

ANÁLISE MULTITEMPORAL POR SENSORIAMENTO REMOTO DA EVOLUÇÃO DA LINHA COSTEIRA DA BAÍA DE GUANABARA, RIO DE JANEIRO, BRASIL

Patrícia Gloriza Fernandes

pgloriza2010@hotmail.com
Universidade Federal Fluminense –
UFF, Niterói, Rio de Janeiro, Brazil.

José Antônio Baptista Neto

jabneto@id.uff.br
Universidade Federal Fluminense –
UFF, Niterói, Rio de Janeiro, Brazil.

Khaue Silva Vieira

kvieira87@gmail.com
Universidade Federal Fluminense –
UFF, Niterói, Rio de Janeiro, Brazil.

Marcelo Pompermayer de Almeida

marcelo@valorainova.com.br
Universidade Federal Fluminense –
UFF, Niterói, Rio de Janeiro, Brazil.

Thulio Righeti Correa

thuliorigheti@hotmail.com
Universidade Federal Fluminense –
UFF, Niterói, Rio de Janeiro, Brazil.

Jessica de Freitas Delgado

jessiiacafdelgado@gmail.com
Universidade Federal Fluminense –
UFF, Niterói, Rio de Janeiro, Brazil.

Estefan Monteiro da Fonseca

oceanos25@hotmail.com
Universidade Federal Fluminense –
UFF, Niterói, Rio de Janeiro, Brazil.

RESUMO

As mudanças nas linhas costeiras são consideradas um dos processos mais dinâmicos em ambientes costeiros. Portanto, o mapeamento de tais variações tornou-se importante no levantamento dos impactos costeiros. Nos últimos anos, o sensoriamento remoto tem sido utilizado no mapeamento da linha de costa. Nesta pesquisa, o litoral da Baía de Guanabara, localizada no estado do Rio de Janeiro, Brasil, foi mapeado nos anos de 1938, 1974, 1984, 1997 e 2015, utilizando um software de georreferenciamento e documentos cartográficos. Para mapear as mudanças, a baía foi dividida em quatro seções, para as quais foram produzidos mapas em formato gráfico, usando ArcGIS, em escalas de 1:175.000 e 1:250.000. A pesquisa utilizou imagens de satélite de Landsat 1 *Multispectral Scanner System* (MSS), Landsat 5 *Thematic Mapper* (TM) e Landsat 8 *Operational Land Imager* (OLI), integradas em base de dados de um sistema de informação geográfica, para uma análise visual (qualitativa) e observação estatística (quantitativa) de imagens orbitais. Os dados indicam transformações mais intensas entre os anos 1938 e 1974, com uma área total de desembarque de 15.220.000m². Esta área corresponde a 69,23% da quantidade suprimida durante o intervalo entre 1938 e 2015.

Palavras-chave: Mapeamento Histórico; Linha costeira; Baía de Guanabara.

1. INTRODUÇÃO

As áreas costeiras apresentam ecossistemas particularmente sensíveis e frágeis sob uma perspectiva ambiental, como estuários e manguezais. Como resultado da sua peculiar geomorfologia e conseqüente hidrodinâmica, apresentam uma complexidade ecológica e riquezas biológicas fundamentais para o equilíbrio das espécies (Soares et al., 2011). No entanto, em geral, toda a orla marítima está sujeita a muitos agentes em rápido processo de expansão, tais como o turismo, a aquicultura, grandes complexos industriais e portos. Tais atividades têm contribuído para acelerar a expansão e ocupação urbana irregular, com todas as questões e impactos que geram, a exemplo da emissão de esgotos domésticos e industriais, e a ocupação de áreas públicas e de preservação permanente.

A zona costeira pode ser definida como uma zona dinâmica entre continentes e oceanos, sujeita a contínuas mudanças morfológicas, resultantes de processos continentais e oceânicos (Yanli, 2002; Alesheikh et al., 2007; Selvavinayagam, 2008). As linhas costeiras ao redor do mundo mudaram rapidamente nos últimos anos devido ao resultado de fenômenos físicos naturais e à atividade antropogênica. Fatores naturais, como o fornecimento de sedimentos, a energia hidrodinâmica e o nível do mar, são as principais causas das mudanças na linha costeira. Mas, ao mesmo tempo, a atividade humana tem se mostrado como uma força aceleradora dessas mudanças (Van e Binh, 2011; Niya et al., 2013) em razão do desembarque e das instalações industriais.

Os aterros em grande escala são comuns nas áreas metropolitanas costeiras, pois eliminam áreas entremarés significativas. Exemplos ocorrem na Baía de São Francisco, nos Estados Unidos da América, onde 96% da área de sapal (originalmente 3.400 km², ou mais da metade da superfície da baía) foi perdida (Atwater et al., 1979), e na Holanda, onde 4.000 km² de sapais estuarinos foram aterrados (Wolff, 1992). Entre os estuários brasileiros, o processo de aterragem mais severo ocorreu na Baía de Guanabara: mais de 10% da sua área original (hoje com 384 km²) foi aterrada (Amador, 1992).

A gestão integrada do litoral deve ser entendida como uma ação baseada em ciência e tecnologia. Por isso, exige um entendimento que não vem apenas da sua aplicação prática, mas de um desenvolvimento conceitual e de uma metodologia crítica que não pode ser construída dentro das instituições de pesquisa e desenvolvimento (Asmus et al., 2006). A identificação e registro de mudanças costeiras são ações importantes para o monitoramento ambiental e a gestão costeira (Xuejie e Michiel, 2007). O controle das alterações das faixas marítimas pode seguir diferentes abordagens, com vantagens e desvantagens particulares. Dentro deste contexto, as imagens de satélite são simples de interpretar e de fácil acesso (Van e Binh, 2011).

A detecção remota é uma ferramenta importante que utiliza imagens de satélite, e tem sido frequentemente utilizada para compreender e gerir recursos naturais (Sundaravadivelu et al., 2005). Tem a capacidade de apoiar estudos com informação básica para pesquisa geográfica, com uma variação consideravelmente grande. Além disso, o uso integrado de dados de sensoriamento remoto e técnicas de geoprocessamento representam um poderoso instrumento para acompanhar e analisar alterações costeiras tempo-espaciais (Zhang, 2011; Zhang e Chen, 2009).

Os dados de detecção remota fornecem uma percepção global de uma região e uma perspectiva muito próxima dos dados de outras fontes, como mapas e sistemas de informação geográfica, conforme afirma Centeno (2009): *“se abre a possibilidade de fazer uso de uma forma integrada de imagens de satélite, e com outras fontes de informação espacial, como modelos digitais do terreno gerados a partir de observações de GPS ou radar”*.

Com base nas informações mencionadas acima, esta pesquisa teve como objetivo avaliar as transformações na costa da Baía de Guanabara, através da comparação de imagens de satélite multitemporais, a fim de avaliar as principais modificações que ocorreram na superfície da água da baía.

