



## **Variação da linha de costa e balanço sedimentar de longo período em praias sob risco muito alto de erosão do município de Caraguatatuba (Litoral Norte de São Paulo, Brasil) \***

### ***Long-term shoreline changes and sedimentary budget in beaches under very high risk of erosion in Caraguatatuba County (São Paulo Northern Coast, Brazil)***

Celia Regina de G Souza <sup>@, 1, 2</sup> & G. da C. Luna <sup>3</sup>

---

#### **RESUMO**

No município de Caraguatatuba 60% das praias arenosas encontram-se sob risco muito alto de erosão. Essa classificação de risco é baseada na presença de onze tipos de indicadores de erosão costeira monitorados nas praias do Estado de São Paulo desde a década de 1990. Entre eles está a retrogradação da linha de costa nas últimas décadas. O objetivo deste artigo é apresentar os resultados obtidos a partir de trabalhos de geoprocessamento realizados em duas praias de Caraguatatuba, as praias de Massaguaçu e Tabatinga, ambas sob risco muito alto de erosão costeira e que evidenciaram preliminarmente a ocorrência de retrogradação em escala decadal. Foram efetuados cálculos das taxas de variação da linha de costa e do balanço sedimentar dessas praias nas últimas quatro décadas a partir de fotografias aéreas de 1962, 1977 e 2001. Os cálculos das taxas de variação da linha de costa (polígono praial) foram efetuados através dos métodos do ponto de terminação ou *End Point Rate (EPR)* e das suas médias ou *Average of EPRs (AEPR)*. A delimitação dos polígonos praiais foi feita com base nos seguintes limites: superior - linha de vegetação permanente na planície costeira ou estruturas construídas pelo homem; inferior - linha d'água mais alta ou limite entre área úmida/área seca. Os resultados mostraram que a Praia de Massaguaçu apresentou recuo progressivo em quase todos os transectos, com as maiores taxas de retrogradação no trecho central da praia, o que tem resultado na destruição contínua de parte da rodovia BR-101. A taxa de retrogradação média para toda a praia foi da ordem de 0,23 m/ano, com redução em área de 30% e evasão de aproximadamente 488.000 m<sup>3</sup> de sedimentos. Na Praia de Tabatinga, por sua vez, os resultados brutos sugerem uma

---

@ Autor correspondente: [celiagouveia@gmail.com](mailto:celiagouveia@gmail.com)

1 Instituto Geológico-SMA/SP, Setor de Geologia Aplicada e Ambiental, Av. Miguel Stéfano, 3900. São Paulo, Brasil.

2 Universidade de São Paulo - Programa de Pós-Graduação do Departamento de Geografia Física da FFLCH.

3 Geojá Mapas Digitais S.A., Av. Luiz Dumont Villares, 2078. São Paulo, Brasil

---

\* Submissão – 21 Outubro 2009; Avaliação – 12 Dezembro 2009; Recepção da versão revista – 9 Maio 2010; Disponibilização on-line – 20 Maio 2010

tendência de balanço sedimentar em equilíbrio, evidenciado por irrisória progradação média do polígono praial da ordem de 0,02 m/ano e aumentos em área de 0,05% e em volume de 124 m<sup>3</sup>. No entanto, alguns indicadores de erosão costeira presentes nesta praia sugerem tendências retrogradacionais de longo período, muito além dos fenômenos de curto e médio período identificados. As causas da erosão em ambas as praias são explicadas principalmente por processos naturais como a elevação do nível do mar (longo período) e variações na dinâmica de circulação costeira, incluindo inversões nas células de deriva litorânea e o fenômeno da rotação praial (curto e médio período). Não foram observadas intervenções antrópicas diretas nessas praias capazes de explicar, por si só, a erosão observada. Entretanto, sabe-se que práticas como a retirada de areia das praias e construções sobre a pós-praia podem aumentar os processos naturais em curso. Estudos como este são imprescindíveis para a gestão da orla marítima, principalmente no contexto atual de elevação do nível do mar e mudanças climáticas, pois poderão orientar ações futuras em curto, médio e longo prazo, que visem a mitigação da erosão e/ou recuperação das praias, além de subsidiar instrumentos normativos que promovam programas de conservação das praias do Litoral Norte paulista.

Palavras-Chave: variação da linha de costa, balanço sedimentar, praias arenosas, fotografias aéreas, Caraguatatuba.

### ABSTRACT

*Shoreline recession in the last few decades is one among the eleven indicators of coastal erosion that have been monitored in the São Paulo state sandy beaches since the nineties. According to the coastal erosion risk assessment has established to these beaches, which is based on the number of these indicators and their perceptual distribution along the beaches, about 22% of the São Paulo beaches are under very high risk. Caraguatatuba County, located at São Paulo Northern coast, has 60% of its sandy beaches under very high risk of erosion. This paper presents the historical shoreline change rates and the net sedimentary budget estimated for two beaches of Caraguatatuba County (Massaguaçu and Tabatinga beaches), both under very high risk of erosion. Geoprocessing works were carried out at aerial photographs from 1962 (most ancient available, original scale 1:25.000), 1977 (original scale 1:45.000) and 2001 (georeferenced digital orthophotos, original scale 1:15.000). Beach polygonal (shoreline) boundaries were drowned according to the follow limits: superior limit – it corresponds to the permanent vegetation line on the coastal plain or some manmade structure such as gardens, walls, sidewalks etc.; inferior limit – it is marked by the high water line, or the limit between wet and drought zones. Shoreline change rates were controlled through perpendicular to the shoreline equidistant transects, which locations coincided to the monitored beach profiles sites so as possible. Methods of End Point Rate (difference between beach width values in each transect for each reference period: 1962-1977, 1977-2001, and 1962-2001) and Average End Point (arithmetic average of EPRs calculated to the set of years) were applied in order to calculate shoreline change rates through the time. Besides, beach areas changes, as well as total average of EPRs and AEPRs were also estimated. Recession or progradation rates were calculated on basis on the average of AEPRs and the entire period of observation (39 years). Values of beach width standard deviation were utilized to refer to the Beach Variability Index, which indicates the trends of the beach through the time, and gives interpretations concerned the causes of beach recession or progradation, including natural processes and/or anthropogenic origins. Net sedimentary budget results from the difference between annual volume values obtained in 2001 and 1962. Annual volume refers to the product between beach area (calculated for 1962 and 2001) and mean beach height (average of heights obtained in previous beach profile monitoring carried out between 1992 and 2003). Interesting processes acting in short- (months to years), medium- (decadal) and long-term (two or more decades) periods could be identified. Massaguaçu beach showed a progressive recession along the entire beach, although the largest rates occur at its central-southern sector, what has been leading to a continuous destruction of a BR-101 highway stretch. The mean recession rate is about 0.23 m/y for the last four decades, resulting in reduction of 30% in area and an escape of around 488.000 m<sup>3</sup> of sands. Tabatinga beach showed numerical results indicating that beach area have increased 0.05% and volume have increasing 124 m<sup>3</sup>, then showing a sedimentary budget in balance, or a small progradation rate of about 0.02 m/y. However, the presence of some coastal erosion indicators seems to indicate that there has been acting a long-term recession trend. The most important causes of erosion in both beaches are sea-level rise (long-term) and changes in coastal circulation dynamics (short- and medium-terms), including reversions in longshore drift cells and even beach rotation. Anthropogenic interventions on the beaches could not explain the erosional processes observed. However, it is known that sand beach mining and construction of hard structures on the beach augment the ongoing natural processes. Finally, considering the current context of sea-level rise and climatic changes, such studies are indispensable for the shoreline management, once results could orientate short-, medium- and long-term actions in order to mitigate the erosional processes and/or to recuperate beaches. Besides, they could be useful tools in normative instruments for promoting a beach conservation regional program.*

Keywords: shoreline changes, sedimentary budget, sandy beaches, aerial photographs, Caraguatatuba County.

## 1. INTRODUÇÃO

Com o aumento da ocupação das áreas costeiras e o quadro atual de mudanças climáticas e elevação do nível relativo do mar (NM), estudos sobre mudanças da posição da linha de costa nas últimas décadas têm se tornado ferramentas essenciais para a gestão da orla marítima e da zona costeira.

A interpretação de séries históricas de fotografias aéreas e mapas antigos como técnica para medir variações da linha de costa começou no final da década de 1960 (Anders & Byrnes 1991). Desde então, inúmeros trabalhos têm discutido os métodos, os erros envolvidos e as aplicações dessa técnica, visando ao estudo de processos erosivos e ao cálculo da taxa de retrogradação da linha de costa (*e.g.* Anders & Byrnes 1991, Crowell et al. 1991, Dolan et al. 1991, Camfield & Morang 1996, Moore 2000, Douglas & Crowell 2000, Fenster et al. 2001, Honeycutt et al. 2001, Byrnes et al. 2003, Boak & Turner 2005, Esteves et al. 2009).

No Brasil, estudos desse tipo ganharam expressão somente a partir da década de 1990 (Souza et al. 2005). Inicialmente, se limitavam a averiguar mudanças da linha de costa em desembocaduras fluviais e lagunares, através da comparação de *overlays* obtidos por fotointerpretação. Na década de 2000, com o advento de técnicas avançadas de geoprocessamento e o aprimoramento da localização espacial por satélite (georreferenciamento), os estudos passam a abordar a identificação das variações da linha de costa de longo período em todo o segmento praial (*e.g.* Dias 2005). São importantes fontes de referência bibliográfica trabalhos apresentados nos Congressos da Associação Brasileira de Estudo do Quaternário (ABEQUA) a partir de 1997, além de Souza et al. (2005) e Muehe (2006).

No Estado de São Paulo, a evolução dos trabalhos sobre o tema se deu da mesma maneira (Souza 2009a). O primeiro trabalho utilizando métodos de cálculo da taxa de retrogradação da linha de costa (toda a praia) e incorporando técnicas de geoprocessamento foi realizado na Praia do Gonzaguinha, no município de São Vicente (Souza & Barbosa 2007, Souza 2008). Estudos semelhantes ao apresentado aqui foram realizados recentemente em outras quatro praias do município de Ubatuba (Souza & Luna 2009).

