	R ₂ O ₃	CaCO ₃	MgCO ₃
N1 (6,2 a 7,5 m)	0,9	0,5	97,1	1,5
N2 (5,5 a 6,2 m)	0,7	0,3	98,2	0,8
N3 (4,8 a 5,5 m)	0,7	0,3	98,2	0,8
N4 (4,1 a 4,8 m)	1,2	0,3	97,5	1,0
N5 (3,6 a 4,1 m)	0,9	0,1	98,0	1,0
N6 (3,0 a 3,6 m)	0,8	0,2	98,2	0,8
N7 (2,3 a 3,0 m)	1,7	0,4	96,6	1,3
N8 (1,0 a 2,3 m)	0,7	0,3	98,2	0,8
N9 (0 a 1,0 m)	0,2	0,1	98,9	0,8
AR 1 (Topo)	1,2	0,2	97,6	1,0
AR 2 (Base)	1,0	0,2	97,8	1,0
AR 3 (Intermediário)	1,0	0,2	98,0	0,8
MÉDIA	0,9	0,3	97,9	1,0

Laboratório: Carbomil Química S/A.

8.3 Levantamento Topográfico da Caverna

Esta fase teve como objetivo principal a coleta de dados para posterior construção do esqueleto da caverna. Através do levantamento topográfico foi possível avaliar o desenvolvimento e o desnível da caverna em relação a superfície.

O método baseou-se no caminhamento e distribuição de estações ao longo dos eixos principais de desenvolvimento da caverna, com irradiações de visadas laterais. A partir das quais foram tomadas leituras de ângulos horizontais (azimute) e verticais (desnível), distâncias à direita e à esquerda (largura), de vante e de ré (comprimento) e alturas do teto (Figura 8.25). Desta forma, após a escolha da escala de trabalho compatível com nível de detalhamento desejado (1:200), utilizando as medidas topográficas, foi executado um croqui esquemático da planta baixa da caverna.

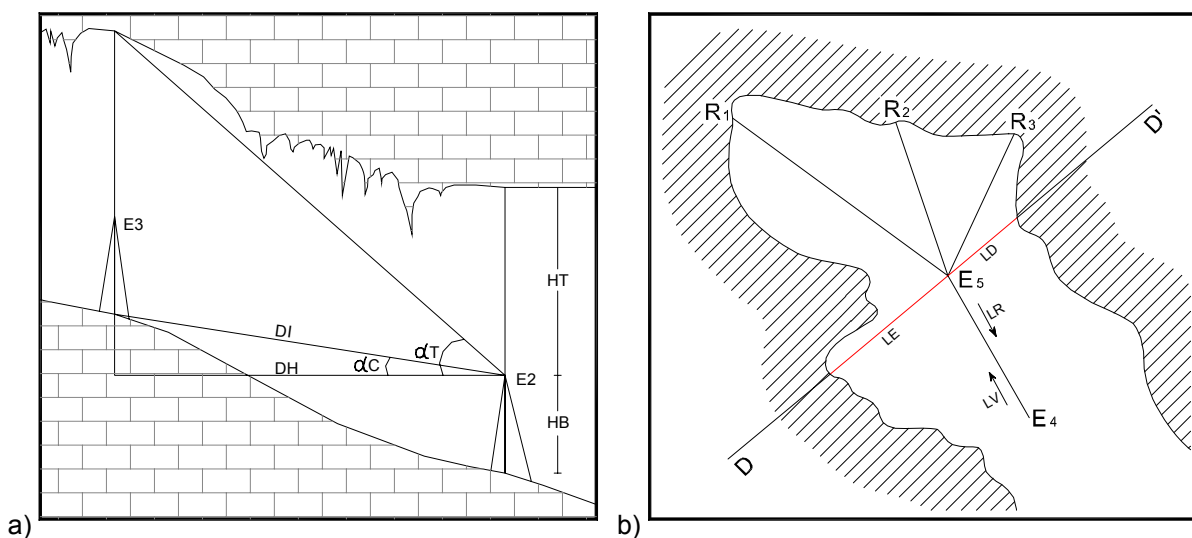


FIGURA 8.25 – Metodologia aplicada no levantamento topográfico da caverna: leituras tomadas (a) e distribuição das estações (b).

Para a realização da topografia da caverna empregou-se como técnica a poligonal aberta para as galerias, com irradiação a partir de uma base fixa nos salões mais amplos. Os dados medidos a partir dessas bases foram repassados diretamente para o papel milimetrado, no campo, usando régua e transferidor (Figura 8.26). As visadas foram tomadas, em frente e ré, com objetivo de evitar erros grosseiros de leitura de dados direcionais. As direções das galerias e estruturas, e as distâncias entre as bases topográficas e as paredes da gruta foram desenhadas durante o levantamento topográfico. Estes dados foram repassadas, em escala adequada, para um croqui esquemático, representando a planta baixa da caverna, com símbolos de toda sua ornamentação (estalactites, estalagmites, etc.), bem como depósitos clásticos, blocos, registros fósseis e fraturas (Figura 8.27).



FIGURA 8.26 – Equipe topográfica em uma base fixa no interior da caverna.



