

Caracterização das falhas de transferência na porção norte da Bacia de Santos a partir da integração de dados geológicos e geofísicos

Transfer faults characterization in northern portion of the Santos Basin based on geological and geophysical data integration

Iata Anderson de Souza¹, Hans Dirk Ebert (*in memoriam*), Joel Carneiro de Castro², Adilson Viana Soares Jr.³, Gustavo Henrique Teixeira da Silva⁴, Carlos Felipe Benvenuti⁵

resumo

No embasamento pré-cambriano aflorante no continente, foram identificadas e caracterizadas estruturas que se dirigem transversal/subtransversalmente à costa. Essas estruturas foram analisadas em imagens de modelo digital de elevação SRTM 90m, extraindo-se lineamentos NW-SE que interceptam as estruturas NE-SW do embasamento. Esses lineamentos foram selecionados, classificados em 48 segmentos que se projetam para *offshore* e correlacionados com estruturas da bacia. Nesta, foram interpretadas 25 seções sísmicas 2D, 12 perfis de poços e dados de métodos potenciais, identificando-se os horizontes estratigráficos chave e as principais estruturas, e gerando mapas estruturais de cada horizonte. Foram detectadas seis falhas de transferência (FTs) nomeadas FT-1 a FT-6, cujas extensões no continente correspondem a lineamentos designados FC1 a FC6. As FTs foram relacionadas com

falhas de transferência e com a evolução e deformação da porção norte da Bacia de Santos. Nas seções sísmicas, essas falhas apresentam deslocamentos laterais em estruturas-em-flor, inversão de rejeito passando de normal no topo para reverso na base, mudanças abruptas na espessura ou mesmo desaparecimento dos refletores. No mapa estrutural do Embasamento e do Topo do Rifte, as falhas controlam alguns depocentros e, em algumas áreas, observam-se deslocamentos. Os mapas de métodos potenciais indicam que, em algumas áreas, há deslocamentos acentuados das anomalias associados às FTs. Em algumas seções sísmicas, nota-se reativação das FTs quando interceptam horizontes, desde o embasamento até as camadas mais recentes. A integração dos dados em ambiente 3D permitiu observar a extensão das FTs nas discontinuidades do continente.

Palavras-chave: falhas de transferência | lineamentos tectônicos | Bacia de Santos

¹ Universidade Estadual Paulista. Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Departamento de Petrologia e Metalogenia. Campus de Rio Claro. iata_and@yahoo.com.br.

² Universidade Estadual Paulista. Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Departamento Geologia Aplicada. Campus de Rio Claro. jocastro@rc.unesp.br.

³ FUNDUNESP (Fundação para o Desenvolvimento da UNESP). avsoares@rc.unesp.br.

⁴ PETROBRAS. Edifício Sede da Petrobras - EDISE. E&P Exploração. Aquisição Terrestre. gustavohts@petrobras.com.br

⁵ Universidade Estadual Paulista. Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Campus de Rio Claro. Pós-graduação Geologia Regional. felipebenvenuti@hotmail.com

abstract

Structures transverse/sub-transverse to the shoreline have been identified and characterized on the precambrian basement outcrop on the continent adjacent to the northern Santos Basin. These structures were analyzed from images of digital elevation model SRTM 90m by extracting NW-SE lineaments that intersect the NE-SW foliation. The lineaments were selected, classified into 48 segments that extend toward offshore, and correlated with basin structures. In the basin 25 2D seismic sections, 12 well logs and data from potential methods were interpreted, identifying the key stratigraphic levels and the major structures. Structural maps of each horizon were generated. Six transfer faults (FTs) were recognized and named FT-1 to FT-6, whose extensions correspond to continental lineaments named FC1 to FC6. The FTs are related to the basin deformation and evolution. In seismic sections, these faults have lateral slip in flower structures, displacement inversions from normal at the top to reverse at the base, abrupt changes in thickness or even disappearance of the seismic reflectors. The structural map of the Basement and Top of the Rift shows control of some depocenters by faults and displacements in some areas. The maps of potential methods indicate that there are pronounced anomaly shifts in some areas, associated with FTs. Some seismic sections indicate reactivation of FTs when they intersect horizons from the basement until the most recent layers. The 3D integration of data facilitated the observation of the FT extensions in the continent discontinuity.

(Expanded abstract available at the end of the paper).

Keywords: transfer faults | tectonic lineaments | Santos Basin

introdução

O embasamento continental da região costeira do Brasil constitui importante alvo de investigações geológicas, pois registra os processos tectônicos mesozoicos da fragmentação do Gondwana que resultaram na abertura do Atlântico e na separação da América do Sul e da África. Esses processos de natureza distensiva foram responsáveis por falhamentos que geraram e compartimentaram bacias sedimentares

que, em parte, acompanharam a manifestação magmática Eocretácica (Neocomiano) durante a fase rifte. Uma dessas bacias é a de Santos, na região Sudeste e Sul do Brasil.

Além das falhas normais sintéticas e antitéticas próprias do regime distensivo, o desenvolvimento das bacias normalmente envolve outras importantes falhas, de transferência e de movimentação lateral. Elas possuem forte influência na configuração geométrica da bacia, erosão e acumulação sedimentar, geração de trapas estruturais e migração de hidrocarbonetos (Zalán, 1986; Mohriak *et al.*, 1995; Demercian e Szatmari, 1999; Mohriak, 2004).

As falhas reconhecidas na margem continental têm sido correlacionadas aos lineamentos tectônicos, presentes na faixa costeira da região Sudeste, a maioria de direção NE-SW, e relacionados com as estruturas pré-existentes da bacia. São também reconhecidas falhas transversais NW-SE e NNW-SSE que se projetam para dentro da bacia, podendo corresponder a possíveis falhas de transferência.

A partir destas informações, este trabalho objetiva a apresentação das estruturas transversais identificadas e caracterizadas no embasamento aflorante e suas projeções para a margem continental da porção norte da Bacia de Santos. Como resultado, buscou-se a associação com as falhas de transferência e suas relações com a evolução e deformação da Bacia de Santos (fig.1).

base de dados e métodos

interpretação por sensoriamento remoto

Na parte continental, desenvolveu-se um estudo para o reconhecimento estrutural, tectônico e geomorfológico por meio de processamento de imagens digitais, com o intuito de identificar as feições lineares rúpteis da área de estudo e, principalmente, as que se projetam para dentro da porção norte da Bacia de Santos.

Para isso, utilizou-se Modelo Digital do Terreno (MDT), criado a partir de imagens de radar SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) com resolução de 90m (fig. 2) com o objetivo de mapear os principais lineamentos tectônicos. Foram aplicados os modelos de fotointerpretação de Amaral (1994) e Liu

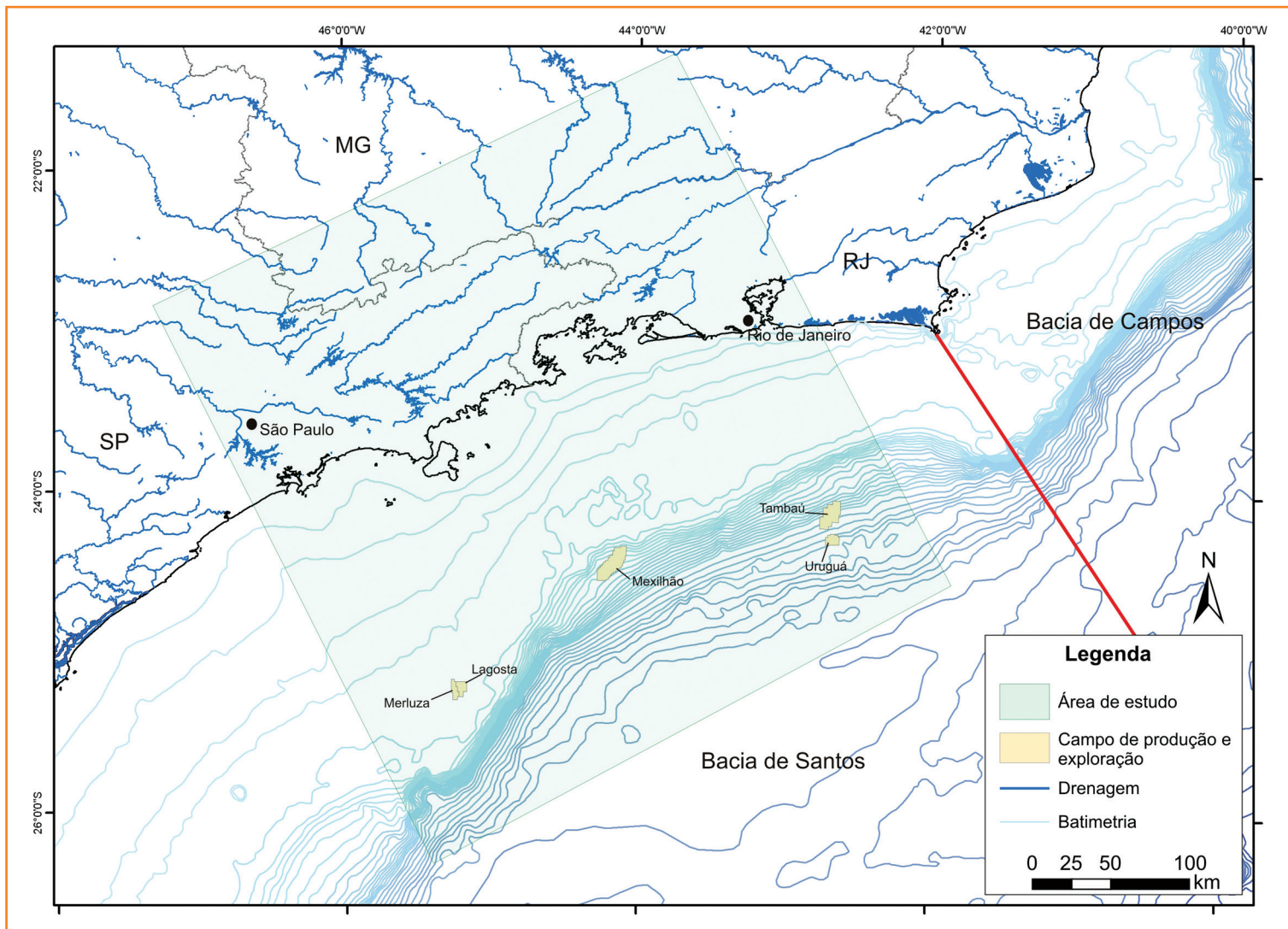


Figura 1
Mapa de localização da área de estudo.

Figure 1
Location map of study area.

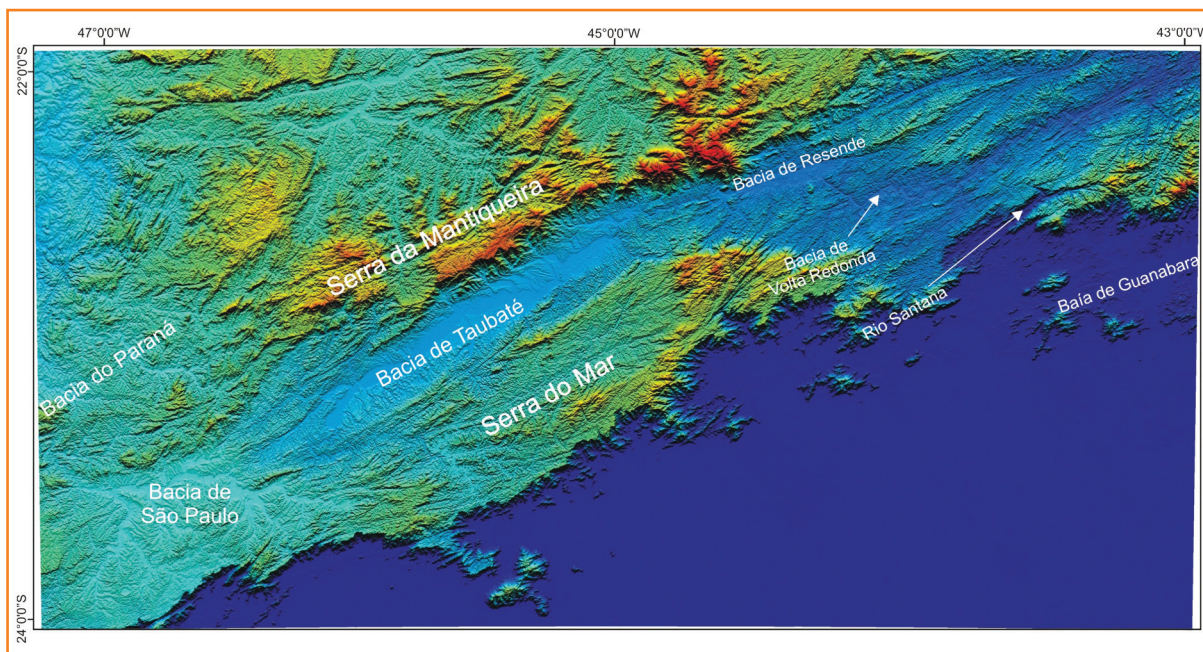


Figura 2
Imagem SRTM 90m utilizada no trabalho, destacando as serras do Mar e da Mantiqueira e as bacias sedimentares.

Figure 2
SRTM 90m image used in the work, showing the Mar and Mantiqueira mountains and the sedimentary basins.

(1984) para a identificação dos principais elementos estruturais, dentro das seguintes categorias: linhas de cristas, vales estruturais, linhas de drenagem, escarpas e depressões. Esses elementos indicam feições estruturais significativas para a análise de zonas de cisalhamento, falhas, juntas e outras feições.

interpretação geofísica e de poços

Na porção norte da Bacia de Santos, foram interpretadas 25 seções sísmicas 2D, 12 dados de poços (contendo registros sônicos, raios gama, densidade e descrição de testemunho), assim como dados aeromagnetométricos (levantamento Plataforma Continental Sul) e gravimétricos (levantamento Santos Reconhecimento p0141), fornecidos pelo Banco de Dados de Exploração e Produção (BDEP-ANP) (fig. 3), através da política de

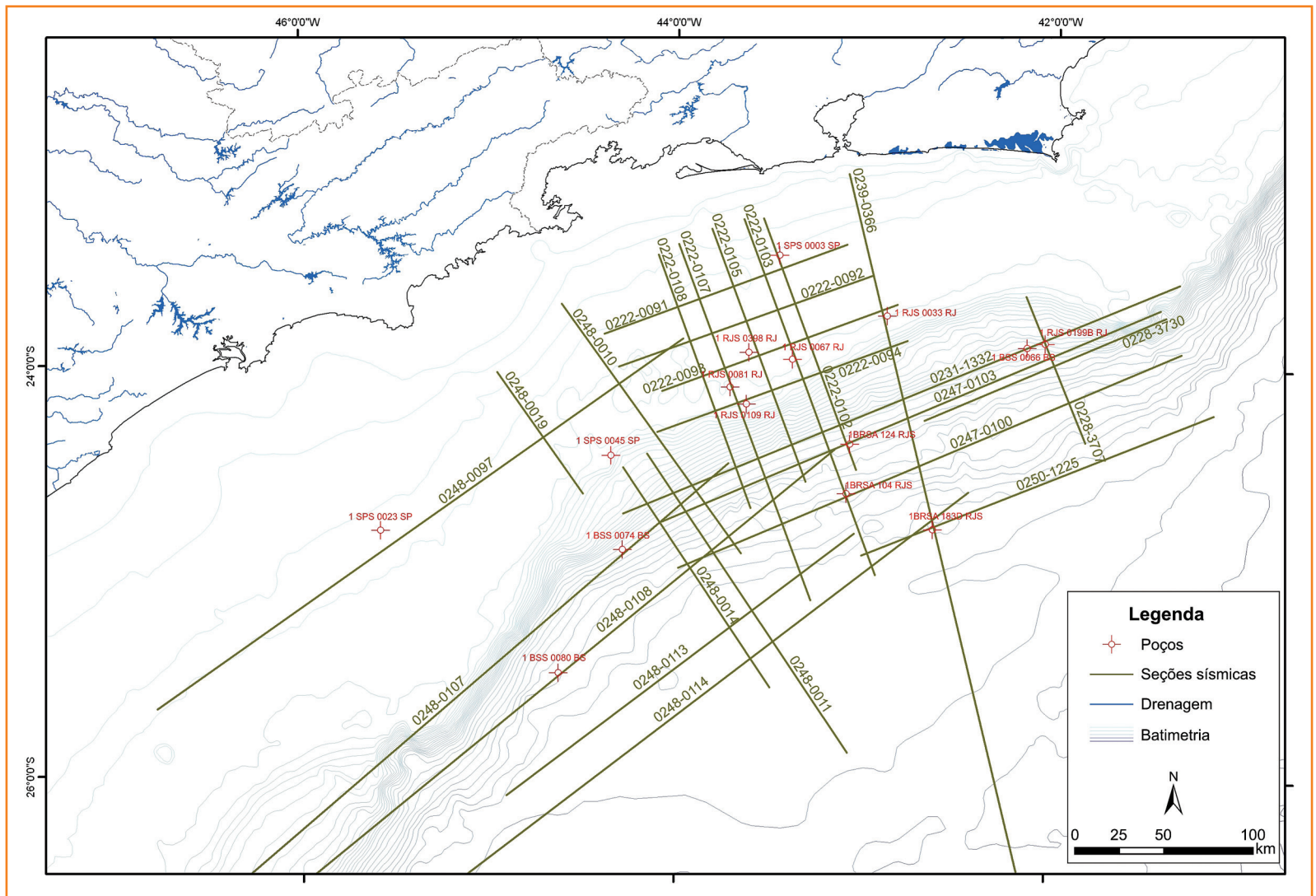
gratuidade para universidades. Estes dados foram interpretados no LISG-PRH-05 (Laboratório de Interpretação de Dados Sísmicos e Geológicos) através do *University Software Grant Program* da Landmark-Halliburton.