A erosão nas praias paulistas tem sido atribuída a

uma gama de causas naturais e antrópicas, sendo as mais importantes a elevação no NM, mudanças na dinâmica de circulação costeira e as diversas intervenções do homem na zona costeira (Souza & Suguio 1996,2003, Souza 1997,2001, 2008,2009a,2009b, Souza & Luna 2009). As séries históricas de registros maregráficos para o Estado de São Paulo indicam que no último século a elevação do NM foi da ordem de 30-40 cm (Mesquita 2003), portanto maior do que a média mundial de 18 cm (IPCC 2007). A dinâmica de circulação de células de deriva litorânea, modificada por causas naturais ou por intervenções antrópicas na linha de costa, abrange processos de curto até longo período de tempo. A ocupação inadequada da planície costeira e da orla, incluindo a praia, e a implantação de estruturas rígidas na linha de costa resultam em modificações no balanço sedimentar costeiro, em escalas de médio a longo período de tempo (*e.g.* Souza 1997,2001,2009a, Souza & Alfredine 2000, Souza & Suguio 1996,2003, Souza & Luna 2009). Outra intervenção antrópica que afeta o balanço sedimentar das praias é a retirada de areia das mesmas. Em São Paulo, até o início da década de 1990, essa prática era muito comum em várias praias urbanas, sendo os principais motivos a limpeza das praias, a desobstrução de vias públicas e de equipamentos urbanos instalados na pós-praia, e a utilização da areia na pavimentação de ruas e até no aterro de lixões localizados sobre manguezais. Desde meados daquela década, entretanto, essa atividade tem sido severamente combatida por ações estaduais por parte do Ministério Público e da Secretaria de Meio Ambiente do Estado de São Paulo. Note-se bem que os impactos dessa atividade são, em geral, difíceis de monitorar e mitigar e, em alguns casos, até mesmo de serem identificados.

A retrogradação da linha de costa nas últimas décadas compreende um dos onze indicadores de erosão costeira monitorados nas praias do Estado de São Paulo, desde 1992 (Souza 1997,2009a, Souza & Suguio 2003). Esses indicadores e a sua distribuição espacial ao longo das praias foram os critérios adotados para a classificação de risco à erosão costeira estabelecida para as praias paulistas, urbanizadas ou não (Souza & Suguio 2003, Souza 2007a,2009a). Por seu caráter dinâmico, essa classificação também passou a ser instrumento de reavaliação periódica.

Este trabalho apresenta os resultados obtidos a partir do emprego de técnicas de geoprocessamento realizados em fotografias aéreas de 1962, 1977 e 2001 nas praias de Massaguaçu e Tabatinga (município de Caraguatatuba, Litoral Norte do Estado de São Paulo), com o objetivo de obter as taxas de variação da linha de costa (polígono praial) e do balanço sedimentar dessas praias, bem como identificar os processos intervenientes e suas principais causas.

## 2. PRAIAS DE ESTUDO

As praias de estudo estão localizadas no Litoral Norte de São Paulo, que abrange os municípios de São Sebastião, Ilhabela, Caraguatatuba e Ubatuba (Figura 1).

Nesse setor costeiro a situação das praias arenosas em relação ao grau de risco à erosão é preocupante, pois cerca de 47% delas se encontram em risco Alto e Muito Alto, 27,5% sob risco Médio, 22,4% sob risco Baixo e 3,4% sob risco Muito Baixo (Souza & Suguio 2003, Souza 2007a, 2009a) No município de Caraguatatuba, 60% das praias estão sob risco Muito Alto de erosão.

Para a realização do presente estudo foram selecionadas duas dessas praias, a Praia de Massaguaçu e a Praia de Tabatinga (Figura 1), ambas relativamente abrigadas e ocupando o fundo da Enseada de Caraguatatuba.

A Praia de Massaguaçu tem comprimento superior a 7 km e orientação NE-SW, sendo, portanto, mais exposta para os principais sistemas de ondas que atuam no litoral paulista, com direção S-SE-E (Souza 1997). Apresenta variação do estado morfodinâmico ao longo do arco praial, com características reflexivas de alta energia (com tendências intermediárias) na maior parte da praia, e intermediária no setor norte (localmente conhecida como Praia da Cocanha), onde se encontra mais abrigada, atrás das pequenas Ilhas Cocanha (Souza 1997). É formada por areias grossas a médias moderadamente a bem selecionadas e apresenta bermas e cúspides praias bem desenvolvidas (Figura 2). Fortes correntes de deriva litorânea de rumo sul fecham frequentemente a desembocadura do Rio Massaguaçu, localizada na extremidade sul da praia, onde a face praial e o estirâncio atingem altas declividades, de até cerca de 30° (Figura 2).

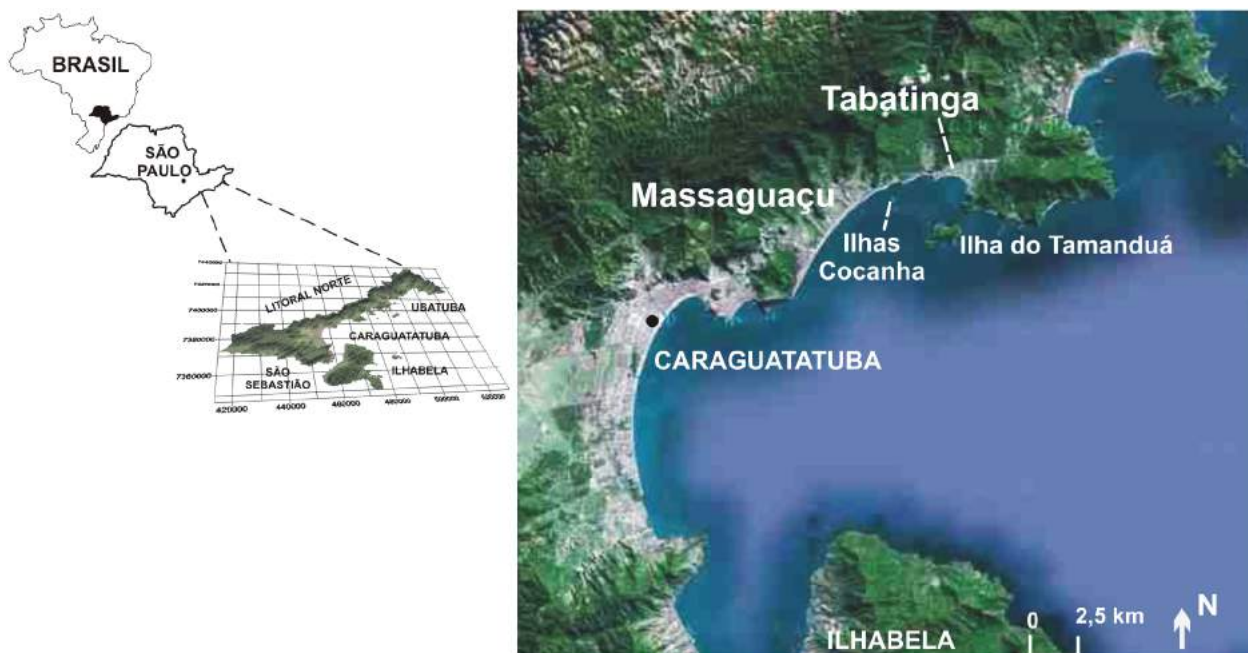


Figura 1. Localização da área de estudo.

Figure 1. Location of the studied beaches.



Figura 2. Extremidade sul da Praia de Massaguaçu (Celia R. de G. Souza). Notar a desembocadura do Rio Massaguaçu completamente assoreada (Lagoa Azul, à esquerda da foto), as duas sequências de bermas praias, pequenas cúspides praias bem desenvolvidas e suas pequenas correntes de retorno associadas, e a alta refletividade da praia.

*Figure 2. Massaguaçu beach southern ending (Celia R. de G. Souza). Note that Massaguaçu River mouth is completely silted by beach sands (Blue Lake, on the left of the picture), there are two sequences of beach berms, well developed beach cusps and associated small rip currents, and beach presents very high reflectivity.*

A Praia da Tabatinga, com orientação E-SE e arco praias pronunciado e pouco extenso (~2 km), é mais abrigada. Está posicionada entre dois promontórios de embasamento ígneo-metamórfico e à retaguarda da Ilha do Tamanduá, constituindo assim uma praia embaçada ou de bolso (*headland bay beach*). Com estado morfodinâmico intermediário a reflexivo de baixa energia, é constituída por areias finas a médias moderadamente selecionadas e possui berma praias incipiente e barras longitudinais suaves (Souza 1997).

O processo erosivo observado atualmente em ambas as praias é intenso, ora se estendendo por todo o arco praias como na Praia da Tabatinga (Figura 3), ora se mostrando maior em alguns trechos como na porção centro-sul da Praia de Massaguaçu (Figura 4). Na Praia de Massaguaçu são monitorados 10 indicadores de erosão e em Tabatinga 8 indicadores (Souza 1997, 2009a, Souza & Suguio, 1996, 2003).



Figura 3. Erosão acelerada na área central da Praia da Tabatinga, onde afloram restos de terraços marinhos provavelmente pleistocênicos, com espodossolos (Celia R. de G. Souza).

*Figure 3. Accelerated erosion in Tabatinga Beach central sector, where remainders of Pleistocene (likely) marine terraces with podzols are exposed (Celia R. de G. Souza).*



Figura 4. Erosão acelerada no setor centro-sul da Praia de Massaguaçu, com destruição recorrente da saia de aterro e da pavimentação da rodovia BR-101 (Celia R. de G. Souza). Notar a tentativa frustrada de conter a erosão através de um anteparo de blocos rochosos. *Figure 4. Accelerated erosion in Massaguaçu Beach, around its center-southern portion (Celia R. de G. Souza). Note the rocky boulders revetment as a frustrated bid for containing the erosional process on the BR-101 highway.*

As causas da erosão têm sido apontadas como sendo: (a) naturais - variações na dinâmica de circulação costeira (inversões na deriva litorânea resultante), aporte sedimentar naturalmente ineficiente (fechamento da desembocadura do Rio Massaguaçu), fisiografia costeira (controlando a dinâmica de circulação costeira e a fuga de sedimentos), armadilhas de sedimentos (Rio Massaguaçu/Lagoa Azul), elevação do NM de curto período (marés meteorológicas cada vez mais intensas como efeito das mudanças climáticas) e de longo período (Princípio de Bruun – Bruun 1962; migração do perfil praiial para o continente - Davidson-Arnott 2005), e balanço sedimentar negativo devido a todos esses processos; (b) antrópicas – urbanização da orla com implantação de estruturas rígidas sobre as praias, conversão de terrenos naturais em espaços urbanos na planície costeira e na praia, retirada de areia de praia e balanço sedimentar negativo devido a todos esses processos (Souza 1997,2001,2007a,2009a, Souza & Suguio, 1996,2003).

A urbanização dessas planícies costeiras e praias é bastante recente, tendo sido induzida principalmente após a implantação da rodovia BR-101 (Rio-Santos), finalizada em meados da década de 1970. Na planície costeira de Massaguaçu, até essa época, a única ocupação antrópica era um loteamento localizado no trecho sul da praia. A partir de então, embora vários loteamentos tenham se espalhado por toda a planície costeira, sempre houve manutenção de uma larga faixa entre a urbanização e a pós-praia, na qual foram construídas as vias de acesso local e expresso (rodovia BR-101).