FIGURA 8.27 – Medição de fraturas no teto da caverna.

A entrada da gruta, bem como as principais estruturas em superfície (dolinas e fraturas) existentes na área, foram georeferenciadas utilizando-se equipamento geodésico de precisão centimétrica da marca ASTHEC (Figura 8.28), no sistema de projeção SAD/69, posteriormente convertido para WGS 84. Tais dados geraram um modelo digital do terreno, o qual exibe características de um terreno ruiforme, com altos e baixos, proveniente da dissolução do calcário (Figura 8.29).



FIGURA 8.28 – Medida de estruturas em superfície utilizando GPS geodésico.

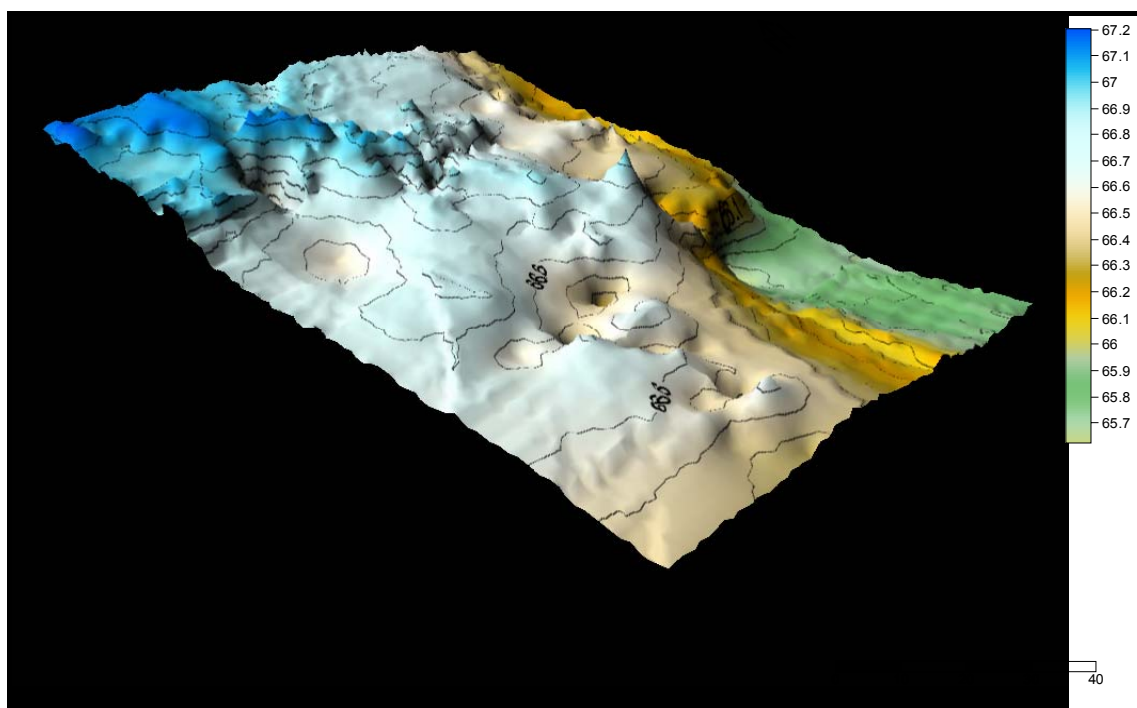


FIGURA 8.29 – Modelo digital do terreno a partir de dados georeferenciados utilizando-se equipamento geodésico de precisão. A figura mostra características de um terreno ruiforme, com altos e baixos, proveniente da dissolução do calcário.

Posteriormente, em escritório, todos estes dados foram utilizados para a confecção do mapa topográfico em meio digital, composto de planta baixa, cortes transversais e perfis longitudinais, simulando três planos distintos em uma mesma escala.

Planta baixa é a projeção da caverna no plano horizontal, por outro lado, perfil longitudinal é a representação vertical ao longo do eixo principal de desenvolvimento da caverna, finalmente, seções transversais são planos verticais imaginários que cortam transversalmente as estações topográficas.

O mapeamento espeleológico, exige sensibilidade de observação. Através dele obteve-se uma percepção espacial e memorização de toda a caverna. Verificou-se que a caverna Arapuá é caracterizada por duas galerias, uma NW-SE e outra NE-SW. Os perfis longitudinais mostram que a primeira, a maior delas, possui 53,55 m de comprimento e a segunda 33 m. Já as seções transversais fornecem dados de largura e altura de determinadas porções. Alguns salões chegam a atingir

larguras superiores a 10 m e alturas de até 3,65 m, enquanto que outros apresentam tetos baixos, inferiores a 1m em determinadas passagens.

Com relação as fraturas presentes, estas são responsáveis pela infiltração da água no ambiente cavernícola. Tentou-se correlacionar as direções tomadas no interior da caverna com aquelas medidas em superfície, através de GPS geodésico (Figura 8.28) que ofereceu precisão centimétrica à localização dessas fendas.

