

O USO DE DADOS DA MISSÃO SRTM E SEDIMENTOLÓGICOS NOS ESTUDOS DE GEOMORFOLOGIA E PADRÕES DE DRENAGEM NA REGIÃO DOS LENÇÓIS MARANHENSES

Use of SRTM Mission and Sedimentological Data in Geomorphological Studies and Drainage Patterns in Region of Lençóis Maranhenses

Francisco Gleidson da Costa Gastão¹
Luís Parente Maia¹

¹**Universidade Federal do Ceará – UFC**
Instituto de Ciências do Mar (LABOMAR)/Laboratório de Dinâmica Costeira (LABDIC)
Av. da Abolição, 3207. Meireles. CEP: 60.165-081, – Fortaleza-CE.
geo_gleidson@yahoo.com.br
parente@ufc.br

RESUMO

Os dados disponibilizados pela missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) são usados para gerar os Modelos Digitais de Elevação (MDEs). Estes juntamente com outras informações, tais como levantamentos sedimentológicos e estruturais, podem ser úteis nos estudos da geomorfologia e da rede de drenagem de uma região. A área estudada, onde estão incluídos os Lençóis Maranhenses, apresenta pelo menos três compartimentos de relevo, cada qual com suas características sedimentológicas distintas; são os corpos dunares (móveis e fixados por vegetação), os tabuleiros pré-litorâneos e os tabuleiros dissecados. Os elementos estruturais, como lineamentos, presentes nestes relevos, condicionam as feições morfológicas que se observam em superfície, além de contribuírem para a estruturação da bacia hidrográfica da região, englobando os padrões de drenagem dos tipos paralelo, retangular, dendrítico e contorcido.

Palavras chaves: SRTM, Padrões de Drenagem, Geomorfologia, Dunas, Lençóis Maranhenses.

ABSTRACT

The data made available by the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) have been employed to generate Digital Elevation Models (DEM). These, together with such information as sedimentologic and structural survey, are supposed to be useful in studies of geomorphology and drainage systems of a given region. The studies are, where the *Lençóis Maranhenses* are included, presents at least three relief compartments, each one with its distinct, sedimentologic characteristic, namely the dune-formed bulks (mobile or fixed by vegetation), and the sublittoral and dissected tablelands. The structural elements, like contours, present on those relieves, entail the morphological features which are visible on the surface, in addition to their contributing to a framework of the parallel, rectangular, dendritic and contorted types.

Keywords: Shuttle Radar Topography Mission, Drainage Patterns, Geomorphology, Dunes, *Lençóis Maranhenses*.

1. INTRODUÇÃO

Mapas de redes de drenagem podem ser considerados como ferramentas bastante úteis nos estudos aplicados ao relevo de uma região. Um dos pioneiros nos levantamentos de dados a cerca de bacias hidrográficas foi HORTON, 1945 (*In DEMATTÊ &*

DEMÉTRIO, 1995). Este autor destacou algumas características da rede de drenagem, como dimensões de áreas de microbacias, comprimento e composição da rede de drenagem, densidade da rede, frequência de rios, entre outras; e montou uma base metodológica bastante sólida que deu um grande impulso no desenvolvimento da análise morfométrica dos sistemas

naturais de drenagem, uma vez que, estes expressam estreita correlação com o tipo litológico, controle estrutural e os elementos que compõem a superfície terrestre, como solos ou tipos de sedimentos, por exemplo.

Novos autores utilizaram outras tecnologias, juntamente com as premissas de HORTON, 1945 (*In* DEMATTÊ & DEMÉTRIO, 1995), nos estudos de redes de drenagem, como FRANÇA & DEMATTÊ (1990). Estes, usando fotografias aéreas, determinaram os parâmetros de drenagem em áreas de latossolos argilosos e solos podzólicos de textura arenosa a média ou média a argilosa. FRANÇA & DEMATTÊ (1993), cruzando dados aerofotográficos e pedológicos, fizeram um estudo dos padrões de drenagem desenvolvidos em solos do arenito de Bauru no oeste da cidade de São Paulo.

Dentre as novas aquisições de dados para a aplicação em estudos de relevo, se destaca a da missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*). Um projeto realizado a partir da parceria entre a agência espacial norte-americana (*National Aeronautic and Space Administration* – NASA), a *National Geospatial-Intelligence Agency* (NGA), o Departamento de Defesa dos Estados Unidos (DoD) e as agências espaciais alemã (*Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt* – DLR) e italiana (*Agenzia Spaziale Italiana* – ASI) em fevereiro de 2000, para o mapeamento do relevo da área continental da Terra com interferometria de radar de abertura sintética (InSAR), entre 60° de latitude norte e 54° de latitude sul, o que corresponde aproximadamente 80% das áreas emersas do planeta (JPL, 2009).

O resultado das técnicas da missão SRTM é a geração de Modelos Digitais de Elevação (MDEs). E uma das aplicações dos MDEs é a extração automática da rede de drenagem. Para isso usam-se vários métodos algorítmicos, como o método utilizado por RIAZANOFF et al. (1988), um algoritmo que extrai a rede de drenagem por processo de busca contínua em caminhos de mesma elevação. MARTINS et al. (2007) notaram, em estudo que caracterizou a rede de drenagem das bacias hidrográficas do nordeste do Pará e noroeste do Maranhão, que os mapas gerados a partir dos MDEs da missão SRTM são coerentes, comparados com a drenagem do mapeamento convencional, e que os dados servem para levantamentos de escala regional.

A geomorfologia de uma região, compreendida em uma escala espaço-temporal (KÖHLER, 2002), diz respeito ao estudo das formas de relevo (CASSETI, 2001). E a geomorfologia fluvial é uma subdivisão da geomorfologia, que procura analisar as bacias hidrográficas, considerando suas principais características que, por sua vez, condicionam o regime hidrológico, a análise dos cursos de água que contemplam os processos fluviais e as formas resultantes do escoamento das águas (CUNHA, 2001).

É importante levar em consideração os eventos tectônicos e neotectônicos para estudar a geomorfologia de uma região e seu sistema de drenagem. O termo neotectônica, utilizado pela primeira

vez por OBRUCHEV, 1948 (*In* SUGUIO & MARTIN, 1996), se refere a uma sucessão de movimentos crustais recentes, iniciados a partir do período Terciário Superior e que continuou durante o Quaternário. Devido às grandes obras de engenharia civil; tais como obras de usinas hidrelétricas e term nucleares, além de portos, desenvolvidas nas últimas décadas; a neotectônica tem sido alvo de pesquisas desenvolvidas por vários geólogos brasileiros (SUGUIO & SALLUN, 2004). SUGUIO & MARTIN (1996) ressaltam que estes eventos desempenharam um papel muito importante na evolução geológica na linha de costa do Brasil.

ANDRADES FILHO et al. (2008) estudando a formação de areais no sudoeste do Rio Grande do Sul, notaram que a neotectônica tem forte influência na formação destes depósitos, e que estes, estão associados aos cursos de drenagem identificados por anomalias.

Considerar a sedimentologia destes depósitos, associada a sua gênese, também é importante, pois a mobilidade dos sedimentos que os formam pela ação das águas e dos ventos, moldando a morfologia do terreno e as bacias hidrográficas, depende das características sedimentológicas do material que os compõe, como granulometria, teores de carbonato de cálcio e matéria orgânica, bem como os graus de arredondamento e esfericidade dos grãos.

As coordenadas métricas usadas no presente trabalho referem-se ao sistema UTM fuso 23 Sul, no datum horizontal WGS 84.

2. OBJETIVO

Estudar a geomorfologia e os padrões de drenagem de uma área onde estão inclusos os Lençóis Maranhenses, através de técnicas de geoprocessamento e estudos sedimentológicos. E encontrar evidências do controle estrutural, advindo dos processos tectônicos, responsáveis pela modelagem do relevo e da bacia hidrográfica daquela região.