2. ÁREA DE ESTUDOS

A Baía de Guanabara está localizada no estado do Rio de Janeiro, Brasil, entre as coordenadas longitudinais 43o00'00" e 43o20'00"W, e as coordenadas latitudinais 22o40'00" e 23o05'00"S. Este ecossistema é caracterizado por um estuário com uma área total de 346 km², incluindo 59 km² de ilhas, como visto na Figura 1. A bacia hidrográfica afluente inclui uma área de aproximadamente 4.000 km² e contribui através de 35 rios principais, extremamente poluídos por esgotos domésticos brutos ou parcialmente tratados, produzidos por 10 milhões de habitantes, e efluentes industriais de mais de 12.000 indústrias (Fonseca et al., 2009). A baía atinge 15 cidades, tendo uma densidade populacional particularmente elevada na porção oeste da bacia.

A Baía de Guanabara atingiu o atual nível de impacto, que começou quando o processo de degradação se intensificou durante as décadas de 1950 e 1960, devido a um elevado desenvolvimento urbano, especialmente na região sul do Brasil. Outra consequência da ocupação após 1950 foi a origem, na bacia hidrográfica da baía, de um dos maiores polos de desenvolvimento industrial do país.

O crescimento populacional e o desenvolvimento industrial trouxeram, além da poluição gerada por esse processo, questões ambientais físicas, como a destruição de ecossistemas periféricos à baía, os aterros, o uso descontrolado do

solo e seus efeitos adversos, como a agradação, o assoreamento de fundo, as inundações e o deslizamento de terras (Andreatta et al., 2009).

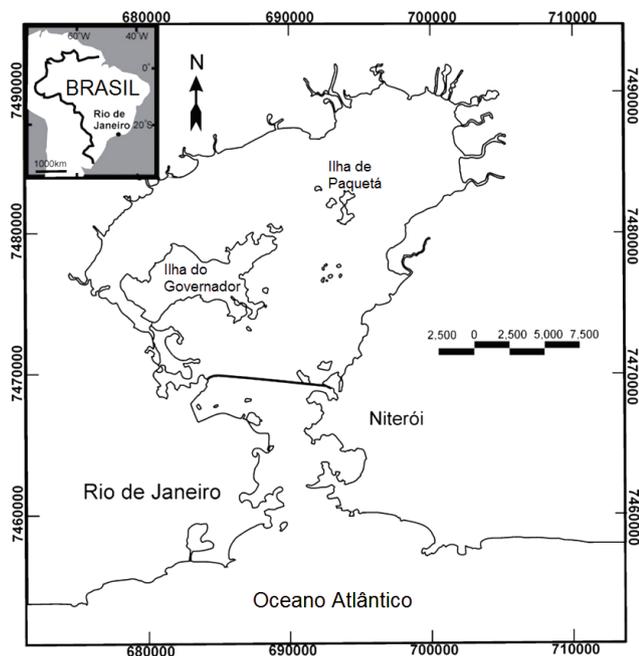


Figura 1. Área de pesquisa

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente, a metodologia foi baseada numa revisão bibliográfica e num estudo comparativo de documentos cartográficos e imagens orbitais da área selecionada. A pesquisa foi realizada em ambiente gráfico, com o objetivo de criar um banco de dados de informações georreferenciadas baseadas em mapas. Através desses dados, as indicações do litoral da Baía de Guanabara, de 1938 a 2015, foram descobertas. Os mapas gerados como resultado dessas observações foram integrados a uma base de sistema de informação geográfica (SIG), usando como ferramentas o sensoriamento remoto e o software de georreferenciamento ArcGis 10.3.1.

Durante a primeira etapa, a digitalização do litoral da Baía de Guanabara foi realizada em escala 1:50.000, na histórica Carta Náutica Nº 1501, de 1938, adquirida no Centro Hidrográfico da Marinha do Brasil. Sobre este contorno acessado, somado à documentação cartográfica existente, os dados foram ajustados sob uma base SIG do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Esse ajuste foi baseado nas limitações entre os municípios da base de dados do IBGE, bem como nos pontos de controle sob essa base de dados, levando à transformação polinômica 1 - vizinho mais próximo, com margem de erro média de 0,0345766, correspondente a 1,73 metros.

Durante a segunda etapa, as imagens foram processadas através do software ArcGis 10.3.1. Em seguida, os mapas foram adquiridos através da vetorização das imagens orbitais utilizando a aplicação ArcMap. Nesta fase, foram utilizadas as seguintes imagens de satélite: Landsat 1 *Multispectral Scanner System* (MSS) (1974), ponto de órbita 233/076; Landsat 5 *Thematic Mapper* (TM) (1984; 1997), ponto de órbita 217/076; e Landsat 8 *Operational Land Imager* (OLI) (2015), ponto de órbita 217/076/268 LGN00, as quais foram adquiridas no site do INPE/NASA (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais / National Aeronautics and Space Administration), sendo que as que apresentavam melhor visão foram selecionadas por terem menos nuvens.

A Tabela 1 descreve as características das imagens orbitais e dos sensores utilizados.

Tabela 1. Imagens orbitais utilizadas no mapeamento da Baía de Guanabara

Imagem	Sensor	Ano	Resolução (em metros)
Landsat 1	Sistema de Scanner Multiespectral - MSS	1974	80 x 80
Landsat 5	Mapeador Temático - TM	1984	30 x 30
Landsat 5	Mapeador Temático - TM	1997	30 x 30
Landsat 8	Multisensor - OLI	2015	15 x 15 Pancromáticos

A partir do processamento e georreferenciamento para a projeção horizontal SIRGAS (2000), Zona 23S e Universal Transversa de Mercator (UTM), as imagens foram adicionadas ao SIG, utilizando o software ArcGIS 10.3.1. A composição colorida das bandas RGB e a falsa cor das imagens orbitais dos satélites Landsat foram realizadas com o objetivo de enfatizar a diferenciação entre corpos de água e terra (Meneses e Almeida, 2012; Rosa et al., 2011).

Posteriormente, as imagens Landsat foram enviadas para correções radiométricas e geométricas das distorções relacionadas com os sensores de cada satélite, através de georreferenciação, correção geométrica e interpolação cúbica (Silva et al., 1998; D'Alge, 2007).

Com o objetivo de realizar a georreferenciação, a primeira etapa foi a seleção da imagem de referência, previamente corrigida a partir do Catálogo *Global Land Cover Facility* (GLCF). Além disso, elas foram ortoretificadas, pois ambas as imagens estavam em TIFF (*Tagged Image File Format*).

Após a seleção prévia das bandas, o empilhamento organizado de tais imagens foi realizado através da aplicação ArcMap. O mesmo procedimento foi feito para as bandas do catálogo do INPE.

As imagens adquiridas como referência da GLCF não só estão disponíveis na UTM, como também são encontradas no Hemisfério Norte. Portanto, um ajuste é necessário para o Hemisfério Sul (Meneses e Almeida, 2012).

Após a correção geométrica dentro de uma tolerância de 0,5 pixels, a interpolação cúbica foi feita para melhorar os resultados da imagem. Esta transformação, de um sistema linha-coluna (LC) para um sistema UTM (E, N) permite estabelecer uma correção matemática entre uma imagem e um terreno através de parâmetros de transformação (Antunes, 2002).