Na área em torno a caverna e em seu interior, a direção preferencial de todas as juntas levantadas (freqüência acumulada) com GPS Geodésico estão representadas na figura 8.30. Verifica-se que em superfície as estruturas ocorrem em diversas orientações aleatórias, porém existe uma concentração maior na direção NW (a). Por outro lado, no interior da caverna, as juntas evidenciadas pelo alinhamento de estalactites e fraturas no teto, encontram-se orientadas segundo duas direções preferenciais: NE-SW e NW-SE (b).

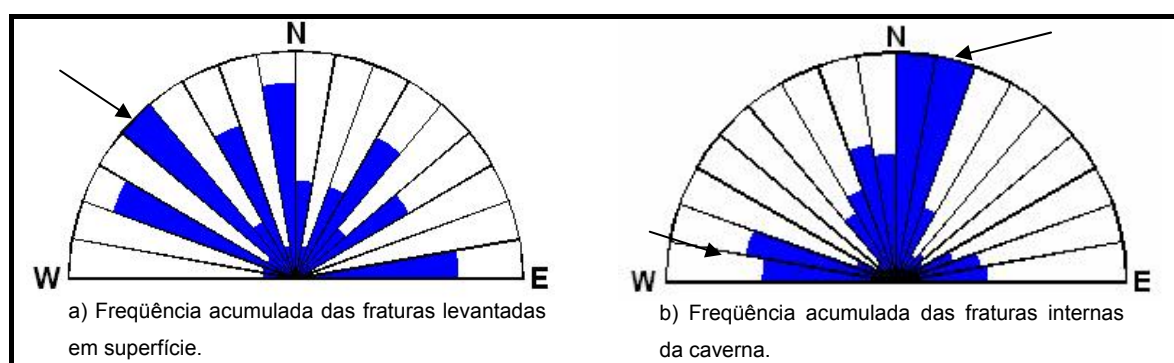


FIGURA 8.30 – Diagramas de rosetas mostrando a freqüência acumulada das direções levantadas em superfície com GPS Geodésico (a) e no interior da caverna (b).

As figuras 8.31 e 8.32, exibem a distribuição, em planta, destas fraturas externas e internas, da caverna, respectivamente. O procedimento permitiu diagnosticar que essas estruturas tanto em superfície com em subsuperfície, assumem direção aproximada ao desenvolvimento da caverna. Grande parte das fraturas mapeadas em superfície (62%) são muito abertas, em outras palavras é possível dizer que estas fraturas tiveram e têm importante participação na gênese e morfologia da caverna Arapuá.

