



UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO
FACULDADE DE GEOLOGIA

Luiz Guilherme Almeida do Eirado Silva

**A INTERAÇÃO ENTRE OS EVENTOS TECTÔNICOS E A
EVOLUÇÃO GEOMORFOLÓGICA DA SERRA DA BOCAINA,
SUDESTE DO BRASIL**

RIO DE JANEIRO

2006

Luiz Guilherme Almeida do Eirado Silva

**A INTERAÇÃO ENTRE OS EVENTOS TECTÔNICOS E A
EVOLUÇÃO GEOMORFOLÓGICA DA SERRA DA BOCAINA,
SUDESTE DO BRASIL**

Dissertação apresentada como requisito
a obtenção do título de Doutor, ao
Programa de Pós-Graduação em Análise de Bacias
e Fixas Móveis da Faculdade de Geologia,
da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Monica Heilbron

Co-orientadora: Prof^a. Dr^a. Ana Maria Netto

RIO DE JANEIRO

2006

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ/REDE SIRIUS/BIBLIOTECA CTC/C

S586 Silva, Luiz Guilherme Almeida Eirado.
A interação entre os eventos tectônicos e a evolução geomorfológica da Serra da Bocaina, Sudeste do Brasil / Luiz Guilherme Almeida Eirado Silva. – 2006.
273 f. : il.

Orientador: Monica Heilbron.
Co-orientador: Ana Maria Netto
Tese (doutorado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Geologia.

1. Geologia estrutural - Mar, Serra do - Teses. 2. Geomorfologia - Mar, Serra do - Teses. I. Heilbron, Monica. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Faculdade de Geologia. III. Título.

CDU 551.243

Luiz Guilherme Almeida do Eirado Silva

**A INTERAÇÃO ENTRE OS EVENTOS TECTÔNICOS E A EVOLUÇÃO
GEOMORFOLÓGICA DA SERRA DA BOCAINA,
SUDESTE DO BRASIL**

Dissertação apresentada como requisito
a obtenção do título de Doutor, ao
Programa de Pós-Graduação em Análise de Bacias
e Faixas Móveis da Faculdade de Geologia,
da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Aprovada em_17 de março de 2006

Banca Examinadora:

Profª. Drª. Monica Heilbron (Orientadora)
Faculdade Geologia da UERJ

Profª. Drª. Ana Maria Netto
Faculdade de Geologia da UERJ

Prof. Dr. Miguel Tupinambá
Faculdade de Geologia (UERJ)

Prof. Dr. Jorge Carlos Della Fávera
Faculdade de Geologia (UERJ)

Profª. Drª. Maria Lídia Vignol-Lelarge
Faculdade de Geologia (UFRGS)

Prof. Dr. Cláudio Riccomini
Faculdade de Geologia (USP)

Duas almas residem, aí! Em meu
peito: Uma quer separar-se da outra;
Uma, mediante órgãos tenazes,
Aferra-se ao mundo num rude deleite amoroso;
A outra eleva com vigor das trevas
Aos campos de excelsos antepassados.

Goethe, Fausto,
I

À Natureza maravilhosa da Serra da Bocaina

AGRADECIMENTOS

À querida e eterna amiga Monica Heilbron, com sua generosa energia que agrega e movimenta o que lhe cerca. Agradeço o carinho, os ensinamentos e o entusiasmo na orientação de mais este trabalho. Esta tese é dedicada a você.

À amiga Ana Maria Netto pelo estímulo na realização desta tese e a dedicação em que me orientou no mundo do traço de fissão em apatitas.

Ao grande amigo Julio Almeida a quem devo muito do meu conhecimento de geologia de campo e sua participação em vários momentos, desde o início deste trabalho. Sinta-se também um orientador desta tese.

Ao amigo Claudio Valeriano, geólogo de primeira grandeza, com quem também aprendi muito no nosso convívio.

Ao amigo Miguel Tupinambá, grande parceiro de diversos trabalhos e pela inestimável leitura crítica desta tese.

Ao grande amigo Marcelo Motta “Mancha”, companheiro velho, que com sua percepção geomorfológica muito enriqueceu esta tese em idéias e belas ilustrações. Agradeço o estímulo e os presentes ao longo deste trabalho.

Às queridas amigas Cláudia Valladares e Beatriz Duarte pelo constante apoio e estímulo. Muito obrigado!

À minha querida mãe Maria Dalva pelo carinho, enorme dedicação e a força que tem me deu na reta final deste trabalho.

À minha querida e generosa irmã Angelica, sempre presente e que no final desta tese me prestou dedicação inestimável. Deixo clara a minha eterna e calorosa gratidão a você.

Ao irmão Miguel Buck, pela eterna e generosa amizade. Agradeço sua dedicação ao final desta tese, pela cuidadosa confecção de várias figuras.

Aos amigos do *TEKTOS* – Grupo de Pesquisa em Geotectônica da UERJ, Nely Palermo, Ambrosina Gontijo-Pascutti (Zina), Diana Ragatky, Renata Schmitt, José Renato Nogueira e Mauro Geraldés. Abraços a todos.

À amiga Fatima Dios, colega de longo tempo, pelo apoio na redação do *abstract*.

A Walter Agripino “Bobô”, companheiro de muitas aventuras nas estradas da *Sierra Madre*.

A Hardley Cordeiro que tanto me ajudou durante sua estada no *TEKTOS*.

À Miriam, Selma e Edna pelo apoio nos bastidores administrativos.

A toda equipe do LGPA - Laboratório Geológico de Preparação de Amostras da UERJ, em especial à Rosalva, pela sua dedicação, Alan, Jorge Barbosa e Miguel Arcanjo. Todos prestaram grande auxílio nas tarefas de laboratório. À Ana Paula do LATF - Laboratório de Traço de Fissão, pelo auxílio nas análises das amostras.

À Prof^a. Lídia Vignol-Lelarge (UFRGS), pelo grande suporte nos cálculos de TFA e pela agradável recepção em Porto Alegre.

Ao Prof. Jorge Della Fávera aos conhecimentos passados em seus cursos.

Ao Prof. Ronaldo Melo pela coleta da amostra F-2 para TFA.

Ao Prof. Rui Azevedo pelo apoio.

Ao Prof. Cláudio Riccomini (USP) pelas valiosas sugestões que fez como membro da banca avaliadora desta tese.

Este trabalho contou com a inestimável participação dos alunos de graduação da UERJ que orientei na Serra da Bocaina e na Baía da Ilha Grande, que muito contribuíram com esta tese:

às queridas Raquel Theodoro e Maite Medeiros; ao Alexandre *Rob* Brugger, Alexandre *Zen* Cuellar, Marcelo Ambrósio, Pedro Rossi, Manollo e Sabrina. E ainda à Ilana Nina e ao João Fernandes de Mello, da PUC.

Além destes, agradeço ao André *Johnny*, velho companheiro da *Sierra Madre*, João Guerreiro, Edmundo, Humberto e Siana.

À Sheilla pela primorosa arte final de muitas figuras e anexos desta tese.

Aos geólogos Guilherme Almeida, que realizou o mapeamento geológico na Ilha Grande, e Anderson Neves, pelo fornecimento de dados estruturais.

Aos queridos Iza e André do Eirado & famílias, pela amizade que nos une e pela liberdade em freqüentar a linda Fazenda Jaguaquara. E aos saudosos tios Buck & Maria Lúcia, que me levaram à *Sierra Madre*, pelo apoio afetuosos.

Ao amigo Clayton Guia de Almeida, pela sua percepção universal.

Ao grande amigo Ivan Dias, velho companheiro de travessias e sempre em conexão sutil. Seus ensinamentos na arte de fotografar e suas belas imagens da *Sierra Madre* estão aqui presentes.

À Magali Cardoso e Adriana Gronow pela sensibilidade e ampliação dos caminhos.

Aos admiráveis amigos Roland Behr “Milho”, IsaBela e aos queridos Nina e Thomas, pelas agradáveis estadias em sua casa na Bocaina.

Ao Duia, Márcia, e aos saudosos D. Sebastiana e Seu Luiz, que sempre bem me receberam em Bananal.

Ao José Milton, Paula e Fabio (MW Trekking), pela hospitalidade e pela indicação das trilhas da Bocaina.

As várias pessoas dos sertões da Bocaina que me ajudaram durante as caminhadas, em especial à D. Ana da Faz. Santa Isabel e Seu Pedro Camargo.

Ao Daniel Toffoli, chefe do Parque Nacional da Serra da Bocaina (IBAMA) pela permissão das pesquisas de campo no interior desta unidade.

Ao fotógrafo Araquém Alcântara pelas belas imagens da Bocaina.

Ao amigo Marcelo Dantas, companheiro de geomorfologia.

A Y. Gunnell e K. Hodges pelas idéias que chegaram na hora certa.

As pessoas do GEOHECO-UFRJ, onde entre 1990 e 1997 aprendi muito da pesquisa geomorfológica.

Ao *TEKTOS* e à Faculdade de Geologia da UERJ onde nada me faltou para elaborar os trabalhos. Vida longa para o *TEKTOS* !

Ao IPEN-CNEN de São Paulo pela irradiação das amostras para TFA.

Ao Laboratório de Geocronologia Isotópica da UFRGS pelo uso do equipamento Autoscan para TFA.

Ao IBAMA pelo sobrevôo de helicóptero na Serra da Bocaina.

À CAPES pela bolsa de estudos.

Este trabalho contou com o apoio financeiro da FAPERJ, CNPq, CTPetro-FINEP concedido à Monica Heilbron.