Inicialmente, foram construídos perfis de raios gama, sônico e densidade para cada poço. Esses perfis foram correlacionados entre os diversos poços, utilizando informações de idade, o que permitiu a identificação de nove intervalos estratigráficos: Mesomioceno, Eoeceno, Topo do Cretáceo, Eocampariano, Eosantoniano, Albiano, Formação Ariri, Topo do Rift e Embasamento. Após essa identificação, construíram-se sismogramas sintéticos a partir de valores dos perfis sônicos e de densidade, que foram integrados com as linhas sísmicas e permitiram identificar os intervalos estratigráficos sobre elas.

Nas seções sísmicas, foram interpretadas as falhas e os intervalos estratigráficos identificados (fig. 4).

Figura 3
Mapa de localização dos poços e seções sísmicas interpretadas.

Figure 3
Location map of well and interpreted seismic data.



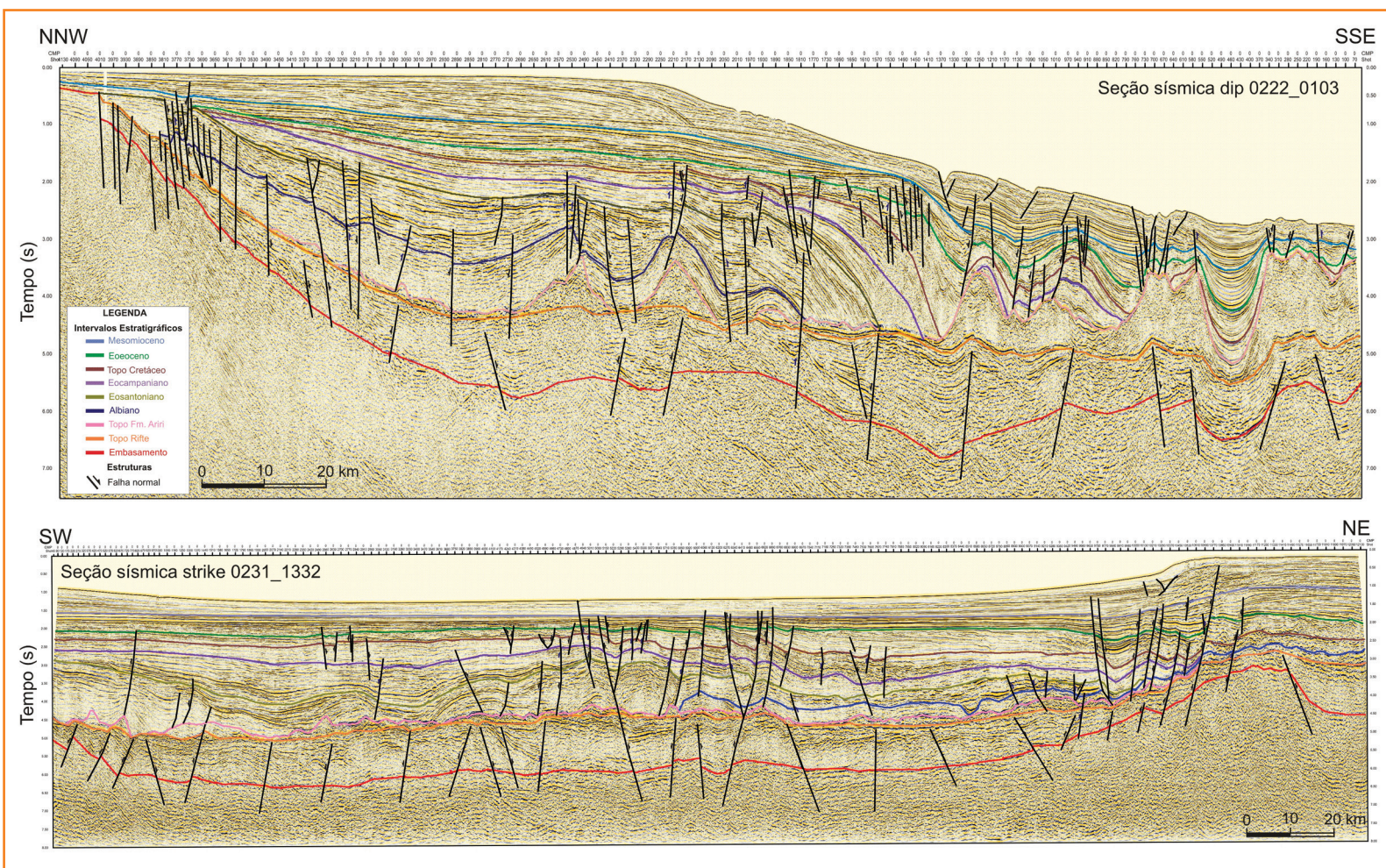


Figura 4

Exemplo de interpretação das seções sísmicas *Dip* (A) e *Strike* (B), destacando os intervalos estratigráficos e as principais estruturas.

Figure 4

Example of seismic section interpretation *Dip* (A) and *Strike* (B), showing the stratigraphic intervals and the main structures.

Os dados interpretados foram integrados em ambiente SIG (Sistemas de Informação Geográfica) e tridimensional, permitindo observar as direções das falhas interpretadas e a geometria da bacia e do continente.

lineamentos tectônicos

A interpretação da imagem SRTM 90m permitiu a extração de aproximadamente 5.600 feições lineares no continente adjacente à Bacia de Santos, além da elaboração de um mapa de lineamentos tectônicos (fig. 5). A análise de roseta de frequência e comprimento acumulados em intervalo 10° revelou as seguintes direções principais, em ordem decrescente: N50-60E, N60-70E, N20-30W, N40-50W e N70-80W. Vale ressaltar que outra direção está presente, não salientada na figura 5, mas que aparece quando tratada discriminadamente: a direção N-S.

Para a caracterização geológica, tectônica e geomorfológica, os lineamentos identificados foram integrados aos diversos mapas temáticos extraídos de Bizzi *et al.* (2001) em ambiente SIG (Sistemas de Informação Geográfica), considerando dados como estruturas, drenagem e bacias sedimentares. Os principais sistemas de direções dos lineamentos da área estão descritos abaixo:

- NE-SW, de direção N26-84E - A roseta de frequência mostra direção preferencial N55-60E (fig. 6). Os lineamentos são retilíneos e extensos; às vezes, curtos. Coincidem com as principais estruturas dúcteis (fig. 6), tais como as zonas de cisalhamento dúctil, contatos litológicos e foliação metamórfica do embasamento. Neste *trend* estão inseridas as bacias cenozoicas (fig. 6) e o Rio Paraíba do Sul e seus principais afluentes. Estruturas desta direção constituem as principais discontinuidades do embasamento aflorante e exercem efetivamente controle nas reativações tectônicas subsequentes;

Figura 5

Mapa de lineamentos tectônicos extraídos de imagem SRTM 90m e respectivas rosetas de comprimento e frequência acumulados.

Figure 5

Map of tectonic lineaments extracted from SRTM 90m image and their respective rosettes of accumulated frequency and length.

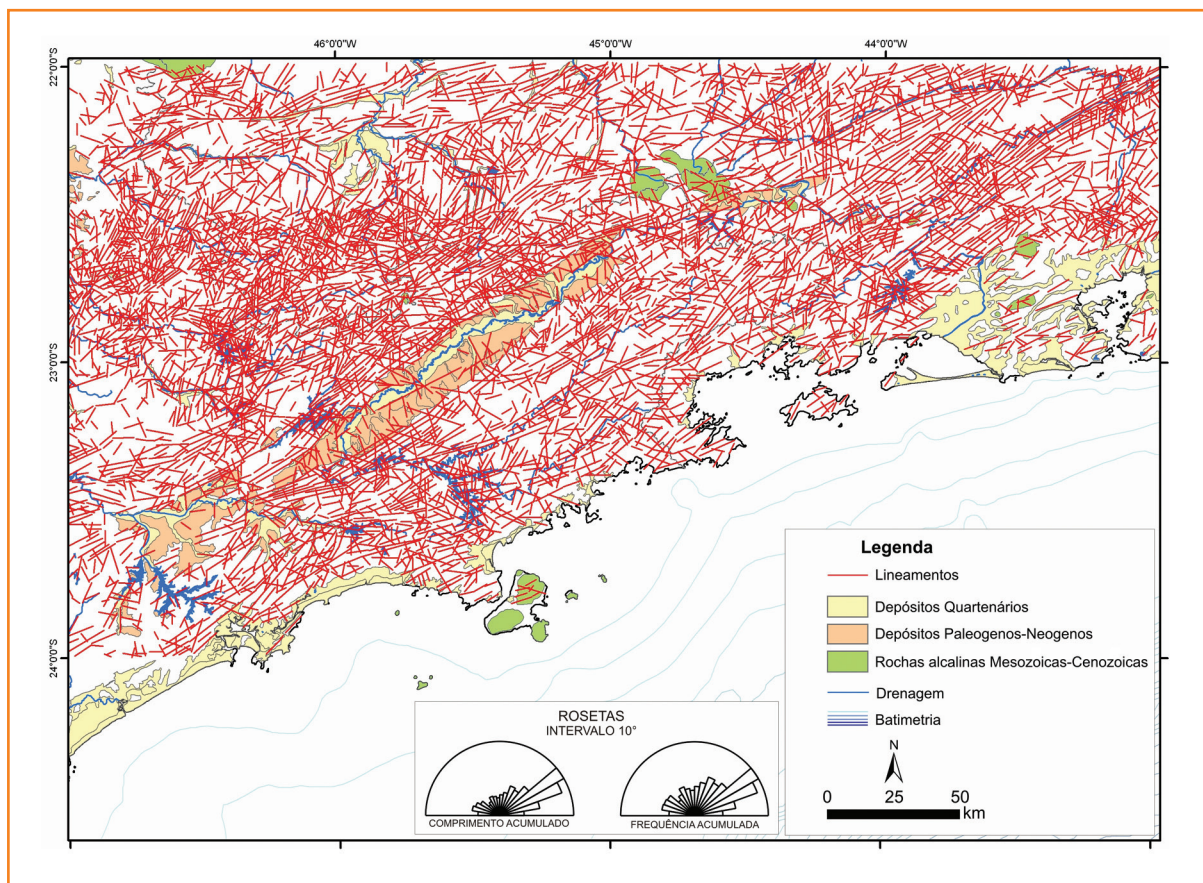
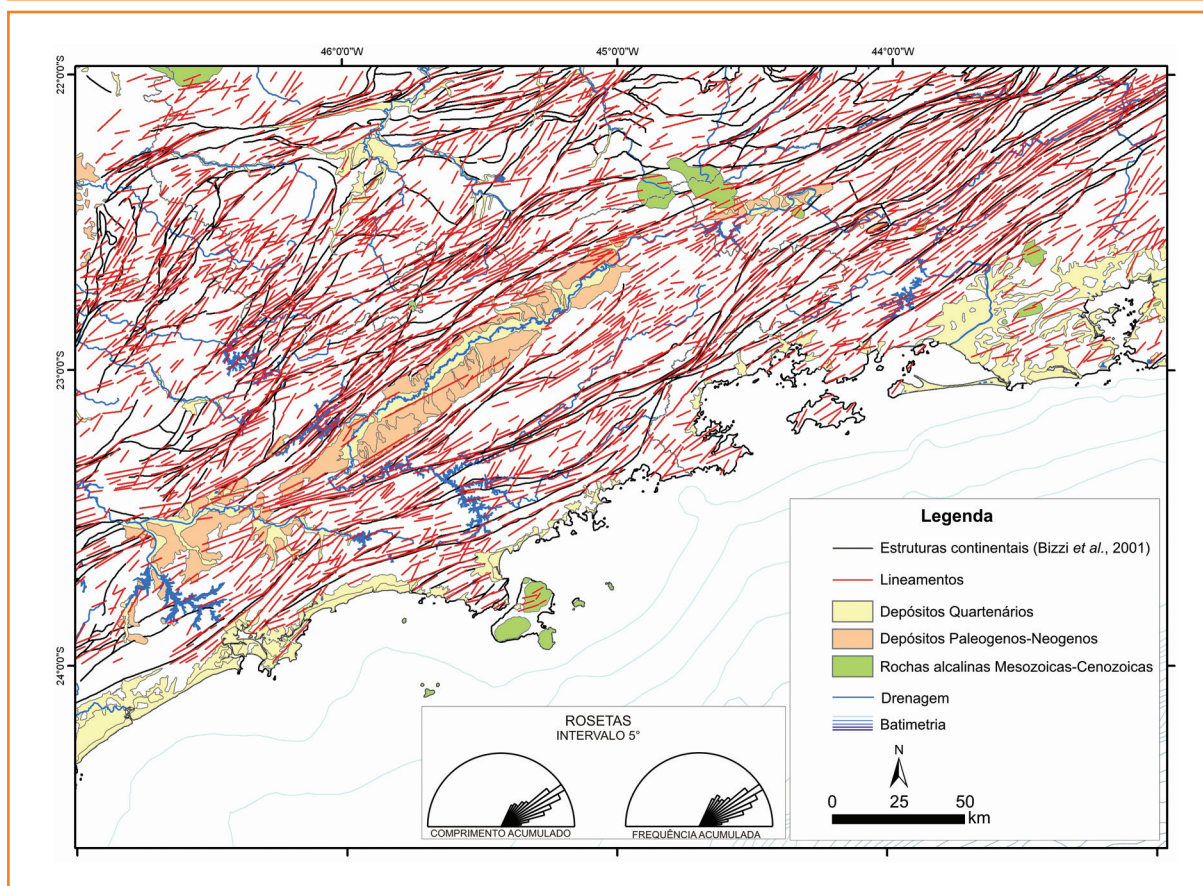


Figura 6

Mapa integrado de lineamentos tectônicos de direções NE-SW e respectivas rosetas com as estruturas continentais reconhecidas (Bizzi et al, 2001).

Figure 6

Integrated map of tectonic lineaments in NE-SW direction and their respective rosettes with recognized continental structures (Bizzi et al., 2001).



