

Análise da estabilidade da Praia do Janga (Paulista, PE, Brasil) utilizando ferramenta computacional *

Elida Regina de Melo e Silva^{@, a}; Daniele Laura Bridi Mallmann^a; Pedro de Souza Pereira^a

Resumo

Este artigo tem por objetivo a análise de estabilidade da forma em planta das baías formadas entre os quebra-mares da praia do Janga (Paulista, Pernambuco, Brasil). No local, onde a erosão se intensificou após os anos 90, foi construída uma série de nove quebra-mares destacados no intuito de conter o processo, dando origem a uma sequência de baías artificiais. Assim, cada baía foi tratada em duas metades, de modo a estudar a estabilidade de cada enseada. Praias de enseada se caracterizam por apresentar uma linha de costa arenosa bordejada por afloramentos ou promontórios rochosos de origem natural ou artificial (como quebra-mares), a qual é modelada por processos de difração e refração de ondas. O modelo parabólico permite, por meio de uma equação empírica, que seja determinada a situação de equilíbrio morfodinâmico das praias de enseada. No intuito de permitir a aplicação do modelo parabólico de modo manual com o uso de mapas, fotografias aéreas verticais, ortofotocartas ou imagens de satélite a praias de enseadas, a partir das quais seja possível o estabelecimento dos parâmetros iniciais do modelo, foi desenvolvido o *software* Mepbay. Esse *software* foi utilizado na área de estudo para analisar a estabilidade das enseadas formadas junto à sequência de quebra-mares da Praia do Janga. Para tanto, foram utilizadas imagens verticais obtidas gratuitamente por meio do programa *GoogleEarth®* e de seu banco de dados associado. As imagens selecionadas foram aplicadas ao modelo com o uso do *software*, e os resultados obtidos foram comparados aos resultados da aplicação de relações empíricas desenvolvidas para estimar a resposta da linha de costa frente à construção de quebra-mares, a partir da geometria da obra e da sua distância até a costa. Os resultados demonstraram que a Praia do Janga pode ser classificada como instável em sua maior parte, uma vez que a configuração da linha de costa nas diversas baías geradas pela difração de ondas entre os quebra-mares ainda não alcançou a configuração da projeção gerada pelo modelo parabólico em sua totalidade. Naquelas em que a praia já está quase ajustada à projeção, pode-se dizer que está próxima do seu equilíbrio estático. A aplicação do modelo parabólico através do *software* Mepbay mostrou-se uma ferramenta de fácil aplicação e rápida resposta, que pode ser utilizada para prever o ajuste da linha de costa mediante a construção de uma estrutura de proteção costeira. No entanto, o aplicativo não realiza previsões acerca da morfologia final em planta (tômbolo ou saliência) que se desenvolverá a partir da difração sofrida pela onda junto à zona de sombra da estrutura de proteção. Por essa razão, uma alternativa interessante e que foi adotada neste estudo é a combinação da aplicação do *software* com o uso de relações empíricas. As análises aqui apresentadas, feitas de maneira visual, qualitativa e com poucos recursos, permitem concluir que o Mepbay é potencialmente útil para estudos rápidos voltados ao manejo da linha de costa.

Palavras-chave: Enseada, quebra-mares, modelo parabólico, saliência, tômbolo.

Abstract

Stability assessment of Janga Beach (Paulista, PE, Brazil) using computational tool

This article aims to analyze the stability of the planform shape of the bays formed between the breakwaters located at Janga Beach (Paulista, Pernambuco, Brazil). On site, where erosion has intensified in the 90's, were constructed a series of nine detached breakwaters in order to contain the process, creating a sequence of artificial bays. Thus, each bay was treated in

[@] Corresponding author: emelogeio@gmail.com

^a Universidade Federal de Pernambuco, LABOGEO – Laboratório de Oceanografia Geológica, Departamento de Oceanografia, Avenida Acadêmico Hélio Ramos s/nº CEP: 50740-530, Pernambuco, Brasil.

* Submission: 16 JAN 2014; Peer review: 13 FEB 2014; Revised: 12 MAY 2014; Accepted: 26 JUL 2014; Available on-line: 24 SEP 2014

two halves, in order to study the stability of each bay-shaped beach. Bay-shaped beaches are characterized by having a sandy shoreline bordered by rocky headlands or outcroppings of natural or artificial origin (such as breakwaters), which is modeled by processes of wave diffraction and refraction. The parabolic model allows, by means of an empirical equation determine the type of morphodynamic stability of the beaches. In order to allow the application of the parabolic model manually with the use of maps, aerial photographs, orthophotos or satellite images from which it is possible to establish the initial parameters of the model, were developed the software Mepbay. This software was used in the study area to analyze the stability of bay-shaped beaches formed by the sequence of breakwaters at Janga Beach. For this purpose, vertical images obtained free through GoogleEarth® software and its associated database were used. The selected images were applied to the model using the software and the results were compared to the results of applying empirical relationships developed to predict the response of the shoreline opposite the construction of breakwaters, based on the structure geometry and their distance from the coast. The results showed that Janga Beach can be classified as unstable for the most part, once that the shoreline configuration in several bays generated by wave diffraction of between the breakwaters has not yet reached the setting of the projection generated by the model parabolic in its entirety. Those where the beach is almost adjusted to the projection, we can say that is close to its static equilibrium. The application of the parabolic model by Mepbay software proved to be a tool for easy application and quick response that can be used to predict the adjustment of the coastline by building a coastal protection work. However, it does not do predictions about the final morphology in plan (tombolo or salience) that will develop from the diffraction suffered by the wave near the shadow of the protective zone. For this reason, an interesting alternative, which was adopted in this study is the combination of the software application using empirical relationships. The analyzes presented here, made visually, qualitative way and with few resources, we can conclude that Mepbay is potentially useful for quick studies related to the management of the shoreline.

Keywords: pocket beach, breakwaters, parabolic model, salient, tombolo.

1. Introdução

Praias de enseada se caracterizam por apresentar uma linha de costa arenosa bordejada por afloramentos ou promontórios rochosos, a qual é modelada por processos de difração e refração de ondas, que as tornam curvilíneas e, em geral, assimétricas. Embora sejam comuns praias naturais com tais características, inúmeras têm sido criadas de forma artificial por meio de projetos de engenharia que incluem estruturas de proteção costeira e portos (Klein *et al.*, 2003).

No que tange à estabilidade, as praias de enseada podem apresentar equilíbrio estático, dinâmico ou instabilidade (Silvester & Hsu, 1993, 1997; Hsu *et al.*, 2000). No equilíbrio estático, as ondas incidentes atingem simultaneamente toda a periferia da baía, de tal forma que a deriva litorânea é praticamente inexistente. Nessas condições, não há erosão ou acreção de longo-termo, apenas por ocasião de tempestades. Para baías em equilíbrio dinâmico, a manutenção da linha de costa em uma mesma posição depende do equilíbrio no balanço sedimentar, e a linha de costa pode mudar de posição em função de variações no suprimento de sedimentos. Finalmente, enseadas instáveis são aquelas nas quais ocorre deslocamento da linha de costa, em geral, erosão em um dos extremos e acreção no outro. Tal deslocamento pode ser observado e medido por meio de levantamentos em campo ou a partir de fotografias aéreas multitemporais (Klein *et al.*, 2003; Silveira *et al.*, 2010).

Inúmeros modelos empíricos têm sido elaborados para representar a forma em planta das praias de enseada. Dentre esses modelos, o modelo parabólico (Hsu & Evans, 1989) incorpora como parâmetros diretos a

geometria da praia e dados sobre a dinâmica da antepraia (por exemplo, o ponto de difração e a direção preferencial de incidência de ondas) (Hsu *et al.*, 2008), sendo bastante adequado para a análise da estabilidade. No intuito de facilitar a aplicação do modelo parabólico em praias de enseada, foi desenvolvido o *software* Mepbay (Klein *et al.*, 2003), que foi criado com a finalidade de definir qual a condição de uma determinada praia de enseada, em termos da estabilidade da sua linha de costa, e qual forma esta virá a assumir se continuar exposta à mesma dinâmica. Desde então, esse *software* tem se mostrado uma importante ferramenta para auxílio de profissionais das áreas de Engenharia Costeira e Geociências na análise morfológica das praias de enseada e suas alterações (Klein *et al.*, 2003; Raabe *et al.*, 2010).