Os resultados adquiridos foram mapas gerados em duas escalas, 1:175.000 e 1:250.000, a fim de permitir uma comparação visual das diferentes linhas nos períodos históricos que elas representam. A metodologia foi baseada na interpretação visual (qualitativa) e estatística (quantitativa) das transformações geomorfológicas da linha costeira, vistas a partir das imagens orbitais (Kampbel, 2005).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O monitoramento da variação da linha de costa é extremamente importante, pois fornece informações básicas que podem apoiar ações para a gestão costeira (Makota et al., 2004). O mesmo estudo permite a previsão de cenários, assim como auxilia os geomorfologistas a quebrar o código dos processos sedimentares existentes numa determinada região. A presente avaliação também foi realizada através da segmentação cronológica de quatro períodos: 1938-1974, 1974-1984, 1984-1997 e 1997-2015 (Tabela 2).

A superfície de água da Baía de Guanabara, subtraída pela atividade humana (Tabela 2), apresenta um crescimento contínuo durante os 77 anos em que foi analisada. Dentro deste aspecto, o período de 1938 a 1974 foi o mais intenso em relação às modificações observadas no litoral, em uma área total ocupada de 15,22km² de aterros. Esta área corresponde a 69,23% da área total aterrada da baía durante todo o período analisado desta pesquisa. Para uma visão mais ampla deste estudo e das possíveis consequências, é plausível dizer que, ao longo de 77 anos, a Baía de Guanabara perdeu cerca de 21.980.000 m² de superfície de água (Tabela 2), o que afeta intensamente ecossistemas inteiros, ilhas e rios, ao expandir a linha costeira sobre os aterros, a retificação dos rios e a ocupação urbana descontrolada. O uso inadequado do solo alterou as características geomorfológicas e as tendências de sedimentação no interior das bacias costeiras, levando a um rápido processo de agredação e asfixia das rotas de navegação, como no canal do Cunha, localizado entre a Ilha do Governador e o continente (Sloss et al., 2011).

As perdas de superfície de água na Baía de Guanabara no processo histórico de mudanças do entorno de 1938 a 2015, juntamente com os locais onde as mudanças foram significativas, podem ser observadas na Tabela 2, Figura 2, e no mapa da Figura 3.

Tabela 2. Lugares e dados de áreas modificadas da Baía de Guanabara, de 1938 a 2015.

Período	Lugar	Área em Km ²	Porcentagem %
1938 - 1974	Aeroporto	0,19	0,84
	Área de Proteção Ambiental de Guapimirim	1,44	6,55
	Aterro do Flamengo	1,54	7,01
	Cajú	0,96	4,38
	Centro da cidade	0,12	0,55
	Cordovil e Duque de Caxias	0,12	0,56
	Fundão	1,87	8,50
	Ilha do Governador	2,96	13,47
	Maré	0,99	4,51
	Niterói e Centro	0,51	2,33
	Penha	2,04	9,26
	Ponta da Areia e Ilha da Conceição	0,60	2,73
	Porto	0,89	4,03
	Niterói-Manilha Highway	0,94	4,25
São Domingos	0,06	0,26	
Resultado		15,22	69,23
1974 - 1984	Guapimirim Environmental Protection Area	0,65	2,95
	Caju	0,29	1,32
	Cordovil and Duque de Caxias	1,24	5,65
	Governador Island	1,08	4,89
	Mocanguê Island	0,31	1,43
	Maré	0,45	2,05
	Niterói e Centro da cidade	0,29	1,31
	Porto	0,11	0,52
Rodovia Niterói-Manilha	0,56	2,54	
Resultado		4,98	22,66
1984 - 1997	Cordovil e Duque de Caxias	1,54	7,02
Resultado		1,54	7,02
1997 - 2015	Fundão	0,18	0,81
Resultado		0,18	0,81
1997 - 2015	Porto	0,06	0,28
Resultado		0,06	0,28
Resultado total		21,98	100,00

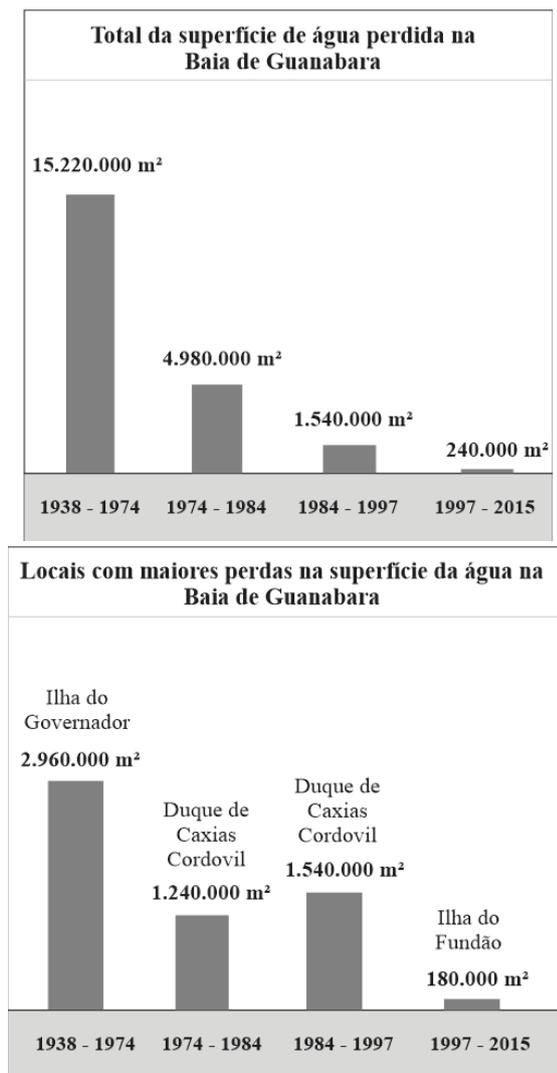


Figura 2. Perdas na superfície da água na Baía de Guanabara, de 1938 a 2015.

A superfície total de água perdida na Baía de Guanabara para o período estudado (de 1938 a 2015) foi estimada em 21.980.000 m².

Com base nos dados adquiridos nesta pesquisa, as quatro áreas que apresentaram maiores modificações no litoral foram o Noroeste (Ilha do Governador), Centro-Oeste (Porto do Rio de Janeiro), Centro-Leste (Porto de Niterói) e Nordeste (Área de Proteção Ambiental de Guapimirim) da Baía de Guanabara.

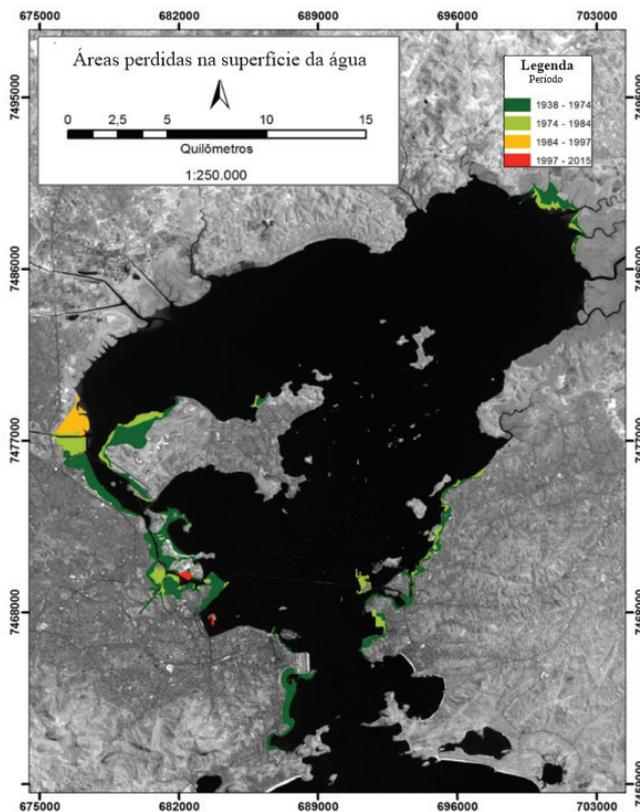


Figura 3. Mapa da Baía de Guanabara, com a perda total da superfície de água, de 1938 a 2015.