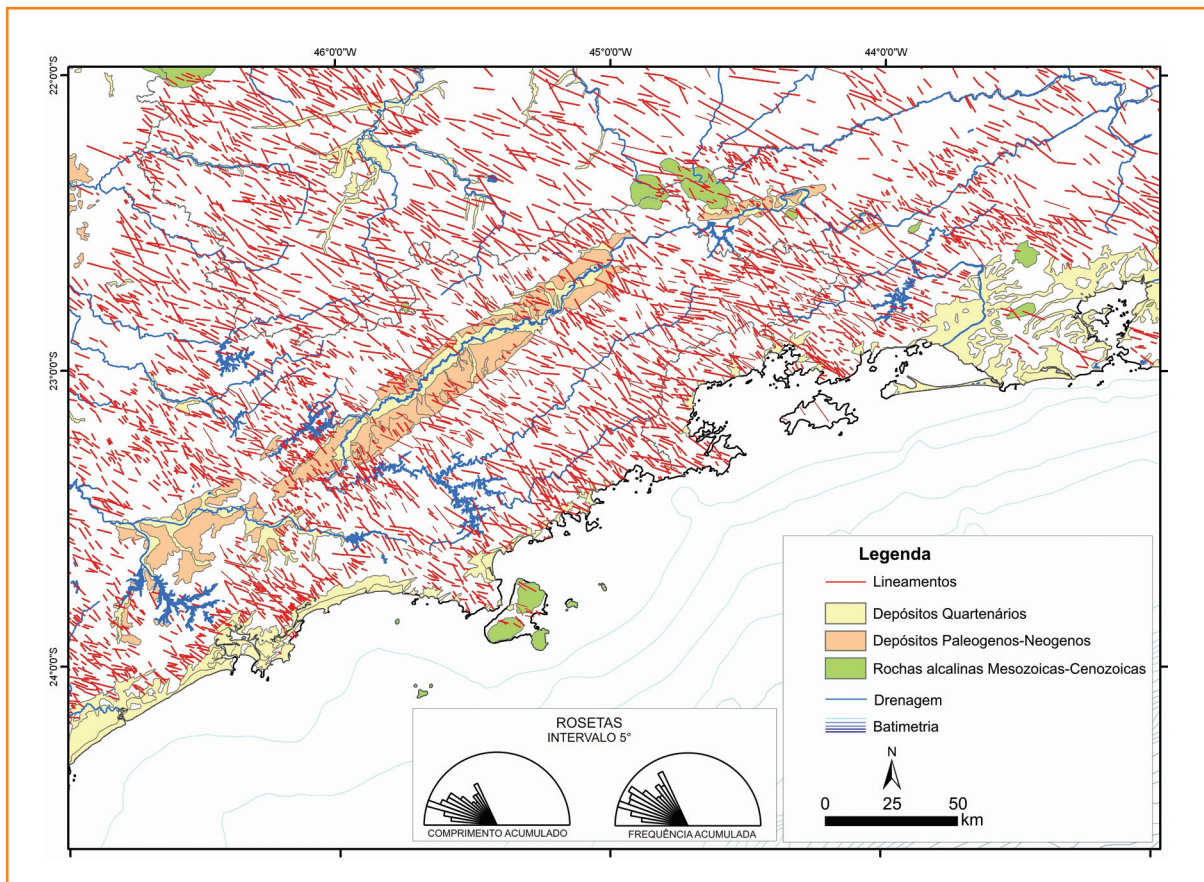


Figura 7
Mapa de lineamento extraído de imagem SRTM 90m de direção NW-SE.

Figure 7
Lineament map extracted from SRTM 90m image in NW-SE direction.

- NW-SE, de direção N26-84W - A roseta de frequência mostra direção preferencial N70-75W (fig. 7). Os lineamentos são de curto comprimento e retilíneos. Eles coincidem com as direções de juntas e falhas observadas na região. As falhas deslocam lineamentos NE-SW, bem como feições geológicas, estruturais e drenagens ao longo do Rio Paraíba do Sul e seus afluentes. Na região de Volta Redonda, no estado do Rio de Janeiro, essa direção coincide com a Zona de Transtensão de Volta Redonda (Valeriano e Heilbron, 1993). Entre a Serra da Bocaina e a Costa Atlântica, a Zona de Transferência do Funil, identificada através de mapa de anomalias Bouguer (Almeida e Ebert, 2002), coincide, em superfície, com estes lineamentos (fig. 8);
- NNW-SSE, de direção entre N6-25W - A roseta de frequência mostra direção preferencial N15-20W (fig. 9). Ocorre, principalmente, na região ao norte da cidade de Resende (RJ), aparecendo como lineamentos extensos e retilíneos. Geomorfologicamente, coincidem com vales estruturais que alojam rios rejuvenescidos, adaptados a linhas

de fraturas e falhas (fig.10). Esta direção também ocorre como lineamentos de curto comprimento e retilíneos, e interceptam algumas estruturas NE;

- NNE-SSW, E-W e N-S: Estruturas rúpteis, ocorrendo homoganeamente por toda a área e algumas direções NNE (fig.11) e E-W (fig.12), acompanham as grandes zonas de cisalhamentos. Em termos morfológicos, condicionam várias escarpas de falhas menores, nas serras do Mar e da Mantiqueira.

interpretação dos lineamentos que se projetam para a bacia

Para identificar as principais discontinuidades transversais do continente que se projetam para a bacia, foram traçados, primeiramente, grandes lineamentos sobre o mapa de feições lineares de direção NW-SE e NNW-SSE, extraídos da imagem SRTM 90m. O principal critério para essa interpretação foi verificar o padrão de segmentos contínuos e contíguos desses lineamentos. Essa análise permitiu definir 48 segmentos transversais

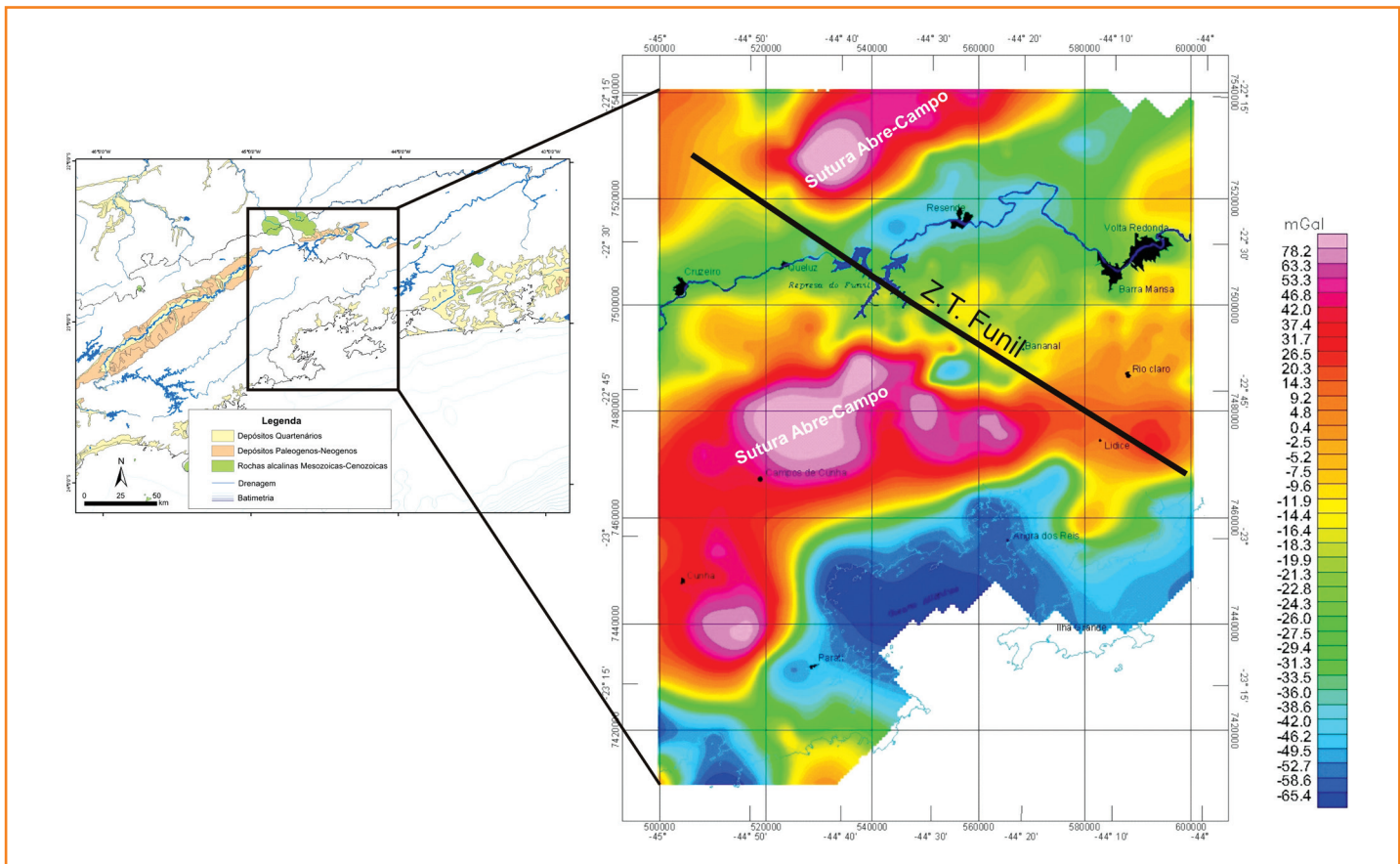


Figura 8
 Mapa de Anomalia Bouguer extraído do trabalho de Almeida (2002) destacando a Zona de Transferência do Funil.

Figure 8
 Bouguer anomaly map extracted from the work of Almeida (2002) highlighting the Funil Transfer Zone.

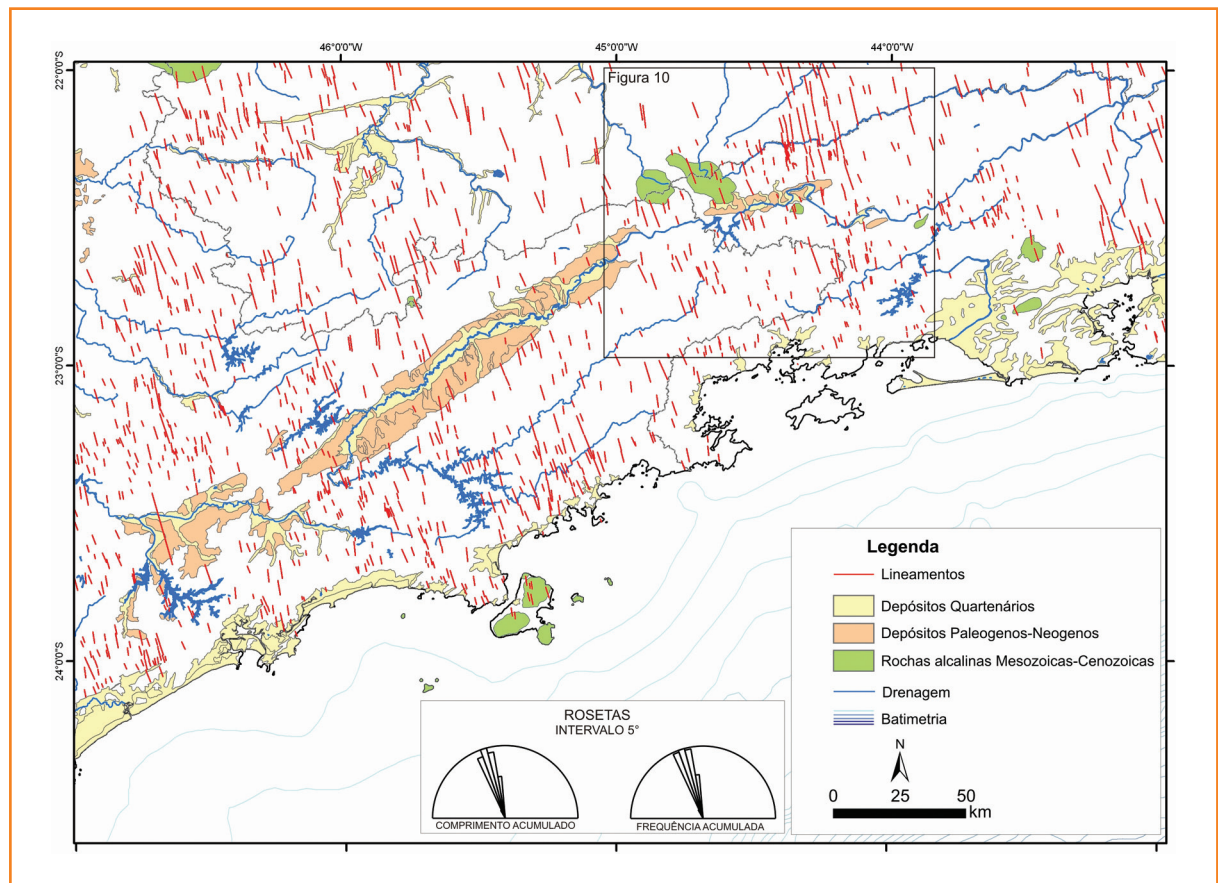


Figura 9
 Mapa de lineamento extraído de imagem SRTM 90m de direção NNW-SSE.

Figure 9
 Lineament map extracted from SRTM 90m image in NNW-SSE direction.

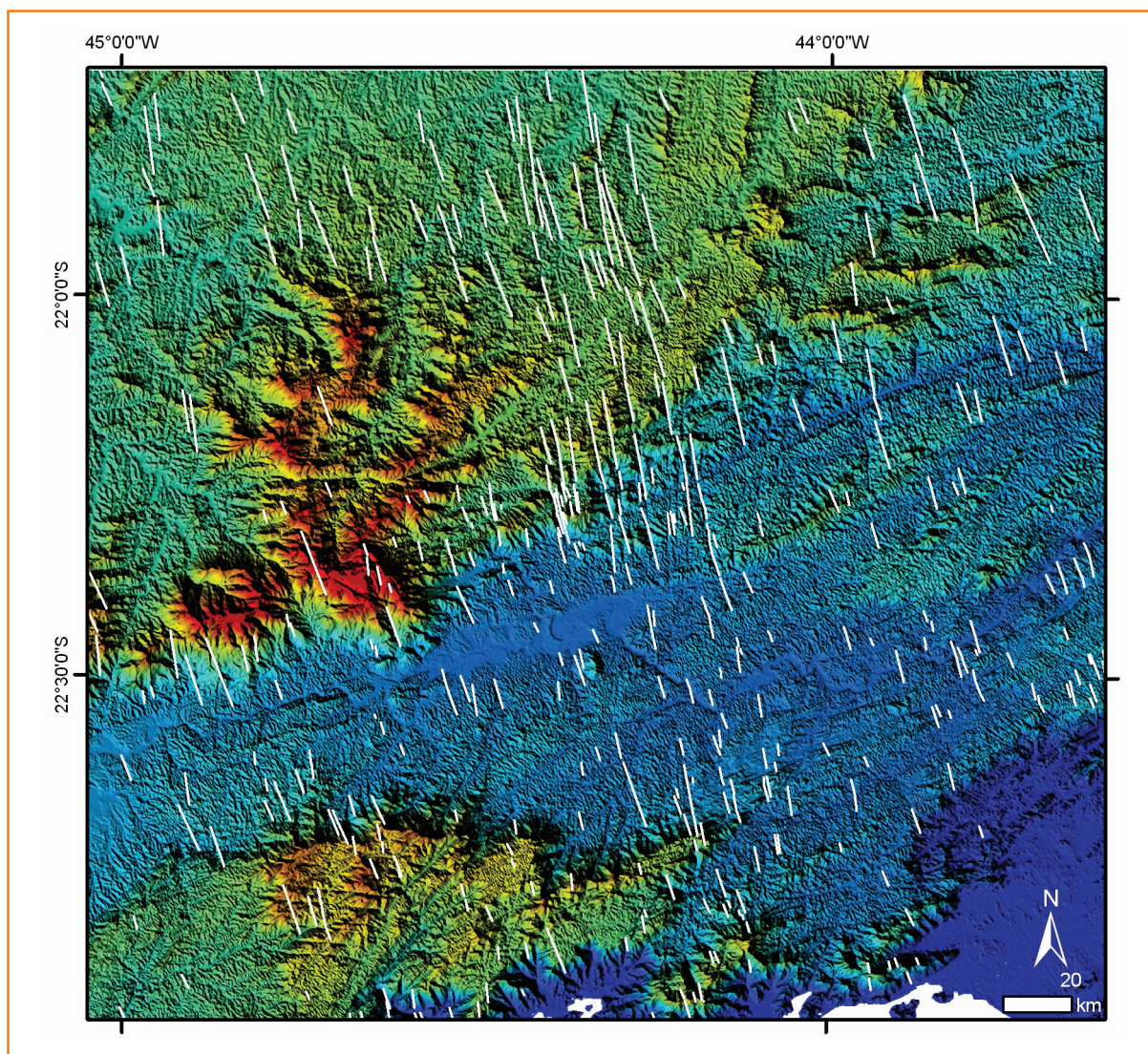


Figura 10
Imagem SRTM 90m destacando os lineamentos de direção NNW-SSE na região de Resende-RJ.