3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA ESTUDADA

A área estudada está localizada no Nordeste (NE) do Brasil, mas precisamente na porção NE do estado do Maranhão (Fig.1). Situa-se numa zona de transição dos climas semi-áridos do interior do Nordeste para os úmidos equatoriais da Amazônia. Comporta o maior registro de sedimentação do Quaternário encontrado na América do Sul (GONÇALVES et al., 2003).

Devido a sua natureza e extensão, este sítio geológico é um grande laboratório para pesquisadores interessados em estudar a origem e evolução dos depósitos eólicos, ou mesmo da formação de morfologias costeiras.

3.1 SÍNTESE DO CONTEXTO GEOLÓGICO

A área estudada está inserida em dois compartimentos geológicos principais que apresentam

domínios geocronológicos, tectônicos e sedimentológicos diferentes, a Bacia Intracratônica do Parnaíba, a sul, e a norte as bacias mesozóicas de margem continental do tipo *rift* de Ilha Nova e de Barreirinhas. Separam estes dois domínios, os arcos tectônicos de Ferrer-Rosário-Bacaba e Urbano Santos (Fig.2). Estes arcos permitiram a erosão do pacote sedimentar superior da Bacia do Parnaíba e influenciaram fortemente na evolução das bacias de margem continental (CPRM, 2000).

A Bacia do Parnaíba ocupa aproximadamente a metade e a parte centro-sul da Província Parnaíba (Província Sedimentar do Meio-norte). Ocupa grandes áreas dos estados do Maranhão e Piauí, e pequenas faixas do leste do Pará, oeste do Ceará, e norte de Tocantins e Goiás. Ela teria sido formada por processos de *underplating* e estruturas grabeniformes posteriores, seguidos de uma subsidência termal. São definidas duas feições tectônicas de primeira ordem na bacia: um alto tectônico de direção NE-SW que se estende desde o Alto Urbano Santos e o Gráben de Itapecuru-Mirim (CPRM, 2000). A Bacia, além de ser constituída de sedimentos do Paleozóico, é composta também por coberturas mesozóicas e cenozóicas.

A formação dos arcos que separam os diferentes domínios se deu a partir dos eventos de abertura do atlântico. Estes arcos são altos do embasamento cristalino e tiveram muita influência na evolução tectônica sedimentar da margem continental, formando as bacias do tipo *rift*, que são as Bacias de Ilha Nova e Barreirinhas (CPRM, 2000). Esta última é mais representativa na área.

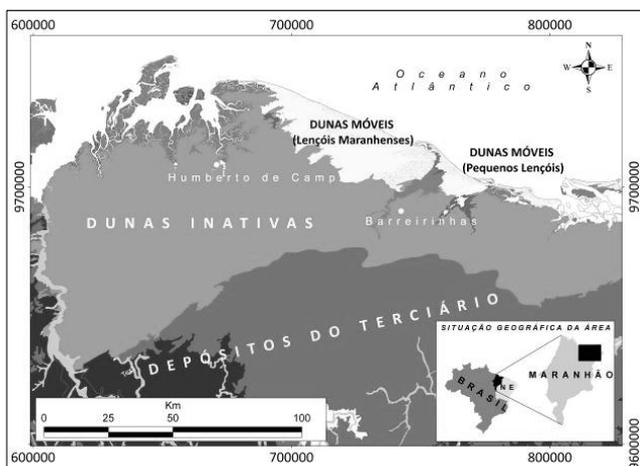


Fig. 1 – Localização da área estudada. Extraído de imagens LANDSAT 5 ETM+ RGB 321, 432 e 543.

A forma da Bacia de Ilha Nova é de um Gráben assimétrico, de direção ONO-ESE, e está encaixada entre as plataformas de Ilha de Santana e Sobradinho. É separada da Bacia de São Luís pelo Alto de Curupu, prolongando-se a oeste para a Bacia de Barreirinhas. Mostra um trende de fálhas normais de direção noroeste, com rejeitos decrescentes em direção à borda sul do Gráben. A bacia abriga sedimentos de idade paleozóica, mesozóica (basicamente dois ciclos

deposicionais, no qual o último representa as variações eustáticas do nível do mar) e cenozóicas (Terciário) (ARANHA et al., 1990).

A Bacia de Barreirinhas é constituída de três megassequências (pré-rifte, sinrifte e pós-rifte) divididas entre rochas ígneas e sedimentares de idade paleozóica, sedimentos clásticos de idade cretácea, clásticos e carbonatos de alta e baixa energia (albiano-cenomanianos), carbonatos de alta energia do Mioceno-Recente e, por último, a cobertura de clásticos plio-pleistocenos da Formação Barreiras (BIZZI et al., 2004). A porção terra da Bacia é constituída de falhas normais listricas de direção WNE e NWE, definindo um sistema distensivo cortado por falhas transcorrentes mais novas de direção NE-SW (SOARES et al., 2008).

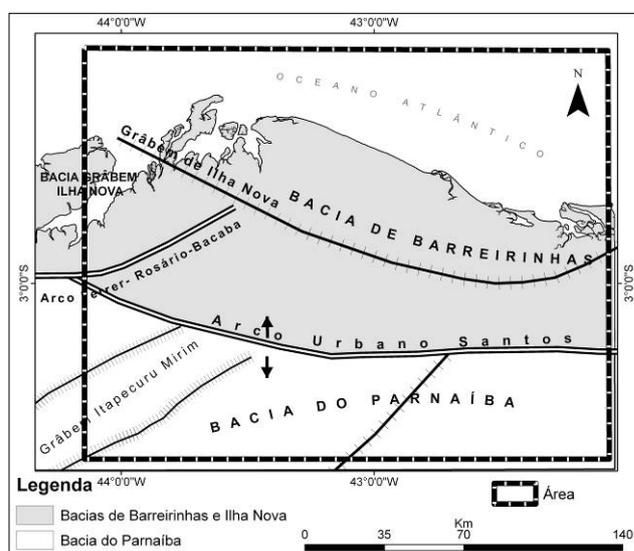


Fig. 2 – Mapa da compartimentação tectônica da área. (Modificado de CPRM, 2000).

3.2 SÍNTESE DA HIDROGEOMORFOLOGIA

Os eventos de tectônica sedimentar ocorridos no plio-pleistoceno; que ocasionaram o soerguimento da faixa litorânea e consequentemente a modelagem da rede de drenagem e erosão da Formação Barreiras, bem como o aprofundamento dos vales (AB'SABER, 1960), e mais recentemente, no período Quaternário, os eventos de transgressão marinha e o aporte de sedimento para a formação de dunas; são os responsáveis pela formação do atual cenário da zona costeira da região. Logo, a geomorfologia da área é desenhada por dunas dos tipos móveis e fixas; as primeiras são mais conhecidas pelos Lençóis Maranhenses, um oásis de beleza rara, repleto de lagoas límpidas que se movem juntamente com as dunas que alcançam distâncias de até 25 km da linha de costa; as segundas, localizadas mais no interior, são compostas por dunas inativas (fixadas por vegetação), um campo de dunas que alcançam distâncias de até 160 km da linha de costa. Mais a leste da área se encontram os

campos de dunas móveis dos Pequenos Lençóis. Compõem também, no sudeste da área os depósitos do período Terciário.

A região estudada apresenta uma hidrografia marcada por vários rios que drenam e cortam os depósitos sedimentares ali existentes, formando, em alguns casos, profundos vales. Os rios Munim, Preguiças, Piri, Buriti, Palmira, Marciano, Alegre Grande, são alguns dos rios que estão inclusos na área. Destaca-se, também, o rio Parnaíba, mais a sudeste da área, que separa os estados do Maranhão e Piauí.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento do trabalho constou das seguintes etapas:

4.1 Tratamento e análise dos dados da SRTM

Após a aquisição dos MDEs da missão SRTM, cenas 219/062 e 220/062, ambas do ano de 2000, disponíveis em formato Geotiff na rede mundial de computadores (*internet*) para *download* no site da GLCF (2009), fizeram-se o tratamento e análise dos dados constados nas imagens, baseado na metodologia abordada por VALERIANO (2004).