No período observado, a modificação mais intensa foi encontrada na Ilha do Governador, com um valor percentual de aterragem de 13,47% do total da área aterrada da baía (Tabela 2). A ocupação e uso da superfície aquática da Baía de Guanabara para plantas petrolíferas industriais, petroquímicas e especialmente para fins navais, somada aos investimentos em portos e estaleiros, tornaram o litoral do Rio de Janeiro a área mais importante e mais impactada do Brasil (Sevá, 2013). Nas ilhas dentro da baía, como a Ilha Redonda, Ilha da Água e Ilha do Governador, existem terminais de carga e descarga de produtos petrolíferos e parques de tanques com grande capacidade de armazenagem ligados à Refinaria Duque de Caxias (REDUC). Os dutos recentemente colocados sobre o leito do mar conectam esses terminais e a REDUC ao novo Centro Petroquímico do Rio de Janeiro (COMPERJ).

A interpretação visual da parte noroeste da Baía de Guanabara, entre 1938 e 1974 (Figura 4), mostra as mudanças na linha costeira para o grupo de ilhas anteriormente existente. A análise multitemporal para este período indica o movimento da linha costeira em direção à costa, acrescentando áreas por desembarque, o desaparecimento da Praia de Maria Angú e a incorporação da Ilha dos Ferreiros ao continente. A Figura 4 permite visualizar a área aterrada na extensão completa da costa, desde a Ilha dos Ferreiros até o

sul da Ilha de Saravatá. Observa-se também, no período de 1974 a 1984, um movimento crescente da área costeira no segmento que parte da base da Ponte Rio-Niterói, indo para sudoeste em direção à Ilha do Fundão. A área anteriormente inundada e formada por planícies de maré, como pode ser visto na Figura 4 do mapa 1, foi aterrada, anexando a Ilha do Pinheiro ao continente.

Em relação à análise qualitativa para o período 1984-1997, sugere-se que a pressão sobre a Baía de Guanabara tem continuado devido à urbanização, e as sucessivas aterrissagens na zona norte do rio Meriti estabeleceram um novo contorno da linha costeira. O crescimento urbano descontrolado nas áreas da Baixada Fluminense tem gerado inundações durante as chuvas tropicais de verão em alguns dos municípios ao redor da Baía de Guanabara (Costa, 2015). A Ilha do Governador também teve mudanças no seu contorno para a construção do Aeroporto Internacional Tom Jobim, tendo acrescentado áreas e maior perímetro no lado noroeste da ilha. Segundo Amador (1980), os elevados índices de sedimentação e a agradação originada pelo desmatamento do canal entre a Ilha do Governador e o continente resultaram na perda da superfície da água. Após os anos 1970, os sucessivos desembarques continuaram a ser utilizados por grandes projetos de engenharia sugeridos pelo modelo econômico utilizado na época (Amador, 1997).

No final, para o período entre 1997 e 2015, a análise da Figura 4 mostra que houve poucas mudanças observadas na escala, se comparada com os mapas dos períodos anteriores. Um estudo realizado por Gatto et al. (2010) sobre a dinâmica atual da evolução da Ilha do Fundão mostra que há um projeto de recuperação da área de reserva ambiental, uma diminuição do uso de grama e um aumento da área construída em algumas porções da ilha. As mudanças na seção noroeste representaram uma área de aproximadamente 14.780.000m². Cruz et al. (1996) confirmaram que 80% dos aterros na Baía de Guanabara foram encontrados nesta área, durante o processo de urbanização entre as décadas de 1940 e 1960. Como Amador (1997) descobriu, esta área era constituída por um arquipélago cortado por canais de composição arenosa e vegetação abundante, que pertencia a estas ilhas e onde a circulação das águas pelas correntes de maré permitia a sua renovação. Menezes (2005) sugerem uma diminuição da superfície de água de cerca de 2.700.000m², através da eliminação de oito ilhas: Fundão, Baiacú, Cabras, Catalão, Ferreira, França, Bom Jesus e Sapucaia, que foram fundidas para construir a Cidade Universitária, hoje Ilha do Fundão.

Mais ao sul, ainda na costa oeste da baía, é possível detectar uma modificação acentuada que ocorreu durante os períodos iniciais analisados nesta pesquisa. O trecho da Baía de Guanabara onde está localizado o Porto do Rio de Janeiro

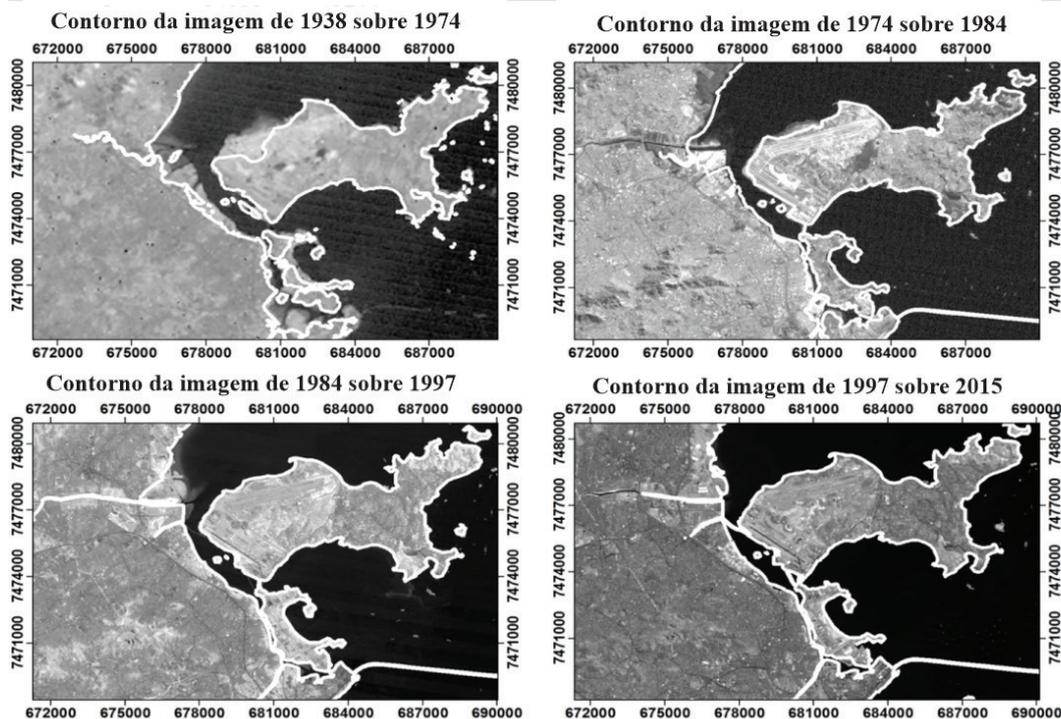


Figura 4. Mapas com as mudanças históricas do contorno da Baía de Guanabara para a seção noroeste, na escala 1:175.000, para o período de 1938 a 2015, e imagens de satélite pancromáticas: Landsat1 (MSS) 1974, Landsat5 (TM) 1984 e 1997, e Landsat8 (LC8217076) 2015 (Fonte: www.dgi.inpe.com.br/NASA)

é uma das áreas mais alteradas desde o início do século XX, onde o litoral original foi completamente modificado para colocar o porto da cidade e, posteriormente, para modernizar seu sistema (Moscatelli, 2009).