Figure 10
SRTM 90m image highlighting the NNW-SSE direction lineaments in the Resende-RJ region.

(fig. 13) que foram objetos de estudo para a interpretação dos dados de subsuperfície (sísmica e métodos potenciais) da porção norte da Bacia de Santos e associar a falhas de transferência.

arcabouço estrutural e identificação das falhas de transferência

Para o melhor entendimento do arcabouço estrutural da área, construíram-se mapas de contorno estrutural em tempo, a partir da interpolação dos intervalos estratigráficos interpretados na sísmica, com

agregação das interpretações dos mapas aeromagnetométricos e gravimétricos, o que permitiu verificar a existência de algumas estruturas transversais na bacia.

A análise integrada dos mapas de contorno estrutural em tempo, seções sísmicas e mapas de métodos potenciais (aeromagnetométrico e gravimétrico) indicam, em geral, que a porção norte da Bacia de Santos apresenta um alongamento de direção NE-SW, coincidente com a direção da estruturação pré-cambriana do embasamento aflorante adjacente. Isso ocorre devido ao Cinturão Orogênico Ribeira ter sido afetado por esforços distensivos durante fragmentação do Gondwana, ocasionando estiramento crustal e reativação das principais descontinuidades pré-cambrianas. Os sedimentos da bacia foram depositados nas novas estruturas formadas (Chang *et al.*, 1992; Macedo *et al.*, 1989). Esses esforços distensivos geraram os grâbens, semigrâbens e *horstes*,

Figura 11
 Mapa de lineamento extraído de imagem SRTM 90m de direção NNE-SSW.

Figure 11
 Lineament map extracted from SRTM 90m image in NNE-SSW direction.

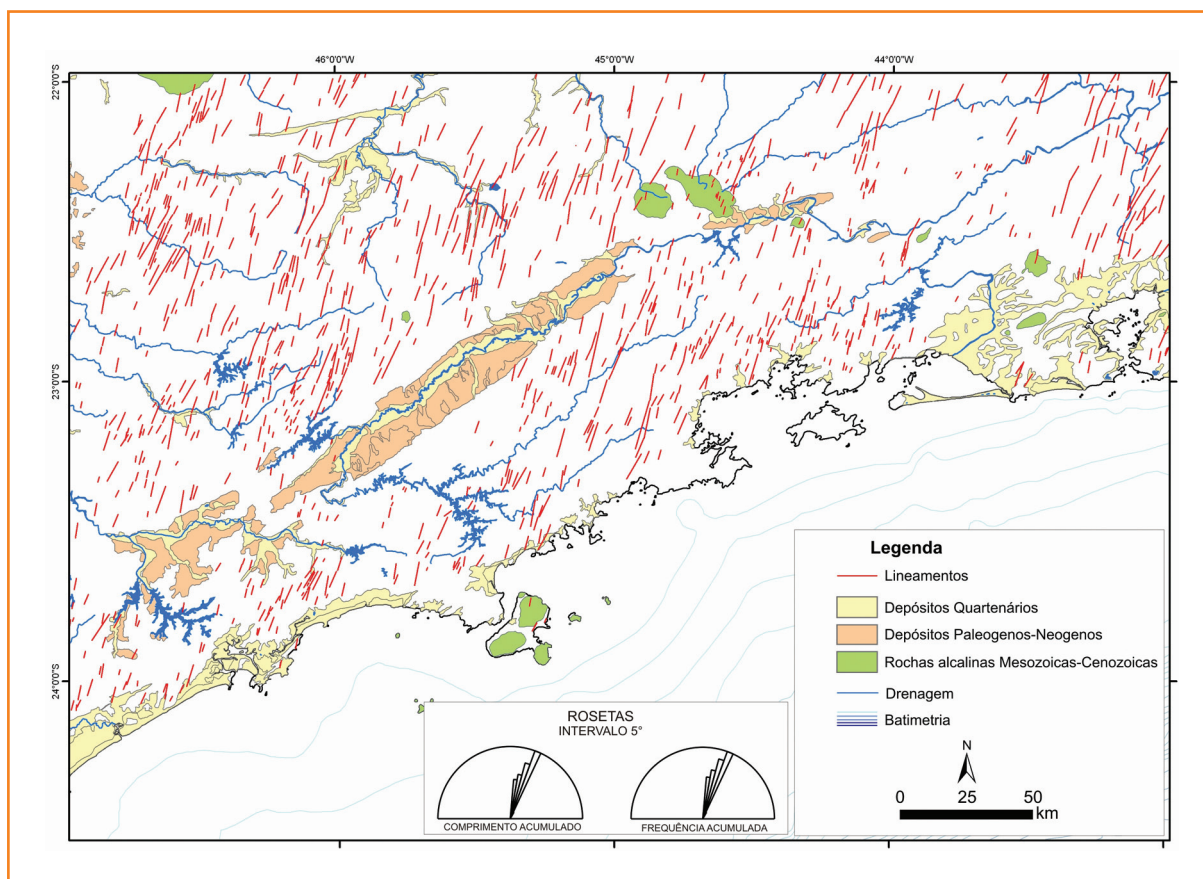
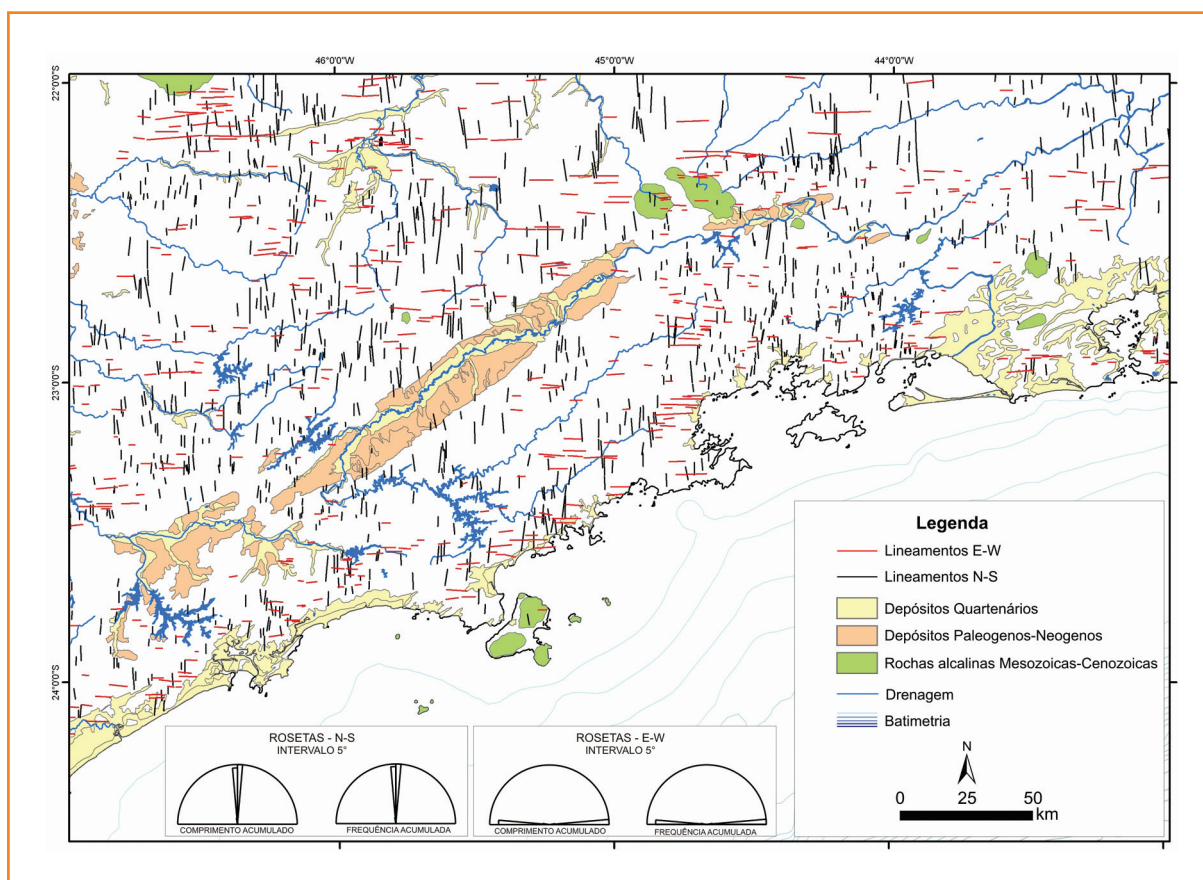


Figura 12
 Mapa de lineamento extraído de imagem SRTM 90m de direção N-S e E-W.

Figure 12
 Lineament map extracted from SRTM 90m image in N-S and E-W direction.



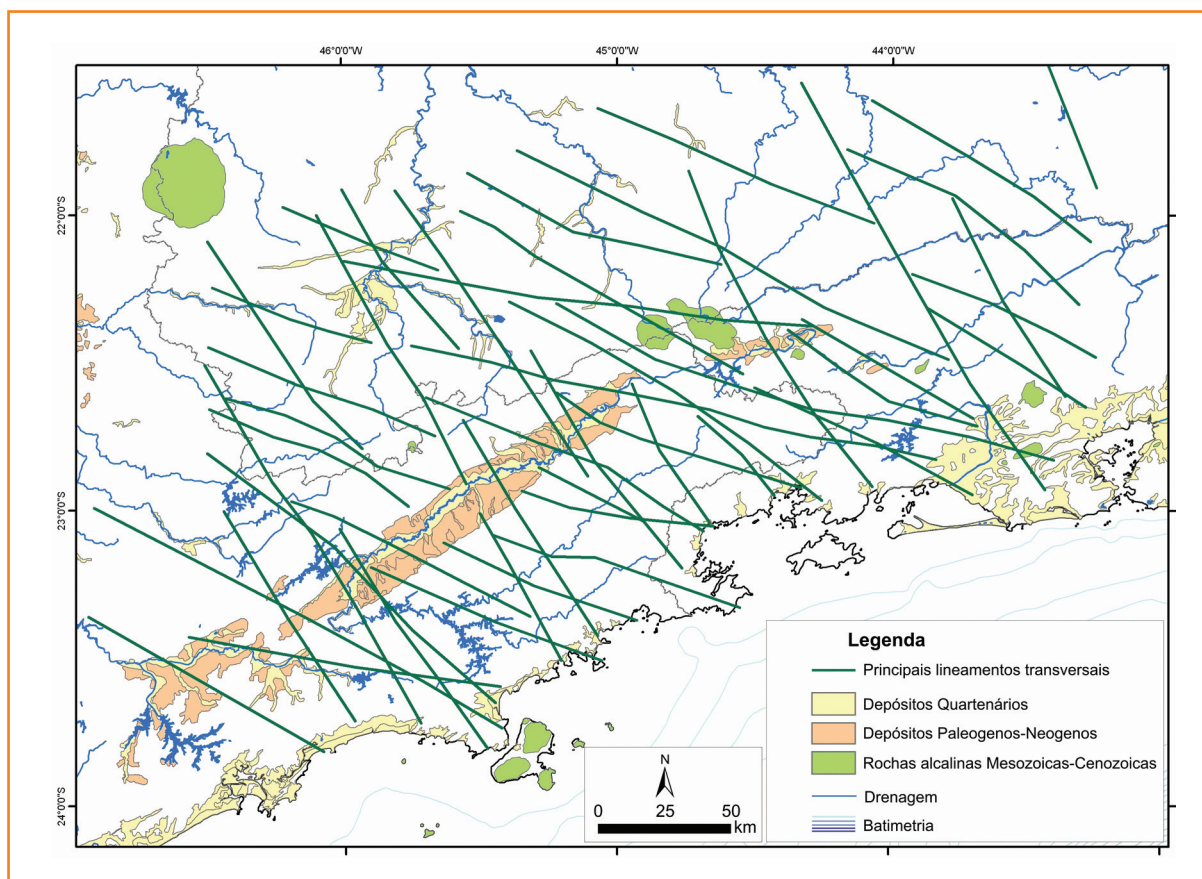


Figura 13
Principais descontinuidades transversais que se projetam para a bacia.

Figure 13
Main cross discontinuities that project into the basin.

observados nas seções sísmicas entre os intervalos estratigráficos do Embasamento e Topo do Rifte, onde os falhamentos são predominantemente sintéticos e, às vezes, antitéticos. Os sistemas de direções estruturais NW-SE foram observados nos mapas de contorno estrutural em tempo (figs. 14 e 15), seções sísmicas *strike*, mapas de métodos potenciais (fig. 16). Na sísmica, estes sistemas de falhas apresentam-se sugestivamente com caráter transcorrente (fig. 17) e as principais características encontradas são estruturas-em-flor, planos de falhas verticais e subverticais, ocorrência de inversão do rejeito com a profundidade (caráter inverso na base e normal no topo) e mudanças abruptas na espessura dos refletores ao longo da seção sísmica. A integração desses dados em ambiente tridimensional permitiu identificar seis conjuntos de falhas de transferência que foram nomeados de FT-1, FT-2, FT-3, FT-4, FT-5 e FT-6 e estão descritos a seguir:

- FT-1: Esta falha de transferência está localizada na porção sudoeste da área. No cruzamento das seções sísmicas *strike* (fig. 18), observa-se que a falha está situada entre um gráben (na parte

sudoeste) e um alto (na parte nordeste) e, nos mapas estruturais do Embasamento e do Topo do Rifte (figs. 14 e 15), verificou-se um controle desses altos e baixos estruturais nessa direção da falha (NW). No mapa aeromagnetométrico (fig. 16), nota-se, ao longo de FT-1, que há inflexões deslocando o *trend* principal (direção NE), principalmente os altos valores de anomalia (em vermelho). Na parte proximal na seção sísmica (fig. 18), observa-se que as falhas interceptam a camada mais recente (Eoceno), indicando reativações cenozoicas. Na parte distal, há um controle dessa falha na tectônica halocinética, principalmente na formação das minibacias (fig. 18);

- FT-2: Situada na porção sudoeste da área. Observa-se na porção distal no mapa de isócrona do rifte (fig. 19), que essa falha de transferência controlou a deposição desse intervalo ou deslocou-o durante uma fase posterior. No mapa estrutural do Embasamento (fig. 14), verificou-se que o depocentro é alongado na direção da falha (NW). No mapa aeromagnetométrico (fig. 16) e anomalia Bouguer, a falha subdivide

Figura 14
 Mapa estrutural do Embasamento e as falhas de transferência identificadas.

Figure 14
 Structural map of the Basement and the identified transfer faults.