O software ENVI (*Environment for Visualizing Images* in (RESEARCH SYSTEMS INC., 2002) foi

utilizado para fazer a correção de falhas nas imagens. Estabeleceu-se um intervalo de -99999999... até 0 para valores inválidos. Em seguida, no mesmo aplicativo, foi feita a exportação dos dados (x, y e z) das imagens corrigidas em arquivo ASCII. A interpolação total dos dados foi feita no aplicativo *Surfer* (GOLDEN SOFTWARE, 1995) e foram interpolados por krigagem de modo automático. Os produtos extraídos do novo MDE, após a krigagem, para a avaliação dos dados, foram os processos de visualização (relevo sombreado e perspectiva) em diferentes escalas (VALERIANO & ABDON, 2007). A partir destes produtos foi possível gerar os modelos para os estudos da geomorfologia e dos padrões de drenagem, que nos quais são: tipos de relevos existentes por perfis interpretativos do terreno com dados de cotas altimétricas, lineamentos estruturais e os padrões da rede de drenagem em si. A sequência de tratamento e análise dos dados das imagens SRTM é mostrada na Fig. 3.

O modelo de lineamento parte da orientação preferencial dos elementos estruturais do terreno (cristas alinhadas, fundos de vale, corredores de drenagem, entre outros) moldados pelos eventos tectônicos, tendo como base a simulação da direção e ângulo de incidência da iluminação de azimutes, que para este trabalho foi de 315°Az/45°, gerando o produto de sombreado. Este possibilitou, também, o levantamento dos padrões da rede de drenagem.

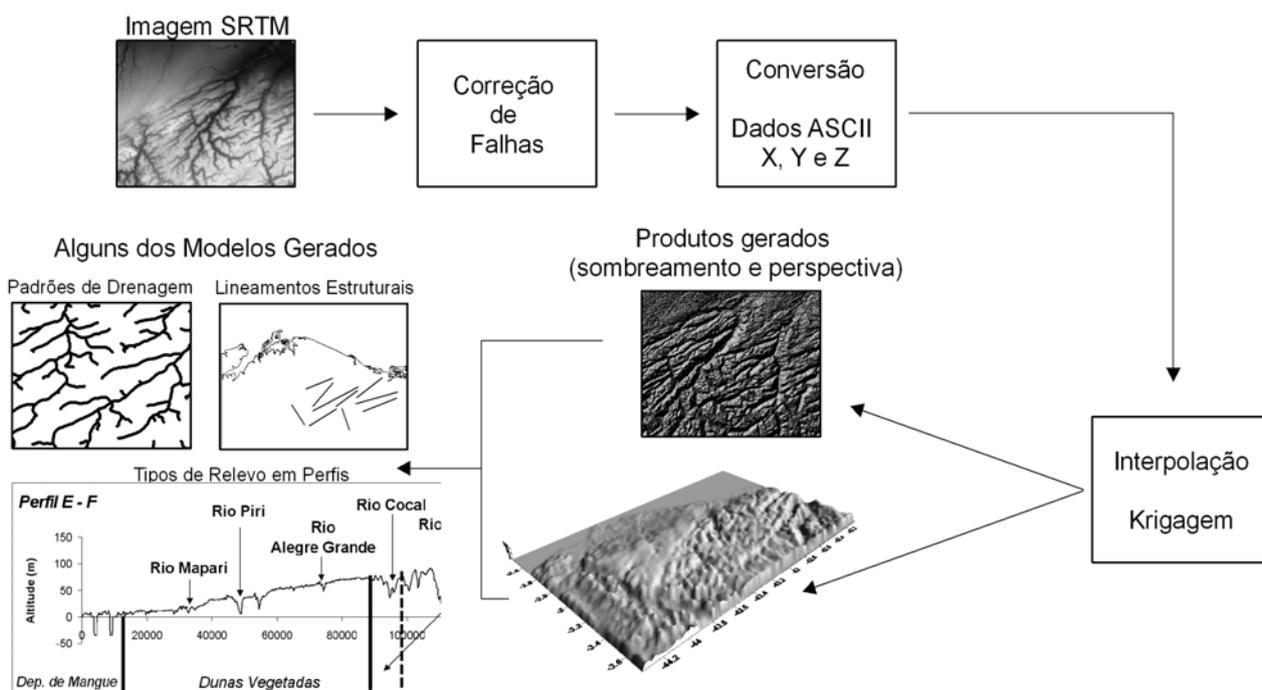


Fig. 3 – Sequência de tratamento e análise dos dados das imagens SRTM.

4.2 Amostras de campo

A coleta de amostras em campo foi feita usando trado manual. Foram coletadas 48 amostras distribuídas entre os vários tipos de dunas e outros depósitos sedimentares, em profundidades de 1 a 2 metros. Os pontos de coleta foram escolhidos estrategicamente depois da preparação de um mapa base (Fig. 4). E para auxiliar na amostragem, usou-se um *GPSmap 76 Garmin* à precisões variando de 8 a 11 metros. Dados altimétricos foram coletado com este *GPS*, porém não foram considerados para o estudo de relevo, uma vez que a precisão não é representativa.

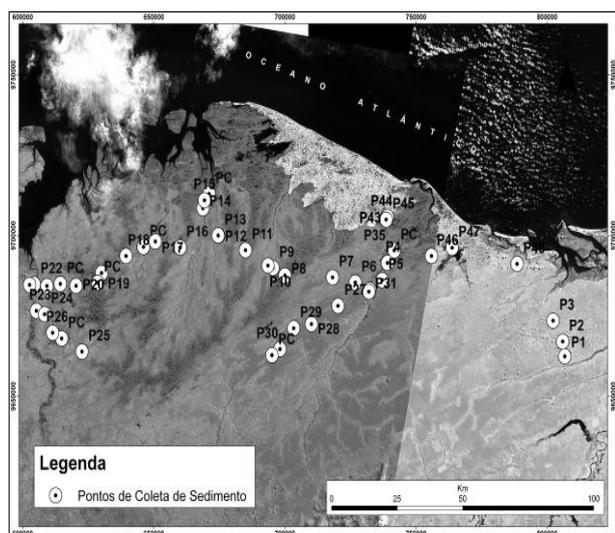


Fig. 4 – Pontos de coleta de sedimentos.

4.3 Análises em laboratório

No Laboratório de Oceanografia Geológica do Instituto de Ciências do Mar (LABOMAR) da Universidade Federal do Ceará (UFC) foram realizadas as análises sedimentológicas (granulometria, teores de CaCO_3 e matéria orgânica e estudo morfológico dos grãos) das amostras coletadas em campo.

As amostras de sedimento, chegando ao laboratório, passaram pelos procedimentos de análise granulométrica. Foram inicialmente acondicionadas a 60°C em estufa para a secagem. Em seguida foi feito o quarteamento e fracionamento em 100,0g de cada amostra. Processado, então segue para o mecanismo de peneiramento úmido, o qual separa a fração lama da arenosa (limites das classes = 0,062mm de diâmetro). Por conseguinte as amostras passam pelo peneiramento mecânico, etapa de separação das classes arenosas e cascalhos, ou seja, frações de 0,062mm até 2,00mm diamétricas para as classes de areia e frações com diâmetro superior a 2,00mm para as definições de cascalho.

Os dados das análises granulométricas (valores de ϕ para as frações de cada amostra) foram submetidos ao programa de análise granulométrica ANASED 4.3i, desenvolvido pelo Laboratório de

Geologia Marinha e Aplicada (LGMA) da UFC.

Os parâmetros granulométricos são calculados com base em dados gráficos obtidos das curvas acumulativas da distribuição e frequência elaboradas na escala (ϕ), caracterizando a curva em relação a sua tendência central e graus de dispersão, assimetria e agudez dos picos. Estes valores, segundo a classificação de FOLK & WARD (1957), avaliam a descrição dos sedimentos em termos de suas várias propriedades, incluindo a média e a mediana, obtendo-se, ainda, as medidas de tendência central, os graus de seleção, assimetria e curtose.

A interpretação dos parâmetros de cada amostra permite classificar os sedimentos e tentar correlacioná-los de modo a inferir aspectos sobre a sua gênese, transporte e modo de deposição.