Segundo Andreatta et al. (2009), na década de 1960, o primeiro governador eleito no período promoveu uma intensa campanha de modificações na engenharia civil para melhorar o saneamento e a urbanização da cidade do Rio de Janeiro. A construção mais significativa desse período foi o Parque do Flamengo, ou Aterro do Flamengo, em 1964, iniciado na década anterior. A celebração do Congresso Eucarístico de 1955, na Gruta da Glória, foi o ponto de partida para a criação de uma grande área de pouso. No entanto, o mesmo autor menciona que o desmonte do Morro Santo Antônio gerou o material necessário para sustentar a aterragem de grandes dimensões, e permitiu à cidade do Rio de Janeiro ter um parque único à beira-mar, modificando o perfil das praias do Flamengo e Botafogo. A mudança completa neste setor representou uma área adicional de aproximadamente 1.850.000m².

A análise quantitativa para a porção nordeste da Baía de Guanabara mostra modificações significativas no entorno entre os rios Magé e Guaxindiba, representados no primeiro mapa da Figura 5. De acordo com os dados da Tabela 2, a região da Área de Proteção Ambiental de Guapimirim apresentou uma diferença na linha costeira, sob os polígonos de área encontrados, com valores aproximados de 1,44 Km² no período de 1938 a 1974. Este valor corresponde a 6,55% de perda da área de superfície de água. Tais evidências podem estar associadas à degradação da região, em razão do desmatamento para prover recursos de acordo com os modelos econômicos adotados durante o período analisado (Amador, 1997).

No período seguinte, de 1974 a 1984, 0,65 Km² foram subtraídos da área de proteção, correspondendo a 2,95% da área de superfície de água perdida. No terceiro e no quarto mapa da Figura 5, as mudanças na linha costeira não são perceptíveis na escala utilizada para a pesquisa, o que pode sugerir uma redução dos impactos resultantes da pressão das atividades humanas sobre o corpo hídrico (Verdonschot et al., 2013). Em Moraes et al. (2009), a recuperação natural dos ecossistemas de manguezais localizados nos limites do rio Guapi pode ser associada a um controle mais amplo das ações humanas, dadas as políticas de monitoramento estabelecidas. Um exemplo desse movimento é a promulgação do Decreto nº 90.225, de 25 de setembro de 1984, que criou a Área de Proteção Ambiental de Guapimirim, e a proteção de suas áreas de manguezais.

O desmatamento, a retificação e a canalização de alguns rios que drenam para a baía, mudando seu curso e vazão (Pires, 1986), influenciaram na deposição de sedimentação

ao redor da bacia da Baía de Guanabara (Godoy et al., 1998). Dito isto, os manguezais que retêm através de suas raízes grande parte dos sedimentos livremente transportados pelos rios, e que costumavam funcionar como verdadeiros filtros encontrados em áreas entre as marés, são agora inexistentes em locais onde costumavam ser abundantes (Amador, 1997). A modificação completa da porção nordeste foi de aproximadamente 2.090.000m².

No final, a região centro-leste da baía também apresentou grande variação em termos de área, mais especificamente na área correspondente ao centro da cidade de Niterói, entre os anos de 1938 e 1984. Segundo Kang et al. (2010), a área é caracterizada pela baixa atividade dinâmica das marés e leitos marinhos lamacentos, típicos de ambientes estuarinos; portanto, ela vem sofrendo ações antropogênicas de uso do solo, que afetam diretamente as características das bacias hidrográficas. Esta área foi amplamente impactada pelo setor portuário (Porto de Niterói), com o objetivo de ativar inicialmente o comércio de alimentos, madeira e celulose, exportando açúcar, sardinhas e café (no período de 1958 a 1962). Após 1964, com a expansão dos sistemas viários, o Porto de Niterói declinou; situação que também foi impactada pela agregação do canal principal, e pela proximidade do porto do Rio de Janeiro. Em 1967, o canal que permitia o acesso ao porto foi reduzido a uma profundidade média de três metros e meio (dos oito metros mínimos a serem utilizados), contribuindo para assustar os comandantes de navios cujos navios estavam totalmente carregados e forçando-os a atracar no Porto do Rio de Janeiro (Azevedo, 1994).

Costa (2014) menciona alguns fatos significativos relacionados à implantação da região portuária a serem levados em consideração: a construção da Avenida do Contorno em torno da orla, em direção ao norte, na década de 1960, o que significou aterragens adicionais e conseqüentemente mudanças no projeto da enseada portuária; e, em 1974, a inauguração da Ponte Rio-Niterói, que acentuou ainda mais as mudanças da costa nesta área. As muitas rampas criadas em conjunto com a ponte modificaram significativamente a paisagem e o ambiente local, tornando-se barreiras físicas consideravelmente importantes. A modificação completa da seção centro-leste representou uma área de aterro de aproximadamente 3.270.000m².

Vários autores têm realizado pesquisas nos últimos anos sobre as recentes taxas de sedimentação lodosa na Baía de Guanabara. Amador (1997) divide as taxas de sedimentação na baía em duas fases: 1ª – representada pelas taxas de assoreamento geológico ou natural, e a 2ª – representada pelo assoreamento histórico. Amador (1997) determina o assoreamento geológico a partir da relação entre a espessura média dos sedimentos depositados na baía e o tempo durante o qual a deposição ocorreu. Em 1997, este autor considera