O presente artigo apresenta resultados da análise de estabilidade da forma em planta das baías formadas entre os quebra-mares da praia do Janga (município de Paulista, Pernambuco, Brasil), realizada através da aplicação do modelo parabólico a imagens de satélite com uso do *software* Mepbay. Adicionalmente, são apresentadas análises geradas a partir da comparação desses resultados com dados oriundos da aplicação de equações empíricas para predizer o comportamento da linha de costa frente à zona de sombra dos referidos quebra-mares.

2. Área de Estudo

O município de Paulista, no qual se localiza a Praia do Janga, dista cerca de 20km a nordeste de Recife, capital do estado, estando inserido na Região Metropolitana do Recife e sendo delimitado pelos rios Timbó, a norte, e Paratibe, a sul. A planície costeira do município segue

os padrões da região, com menos de 10km de largura e altitude média de 4m, é formada por depósitos sedimentares e alinhada na direção NNE-SSO. Extensos alinhamentos de *beachrocks* constituem as feições mais conspícuas da linha de costa (Neves & Muehe, 1995). Os ecossistemas presentes na região incluem manguezais, recifes de coral e restingas.

A região apresenta temperatura média anual em torno de 27°C e pluviosidade aproximada de 2.000 mm/ano, distribuídos de modo desigual entre períodos secos e chuvosos. Predominam os ventos de SE. As ondas respondem ao regime dos ventos, predominando de SE. As marés registradas na região são semi-diurnas, sendo classificadas em termos de amplitude como mesomarsés. A altura significativa de ondas varia de acordo com a localidade, apresentando valores entre 0,27/0,29m para o município de Paulista (FINEP/ UFPE, 2009).

A praia do Janga localiza-se no município de Paulista, na Região Metropolitana do Recife, estando situada entre as coordenadas 7° 57' 8.64" e 7° 55' 50.88" S e 34° 48' 56.16" W e 34° 49' 22.08" W, apresentando uma extensão de 3,8km (Fig. 1). A área possui um conjunto de nove quebra-mares, além de obras de contenção da erosão que incluem enrocamento, muros de contenção e aterro hidráulico.

Os quebra-mares possuem comprimento variável de 120 a 320m, com ênfase para o último, que, após a conclusão da obra, passou a ter 650m (CPRH/GERCOPE, 2001). A distância média entre os quebra-mares e a costa é de 150m.

O conjunto de obras de contenção do processo erosivo foi construído a partir da demanda gerada pela transferência de erosão do município de Olinda, situado a sul. A erosão atingiu a área a partir da década de 80, após a construção dos molhes do Rio Paratibe (também conhecido como Rio Doce), tendo evoluído na década de 90 para uma situação catastrófica. A partir de então, foram construídos os quebra-mares, cuja obra foi concluída no ano de 2001 (Costa, 2002).

3. Metodologia

A metodologia aplicada neste estudo foi dividida em três etapas: (i) seleção das imagens; (ii) aplicação do modelo; e (iii) análise da estabilidade das praias, conforme descrito a seguir.

(i) Aquisição das imagens

As imagens verticais utilizadas foram obtidas gratuitamente por meio do programa *GoogleEarth*® e de seu banco de dados associado. Foi utilizado um recorte da imagem de satélite para cada baía formada por um conjunto de dois quebra-mares. Uma lacuna entre dois quebra-mares, localizada ao norte na área de estudo, entre os quebra-mares Q8 e Q9, não pôde ser analisada, uma vez que sua linha de costa se encontra

imobilizada pela presença de um enrocamento, não permitindo a aplicação do modelo. As imagens utilizadas para aplicação do modelo e verificação da resposta da costa datam, respectivamente, de 01/07/2003 e 12/01/2009.

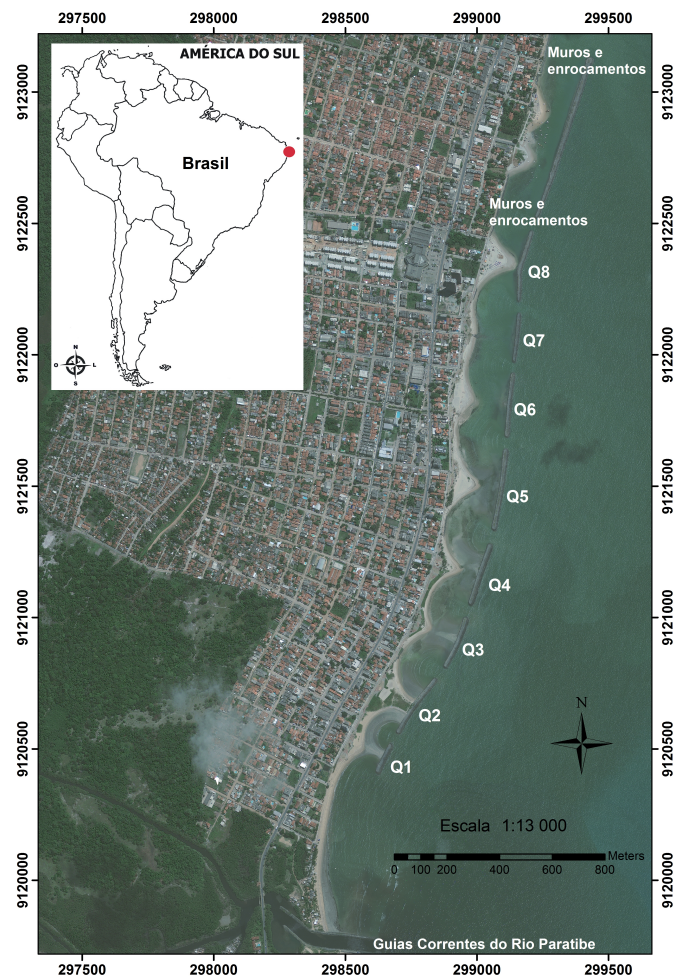


Figura 1 - Localização da área de estudo indicando os quebra-mares nomeados de Q1 a Q8 de sul para norte (Imagem: *GoogleEarth*).

Figure 1 - Study area indicating the breakwaters which are named from Q1 to Q8 from south to north. (Image: *GoogleEarth*).

(ii) Aplicação do modelo

O modelo parabólico consiste num modelo empírico que permite determinar a situação de equilíbrio morfodinâmico das praias de enseada. Schiaffino *et al.* (2012) descrevem que, para o referido modelo (Fig. 2), o sistema de coordenadas tem início em (X_0, Y_0) ; (X_1, Y_1) é definido como ponto cuja tangente à linha de costa é paralelo à crista de onda. Cada ponto em (X, Y) pertence à linha de costa definida por coordenadas polares (R, θ) . Os coeficientes $(C_1, C_2$ e $C_3)$ dependem de β (ângulo formado entre as linhas de crista de onda predominantes e a linha de controle R_β , sendo esta a linha que une o ponto de controle localizado no promontório rochoso – onde se inicia o processo de

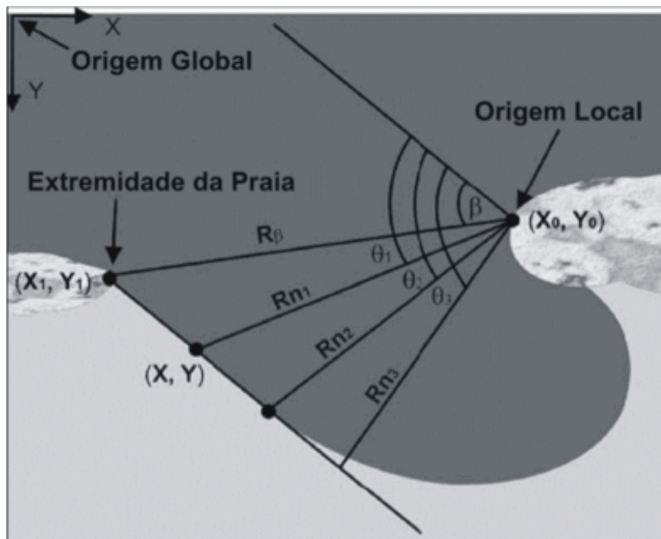


Figura 2 - Esquema que ilustra a definição dos parâmetros principais do modelo parabólico para praias de enseada. Segundo Klein *et al.*, 2003.