A análise dos teores de CaCO_3 foi feita a partir do método do *Calcímetro de Bernard* modificado, em que as amostras são atacadas com ácido clorídrico (HCL) diluído à 10% em um sistema de vasos comunicantes. O sedimento é inicialmente seco à 60°C em estufa, fracionado 0,5g e acondicionado num *erlenmeyer* adaptado a um tudo de ensaio, ligado a um tubo de provetas preenchidas por água. O gás CO_2 desprendido pela reação $\text{HCL} + (\text{amostra} + \text{CaCO}_3)$ faz com que a coluna d'água se desloque ($d\Delta$) dentro da proveta (Fig. 5). É admitido um valor máximo de deslocamento para uma amostra de 99% de CaCO_3 .

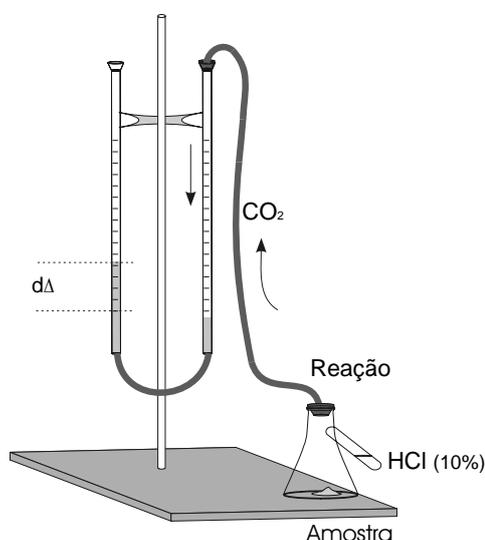


Fig. 5 – Esquema de ensaio para a obtenção dos teores de CaCO_3 . *Calcímetro de Bernard* (modificado).

Os teores de matéria orgânica total foram obtidos pelo método gravimétrico, com combustão de 2g do sedimento previamente seco em forno mufla (em duplicata) à 450°C por 24 horas (LORING & RANTALA, 1992). O teor de matéria orgânica [MO] analisado foi obtido pela seguinte expressão:

$$[\text{MO}] = (m_c \times 100) / m_s \quad (1)$$

onde m_c = massa perdida após calcinação e m_s = massa do sedimento.

A forma e arredondamento dos grãos de areia e

dos seixos têm sido usados há muito tempo para decifrar a história dos depósitos sedimentares, dos quais estes fazem parte. As formas típicas dos seixos que passam por abrasão em ambientes eólicos são bem conhecidas. Já os efeitos causados por outros ambientes, nem são assim tão esclarecidos, mantendo-se muitas controvérsias.

O levantamento morfoscópico se deu a partir da observação dos graus de arredondamento e esfericidade dos grãos de sedimento RUSSEL & TAYLOR, 1937 (*In* SUGUIO, 1973).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme as análises e tratamento dos dados da missão SRTM e sedimentológicos, feitos neste trabalho, os resultados estão divididos entre os estudos da geomorfologia e dos padrões de drenagem.

5.1 Geomorfologia da área

A área estuda apresenta uma geomorfologia definida por diferentes depósitos sedimentares que se destacam, entre si, de acordo com as peculiaridades de cada um. Sendo assim, esta parte do estudo ressalta os tipos de relevos existentes e lineamentos estruturais desenvolvidos possivelmente pelos processos neotectônicos.

5.1.1 Compartimentação de relevo

Após o tratamento dos dados da missão SRTM e geração dos produtos para a interpretação do comportamento geomorfológico da região foi possível realizar a divisão de três compartimentos distintos de relevos, que neste trabalho chamamos simplesmente de relevos A, B e C (Fig. 8). Claro que essa denominação não tem haver com nenhuma classificação, foi feita somente para distinguir os três tipos nos modelos gerados.

Uma característica marcante que distingue estes três tipos de terrenos, que pode ser vista na figura 8, é a forma como eles se apresentam em um perfil vertical de distância *vs.* altitude. Cada um possui uma topografia produto dos eventos mais recentes do tectonismo sedimentar, ou neotectônica. O relevo A, por exemplo, é formado por dunas móveis dos Lençóis Maranhenses dos tipos barcana e barcanóides (Fig. 6) e os Pequenos Lençóis, as dunas fixadas por vegetação, também formam este relevo e são do tipo parabólico (feição vista somente nas imagens de satélite), pois em campo é percebido apenas o relevo ondular se destacando no corte de estrada (Fig. 7). Estas são macro-dunas parabólicas características de um grande evento de transporte eólico ocorrido no período Quaternário. Este relevo não apresenta altitude superior a 90m e sua declividade está em torno de $0,05^\circ$ para a porção que se dirige à linha de costa e $4,76^\circ$ para a porção que está voltada para o interior do continente, esta diferença está relacionado ao fato de haver uma

grande queda na topografia, localizada próximo ao Rio Buriti (Perfil A – B, Fig. 8), como se representasse uma grande duna com sua face de barlavento (menos inclinada) e sotavento (mais inclinada). A figura 9 mostra a queda topográfica para sul na “face” de sotavento destas dunas, próximo ao Rio Buriti na estadual MA-110, logo após esta queda encontram-se os depósitos do relevo C.



Fig. 6 – Cadeia de barcanóides. Dunas móveis dos Lençóis Maranhenses. (coordenadas: E= 739035 / S= 9705922).



Fig. 7 – Dunas vegetadas em corte de estrada. As linhas representam as parte mais alta da duna. (coordenadas: E= 802137 / S= 9673359).

Os dados sedimentológicos para a granulometria revelam que estes depósitos são compostos de areia fina quartzosa, típicas de depósitos eólicos, e grau de seleção moderadamente selecionada, para as dunas que estão próximas aos vales de rios, e bem selecionadas para as dunas em área não banhadas por estes corpos d’água. Os teores de CaCO_3 para as dunas móveis variam de 1,26 até 6,32% com média de 3,85%, e de 1,89 a 7,83% com média de 4,52% para as dunas fixadas por vegetação. Estes dados revelam uma forte influência de sedimentação marinha ocorrida no Quaternário, com a deposição de material favorável para a formação destes depósitos. A matéria orgânica é mais concentrada nas dunas fixadas por vegetação, estas apresentam teor médio de 0,68%, ao passo que as dunas móveis comportam média de 0,25%.

Os dois tipos de dunas possuem grãos sub-arredondados, porém, em alguns corpos de dunas fixadas por vegetação os grãos são bem mais trabalhados pela ação eólica, uma vez que estes depósitos estão longe da área fonte.