Até meados da década de 1980, quando foram realizados os primeiros estudos nessa praia, a erosão acelerada ainda não era perceptível (Souza 1990). No entanto, em 1992, quando se iniciou o monitoramento praiial em todo o litoral paulista (Souza 1997), vários indicadores de erosão costeira já podiam ser notados, embora o processo ainda não fosse tão intenso quanto nos dias atuais (Figura 5).

Na planície costeira da Praia de Tabatinga, até meados da década de 1970, havia apenas uma antiga aldeia de pescadores localizada no setor SE da praia. Em 1977 iniciou-se a implantação de um grande condomínio em todo o setor central e oeste, com construções que atualmente se encontram na pós-

praia (Figura 3). A aldeia de pescadores, por sua vez, foi dando lugar a uma ocupação mais densa a partir de meados da década de 1990, e hoje existem alguns quiosques de alvenaria e até residências sobre a pós-praia, aumentando o processo erosivo ali instalado. Pescadores antigos afirmam que muito antes do condomínio ser implantado toda a praia já sofria forte erosão, pois “a mesma se estendia por mais de 100 m mar adentro” (Souza 1997).

Não há dados consistentes sobre os gastos decorrentes dos danos causados pela erosão nas praias do município de Caraguatatuba, tanto em relação às estruturas e equipamentos urbanos públicos, quanto às construções privadas. Sabe-se apenas que, somente em 2006, o Departamento Estadual de Estradas de Rodagem aplicou mais de R\$ 2.000.000,00 em “obras de recuperação” na rodovia BR-101 junto à Praia de Massaguaçu, em tentativas inadequadas e infrutíferas de contenção da erosão (Figura 4).



Figura 5. Forte erosão na porção SE da Praia de Tabatinga e construções sobre a pós-praia (Celia R. de G. Souza).

*Figure 5. Strong erosion in the SE portion of Tabatinga Beach (around profile 701) (Celia R. de G. Souza).*

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

As melhores fontes de dados disponíveis para se estudar as variações da linha de costa ao longo do tempo são fotografias aéreas, imagens de satélite de alta resolução, mapas (mapas históricos e principalmente cartas topográficas e náuticas) e, obviamente, perfis de monitoramento praiial. Cada um

deles tem suas próprias características, influenciando vantagens e desvantagens de utilização, além de diferentes escalas espaciais e temporais e, conseqüentemente, vários tipos de erros envolvidos.

A taxa de variação da linha de costa (polígono praial) em fotografias aéreas e mapas pode ser calculada a partir de vários métodos computacionais, sendo os mais utilizados atualmente: (a) taxa de variação do ponto de terminação ou *End-Point Rate (EPR)*, através do qual é medida a distância horizontal entre duas posições de linha de costa no tempo, preferencialmente ao longo de vários trechos da praia (transectos perpendiculares à linha de costa e eqüidistantes entre si) e envolvendo apenas dois períodos de tempo (é o método proxy mais utilizado nos Estados Unidos); (b) média das *EPRs* ou *Average of EPRs (AEPR)*, através da qual diferentes *EPRs* são calculadas para vários intervalos de tempo, sendo a taxa final a média aritmética do conjunto de valores obtidos; (c) regressão linear ponderada (*Weighted Linear Regression*), é um método estatístico no qual a melhor medida é dada pela soma dos quadrados das diferenças (mínimos quadrados) entre as várias posições da linha de costa obtidas no tempo e medidas em vários trechos da praia; (d) média dos mínimos quadrados (*Least Mean Squares*) (Dolan et al. 1991, Honeycutt et al. 2001, Esteves et al. 2009, Souza & Luna 2009).

No caso específico de produtos de sensores remotos, os indicadores de limites de linha de costa são dados por duas referências: o limite superior é definido pela presença de vegetação permanente ou uma estrutura urbana (ex.: muros, muretas, jardins, calçadas, anteparos etc.); o limite inferior corresponde à linha de água mais alta atingida pela maré naquele período (*high water line* – Dolan et al. 1980), que pode ser observada por diferenças de tonalidade, sendo o contato entre a areia úmida e a areia seca.

Até a década de 1990, para mapeamentos da linha de costa através de fotointerpretação, a menor escala utilizável era a de 1:20.000 ou próxima, com erros em geral de até 2 m (Moore 2000). Entretanto, com o advento das geotecnologias os erros passaram a ser cada vez mais reduzidos, possibilitando o uso de produtos de sensores remotos de escalas bem menores (Dias 2005). Isto porque, o emprego de ferramentas de processamento digital de imagens permite realizar correções automáticas para reduzir as distorções e aumentar a resolução dos pixels,

mesmo em escalas antigamente consideradas inadequadas como, por exemplo, de 1:45.000.

Vários autores têm discutido tanto as questões ligadas à utilização dos diversos materiais-fonte de dados, como também testado os diferentes métodos de aplicação, demonstrando que a eficiência de cada um depende da área estudada e dos erros inerentes a cada material, erros de medição e erros dos métodos estatísticos empregados (e.g. Dolan et al. 1980, Anders & Byrnes 1991, Crowell et al. 1991, Dolan et al. 1991, Camfield & Morang 1996, Moore 2000, Douglas & Crowell 2000, Fenster et al. 2001, Honeycutt et al. 2001, Byrnes et al. 2003, Boak & Turner 2005, Esteves et al. 2009).

Na área de estudo foram aplicados os métodos de *EPR* e *AEPR* em três conjuntos de fotografias aéreas: 1962 – sobrevôo mais antigo disponível para o litoral paulista, em escala original de 1:25.000 e obtido em junho (Secretaria da Agricultura do Estado de São Paulo), 1977 - em escala original de 1:45.000 e obtido em junho-julho (Terra Foto AS.), e 2001 - ortofotos digitais georreferenciadas, em escala original de 1:15.000, e obtidas em junho (Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo – Projeto de Preservação da Mata Atlântica – PPMA/KFW).

Embora outros sobrevôos sejam disponíveis para o mesmo período, até com escalas maiores, a escolha destes conjuntos deveu-se aos seguintes fatos: os três sobrevôos foram realizados no mesmo período do ano e, aparentemente, sob as mesmas condições de contorno, ou seja, em fase de baixamar de quadratura (horário entre 9:30 e 11:30 h); não ocorreram fenômenos meteorológicos anômalos nos dias que antecederam esses sobrevôos; o sobrevôo de 1977 foi escolhido também porque a rodovia BR-101 (ou Rio-Santos), que interliga as praias estudadas, foi finalizada em 1975-1976.

As fotografias aéreas de 1962 e 1977 foram digitalizadas várias vezes em Scanner A3, com resolução inicial de 800 *dpi* e posterior redução do tamanho das imagens (com mínimo erro) até 400 *dpi*, para sua transformação em arquivos *raster* (não georreferenciados). Posteriormente, as imagens foram georreferenciadas com auxílio do aplicativo de programa *MapInfo* versão 9.0, tendo como base pontos de controle obtidos nas ortofotos de 2001, tais como: cruzamentos de ruas e avenidas, grandes equipamentos lineares como oleoduto e redes de alta

tensão, pontes e, eventualmente, anomalias no relevo (centróide de topo de morros isolados).

Os erros quadráticos médios calculados para as fotografias aéreas utilizadas, após o emprego das ferramentas de geoprocessamento, são descritos a seguir.

- a) Fotografias aéreas de 1962 – Massaguaçu: 0,15769m; Tabatinga: 0,07018m.
- b) Fotografias aéreas de 1977 – Massaguaçu: 0,44467m; Tabatinga: 0,12493m.
- c) Fotografias aéreas de 2001 – Massaguaçu: 0,15831m; Tabatinga: 0,15831m.

Na etapa seguinte efetuou-se a edição topológica do objeto de estudo, ou seja, a delimitação dos polígonos de contorno de cada praia, para cada ano amostrado. Ao final e por motivos óbvios, a representação espacial de toda a série histórica foi feita sobre as ortofotos de 2001, sendo os erros calculados pelo programa da ordem de 1%. O polígono praiial de 1962 foi adotado como *datum* para os cálculos apresentados no trabalho.

Assim, foram obtidas as áreas de cada praia e calculadas as variações de área nos três intervalos de tempo, aqui denominados períodos de referência: 1962-1977, 1977-2001 e 1962-2001.

Em cada polígono de praia foram então traçados transectos de controle, perpendiculares à linha de costa e aproximadamente equidistantes entre si, cuja locação foi, sempre que possível, seguindo as localizações de perfis de monitoramentos realizados nas praias estudadas entre 1992 (Souza 1997) e 2001 (Souza 2005). Entretanto, para preservar a acuidade do método e visando manter a equidistância entre os transectos, foi necessária a alocação de outros transectos em trechos não perfilados anteriormente.

Ainda fazendo uso de ferramentas de geoprocessamento, foram medidas as larguras da praia em cada transecto, para cada ano, e obtidos a média aritmética e o desvio padrão correspondentes.

A partir dos valores de desvio padrão Souza & Luna (2009) estabeleceram um parâmetro ao qual denominaram de Índice de Variabilidade Espaço-Temporal da Praia, que indica as tendências espaciais dessa praia ao longo do tempo e pode fornecer interpretações quanto às causas dos fenômenos envolvidos nas variações da linha de costa (processos naturais e/ou intervenções antrópicas). Assim, em função dos valores de desvio padrão ( $\sigma$ ) obtidos para

as praias estudadas aqui, foi estabelecida a seguinte classificação:  $\sigma=0-10$ : variabilidade muito baixa;  $\sigma=11-20$ : variabilidade baixa;  $\sigma=21-30$ : variabilidade média;  $\sigma=31-40$ : variabilidade alta;  $\sigma > 40$ : variabilidade muito alta. Variabilidades baixas e muito baixas sugerem processos essencialmente naturais, enquanto variabilidades alta e muito alta indicam processos predominantemente antrópicos.

A *EPR* corresponde à diferença entre os valores de largura de cada transecto por período de referência (1962-1977, 1977-2001 e 1962-2001), e a *AEPR* é a média aritmética de cada *EPR* calculada para o conjunto de todos os anos (1962/1977/2001). Foram também calculadas as médias totais de variação de largura para cada praia (conjunto de todas as *EPRs*), bem como a média total das *AEPRs*.

Para obter o balanço sedimentar das praias, inicialmente foi calculado o volume de areia correspondente em cada ano de amostragem. Para tanto, multiplicou-se o valor da área da praia pela altura média da praia em seu perfil emerso, cujos valores foram obtidos a partir dos dados coletados em monitoramentos praiiais (perfilagens) realizados entre 1992 e 2003 (Souza 1997, 2005). Posteriormente, foram calculadas as diferenças de volume em cada período de referência e o volume total de sedimentos evadidos ou acumulados no intervalo total de 39 anos.