Figure 2 - Sketch for definition of major parameters of parabolic bay shape model. According to Klein *et al.*, 2003.

difração de ondas – até a extremidade final da praia). O modelo parabólico foi desenvolvido por Hsu & Evans (1989), sendo descrito pela seguinte equação (Eq. 1).

$$Rn/R\beta = C0 + C1\beta n + C2\beta n^2 \quad (1)$$

O *software* Mepbay foi desenvolvido para permitir a aplicação do modelo parabólico de modo manual com o uso de mapas, fotografias aéreas verticais, ortofotocartas ou imagens de satélite a praias de enseadas a partir das quais seja possível o estabelecimento dos parâmetros iniciais do modelo (β e $R\beta$). Os resultados dependem da resolução da imagem utilizada (Raabe *et al.*, 2010) e da habilidade do operador em estabelecer os pontos que determinam os dados de entrada.

Para a aplicação do modelo parabólico com uso do Mepbay, as imagens selecionadas foram carregadas no *software*, no qual foi feito o seu escalonamento. Tal procedimento é realizado através da associação manual de uma feição observada na imagem à sua medida real conhecida em campo. Posteriormente, foram inseridos os pontos de controle.

Para o adequado estudo do comportamento de uma praia de enseada através da metodologia aqui aplicada, é necessário saber, ainda, a localização do promontório rochoso (natural ou artificial), o final da praia e a direção de incidência predominante das ondas (Fig. 3). É através da indicação desses pontos que o Mepbay calcula a posição da linha de costa teórica através do modelo parabólico de Hsu & Evans (1989) e a projeta sobre a imagem base.

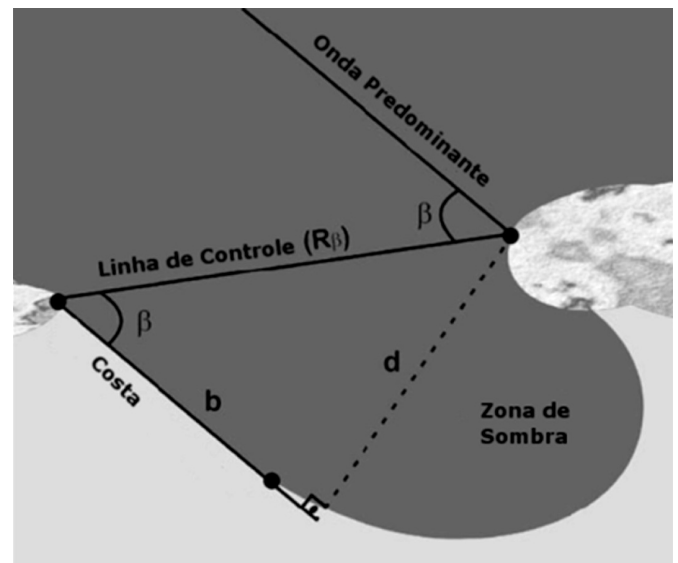


Figura 3 - Definição dos pontos de controle. Adaptado de Klein *et al.*, 2003.

Figure 3 - Definition of the control points. Adapted from Klein *et al.*, 2003).

Tabela 1 - Resultados da aplicação de equações empíricas para prever o comportamento da linha de costa frente à construção de quebra-mares (Fonte: Imambaks *et al.*, 2011; Marinho, 2012).

Table 1 - Results of empirical equations application to predict the shoreline behavior after the breakwaters construction (Source: Imambaks *et al.*, 2011; Marinho, 2012).

Quebra-mar	Comprimento (L) (m)	Distância da costa (D) (m)	Relação D/L	$Is = \text{EXP}(1,72 - 0,41 * L/D)$	Classificação (Ahrens & Cox, 1990)	Classificação (Bosboom & Stive, 2011)
Q1	127	143	1,13	3,88	Saliência	Saliência pouco desenvolvida
Q2	250	118	0,59	2,79	Tômbolo	Saliência bem desenvolvida
Q3	204	172	0,84	3,43	Saliência	Saliência bem desenvolvida
Q4	240	170	0,71	3,13	Tômbolo	Saliência bem desenvolvida
Q5	310	180	0,58	2,76	Tômbolo	Saliência bem desenvolvida
Q6	240	210	0,88	3,50	Saliência	Saliência pouco desenvolvida
Q7	180	192	1,07	3,80	Saliência	Saliência pouco desenvolvida
Q8	270	130	0,48	2,38	Tômbolo	Tômbolo periódico

Definidos os pontos de controle, o modelo foi aplicado, resultando na geração de linhas teóricas calculadas pelo programa sobre a imagem, a partir das quais é possível inferir sobre o tipo de equilíbrio em que a praia se encontra. Cabe observar que, para a aplicação da equação parabólica às baías, foi necessária a divisão da baía em duas partes, criando duas enseadas, visto que o modelo foi desenvolvido para praias com essa configuração.

(iii) Análise da estabilidade das praias

A análise da estabilidade da praia do Janga foi feita através da comparação da linha de costa teórica calculada pelo programa Mepbay e a linha de costa mais atual obtida nas imagens do *GoogleEarth*, possibilitando a discussão sobre o tipo de equilíbrio em que a enseada se encontra. Foram, ainda, utilizados relatórios e monografias (Imambaks *et al.*, 2011; Marinho, 2012) como material de apoio para embasar a análise.

Para fins de discussão, são apresentados na tabela 1, conforme Imambaks *et al.* (2011), os resultados da aplicação de relações empíricas baseadas nos modelos desenvolvidos por Ahrens & Cox (1990) e Bosboom & Stive (2011) para aplicar à geometria dos quebra-mares do Janga e prever o comportamento da linha de costa junto à zona de sombra da obra. A interpretação permite inferir sobre a morfologia final da costa, se uma saliência ocorrerá, se esta será pouco ou bem desenvolvida, se ocorrerá um tombolo periódico (apenas na maré baixa) ou um tombolo permanente. Os

modelos empíricos serão referidos como (AC90) para Ahrens & Cox (1990) e (BS11) para Bosboom & Stive (2011).

4. Resultados e Discussão

Os resultados da aplicação do modelo parabólico através do *software* Mepbay são apresentados a seguir, com uma breve interpretação para cada uma das baías analisadas. As pranchas mostram as projeções feitas pelo modelo (com base em imagens datadas de 2003) e observadas em imagens mais recentes (2009).

BAÍA 1

Para o segmento de linha de costa da praia do Janga que sofre influência do primeiro quebra-mar (Q1) (Fig. 4), a tendência projetada pelo modelo parabólico utilizando a imagem de 2003 indica erosão na extremidade sul da área sob influência do quebra-mar e acúmulo de sedimentos localizado imediatamente à zona de sombra (zona abrigada da ação direta de ondas) da obra. De acordo com os resultados das relações empíricas (Imambaks *et al.*, 2011), há tendência para a formação de saliência (AC90) ou saliência pouco desenvolvida (BS11) junto à zona de sombra do quebra-mar. A análise da imagem de 2009 do mesmo segmento revela que houve erosão na extremidade sul, indicada pela presença de um enrocamento e deposição de sedimentos configurando um tombolo periódico, isto é, um tombolo que somente é visível durante a baixamar na área de sombra formada por Q1. A projeção do *software* sobre