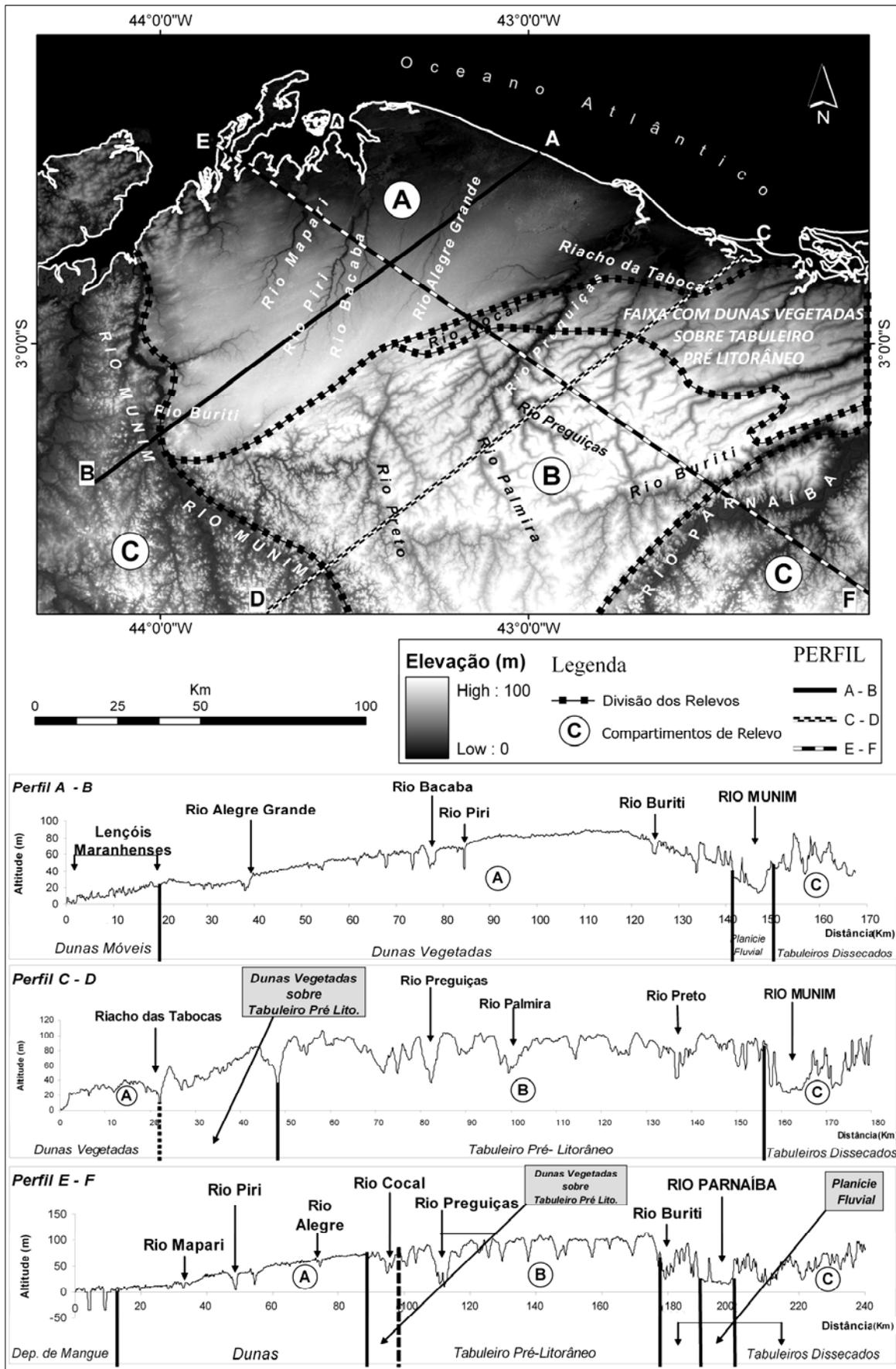


Fig. 8 – Compartimentação de relevo em perfis de altitude vc. distância.



Fig. 9 – Queda na topografia vista para o sul. Notar a MA-110 bem na queda do relevo e mais ao fundo os depósitos do relevo tipo C. (coordenadas: E= 604395/ S= 9684832).

O Perfil C – D da figura 8 destaca o relevo B. São os Tabuleiros Pré-litorâneos da Formação Barreiras, estes depósitos foram formados no período Terciário por ação fluvial, sendo modelados à medida que os rios seguiam seu curso natural de direção ao mar. Mostram um comportamento mais tabular devido à ação de processos erosivos mais recentes. Possuem uma vegetação mais desenvolvida que as das dunas fixas (Fig. 10).

Os valores de altitude para este terreno estão em torno de 100m e a declividade não ultrapassa os 0,08°, reforçando o fato da modelagem tabular deste relevo.

São depósitos formados por areia muito fina com níveis de cascalho ferruginoso (laterita) muito pobremente selecionada. Os teores de CaCO_3 estão em torno de 4,57%. A matéria orgânica concentra 2,02%.



Fig. 10 – Estrada carroçável sobre relevo da Formação Barreiras. (coordenadas: E= 720074/ S= 9677947).

Uma faixa de dunas vegetadas se localiza sobre os tabuleiros pré-litorâneos. São paleodunas de cor avermelhada típicas destes tabuleiros, sem forma definida, compostas de areia fina moderadamente selecionada, com grãos sub-angulosas a sub-arredondadas e teor de 6% de CaCO_3 (intervenção marinha) (Fig. 11).

O relevo C é aqui denominado de tabuleiros dissecados (ver Fig. 8, perfil E – F). No perfil é notado o quanto este relevo foi ou ainda é moldado por

processos fluviais a partir dos cursos de drenagem dos rios como o Parnaíba (Fig. 12). Possui altitudes que não passam dos 90m e a declividade é baixa, em torno dos 0,06°, ou seja, acompanha o mesmo comportamento dos tabuleiros pré-litorâneos anteriormente citados.



Fig. 11 – Paleoduna sem forma definida sobre tabuleiros pré-litorâneos. Notar linha realçando a forma tabular. (coordenadas: E= 788508/ S= 9691421).



Fig. 12 – Rio Parnaíba na divisa do estado do Maranhão com Piauí. Notar seta mostrando o relevo dissecado de tabuleiro. (coordenadas: E= 853662/ S= 9668694).

Os gráficos dos perfis de altitudes vs. distância mostram a diferença de relevo bastante notável entre os três compartimentos de terrenos mostrados. E levando em consideração mais dois produtos extraídos da missão SRTM, que nos quais são os MDEs de sombreamento e de perspectiva (Figuras 13 e 14), essa diferença pode ser realçada. No contexto destes produtos podem ser citados os lineamentos estruturais advindos possivelmente de eventos tectônicos mais recentes, ou neotectônica.

5.1.2 Lineamentos Estruturais

A configuração atual da geomorfologia costeira, pelo menos na América do Sul, é produto de uma sequência de eventos tectônicos que aconteceram no passado. SOARES et al. (2008) relatam que a evolução do Oceano Atlântico equatorial é dividida em três episódios de caráter distensivo e que aconteceram entre o mesotriássico e o neocretáceo, formando várias bacias sedimentares.

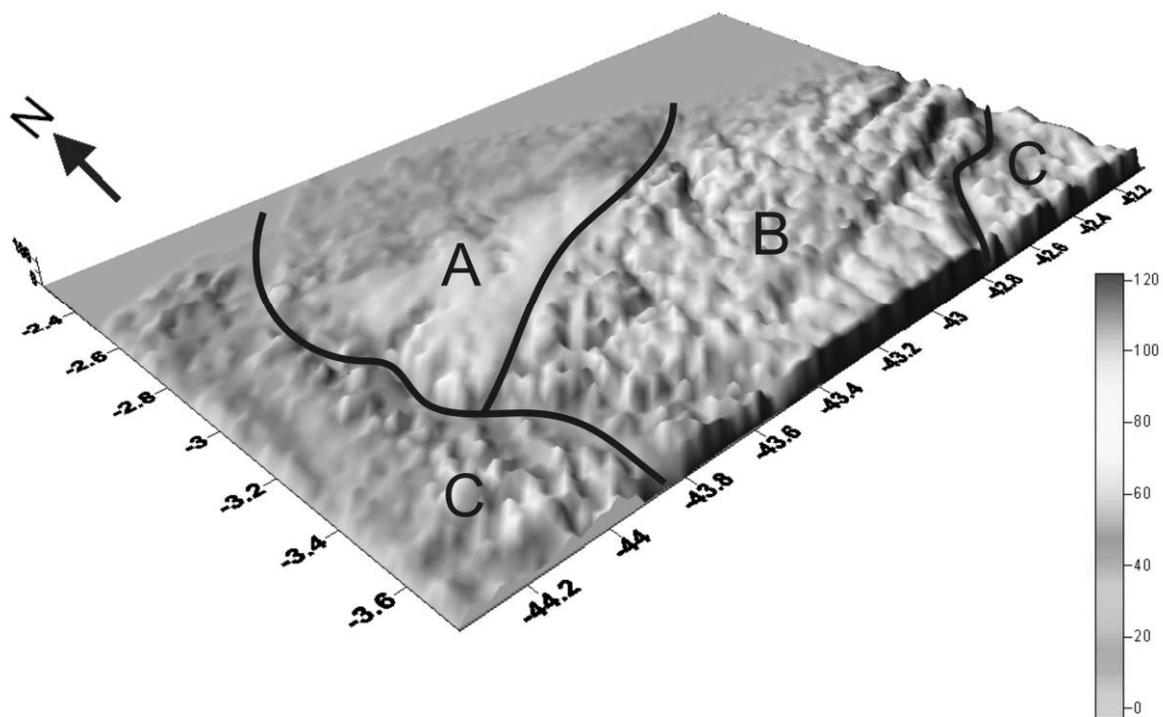


Fig. 13 – Produto da SRTM de Modelo Digital de Terreno (MDT) em perspectiva da área estudada.