A taxa média de retrogradação (reco) ou de progradação da linha de costa (polígono praiial) foi obtida a partir da divisão entre a média das *AEPRs* e o intervalo de tempo total de análise (39 anos).

Dados de largura da praia obtidos nas campanhas de monitoramento praiial não podem ser utilizados, em seus valores absolutos, para o estabelecimento de comparações com os resultados obtidos para este trabalho. Isto porque a “largura praiial” incorpora conceitos diferentes para cada caso. Neste trabalho, o limite inferior da praia é marcado pelo limite entre a área seca e a área úmida da praia, que corresponde, aproximadamente, à linha mais elevada atingida pela última preamar (no caso de São Paulo, em geral a preamar da madrugada), sendo, portanto, o limite superior do estirâncio naquele dia. Nas perfilagens praiiais, o limite inferior do perfil praiial emerso medido corresponde à linha d’água no momento da amostragem, ou seja, ao limite inferior do estirâncio. Essas diferenças podem gerar erros de até dezenas de metros no caso das praias estudadas, as quais são sujeitas a regime de micromarés com maré semi-



diurna e amplitude de até 1,0 m em condições de tempo bom. Além disso, são também fatores limitantes as condições de contorno durante as perfilagens praias, como o mês do ano e as condições meteorológicas antes e durante as coletas.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

##### 4.1. Análise Espacial e Balanço Sedimentar das Praias

De maneira geral, observa-se que ambas as praias sofreram importantes variações espaciais nas quatro décadas de análise (figuras 6 e 7, tabela 1).

As variações nas áreas e volumes dos arcos praias demonstram perdas graduais e significativas em certos trechos de ambas as praias, embora isso pareça mais evidente em Massaguaçu e apenas temporário ou mais setorizado em Tabatinga.

No período de 1962-1977 a Praia de Massaguaçu teve sua área reduzida em cerca de (-)13%, enquanto

em Tabatinga essa redução foi de (-)8,23%. No período de 1977-2001, a redução em área na Praia de Massaguaçu foi de 19,2%, enquanto na Praia de Tabatinga houve aumento de área, em valor semelhante à perda ocorrida no período anterior, ou seja, de 8,28%. Comparando 1962 e 2001, a taxa de redução de área em Massaguaçu foi de quase 30%, mas a Praia de Tabatinga contabilizou um acréscimo de 0,05%.

Conseqüentemente, após quatro décadas de erosão gradual, o balanço sedimentar na Praia de Massaguaçu estaria negativo, envolvendo perda total de volume de areia da ordem de  $-487.901,30 \text{ m}^3$ . Na Praia de Tabatinga, por outro lado, os dados brutos revelam um relativo equilíbrio (balanço sedimentar praticamente igual a zero), já que o pequeno saldo de  $124,05 \text{ m}^3$  pode ser considerado irrisório se contabilizados os erros inerentes aos métodos aplicados.

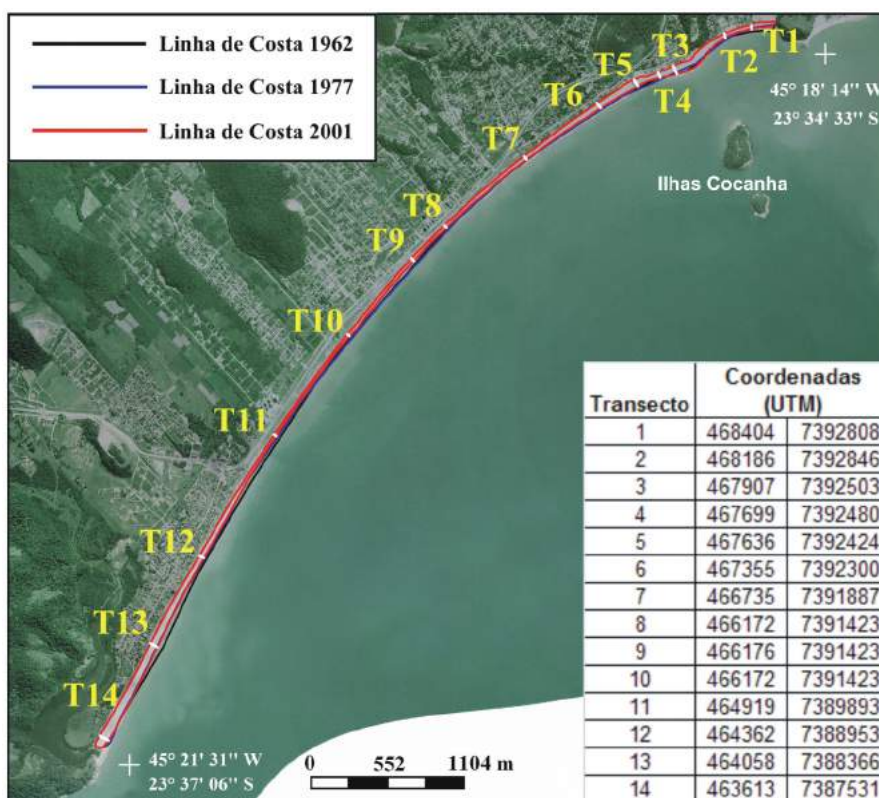


Figura 6. Variação da linha de costa (polígono praial) na Praia de Massaguaçu para os anos de 1962, 1977 e 2001.

Figure 6. Shoreline (beach polygon) changes in Massaguaçu beach for 1962, 1977 and 2001.

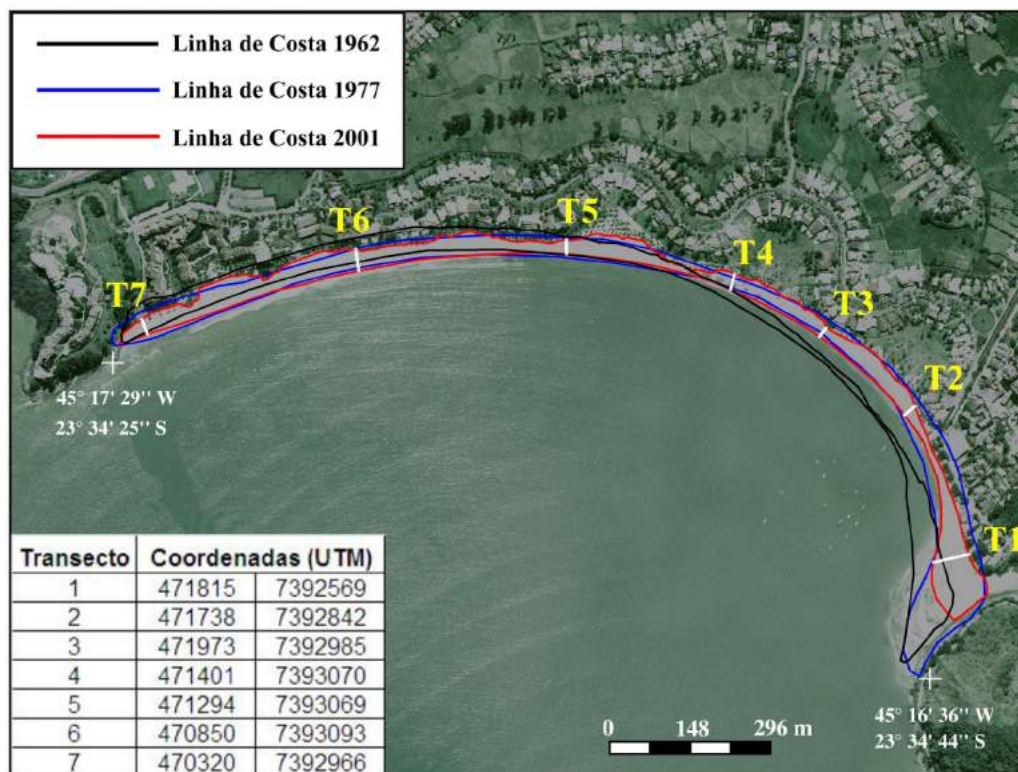


Figura 7. Variação da linha de costa (polígono praial) na Praia de Tabatinga para os anos de 1962, 1977 e 2001.

Figure 7. Shoreline (beach polygon) changes in Tabatinga beach for 1962, 1977 and 2001.

#### 4.2. Praia de Massaguaçu

A Praia de Massaguaçu apresentou, em geral, larguras pequenas (Figura 8, Tabela 2), como esperado para praias reflexivas. As médias variaram de 29,9 m (T7) até 79,6 m (T14), locais estes que durante todo o período se apresentaram como sendo os trechos respectivamente mais estreitos e mais largos da praia.

Em 1962 as larguras variavam de 32,8 m (T7) até 93,3 m (T13); em 1977 a menor largura foi 24,2 m (T1), e a maior de 90,8 m (T14); já em 2001, a porção mais estreita da praia localizava-se em T11, que apresentava apenas 16,4 m, enquanto a mais larga estava em T7, com 29,4 m. Entre 1992 e 2001 observa-se uma tendência geral de diminuição das larguras em treze dos quatorze transectos avaliados.

O gráfico obtido sugere que os segmentos das curvas são temporalmente ora sintônicos, ora assintóticos. As curvas de 1962 e 1977 são sintônicas nos trechos entre os transectos T1 a T7 e T11 a T12,

e assintóticas nos demais trechos. As curvas de 1962 e 2001 também são sintônicas nos trechos entre os transectos T1 a T7, T9 a T10 e em T14, e assintóticas nos demais trechos. As curvas de 1977 e 2001 são sintônicas nos trechos de T1 e entre os transectos T4 a T7, T9 a T10 e T11 a T13.

Os resultados obtidos para as EPRs (Tabela 3) demonstram ainda melhor essas tendências. No período de referência de 1962-1977, certos locais da praia sofreram acreção de alguns metros, como em T2, T4, T5, T8 (mínimo valor, de 5,5 m), T9, T10 e T14 (máximo valor, de 15,8 m); os demais transectos sofreram erosão, em geral de dezenas de metros e variando de -1,9 m (T6) até -39,7 m (T13). Por causa desse relativo equilíbrio, a média das EPRs nesse período ficou em -3,68 m, mesmo assim indicando que o saldo foi negativo. No período de 1977-2001, os locais com acreção estavam somente em T1, T3 (máximo valor, de 14,4 m), T7 (mínimo, de 1,9 m) e

T13; nos demais transectos as taxas de erosão foram bem maiores que no período anterior, variando de -4,8 m (T12) até -29,13 m (T9). Com isso, a média das EPRs atingiu -10,2 m. Comparando 1962 e 2001,

somente o transecto T3 sofreu pequena acreção, de 0,76 m; no restante da praia a erosão variou de 2,12 m (T14) até 36,8 m (T13).