RESUMO

SILVA, Luiz Guilherme Almeida Eirado. A interação entre os eventos tectônicos e a evolução geomorfológica da Serra da Bocaina, Sudeste do Brasil. 2006. 273 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

O relevo da Serra da Bocaina revela o forte controle das estruturas dúcteis e rúpteis relacionadas à Faixa Ribeira gerada na Orogênese Brasileira (ca. 790-480 Ma) e às reativações mesozóica-cenozóicas. As rochas são agrupadas em 4 terrenos tectônicos colados nas etapas colisionais brasileiras, que formaram as estruturas mais penetrativas: foliação com mergulho para NW, zonas de cisalhamento dúcteis NE-SW e dobras. Zonas de cisalhamento rúptil-dúcteis NW marcam o colapso orogênico. A abertura do Atlântico Sul (ca. 135-120 Ma) é registrada pelos enxames de diques toleíticos NNE e ENE, em parte condicionados pelas estruturas brasileiras. No Planalto da Bocaina uma idade de traço de fissão em apatita (TFA) de ca. 145 Ma data o resfriamento ainda da fase pré-rifte do Gondwana. O soerguimento da margem continental na fase rifte pode ter alçado este nível para fora da zona de apagamento parcial do TFA. A reativação neocretácea é datada pelo TFA (ca. 85 Ma) na costa e na escarpa atlântica, indicando novo pulso de denudação e soerguimento da margem continental. Isto também concorda com o extenso aporte de sedimentação siliciclástica na Bacia de Santos. No Paleógeno, a formação dos Riftes Continentais do Sudeste Brasileiro (RCSB) gerou a reativação das estruturas dúcteis NE da Faixa Ribeira, falhas e fraturas NW, E-W, além de fraturas NE na Baía da Ilha Grande. O contato tectônico entre os Terrenos Paraíba do Sul e Embu é a principal zona reativada na Serra da Bocaina. Idades TFA (ca. 55 Ma) registram o estágio inicial do RCSB, que provocou o rebaixamento do nível de base e a formação de uma escarpa no interior. A Serra da Bocaina parece constituir uma região elevada desde a formação da *Cordilheira Ribeira*, incrementada pelos soerguimentos das fases rifte e pós-rifte do Atlântico e do RCSB. Estes eventos tectônicos que elevaram a Serra da Bocaina, também geraram as estruturas que conduzem sua denudação. Neste contexto, destaca-se o par de estruturas NE (foliação e zonas de cisalhamento reativadas ou não) e NW (fraturas e falhas), as mais freqüentes, que orienta a rede de drenagem, os níveis de base locais (*knickpoints*) e as formas côncavas das encostas (cabeceiras de canais). Diques toleíticos também conduzem a dissecação dos vales fluviais. Por outro lado, granitos e ortognaisses que sustentam as elevações e segmentos de escarpas mostram o papel da erosão diferencial em rochas mais resistentes. A denudação do Planalto da Bocaina e o recuo de suas escarpas (atlântica e interior) são regulados por diferentes níveis de base (p.ex. nível do mar, rio Paraíba do Sul no RCSB, diversos *knickpoints*), sensíveis aos eventos de reativações tectônicas (soerguimento), variações eustáticas e à erosão diferencial. Os pulsos erosivos vêm dissecando de modo diferencial os vales suspensos do planalto, através da incisão fluvial e reativação das cabeceiras de canais, que avançam sobre as encostas promovendo a quebra dos divisores e capturas de drenagens. Este processo rebaixamento de relevo parece levar à formação das superfícies colinosas que ocorrem em diferentes níveis topográficos. As idades TFA antigas indicam baixas taxas de denudação na porção mais elevada do Planalto da Bocaina, o que contrasta com as altas taxas da região costeira. Este caráter diferencial da denudação condicionada pelo substrato geológico e pelos eventos de soerguimento, vem preservando antigas paisagens no Planalto da Bocaina. No outro extremo, a denudação propagada pelo recuo das duas escarpas vem degradando as bordas e introduzindo a dissecação no interior do planalto. As duas escarpas geradas por eventos riftes distintos vêm se ajustando ao controle das rochas e estruturas da Faixa Ribeira.

Palavras-chave: Geomorfologia da Serra do Mar; Geologia da Faixa Ribeira; Reativação tectônica mesozóica-cenozóica; Termocronologia por traço de fissão em apatitas.

ABSTRACT

SILVA, Luiz Guilherme Almeida Eirado. Interaction between tectonic events and the landscape evolution of Bocaina Ridge, Southeastern Brazil. 2006. 273 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

The Bocaina Ridge landscape is strongly controlled by both ductile and brittle structures related to the Ribeira Belt (Brasiliano Orogeny ca. 790-480Ma) and also to the mesozoic-cenozoic reactivations. The rocks were subdivided in four tectonic terrains accreted in the brasiliano collisional stages. The most prominent structures related to these collisions are: NW dipping foliation, NE-SW ductile shear zones, and folds. NW ductile-brittle shear zones represent the orogenic collapse stage. The South Atlantic opening (ca.135-120 Ma) is registered in NNE and ENE tholeitic dike swarms, partly conditioned by brasiliano structures. In the Bocaina Plateau one apatite fission track age (AFT) of ca.145Ma represents pre-rift Gondwana cooling. The continental margin uplift associated to the rift phase might have raised this level out of the AFT partial annealing zone. Neocretaceous reactivation (ca. 85Ma) was AFT dated both in the coast and the atlantic scarp, pointing out to a newer continental margin denudation and uplift pulse. This reactivation is in accordance with the Santos basin significant siliciclastic sedimentation. In paleogene times, the Southeastern Brazil Continental Rift System (SBCR) development was responsible for: the reactivation of the Ribeira Belt NE ductile structures, NW and E-W faulting and fracturing, and NE fracturing in Ilha Grande Bay. The tectonic boundary between Paraíba do Sul and Embu Terrains is the main reactivation zone in the Bocaina Ridge. AFT ages of ca. 55 Ma register the initial stage of the SBCR, which produced base level lowering and the formation of an inland scarp. The Bocaina Ridge seems to constitute an elevated region since the development of the Ribeira Cordillera, increased by the South Atlantic rift and post-rift uplifts and also by the SBCR.

Keywords: Geomorphology of Serra do Mar; Geology of the Ribeira Belt; Mesozoic-cenozoic tectonic reactivation; Apatite fission track thermochronology.

LISTA DE FIGURAS

Pág.

- Figura 2.1** - Mapa de localização da área de estudo - Serra da Bocaina e Baía da Ilha Grande - na região entre as cidades do Rio de Janeiro e São Paulo, com as principais rodovias de acesso e a rede de drenagem..... 8
- Figura 2.2** - Principais feições geomorfológicas e localização da área de estudo no contexto das serras do Mar e da Mantiqueira e do vale do rio Paraíba do Sul, Sudeste do Brasil. Fonte: imagem *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), USGS-NASA, 2004. 10
- Figura 2.3** - a) Mapa tectônico do sudeste do Brasil com as principais unidades do setor central do Sistema Orogênico Mantiqueira; b) Seção tectônica transversal ao segmento central da Faixa Ribeira (modificado de Heilbron *et al.*, 2004)..... 15
- Figura 2.4** - Mapa tectônico simplificado do Sistema de Riftes Continentais do Sudeste do Brasil (RCSB), mostrando as principais estruturas e unidades geológicas; modificado de Riccomini *et al.* (2004), Heilbron *et al.* (2004), Valeriano & Heilbron (1993) e Almeida (1976)..... 22
- Figura 2.5** - Seções esquemáticas com possível evolução tectônica da borda continental da Bacia de Santos. Modificado de Almeida (1976) e com adendos extraídos de Almeida & Carneiro (1998). As idades dos estágios evolutivos foram atualizadas mediante os novos dados geocronológicos..... 29
- Figura 2.6** - Mapa hipsométrico do Planalto Atlântico no Sudeste do Brasil, limitado a oeste pela depressão periférica e a leste pelas planícies e maciços costeiros. Destacam-se os principais domínios do relevo: as serras e seus planaltos, e as depressões interplanálticas (vales). Fonte: imagem *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), USGS-NASA, 2004..... 32
- Figura 2.7** - Seções topográficas transversais às serras da Mantiqueira e da Bocaina, mostrando a depressão interplanáltica do médio vale do rio Paraíba do Sul entre os dois domínios montanhosos. Destaca-se os domínios das escarpas atlântica e interior que limitam o Planalto da Bocaina, que possui uma inclinação para SE. Notar que na seção (a) o Planalto da Bocaina é estreito comparado à seção (b)..... 33
- Figura 2.8** - Desenho esquemático dos Complexos de Rampas mostrando processos de degradação na encosta, concomitante, a agradação nos fundos de vales na vertente adjacente. Unidades erosivas e deposicionais: C - encosta côncava (hollow), D - encosta convexa (interflúvio), V - voçoroca, 1 - embasamento, 2 e 3 - colúvios antigos, 4 - rampa de colúvio atual, 5 - depósitos aluviais. As cabeceiras de canais situam-se nos segmentos côncavos das encostas, associadas ou não às voçorocas. Modificado de Meis *et al.* (1985)..... 35
- Figura 3.1** - Articulação das fontes dos levantamentos utilizados nesta tese, sendo: a) área do mapa geológico com ênfase as unidades da Faixa Ribeira; b) área para os estudos geomorfológicos e da tectônica mesozóica-cenozóica, com a identificação das folhas topográficas 1:50.000 utilizadas..... 41
- Figura 3.2** - Esquema mostrando as zonas de estabilidade dos traços de fissão em apatitas (ricas em flúor) na crosta. Três caminhos de soerguimento e denudação são mostrados para a mesma origem na base da ZAP: (A) resfriamento rápido; (B) resfriamento lento; (C) resfriamento complexo..... 48
- Figura 3.3** - Distribuição dos comprimentos de traços induzidos (a) e espontâneos (b)

do tufo vulcânico Fish Canyon, mostrando resfriamento rápido; distribuição dos comprimentos de traços indicando resfriamento lento (c) e complexo (d), ambos com aumento de traços curtos. Acompanhar os histogramas com o gráfico à direita, que indica o caminho T-t dessas amostras.....

Figura 3.4 - Fluxograma mostrando as principais etapas de preparação das amostras (seleção dos cristais) para análises de traço de fissão em apatitas..... 54

Figura 3.5 - Esquema dos procedimentos de preparação e ataque químico (revelação) os cristais de apatita para análise de traço de fissão pelo método do detector externo (modificado de Gallagher *et al.*, 1998)..... 56

Figura 3.6 - Container de polietileno onde são colocadas as amostras para irradiação no reator nuclear: apatita para datação, apatita padrão e vidros dosimétricos, todos cobertos pelo detector externo (Kapton). Desenho por Ana Maria Netto..... 59

Figura 3.7 - Microfotografias: a) cristal de apatita com traços de fissão espontâneos; b) imagem espelhada do detector externo com traços de fissão induzidos; c) Imagens do cristal e Kapton sobrepostas, o rebatimento do cristal (a), para auxiliar a identificação do campo a ser contato os traços no microscópio. Amostra CB-L-02, cristal E-6..... 59

Figura 3.8 - a) *Radial plot* indicando as idades central (no caso = a idade *pool*) e média de uma amostra com 15 cristais de apatita. Para determinar a idade individual de cada cristal (nº 14) é só traçar uma linha que saia da origem (0,0), passe pelo grão desejado até a curva da idade. b) Histograma revelando uma distribuição unimodal das idades, mas com um cristal (nº 5) de idade mais velha, indicando não pertencer à mesma população. Exemplo do programa Trackkey 4.2f (Dunkl, 2002)..... 63

Figura 4.1 - Ciclo de erosão de Davis (1989). A linha basal α - \downarrow representa a passagem do tempo, 0 a 4 são estágios evolutivos do relevo: 1) ápice do soerguimento, 2) juvenil, 3) maturidade, 4) velhice. A linha superior B-K representa a altitude média das partes mais altas, enquanto a linha inferior A-J é a altitude media das partes mais baixas. A linha tracejada A'-C corresponde à degradação dos vales, enquanto o segmento C-E-G é a agradação dos vales..... 69

Figura 4.2 - Seções esquemáticas dos modelos de evolução da paisagem elaborados por (A) W.M. Davis, (B) W. Penck e (C) L.C. King. O nível de base é assumido como fixo através do tempo e a escala temporal não é necessariamente a mesma entre os três diagramas. Extraído de Summerfield (1991)..... 69

Figura 4.3 - Esquema mostrando o alargamento dos vales e evolução das encostas, segundo o modelo de rebaixamento do relevo de W.M. Davis (à direita) e de recuo paralelo de W. Penck (à esquerda), na visão de Davis. Extraído de King (1953)..... 71