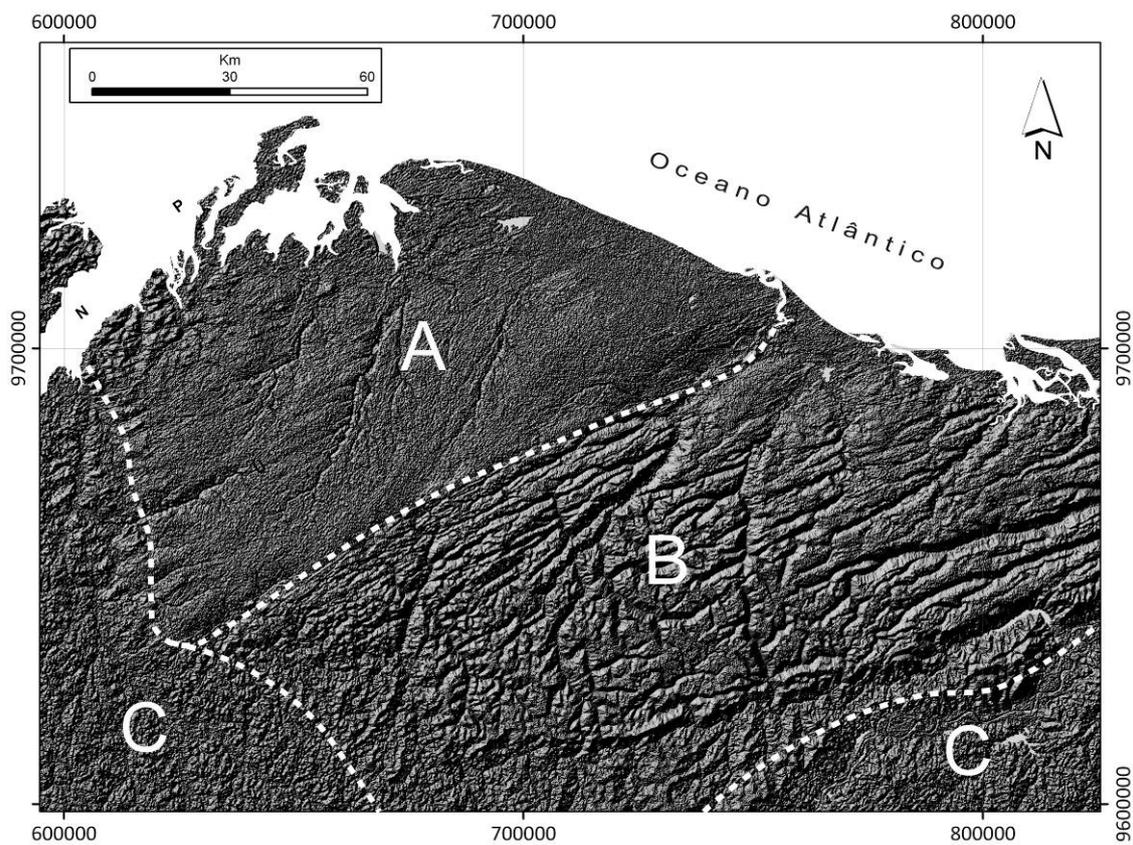


Fig. 14 – Produto SRTM em sombra da área estudada.

Entre estas bacias, está a do Barreirinhas. Esta teria se formado no último evento distensivo a partir da instalação de sistemas de falhas normais de direções E-W e NW-SE, com mergulhos para N. Os autores ressaltam que a separação dos continentes sul-americano e africano foi responsável pelo aparecimento de falhas transcorrentes de direção NE-SW em todo o conjunto de riftes na região meio-norte do Brasil. Seria esse, então, o evento causador da deformação de vários níveis crustais das bacias sedimentares, inclusive o nível crustal raso que, conseqüentemente, modelou o fluxo e curso de alguns dos principais rios da região. A figura 15 mostra o sistema de lineamentos estruturais de direções NW-SE e NE-SW no relevo B gerados a partir do produto de sombreamento das imagens SRTM.

AB'SABER (1960) resalta que a forma atual da zona costeira do estado do Maranhão é produto da evolução do Golfão Maranhense, que teve início no final do Terciário (Plioceno), ocorrendo o soerguimento da faixa litorânea, provocando a sobreposição da rede de drenagem e conseqüentemente a erosão da Formação Barreiras. No evento seguinte, final do Pleistoceno, houve a retomada da erosão e aprofundamento dos vales e uma moderna transgressão marinha.

É notável o quanto os eventos do tectonismo afetaram o nível crustal raso do relevo B. Porém, os lineamentos, como evidências estruturais, podem está

presentes nos outros relevos também. Mas para que isso se torne uma afirmação mais precisa seria adequado fazer um estudo mais detalhado destes outros terrenos usando técnicas que adquirissem informações de níveis crustais mais profundo, pois as imagens da missão SRTM nos limitam a uma pesquisa em níveis mais superficiais.

5.2 Sistemas de drenagem

Esta parte do estudo apresenta os padrões de drenagem que parecem ser concordantes com a geomorfologia e o sistema de lineamentos, produtos dos eventos tectônicos.

5.2.1 Padrões de drenagem

Um padrão de drenagem é o esboço formado pelo aglomerado de caminhos de escoamento fluvial numa determinada área, sem que sejam levados em consideração os cursos d'água permanentes. As características destes padrões os distinguem espontaneamente um dos outros, e são regidas pelo controle estrutural da região (HOWARD, 1967). Logo certos cursos d'água seguem um padrão de drenagem de acordo com os fluxos preferenciais moldados pelos eventos da tectônica que, por sua vez, geraram o desenho estrutural da área banhada pelos rios.