Tabela 1. Variação das áreas dos arcos praiais, variação do volume de sedimentos e balanço sedimentar das praias de Massaguaçu e Tabatinga (valores negativos = perdas/erosão; valores positivos = ganhos/progradação).

Table 1. Beach areas and sedimentary volume changing rates, and sedimentary budget for Massaguaçu and Tabatinga beaches (negative values = losses/recession; positive values = gains/progradation).

Área do Arco Praiaal (m <sup>2</sup> )			
Praia	1962	1977	2001
Massaguaçu	373.368,24	324.721,45	262.481,58
Tabatinga	67.429,14	61.878,62	67.463,79

Taxas de Variação da Área do Arco Praiaal (m <sup>2</sup> )						
	ΔA 1962-1977		ΔA 1977-2001		ΔA 1962-2001	
	(m <sup>2</sup> )	(%)	(m <sup>2</sup> )	(%)	(m <sup>2</sup> )	(%)
Massaguaçu	-48.646,79	(-)13,03	-62.239,87	(-)19,17	-110.886,66	(-)29,70
Tabatinga	-5.550,52	(-)8,23	5.585,17	(+)8,28	34,65	(+)0,05

	Volume de Areia do Arco Praiaal (m <sup>3</sup> )			Balanço Sedimentar (m <sup>3</sup> )
	1962	1977	2001	(1962-2001)
Massaguaçu	1.642.820,26	1.428.774,38	1.154.918,95	-487.901,31
Tabatinga	241.396,32	221.525,46	241.520,37	124,05

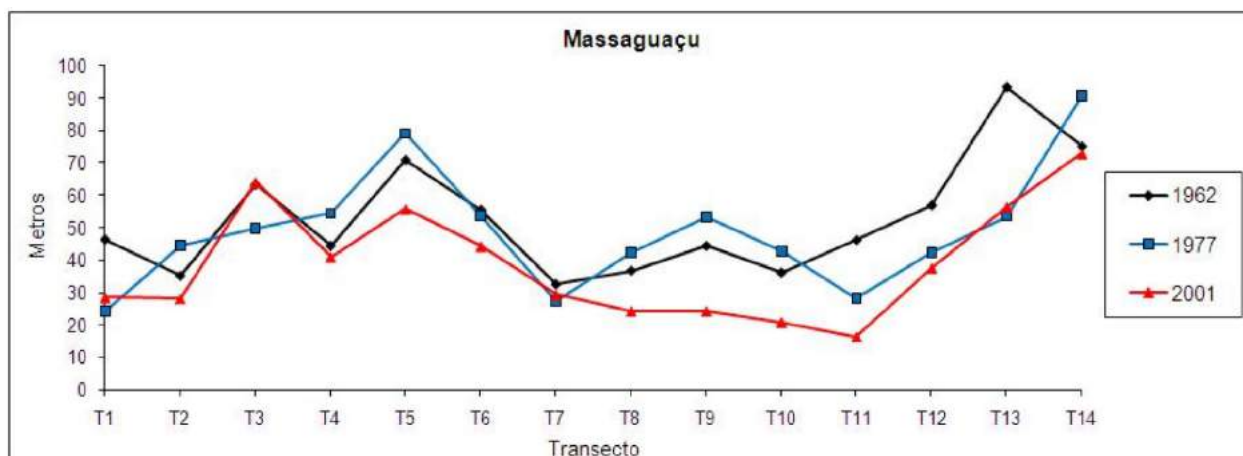


Figura 8. Variação temporal da largura do arco praiial na Praia de Massaguaçu.

Figure 8. Beach width long-term variation in Massaguaçu beach.

Tabela 2. Variação da largura na Praia de Massaguaçu e índice de variabilidade espaço-temporal da praia.

Table 2. Beach width variation and beach variability index for Massaguaçu beach.

<i>Transecto</i>	<i>1962</i>	<i>1977</i>	<i>2001</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Variabilidade</i>
T1	46,49	24,2	28,5	33,06	28,59	Média
T2	35,36	44,55	28,23	36,05	8,18	Muito Baixa
T3	63,31	49,7	64,07	59,03	8,09	Muito Baixa
T4	44,55	54,51	41,01	46,69	7,00	Muito Baixa
T5	70,92	79,17	55,86	68,65	11,82	Baixa
T6	55,57	53,65	44,36	51,19	6,00	Muito Baixa
T7	32,77	27,47	29,35	29,86	2,69	Muito Baixa
T8	36,93	42,35	24,37	34,55	9,22	Muito Baixa
T9	44,55	53,48	24,35	40,79	14,92	Baixa
T10	36,34	42,84	20,91	33,36	11,26	Baixa
T11	46,32	28,23	16,41	30,32	15,06	Baixa
T12	57,01	42,47	37,64	45,71	10,08	Baixa
T13	93,26	53,54	56,48	67,76	22,13	Média
T14	75,08	90,84	72,96	79,63	9,77	Muito Baixa

Obviamente, com os efeitos das mudanças climáticas e a elevação atual do NM (Souza 2010), esses processos são amplificados, pois ocorrem alguns

fenômenos que reduzem o balanço sedimentar das praias e intensificam a erosão, entre eles: aumento de intensidade, frequência e magnitude de eventos

Tabela 3. Taxas de variação da linha de costa (polígono praia) na Praia de Massaguaçu: *EPRs* e *AEPRs* (sinais negativos = retrogradação da linha de costa; sinais positivos = progradação da linha de costa).Table 3. Shoreline (beach polygon) changing rates for Massaguaçu beach: *EPRs* and *AEPRs* (negative values = erosion or shoreline recession; positive values = shoreline progradation).

<i>Transecto</i>	<i>EPR 1962-1977</i>	<i>EPR 1977-2001</i>	<i>EPR 1962-2001</i>	<i>AEPR 1962/1977/2001</i>
T1	-22,29	4,31	-17,98	-11,99
T2	9,19	-16,32	-7,13	-4,75
T3	-13,61	14,37	0,76	0,51
T4	9,96	-13,5	-3,54	-2,36
T5	8,25	-23,31	-15,06	-10,04
T6	-1,92	-9,29	-11,21	-7,47
T7	-5,3	1,88	-3,42	-2,28
T8	5,42	-17,98	-12,56	-8,37
T9	8,93	-29,13	-20,2	-13,47
T10	6,5	-21,93	-15,43	-10,29
T11	-18,09	-11,82	-15,43	-15,11
T12	-14,54	-4,83	-19,37	-12,91
T13	-39,72	2,94	-36,78	-24,52
T14	15,76	-17,88	-2,12	-1,41
<i>Médias</i>	-3,68	-10,18	-12,82	-8,89

As *AEPRs* de cada transecto (Tabela 3) indicam tendência erosiva variável para todos eles no período total de amostragem, exceto para T3 (acrecção de 0,51 m). As maiores taxas de erosão ocorreram nos perfis T13 (-24,5 m), T11 (-15,1 m), T9 (-13,5 m), T12 (12,9 m), T1 (-12 m), T10 (-10,3 m) e T5 (-10 m). As menores taxas erosivas foram obtidas para T14 (-1,4 m), T7 (-2,3 m), T4 (-2,4 m) e T2 (-4,8 m).

A média das *AEPRs* foi de -8,9 m, o que corresponderia a uma taxa de retrogradação média da ordem de 0,23 m/ano, para as últimas quatro décadas.

Os índices de variabilidade espaço-temporal da praia (Tabela 2) e os resultados obtidos para as *EPRs* e *AEPRs* indicam que os trechos mais estáveis da praia (s muito baixa) estão nos transectos T2, T4, T3, T7, T6 e T14, enquanto que os relativamente mais instáveis (s média) estão localizados nos transectos T1 e T13. Da mesma forma, demonstram que o trecho mais erosivo da praia está entre os transectos T7 e T11, sendo este último o local que sofreu maior taxa de recuo praial nessas quatro décadas.

As causas do recuo generalizado da linha de costa parecem estar mais ligadas a processos naturais (predominam variabilidades muito baixas e baixas), como variações na dinâmica de circulação costeira (células de deriva litorânea) e mesmo a elevação do NM no último século, do que à urbanização que ocorreu nessa praia, incluindo a construção da rodovia BR-101. Neste sentido, é importante ressaltar que as vias de acesso (estrada não pavimentada inicialmente e rodovia na década de 1970) não foram implantadas sobre a pós-praia, como é possível observar na Figura 9, mesmo na área entre os transectos T8 e T9 onde a rodovia sofre intensa erosão (Figura 4). Por outro lado, no trecho da praia que sofreu maior recuo nessas quatro décadas, localizado entre os transectos T10 e T11, a rodovia ainda se encontra bem afastada da praia, demonstrando que ela não pode ser caracterizada como causa da erosão.

Em relação à dinâmica de circulação costeira, a parte central dessa praia parece estar sujeita à ação de um foco estável de energia de ondas, responsável pela existência de zonas de divergência de células de deriva litorânea. Em 2001, por exemplo, dados do monitoramento realizado nessa praia mostram que ocorria uma zona de divergência em T9, com zonas de sotamar localizadas em T6 e T12 (Tabela 4) A

migração dessa zona rumo ao sul (transectos T8, T9, T10 e T11) ou, ainda, inversões nesse padrão de circulação, explicariam o processo erosivo acentuado e gradativo observado em todo esse trecho da praia (Souza 1997,2005,2007b). Calliari et al. (1998) identificaram o fenômeno em praias do Rio Grande do Sul, com focos estáveis de energia sempre associados a erosão acelerada em determinados trechos das mesmas.



Figura 9. Detalhes das fotografias aéreas de 1962 e 1977, mostrando a faixa de vegetação preservada entre a praia e as vias de acesso no trecho compreendido entre os transectos T8 e T9.

Figure 9. Aerial photographs from 1962 and 1977 showing a preserved stretch of vegetation between the beach and the highway around transects T8 and T9.

atmosféricos extremos (tempestades e ressacas), mudanças no clima de ondas, mecanismos que regem o Princípio de Bruun (Bruun 1962) e migração do perfil praiado rumo ao continente (Davidson-Arnott 2005).

Em relação à Regra ou Princípio de Bruun, Souza (1997) obteve resultados interessantes que comprovam a atuação desse mecanismo em toda a costa paulista. A análise comparativa de cartas náuticas publicadas nas décadas de 1930 e 1990 mostrou o deslocamento generalizado das isóbatas entre 0 (linha de costa) e 50 m, em direção ao mar aberto, bem como a diminuição da declividade da plataforma continental, em cerca de 80% da costa, incluindo a área de estudo.