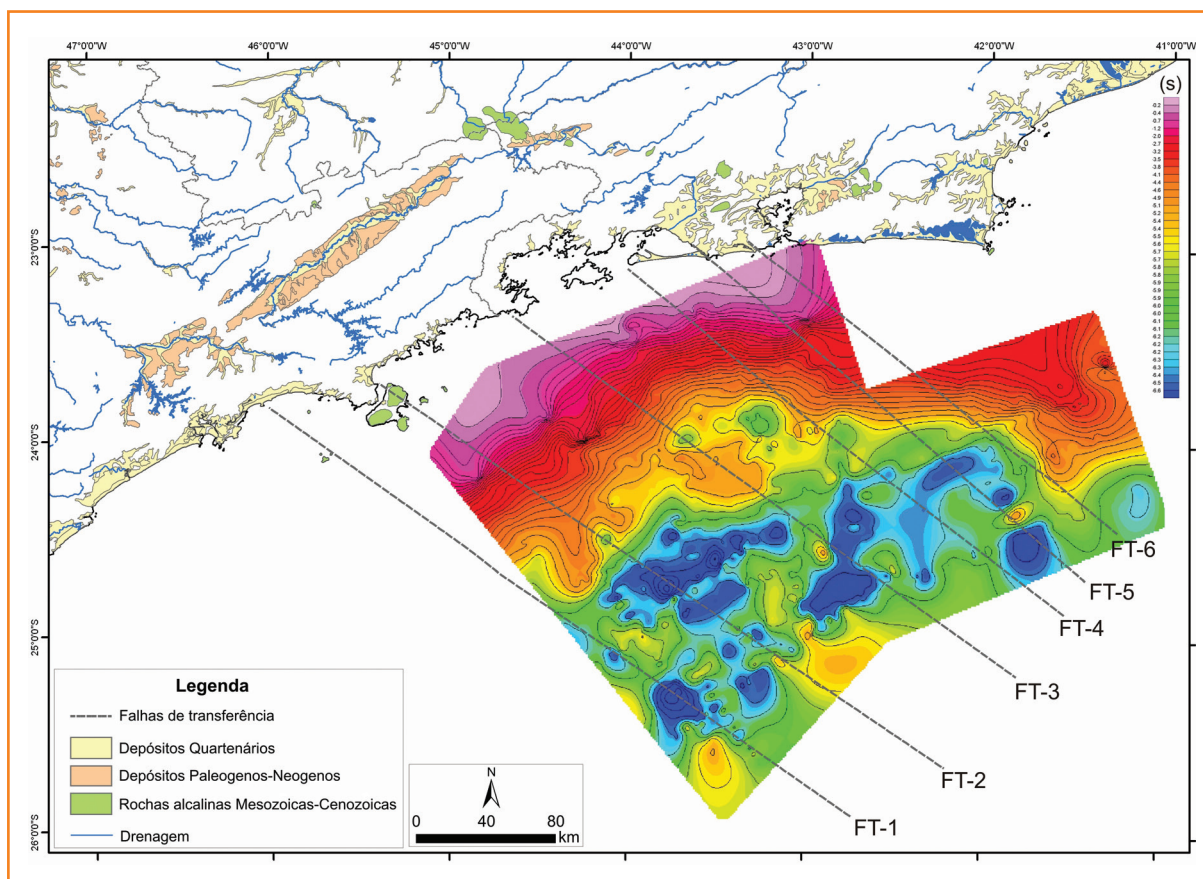
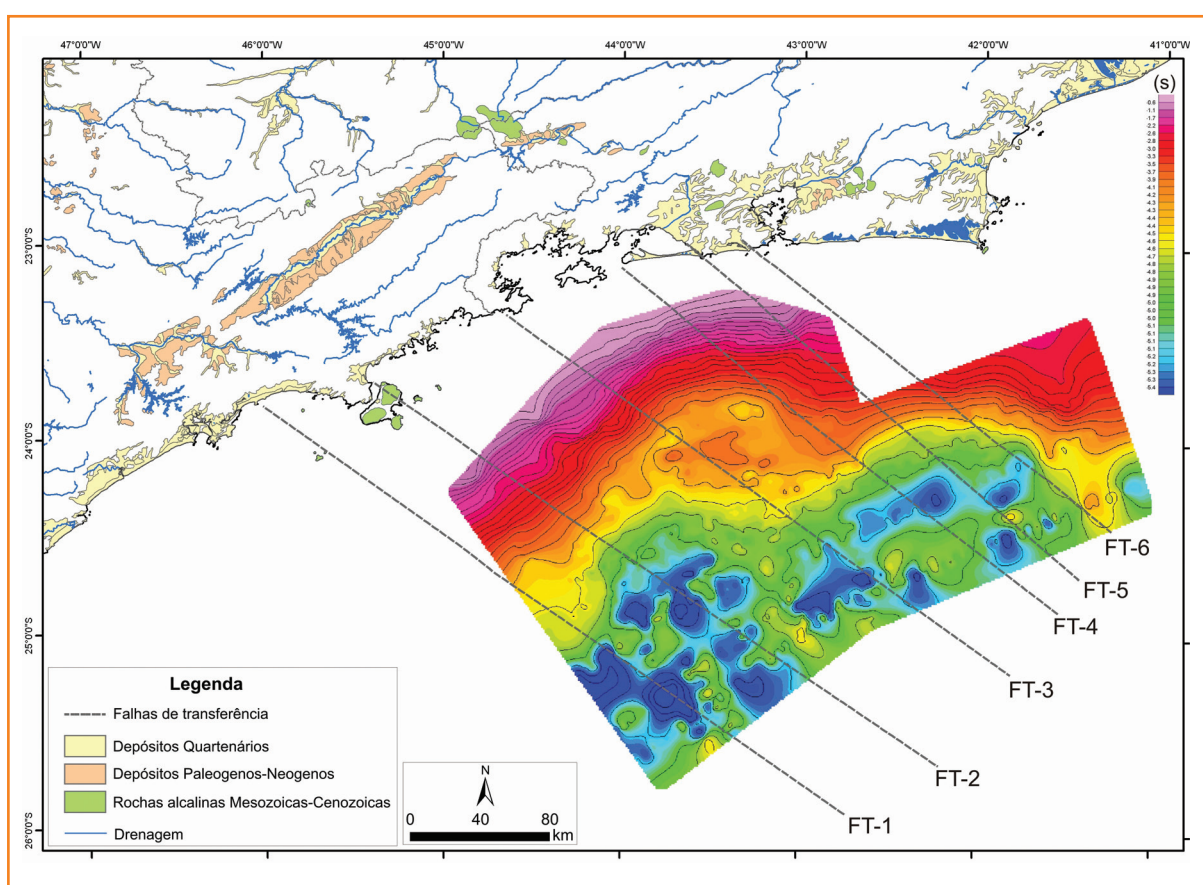


Figura 15
 Mapa estrutural do Topo do Rifte e as falhas de transferência identificadas.

Figure 15
 Structural map of Top of the Rift and the identified transfer faults.



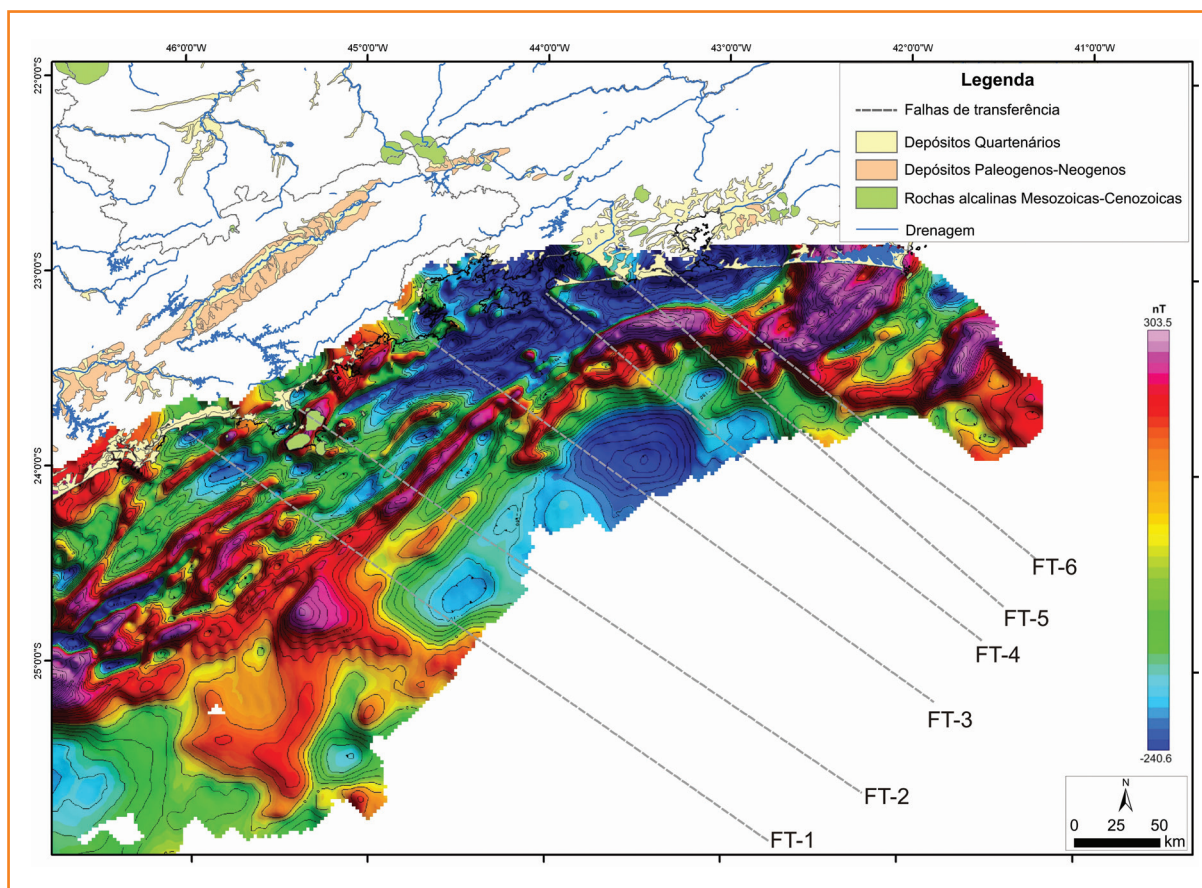


Figura 16
Mapa aeromagnetométrico e as falhas de transferência identificadas.

Figure 16
Aeromagnetic map and the identified transfer faults.

e desloca as anomalias de altos valores na parte proximal da área. Nas seções sísmicas *strike* (fig. 18), observa-se que, na parte basal, a falha se encontra em um baixo estrutural entre dois *horsts*, e na parte proximal, observa-se reativação cenozoica, onde as falhas interceptam camadas mais jovens (fig. 18);

- FT-3: Esta falha está localizada na porção central da área. Nas interpretações das seções sísmicas (fig. 20), verificou-se que nessa porção da falha há características de transcorrência, com presença de inversão de rejeito e mudança abrupta de camadas. Essa falha apresentou-se ativa ou foi reativada durante a evolução da bacia, pois intercepta camadas de idades Santoniano até o Mesomioceno. No mapa estrutural do Embasamento e do Topo do Rifte (figs. 14 e 15), observa-se que a FT-3 controlou a inflexão NW do alto estrutural na porção proximal da área, enquanto na parte distal, a falha desloca os seus depocentros. No mapa de isócrona do *rifte* (fig. 19), constata-se que a FT-3 controlou a deposição deste

intervalo na porção proximal, onde as maiores espessuras estão a nordeste da falha e, na porção distal, há deslocamento do depocentro. No mapa aeromagnetométrico (fig. 16), observam-se pequenas inflexões dos altos valores da anomalia do *trend* principal;

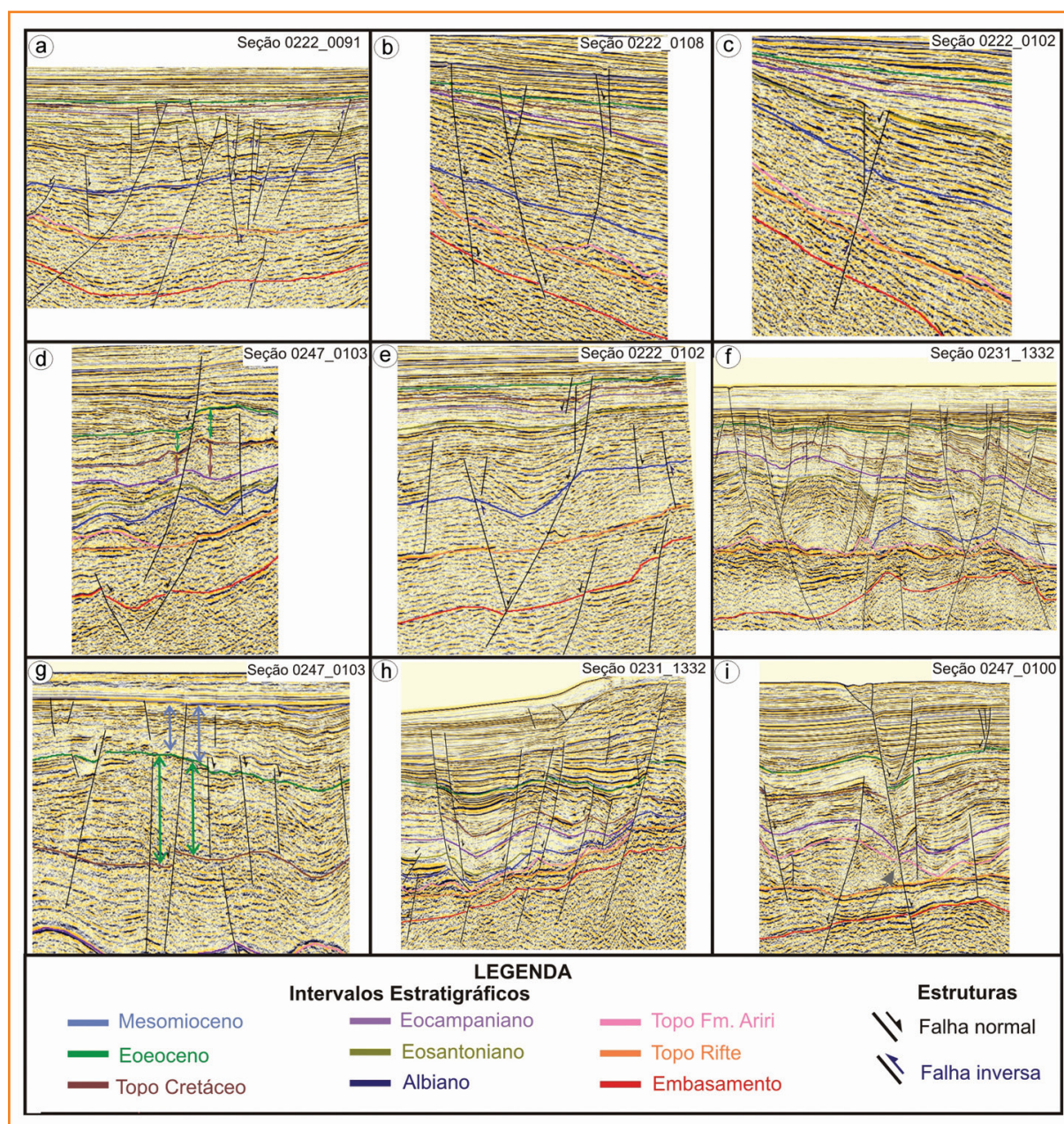
- FT-4: Esta falha está situada na porção centro-nordeste da área. No mapa aeromagnetométrico (fig. 16), os valores das anomalias apresentam forte gradiente horizontal na área proximal e distal e, no centro, há inflexão e deslocamentos do *trend* principal, indicado pelos altos valores da anomalia (em vermelho). Nas seções sísmicas *strike* (fig. 20), observa-se a presença de feições sugestivas de transcorrência com presença de estrutura-em-flor negativa e falhas verticais com inversão de rejeito. Estas apresentam reativações cenozoicas, onde a falha intercepta as camadas do intervalo Mesomioceno. Nos mapas estruturais do Embasamento e do Topo do Rifte (figs. 14 e 15), a FT-4 desloca os depocentros na porção distal da área;

Figura 17

Exemplos de estruturas características de falhas de movimentação lateral interpretadas nas seções sísmicas: estruturas-em-flor negativas (e e h), estrutura-em-flor composta de positiva e negativa (f), planos de falhas verticais e subverticais (c e i), inversão do rejeito com a profundidade (a, b e c), e mudanças abruptas na espessura (d e g).

Figure 17

Examples of characteristic structures of lateral movement faults interpreted in the seismic sections: negative flower structures (e and h), composition of positive and negative flower structures (f), plans of vertical and subvertical faults (c and i), displacement inversion in depth (a, b and c), sudden changes of thickness or even disappearance of reflectors (d and g).