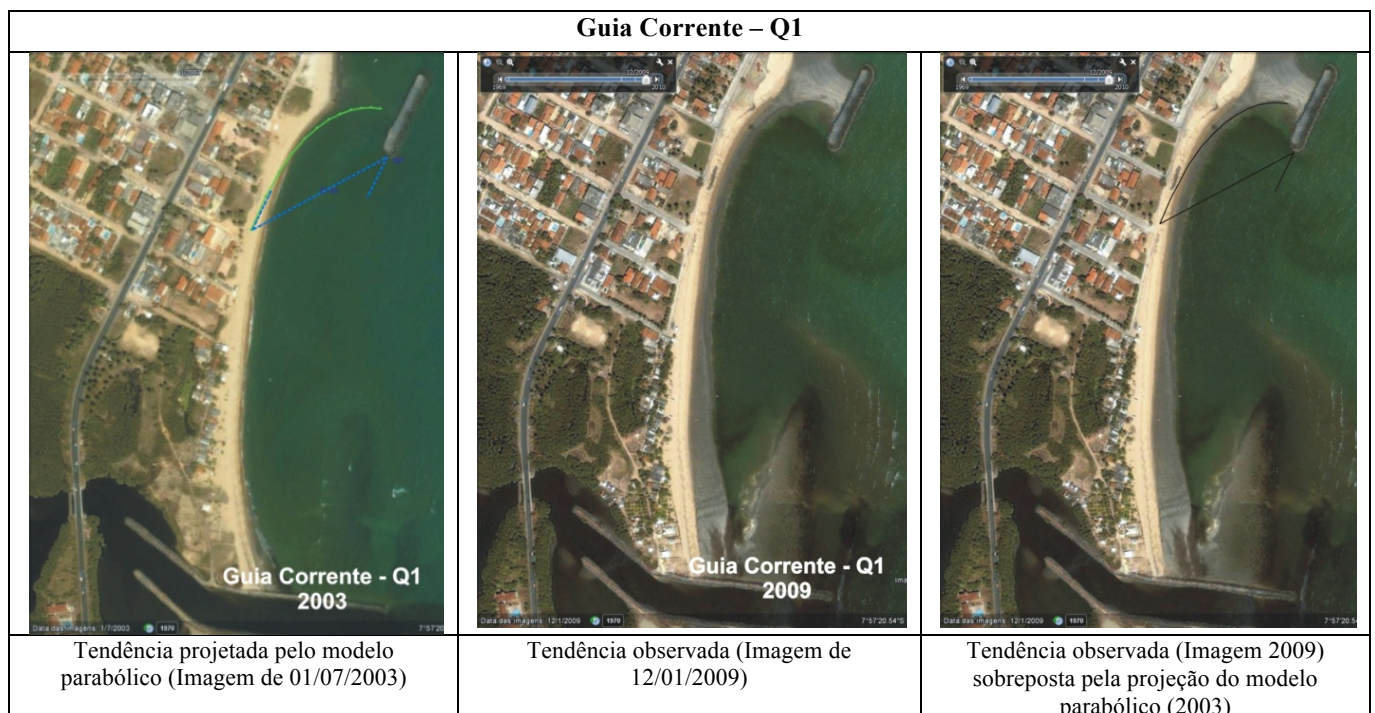


Figura 4 - Análise da estabilidade da linha de costa para a enseada protegida pelo quebra-mar Q1. (Imagens: *GoogleEarth*).

Figure 4 - Shoreline stability analysis made for bay protected by the breakwater Q1. (Images: *GoogleEarth*).

a erosão no segmento foi confirmada. Entretanto, de acordo com observação é possível dizer que houve um acúmulo de sedimentos maior que o previsto pela aplicação das equações empíricas, cuja previsão seria de saliência pouco desenvolvida (BS11) ou saliência (AC90), indicando que no processo de sedimentação há outros fatores interferindo na configuração em planta da zona de sombra do quebra-mar que não são avaliadas pela metodologia utilizada (isto é, da geometria da obra). A previsão para a feição morfológica da zona de sombra se ajustou àquela prevista, no entanto, o processo erosivo do centro da baía estimado pelo Mepbay excede o observado. Desta forma, pode-se dizer que este trecho da linha de costa se encontra em equilíbrio dinâmico, ainda se ajustando ao seu estado final de equilíbrio.

BAÍA 2

Na imagem de 2003, observou-se que a projeção do modelo parabólico para a configuração da linha de costa apresentada diante da difração de onda que ocorre nos quebra-mares Q1 e Q2 (Fig. 5) é de meia-lua, com erosão no centro da baía e acresção nas laterais. Os resultados obtidos através das relações empíricas apontam para a formação de saliência (AC90) ou saliência bem desenvolvida (BS11) para o quebra-mar 1 e tómbolo (AC90) ou saliência bem desenvolvida (BS11) para o quebra-mar 2. As imagens de 2009 permitem observar a formação de um tómbolo periódico para o Q1 e de um tómbolo para Q2. A análise comparativa entre a projeção gerada pelo modelo e a configuração em planta observada na imagem de 2009 foram confirmadas, com exceção da erosão no centro da baía. Diante do cenário observado pode-se dizer que esta praia se encontra em equilíbrio dinâmico, tendendo a erodir o fundo da baía até chegar ao equilíbrio previsto.

BAÍA 3

Com base nas informações da imagem de 2003, a baía projetada pelo Mepbay como resultado da difração causada pelo conjunto de quebra-mares Q2 e Q3 (Fig. 6) indica uma tendência erosiva no centro da baía e progradante nas extremidades. Tal projeção está de acordo com a análise semântica da imagem mais recente, que mostra acresção na extremidade sul com formação de tómbolo e uma modesta acresção na extremidade norte, além de erosão no centro da baía. Entretanto, como a saliência observada na zona de sombra de Q3 ainda não atingiu totalmente a configuração prevista pela aplicação das relações empíricas, que apontam para o desenvolvimento de uma saliência ou saliência bem desenvolvida, e o contorno da baía também não alcançou desenho indicado pelo modelo, pode-se dizer que a praia se encontra em instabilidade.

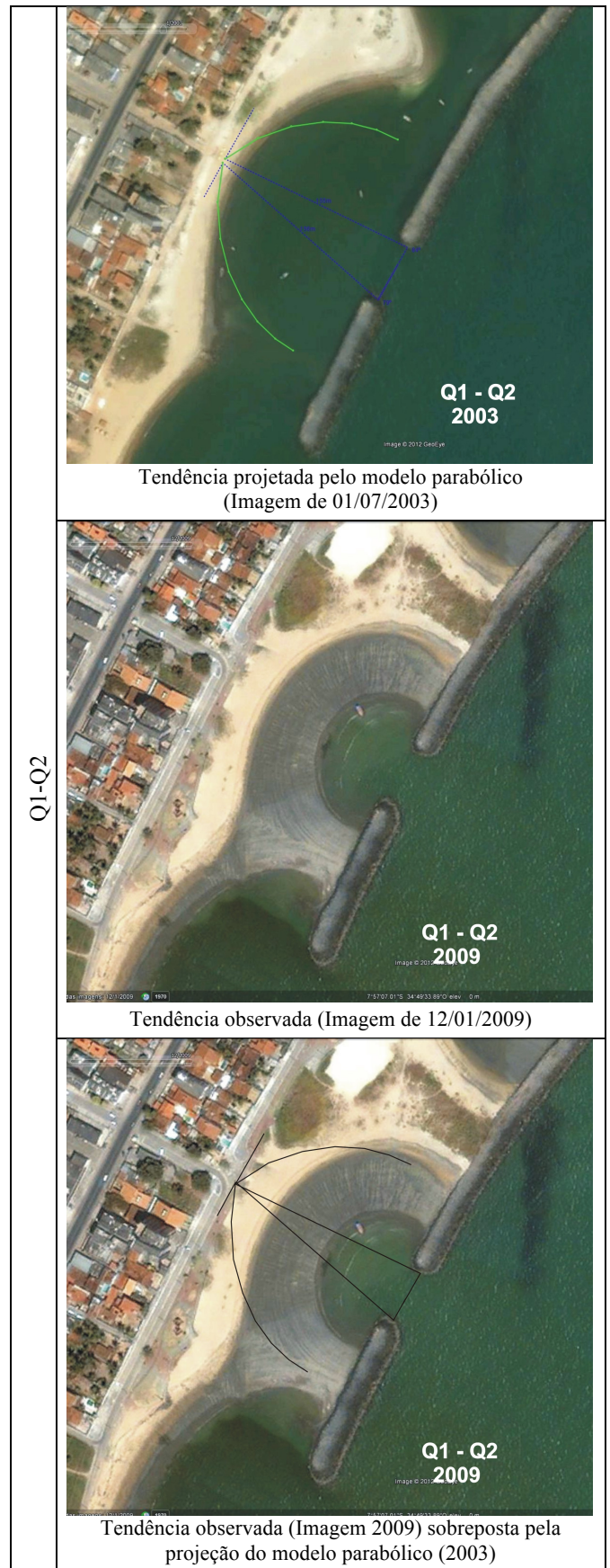


Figura 5 - Análise da estabilidade da linha de costa para a baía, formada entre Q1 e Q2 (Imagens: GoogleEarth).