### 4.3. Praia de Tabatinga

A Praia de Tabatinga apresentou, em todos os anos de amostragem, larguras da ordem de poucos até várias dezenas de metros (Tabela 5 e Figura 10), sendo que as médias entre 17 m (T3) até 60 m (T1 - proximidades do Rio Tabatinga).

Os índices de variabilidade espaço-temporal da praia, sempre muito baixos e baixos, revelam que as variações de largura foram pequenas em todos os transectos e que essa praia, como um todo, seria relativamente estável

nesse período.

Os valores das *EPRs* (Tabela 6) também refletem essas tendências. No período de referência de 1962-1977, o trecho entre os transectos T1 a T4 exibiu progradação, variando de 0,75 m em T4 até 33 m em T2; por outro lado, no trecho entre os transectos T5 e T7, observou-se retrogradação da praia, que variou de -4,1 m em T5 até -21,1 m em T7. No período de 1977-2001 não há tendências homogêneas, pois os transectos T1, T4 e T6 apresentaram aumento de largura de 7,4 m em T1 até 13 m em T6, enquanto nos demais ocorreu diminuição, que variou de 1,7 m em T3 até 36,7 m em T7. No cômputo 1962-2001, o trecho entre T1 e T4 sofreu progradação (11 m em T4 até 21 m, em T2), enquanto o trecho entre T5 e T7 sofreu retrogradação (de 4 m em T6, até 23,8 m em T7).

Os valores das *AEPRs* (Tabela 6) indicam progradação no trecho entre T1 e T4, com maior valor em T2 (14 m) e menores em T4 (7,4 m) e T3 (7,8 m), e retrogradação no restante da praia, oscilando de 2,8 m em T6 a 27 m em T7.

O valor da média das *AEPRs* na Praia de Tabatinga foi de 0,64 m, sugerindo que essa praia esteve em relativo equilíbrio entre 1962 e 2001, apresentando uma irrisória taxa de progradação da ordem de 0,02 m/ano.

Tabela 4. Matriz de Comparação para identificação de células de deriva litorânea na Praia de Massaguaçu, segundo o Método de Souza (1997,2007b) e com base em dados da perfilagem praiado de 2001. (E = erosão, zona de barlamar de célula de deriva litorânea; D = deposição, zona de sotamar; T = transporte, zona de transporte). Cada célula tem início em "E" e terminação em "D".

Table 4. Comparison Matrix for identifying longshore drift cells according to the Souza's Method (1997,2007b), by using data from Massaguaçu beach monitoring carried out in 2001. (E = erosion, updrift zone of longshore drift cell; D = deposition, downdrift zone; T = transportation, transport zone). Each longshore drift cell begins in "E" and ends in "D".

Perfil Praial (Transecto)	Diâmetro médio ( $\phi$ )		Desvio padrão ( $\phi$ )		Curtose ( $\phi$ )	Inclinação (graus)		Largura (m)		Resultado	Processo Resultante
686 (T14)	0,86	-	0,87	-	0,89	-	13	-	38	-	E
687 (T12)	1,12	+/+	0,83	-/-	1,06	+/+	10	+/-	47	+/+	D
688 (T9)	0,96	-/+	0,64	+/-	1,05	-/-	6	+/-	19,5	-/-	E
689 (T8)	0,82	-/-	0,60	+/-	1,06	+/+	6	0/+	33	+/-	T
694 (T6)	1,11	+/-	0,44	+/+	0,97	-/0	10	-/-	55,5	+/+	D
693 (T5)	1,32	+/+	0,45	-/+	0,97	0/-	9	+/+	54	-/+	T
690 (T3)	1,28	-/-	0,60	-/+	0,98	+/+	10	-/-	22	-/-	E
691 (T2)	1,77	+/-	0,65	-/-	0,95	-/+	7	+/-	54	+/+	T
692 (T1)	1,82	+	0,59	+	0,93	-	3	+	23,5	-	D

Tabela 5. Variação da largura na Praia de Tabatinga e índice de variabilidade espaço-temporal da praia.  
 Table 5. Beach width variation and beach variability index for Tabatinga beach.

Transecto	1962	1977	2001	Média	Desvio Padrão	Variabilidade
T1	53,12	59,74	67,1	59,99	6,99	Muito Baixa
T2	4,50	37,75	25,74	22,66	16,84	Baixa
T3	8,58	22,08	20,31	16,99	7,34	Muito Baixa
T4	19,04	19,79	30,06	22,96	6,16	Muito Baixa
T5	32,71	28,62	26,46	29,26	3,17	Muito Baixa
T6	44,47	27,16	40,29	37,31	9,03	Muito Baixa
T7	53,28	32,22	29,47	38,32	13,03	Baixa

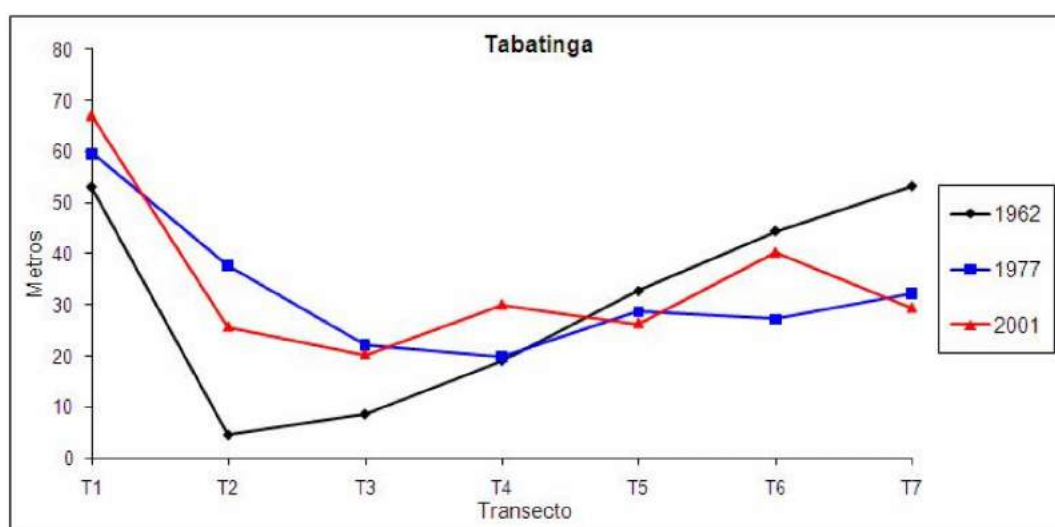


Figura 10. Variação temporal da largura do arco praial na Praia de Tabatinga.  
 Figure 10. Beach width long-term variation in Tabatinga Beach.

Tabela 6. Taxas de variação da linha de costa (polígono praial) na Praia de Tabatinga: EPRs e AEPRs (sinais negativos = retrogradação da linha de costa; sinais positivos = progradação da linha de costa).  
 Table 6. Shoreline (beach polygon) changing rates for Tabatinga beach: EPRs and AEPRs (negative values = erosion or shoreline recession; positive values = shoreline progradation).

Transecto	EPR 1962-1977	EPR 1977-2001	EPR 1962-2001	AEPR 1962/ 1977/ 2001
T1	6,62	7,36	13,98	9,32
T2	33,25	-12,01	21,24	14,16
T3	13,5	-1,77	11,73	7,82
T4	0,75	10,27	11,02	7,35
T5	-4,09	-2,16	-6,25	-4,17
T6	-17,31	13,13	-4,18	-2,79
T7	-21,06	-36,71	-23,81	-27,19
<b>Médias</b>	<b>1,67</b>	<b>-3,13</b>	<b>3,39</b>	<b>0,64</b>

Portanto, os resultados numéricos brutos indicariam que, em geral, ocorreu progradação no trecho E-SE da praia, entre T1 e T4 (com média máxima de 14,2 m em T2), e retrogradação no restante do arco praial, entre T5 e T7 (com média máxima de -27,2 m em T7).

Entretanto, observando as variações do polígono praial em planta com projeção espacial (Figura 7), percebe-se que, na realidade, ocorreu um forte recuo de todo o segmento E-SE da praia (transectos T1 a T4) entre os anos 1962 e 1977 e, em parte, entre 1977 e 2001. No segmento centro-oeste (T5 a T7), por outro lado, nota-se progradação da praia entre os anos de 1962 e 1977 e, em parte, entre 1977 e 2001, com posterior ocupação da área acrescida de 1962. Essas variações sugerem que no período entre 1962 e 1977 a teria ocorrido um fenômeno conhecido como rotação praial, cuja zona de inflexão estaria localizada na área entre os transectos T4 e T5.

A rotação praial é um fenômeno oscilatório, de curto a médio intervalo de tempo (semanas até décadas), observado em praias embaçadas ou de bolso. Corresponde a um realinhamento da praia em resposta a fortes modificações no transporte litorâneo longitudinal (correntes de deriva litorânea), decorrentes de súbita mudança na direção dos trens de ondas incidentes (Short & Masselink, 1999). Como consequência, ocorre alternância entre erosão e acreção rumo às terminações opostas da praia, sendo que o sedimento erodido não sai da praia, mas é redepositado em outro local do seu arco (Figura 11).

No Brasil, a única referência ao fenômeno é feita por Klein et al. (2004), que observaram sua ocorrência em algumas praias de Santa Catarina, semelhantes à praia estudada.

Embora as variações espaciais dessa praia possam sugerir um relativo equilíbrio no intervalo de tempo amostral, como explicar a presença de restos de depósitos marinhos de idade provavelmente pleistocênica sobre o estirâncio e a pós-praia observados no segmento centro-oeste da praia (Figura 3)? Este é um indicador incontestável de erosão acelerada e déficit sedimentar de longo período, cuja causa muito provavelmente está relacionada à elevação do NM no último século. Outros exemplos da presença desse indicador são encontrados em outras três praias de São Paulo, na Praia Vermelha do Norte

em Ubatuba (Litoral Norte), na Praia do Itaguapé em Bertioga (Baixada Santista) e no extremo sul da Ilha Comprida (Litoral Sul).

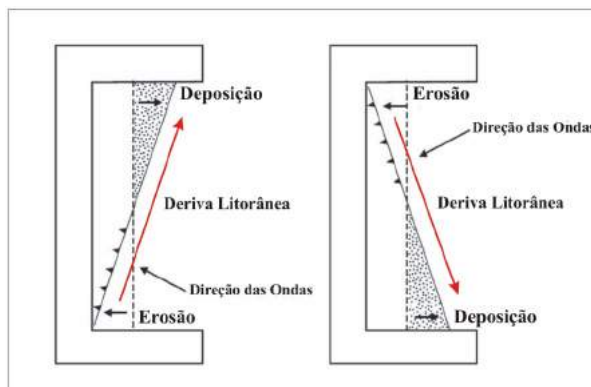


Figura 11. Processos de erosão e deposição associados à rotação praial em uma praia embaçada (modificado de Short & Masselink 1999).