- FT-5: Está localizada a nordeste da área. O mapa estrutural do Topo do Rifte (fig. 15) mostra um deslocamento dextral para este sistema de falha na parte distal, e nesta parte, o mapa estrutural do Embasamento (fig. 14) indica um depocentro alongado nessa direção, com maior profundidade no lado a nordeste da falha. A FT-5 limita, na porção central da área, a maior espessura dos depósitos do rifte, o que pode ser visto no mapa de isócrona (fig. 19). No mapa aeromagnetométrico (fig. 16), os valores das anomalias apresentam forte gradiente horizontal na direção NW na área distal. Nas seções sísmicas (fig. 21), observa-se mudança

abrupta das camadas, principalmente na seção 0247_0100, onde as camadas do rifte são menos espessas em relação às demais seções sísmicas. Nota-se que as falhas atingem os intervalos superiores, até o recente, indicando reativação;

- FT-6: Esta falha está localizada na porção nordeste da área, próximo ao Alto de Cabo Frio, onde foi identificada uma zona de transferência por Mohriak *et al.* (1995). No mapa aeromagnetométrico (fig. 16), os valores das anomalias apresentam forte gradiente horizontal de direção NW, inflexão e deslocamentos da orientação

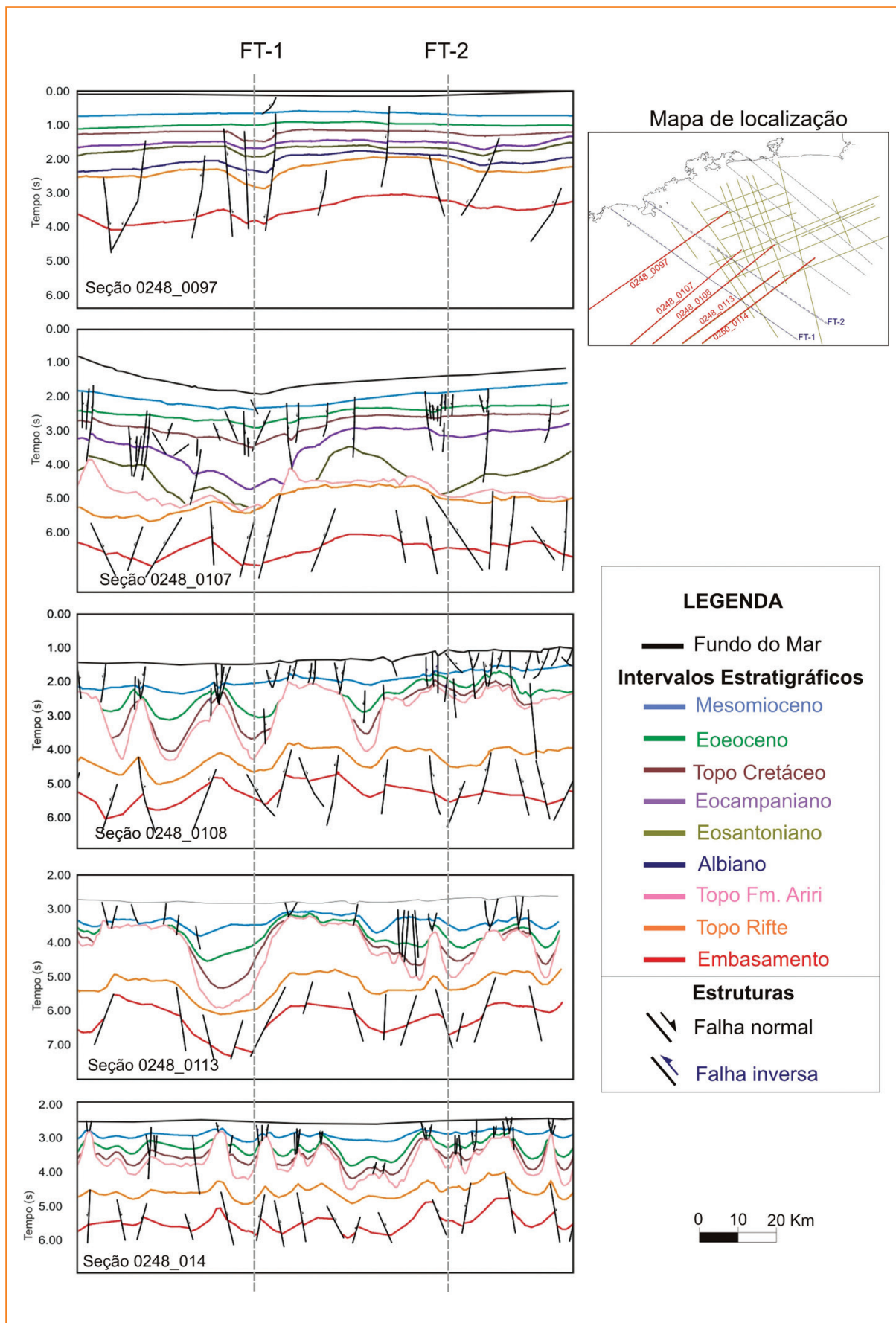


Figura 18
Parte das seções sísmicas *strike* interpretadas destacando as falhas de transferência FT-1 e FT-2.

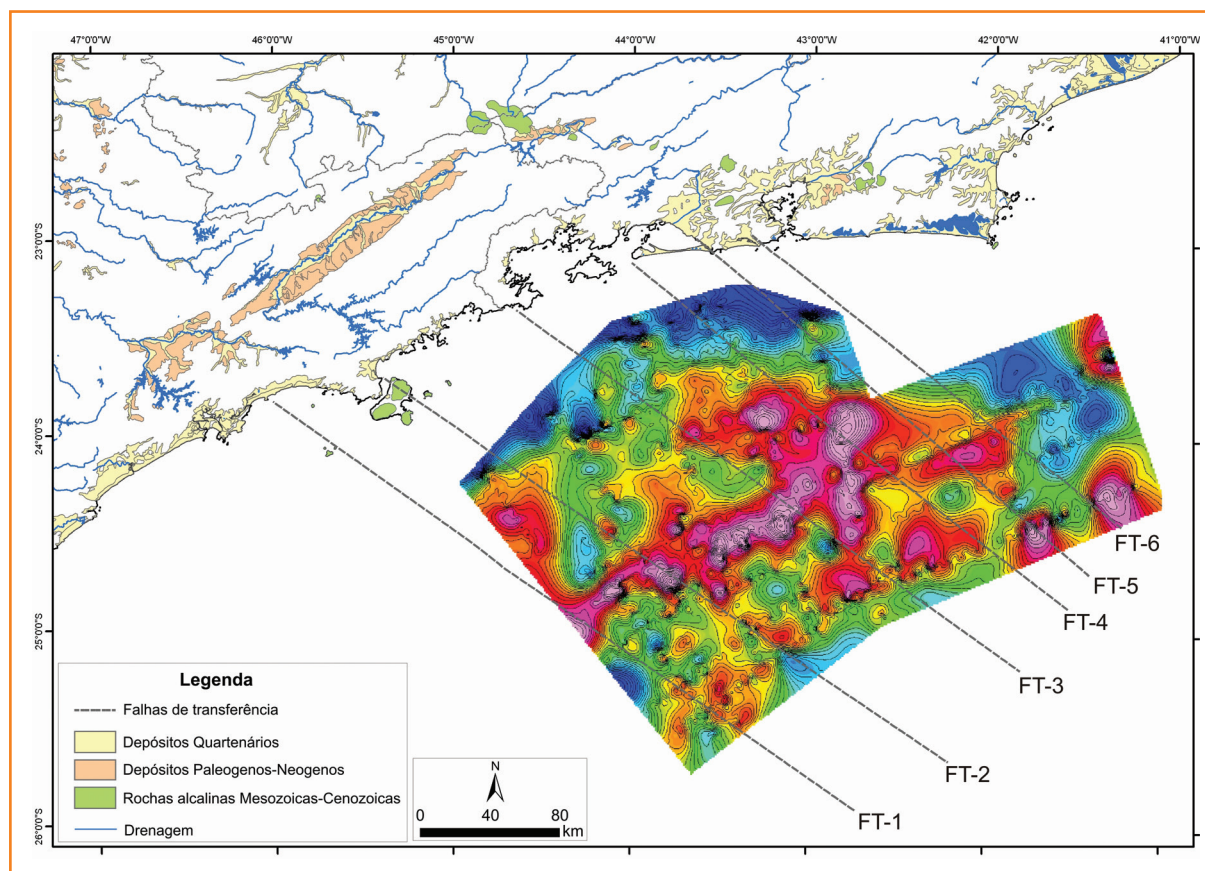
Figure 18
Part of the seismic sections of interpreted *strike* highlighting the transfer faults FT-1 and FT-2.

Figura 19

Mapa de isócrona do Rifte e as falhas de transferência identificadas. As cores quentes (rosa) indicam áreas de maiores espessuras e as frias (azul) as de menores espessuras.

Figure 19

Isochron map of the Rift and the identified transfer faults.



principal indicados pelos altos valores da anomalia (em vermelho). Na porção distal dos mapas estruturais do Embasamento e do Topo do Rifte (figs. 14 e 15), a falha limita os blocos altos e baixos. Nas seções sísmicas *strike* (fig. 21), a FT-6 está no limite entre os blocos e, na parte central, ela controla a formação das estruturas halocinéticas (diápiros e muralha de sal). Observa-se, também, que há evidências de reativações onde as falhas interceptam as camadas mais recentes.

As interpretações das seções sísmicas, mapas estruturais dos intervalos e métodos potenciais permitiram interpretar as feições estruturais transversais de direção NW-SE como falhas de transferência. Esses resultados de subsuperfície foram integrados com os obtidos nas interpretações do continente por Modelo Digital do Terreno, em ambiente SIG (fig. 22) e tridimensional (figs. 23 a 25). A integração permitiu observar que, dos lineamentos principais interpretados no continente, somente seis deles (de direção NW) coincidem com as falhas de transferência identificadas na bacia (figs. 14 a 21) e são descritas a seguir:

integração dos dados e conclusões

A utilização dos métodos indiretos aplicados para o estudo das grandes feições estruturais de superfície (MDT) e subsuperfície (sísmica e métodos potenciais) têm se mostrado bastante eficiente. Esses métodos, quando tratados como ferramentas adequadas, proporcionam maior confiabilidade nos resultados.

- A descontinuidade FC-1, localizada na porção sul da área, atravessa a Bacia de São Paulo até o litoral da região de Santos e coincide com a falha de transferência FT-1 da Bacia de Santos (figs. 22 e 23). É representada por lineamentos de curto comprimento, com alguns deslocamentos da estruturação principal do continente (NE) e também coincidem com a feição identificada no mapa de anomalia Bouguer. Como a Bacia de São Paulo e seu preenchimento são do Paleogeno, essa descontinuidade está associada à reativação cenozoica observada na falha de

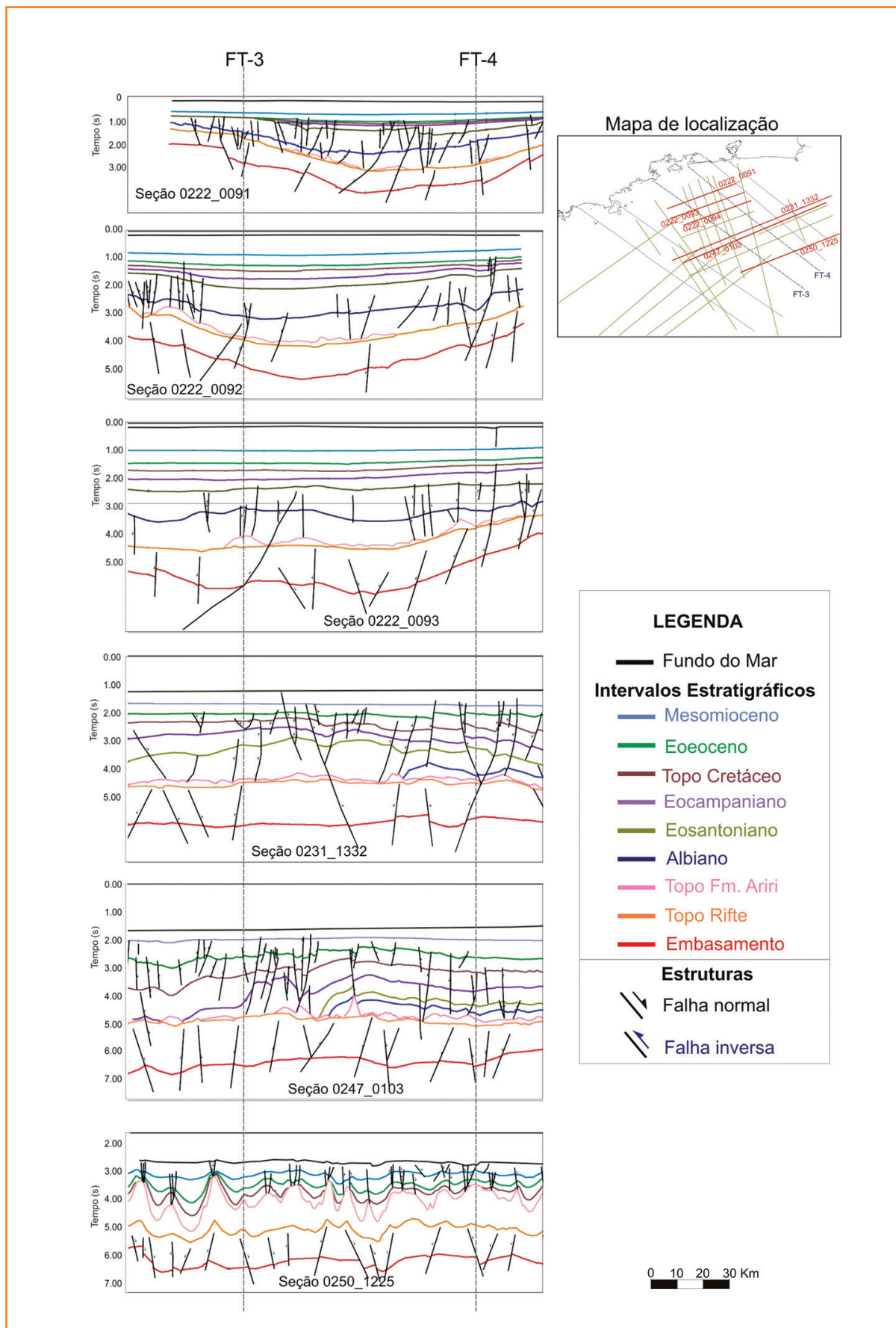


Figura 20

Parte das seções sísmicas strike interpretadas destacando as falhas de transferência FT-3 e FT-4.

Figure 20

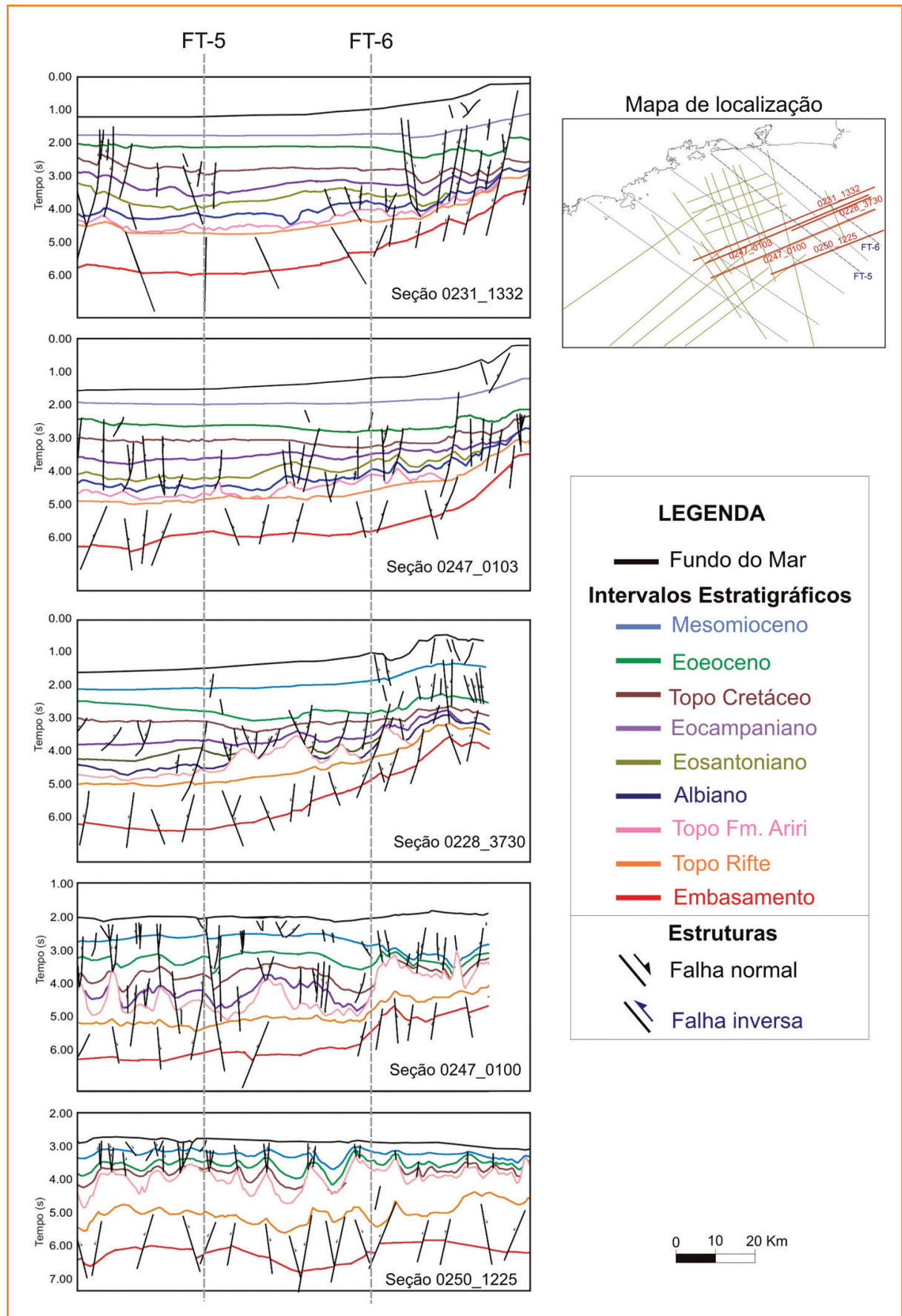
Part of the seismic sections of interpreted strike highlighting the transfer faults FT-3 and FT-4.