Figura 4.4 - Formação das superfícies de erosão (pediplanos), segundo o modelo de recuo paralelo das escarpas de L.C. King. As superfícies A-D foram iniciadas durante três episódios de queda do nível de base. Elas são diacrônicas e os sedimentos podem fornecer uma idade mínima local. Extraído de Summerfield (1991)..... 72

Figura 4.5 - Esquema do modelo de denudação diferencial de margens passivas elevadas de Gilchrist & Summerfield (1990). Observar a assimetria da topografia e o recuo do escarpamento da posição inicial na fase rifte até a presente elevação. A taxa de denudação na costa (e1) é maior que no interior continental (e2), gerando uma resposta isostática com maior soerguimento junto à escarpa..... 75

Figura 4.6 - Seção esquemática de margens passivas elevadas. À direita, na margem tipo ombreira o divisor de drenagem (ponto mais elevado) coincide com o topo do

escarpamento. Na margem tipo arco o divisor de drenagem situa-se no interior do <i>plateau</i> , separado do topo do escarpamento. Modificado de Matmon <i>et al.</i> (2002).....	76
Figura 4.7 - (A) Seção simplificada de margem passiva arqueada, situando a paleosuperfície, a discordância basal sob a cunha sedimentar <i>offshore</i> e o escarpamento. A paleosuperfície e a discordância são correlatas. (B) Diagrama mostrando as principais feições geomorfológicas da margem continental. O eixo do arqueamento é o divisor de drenagem regional, gerando inversões no fluxo dos canais fluviais. O recuo do escarpamento segue em direção ao divisor, erodindo a paleosuperfície. Modificado de Ollier & Pain (1997).....	77
Figura 4.8 - Planta esquemática mostrando os controles sobre a evolução dos escarpamentos nas margens rifteadas. As principais relações dos escarpamentos com a rede de drenagem, divisor antecedente, falhas, litologia e clima estão descritas no texto. Extraído de Beaumont <i>et al.</i> (1999).....	78
Figura 4.9 - Idade TFA em função da elevação (relação positiva) e histogramas de distribuição de comprimentos de traços, de rochas em Denali, Alaska. A quebra da inclinação da curva em ~6 Ma e os traços mais longos indicam o início de um pulso de rápido resfriamento. Acima da quebra da inclinação da curva os traços curtos refletem uma paleo-ZAP. Modificado de Fitzgerald <i>et al.</i> , (1995).....	83
Figura 4.10 - Padrões de idade TFA para terrenos com contrastes litológicos, onde o charnockito é mais resistente que o gnaiss (quadro à esquerda). Duas situações podem ocorrer após o aplainamento (A e B). No quadro A ocorre um soerguimento do charnockito devido à reativação tectônica do contato, onde a erosão é mínima. Neste caso, as idades TFA serão semelhantes. No quadro B, como no escudo do sul da Índia, indica uma longa denudação diferencial das rochas, assim as idades TFA na superfície de cada litotipo serão diferentes. Os gnaisses com maior denudação terão idades mais novas que o charnockito. Modificado de Gunnell (2000).....	85
Figura 4.11 - Padrão de resfriamento mostrando um período de estabilidade da denudação (quiescência), interpretado como o aplainamento do relevo, situado entre dois episódios de soerguimento de rochas. Modificado de Gunnell (2000).....	86
Figura 4.12 - Idades TFA para margens passivas em função da distância da costa. As bandas cinzas horizontais representam aproximadamente a idade do rifteamento continental. Extraído de Gunnell (2000).....	88
Figura 4.13 - Comprimentos médios de traços (CMT) em função das idades TFA (<i>boomerang plots</i>) para margens passivas selecionadas da Figura 4.12. As bandas cinzas verticais representam a idade do rifteamento. Extraído de Gallagher <i>et al.</i> (1998).....	89
Figura 4.14 - Domínios de idades TFA para o sul/sudeste do Brasil: A) pré-rifte (> 200 Ma); B) rifte (200-100 Ma); C) pós-rifte (100-0 Ma). O gráfico superior mostra as idades TFA <i>versus</i> elevação topográfica, e o inferior idades TFA <i>versus</i> distância da costa. Extraído de Cobbold <i>et al.</i> (2001), baseados nos resultados de Gallagher <i>et al.</i> (1994).....	90
Figura 4.15 - Três modelos de evolução do relevo de margens passivas: (a) arqueamento da margem (King, 1962; Ollier & Pain 1987); (b) Recuo paralelo das escarpas (King, 1953; Gilchrist & Summerfield, 1990); c) <i>pinned divide</i> (Kooi & Beaumont, 1994; Gilchrist <i>et al.</i> , 1994). O quadro inferior direito motra os padrões de idades TFA previstos para cada modelo, onde 1=a, 2=b, 3=c. Extraído de Gallagher <i>et al.</i> (1998).....	91
Figura 4.16 - Esquemas dos modelos de evolução de escarpamentos em margens	

passivas. Linha preta cheia é a topografia atual; linha tracejada é geometria inicial do rifte; linhas cinza são os estágios intermediários de desenvolvimento. Modelos: (A) arqueamento da margem formando um monoclinial (Ollier & Pain, 1997), onde as idades TFA 1 e 2 deveriam ser similares, mas não têm sido confirmado; (B) recuo paralelo das escarpas de King; (C) rebaixamento (ou declínio) Davisiano. Observar que o volume de crosta denudada no modelo A é, aproximadamente, a metade dos cenários B e C. Extraído de Gunnell (2000)..... 92

Figura 5.1 - Mapa tectônico simplificado da região da Serra da Bocaina e da baía da Ilha Grande com os terrenos da Faixa Ribeira e principais corpos de granitos tardi a pós-colisionais discordantes aos contatos tectônicos..... 96

Figura 5.2 - Biotita gnaisse bandado do Terreno Ocidental com níveis (cm) de rochas calcissilicáticas e quartzitos; rocha apresentando fabric milonítico e dobras D2, próximo ao Limite Tectônico Central (LTC). Afloramento no litoral de Parati, RJ. Foto por Julio Almeida..... 100

Figura 5.3 - Hornblenda-biotita gnaisse migmatítico do Complexo Rio Negro, Terreno Oriental. Notar a variação da morfologia das dobras devido à diferença de competência do bandamento. Afloramento no litoral de Mambucaba, RJ. Foto por Julio Almeida..... 100

Figura 5.4 - (Hornblenda)-biotita gnaisse porfiróide inserido no Complexo Rio Negro, Terreno Oriental. Afloramento no litoral de Mambucaba, RJ..... 102

Figura 5.5 - Hornblenda-biotita gnaisse migmatítico do Complexo Quirino, embasamento do Terreno Paraíba do Sul. Serra do Turvo, Bananal, SP..... 102

Figura 5.6 - Hornblenda-biotita gnaisse porfiróide inserido no Complexo Quirino, Terreno Paraíba do Sul. Serra da Bocaina, Bananal, SP..... 102

Figura 5.7 - Coluna estratigráfica simplificada do Grupo Paraíba do Sul para a área de estudo..... 105

Figura 5.8 - Biotita gnaisse bandado milonítico da Unidade Três Barras, próximo ao contato com a Unidade São João, Grupo Paraíba do Sul. Bananal, SP..... 106

Figura 5.9 - Sillimanita-granada-biotita gnaisse migmatítico da Unidade São João, Grupo Paraíba do Sul. Bananal, SP..... 106

Figura 5.10 - Biotita gnaisse bandado da Unidade Beleza, Grupo Paraíba do Sul. Arapeí, SP..... 106

Figura 5.11 - Hornblenda-biotita gnaisse granitóide Campinho, rico em enclaves de gnaisses mesocráticos e de rochas máficas. Bananal, SP..... 108

Figura 5.12 - Sillimanita-muscovita-biotita gnaisse xistoso da Unidade Rio Paraitinga, Complexo Embu. Campos da Bocaina, S. José do Barreiro, SP..... 108

Figura 5.13 - Fotomicrografia do estauroлита-muscovita-biotita-quartzo xisto da Unidade Rio Paraitinga, Complexo Embu. Campos da Bocaina, S. José do Barreiro, SP... 108

Figura 5.14 - Hornblenda-biotita gnaisse granitóide Taquaral cortado por veio de biotita leucogranito. Resende, RJ..... 111

Figura 5.15 - Biotita granito porfiróide foliado Campo Alegre, Terreno Embu. Alto dos Mouras, Cunha, SP..... 111

Figura 5.16 - Granito porfirítico do Complexo Plutônico Parati com enclave de rocha

máfica. Parati, RJ.....	111
Figura 5.17 - Granito Mambucaba equigranular. Perequê, RJ.....	111
Figura 5.18 - Estereogramas de pólos da foliação principal (S1+S2) e de lineação mineral e de estiramento (L1+L2) para cada terreno (a,b,c,d,e); estão plotados também os traços dos planos máximos (linha cheia) e sub-máximos da foliação. Rede equi-área, hemisfério inferior.....	116
Figura 5.19 - Dobra D2 (tracejado laranja) dobrada por D3 (linha amarela) no ortognaisse do Complexo Rio Negro com enclave máfico, Terreno Oriental. Afloramento no litoral de Mambucaba, RJ.....	117
Figura 5.20 - Afloramento do Limite Tectônico Central (LTC), colocando em contato os paragnaisse do Terreno Ocidental acima com ortognaisse leucocrático porfiróide do Complexo Rio Negro, Terreno Oriental, abaixo. Litoral entre Mambucaba e Parati, RJ....	117
Figura 5.21 - Biotita gnaisse bandado milonítico do Complexo Quirino junto ao empurão basal do Terreno Paraíba do Sul. Afloramento no rio Mambucaba, Perequê, RJ.....	117
Figura 5.22 - Dobras da fase de deformação D2 na Unidade Beleza do Terreno Paraíba do Sul, Arapeí (SP): a) biotita gnaisse com mármore, rio do Capitão Mór; b) rocha calcissilicática, ribeirão do Doce; c) biotita gnaisse alterado, vale do rio Capitão Mór.....	120
Figura 5.23 - Afloramento de sillimanita-muscovita-biotita gnaisse milonítico do Terreno Embu, com forte lineação de estiramento subhorizontal, na Zona de Cisalhamento Rio do Gavião. Trilha do Ouro, Parque Nacional da Serra da Bocaina, S. José do Barreiro, SP.....	120
Figura 5.24 - Roseta de strike da foliação principal (S1+S2) para cada terreno tectônico (a,b,c,d,e); notar a variação gradativa na orientação da foliação, que é ENE no Terreno Oriental (máximo em N65-70E), para N40E (média) nos domínios do Terreno Embu. Em relação ao Terreno Embu, no Domínio I a direção da foliação é mais NNE, diferente do Domínio II que é N45E.....	122
Figura 5.25 - Estereograma das estruturas da fase de deformação D3: eixos de dobras; lineação de crenulação e de interseção; planos médios da foliação S3 e de zonas de cisalhamento D3. Rede equi-área, hemisfério inferior.....	125
Figura 5.26 - Rosetas de orientação (a) e mergulho (b) das zonas de cisalhamento dúctil-rúpteis da fase D4, com intervalos de 5° e 10° respectivamente.....	125
Figura 5.27 - Zonas de cisalhamento dúctil-rúpteis da fase D4 de direção NW, no granada-hornblenda-biotita gnaisse do Complexo Embu. Na foto (b) ocorre zona de cisalhamento preenchida por pseudotaquilito. Campos da Bocaina, S. J. do Barreiro, SP.....	126
Figura 5.28 - Roseta de direção dos diques de rochas toleíticas, para toda área de estudo.....	131
Figura 5.29 - Dique de diabásio de direção NE do Domínio Costeiro, concordante à foliação do ortognaisse do Complexo Rio Negro, Terreno Oriental. Afloramento no litoral de Mambucaba, RJ.....	131
Figura 5.30 - Mapa estrutural destacando os diques toleíticos cretácicos, que estão com espessuras e comprimentos exagerados. a) roseta de orientação dos diques do Domínio Interior Leste; b) roseta de orientação dos diques do Domínio Costeiro.....	133