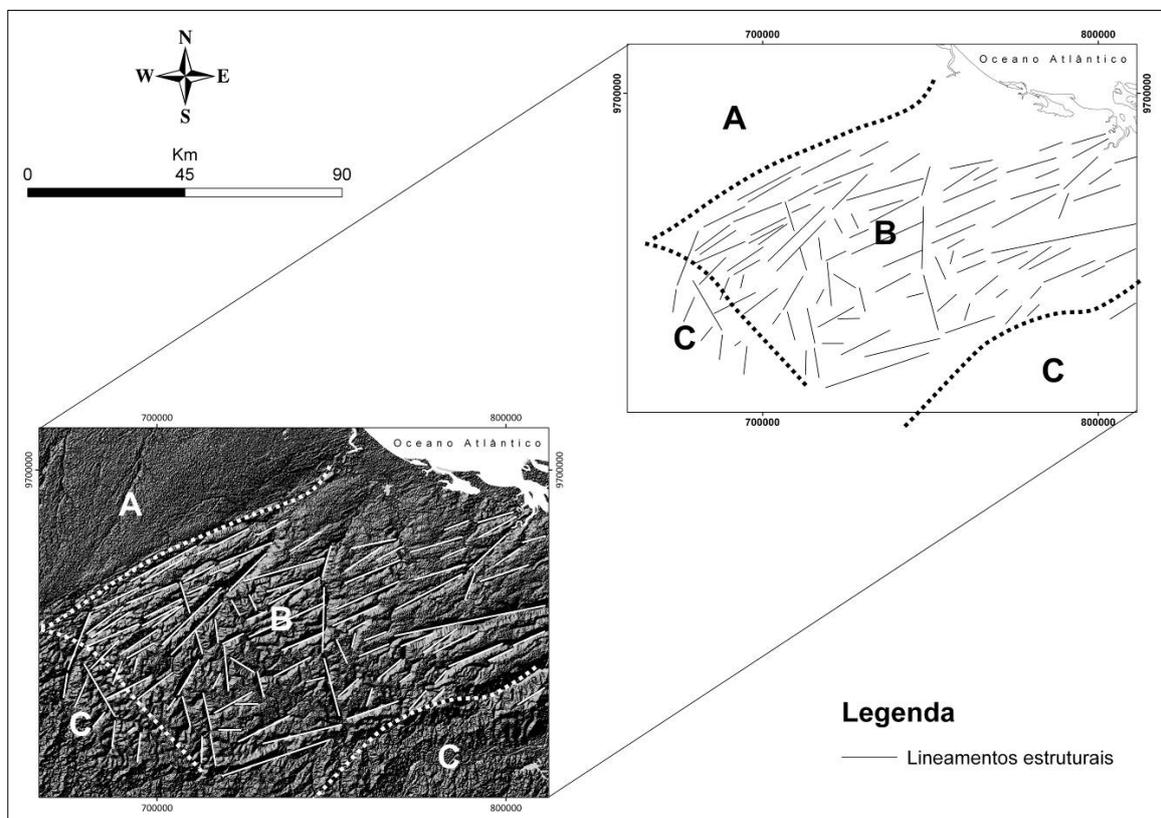


Fig. 15 – Sistema de lineamentos estruturais.

A extração automatizada de padrões de drenagem a partir de dados dos sensores remotos como os da missão SRTM, parece ser uma rotina que traz resultados satisfatórios para uma boa interpretação a respeito do comportamento hidrogeomorfológico de uma região. Isso é visto em um estudo feito nas bacias hidrográficas do nordeste do Pará e noroeste do Maranhão de MARTINS et al. (2007), já citado neste trabalho.

Outros recursos como o uso de aerofotografias também podem fornecer informações necessárias para uma boa interpretação deste assunto, como é mostrado no trabalho feito por DEMATTÉ & DEMÉTRIO (1995). Estes autores, utilizando fotografias aéreas na escala 1:25.000, caracterizaram os padrões de drenagem levando em consideração as ordens de ramificação das bacias hidrográficas.

Os padrões de drenagem básicos são classificados, segundo (HOWARD, 1967), como: dendrítico (lembra galhos de árvores em expansão, com tributários a ângulos variados), paralelo (caracterizado por ângulos de confluência bem agudos entre segmentos subparalelos entre si), treliça (caracterizado por rios menores, ou tributários secundários, com o mesmo comprimento em ambos os lados de longos e paralelos rios subsequentes, ou tributários primários), retangular (caracterizado por inflexões ortogonais tanto no rio principal como nos tributários, sendo mais irregular que o padrão de treliça), radial (também chamado de centrífugo, é caracterizado por rios que se irradiam de uma área central, como raios de uma roda), anelar (em forma de anel), multibacia (termo descritivo para todos os padrões de depressões múltiplas cuja exata origem é desconhecida) e contorcido (característico de terrenos com rochas metamórficas, apresentando um grosso bandamento de geometria contorcida).

Após a extração da rede de drenagem das imagens da missão SRTM foi possível notar que a área apresenta pelo menos quatro padrões de drenagem, nos quais são: dendrítico, paralelo, retangular e contorcido.

O padrão de drenagem do tipo dendrítico está situado nos relevos C e B. As formas destes relevos de tabuleiros pré-litorâneos, para o B, e tabuleiros dissecados, para o C, contribuem para que a distribuição da drenagem siga este padrão. O Rio Munim, na porção SW da área (figuras 16 e 17), é um dos rios que banham o relevo C. Já no relevo B este padrão de drenagem está moldado pelos rios Carrapato e da Fome, entre outros.

O padrão paralelo está presente nos relevos A e B associados à morfologia de dunas. O padrão retangular aparece somente no relevo B e tem como corpos d'água que banham esta parte, o Rio Cocal (figuras 16 e 18), o Riacho das Pacas e o Rio Guaribas, entre outros. Os padrões paralelo e retangular são marcados por rios retilíneos, fato associado ao forte controle estrutural dos lineamentos WNE e NWE e NE-SW presentes nos terrenos. Esta característica mostra a alta influência da tectônica na morfologia da

rede de drenagem.

O padrão de drenagem contorcido se encontra no relevo B, este comportamento pode estar associado à transição deste padrão de drenagem para o dendrítico do relevo C, pelo menos nesta porção da área.

Apenas o relevo B, de tabuleiros pré-litorâneos, possui os quatro padrões de drenagem. Esta complexidade pode estar ligada ao fato de que este terreno tenha sofrido mais com os eventos tectônicos do que os demais, favorecendo a formação de um complexo sistema de drenagem.

6. CONCLUSÕES

A aplicação dos MDEs extraídos dos produtos das imagens de radar da missão SRTM nos estudos em escala regional da geomorfologia e da hidrografia de uma determinada região é de alta relevância. E para este trabalho forneceram as informações necessárias para que fosse possível definir o comportamento do relevo e os padrões de drenagem nos terrenos estudados.

O levantamento sedimentológico contribuiu bastante para a caracterização de alguns depósitos sedimentares da área, e para que fossem tiradas algumas conclusões a respeito dos processos da gênese e evolução destes depósitos.

A geomorfologia é diretamente concordante com a drenagem, se levado em consideração os elementos estruturais formados por eventos tectônicos mais recentes (neotectônica). Os vários rios que cortam a área seguem seus cursos preferenciais, perfazendo padrões de drenagem de acordo com as evidências estruturais (lineamentos) do tectonismo e com os tipos de depósitos sedimentares associados ao relevo.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico-CNPq pelo apoio financeiro com a bolsa de mestrado (Processo 136055/2008-7) concedida ao primeiro autor. E ao Instituto de Ciências do Mar-LABOMAR pela infraestrutura fornecida para a realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AB'SABER, A. N. **Contribuição a Geomorfologia do Estado do Maranhão. Notícia Geomorfologia.** Campinas: Departamento de Geografia da Unicamp, 3 (5):35-45, abr.1960.
- ANDRADES FILHO, C. O.; GUASSELLI, L. A.; SUERTEGARAY, D. M. A.. **Identificações de deformações neotectônicas, através de imagem SRTM, e sua relação com a gênese dos areais - Sudoeste do Rio Grande do Sul.** Revista Geográfica Acadêmica, v. 2, p. 96-110, 2008.