Figura 21

Parte das seções sísmicas *strike* interpretadas destacando as falhas de transferência FT-5 e FT-6.

Figure 21

Part of the seismic sections of interpreted *strike* highlighting the transfer faults FT-5 and FT-6.



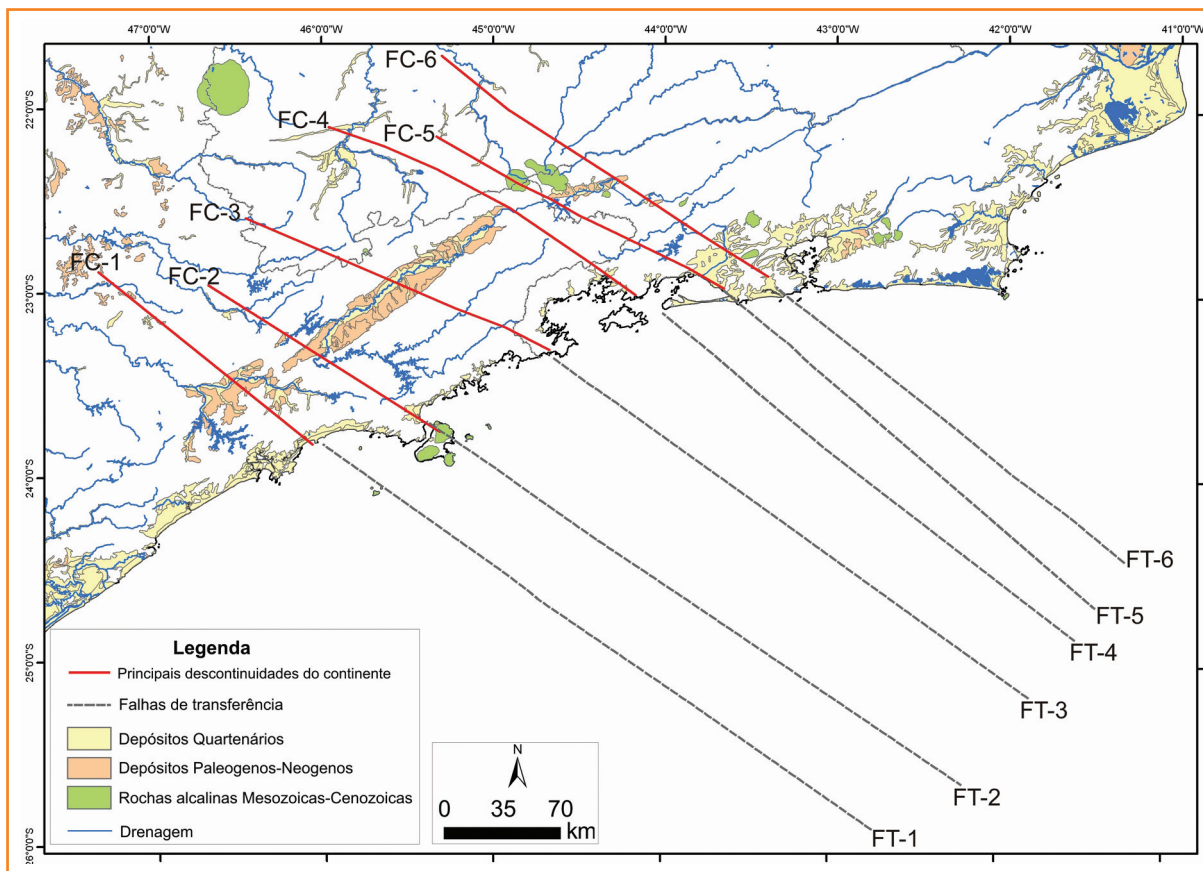


Figura 22
 Mapa de integração em ambiente SIG das principais descontinuidades do continente com as falhas de transferência identificadas.

Figure 22
 Integration in the GIS environment of the main continent discontinuities with the identified transfer faults.

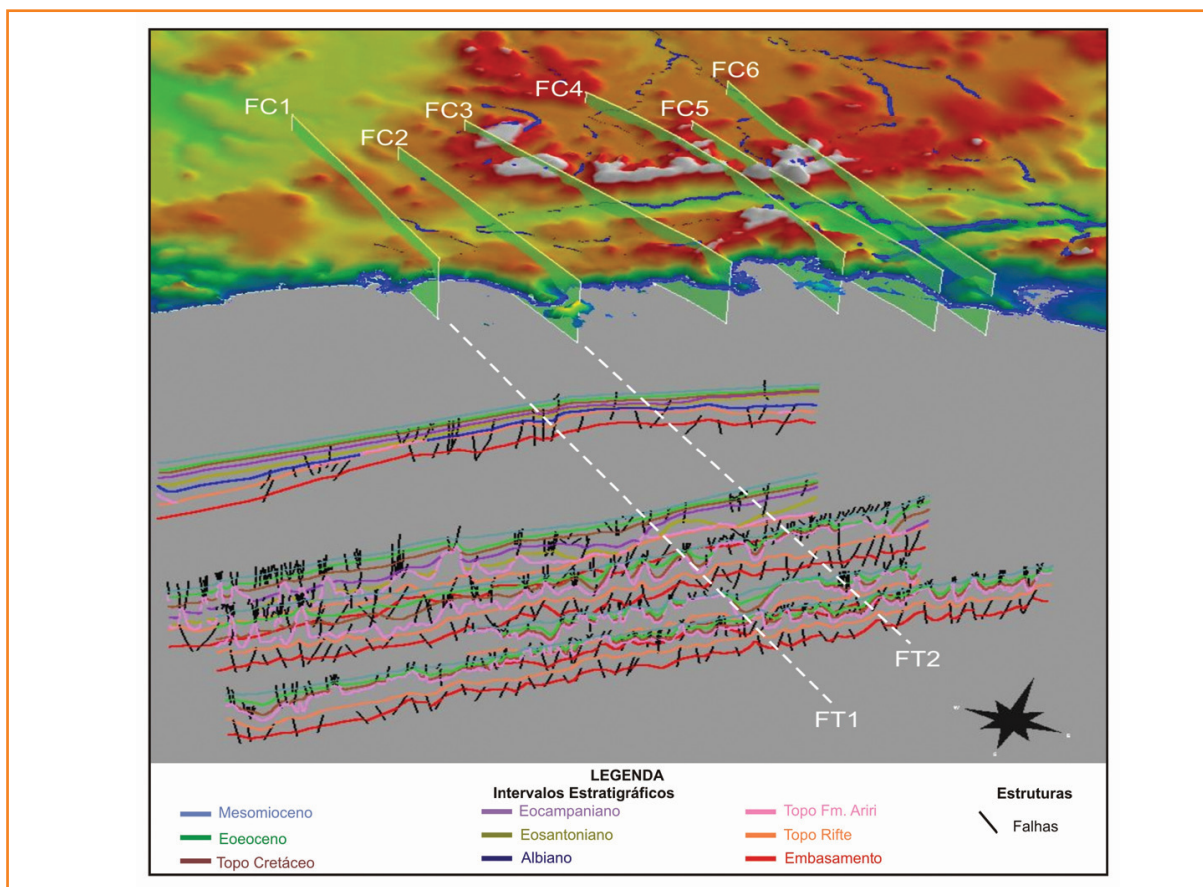


Figura 23
 Integração em ambiente tridimensional das principais descontinuidades do continente (FC-1 e FC-2) com as falhas de transferência (FT-1 e FT-2).

Figure 23
 Integration in the three-dimensional environment of the main continent discontinuities (FC-1 and FC-2) with the identified transfer faults (FT-1 and FT-2).

Figura 24

Integração em ambiente tridimensional das principais descontinuidades do continente (FC-3 e FC-4) com as falhas de transferência (FT-3 e FT-4).

Figure 24

Integration in the three-dimensional environment of the main continent discontinuities (FC-3 and FC-4) with the identified transfer faults (FT-3 and FT-4).

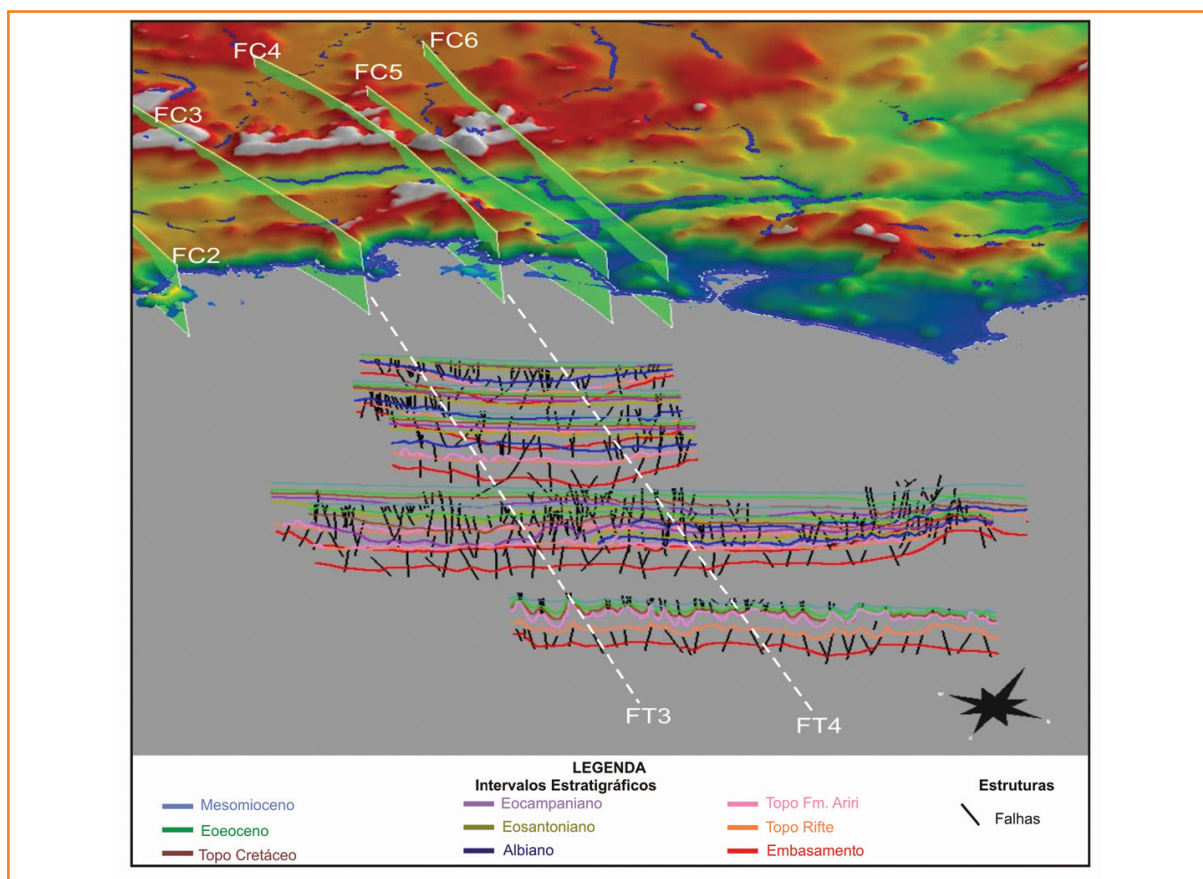
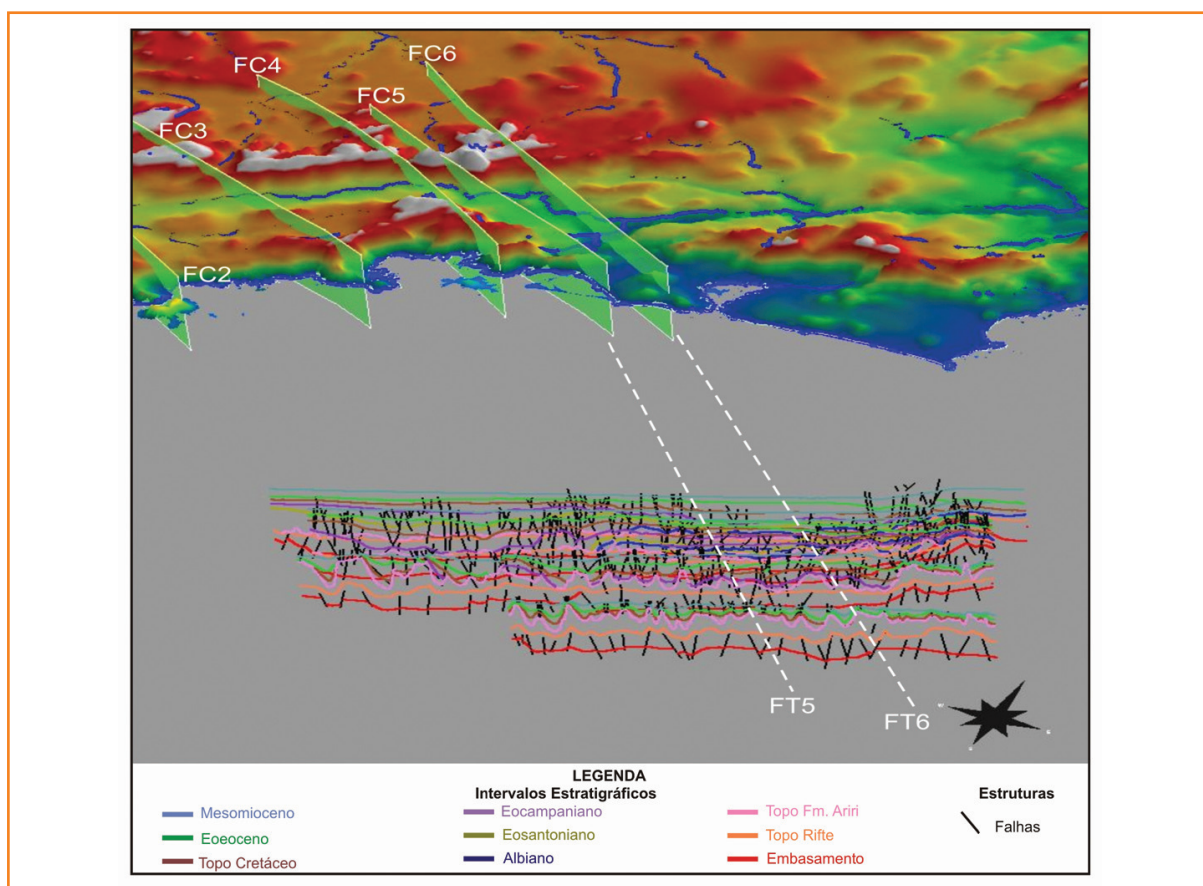


Figura 25

Integração em ambiente tridimensional das principais descontinuidades do continente (FC-5 e FC-6) com as falhas de transferência (FT-5 e FT-6).

Figure 25

Integration in the three-dimensional environment of the main continent discontinuities (FC-5 and FC-6) with the identified transfer faults (FT-5 and FT-6).



transferência FT-1 nas seções sísmicas, onde as falhas interceptam intervalos com idades até o Eooceno (fig. 18).