Figura 5.31 – Desenho esquemático em planta mostrando desvios ao longo os diques toleíticos e extensão NW-SE ortogonal às paredes dos corpos: a) forma escalonada; b) forma em ziguezague, alternando segmento NNE e NE (paralelo à foliação do embasamento). Notar possível movimento direcional sinistral no segmento NE, com predomínio de extensão WMW-ESE. Comparar estes desenhos com os diques dos mapas da Figura 5.30 e do Anexo 3.....	134
Figura 5.32 – Roseta de orientação e mergulho de planos de falhas, com intervalos de 5° e 10°, respectivamente, sendo: a) todas as falhas indiscriminadas, b) falhas com rejeito de mergulho (normais e reversas), c) falhas com rejeito direcional (transcorrentes), d) falhas oblíquas.....	136
Figura 5.33 – a) Falha NE subvertical com mergulho para NW do Domínio Rúptil Alto Paraitinga, em paragnaises com leucogranitos foliados do Terreno Embu; b) detalhe do plano e estria de falha com movimento normal. Campos Novos, Cunha (SP).....	140
Figura 5.34 – Falhas NE com mergulhos para SE e falhas NW do segmento 2 do Domínio Rúptil de reativação da Zona de Cisalhamento Rio do Gavião, em paragnaises do Terreno Embu. Reparar na cor de alteração amarelada da rocha junto aos planos de falhas. Cachoeira do Veado, Parque Nacional da Serra da Bocaina, S. José do Barreiro, SP.....	140
Figura 5.35 – Diagrama de Angelier para planos e estrias de falhas do Domínio Rúptil da reativação da Zona de Cisalhamento Rio do Gavião (ZCRG), sendo: a) segmento 1 da ZCRG, b) segmento 2 da ZCRG.....	142
Figura 5.36 – Diagrama de planos de falhas do Domínio Rúptil da Ilha Grande.....	142
Figura 5.37 – Falhas NW do Domínio Rúptil Bananal (DRB) em paragnaises bandados do Terreno Paraíba do Sul: a) afloramento no chão mostrando falhas com movimento aparente sinistral, Serra da Bocaina, Bananal (SP); b) seção com pequeno <i>horst</i> , Bananal (SP).....	144
Figura 5.38 – Estereograma de pólos de planos de fraturas.....	146
Figura 5.39 – Mapa de orientação de fraturas segundo os terrenos tectônicos da Faixa Ribeira e o Granito Parati, Região da Serra da Bocaina e da Baía da Ilha Grande.....	148
Figura 5.40 – Mapa com orientação de fraturas por setores geográficos da Região da Serra da Bocaina e da Baía da Ilha Grande.....	151
Figura 5.41 – Fraturas de direção NW ortogonais à foliação milonítica do gnaiss do Complexo Quirino, base do Terreno Paraíba do Sul. Afloramento no rio Mambucaba Perequê, RJ.....	153
Figura 5.42 – Fraturas NW ortogonais à foliação do paragnaisse do Terreno Paraíba do Sul. Bananal, SP.....	153
Figura 5.43 – Fraturas NE <i>en echelon</i> em rocha charnockítica do costão da Ilha Grande, RJ.....	153
Figura 6.1 – Imagem Landsat TM (1999) exibindo o Planalto da Serra da Bocaina e os domínios das vertentes adjacentes: VN - vertente norte; VL - leste; VS - Sul; VO - oeste..	165
Figura 6.2 – <i>Knickpoint</i> no rio Paraitinga, no limite entre a borda WNW do Planalto da Bocaina e a vertente oeste. Notar o vale suspenso de baixa amplitude topográfica no domínio do planalto, comparado ao segmento encaixado a jusante com encostas íngremes.....	167

Figura 6.3 - Compartimento de relevo de baixa amplitude topográfica do Planalto da Bocaina. a) Panorama da borda sul do planalto com extenso relevo colinoso, junto a escarpa atlântica. Ao fundo, na direção NNW, observa-se a porção mais elevada do planalto, onde está situado seu ponto culminante, o Pico do Tira Chapéu. A seta laranja (a esq.) indica o médio vale do rio Mambucaba com maiores desnivelamentos topográficos. Foto tirada do Pico do Frade (1592m); b) Borda NE do planalto no limite com a escarpa interior mostrando o relevo de colinas rebaixadas e vales de direção NE controlados pela foliação e contatos litológicos. Cabeceiras do rio Paca Grande na localidade do Taquaral. Foto por Marcelo Motta.....	167
Figura 6.4 - Mapa de compartimentação topográfica do Planalto da Bocaina, baseado em classes de desnivelamentos altimétricos de bacias de drenagem de 2a. ordem, segundo o método de Meis <i>et al.</i> (1983). Notar as classes de menores desnivelamentos 0-100m (amarela) e 100-200m (laranja), ou seja, áreas de baixa amplitude topográfica, que correspondem aproximadamente aos planaltos isolados de Ponçano <i>et al.</i> (1981) e Hiruma <i>et al.</i> (2005). Os traços se referem aos perfis topográficos do Anexo 5. Modificado de Fernandes de Mello (2002).....	169
Figura 6.5 - Compartimento de relevo de baixa amplitude topográfica do Planalto da Bocaina. Alto vale do rio Paraitinga.....	170
Figura 6.6 - Relevo de baixa amplitude na borda NNW do Planalto da Bocaina, alto vale do rio Paraitinga. Ao fundo, superfície elevada aplainada em dissecação pelas cabeceiras de drenagens (anfiteatro). No primeiro plano, afloramentos de gnaise de atitude subvertical.....	170
Figura 6.7 - Relevo de média a alta amplitude topográfica do Planalto da Bocaina, associado a vales encaixados de direção NE. As encostas apresentam concavidades alongadas.....	170
Figura 6.8 - Compartimento do relevo com maiores amplitudes topográficas. Ao fundo, o Pico do Frade (1592m), na borda sul do Planalto da Bocaina. Foto por Ivan Dias.....	170
Figura 6.9 - a) Mapa destacando os planaltos isolados do Planalto da Bocaina: (1) Cabeceiras do Paraitinga; (2) Serra dos Palmares; (3) Serra da Carioca; (4) Ribeirão da Capetinga; (5) Rio do Funil; (6) Rio da Onça; (7) Serra do Frade; (8) Rio do Braço. Roseta de orientação de lineamentos morfoestruturais, sendo: b) frequência por número total, com máximo entre N30-55W e submáximo em N40-65E; c) frequência por comprimento, com máximo entre N40-70W e submáximo em N30-55W. Modificado de Hiruma <i>et al.</i> (2005).....	172
Figura 6.10 - Concavidade de forma conchoidal arredondada em encosta de relevo colinoso do Planalto da Bocaina. Foto por Araquém Alcântara.....	173
Figura 6.11 - Voçoroca ativa no eixo da concavidade rebaixada. Alto vale do rio Mambucaba, localidade dos Campos da Bocaina.....	173
Figura 6.12 - Pico do Tira Chapéu (2088m), o ponto mais alto do Planalto da Bocaina. Afloramento do Granito Campo Alegre, amostrado para traço de fissão em apatita (ponto RML-84). Foto por Araquém Alcântara.....	173
Figura 6.13 - Diagrama de roseta mostrando a orientação de segmentos do limite do Planalto da Bocaina.....	177
Figura 6.14 - Alternância de interflúvios e fundos de vales encaixados na escarpa	

atlântica da Serra da Bocaina.....	
Figura 6.15 – Cachoeira do rio Taquari na escarpa atlântica, cujo canal está encaixado em fraturas de direção NW.....	179
Figura 6.16 – Cicatriz de movimento de massa, um processo erosivo comum nas encostas da escarpa atlântica.....	179
Figura 6.17 – Panorama do ambiente estuarino da Baía da Ribeira, vertente sul da Serra da Bocaina. Foto tirada no Pico do Frade.....	179
Figura 6.18 – Mapa com rosetas de orientação de segmentos do (a) limite Escarpa Atlântica-Planalto da Bocaina, linha violeta; (b) linha de costa rochosa da Baía da Ilha Grande (BIG), e da rede de drenagem das bacias da vertente sul da Serra da Bocaina: (c) costa oeste da BIG; (d) baixo Mambucaba; (e) Baía da Ribeira. As linhas azuis e verdes são, respectivamente, os limites das bacias na vertente sul e o divisor continental da Serra do Mar. As pétalas coloridas das rosetas consideram o número de segmentos, enquanto as pétalas sem preenchimento aos comprimentos dos segmentos. Os diagramas foram modificados de Medeiros (2003).....	182
Figura 6.19 – Porção NNW da vertente norte da Serra da Bocaina, mostrando o contraste entre o relevo íngreme da escarpa interior (ao fundo) e as colinas de baixa amplitude topográfica. As setas na escarpa chamam atenção para o mergulho das rochas para NW.....	185
Figura 6.20 – Vale do ribeirão do Máximo encaixado na direção NE, vertente norte da Serra da Bocaina, na região de Arapeí (SP). Foto por Marcelo Motta.....	185
Figura 6.21 Domínio do relevo de colinas convexo-côncavas (<i>mar de morros</i>) da vertente norte da Serra da Bocaina. Área na bacia do rio Bananal.....	185
Figura 6.22 – Vale do rio Alambari encaixado na Zona de Cisalhamento do Rio Gavião (Arapeí, SP). Foto por Ivan Dias.....	185
Figura 6.23 – Mapa das bacias de drenagem do Planalto da Bocaina e vertentes associadas.....	189
Figura 6.24 – Áreas com a rede de drenagem (polígonos com 81 Km ²) com as respectivas rosetas de orientação de segmentos de drenagem: a) altos Paraitinga/Mambucaba; b) Capetinga/ Mambucaba; c) médio Mambucaba; d) Paca Grande; e) Braço; f) alto Bananal; g) Barreiro de Baixo/ Sesmária. Pétalas das rosetas com intervalo de <i>strike</i> de 5°. Todas as áreas estão no interior do Planalto da Bocaina, exceto as áreas f e g, que se situam na vertente norte.....	192
Figura 6.25 – Perfis longitudinais de canais com varredura dos topos dos principais rios da Serra da Bocaina.....	196
Figura 6.26 – Mapa topográfico de segmento da bacia do rio Mambucaba mostrando a captura que gera a feição em T no limite entre o Planalto da Bocaina e a escarpa atlântica, controlado principalmente pela Zona de Cisalhamento Rio do Gavião (ZCRG), reativada pela tectônica rúptil. O padrão da rede de drenagem é formado por canais NE e NW controlados, respectivamente, pela foliação (e ZCRG) e fraturas. As principais capturas fluviais e knickpoints associados estão posicionadas nos segmentos de canais NW, como por exemplo: no cotovelo do rio Mambucaba no limite estadual RJ-SP; a montante das cachoeiras do Guaripu e do Veado (foto ao lado por Araquém Alcântara), onde afloram as evidências de reativações rúpteis na ZCRG. Notar os depósitos fluviais a montante do ribeirão do Veado, capturado pelo rio Mambucaba,	