Figure 5 - Shoreline stability analysis made for the bay formed between Q1 and Q2 (Images: GoogleEarth).

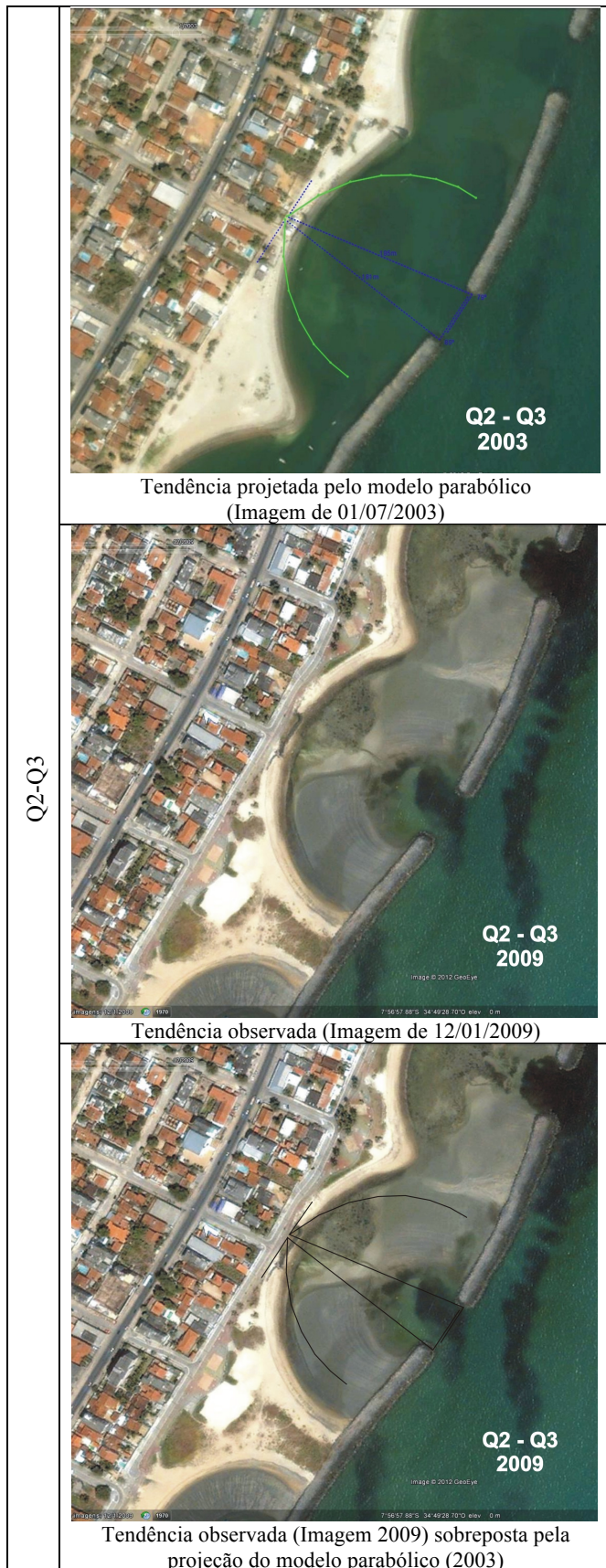


Figura 6 - Análise da estabilidade da linha de costa para a baía 3, formada entre Q2 e Q3. (Imagens: GoogleEarth).

Figure 6 - Shoreline stability analysis made for the bay 3 formed between Q2 and Q3. (Images: GoogleEarth).

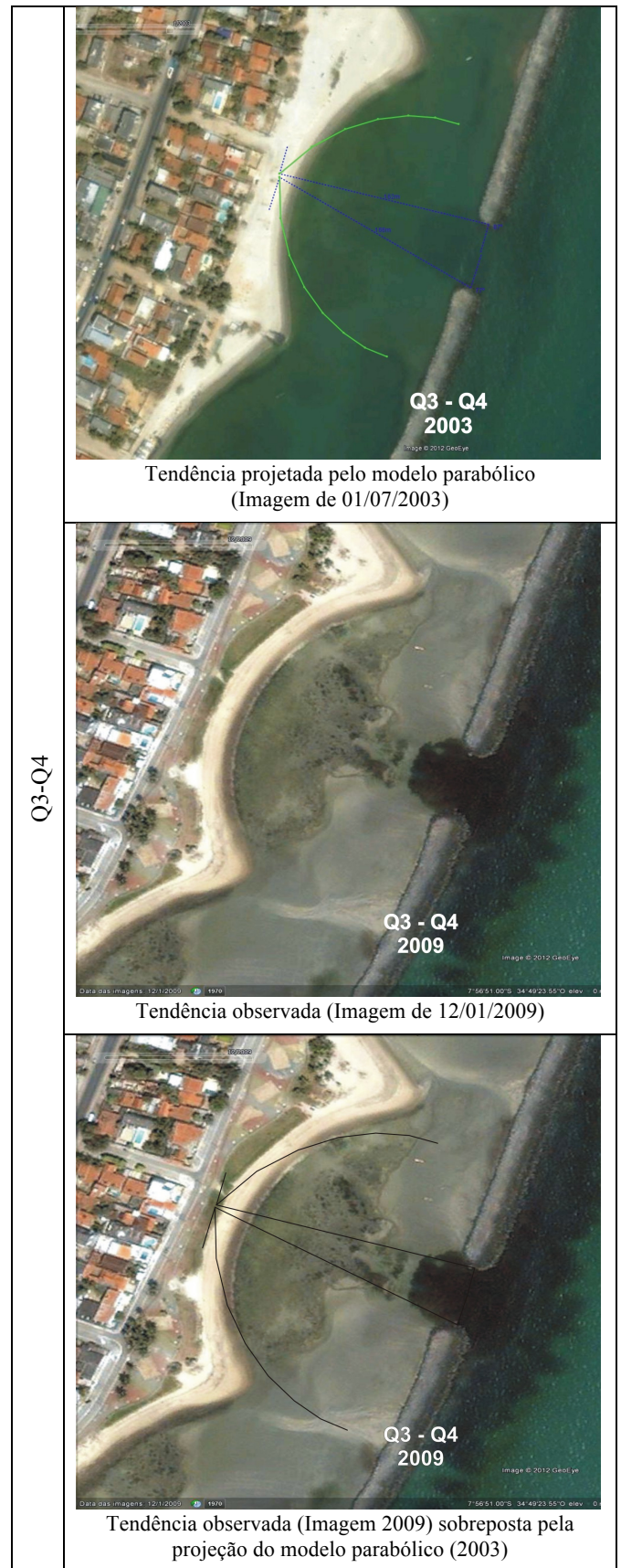


Figura 7 - Análise da estabilidade da linha de costa para a baía 4, formada entre Q3 e Q4. (Imagens: GoogleEarth).

Figure 7 - Shoreline stability analysis made for the bay 4 formed between Q3 and Q4. (Images: GoogleEarth).

BAÍA 4

O contorno da baía projetado pelo modelo parabólico para o trecho entre os quebra-mares Q3 e Q4 (Fig. 7) indica erosão no centro da baía e acresção nas laterais. A imagem mais recente mostra a acresção nas laterais, confirmando parcialmente a projeção gerada pelo modelo parabólico, já que não ocorreu erosão no setor indicado. No local, pode-se observar inclusive vegetação incipiente na pós-praia. As previsões baseadas nas relações empíricas indicam que, na área de sombra de Q3, poderá se formar uma saliência (AC90) ou uma saliência bem desenvolvida (BS11), e na zona de sombra de Q4, um tómbolo (AC90) ou uma saliência bem desenvolvida (BS11). As projeções não coincidem com o observado na imagem de 2009, e a linha de costa se encontra à retroterra em relação ao previsto, configurando instabilidade.