- A descontinuidade FC-2 tem continuidade na falha de transferência FT-2 e passa pela região da Ilha de Sebastião, prolongando-se para a Bacia de Taubaté (figs. 22 e 23). Essa borda, de acordo com os dados gravimétricos do trabalho de Fernandes e Chang (2003), é caracterizada por um alto estrutural. Essa descontinuidade sofreu reativações durante o Neomesozoico e Cenozoico, onde, de acordo com a projeção para a Bacia de Santos, é possível observar que as falhas interceptam os intervalos do Eosantiano e Eooceno (fig. 18).
- A descontinuidade FC-3 corresponde à falha de transferência FT-3 da Bacia de Santos. Passa pela região de Parati e alcança a porção nordeste da Bacia de Taubaté (figs. 22 e 24), onde coincide com o Alto Capela Nossa Senhora do Socorro, que separa as sub-bacias de Quirimim e Roseira (Marques, 1990). Os lineamentos tectônicos identificados nas imagens que representam a descontinuidade FC-3 interceptam algumas estruturas principais do Pré-Cambriano (direção NE). A análise das seções sísmicas indica reativações durante o Neocretáceo e Eoceno (fig. 20).
- A descontinuidade FC-4 passa pela região da Ilha Grande e coincide, no interior, com o alto estrutural referido como Soleira de Queluz, que separa as bacias de Taubaté e Resende. Esse alto foi controlado por sistemas de falhas NW (Riccomini, 1989). Em direção à Bacia de Santos, a descontinuidade F7 se projeta na falha de transferência FT-4 (figs. 22 e 24). Nas seções sísmicas, é possível observar a presença de estrutura-em-flor negativa e indicação de que a descontinuidade sofreu reativação cenozoica (fig. 20).
- A descontinuidade FC-5, com projeção para a falha de transferência FT-5 (figs. 22 e 25), está localizada na região de Sepetiba e segue para o interior com sentido à porção central da Bacia de Resende. Esta descontinuidade coincide com a Zona de Transferência de Funil, identificada pela interpretação de anomalia Bouguer por Almeida (2002), onde esta desloca a Sutura de Abre-Campo (Haralyi *et al.*, 1985). Observou-se

que o conjunto de lineamento SNW passa pela região entre os maciços alcalinos Itatiaia e Morro Redondo, ambos do Paleogeno. As seções sísmicas que cruzam essa descontinuidade na Bacia de Santos interceptam camadas mais recentes (Holoceno), indicando reativação cenozoica (fig. 21).

- A descontinuidade FC-6 tem sua projeção situada na borda nordeste das bacias de Resende e Volta Redonda até próximo à Baía de Guanabara, e se ajusta com a falha de transferência FT-6 (figs. 22 e 25). Essa descontinuidade entre a região de Volta Redonda e Barra do Piraí coincide com a Zona de Transtensão de Volta Redonda (Valeriano e Heibron, 1993) representada por falhas transcorrentes dextrais que deslocam lateralmente as estruturas pré-cambrianas de direção NE. Os maciços alcalinos Serra dos Tomazes e Mendanha do Paleogeno são interceptados por esta descontinuidade. Nas seções sísmicas, a projeção da FC6 está associada com as falhas de transferência identificada por Mohriak *et al.*, (1995) na região do Alto de Cabo Frio. A descontinuidade FC-6 apresenta reativação cenozoica que pode ser evidenciada no limite da borda das bacias de Resende e Volta Redonda e nas seções sísmicas onde as falhas interceptam o intervalo Mesomioceno (fig. 21).

Em geral, as falhas de transferência interpretadas na porção norte da Bacia de Santos influenciaram na estruturação e evolução da bacia, uma vez que se originaram durante o evento distensivo, afetando o principal *trend* estrutural (direção NE-SW) da bacia (Mohriak, 2004; Modica e Brush, 2004). É notável constatar sua reativação em algumas seções sísmicas, onde interceptam horizontes desde o embasamento até as camadas mais recentes.

A integração dos dados também permitiu identificar alguns eventos tectônicos. O primeiro, durante a fase rifte, está associado a processos extensionais que reativaram as grandes estruturas do embasamento (zonas de cisalhamento) de direção NE-SW, como falhas normais gerando *horsts* e grábens preenchidos por sedimentos continentais (Chang *et al.*, 1992; Macedo, 1987; Mohriak, 2004). Essa fase também foi responsável pela formação das falhas de transferência de direções NW-SE e NNW-SSE observadas nas seções sísmicas e mapas estruturais nos intervalos entre o Embasamento e Topo do Rifte.

A segunda fase se deve à tectônica halocinética, originada a partir dos primeiros aportes sedimentares (Albiano), resultando no deslocamento do sal e formando intrusões diapíricas, muralhas e falhas devidas à acomodação do sal. A halocinese deforma os intervalos sobrepostos à Formação Ariri e, em porções mais distais, as camadas de sal interceptam outras camadas mais recentes.

O terceiro evento tectônico ocorreu após a fase rifte. Foram observadas feições estruturais (nos mapas estruturais e seções sísmicas) interceptando os intervalos desde o Albiano até o Eooceno, caracterizadas por falhamentos normais e reversos. No continente, essa fase está associada ao primeiro evento de soerguimento da Serra do Mar (Senoniano), responsável pelo grande aporte sedimentar progradante para a bacia (Macedo, 1987, 1989), e reconhecida nas seções sísmicas *dip* na forma de cunhas clásticas nos intervalos do Santoniano (Fm. Juréia) ao Topo do Cretáceo. Em algumas seções sísmicas, as falhas geradas durante a fase rifte foram reativadas como normais, sendo que, algumas delas, revertem para falha.

O quarto evento ocorreu a partir do Paleoceno e está associado à segunda fase de soerguimento da Serra do Mar, reativando as grandes zonas de cisalhamento do continente, dando origem às bacias do Sistema Rifte Continental (Riccomini, 1989). Nas seções sísmicas da Bacia de Santos, observam-se algumas falhas normais, inversas e de transferências, seccionando o intervalo do Eooceno. Esta fase modificou o quadro evolutivo da bacia e a geomorfologia do continente, sendo o soerguimento da serra o responsável pelo rearranjo da rede de drenagem.

A última fase é associada a eventos neotectônicos, em que falhas truncam o intervalo do Mesomioceno, algumas delas cortando tanto o intervalo da fase rifte quanto as camadas mais jovens da Bacia de Santos. Na parte continental, foram separados os lineamentos que interceptam os sedimentos das bacias cenozoicas, cujas feições lineares apresentam direção preferencial NW-SE.

agradecimentos

Ao Programa de Recursos Humanos para o Setor de Petróleo e Gás - PRH-05-ANP/MCT, pelo apoio através de uma bolsa de pesquisa de pós-graduação e a instalação do Laboratório de Interpretação de Dados Sísmicos e Geológicos (LISG). Contou com apoio da *Landmark Graphics* que cedeu diversos módulos do programa *Landmark* e *Geographix* e com a ANP/BDEP que forneceu os dados para finalidades acadêmicas. À Eng. Geof. Dr^a. Maria Gabriela C. Vicentelli, que auxiliou na implantação das ferramentas de trabalho. Ao Gilmar Vital Bueno, pelo convite para participar do BGP.

referências bibliográficas

ALMEIDA, S. H. S.; EBERT, H. D. Arcabouço crustal e gravimetria do Cinturão Ribeira na Margem Continental na Região Limítrofe entre os Estados de São Paulo e Rio de Janeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 41., 2002, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: Sociedade Brasileira de Geociências, 2002. p. 289.

ALMEIDA, S. H. S. **Tectônica e gravimetria do Cinturão Ribeira na divisa entre os estados de São Paulo e Rio de Janeiro**. 2002. 203 p. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2002.

AMARAL, G. Métodos para a obtenção de informação estrutural em produtos de sensoriamento remoto. **Cadernos IG/UNICAMP**, Campinas, v. 4, n. 1, p. 98-111, 1994.

BIZZI, L. A.; SCHOBENHAUS, C.; GONÇALVES, J. H.; BAARS, F. J.; DELGADO, I. M.; ABRAM, M. B.; LEÃO NETO, R.; MATOS, G. M. M.; SANTOS, J. O. S. (Org.). **Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil**: Sistema de Informações Geográficas – SIG. Brasília: Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais, 2001. Mapas. Escala 1:2.500.000. 4 CD-ROM.

CHANG, H. K.; KOWSMANN, R. O.; FIGUEIREDO, A. M. F.; BENDER, A. A. Tectonics and stratigraphy of the East Brazil Rift system: an overview. **Tectonophysics**, Amsterdam, v. 213, n. 1-2, p. 97-138, Oct. 1992.

- DEMERCIAN, L. S.; SZATMARI, P. Thin-skinned gravitational Transfer Zone in the Southern Part of Santos Basin. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 6., 1999, Rio de Janeiro. **Expanded Abstracts**... Rio de Janeiro: SBGf, 1999. 1 CD-ROM.
- FERNANDES, F. L.; CHANG, H. K. Arcabouço estrutural da Bacia de Taubaté. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, 9., 2003, Búzios. **Boletim de Resumos**... Búzios: Sociedade Brasileira de Geologia, 2003. p. 367-370.
- HARALYI, N. L. E.; HASUI, Y.; MIOTO, J. A.; HAMZA, V. M.; RODRIGUES, C. R. V. Ensaio sobre a estruturação crustal do Estado de Minas Gerais com base na informação geofísica e geológica. **Contribuições à Geologia e à Petrologia**, Belo Horizonte: SBG, 1985. p. 71-93. (Boletim Especial - Volume Djalma Guimarães).
- LIU, C. C. **Análise estrutural de lineamentos em imagens de sensoriamento remoto**: aplicações ao Estado do Rio de Janeiro. 1984. 157 p. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1984.
- MACEDO, J. M. **Evolução estrutural da Bacia de Santos e áreas continentais adjacentes**. 1987. 173 p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 1987.
- MACEDO, J. M. Evolução Tectônica da Bacia de Santos e áreas continentais adjacentes. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 3, n. 3, p. 159-173, jul./set. 1989.
- MARQUES, A. Evolução tectono-sedimentar e perspectivas exploratórias da Bacia de Taubaté, São Paulo, Brasil. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 4, n. 3, p. 253-262, jul./set. 1990.
- MODICA, C. J.; BRUSH, E. R. Postrift sequence stratigraphy, paleogeography, and fill history of the deep-water Santos Basin, offshore southeast Brazil. **AAPG Bulletin**, Tulsa, v. 88, n. 7, p. 923-945, July 2004.
- MOHRIAK, W. U.; MACEDO, J. M.; CASTELLANI, R. T.; RANGEL, H. D.; BARROS, A. Z. N.; LATGÉ, M. A. L.; RICCI, J. A.; MIZUSAKI, A. M. P.; SZATMARI, P.; DEMERCIAN, L. S.; RIZZO, J. G.; AIRES, J. R. Salt tectonics and structural styles in the deep-water Province of the Cabo Frio Region, Rio de Janeiro, Brazil. In: JACKSON, M. P. A.; ROBERTS, D. G.; SNELSON, S. (Ed.). **Salt tectonics**: a global perspective. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1995. p. 273-304. (AAPG Memoir, 65).
- MOHRIAK, W. U. Recursos energéticos associados à ativação tectônica Mesozoico-Cenozoico da América do Sul. In: MANTESSO NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C. D. R.; BRITO NEVES, B. B. (Ed.). **Geologia do Continente Sul-Americano**: evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. São Paulo: Beca, 2004. p. 293-318.
- RICCOMINI, C. **O rifte continental do sudeste do Brasil**. 1989. 256 p. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.
- VALERIANO, C. M.; HEILBRON, M. A Zona de Transensão de Volta Redonda e sua importância na junção entre os riftes do Vale do Paraíba e o da Guanabara: dados preliminares. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE, 3., 1993, Rio de Janeiro. **Atas**... Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geologia, 1993. p. 9-16.
- ZALÁN, P. V. A tectônica transcorrente na exploração de petróleo: uma revisão. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 16, n. 3, p. 245-257, set. 1986.

expanded abstract

The structures transverse/sub-transverse to the coast were identified and characterized in the Precambrian basement of the continental area adjacent to the northern portion of the Santos Basin. These structures were related to transfer faults and the basin deformation and evolution.

The continental area study analyzed structural, tectonic and geomorphological aspects looking for lineaments on images of digital elevation model SRTM 90m in GIS and 3D environments. Approximately, 5,600 NW-SE and NNW-SSE lineaments were extracted, which truncate the foliation of the precambrian rocks in a predominantly NE-SW direction. They were selected and classified into 47 major lineaments based on the continuity of the segments. These lineaments were used for subsurface geophysical data interpretation.

The northern portion of the Santos Basin was interpreted taking into account 25 2D seismic sections, 12 well logs, and airborne magnetic and gravity data supplied by BDEP-ANP.

Gamma ray, sonic and density profiles were elaborated for each well. The profiles of different wells were correlated using age information to identify the stratigraphic intervals. Nine intervals were recognized: Middle Miocene, Eocene, Top of the Cretaceous, Early Campanian, Santonian, Albian, Ariri Formation, Top of the Rift, and Basement.

Faults were interpreted and the stratigraphic intervals limited in seismic sections. To better understand the structural framework, time maps were elaborated by stratigraphic interval interpolation and aggregating data obtained from the interpretation of aeromagnetic and gravity maps.

The NW-SE and NNE-SSW features observed in the structural maps correspond to transverse/sub-transverse faults, with indications of lateral movement, flower structures, inversion of the displacements at depth, abrupt changes in thickness or even disappearance of reflectors along the seismic section. They are interpreted as transfer faults.

The integration of this data in a 3D environment led to the identification of six sets of transfer faults labeled FT-1 to FT-6. Six lineaments in a NW-SE direction were also identified on the continent, designated FC1 to FC6, which are extensions of the FTs.

FC1 coincides with the FT-1 extension and is located in the southern domain of the area, crossing the São Paulo Basin and reaching the city of Santos on the coast. It is represented by short length lineaments with some displacements of the NE-SW basement structures, and has a signature on the map of the Bouguer anomaly. The São Paulo Basin is Paleogene and this discontinuity is associated with Cenozoic reactivation observed in FT-1 by the faults intersecting the intervals up to the Eocene in seismic sections.

FC2 has continuity in FT-2 and extends from the São Sebastião Island to the Taubaté Basin, where the gravity data indicates a structural high. FC2 was reactivated in the Upper Mesozoic and Cenozoic, as faults intersecting the Early Santonian and Eocene intervals as seen in its extension to the Santos Basin.

FC3 matches the FT-3 offshore. It extends from the region of Parati to the northeastern portion of Taubaté Basin, where it coincides with the structural high Alto Capela Nossa Senhora do Socorro separating the Quiririm and Roseira sub-basins. The lineaments of FC3 intercept the major Precambrian structures. Reactivation during the Late Cretaceous and Eocene are recognized in FT-3 by seismic section analysis.

FC4 extends from the Ilha Grande region to the structural high of Queluz, which separates the Taubaté and Resende basins and is controlled by the NW-SE fault systems. Towards the Santos Basin FC4 connects to FT-4. Negative flower structure observed in seismic sections indicates Cenozoic reactivation of the discontinuity.

FC5 extends from the Sepetiba region to the central portion of the Basin of Resende, and crosses the region between the Paleogene Itatiaia and Morro Redondo alkaline intrusions. It coincides with the Precambrian Funil Transform Zone, identified by interpretation of the Bouguer anomaly, which seems to displace the Abre Campo Suture (Paleoproterozoic). FC5 has a projection into the FT-5, which intersect most recent layers (Holocene) in seismic sections, indicating Cenozoic reactivation.

FC6 fits with the FT-6 and extends from the area between the basins of Resende and Volta Redonda to the neighborhoods of the Guanabara Bay. It coincides with the so-called Transtensional Zone of Volta Redonda, represented by dextral strike-slip faults that laterally displace Precambrian structures in the region of Volta Redonda and Barra do Pirai. The Paleogene alkaline intrusions of Tomaz and Mandanha are intercepted by this discontinuity. The offshore projection of FC6 is associated with the transfer faults recognized in seismic sections of the Cabo Frio High. Cenozoic reactivation is detected at the boundary of the Resende and Volta Redonda basins and in seismic sections where faults intersect the Middle Miocene interval.

In general, the transfer faults in the northern portion of the Santos Basin influenced its structure and evolution. They originated during the extensional event and affected the main NE-SW structural trend of the basin. Also, in some places, they controlled the salt tectonics, as may be observed in the structural maps. It is remarkable to note their reactivation in some seismic sections, intersecting the stratigraphic levels from the basement up to the most recent layers.