formando um novo divisor sobre sua planície sedimentar abandonada (linha pontilhada azul). Ver localização desta área no Anexo 4. Base cartográfica: Folha Rio Mambucaba, 1:50.000 (IBGE).....	199
Figura 6.27 - Esquema simplificado em planta dos estágios de captura fluvial da drenagem do Planalto da Bocaina pelos canais da escarpa atlântica, na bacia do rio Mambucaba: a) pré-captura - avanço a remontante das cabeceiras dos canais NW da escarpa, rumo ao planalto; b) captura em joelho do segmento de canal NE formando um cotovelo de 90°, destruição dos divisores e recuo do limite escarpa-planalto; c) captura em T - inversão do fluxo de SW para NE do outro segmento do canal NE abandonado; outra captura é formada a montante no interior do planalto, envolvendo canais NW e NE. Observar a seção X-Y nos estágios (a) e (b).....	200
Figura 6.28 - <i>Knickpoints</i> mostrando a relação entre os segmentos de canais e as fratura NW ortogonais ao strike da foliação das rochas. a) Mudança de direção da drenagem em <i>knickpoint</i> : o canal à montante está encaixado na foliação NE subvertical, sendo desviado para fratura. Afloramento em ortognaisse do Complexo Quirino no rio do Monjolo, vertente oeste da Serra da Bocaina (Cunha, SP). b) Pequeno <i>knickpoint</i> em paragnaisse do Grupo Paraíba do Sul, mostrando o mergulho da foliação e o canal encaixado na fratura NW. Rio do Doce, vertente norte (Bananal, SP).....	203
Figura 6.29 - a) <i>Knickpoint</i> da cachoeira de Santo Isidro no alto rio Mambucaba, formando vale suspenso a montante. Foto por Marcelo Motta; b) detalhe da cachoeira com cerca de 70m de altura, constituída de paragnaisse do Complexo Embu. Segmento de canal encaixado em fratura de direção NW e posicionado contra o mergulho da foliação da rocha. Foto por Araquém Alcântara, Parque Nacional da Serra da Bocaina, São José do Barreiro (SP).....	203
Figura 6.30 - Esquema com a sequência dos tipos de concavidades estruturais do ambiente de colinas de baixa amplitude topográfica, encontrado em áreas do Planalto da Bocaina e das vertentes norte e oeste. Concavidades: a) conchoidal suspensa; b) conchoidal ajustada; c) conchoidal coalescida. Desenho por Marcelo Motta.....	206
Figura 6.31 - Esquema com os tipos de concavidades estruturais do ambiente de média amplitude topográfica, encontrado em áreas intermontanas do Planalto da Bocaina e no sopé da escarpa interior (norte). Concavidades: a) conchoidal suspensa; b) conchoidal ajustada; c) alongada em coalescência.....	206
Figura 6.32 - Esquema com os tipos de concavidades estruturais alongadas do ambiente de alta amplitude topográfica das escarpas atlântica e interior da Serra da Bocaina. Concavidades: a) alongada ajustada; b) alongada suspensa. O tipo (c) corresponde às concavidades (suspensas ou em ajuste) situadas no topo da escarpa que foram “capturadas” da borda do planalto. Este último tipo lembra as concavidades de relevo de média amplitude da figura acima. Desenho por Marcelo Motta.....	206
Figura 6.33 - Concavidade conchoidal ajustada com vários eixos ou concavidades internas. Arredores da cidade de Cunha (SP), vertente oeste da Serra da Bocaina.....	208
Figura 6.34 - Concavidades estruturais conchoidais ajustadas (setas vermelhas) ao fundo de vale de direção NE-SW, com eixos encaixados nas fraturas NW. A seta preta indica uma concavidade com eixo NE controlada pela foliação do gnaisse. Planalto da Bocaina.....	208
Figura 6.35 - Concavidades estruturais conchoidais suspensas no Planalto da Bocaina...	206

Figura 6.36 – Exemplos de concavidades estruturais das áreas intermontanas da bacia do rio Mambucaba, no Planalto da Bocaina. a) Concavidades conchoidais suspensas; a concavidade frontal está em estágio de ajuste e, assim como a da esquerda, são mais complexas com várias cabeceiras de canais internas. b) Concavidades conchoidais suspensas (1), alongadas ajustadas (2) e coalescentes com divisores destruídos (3). c) Concavidades conchoidais suspensas coalescentes com divisores rebaixados, situadas em encosta concordante ao mergulho das camadas. Desenhos a partir de fotografias de campo..... 209

Figura 6.37 – Exemplos de concavidades estruturais (cabeceiras de drenagens) na bacia do rio Bananal, vertente norte da Serra da Bocaina. Concavidades estruturais conchoidais suspensas no ambiente de média amplitude topográfica (pré-montanhoso) e alongadas suspensas na escarpa interior de alta amplitude. A linha preta na encosta das concavidades conchoidais 1, 2 e 3 é o traço da camada desenhando a *regra dos Vs*; o Pico da Pirâmide, no mesmo *strike* à direita, também indica o mergulho das rochas para NW. Os eixos das concavidades são orientados pelas fraturas subverticais NW. Ao fundo a porção oriental da escarpa interior, onde a Pedra Vermelha é constituída pelos ortognaisses do Complexo Quirino, base do Terreno Paraíba do Sul..... 210

Figura 6.38 – a) Sequência de concavidades estruturais conchoidais suspensas de ambiente de média amplitude topográfica no vale do ribeirão da Fortaleza, tributário do rio Bananal, vertente norte da Serra da Bocaina. As concavidades são estranguladas na base e abertas no topo. A encosta é concordante ao mergulho das camadas (40° para NW), e a linha tracejada que desenha a *regra dos Vs* representa o contato basal de uma camada mais resistente que controla o estrangulamento da concavidade. Os canais são orientados pelos planos de fraturas subverticais NW. b) Ampliação de uma concavidade conchoidal com os contatos da camada mais resistente, que gera *knickpoints* nas cabeceiras de canais..... 210

Figura 6.39 – Desenhos esquemáticos mostrando o controle geológico nos dois tipos de concavidades estruturais suspensas; ambos os tipos estão situados na encosta concordante ao mergulho das camadas e possuem canal (eixo) encaixado na fratura NW. Estas concavidades também podem ocorrer na encosta contra o mergulho das camadas. a) Concavidade estrutural conchoidal; b) Concavidade estrutural (conchoidal a alongada) mostrando desvio de 90° na orientação do canal à montante, passando a encaixar no *strike* NE-SW das camadas. Desenhos por Marcelo Motta..... 212

Figura 6.40 – Sequência de concavidades alongadas ajustadas (bacias de 1ª ordem) ao fundo de vale. Porção central do Planalto da Bocaina..... 213

Figura 6.41 – a) No primeiro plano observa-se depressões (seta 1) no divisor aplainado que quando *capturadas* formam concavidades suspensas (setas 2 e 3) desconectadas numa primeira etapa à rede de drenagem. No segundo plano, encosta NE-SW com feições tipo “vales & cristas”; b) Sequência de concavidades alongadas e divisores com eixos NW paralelos as fraturas, situadas em encosta concordante ao mergulho das rochas. Planalto da Bocaina. Fotografia por Marcelo Motta..... 213

Figura 6.42 – Concavidades coalescentes (Complexo de Rampas) em ambiente colinoso mostrando o rebaixamento dos divisores e a sedimentação colúvio-aluvial associada. Alto vale do rio Mambucaba, porção norte do Planalto da Bocaina..... 213

Figura 6.43 - Coalescência de divisores de concavidades com *knickpoint* associado na base, com canal encaixado em fraturas e ZC D4 de direção NW (ver Figura 5.27); ao lado direito, ocorre uma concavidade íngreme com divisores preservados. Abaixo observa-se uma voçoroca também na direção NW, evidenciando a atividade erosiva

contemporânea em direção às cabeceiras de canais. Alto vale do rio Paraitinga, borda NNW do Planalto da Bocaina..... 214

Figura 6.44 - No primeiro plano observa-se uma superfície aplainada elevada (~1.700m) formando um relevo tipo chapada, condicionado pela atitude subhorizontal em charneira de dobra D3 nos metassedimentos do Complexo Embu; no centro percebe-se uma cabeceira de canal com suave concavidade suspensa. À esquerda esta superfície está dissecada pela concavidade conchoidal suspensa com canal NW. Ao fundo à direita, a seta preta aponta para o Pico do Tira Chapéu (2088m), onde aflora o Granito Campo Alegre..... 214

Figura 6.45 - Morfologia tipo “vales & cristas” com concavidades alongadas ajustadas em encostas concordantes ao mergulho das camadas. Os eixos das concavidades (canais) são encaixados nas fraturas subverticais NW. A linha vermelha na encosta da frente é o traço da camada de rocha fazendo a *regra dos Vs*, que gera uma morfologia na base das encostas (interflúvios) que lembra as facetas triangulares relacionadas à falha, mas não são. Cada subdivisão interna (lobos) das concavidades está relacionada a uma camada diferente. Bacia do rio Mambucaba, Planalto da Bocaina..... 215

Figura 6.46 - Exemplos da metamorfose das concavidades na borda NNW do Planalto da Bocaina no limite com a escarpa interior.
a) depressões suavemente inclinadas (1) que com o rebaixamento do nível de base (reco da escarpa e dissecção do planalto) transformam-se em concavidades conchoidais suspensas (2) conectadas à escarpa, por exemplo, através canais incisos dos deslizamentos (3). b) Panorama com concavidades alongadas suspensas (1, 2) da escarpa, que capturaram concavidades anteriormente voltadas para o interior do Planalto da Bocaina..... 215