*Figure 11. Erosion and deposition processes associated to beach rotation in a headland bay (modified from Short & Masselink 1999).*

Outra possível causa natural para explicar essa erosão acelerada, superposta às demais, poderia ser atribuída a processos de curto período de tempo (semanas, meses, poucos anos) como a reversão ou geração de pequenas células de deriva litorânea em certos trechos da praia. Fenômenos de reflexão (ondas de ressonância ou *edge waves*) ou difração de ondas ao redor da Ilha do Tamanduá e dos promontórios rochosos nas terminações da praia podem gerar trens de ondas secundários próximos à costa (Souza 1997), causando reversões ou novos padrões de células. Na Figura 7, por exemplo, observa-se a existência de dois trens de ondas: um principal, cuja ortogonal tem rumo NW, e um secundário, de rumo NNW, ambos se interceptando nas proximidades do transecto T6, onde haveria uma zona de divergência de duas células de deriva litorânea, uma com rumo W e outra com rumo E.

O comportamento não linear e heterogêneo da atuação dessas células pode ser exemplificado através dos resultados de perfilagens praias realizadas em 1992 (Souza 1997) e 2001 (Souza 2005), obtidos a partir da aplicação do Método de Souza (Souza 1997, 2007b) (Tabela 7). Em 1992 (perfis 164 a 167) observa-se a ocorrência de uma única célula, com



barlamar no canto oeste da praia (T7) e sotamar na terminação oposta. Já em 2001 (perfis 698 a 701) aparecem três células, com zonas de barlamar em T7 e T5 (zona de divergência de duas células pequenas) e sotamar em T6 (zona de convergência de duas células pequenas) e no canto SE da praia (T2).

A maior deposição verificada em T1, em todos os anos, deve estar relacionada a duas causas principais, a saber: (a) influência do Rio Tabatinga, localizado na extremidade sul da praia, como importante fonte local de sedimentos que devem ser pouco remobilizados devido à baixa energia de ondas no local (área de sombra atrás da Ilha do Tamanduá e dos promontórios); (b) presença predominante de uma zona de sotamar de célula de deriva litorânea, mesmo durante a rotação praial, cuja origem (barlamar) estaria próxima de T2 ou entre T2 e T1 (áreas com larguras diminutas) e a terminação (sotamar) no promontório rochoso.

A urbanização da praia não pode ser apontada como causa direta de erosão, pois processos erosivos já podiam ser observados antes da ocupação da praia nos moldes atuais (Figura 12).

## 5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos mostram tendências de retrogradação da linha de costa de longo período para ambas as praias.

Na Praia de Massaguaçu, 93% dos transectos apresentaram retrogradação nas quatro décadas de análise, com recuos progressivos desde 1962. O trecho mais erosivo está na porção central dessa praia, entre os transectos T7 e T11. A média de todas as EPRs no período 1962-1977 foi de -3,68 m, bem menor do que a média para o período 1977-2001, da ordem de -10 m. Quando comparados 1962 e 2001, a média é de -12,82 m. As áreas do polígono praial sofreram redução progressiva, de 13% no período 1962-1977 e 19% no período 1977-2001. Comparando 1962 e 2001, a praia apresentou diminuição de área de 110.886,70 m<sup>2</sup>, o que corresponderia a uma redução de quase 30% da mesma e taxa média de retrogradação da ordem de 0,23 m/ano. O balanço sedimentar dessa praia é negativo, com evasão da ordem de 487.901,3 m<sup>3</sup> de areia.

A erosão observada na Praia de Massaguaçu, com evidências mais acentuadas no setor centro-sul da

Tabela 7. Matriz de comparação para identificação das células de deriva litorânea na Praia de Tabatinga, segundo o Método de Souza (1997,2007b) e com base em dados das perfilagens praiais de 1992 e 2001. (E= erosão, zona de barlamar de célula de deriva litorânea; D= deposição, zona de sotamar; T= transporte, zona de transporte). Cada célula tem início em “E” e terminação em “D”.

Table 7. Comparison Matrix for identifying longshore drift cells according to the Souza's Method (1997,2007b), by using data from Tabatinga beach monitoring carried out in 1992 and 2001. (E = erosion, updrift zone of longshore drift cell; D = deposition, downdrift zone; T = transportation, transport zone). Each longshore drift cell begins in “E” and ends in “D”.

Perfil Praial (Transecto)	Diâmetro médio (φ)	Desvio padrão (φ)	Curtose (φ)	Inclinação (graus)	Largura (m)	Resultad o	Processo Resultante
164 (T6/T7)	1,24 -	0,55 +	1,01 -	10 -	35 +	-	E
165 (T4)	2,18 +/-	0,56 -/+	1,09 +/+	8 +/-	18 -/-	+/-	T
167 (sul)	2,32 +	0,65 -	1,07 -	4,5 +	33 +	+	D
698 (T7)	1,30 -	0,75 -	0,90 -	7 +	40 +	-	E
699 (T6)	1,46 +/-	0,53 +/+	0,99 +/+	13,5 -/-	33,5 -/+	+/+	D
700 (T5)	1,57 +/-	0,58 -/+	0,98 -/-	11 +/-	16 -/-	-/-	E
701 (T2)	2,19 +	0,67 -	1,08 +	4,5 +	28 +	+	D

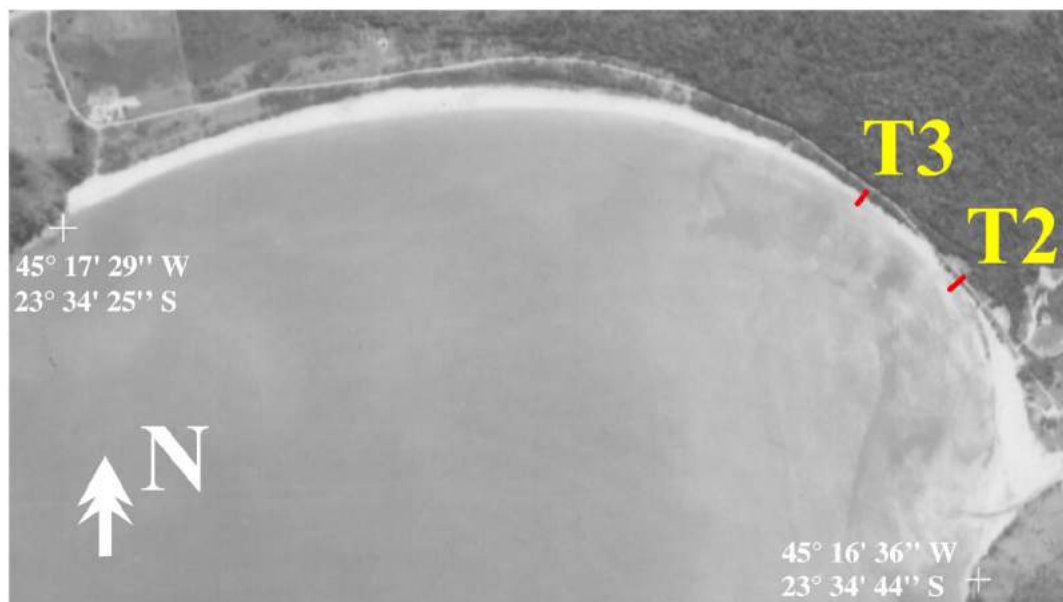


Figura 12. Praia de Tabatinga em 1962, onde é possível observar processos erosivos intensos anteriores à urbanização, no trecho ao redor dos transectos T2 e T3.

*Figure 12. Tabatinga beach in an aerial photograph from 1962 showing strong erosional processes previously to the urbanization process, around transects T2 and T3.*

praia, como a destruição progressiva da rodovia BR-101, deve sua origem a processos essencialmente naturais e de escala decadal, relacionados à dinâmica de circulação costeira, aos efeitos das mudanças climáticas e até à elevação do NM no último século.

Entretanto, intervenções antrópicas mais recentes, entre 2000 e até a metade dessa década, como a colocação de blocos e anteparos de pedra naquele local, somente têm contribuído para o aumento do processo erosivo e sua ampliação para áreas vizinhas da praia. Desde 2008, com parte dos blocos já soterrados e a outra parte removida, têm sido empilhados, no local, dezenas de sacos de propileno preenchidos com areia (bolsa-roca), como mais uma tentativa para impedir a continuidade do processo erosivo. Mas como o preenchimento é feito utilizando as areias da própria praia, obviamente haverá maior aceleração do processo erosivo.

Com base nos resultados obtidos é recomendável a realocação do eixo de rolagem da estrada mais para o interior da planície costeira (e há espaço para isso), bem como a manutenção de uma larga faixa de proteção entre a praia e a nova pista, que deverá ser recuperada e recomposta com vegetação nativa.

A Praia de Tabatinga, por sua vez, pode ser considerada um exemplo de interveniência de processos de curto, médio e longo período de tempo, também predominando processos de origem natural.

A exumação de depósitos marinhos provavelmente pleistocênicos na pós-praia e no estirâncio, no setor centro-oeste da praia, é evidência incontestável de um processo erosivo antigo, muito além do período amostral deste estudo, relativamente permanente e que levou a um balanço sedimentar negativo. Esse processo deve estar relacionado à elevação do NM no último século, trazendo como consequência os mecanismos relacionados ao Princípio de Bruun e à migração vertical do perfil praiado rumo ao continente.

Por outro lado, os resultados obtidos pelos cálculos efetuados neste trabalho sugerem um balanço sedimentar em relativo equilíbrio para as últimas quatro décadas, com taxa de progradação muito pequena de 0,02 m/ano e ganhos irrisórios em volume da ordem de 124 m<sup>3</sup> de areia. Esses resultados são evidenciados pelo aumento da largura da praia (valores positivos de *AEPR*) no trecho dos transectos T1 a T4 e diminuição da largura (valores negativos de

AEPR) no restante do arco praias (transectos T5 a T7). No entanto, quando se observam as variações espaço-temporais do polígono praias em planta, com projeção espacial, nota-se que, na realidade, a praia sofreu uma rotação entre 1962 e 1977, havendo forte recuo de todo o segmento E-SE da praia (transectos T1 a T4) rumo ao continente, e deslocamento do segmento centro-oeste (transectos T5 a T7) rumo ao mar. A zona de inflexão dessa rotação praias estaria localizada entre os transectos T4 e T5, e a escala do fenômeno seria de médio período de tempo. Esses fenômenos, de curto a médio período de tempo, seriam provocados por mudanças na dinâmica de circulação costeira.