BAÍA 5

A projeção do modelo parabólico baseado na imagem de 2003 indica tendência erosiva no centro da baía e progradante nas laterais. Utilizando a imagem de 2009 entre os quebra-mares Q4 e Q5 (Fig. 8), observou-se que a projeção do modelo foi confirmada pela formação de saliências na zona de sombra dos quebra-mares 4 e 5. Tais observações estão de acordo, ainda, com as predições feitas a partir da geometria dos quebra-mares, as quais indicam, para ambos os quebra-mares, a formação de saliências bem desenvolvidas (AC90) ou tómbolos (BS11). Esta baía foi classificada como instável, porque a configuração em planta das extremidades ainda não atingiu a conformação projetada pelo Mepbay, indicando que o processo erosivo do centro da baía pode ter continuidade até atingir o limite indicado na projeção.

BAÍA 6

Para a baía formada entre os quebra-mares 5 e 6 (Fig. 9), a partir da imagem base de 2003, o modelo parabólico projetou uma configuração indicativa de erosão no centro da baía com acresção nas extremidades. A observação da imagem de satélite datada de 2009 confirmou as previsões feitas a partir das relações empíricas, as quais indicam o acúmulo de sedimentos na zona de sombra dos quebra-mares com a consequente formação de saliência bem desenvolvida (AC90) e saliência pouco desenvolvida (BS11), em Q5 e Q6, respectivamente. Sob o ponto de vista da estabilidade praial, a baía foi classificada como instável, devido a o desenho da forma em planta não ter alcançado a configuração indicada na projeção do modelo.

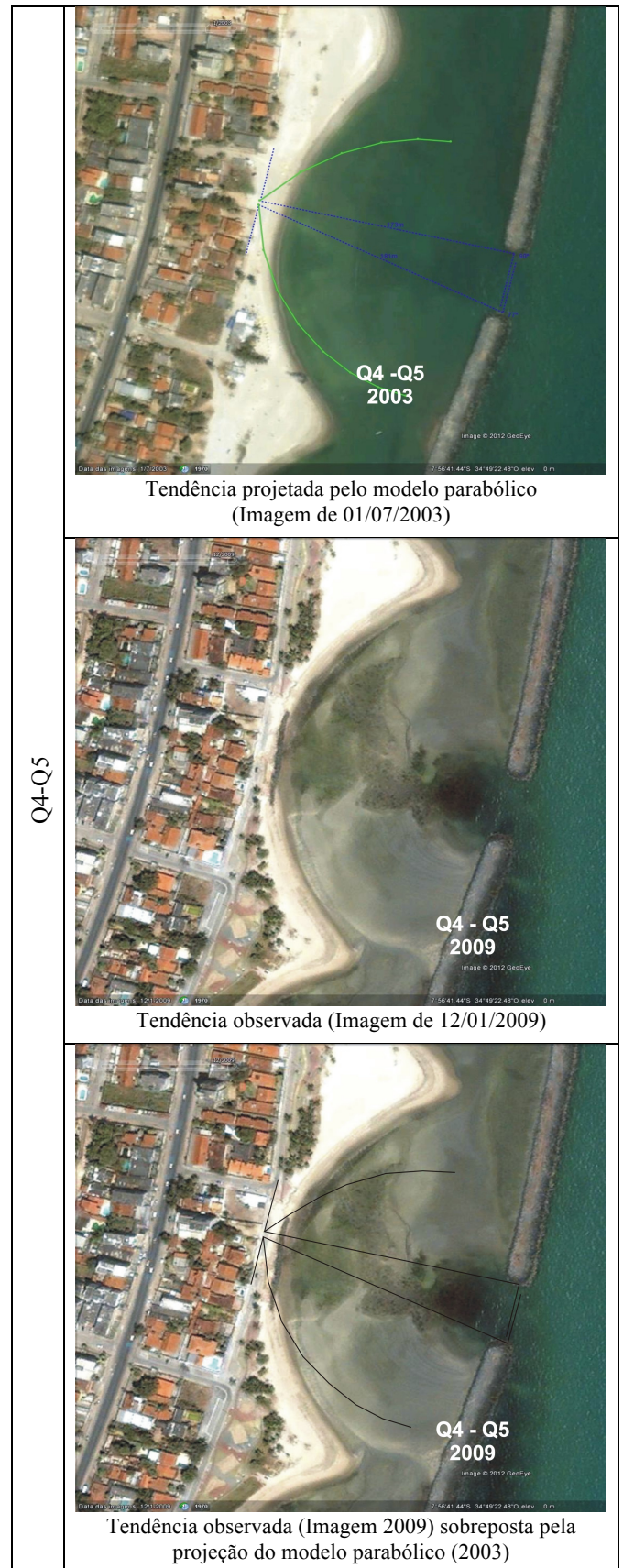


Figura 8 - Análise da estabilidade da linha de costa para a baía 5, formada entre Q4 e Q5. (Imagens: GoogleEarth).

Figure 8 - Shoreline stability analysis made for the bay 5 formed between Q4 and Q5. (Images: GoogleEarth).

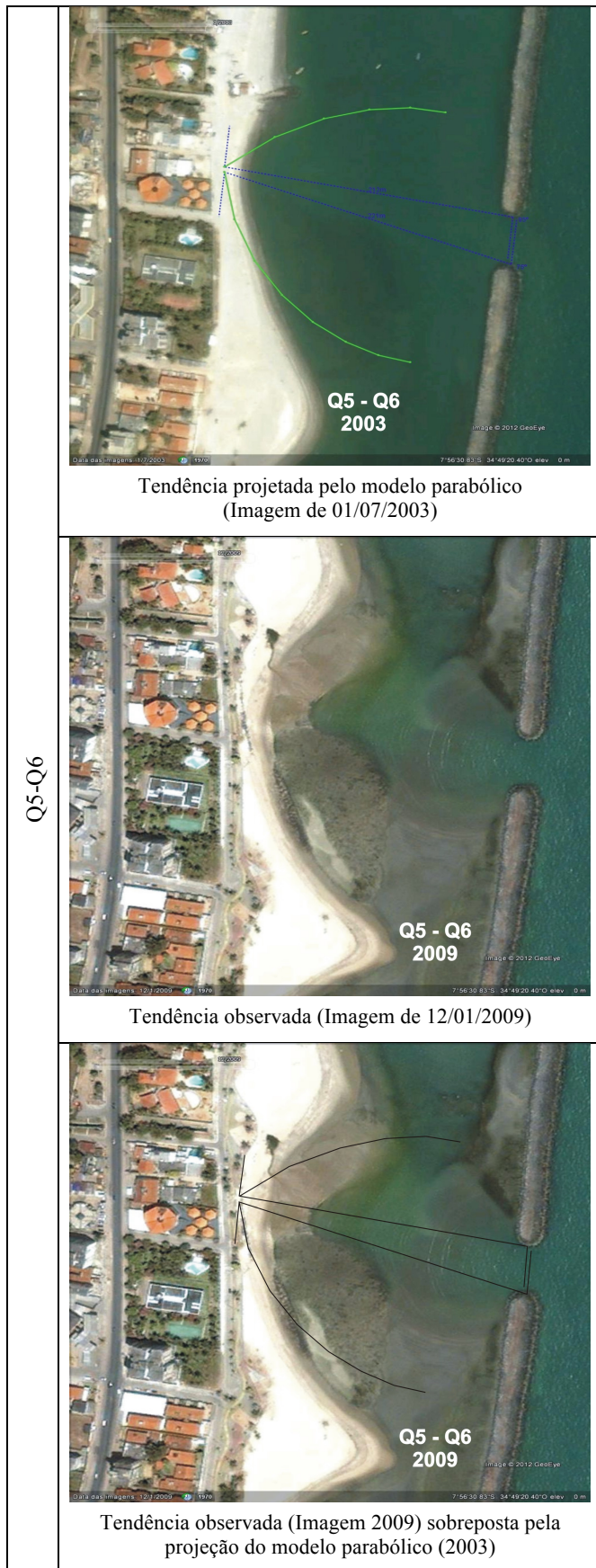


Figura 9 - Análise da estabilidade da linha de costa para a baía 6, formada entre Q5 e Q6. (Imagens: GoogleEarth).