Figura 6.47 - Fotografia aérea do alto rio Bananal, no limite entre a escarpa interior (a leste) e a borda norte do Planalto da Bocaina (cabeceiras do rio Paca Grande). A foto evidencia uma morfologia tipo “vales & cristas” das encostas NE do planalto e as seguintes feições de controle estrutural sobre o relevo:
a) o padrão da rede de drenagem em treliça do planalto, orientado pela foliação NE e fraturas NW; b) concavidades estruturais conchoidais e alongadas (com lobos) nas encostas do planalto com eixo paralelo às fraturas e estrangulamentos controlados pela foliação e bandamento; c) concavidades alongadas e íngremes na escarpa, com eixos também concordantes com as fraturas; d) encosta paralela ao mergulho (*dip slope*) das rochas mais resistentes (no caso o Granito Resgate, ver Anexo 1), mostrando a *regra dos Vs* junto às drenagens; essas formas das encostas parecem facetas triangulares de falhas, mas não são; e) a orientação do rio Bananal NNE controlado pelo dique toleítico. Fonte: Terrafoto (1973), escala original 1:25.000..... 217

Figura 6.48 - Fotografia aérea do vale do rio Mambucaba no Planalto da Bocaina, mostrando um relevo marcado pela presença de concavidades estruturais do tipo alongadas e conchoidais. As concavidades são suspensas ou ajustadas encontram-se tanto nas encostas paralelas ao mergulho, como nas contra o mergulho das camadas, e seus eixos são normalmente concordantes com as direções das fraturas NW. Ocorre uma concavidade alongada no vale do rio Gavião subparalela ao *strike* NE das camadas metassedimentares. Notar que grande parte das concavidades corresponde a bacias de 1ª ordem. Os principais *knickpoints* estão situados nos segmentos de canal NW paralelos às fraturas e parecem relacionados às coalescências (destruição dos divisores) das concavidades estruturais. Fonte: USAF (1966), escala original 1:60.000..... 218

Figura 6.49 - Seção esquemática da Serra da Bocaina mostrando os tipos de

concauidades estruturais (cabeceiras de canais), segundo os compartimentos de amplitude de relevo (baixa, média e alta). De NNE para SSW: nos compartimentos de baixa (colinas) e média amplitude (pré-montanhoso) da vertente norte predominam as concauidades conchoidais ajustadas e suspensas; no compartimento de alta amplitude das escarpas interior e atlântica predominam as concauidades alongadas; nas colinas de baixa amplitude do Planalto da Bocaina os tipos conchoidais e alongadas ajustadas são freqüentes, enquanto no relevo intermontano de média amplitude do planalto predominam as concauidades alongadas suspensas e ajustadas. O par de perfis longitudinais de canal é a referência para a concauidade ser suspensa ou ajustada. Na Serra da Bocaina este par de canais é representado pelos rios Paca Grande (vertente sul) e Bananal (vertente norte) ou pelos rios Mambucaba-Gavião (v. sul) e Barreiro de Baixo-Capitão Mór (v. norte). A área com sobreamento vermelho representa a antiga configuração do planalto e as setas grandes a NNE e SSW simbolizam o recuo das escarpas interior e atlântica..... 219

Figura 6.50 - Desenhos esquemáticos mostrando as relações entre o substrato geológico e as concauidades estruturais, que são as formas arquetípicas da área de estudo. a) Concauidade suspensa e transicional entre os tipos alongada a conchoidal. O padrão estrutural que controle a concauidade e o *knickpoint* são os mesmos. As fraturas NW orientam o eixo da concauidade e do segmento canal rochoso, enquanto a foliação NE controla as direções das encostas e do canal fluvial principal. Notar na porção superior direita da concauidade, um segmento de canal orientado pela foliação NE destruindo um divisor lateral. Estes condicionamentos geológicos são os mais freqüentes no Planalto da Bocaina e suas vertentes. b) Este desenho repete o anterior (a), só que está representado o par de planos das estruturas “novas & velhas” (rúptil & dúctil) ortogonais: fratura vertical NW e a foliação NE com mergulho para NW..... 224

Figura 7.1 - Localização das amostras com termocronologia por traço de fissão em apatitas (TFA). As estrelas pretas são as amostras analisadas nesta tese e as estrelas vermelhas são as amostras de Gallagher *et al.* (1994). Fonte: imagem *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)*, USGS-NASA, 2004..... 239

Figura 7.2 - Gráficos radiais das idades centrais e histogramas de comprimentos dos traços de fissão para as quatro amostras analisadas: a) CBL-02; b) CBL-284; c) RML-84; d) F-2..... 240

Figura 7.3 - Altitude em função da idade central de traço de fissão em apatita. As estrelas pretas são as amostras datadas nesta tese e as estrelas vermelhas são amostras de Gallagher *et al.* (1994) situadas na região estudada. As barras horizontais nas amostras correspondem aos erros das idades e a elipse agrupa as amostras da Baía da Ilha Grande. As faixas verticais são os eventos tectônico-magmáticos regionais, sendo: Magma. Pré-RAS - magmatismo toleítico pré-riftes do Atlântico Sul; RAS - riftes do Atlântico Sul com extenso magmatismo toleítico; Magma Alc. - magmatismo alcalino; RSCB - geração do segmento central dos Riftes Continentais do Sudeste do Brasil com vulcânicas alcalinas. Fonte dos eventos: Turner *et al.* (1994); Thomaz & Rodrigues (1998); Misuzaki & Thomaz Filho, 2004; Riccomini *et al.* (2004); Guedes *et al.* (2005)..... 243

Figura 7.4 - Comprimento médio dos traços (CMT) em função da idade central dos traços de fissão em apatitas. As estrelas pretas são as amostras datadas nesta tese e as estrelas vermelhas são amostras de Gallagher *et al.* (1994) inseridas no contexto da área de estudo. A curva tracejada representa o *boomerang plot* de Gallagher & Brown (1997), um comportamento comum dos CMT para margens rifteadas, porém faltam as idades intermediárias com traços curtos..... 243

Figura 7.5 - Seções esquemáticas transversais à margem continental do sudeste do Brasil mostrando a formação e denudação das zonas de apagamento parcial (ZAP) dos traços de fissão em apatita, desde o Jurássico até o momento atual. Períodos & eventos tectônicos: a) Jurássico - estágio pré-quebra do Gondwana Ocidental; b) Cretáceo Inferior - abertura do Atlântico Sul (estágio rifte); c) Cretáceo Superior e Paleógeno - soerguimento e denudação neocretácica, seguida da geração dos Riftes Continentais do Sudeste Brasileiro (RCSB) e contínuo recuo da escarpa atlântica; d) Momento atual, mostrando o recuo das escarpas atlântica e interior da Serra do Mar (da Bocaina); os números representam as idades TFA em Ma determinadas nesta tese..... 246

Figura 8.1 - Relação entre a sedimentação na Bacia de Santos e nos Riftes Continentais do Sudeste do Brasil (RCSB), os principais eventos tectônico-magmáticos e as idades de traços de fissão em apatita (TFA) da área de estudo. As colunas estratigráficas da Bacia de Santos e do segmento central do RCSB foram modificadas, respectivamente, de Meisling *et al.* (2001) a partir dos dados de Pereira & Feijó (1994) e de Riccomini *et al.* (2004) com adição da Fm. Quatis da Bacia de Resende (Ramos, 2003). As estrelas pretas são as amostras com idades TFA determinadas nesta tese, as estrelas brancas são os componentes de idades mais jovem e mais velha da amostra CB-02 e as estrelas vermelhas são as amostras de Gallagher *et al.* (1994). As referências dos eventos tectônicos são aquelas da Figura 7.3..... 251

Figura 8.2 - Modelo esquemático exemplificando os principais controles geológicos sobre o relevo do Planalto da Bocaina e da vertente sul. As estruturas geológicas NE (contatos litológicos, foliação, zona de cisalhamento reativada) e NW (fraturas, falhas) orientam a rede de drenagem principal, as concavidades estruturais (cabeceiras de canais) e os *knickpoints* de naturezas diferentes (ver legenda). A superfície mais rebaixada do planalto à esquerda (p.ex. médio vale do rio Mambucaba) está sendo intensamente dissecada através da expansão das cabeceiras de drenagens que geram a coalescências dos divisores e capturas fluviais, rebaixando o relevo. Este mesmo pulso de denudação pode ser retardado à montante (ver superfície mais alta à esquerda) devido, por exemplo, a presença de *knickpoints* relacionados às rochas mais resistentes; porém as concavidades estruturais (a forma arquetípica) já estão se expandindo à montante. Os vários níveis topográficos (vales suspensos) do Planalto da Bocaina são formados pela interação dos pulsos de denudação regulados pelos eventos de soerguimento (p.ex. abertura do Atlântico Sul, RCSB), a variação dos níveis de base principais (p.ex. nível do mar) e a formação dos níveis de base locais (*knickpoints*). Portanto, não é necessário que cada superfície (nível topográfico) seja formada por um evento distinto de soerguimento e denudação, um mesmo pulso pode formar superfícies em altitudes diferentes devido à anisotropia do substrato geológico, somado às reativações tectônicas..... 254

Figura 8.3 - Esquema mostrando o comportamento diferencial de um pulso de denudação (D1) a partir do perfil longitudinal de canal que drena o Planalto da Bocaina e a vertente sul (p.ex. o rio Mambucaba). A superfície S0 foi desenvolvida em consequência de uma extensa denudação que se seguiu ao soerguimento de rochas (p.ex. a abertura do Atlântico Sul ou reativação neocretácica), mas que preservou uma paleo-ZAP (ver Figura 7.5). O novo pulso de denudação D1 relacionado ao contínuo recuo da escarpa atlântica regulado pelo nível de base principal (nível do mar), vem dissecando a superfície S0. No entanto, a propagação de D1 sofre interrupções nos *knickpoints* relacionados à reativação pré-D1 da zona de cisalhamento à jusante (p.ex. ZCRG), mas principalmente, nos *knickpoints* associados à erosão diferencial devido a rochas mais resistentes situadas à montante (p.ex. granitos, ortognaisses). Notar o

intervalos entre as curvas de D1, quanto mais apertado menor a taxa de denudação, como ocorre no knickpoint formado pela rocha mais resistente. Deste modo, um único pulso de denudação D1 pode gerar várias superfícies em níveis topográficos distintos (S1A, S1B, S1C) decorrente das barreiras impostas pelos *knickpoints*. Apesar das três superfícies possuírem entre si idades próximas comparadas à antiga S0, a superfície S1C mais elevada é mais nova que a superfície S1B, que por sua vez é mais nova que S1A. Isto contradiz o modelo tradicional de recuo de escarpas e formação de superfícies de erosão de L. King, onde as superfícies mais velhas situam-se nos níveis topográficos mais altos. Também não é necessário a relação 1:1 entre pulsos de soerguimento-denudação e a formação de superfícies aplainadas, em referência ao conceito Davisiano da evolução policíclica da paisagem (Gunnell, 1998). Por outro lado, o rebaixamento tectônico local do nível de base provocado pela reativação da zona de cisalhamento pode incrementar o pulso D1, gerando uma migração remontante dos knickpoints (seta vermelha) e a erosão na superfície S1b, suportando os clássicos modelos de evolução do relevo. Isto mostra a complexidade de evolução da paisagem que pode conjugar a interação de vários componentes que modificam os níveis de base (tectônico, erosão diferencial, climático) e que atuam em escalas diferentes, global (p.ex. abertura de oceano e a variação eustática), regional (p.ex. soerguimento crustal) e local (p.ex. falhamento) (Gunnell, 1998)..... 255