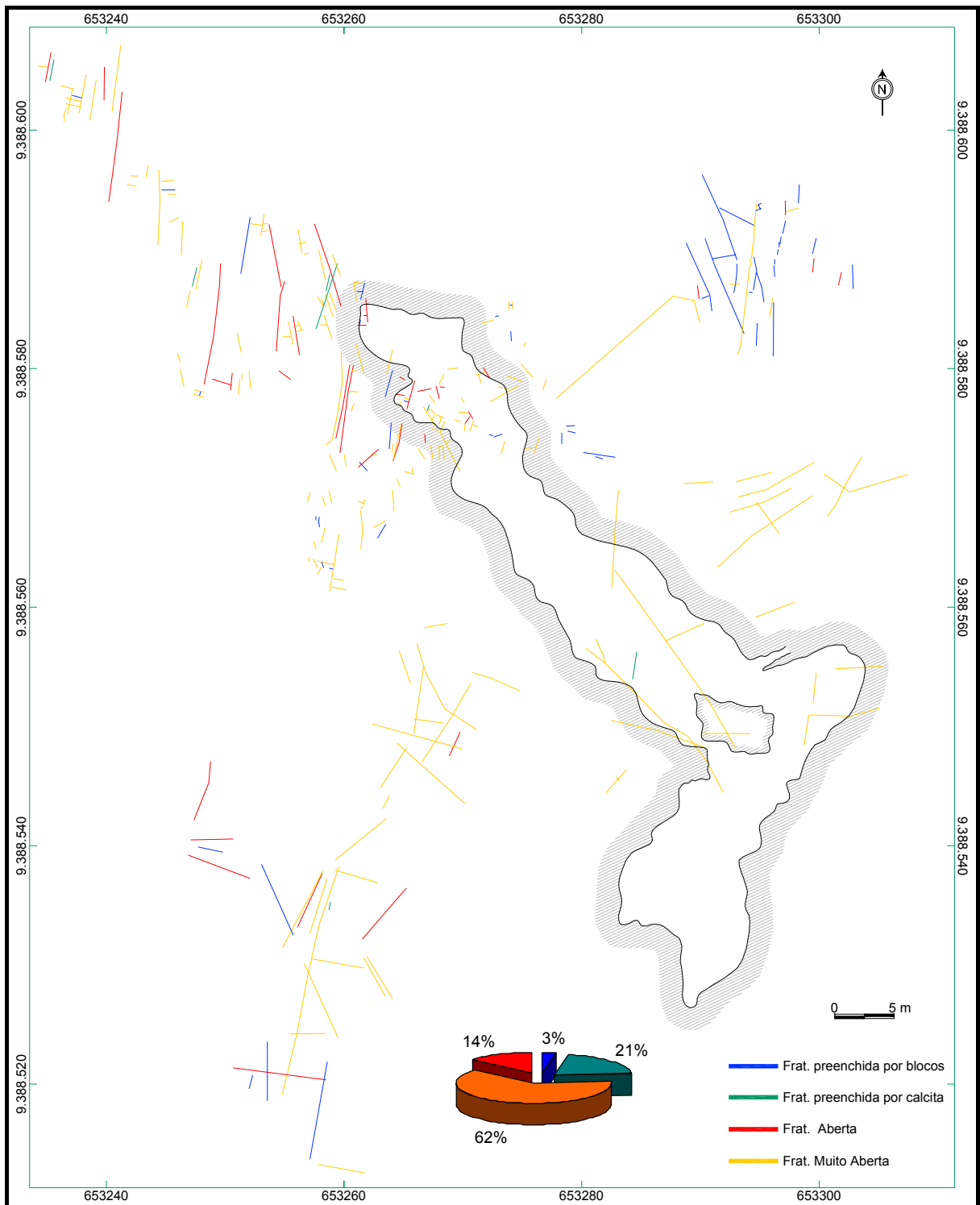


FIGURA 8.31 – Distribuição, em planta, das fraturas externas da caverna, localadas com GPS geodésico.

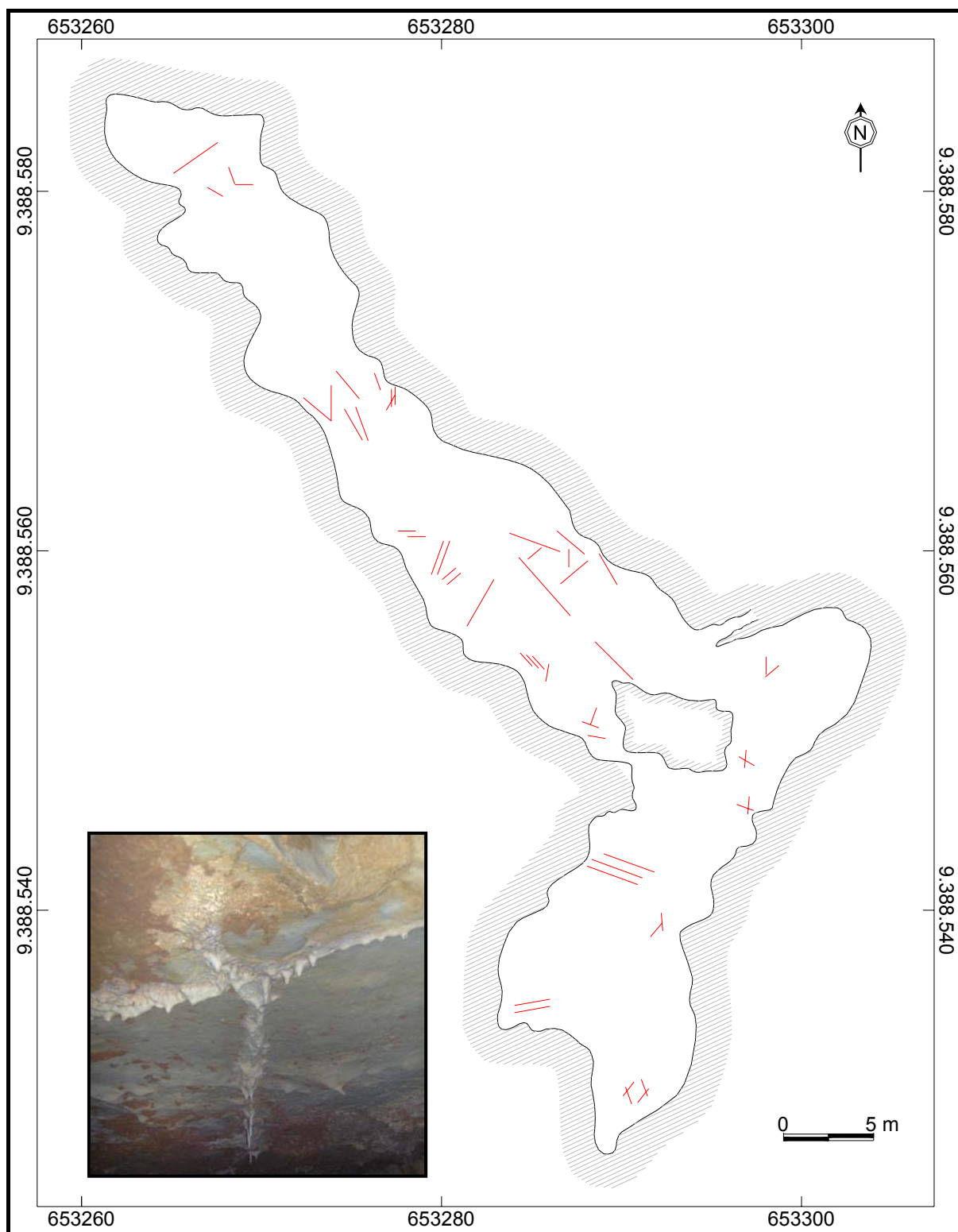
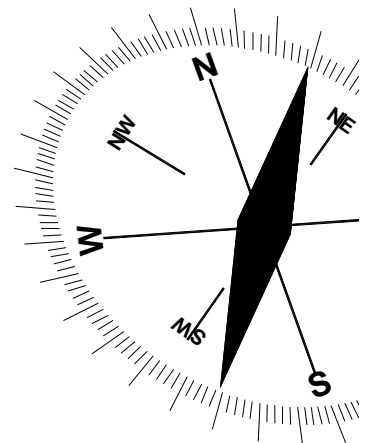


FIGURA 8.32 – Distribuição, em planta, das fraturas internas da caverna, medidas com trena e bússola.