Figure 9 - Shoreline stability analysis made for the bay 6 formed between Q5 and Q6. (Images: GoogleEarth).

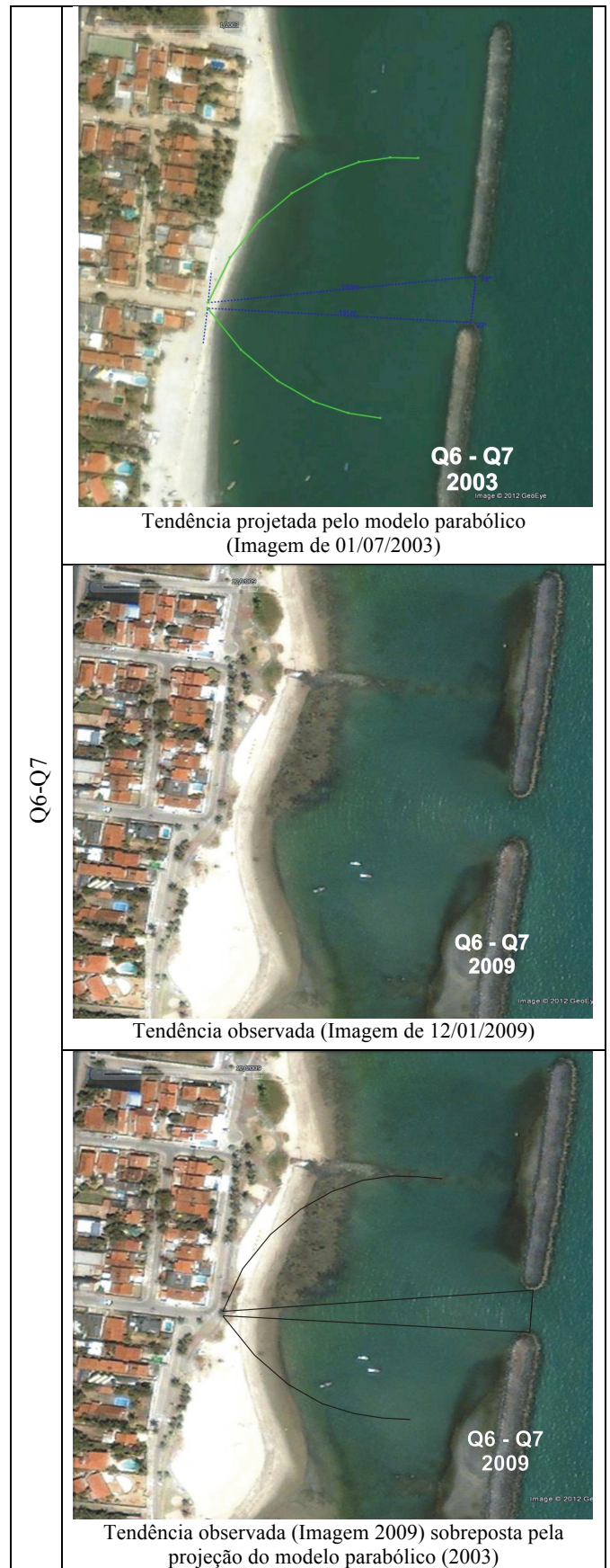


Figura 10 - Análise da estabilidade da linha de costa para a baía 7, formada entre Q6 e Q7. (Imagens: GoogleEarth).

Figure 10 - Shoreline stability analysis made for the bay 7 formed between Q6 and Q7. (Images: GoogleEarth).

BAÍA 7

A projeção baseada na imagem de 2003, entre os quebra-mares Q6 e Q7 (Fig. 10), resultou em um arco mais fechado, indicando erosão no centro da baía e acresção nas laterais, sendo mais acentuada a norte. Por sua vez, os resultados da aplicação das relações empíricas apontam para a formação de saliência (AC90) ou saliência bem desenvolvida (BS11) nas zonas de sombra de Q6 e Q7. A imagem de 2009 mostra que, salvo o aumento da saliência na zona de sombra de Q6 e uma pequena acresção no centro da baía, não houve grande alteração na configuração em planta da linha de costa. Cabe ressaltar que, nesta área, parte da ponte de acesso ao quebra-mar, utilizada na época da construção da obra, foi mantida, o que modifica os efeitos de difração e refração na área abrigada. Como a configuração em planta projetada não foi alcançada e há acúmulo de sedimento junto aos quebra-mares, indicando uma possível reformulação do desenho dessas feições em planta, a baía foi classificada como instável.

BAÍA 8

As predições realizadas por Imambaks *et al.* (2011), através da aplicação das relações empíricas, indicam a formação de saliência ou saliência bem desenvolvida na zona de sombra de Q7 e tómbolo (AC90) ou tómbolo periódico (BS11) na zona de sombra de Q8. Analisando a imagem de 2009, observou-se que as projeções do modelo parabólico e as predições empíricas previstas para o quebra-mar 8 ocorreram, entretanto não houve modificações notáveis no contorno da linha de costa na área de influência do quebra-mar 7. Outro fato observado foi que o contorno da linha de costa de toda a baía não se ajustou à projeção do modelo parabólico, e a linha de costa está à retroterra da linha estimada. Por esse motivo, a baía foi classificada como instável (Fig. 11).

Diante dos resultados acima, podemos classificar a praia do Janga como instável em sua maior porção, pois a configuração da linha de costa nas diversas baías, gerada pela difração de ondas entre os quebra-mares, ainda não alcançou a configuração da projeção gerada pelo modelo parabólico desenvolvido por Hsu & Evens (1989) em sua totalidade. Naquelas em que a praia já está quase ajustada à projeção, pode-se dizer que está próxima do seu equilíbrio estático (Klein *et al.*, 2003).

Embora as tendências indicadas pela aplicação das relações empíricas à geometria dos quebra-mares (Imambaks *et al.*, 2011), as tendências projetadas pelo Mepbay e as observadas nas imagens de satélite estejam, na sua maior parte, de acordo, cabe ressaltar que existe uma gama de parâmetros que definem a forma em planta de uma baía e que não foram aqui