LISTA DE TABELAS

	Pág.
Tabela 2.1 - Relação dos corpos alcalinos com idades K-Ar do Alinhamento Magmático Cabo Frio (Almeida, 1991).....	24
Tabela 2.2 - Síntese dos eventos de deformação geradores e modificadores do segmento central do Riftes Continentais do Sudeste do Brasil (RCSB).....	28
Tabela 3.1 - Relação e proporção da área das folhas topográficas 1:50.000 utilizadas nos mapeamentos e na digitalização.....	40
Tabela 3.2 - Relação das amostras analisadas para TFA.....	53
Tabela 3.3 - Relação dos valores envolvidos no cálculo do parâmetro zeta (ζ), utilizado nas idades TFA determinadas nesta tese.....	60
Tabela 5.1 - Unidades litológicas dos terrenos tectônicos da área de estudo e correlação com as idades disponíveis regionalmente.....	98
Tabela 5.2 - Síntese das orientações preferenciais das estruturas rúpteis: diques toleíticos, falhas, fraturas e zonas de cisalhamento dúctil-rúpteis D4.....	132
Tabela 5.3 - Síntese das atitudes e cinemática das falhas nos domínios rúpteis.....	139
Tabela 6.1 - Os doze principais picos e elevações do Planalto da Bocaina, localizados no Anexo 4.....	177
Tabela 6.2 - Orientações preferenciais do limite escarpa atlântica-planalto e de linha de costa, a partir dos diagramas da Figura 6.18.....	181
Tabela 6.3 - Orientações preferenciais dos segmentos de canais no Planalto da Bocaina e na vertente norte, a partir dos diagramas da Figura 6.24.....	193
Tabela 6.4 - Orientações preferenciais dos segmentos de canais na vertente sul, a partir dos diagramas da Figura 6.18.....	194
Tabela 6.5 - Classificação das concavidades estruturais em relação à amplitude de relevo e a posição nas encostas.....	207
Tabela 7.1 - Dados das análises de traços de fissão em apatitas.....	238

SUMÁRIO

1. Introdução.....	1
1.1 Problemática do Tema e da Área de Estudo.....	1
1.2 Objetivos.....	4
1.3 Composição da Tese.....	5
2. A Área de Estudo.....	7
2.1 Localização & Acesso.....	7
2.2 Contexto Geográfico, Histórico e Ecológico.....	7
2.3 Contexto Geológico Regional.....	14
2.3.1 Tectônica da Faixa Ribeira.....	14
<i>Unidades Lito-estratigráficas</i>	16
<i>Evolução Geológica</i>	18
2.3.2 Tectônica Mesozóica-cenozóica.....	20
<i>Quebra do Gondwana & Abertura do Atlântico Sul</i>	20
<i>Magmatismo Alcalino & os Riftes Continentais do Sudeste do Brasil</i>	23
2.4 Contexto Geomorfológico Regional.....	30
2.4.1 A Serra da Bocaina.....	36
3. Metodologia.....	38
3.1 Trabalhos de Campo.....	38
3.1.1 Mapeamento Geológico.....	38
3.2 Análise Estrutural.....	40
3.3 Análise Petrográfica.....	42
3.4 Cartografia Digital.....	42
3.5 Análise Geomorfológica.....	43
3.6 Análises de Traço de Fissão em Apatitas.....	45
3.6.1 A Metodologia TFA.....	45
<i>Formação dos Traços de Fissão</i>	45
<i>As Variáveis do Annealing</i>	46
<i>Significado das Idades TF</i>	47
<i>Padrões de Distribuição dos Tamanhos dos TF</i>	48
<i>Cálculo da Idade TF</i>	50
3.6.2. Trabalhos Desenvolvidos em TFA.....	52
<i>Amostragem</i>	52
<i>Preparação das Amostras</i>	53
<i>Revelação dos Traços de Fissão</i>	55
<i>Método do Detector Externo</i>	57

<i>Irradiação das Amostras</i>	58
<i>Determinação da Idade TFA</i>	60
<i>Representatividade das Idades Calculadas</i>	61
<i>Determinação dos Comprimentos dos Traços Confinados</i>	63
4. Modelos de Evolução do Relevo e a Termocronologia por Traços de Fissão em Apatitas.....	65
4.1 Introdução.....	65
4.2 Modelos de Evolução do Relevo.....	67
4.2.1 Modelos Clássicos.....	68
<i>O Ciclo de Erosão de W. M. Davis</i>	68
<i>W. Penck: Soerguimento Versus Denudação e a Evolução das Encostas</i>	70
<i>L. C. King: Recuo das Escarpas e Pediplanação</i>	71
4.2.2 Modelos Contemporâneos em Ambientes de Margens Passivas.....	72
<i>Denudação das Margens Passivas e Evolução dos Escarpamentos</i>	74
4.3 Aplicação da Termocronologia por Traço de Fissão em Apatitas na Geomorfologia.....	79
4.3.1 TTFA e Geomorfologia: Potenciais & Limitações.....	80
<i>Denudação e Soerguimento</i>	81
<i>Denudação, Topografia e Gradiente Geotérmico</i>	82
<i>Padrão de Resfriamento e Resistência Litológica</i>	84
<i>Padrão de Resfriamento e Mudança do Nível de Base</i>	86
4.3.2 TTFA e a Denudação das Margens Passivas Elevadas.....	87
<i>TTFA e Modelos de Evolução do Relevo</i>	91
5. Geologia da Serra da Bocaina e da Baía da Ilha Grande.....	95
5.1. Introdução.....	95
5.2 Unidades Lito-estratigráficas da Faixa Ribeira.....	97
5.2.1 Terreno Ocidental.....	97
5.2.2 Terreno Oriental.....	99
<i>Complexo Rio Negro</i>	99
<i>Granitos Sin-colisionais</i>	99
5.2.3 Terreno Paraíba do Sul.....	101
<i>Complexo Quirino</i>	101
<i>Grupo Paraíba do Sul</i>	103
<i>Granitos Sin-colisionais</i>	104
5.2.4 Terreno Embu.....	105
<i>Complexo Embu</i>	105
<i>Ortognaisses e Granitóides do Complexo Taquaral</i>	107
<i>Granito Campo Alegre</i>	109
5.2.5 Granitos Tardi-colisionias.....	110
<i>Suíte Charnockítica Ilha Grande</i>	110
<i>Complexo Plutônico Parati</i>	112
<i>Leucogranitos</i>	113
5.2.6 Granitos Pós-colisionais.....	113
<i>Granito Vila Dois Rios</i>	113
<i>Granitos Mambucaba e Mombaça</i>	114
<i>Outros Corpos Graníticos</i>	114

5.3	Deformação da Orogênese Brasileira.....	115
5.3.1	Geologia Estrutural da Deformação Principal.....	115
	<i>Terreno Ocidental (TOC)</i>	115
	<i>Terreno Oriental (TOR)</i>	115
	<i>Terreno Paraíba do Sul (TPS)</i>	118
	<i>Terreno Embu (TEM)</i>	119
5.3.2	Geologia Estrutural da Deformação Tardi e Pós-colisional.....	123
	<i>Fase D3</i>	123
	<i>Fase D4</i>	124
5.4	Unidades Lito-estratigráficas Mesozóicas e Cenozóicas.....	127
5.4.1	Diques de Rochas Toleíticas.....	127
5.4.2	<i>Pluton Alcalino do Morro Redondo</i>	127
5.4.3	Sedimentos Paleogênicos.....	127
5.4.4	Sedimentos Neogênicos.....	128
5.5	Reativação Tectônica Mesozóica e Cenozóica.....	130
5.5.1	Magmatismo Toleítico.....	130
5.5.2	Falhas.....	135
	<i>Domínio Rúptil Alto Paraitinga (DRAP)</i>	137
	<i>Domínio Rúptil Reativação da Zona de Cisalhamento do Rio Gavião</i>	139
	<i>Domínio Rúptil Bananal (DRB)</i>	143
	<i>Domínio Rúptil Ilha Grande (DRIG)</i>	145
5.5.3	Fraturas.....	145
	<i>Fraturas e os Terrenos Tectônicos da Faixa Ribeira</i>	147
	<i>Fraturas e os Setores Geográficos</i>	150
5.6	Conclusões.....	154
5.6.1	Os Terrenos Tectônicos da Faixa Ribeira.....	154
	<i>Correlações Regionais e Problemas em Aberto</i>	154
5.6.2	A Reativação Tectônica.....	157
	<i>O Enxame de Diques Toleíticos</i>	157
	<i>Os Domínios Rúpteis</i>	159
	<i>Reativação dos Limites dos Terrenos Tectônicos</i>	160
	<i>O Significado das Fraturas</i>	161
6.	Geomorfologia da Serra da Bocaina.....	163
6.1.	Introdução.....	163
6.2.	Domínios Geomorfológicos.....	166
6.2.1	O Planalto da Bocaina.....	166
	<i>A Geologia e os Limites do Planalto</i>	174
6.2.2	Vertente Sul.....	177
	<i>A Geologia e a Orientação da Vertente Sul</i>	180
6.2.3	Vertente Norte.....	183
	<i>A Geologia e a Orientação da Vertente Norte</i>	186
6.2.4	Vertente Oeste.....	187
6.2.5	Vertente Leste.....	187
6.3.	A Rede de Drenagem da Serra da Bocaina.....	188
6.3.1	Organização das Bacias de Drenagem.....	188
6.3.2	Orientação da Rede de Canais.....	190

<i>Planalto da Bocaina e Vertente Norte</i>	190
<i>Vertente Sul</i>	193
6.3.3 Perfis Longitudinais dos Canais.....	194
6.3.4 A Bacia do Rio Mambucaba: Capturas, <i>Knickpoints</i> e Estruturas.....	198
6.3.5 A Bacia do Rio Bananal: os Diques Toleíticos e a Dissecação do Planalto.....	202
6.4 As Concavidades das Encostas: os Arquétipos da Denudação do Relevo.....	204
6.4.1 A Transformação das Concavidades.....	220
6.4.2 As Formas Arquetípicas.....	222
6.5 Conclusões.....	225
6.5.1 O Ajuste Estrutural do Relevo.....	225
6.5.2 A Propagação da Denudação no Planalto da Bocaina.....	227
6.5.3 Os Níveis de Base e a Evolução das Vertentes.....	230
7. Termocronologia por Traço de Fissão de Apatitas: um Ensaio sobre a Denudação da Serra da Bocaina.....	235
7.1 Introdução.....	235
7.2 Resultados & Interpretações.....	237
7.3 Conclusões.....	245
8. Síntese: a Interação dos Eventos Tectônicos e a Evolução do Relevo.....	249
8.1. A Construção da Serra da Bocaina no Contexto da Evolução Tectônica do Sudeste do Brasil.....	249
8.2. Os Caminhos da Denudação da Serra da Bocaina.....	253
9. Referências.....	258
10. Anexos	
1) Mapa Geológico	
2) Perfis Geológicos	
3) Mapa Estrutural da Tectônica Mesozóica-cenozóica	
4) Mapa Topográfico Simplificado	
5) Perfis Topográficos	
6) Mapa Hipsométrico (Modelo Digital do Relevo)	
7) Tabela com os Dados de Traço de Fissão em Apatitas no Sudeste do Brasil	
8) Resultados das Análises por Traço de Fissão em Apatitas	

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 PROBLEMÁTICA DO TEMA E DA ÁREA DE ESTUDO

O relevo da superfície da Terra, de acordo com diferentes condições tectônicas e climáticas antigas ou atuais, expressa as características do substrato rochoso. Há uma tendência das formas do relevo de se ajustarem às estruturas geológicas, como por exemplo, na orientação da rede de drenagem, nas feições de encostas ou no posicionamento das escarpas.