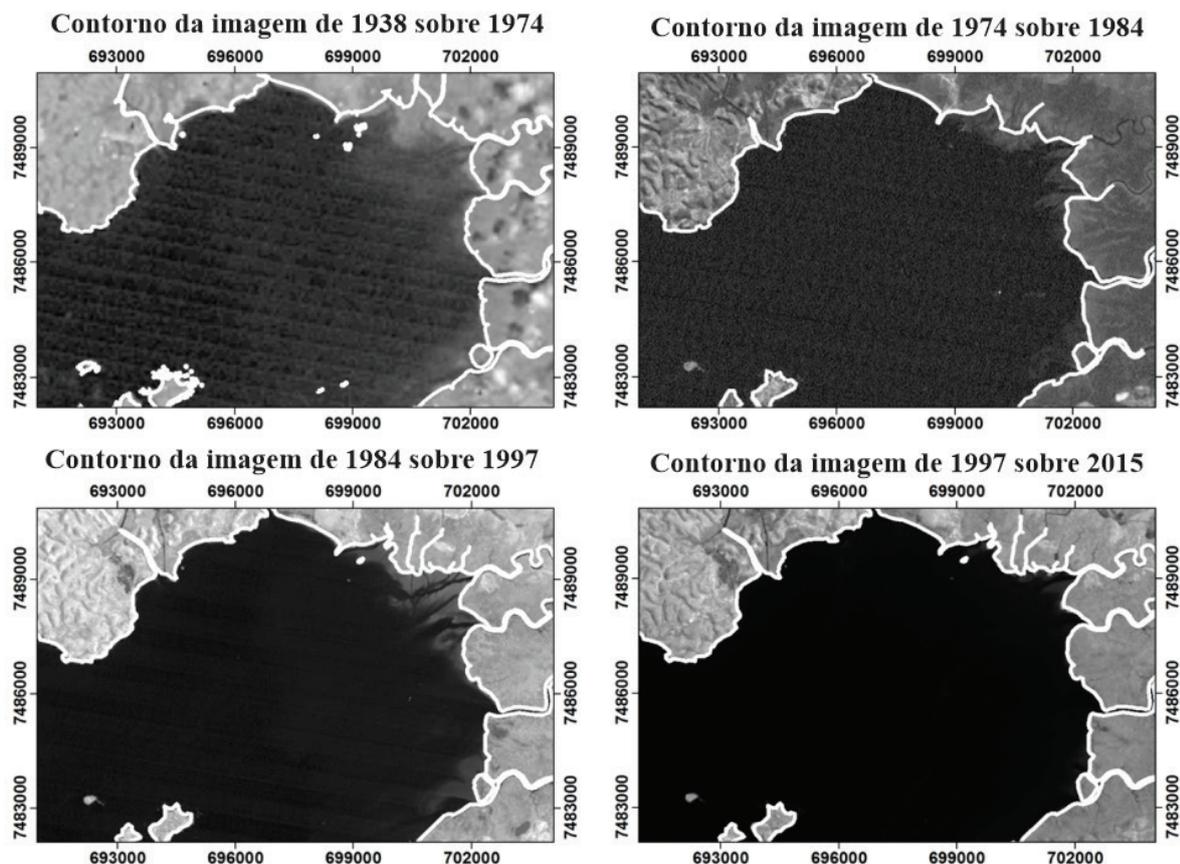


Figura 5. Mapas com mudanças históricas do contorno da Baía de Guanabara para a seção nordeste, na escala 1: 175.000, para o período entre 1938 e 2015, e imagens de satélite pancromáticas: Landsat1 (MSS) 1974, Landsat5 (TM) 1984 e 1997, e Landsat8 (LC8217076) 2015 (Fonte: www.dgi.inpe.com.br)

que a densidade média dos sedimentos atualmente depositados na Baía de Guanabara é de $1,256 \text{ g/cm}^3$ a 4m de profundidade, assumindo assim um valor de $26,9 \text{ cm/século}$ de assoreamento geológico ou natural. A taxa de assoreamento histórico foi determinada, segundo Amador (1997), por estudo comparativo de cartas náuticas de diferentes períodos. Este autor determinou o assoreamento dos períodos de 1849 a 1922 e de 1938 a 1962 e, segundo ele, este último período está principalmente relacionado à ação antrópica nas bacias de drenagem da Baía da Guanabara, tais como as obras de engenharia hidráulica desenvolvidas na década de 1930, o constante desmatamento, os aterros sanitários e a destruição de manguezais que são de grande importância na retenção de sedimentos finos. Para o período entre 1849 e 1922, as taxas observadas por Amador (1980) foram de 24 cm/100 anos. Para o período de 1938 a 1962, foram observados valores de 81 cm/100 anos. Este período é equivalente às grandes mudanças urbanas promovidas na cidade do Rio de Janeiro, sendo a principal delas o desmonte do Morro do Castelo e o aterro sanitário das áreas costeiras da cidade (Figura 6).

Godoy et al. (1998) determinaram as taxas de assoreamento usando a técnica do isótopo de chumbo (^{210}Pb) nos

últimos 100 anos, com base em núcleos rasos coletados em duas estações no norte da Ilha do Governador. Em uma estação, os sedimentos coletados em profundidades inferiores a 50 cm do fundo da baía, com idades entre 40 e 100 anos antes do presente, geraram uma taxa de assoreamento de $0,15 \text{ cm/ano}$, enquanto nos sedimentos entre o leito e a profundidade de 50 cm, correspondente aos últimos 40 anos, a taxa de assoreamento determinada foi de $1,3 \text{ cm/ano}$.

Na outra estação, os sedimentos abaixo da profundidade de 20 cm no fundo da baía, com idade entre 10 e 80 anos antes do presente, apresentaram uma taxa de assoreamento de $0,32 \text{ cm/ano}$, enquanto os sedimentos entre a superfície do fundo e a profundidade de 20 cm, referentes aos últimos 10 anos, apresentaram uma taxa de assoreamento de $2,2 \text{ cm/ano}$. Godoy et al. (2012), com base em dados da literatura e dados adicionais apresentados por eles, concluem que, em geral, a atual taxa de sedimentação da Baía de Guanabara é de aproximadamente 1 cm ano^{-1} , o que representa um aumento cinco vezes maior do que os valores de base. Segundo esses autores, esses dados são consistentes com aqueles existentes na literatura relacionada à datação dos sedimentos da Baía de Guanabara, usando ^{210}Pb . A validação da datação foi

realizada com base nos perfis de cobre, cromo e chumbo, no fluxo ^{210}Pb e no registro histórico das principais intervenções físicas do século passado, como aterro sanitário, canalização principal do rio e construção de estradas. Essas altas taxas de assoreamento são responsáveis por um encolhimento cada vez mais rápido do deslizamento de água da Baía de Guanabara, especialmente em sua porção mais interna. Segundo Pagliosa et al. (2006), esse aumento nas taxas de sedimentação, observado no fluxo ^{210}Pb , corresponde à expansão urbano-industrial, ocorrida em meados dos anos 1950, e promoveu um rápido crescimento urbano, levando a uma grande pressão ambiental, especialmente nas áreas costeiras. Amador (1997) chama a atenção para as intensas mudanças costeiras na Baía de Guanabara através de retificações fluviais, desmatamento e aterros sanitários em ambientes costeiros.

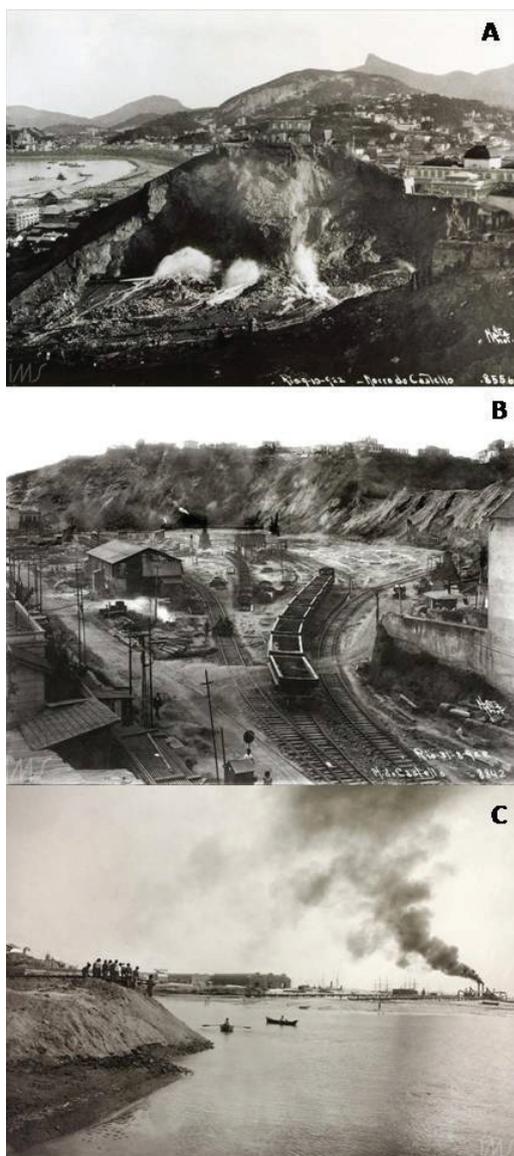


Figura 6. Desmantelamento do Morro do Castelo (A, B) e do aterro sanitário das zonas costeiras da cidade (C)