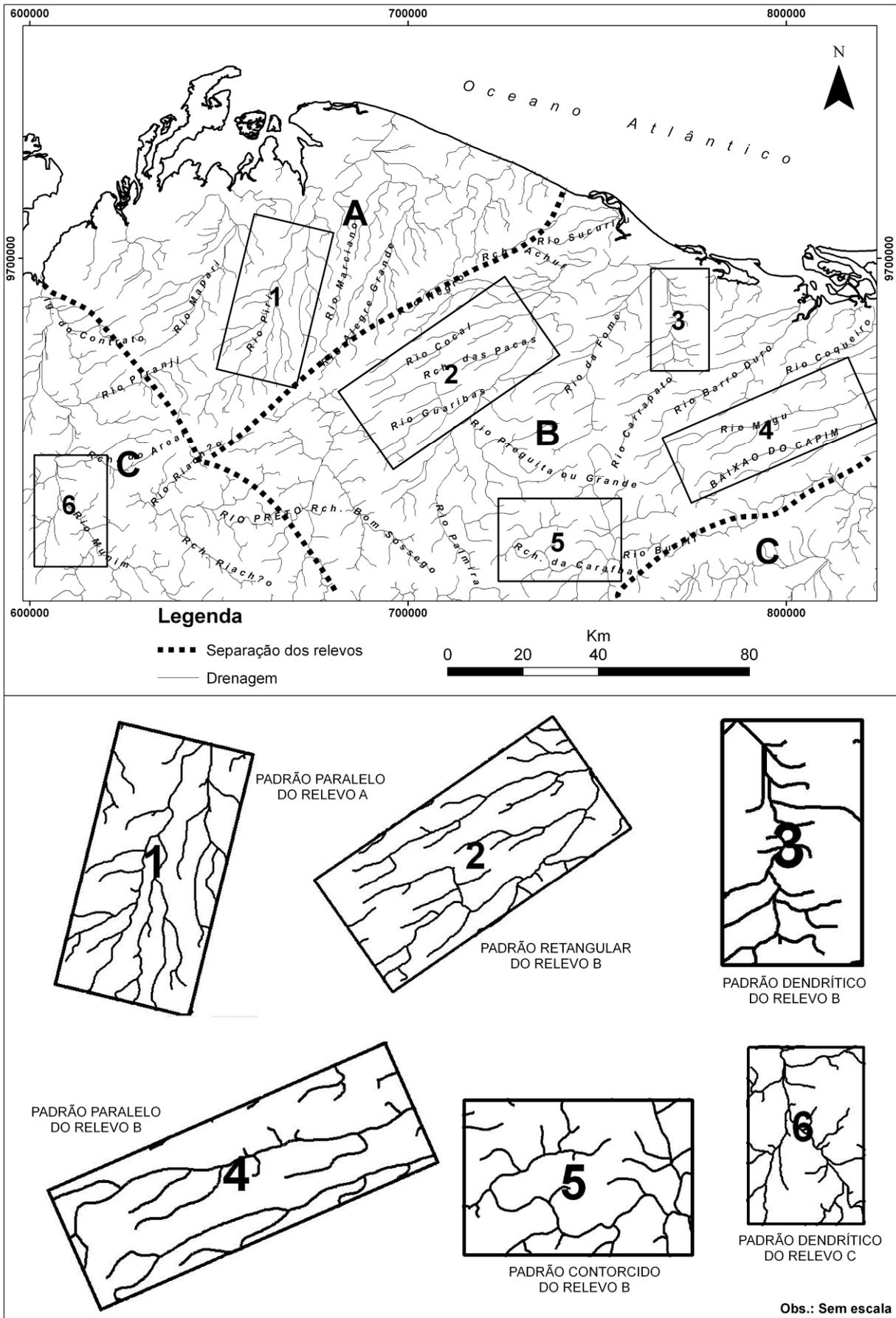


Fig. 16 – Padrões de drenagem encontrados na área.



Fig. 17 – Rio Munim. (coordenadas: E= 605360/ S= 9684900)



Fig. 18 – Rio Cocal. (coordenadas: E= 703324/ S= 9671185)

ARANHA, L.G.F.; LIMA, H.P.; SOUZA, J.M.P.; MAKINO, R.K. **Origem e evolução das bacias de Bragança-Viseu, São Luís e Ilha Nova.** In: RAJA GABAGLIA, G.P.; MILANI, E.J. (coordenadores) **Origem e evolução de bacias sedimentares.** PETROBRAS: Rio de Janeiro. 1990.

BIZZI, L. A.; SCHOBENHAUS, C.; VIDOTTI, R. M.; GONCALVES, J. H. **Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil.** 1. ed. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 2004. v. 01. 674 p.
CASSETI, V. **Elementos de Geomorfologia.** São Paulo, Contexto, 137 p, 2001.

CPRM. **Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. São Luís SW/NW, Folhas SA.23-V e SA.23-Y. Estados do Pará e Maranhão. Escala 1:500.000.** organizado por Herbert Georges de Almeida. – Brasília: CPRM, 2000.

CUNHA, S. B. **Geomorfologia Fluvial.** In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (orgs.) **Geomorfologia uma Base de Atualização e Conceitos.** 4. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, p. 211-252, 2001.

DEMATTÊ, J. A. M. & DEMÉTRIO, V. A. **Fotointerpretação de padrões de drenagem de bacias hidrográficas na caracterização de solos desenvolvidos de rochas eruptivas básicas no Estado**

- do **Paraná**. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v. 52, n. 3, p. 569-577, 1995.
- FOLK, R. L. & WARD, W. C.. **Brazos River Bar: A Study in the Significance of Grain Size Parameters**. *Journal of Sedimentary Petrology*, Tulsa, Okla, 27(1):3-26. 1957.
- FRANÇA, G. & DEMATTÊ, J. A. M.. **Parâmetros da drenagem determinados em fotografias aéreas e sua aplicação na discriminação de solos**. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v. 47, n. 2, p. 541-555, 1990.
- FRANÇA, G. & DEMATTÊ, J. A. M.. **Levantamento de solos e interpretação fotográfica dos padrões de drenagem desenvolvidos em solos originados do Arenito Bauru**. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v. 5, n. 1, p. 77-86, 1993.
- GLCF. Global Land Cover Facility. **Obtenção das imagens SRTM**. Disponível em: <http://glcfapp.umiacs.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>. Acesso: Março de 2009.
- GOLDEN SOFTWARE INC.. **Surfer Version 6.01-Surface Mapping System**. Golden: Golden Software, Inc., 1995.
- GONÇALVES, R. A.; LEHUGEUR, L. G. O.; CASTRO, J. W. A.; PEDROTO, A. E. S.. **Classificação das feições eólicas dos Lençóis Maranhenses- Estado do Maranhão, Brasil**. *Mercator*, Fortaleza, v. 2, p. 99-112, 2003.
- HOWARD, A. D. **Drainage analysis in geologic interpretation: a summation**. In: AMERICAN ASSOCIATION OF PETROLEUM GEOLOGIE BULLETIM, 51(11), 1967.
- JPL. **Jet Propulsion Laboratory**. Disponível em <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/mission.htm> da NASA (National Aeronautics and Space Administration). Acesso: maio de 2009.
- KOHLER, H. C. **A escala na análise geomorfológica (reedição)**. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, Rio de Janeiro, v. 3, n. 1, p. 21-31, 2002.
- LORING, D.H. & RANTALA, R.T.T., **Manual for the geochemical analyses of marine sediments and suspended particulate matter**. *Earth-Science Reviews*, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam: 32, p. 235-283, 1992.
- MARTINS, E. S. F.; SOUZA FILHO, P. W. M. E.; COSTA, F. R. C.; ALVES, P. J. O. **Extração automatizada e caracterização da rede de drenagem e das bacias hidrográficas do nordeste do Pará ao noroeste do Maranhão a partir de imagens SRTM**. In: XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2007, Florianópolis. *Anais on-line do XIII SBSR*, p. 6827-6834, 2007.
- RESEARCH SYSTEMS INC. **Environment for Visualizing Images – ENVI Version 3.6**. Colorado: Boulder, 126p, 2002.
- RIAZANOFF, S.; CERVELLE, B.; CHOROWICZ, J.. **Ridge and valley line extraction from digital images**. *International Journal of Remote Sensing*, v. 9, n. 9, p. 1175-1183, Jun. 1988.
- SOARES JUNIOR, A. V.; COSTA, J. B. S.; HASUI, Y. **Evolução da margem atlântica equatorial do Brasil: três fases distensivas**. *Geociências* (São Paulo), v. 27, p. 427-437, 2008.
- SUGUIO, K. **Introdução à sedimentologia**. São Paulo, Edgard Blüncher, Ed. da Universidade de São Paulo, 317 p, 1973.
- SUGUIO, K. & MARTIN, L.. **The role of neotectonics in the evolution of the Brazilian coast**. *Geonomos*, Belo Horizonte, MG, v. 4, p. 45-53, 1996.
- SUGUIO, K. & SALLUN, A. E. M.. **Geologia do Quaternário e Geologia Ambiental**. In: Mantesso Neto, V.; Bartorelli, A.; Carneiro, C.D.R.; Brito Neves, B.B. (Org.). *Geologia do continente Sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. 1 ed. São Paulo: Beca, v. 1, p. 461-469, 2004.
- VALERIANO, M. M.. **Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul**. São José dos Campos, SP: INPE: Coordenação de Ensino, Documentação e Programas Especiais (INPE-10550-RPQ/756). 72p. (Boletim), 2004.
- VALERIANO, M. M. & ABDON, M. M.. **Aplicação de Dados SRTM a Estudos do Pantanal**. *RBC. Revista Brasileira de Cartografia*, v. 59, p. 63-71, 2007.