Por outro lado, existem vastas áreas do planeta, em especial aquelas de relevo aplainado, excluindo as planícies sedimentares ou áreas marcadas por estruturas horizontais, que não ressaltam, à primeira vista, as características do substrato geológico. A princípio, este quadro sugere um intenso desgaste do relevo, apagando o condicionamento exercido pelas estruturas e rochas mais resistentes ao intemperismo e erosão.

A tendência do relevo de se nivelar formando superfícies aplainadas ou de erosão, discordantes das estruturas geológicas subjacentes, é um conceito estabelecido desde os clássicos modelos de evolução do relevo, destacando aqueles elaborados por W. M. Davis, W. Penck e L. C. King. Em linha geral, seja privilegiando o rebaixamento (declínio) do relevo, seja o recuo paralelo das vertentes, esses modelos propõem um desenvolvimento cíclico ao longo do tempo, onde extensas áreas soerguidas seriam progressivamente denudadas até a geração de um relevo suave e maduro, isto é, as superfícies de erosão. Essa evolução prevê o rejuvenescimento e o remodelamento do relevo, a partir de novos pulsos de soerguimento e denudação, podendo gerar paisagens policíclicas, aonde coexistiriam relevos jovens e antigos (Summerfield, 1990).

De modo análogo ao controle estrutural exercido sobre as formas do relevo, as rochas e estruturas geradas por antigos eventos condicionam a atuação de eventos tectônicos posteriores. Assim, as reativações de estruturas

pretéritas e o comportamento reológico diferencial do embasamento podem orientar a geração de estruturas mais novas. Porém, assim como a denudação pode gerar extensas superfícies aplainadas, encobrando o controle geológico, um evento tectônico intenso ou duradouro pode formar um novo padrão estrutural capaz de se sobrepor à influência das estruturas preexistentes. Assumindo o papel da herança geológica, seja nas reativações tectônicas ou no modelamento do relevo nas áreas de antigos escudos reativados, as formas de relevo revelam a superposição de estruturas, ou seja, a interação entre os eventos tectônicos.

A ênfase dada ao controle geológico desperta uma tradicional e controversa questão geomorfológica, “qual o papel do clima frente aos esforços tectônicos sobre a mudança do nível de base e o desenvolvimento do relevo?”

Ao mesmo tempo em que os movimentos crustais expõem as rochas com sua herança geológica, o clima, aliado à força da gravidade, condiciona os processos superficiais - intemperismo e erosão - modelando o relevo. Por exemplo, as orogêneses responsáveis pelo soerguimento de extensas cadeias montanhosas condicionam o clima numa escala continental, influenciando os sistemas de ventos e chuvas, deixando áreas mais úmidas e outras mais áridas. Por outro lado, os fenômenos climáticos, através do aumento da precipitação, podem provocar uma denudação diferencial, gerando grandes desníveis topográficos nas montanhas (Molnar & England, 1990; Hodges *et al.*, 2004). Este processo pode, conseqüentemente, intensificar as compensações isostáticas e, talvez, induzir reativações de estruturas tectônicas.

A despeito de olhar a tectônica *versus* clima como forças competitivas, a questão principal é como ocorre essa interação. Elas atuam como forças complementares? Como as paisagens se auto-organizam ao longo do tempo, frente aos fenômenos tectônicos e climáticos (Hodges *et al.*, 2004)? A compreensão destas questões requer cada vez mais que as pesquisas geomorfológicas e tectônicas tenham uma abordagem holística acerca dos fenômenos internos e externos da Terra que atuam sobre sua superfície.

A área de estudo desta Tese compreende um segmento da Serra do Mar no sudeste brasileiro caracterizado por um *plateau* elevado com amplitude de relevo média a baixa e limitado da zona costeira por uma proeminente escarpa. Do lado interior, o planalto é limitado por outra vertente menos íngreme, separando-o de uma vasta área de colinas rebaixadas. De forma geral, este é um típico relevo de margens passivas elevadas que ocorre em outras regiões do mundo, como no sudeste da Austrália, sul-sudoeste da África e oeste da Índia.

De modo simplificado, essa área registra o efeito de dois grandes eventos tectônicos principais. O primeiro é a Orogênese Brasileira responsável pela geração da Faixa Ribeira, entre o Neoproterozóico (Ediacarano) e o Ordoviciano; o outro é a reativação distensional mesozóica-cenozóica iniciada pela fragmentação do Gondwana Ocidental e abertura do Atlântico Sul no Cretáceo, seguida pela geração do sistema de riftes continentais no Paleógeno (Heilbron *et al.*, 2000; Riccomini *et al.*, 2004, entre outros). Portanto, a região compreende um orógeno profundamente denudado, que durante boa parte do Paleozóico e Mesozóico tornou-se um ambiente continental intraplaca e, posteriormente, transformou-se numa margem passiva.

Neste sentido, o entendimento integrado acerca dos eventos geológicos é fundamental para compreender a influência do arcabouço tectônico dos orógenos brasileiros sobre as reativações rúpteis e a formação dos *novos* padrões estruturais durante o Fanerozóico. Associado ao conhecimento tectônico e geomorfológico, a termocronologia por traço de fissão é uma valiosa ferramenta que permite estimar a história térmica e as taxas médias de denudação da crosta, apoiando o entendimento da evolução do relevo de longa duração, bem como sobre os eventos de reativações tectônicas mesozóica-cenozóicas.

Portanto, a idéia da Tese é contribuir para o conhecimento da interação entre os eventos tectônicos e a dinâmica da paisagem geomorfológica, onde as formas de relevo modeladas pelos processos superficiais expressam o caráter tectônico do substrato geológico. Retomando a questão da herança geológica, a

tendência do relevo ao ajuste lito-estrutural durante os pulsos de denudação, ativados pelos fenômenos tectônicos e/ou climáticos, indica a presença de uma “memória” responsável em repetir ao longo do tempo certos padrões de formas de relevo.

1.2 OBJETIVOS

A meta desta tese é compreender as relações entre os principais estágios de evolução tectônica e a geomorfologia da região da Serra da Bocaina, sudeste do Brasil, elaborando um modelo que integre o desenvolvimento do relevo à formação do substrato geológico. Para atingir esta meta é preciso focalizar os seguintes objetivos:

a) Estabelecer as unidades lito-estratigráficas relacionadas aos terrenos tectônicos desta porção da Faixa Ribeira, que constitui o embasamento da área de estudo, assim como levantar as estruturas associadas às etapas de deformação da Orogênese Brasileira (Neoproterozóico-Ordoviciano).

b) Identificar o padrão estrutural relacionado aos eventos tectônicos mesozóico-cenozóicos de caráter rúptil, iniciados na quebra do Gondwana, e entender o comportamento das reativações das estruturas preexistentes. O estudo estrutural rúptil abordou o substrato rochoso da Faixa Ribeira (*embasamento*), portanto, não foi privilegiada a análise da atividade neotectônica a partir da deformação da cobertura sedimentar cenozóica.

c) Caracterizar os domínios geomorfológicos da Serra da Bocaina e o papel do substrato geológico sobre as formas do relevo deste segmento da Serra do Mar. A partir disto, compreender a dinâmica erosiva responsável pelo modelamento do relevo, enfocando o desenvolvimento da rede de drenagem e das vertentes.

d) Determinar idades de traço de fissão em apatitas (TFA), que integrado a outros dados de TFA preexistentes, possibilite avaliar os principais eventos

geológicos que provoquem a denudação de rochas da região da Serra da Bocaina.

1.3 COMPOSIÇÃO DA TESE

No Capítulo 2 a área de estudo será situada nos contextos geográfico, geológico (tectônico) e geomorfológico regional, sendo relatado suas características e uma síntese dos principais trabalhos realizados.

O Capítulo 3 descreve os métodos adotados nos estudos, relacionando as atividades realizadas em campo, laboratório e escritório. Serão detalhados os procedimentos utilizados na termocronologia por traço de fissão em apatita (TTFA), bem como, um resumo acerca dos conceitos fundamentais deste método geocronológico.

O Capítulo 4 compreende uma revisão bibliográfica abordando o tema “Modelos de Evolução do Relevo e a Termocronologia por Traço de Fissão de Apatitas”, onde serão discutidas as principais idéias de desenvolvimento do relevo e as potencialidades (e limitações) deste método de datação frente às questões geomorfológicas.

Os resultados da tese serão apresentados em três capítulos, onde ao final de cada um deles serão tecidas conclusões com as interpretações e questões em aberto. A geologia da Serra da Bocaina e da Baía da Ilha Grande será tratada no Capítulo 5, sendo subdividida em duas partes. A primeira aborda as unidades lito-estratigráficas da Faixa Ribeira e as estruturas relacionadas à orogênese brasiliana, enquanto a segunda parte trata das unidades e a tectônica rúptil mesozóica-cenozóica. A partir disso se discutirá a interação entre os dois eventos tectônicos, identificando as reativações de estruturas preexistentes e a influência da compartimentação da Faixa Ribeira sobre a tectônica fanerozóica, bem como a formação de novos padrões estruturais. Os mapas e seções geológicas dos Anexos 1, 2 e 3 são essenciais para acompanhar a descrições deste capítulo.

O Capítulo 6 apresenta os aspectos geomorfológicos da área de estudo. Nele serão caracterizados os domínios do relevo da região, assim como o papel da herança geológica sobre as formas do relevo, ou seja, o condicionamento litológico-estrutural do substrato descrito no capítulo anterior. Para concluir este capítulo serão tecidas considerações acerca da dinâmica evolutiva do relevo da Serra da Bocaina, enfatizando o desenvolvimento da rede de drenagem e das vertentes. Os mapas e perfis topográficos dos Anexos 4, 5 e 6, associados aos anexos anteriores, ilustram os relatos deste capítulo.

Os resultados gerados pelas análises por traço de fissão de apatitas serão enfocados no Capítulo 7, integrando ainda os dados de TTFA disponibilizados por outros autores. São também retomadas algumas considerações contidas na revisão do Capítulo 4. Fechando este capítulo, são feitas correlações entre as idades determinadas e os eventos geológicos reconhecidos regionalmente, estimando uma história térmica e o comportamento da denudação da Serra da Bocaina.

E por fim, o Capítulo 8 sintetiza as interpretações e as conclusões relatadas nos três capítulos anteriores, descrevendo um modelo que integre a evolução tectônica e geomorfológica regional.