Esses resultados enfatizam a importância da análise da projeção espacial do polígono praias ao longo do tempo, para melhor compreensão e interpretação de resultados expressos numericamente (EPRs, APRs, áreas e volumes) e dos possíveis processos envolvidos. Neste contexto, é importante o conhecimento prévio da praia e a observação *in situ* dos indicadores de erosão costeira nela presentes, que podem auxiliar nas interpretações dos processos e mecanismos intervenientes e até apontar a existência de outros.

Assim, na Praia de Tabatinga, a erosão observada atualmente no setor SE poderia ser mitigada com a remoção das construções que estão sobre a praia, pois as mesmas aceleram o processo. No setor central da praia a realocação das estruturas urbanas e mesmo a alimentação ou engordamento artificial são soluções plausíveis para a mitigação e a contenção da erosão. Além disso, seria importante a criação de uma zona de proteção livre de edificações em toda a praia, incluindo a recuperação das características originais da orla.

Comparando os resultados obtidos com estudos anteriores realizados em outras cinco praias de São Paulo (Souza & Barbosa 2007, Souza 2008, Souza & Luna 2009), observa-se que as taxas de variação da linha de costa em Caraguatatuba podem ser consideradas baixas em relação à maioria das praias de Ubatuba (Praia Grande - 1,9m/ano, Barra Seca - 0,78m/ano, Estaleiro, 0,36m/ano, Ubatumirim - 0,25m/ano e Maranduba - 0,17m/ano) e de São Vicente (Praia do Gonzaguinha - 0,64m/ano). Além disso, destacam-se nessas praias diferentes graus de

co-responsabilidade entre os processos envolvidos, ora predominando causas naturais, ora causas antrópicas, ou mesmo ambas interagindo fortemente.

Finalmente, no atual contexto de mudanças climáticas e elevação do NM, estudos como os realizados aqui são imprescindíveis para a gestão da orla marítima, pois podem orientar ações futuras em curto, médio e longo prazo que visem à mitigação da erosão e/ou à recuperação das praias ameaçadas. Também são importantes para subsidiar instrumentos normativos que promovam programas de conservação e gestão das praias.

## AGRADECIMENTOS

Nossos agradecimentos ao estagiário Reinaldo S. Ferreira, do Instituto Geológico, pela colaboração na edição de algumas figuras e tabelas.

## BIBLIOGRAFIA

- Anders, F.J. & Byrnes, M.R. (1991) - Accuracy of shoreline change rates as determined from maps and aerial photographs. *Shore and Beach*, 59(1):17-26.
- Boak, E.H. & Turner, I.L. (2005) - Shoreline definition and detection: a review. *Journal of Coastal Research*, 21(4):688-703.
- Bruun, P. (1962) - Sea level, rise as a cause of shore erosion. *Journal of Waterways and Harbor Division*, 88:117-130.
- Byrnes, M.R., Crowell, M. & Fowler, C. (eds.) (2003) - Shoreline Mapping and Change Analysis: Technical Considerations and Management Implications. *Journal of Coastal Research*, SI 38, 215p.
- Camfield, F.E. & Morang, A. (1996) - Defining and interpreting shoreline change. *Ocean & Coastal Management*, 32(2):129-151.
- Calliari, L.J., Spereanski, N. & Boukareva, I. (1998) - Stable focus of wave rays as a reason of local erosion at the Southern Brazilian coast. *Journal of Coastal Research*, 26:19-23.
- Crowell, M., Leatherman, S.P. & Buckley, M.K. (1991) - Historical shoreline changes: error analysis and mapping accuracy. *Journal of Coastal Research*, 7(3):839-852.
- Davidson-Arnott, R.G.D. (2005) - Conceptual model of the effects of sea level rise on sandy coasts. *Journal of Coastal Research*, 21(6):1166-1172.

- Dias, G.P. (2005) - *Tecnologias digitais de geoprocessamento no suporte à análise espaço-temporal em ambiente costeiro*. 224p., Tese de Doutorado, Universidade Estadual Fluminense, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Dolan, R., Hayden, B.P., May, P. & May, S. (1980) - The reliability of shoreline change measurements from aerial photographs. *Shore and Beach*, 48(4):22-29.
- Dolan, R., Fenster, M.S. & Holme, S.T. (1991) - Temporal analysis of shoreline recession and accretion. *Journal of Coastal Research*, 7(3):723-744.
- Douglas, B.C. & Crowell, M. (2000) - Long-term shoreline position prediction and error propagation. *Journal of Coastal Research*, 16(1):145-152.
- Esteves, L.S., Williams, J.J., Nock, A. & Lymbery, G.O. (2009) - Quantifying shoreline changes along the Sefton coast (UK) and the implications for research-informed coastal management. *Journal of Coastal Research*, SI56(I):602-606.
- Fenster, M.S., Dolan, R. & Morton, R.A. (2001) - Coastal storms and shoreline change: signal or noise? *Journal of Coastal Research*, 17(3):714-720.
- Honeycutt, M.G., Crowell, M. & Douglas, B.C. (2001) - Shoreline-position forecasting: impact of storms, rate-calculation methodologies, and temporal scales. *Journal of Coastal Research*, 17(3):721-730.
- International Panel on Climate Changes - IPCC (2007) - Summary for Policymakers. In: Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor & H.L. Miller (eds.). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 18p., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. (disponível em <http://www.ipcc.ch>).
- Klein, A.H.F. & Benedet Filho, L., Schumacher, D.H. (2002) - Short-Term Beach rotation processes in distinct headland bay beaches systems. *Journal of Coastal Research*, 18(3):442-458.
- Mesquita, A.R. (2003) - Sea-level variations along the Brazilian coast: a short review. *Journal of Coastal Research*, SI35:21-31.
- Moore, L.J. (2000) - Shoreline mapping techniques. *Journal of Coastal Research*, 16(1): 116-124.
- Muehe, D. (org.) (2006) - *Erosão e Progradação do Litoral Brasileiro*. 476p., Ministério do Meio Ambiente, Brasília, DF, Brasil. (ISBN 85-7738-028-9)
- Short, A.D. & Masselink, G. (1999) - Embayed and structurally controlled beaches. In: Short, A.D. (ed.) *Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics*, p. 230-249. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA (ISBN 978-0-471-96570-1).
- Souza, C.R. de G. (1990) - *Considerações sobre os Processos Sedimentares Pretéritos e Atuais na Região de Caraguatatuba, Litoral Norte do Estado de São Paulo*. 314p., Dissertação de Mestrado, Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.
- Souza, C.R. de G. (1997) - *As Células de Deriva Litorânea e a Erosão nas Praias do Estado de São Paulo*. 2 volumes, Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.
- Souza, C.R. de G. (coord.) (2005) - 4º Relatório Científico do Projeto SIIGAL, Fase II. "Sistema Integrador de Informações Geoambientais para o Litoral do Estado de São Paulo, Aplicado ao Gerenciamento Costeiro". Instituto Geológico, Secretaria de Meio Ambiente do Estado de São Paulo, 199p. São Paulo, SP, Brasil (não publicado).
- Souza, C.R. de G. (2007a) - Atualização do mapa de risco à erosão costeira para o Estado de São Paulo. *Anais do XI Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário- ABEQUA*, CD-ROM. Belém, PA, Brasil.
- Souza, C.R. de G. (2007b) - Determination of net shore-drift cells based on textural and morphological gradations along foreshore of sandy beaches. *Journal of Coastal Research*, SI50:620-625.
- Souza, C.R. de G. (2008) - Erosão na Praia do Gonzaguinha-Milionários (São Vicente, SP): Causas e Projeções. *Anais do VII Simpósio Nacional de Geomorfologia e II Encontro Latino-Americano de Geomorfologia*, CD-ROM. Belo Horizonte, MG, Brasil.
- Souza, C.R. de G. (2009a) - A Erosão nas Praias do Estado São Paulo: Causas, Conseqüências, Indicadores de Monitoramento e Risco. In: Bononi, V.L.R., Santos Junior, N.A. (Org.), *Memórias do Conselho Científico da Secretaria do Meio Ambiente: A Síntese de Um Ano de Conhecimento Acumulado*, pp.48-69, Instituto de Botânica -

- Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil. (ISBN 978-85-7523-025-1).
- Souza, C.R. de G. (2009b) - A erosão costeira e os desafios da gestão costeira no Brasil. *Revista de Gestão Costeira Integrada*, 9(1):17-37 (disponível em <http://www.aprh.pt/rgci/revista9f1.html>).
- Souza, C.R. de G. (2010) – Impactos das mudanças climáticas no litoral do Estado de São Paulo (sudeste do Brasil). *Anais do VI Seminário Latino-Americano e II Seminário Íbero-Americano de Geografia Física*, CD-ROM. Coimbra, Portugal.
- Souza, C.R. de G. & Alfredine, P. (2000) - Excursion Route along the State of São Paulo (SP). In: SOUZA, C.R. de G. *et al.* (eds.) Coastal Ecosystems of the Rio de Janeiro, São Paulo and Paraná States and some Environmental Impacts due to their Use and Occupation - *Field Trip Guide of 31<sup>st</sup> Geological International Congress*, Part II, p. 13-57. Rio de Janeiro. RJ, Brasil.
- Souza C.R. de G. & Barbosa, F.O. (2007) - Taxas de recuo da Praia do Gonzaguinha (São Vicente-SP) no período de 1962 a 2001, baseadas em fotografias aéreas. *Anais do XI Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário–ABEQUA*, CD-ROM, Belém, PA, Brasil.
- Souza C.R. de G. & Luna, G.C. (2009) - Taxas de retrogradação e balanço sedimentar em praias sob risco muito alto de erosão no município de Ubatuba (Litoral Norte de São Paulo). *Quaternary and Environmental Geosciences*, 1(1):25-41. ISSN: 2176-6142 (revista eletrônica - <http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs2/index.php/abequa/issue/view/814>).
- Souza, C.R. de G. & Suguio, K. (1996) - Coastal erosion and beach morphodynamics along the state of São Paulo (SE Brazil). *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 68:405-424.
- Souza, C.R. de G. & Suguio, K. (2003) - The coastal erosion risk zoning and the São Paulo state plan for coastal management. *Journal of Coastal Research*, SI35:530-592.
- Souza, C.R. de G., Souza Filho, P.W.M., Esteves, S.L., Vital, H., Dillenburg, S.R., Patchineelam, S.M. & Addad, J.E. (2005) - Praias Arenosas e Erosão Costeira. In: Souza, C.R. de G. *et al.* (eds.), *Quaternário do Brasil*, pp.130-152, Holos Editora, Ribeirão Preto, SP, Brasil. (ISBN 85-86699-47-0)