5. CONCLUSÃO

As contínuas mudanças no litoral da Baía de Guanabara, realizadas especialmente para apoiar os modelos econômicos impostos pelos governadores, resultaram em grandes transformações do litoral e subtração de sua superfície de água. Com a avaliação das transformações da superfície da água através da comparação de imagens de satélite multitemporais, esta pesquisa constatou que, ao longo dos últimos 77 anos, a Baía de Guanabara perdeu aproximadamente 21.980.000m² de superfície de água, o que gerou um impacto significativo nos ecossistemas adjacentes. O estudo constatou que o período entre 1938 e 1974 foi mais intenso nas modificações observadas no litoral, totalizando uma área ocupada por 15.220.000m² de aterros sanitários.

Ao estabelecer uma comparação entre as porções oeste e leste da baía, pode-se observar que as maiores mudanças no contorno ocorreram na parte oeste da cidade do Rio de Janeiro, onde o uso do espaço físico da Baía de Guanabara, seja para fins industriais, petrolíferos, petroquímicos ou navais, com investimentos em portos e estaleiros navais, transformou a costa do Rio de Janeiro na região mais importante e mais impactada do Brasil. No entanto, a detecção e registro de modificações no litoral, com zoneamento nacional, pode contribuir com políticas e ações de monitoramento ambiental e gestão costeira da Baía de Guanabara.

A baixa resolução espacial das imagens do sensor TM, e especialmente do MSS no estudo multitemporal, levou à necessidade de interpolar, a fim de ter imagens com melhor brilho e resultados de aparência natural, suavizando a imagem. Dadas as várias fontes de dados utilizadas na pesquisa, foi necessário processar as imagens que apresentavam diferentes resoluções espaciais, a exemplo da ortorretificação, para padronizar as informações, e integrá-las num banco de dados SIG, apesar dos erros de vetorização que tais estudos podem gerar, e da baixa resolução das imagens que requerem um bom procedimento de georreferenciamento, acrescentando a isso o estado desatualizado da informação das cartas topográficas dos levantamentos fotogramétricos aéreos de 1960 e 1970, que, muitas vezes, não correspondem à realidade atual da área de estudo. Por outro lado, a análise qualitativa e quantitativa das variações do litoral da Baía de Guanabara, indicadas nos dois mapas construídos em escala compatível com a resolução espacial, embora diferentes uma da outra, permitiu observar a correlação entre esta pesquisa e outros estudos na área, sendo descritas individualmente e não influenciando na análise dos resultados.

AGRADECIMENTOS

O financiamento deste projeto foi assegurado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

(CAPES). Os autores também estão em dívida com o Departamento de Geologia e Geofísica da Universidade Federal Fluminense.

REFERÊNCIAS

- Alesheikh, A.A., Ghorbanali A., Nouri N. 2007. Coastline change detection using remote sensing. *International Journal of Environmental Science and Technology* 4, 61-66. <https://doi.org/10.1007/BF03325962>
- Amador, E.S. 1980. Assoreamento da Baía de Guanabara - Taxas de Sedimentação". *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 52, 723-742.
- Amador, E.S. 1992. Sedimentos de fundo da Baía de Guanabara – uma síntese. *Anais do III Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário*. Rio de Janeiro, p. 199–224.
- Amador, E.S. 1997. Baía de Guanabara e ecossistemas periféricos: homem e natureza. Rio de Janeiro: Reproarte.
- Andreatta, V., Chiavari, M.P., Rego, H. 2009. O Rio de Janeiro e a sua orla: história, projetos e identidade carioca. *Coleção Estudos Cariocas*, Rio de Janeiro.
- Antunes, A.F.B. 2002. Sensoriamento Remoto II. Notas de Aula.
- Asmus, M.L., Kitzmann, D., Laydner, C., Tagliani, C.R.A. 2006. Gestão Costeira no Brasil: Instrumentos, fragilidades e potencialidades. *Revista de Gestão Costeira Integrada* 4, 52-57.
- Atwater, B.F., Conrad, S.G., Dowden, J.N., Hedel, C.W., Macdonald, R.L., Savage, W. 1979. History, landforms, and vegetation of the estuary's tidal marshes. In: Conomos, T. J. (Ed.). *San Francisco Bay : the urbanized estuary : investigations into the Natural History of San Francisco Bay and Delta with reference to the influence of man*. San Francisco: Pacific Division AAAS, 347-386.
- Azevedo, M.N.S. 1994. Niterói: Imagem e transformações da cidade irmã da metrópole do Rio de Janeiro. 3º Seminário da História da Cidade e do Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, p. 7-10.
- Brasil. 1984. Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984. Brasília: Diário Oficial da União.
- Centeno, J. A. S. 2009. Sensoriamento Remoto e Processamento de Imagens Digitais. Curitiba: Universidade Federal do Paraná.
- Costa, M.A.M. 2014. A metrópole e o estuário: pressões exercidas pelo Rio de Janeiro na Baía de Guanabara. III Seminário Nacional sobre o Tratamento de Áreas de Preservação Permanente em Meio Urbano e Restrições Ambientais ao Parcelamento do Solo. Belém. p. 10-13.
- Costa, M.A.M. 2015. Da lama ao caos: um estuário chamado Baía de Guanabara. *Cadernos Metrópole* 17, 5-39. <https://doi.org/10.1590/2236-9996.2015-3301>
- Cruz, C.B.M., Mayr, L.M., Barros, R.S., Argento, M.S.F., Senna, C.A.P. 1996. Transformações Ambientais na Baía de Guanabara - uma Abordagem com Suporte de Geoprocessamento. *Anais da I Semana Estadual de Geoprocessamento*. Rio de Janeiro.
- D'Alge, J.C.L. 2007. Correção geométrica de imagens de sensoriamento remoto. Notas de aula. *Introdução ao Sensoriamento Remoto*. Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP.
- Fonseca, E.M., Baptista Neto, J.A., Crapez, M.C., Mcallister, J.J., Fernandez, M.A., Bispo, M. G. 2009. Bioavailability of heavy metals in Guanabara Bay, Rio de Janeiro (Brazil). *Journal of Coastal Research* 1, 802-806.
- Gatto, A. F., Virgilio, T.C., Menezes, P.M.L., Fernandes, M.C., Souza, G.M. 2010. Dinâmica Atual da Evolução da Ilha do Fundão. VI Seminário Latino Americano de Geografia Física, II Seminário Ibero Americano de Geografia Física. Coimbra.
- Godoy, J. M.; Moreira, I.; Bragança, M. J.; Wanderley, C.; Mendes, L. B. 1998. A study of Guanabara Bay sedimentation rates. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 227, 157-160. <https://doi.org/10.1007/BF02386450>
- Godoy, J.M., Oliveira, A.V., Almeida, A.C., Godoy, M.L.D.P., Moreira, I., Wagener, A.R., Figueiredo Junior, A.G. 2012. Guanabara Bay Sedimentation Rates based on 210Pb Dating: Reviewing the Existing Data and Adding New Data. *Journal of the Brazilian Chemical Society* 23, 1265-1273.
- Kampbel, M., Amaral, S., Soares, M.L.G. 2005. Imagens CCD/CBERS e TM/Landsat para análise multi-temporal de manguezais no Nordeste brasileiro. Um estudo no litoral do Estado do Ceará. *Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. Goiania.
- Kang, J.H., Lee, S.W., Cho, K.H., Ki, S.J., Cha, S.M., Kim, J.H. 2010. Linking land-use type and stream water quality using spatial data of fecal indicator bacteria and heavy metals in the Yeongsan river basin. *Water Research* 44, 4143-4157. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.05.009>
- Makota, V., Sallema, R., Mahika, C. 2004. Monitoring Shoreline Change using Remote Sensing and GIS: A Case Study of Kunduchi Area, Tanzania. *Western Indian Ocean Journal of Marine Science* 3, 1-10.
- Meneses, P.R., Almeida, T. 2012. *Introdução ao Processamento de imagens de sensoriamento remoto*. Brasília: Universidade de Brasília.
- Menezes, P.M.L. 2005. Evolução Histórica-Geográfica-Cartográfica da Ilha do Fundão. *Anais do X Encontro de Geógrafos da América Latina*. São Paulo.
- Moraes, L.E.S, Gherardi, D.F.M., Fonseca, L.M.G. 2009. Análise multi-temporal da cobertura vegetal do tipo manguezal da APA de Guapimirim (RJ) através do processamento de ima-