Capítulo 09

CONCLUSÕES E SUGESTÕES



9. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O estudo mostrou que a área compreende um relevo cárstico formado por lapíás, dolinas, cavernas e estruturas ruiformes produzidas pela ação geológica da água superficial e subterrânea sobre rochas solúveis, os calcários da Formação Jandaíra, nos quais a formação de condutos é controlada principalmente pelo grau de solubilidade da rocha e seu padrão estrutural.

Segundo análises químicas, o calcário da área é essencialmente calcítico, com cerca de 97,9%, em média, de CaCO_3 . Apesar de uma composição simples, mostram em lâmina quatro variações de rocha: *wackestone*, *paskstone*, *mudstone* e carbonato cristalino. A porosidade surge de diversas formas: vugular ou intergrãos, intragrãos, ao longo de estilólitos e em fraturas. Acredita-se que as fraturas são o ponto de partida para o desenvolvimento das demais formas de microporosidade. É através do fraturamento que a água inicia sua atuação de desagregação lenta e contínua da rocha, passando, a longo prazo, de microporosidade à cavidades subterrâneas.

Em campo as juntas foram identificadas segundo suas orientações espaciais, perfazendo quatro famílias: J_1 (N-S), J_2 (E-W), J_3 (NE-SW) e J_4 (NW-SE). A família J_3 é a mais persistente, com comprimentos superiores a 20 m. O parâmetro espaçamento oscila entre moderado (J_2), grande (J_1) e muito grande (J_3 e J_4) e quanto a abertura as juntas podem ocorrer fechadas, preenchidas ou extremamente abertas, com características de cavernas.

As falhas, quando comparadas as juntas são maiores em comprimento e espaçamento, da ordem de centenas de metros; e abertura e profundidades métricas. Suas profundidades variam de “pequenas” até “muito profundas”, ao longo de três direções preferenciais: N-S, NW-SE e NE-SW. Não foram registradas em campo, falhas de direção E-W.

A análise por sensores remotos permitiu reconhecer que a série de lineamentos interpretados e mapeados coincide em parte, tanto com o arranjo local, como com todo sistema estrutural da Bacia Potiguar. Em ambiente SIG,

modelamentos matemáticos gerados através do *software Petbool*, permitiram distinguir que existem 3 tendências de direções: NW-SE, NE-SW e N-S; e que todas essas tendências se repetem nas demais formas de representações gráficas das fraturas.

Com base nesse contexto, supõe-se de que as famílias de fraturas presentes na área, com direções preferenciais NE-SW, NW-SE e N-S, são reflexos de uma tectônica de expressão regional, ligada a evolução da margem continental brasileira. Os resultados dos levantamentos efetuados mostram que esta bacia, ao longo de sua história evolutiva, apresenta características estruturais condizentes com o desenvolvimento do intenso sistema de fraturas da área de pesquisa.

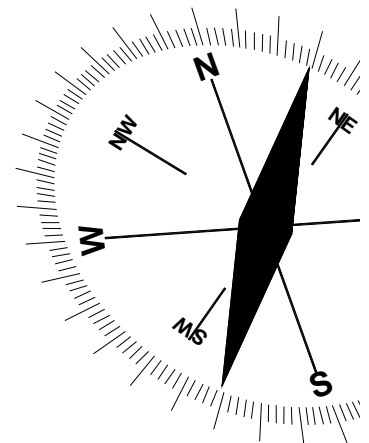
Além disso, os lineamentos NW-SE e NE-SW coincidem também com a topografia da caverna mapeada, o que significa que a presença destas estruturas exerce forte controle e influência direta na formação de cavidades subterrâneas.

É importante ressaltar que, com o mapeamento realizado por este trabalho, o registro de 88 cavidades catalogadas pelo CECAV/IBAMA foi acrescido de mais 14 descobertas, perfazendo 23 cavidades só na área estudada e totalizando 102 cavidades em Felipe Guerra, município onde se encontra a área de pesquisa.

Esperamos, finalmente, que este trabalho seja uma parcela contribuinte da Geologia do Brasil e recomendamos a intensificação de esforços científicos e investimentos em particular, no município de Felipe Guerra, voltados a um detalhamento das descobertas cavernícolas, capazes de enriquecer o banco de informações espeleológicas de natureza singular.

Capítulo 10

BIBLIOGRAFIAS CONSULTADAS



10 BIBLIOGRAFIAS CONSULTADAS

ANDRADE, A. P. U. **Faciologia na Formação Jandaíra, Bacia Potiguar, com Ênfase no Sistema Poroso**. 2007. 96p. Natal. Relatório de Graduação. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, UFRN.

ARARIPE & FEIJÓ, 1994. In: NOGUEIRA, F. C. C. **Método *Ground Penetrating Radar* (GPR) e Análise Estrutural Aplicados ao Estudo da Geometria Tridimensional de Estruturas Cenozóicas na Bacia Potiguar**. 2004. 79p. Fortaleza. Dissertação (Mestrado em Geologia Regional). DEGEO, UFC.

ARTHAUD, M. H. Apostila: **Introdução à Geologia Estrutural**. UFC. DEGEO. 2002. 131p.

AULER, A., RUBBIOLI, E. & BRANDI, R. **As grandes cavernas do Brasil**. Belo Horizonte: Grupo Bambuí de Pesquisas Espeleológicas, 2001. 228p.

BEZERRA, F. H. R., AMARO, V. E., VITA-FINZI, C., SAADI, A., MOREIRA, J. A. M., LINS, F. A. P. L., NOGUEIRA, A. M. B., MACEDO, J. W. P., LUCENA, L. F. & NAZARÉ JR. D. **Pliocene-Quaternary Fault Control of Sedimentation and Coast Plain Morphology in NE Brazil**. *Journal of South American Earth Sciences* 2001. 14: p. 61-75.

BEZERRA, F. H. R., SAADI, A., MOREIRA, J. A. M., LINS, F. A. P. L., NOGUEIRA, A. M. B., MACEDO, J. W. P., LUCENA, L. F. & NAZARÉ JR. D. **Estruturação Nectônica do Litoral de Natal-RN, com Base na Correlação entre dados Geológicos, Geomorfológicos e Gravimétricos**. *Anais do IV Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos*, 2005. SBG Núcleo MG – Bol. 12: 317-321.

CAMPOS, M. DE, BRAGA, A. P. G., MELLO, A. A., SOUZA, E. M., SILVA, F. A. F., FRANÇA, J. B. **Projeto Rio Jaguaribe, estados do Ceará, Rio Grande do Norte e Paraíba**: Relatório final de geologia. Brasília, DNPM, 1979. 149p.

CARVALHO & LEITE (2000). In: CECAV – Centro Nacional de Estudo, Prospecção e Manejo de Cavernas. **Diagnóstico Espeleológico do Rio Grande do Norte**. Organizado por: CRUZ, J. B; COELHO, D. C ; SILVA, F. J; FREITAS, J. I; CASTRO, T. J & CAMPOS, U. P. Rio Grande do Norte-RN, 2007. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/cecav>>.

CAVALCANTI, J. A. D. **Mapeamento Espeleológico**. 1ª. Edição. Ouro Preto: SEE – Sociedade Excurcionista Espeleológica, 1996. 30p.

CECAV – Centro Nacional de Estudo, Prospecção e Manejo de Cavernas. **Diagnóstico Espeleológico do Rio Grande do Norte**. Organizado por: CRUZ, J. B; COELHO, D. C ; SILVA, F. J; FREITAS, J. I; CASTRO, T. J & CAMPOS, U. P. Rio Grande do Norte-RN, 2007. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/cecav>>.

CHANG H. K. ET AL, 1992. In: PESSOA NETO, O.C. **Estratigrafia de Seqüências da Plataforma Mista Neogênica na Bacia Potiguar, Margem Equatorial Brasileira**. Revista Brasileira de Geociências, 2003. Volume 33, p. 263-278, 2003.

CORIOLOANO, A. C. F., LUCENA, L. F., JARDIM DE SÁ, E. F. & SAADI, A. **A deformação quaternária no litoral oriental do Rio Grande do Norte**. VII Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos, 1999. Lençóis, BA. Sessão 4, p. 67-70.

CPRM – Serviço Geológico do Brasil. **Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea**: Diagnóstico do município de Felipe Guerra, estado do Rio Grande do Norte. Organizado por: MASCARENHAS J. C., BELTRÃO,

B. A., SOUZA JUNIOR L. C., PIRES, S. T. M., ROCHA, D. E. G. A. & CARVALHO, V. G. D. Recife, 2005. 11 p.

CREMONINI, O. A. **A Reativação tectônica da Bacia Potiguar no Cretáceo Superior**. V Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos, 1995. Gramado. p. 277-280.

CREMONINI, O. A. & KARNER, G. D. **Soerguimento Termal e Erosão na Bacia Potiguar Submersa e seu Relacionamento com a evolução da margem equatorial brasileira**. Simpósio de Geologia do Nordeste, 16, 1995. Anais... Recife: SBG/NE, V. 1, p. 152-156.

CROSTA, A. P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. Campinas, SP: IG/UNICAMP, 1993-1992. 170p.

CYPRIANO & NUNES, 1968. In: NOGUEIRA, F. C. C. **Método *Ground Penetrating Radar* (GPR) e Análise Estrutural Aplicados ao Estudo da Geometria Tridimensional de Estruturas Cenozóicas na Bacia Potiguar**. 2004. 79p. Fortaleza. Dissertação (Mestrado em Geologia Regional). DEGEO, UFC.