- gens TM-LANDSAT. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Natal.
- Moscatelli, M. 2009. Breve diagnose dos principais problemas ambientais e ações corretivas visando à revitalização da área do Porto do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.
- Niya, A.K., Alesheikh, A.A., Soltanpor, M., Kheirkhahzarkesh, M.M. 2013. Shoreline change mapping using remote sensing and GIS-Case Study: Bushehr Province. *International Journal of Remote Sensing Applications* 3, 103-107.
- Pagliosa, P.R., Fonseca, A., Barbosa, F.A.R. 2006. Evidence of systemic changes in trace metal concentrations in subtropical estuarine sediments as a result of urbanization. *Journal of Coastal Research*, 9, 1078-1083. <https://www.jstor.org/stable/25741747>
- Pires, I.O. 1986. Mapeamentos dos manguezais do recôncavo da Baía de Guanabara através da utilização de técnicas de sensoriamento remoto. Dissertação de mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- Rosa, L.; Alves, M. C.; Sanches, L. 2011. Uso de composições de bandas do satélite Landsat 5 TM para caracterizar a dinâmica da variação de áreas alagadas no Pantanal mato-grossense. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Curitiba, PR.
- Selvavinayagam, K. 2008. ShoreLine Change Monitoring in Coastal India, Using Remote Sensing and GIS Tools. *Enzine Articles*.
- Sevá, O. 2013. Riscos e prejuízos sociais e ambientais da indústria petrolífera. Uma introdução sobre o panorama do Brasil até 201. In: 50 anos da Refinaria Duque de Caxias e a expansão da indústria petrolífera no Brasil. Rio de Janeiro: Fundação Heinrich Böll.
- Silva, D.C. 1998. Avaliação da Resolução de Imagens Digitais para Cadastro. Anais do COBRAC 98: 3º Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário e 1º Encontro de Cadastro Técnico Multifinalitário para os Países do MERCOSUL. Florianópolis.
- Sloss, C.R., Jones, B.G., Brooke, B.P., Heijnis, H., Murray Wallace, C.V. 2011. Contrasting sedimentation rates in Lake Illawarra and St Georges Basin, two large barrier estuaries on the southeast coast of Australia. *Journal of Paleolimnology* 46, 561-577. <https://doi.org/10.1007/s10933-011-9507-z>
- Soares, A.M.L., Carvalho, M.S.B.S., Soares, Z.M.L., Almeida, M.A.G., Freitas Filho, M.R., Andrade, R.I.L., Castro, G.L., Oliveira, P.C. 2011. Mapeamento da carcinicultura marinha na zona costeira do Estado do Ceará utilizando imagens do satélite ResourceSat-1. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Curitiba, PR.
- Sundaravadelu, R., Sivasankaravel, M., Rajeshwararao, N., Nagabhushan, N. 2005. Coastal Erosion Studies in Pondicherry Using GIS and Remote Sensing. *Solutions to Coastal Disasters*, 297-305. [https://doi.org/10.1061/40774\(176\)30](https://doi.org/10.1061/40774(176)30)
- Van, T. T., Binh, T. T. 2011. Shoreline Change Detection to Serve Sustainable Management of Coastal Zone in Cu Long Estuary. *Proceedings of the International Symposium on Geoinformatics for Spatial Infrastructure Development in Earth and Allied Sciences*. Retrieved December 27.
- Verdonschot, P.F.M., Spears, B.M., Feld, C.K., Brucet, S., Keizer-Vlek, H., Borja, A., Elliot, M., Kernan, M., Johnson, R.K. 2013. A comparative review of recovery processes in rivers, lakes, estuarine and coastal waters. *Hydrobiologia* 704, 453-474. <https://doi.org/10.1007/s10750-012-1294-7>
- Wolff, W. J. 1992. The End of a Tradition: 1000 Years of Embankment and Reclamation of Wetlands in the Netherlands. *Ambio* 21, 287-291.
- Xuejie, L., Michiel, C.J.D. 2007. Detection of shoreline change analysis of its environmental impact applied the remote sensing methods in the Pearl River Estuary. *Proceedings of the 28th Asian Conference on Remote Sensing, Asian Association on Remote Sensing (AARS)*. Kuala Lumpur, Malaysia.
- Yanli, T. 2002. The application of GIS and RS for Coastline change detection and risk assessment to enhanced sea level rise. Dissertation, International Institute for Geoinformation Science and Earth Observation, Netherlands.
- Zhang, Y. 2011. Coastal environmental monitoring using remotely sensed data and GIS techniques in the Modern Yellow River delta, China. *Environment Monitoring and Assessment* 179, 1-29. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1716-9>
- Zhang, Y., Chen, S. L. 2009. Remote sensing analysis of spatial-temporal pattern on coastline change: A case study in the Abandoned Yellow River Delta Coast. *Advances in Marine Science* 27, 166-175.

Recebido: 17 fev. 2020

Aprovado: 19 fev. 2020

DOI: 10.20985/1980-5160.2020.v15n1.1619

Como citar: Fernandes, P.G., Baptista Neto J.A., Vieira, K.S. et al. (2020), Análise multitemporal por sensoriamento remoto da evolução da linha costeira da Baía de Guanabara, Rio de Janeiro, Brasil, *Revista S&G* 15, No. 1, 59-69. <https://revistasg.emnuvens.com.br/sg/article/view/1619>