DANTAS, E. P., JARDIM DE SÁ, E. F. & CASTRO, D. L. **Análise de Lineamentos na Porção Central da Bacia Potiguar e sua Reativação Neotectônica**. VII Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos, 1999. Lençóis-BA. Sessão 4, p. 86-89.

DANTAS, E. P. **Gravimetria e Sensoriamento Remoto: uma aplicação ao estudo da tectônica recente entre Macau e São Bento do Norte**. 1998. 97p. Natal. Dissertação (Mestrado em Geodinâmica e Geofísica). CCET, UFRN.

DOURADO, A. C. **Petrografia Básica: textura, clasificación y nomenclatura de rocas**. Editorial Paraninfo, Madrid, 1989. Cap. 3., p. 78-92.

DUNHAM, R. J. (1962). In: _____ **Petrografia Básica**: textura, clasificación y nomenclatura de rocas. Editorial Paraninfo, Madrid, 1989. Cap. 3., p. 78-92.

ECOPLAM – Empresa de Consultoria e Planejamento Ambiental Ltda. In: CECAV – Centro Nacional de Estudo, Prospecção e Manejo de Cavernas. **Diagnóstico Espeleológico do Rio Grande do Norte**. Organizado por: CRUZ, J. B; COELHO, D. C ; SILVA, F. J; FREITAS, J. I; CASTRO, T. J & CAMPOS, U. P. Rio Grande do Norte-RN, 2007. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/cecav>>.

FOLHA APODI (SB.24-X-C-VI). SUDENE – Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste. 1982. Mapa digital, colorido. Escala 1:100.000.

FOLHA QUIXERÉ (SB.24-X-C-III). SUDENE – Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste. 1982. Mapa digital, colorido. Escala 1:100.000.

FOLK (1959,1962). In: _____ **Petrografia Básica**: textura, clasificación y nomenclatura de rocas. Editorial Paraninfo, Madrid, 1989. Cap. 3., p. 78-92.

FRANÇOLIN & SZATMARI (1989). In: DANTAS, E. P. **Gravimetria e Sensoriamento Remoto**: uma aplicação ao estudo da tectônica recente entre Macau e São Bento do Norte. 1998. 97p. Natal. Dissertação (Mestrado em Geodinâmica e Geofísica). CCET, UFRN.

FRANÇOLIN, J. B. L. & SZATMARI, P. (1987). **Mecanismo de rifteamento da porção oriental da margem norte brasileira**. Revista Brasileira de Geociências, 17, p. 196-207.

GIANNINI, P. C. F. Depósito e rochas sedimentares. In: _____, **Decifrando a terra**. 2ª. Reimpressão. São Paulo: Oficina de Textos, 2003. Cap. 14, p. 113-138.

GIANNINI, P. C. F. & RICCONNINI, C. Sedimentos e processos sedimentares. In: _____, **Decifrando a terra**. 2ª. Reimpressão. São Paulo: Oficina de Textos, 2003. Cap. 9, p. 167-190.

GUERRA, A. J. T. E CUNHA, S. B., **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. 3ª. Ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998. 472p.

HACKSPACHER *ET AL.*, 1985. In: DANTAS, E. P. **Gravimetria e Sensoriamento Remoto**: uma aplicação ao estudo da tectônica recente entre Macau e São Bento do Norte. 1998. 97f. Natal. Dissertação (Mestrado em Geodinâmica e Geofísica). CCET, UFRN.

IDEMA – Instituto de Desenvolvimento Econômico e Meio Ambiente. **Anuário Estatístico do Rio Grande do Norte**, 2005. Disponível em: <<http://www.idema.gov.br>>.

ISRM – *International Society for Rock Mechanic*. **Suggested methods for the quantitative description of rock masses**. Traduzido pela ABGE – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. **Método para descrição quantitativa de descontinuidades em maciços rochosos**. Edição autorizada pela Pergaman Press LTD Oxford-England. São Paulo, 1983. p. 132.

INCRA – Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária. In: CECAV – Centro Nacional de Estudo, Prospecção e Manejo de Cavernas. **Diagnóstico Espeleológico do Rio Grande do Norte**. Organizado por: CRUZ, J. B; COELHO, D. C ; SILVA, F. J; FREITAS, J. I; CASTRO, T. J & CAMPOS, U. P. Rio Grande do Norte-RN, 2007. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/cecav>>.

KARMANN, I. Ciclo da água: água subterrânea e sua ação geológica. In: _____, **Decifrando a terra**. 2ª. Reimpressão. Oficina de Textos, São Paulo, 2003. Cap.7, p. 113-138.

KOHLER, H. C., Geomorfologia Cárstica. In: _____, **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. 3ª. Ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998. Cap.7, p. 309 – 334.

LOCH, C. **A interpretação de imagens aéreas: noções básicas e algumas aplicações nos campos profissionais**. 2ª. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 1989. 120p.

MADRUCCI, V., ARAÚJO, C. C. & TAIOLI, F. **Sensoriamento Remoto, Aerogeofísica e geoprocessamento aplicados ao estudo de aquífero fraturado em terreno cristalino, leste do estado de São Paulo**. Revista Brasileira de Geociências, V. 33, 2003, p 43 - 52.

MATOS, R. M. D. **The Northeast Brazilian Rift System Tectonics**, 1992b.11 (4): p766-791.

NOGUEIRA, F. C. C. **Método *Ground Penetrating Radar* (GPR) e Análise Estrutural Aplicados ao Estudo da Geometria Tridimensional de Estruturas Cenozóicas na Bacia Potiguar**. 2004. 79p. Fortaleza. Dissertação (Mestrado em Geologia Regional). DEGEO, UFC.

OLIVEIRA, D. C., MATOS, R. M. D. & SOARES, U. M. **Contribuição ao Estudo das Estruturas Rasas na Bacia Potiguar: análise estrutural do afloramento Afonso Bezerra (RN) e adjacências**. Anais do IV Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos, 2005. SBG Núcleo MG – Bol. 12: 306-311.

PEREZ Y. A. R., FILHO F. P. E., MENESES, L., PORSONI, J. L., APPI, C. J. C., ARAÚJO V. D. & SOUZA A. M. **Caracterização da Geometria de Depósitos Sedimentares da Formação Açú na Borda Sudoeste da Bacia Potiguar, NE do Brasil**. Revista de Geologia. V. 16. N° 1, 2003. UFC. DEGEO. Fortaleza – CE. XX Simpósio de Geologia do Nordeste – SGNE.

PESSOA NETO, O. C. **Estratigrafia de Seqüências da Plataforma Mista Neogênica na Bacia Potiguar, Margem Equatorial Brasileira.** Revista Brasileira de Geociências, 2003. Volume 33, p. 263-278, 2003.

PROASNE – Projeto Água Subterrânea no Nordeste do Brasil. **Modelamento Matemático da Área de Recarga do Aquífero Açú.** Rio Grande do Norte, 2006. Disponível em: <<http://proasne.net/acufinalreporte.html>>.

PROTERO, D. R. & SCHWAB, F. Carbonate Rocks. In: **Sedimentary Geology: an introduction to sedimentary rocks and stratigraphy.** 2ª printing. New York: W. H. Freeman and Company, 1996. Cap. 11, p. 231-254.

QUICKBIRD: **Imagem de satélite digital.** *RGB Composite.* Datum: WGS 1984, UTM Zone 24S, *Transverse Mercator.* Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis & Centro Nacional de Estudo, Prospecção e Manejo de Cavernas, IBAMA/CECAV, 2007.

SANTOS, M.F.C.F., LIMA FILHO, F.P & BERGQVIST. **Fósseis Pleistocênicos da Ravina do Leon, Lajedo de Soledade, Apodi/RN.** Revista de Geologia. UFC, 2002. 15:23-29.

SILVA, A. B. **Sistemas de Informações Geo-Referenciadas: conceitos e fundamentos.** 1 ed. Campinas: UNICAMP, 2003. V. 1. 235p.

SIAL, A. N. **Significado Tectônico de Posicionamento de Rochas Basáltica Pós-paleozóica do Nordeste Brasileiro,** SBG/NE, 1975. Boletim 3: p. 35-51.

SUGUIO, K. **Rochas Sedimentares: propriedades, gênese, importância econômica.** São Paulo: Edgard Blucher, 1980. 500p.

TUCKER, M. E. Limestones. In: **Sedimentary Petrology**, an introduction to the origin of sedimentary rocks. 2ª edition. Oxford: Presented by the British Council. Chapter 4, p. 107-134.

VERÍSSIMO, V.U.C. **Laudo Técnico Sobre a Existência de Cavernas e Potencial Espeleológico do Sítio João Pedro, Zona Rural de Apodi/RN**. LAGETEC – Laboratório de Geotécnica. UFC, Fortaleza, 2006. 20p.

VERÍSSIMO, V. U. C., PAIVA NETO, A. O., LESSA, F. G. N., Nogueira, F. G., MAGINI, C. ; & Câmara, J. R. de F. **Potencial Espeleológico do Sítio João Pedro, Zona Rural e Cárstica do Apodi, RN**. In: XLIII Congresso Brasileiro de Geologia, 2006, Aracajú. Anais XLIII Congresso Brasileiro de Geologia. Aracajú : SBG - Núcleo Bahia - Sergipe, 2006. v. 1.

WILLIAMS, H., TURNER, F. J. & GILBERT, C. M. **Petrografia**: uma introdução ao estudo das rochas em seções delgadas. Traduzido por Ruy Ribeiro Franco. São Paulo-SP, Polígono e Editora da Universidade de São Paulo, 1970. 424p.

Websites visitados:

<http://www.geocites.com/yosemite/5913/>

Wikipedia, a enciclopédia livre: <http://em.wikipedia.org>

Grupo Espeleológico Espírito da Terra: <http://www.espiritodatterra.com.br>

Sociedade Brasileira de Espeleologia: <http://www.sbe.com.br/cavernas>

ANEXO II