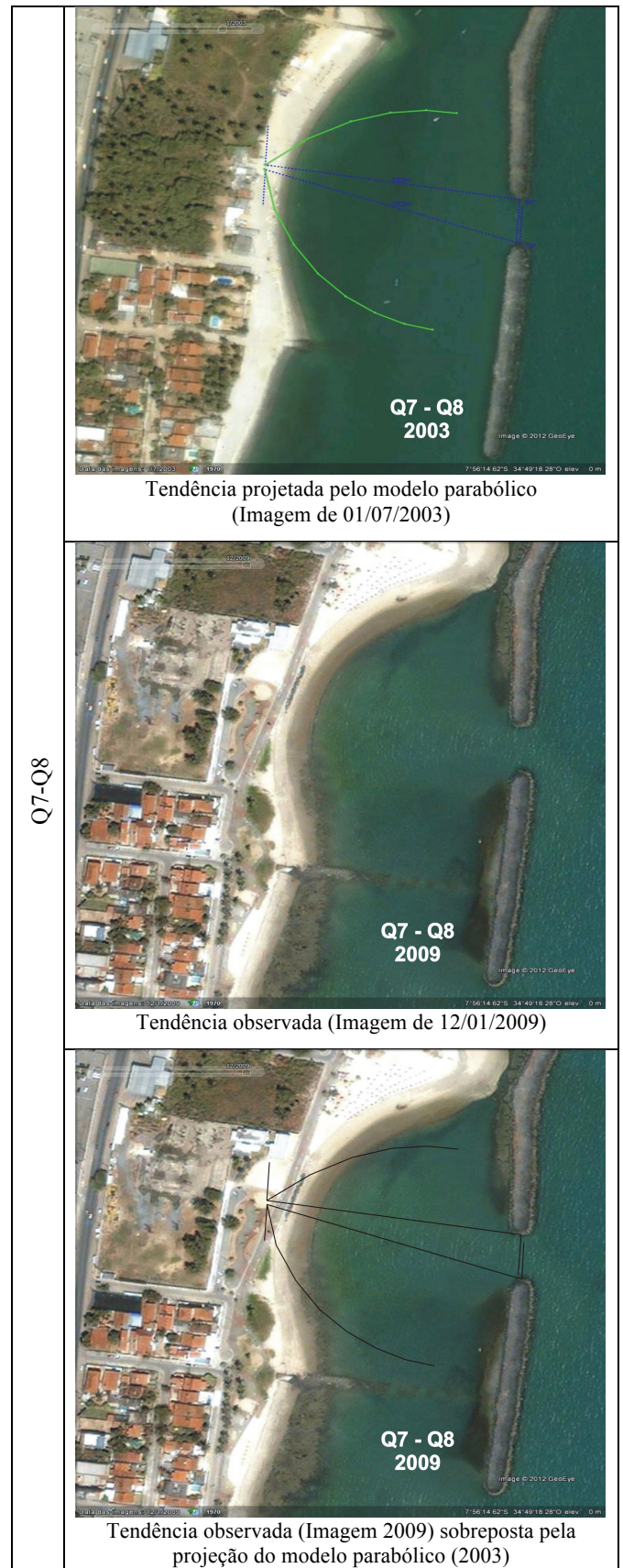


Figura 11 - Análise da estabilidade da linha de costa para a baía 8, formada entre Q7 e Q8. (Imagens: GoogleEarth).

Figure 11 - Shoreline stability analysis made for the bay 8 formed between Q7 and Q8. (Images: GoogleEarth).

abordados, motivo pelo qual os resultados devem ser tomados com critério. Benedet *et al.* (2005) mencionam como alguns desses parâmetros a orientação da praia, a configuração batimétrica e o suprimento sedimentar. Ademais, vale ressaltar que tanto o modelo parabólico quanto os modelos de AC90 e BS11 não indicam o tempo necessário para que a praia atinja o seu equilíbrio ou a formação das saliências e dos tómbolos, respectivamente. Tal limitação sugere a inclusão em estudos futuros de uma análise multitemporal com mais imagens que permitam estabelecer uma tendência e comparar essa tendência às predições dos modelos.

5. Conclusões

A construção de estruturas rígidas como alternativa de proteção costeira deve ser realizada com cautela, sempre acompanhada de estudos que mostrem o seu impacto sobre a dinâmica costeira. A aplicação do modelo parabólico através do *software* MepBay mostrou-se uma ferramenta de fácil aplicação e rápida resposta, que pode ser utilizada para predizer o ajuste da linha de costa mediante a construção de uma estrutura, como no caso dos quebra-mares. No entanto, o aplicativo não realiza predições acerca da morfologia final em planta (tômbolo ou saliência), que se desenvolverá a partir da difração sofrida pela onda junto à zona de sombra da estrutura de proteção. Por essa razão, uma alternativa interessante e que foi adotada neste estudo é a combinação da aplicação do *software* com o uso de relações empíricas, como as de Ahrens & Cox (1990) e Bosboom & Styve (2011).

O modelo foi aplicado às baías formadas pelo campo de quebra-mares da praia do Janga para estimar o seu estágio de equilíbrio, e sua aplicação permite concluir que as baías analisadas, em sua maior parte, ainda não alcançaram seu equilíbrio estático, indicando que o processo erosivo no centro das baías deverá permanecer até que esse processo alcance o limite projetado pelo Mepbay. O sedimento oriundo da erosão no centro da baía possivelmente migrará para as extremidades, complementando a configuração projetada pelo *software*. No caso das baías instáveis, é necessário que haja suprimento sedimentar superior à retirada, para que a praia alcance a conformação prevista.

A ferramenta permite a aplicação da equação parabólica para prever a curvatura de praias de enseada como resposta da linha de costa à existência de dois pontos de controle decorrentes da presença de obras costeiras como quebra-mares. Outro fato importante a ser destacado é a possibilidade de uma análise consistente dos efeitos promovidos por modificação da configuração em planta da baía mediante alteração da localização dos pontos de difração das ondas. Tais aplicações permitem concluir que o Mepbay é potencialmente útil para estudos rápidos voltados ao manejo da linha de costa.

Referências bibliográficas

- Ahrens, J.P.; Cox, J. (1990) - Design and Performance of Reef Breakwaters. *Journal of Coastal Research* (ISSN 0749-0208) SI7:61-75, Fort Lauderdale, FL, U.S.A. Article Stable URL: <http://www.jstor.org/stable/25735389>.
- Benedet, L.; Klein, A.H.F.; Hsu, J.R.C. (2005) - Practical insights and applicability of empirical bay shape equations. *Coastal Engineering* 2004, 2:2181-2193. DOI: 10.1142/9789812701916_0175.
- Bosboom, J.; Stive, M.J. (2011) - *Coastal Dynamics I, Lecture notes - version 0.4 2013*. 573p., Delft Academic Press, Delft, Netherlands. ISBN: 978-9065622860.
- Costa, J.E.R. (2002) - *Morfodinâmica praial do município de Paulista-PE*. 40p., Monografia de Especialização em Oceanografia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, Brasil. Não publicado.
- CPRH/GERCO-PE (2001) - *Obras de Proteção do Litoral de Paulista: Histórico do Processo*. 150p. Relatório técnico, Volume único, Agência Estadual de Recursos Hídricos(CPRH) / Gerenciamento Costeiro Recife(GERCO), Recife, PE, Brasil. Não publicado.
- FINEP/UFPE (2009) - *Monitoramento Ambiental Integrado/Pernambuco – MAI/PE*. 485p., Relatório Final, 3 Volumes, Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) / Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife, PE, Brasil. Não publicado.
- Hsu, J.R.C.; Benedet, L.; Klein, A.H.F.; Raabe, A.L.A.; Tsai, C.P.; HSU, T.W. (2008) - Appreciation of Static Bay Beach Concept for Coastal Management and Protection. *Journal of Coastal Research*, 24(1):198-215. DOI: 10.2112/05-0579.1.
- Hsu, J.R.C.; Evans, C. (1989) - Parabolic bay shapes and applications. *ICE Proceedings*, 87(4):557-570. DOI: 10.1680/jicep.1989.3778.
- Hsu, J.R.C.; Uda, T.; Silvester, R. (2000) - Shoreline protection methods—Japanese experience. In: J.B. Herbich (ed.), *Handbook of Coastal Engineering*, pp. 9.1-9.77, McGraw-Hill, Nova York, NY, U.S.A. ISBN: 978-0071344029.
- Imambaks, R.; Anijs, M.; Kibrit, B.; Sedaghat, A.; Mungar, S. (2011) - *Recife: Coastal Protection Plan*. 275p. Relatório Técnico, volume 1 e appendix. Delft University of Technology (DUT), Delft, Zuid-Holland, Netherlands. Report Stable URL: <http://repository.tudelft.nl/view/ir/uuid%3A70277a41-5591-4c98-9633-06542a0a2ac1/>.
- Klein, A.H.F.; Vargas, A.; Raabe, A.L.A.; Hsu, J.R.C. (2003) - Visual assessment of bayed beach stability with computer software. *Computer & Geosciences*, 29(10):1249 -1257. DOI: 10.1016/j.cageo.2003.08.002.
- Marinho, J.S. (2012) - *Avaliação dos efeitos da presença dos quebra-mares sob a linha de costa da praia do Janga - Pernambuco - Brasil*. 46p., Trabalho de conclusão de curso, Faculdade Maurício de Nassau, Recife, Pernambuco, Brasil. Não publicado.
- Neves, F.N.; MUEHE, D. (1995) - Potential impacts of sea level-rise on the Metropolitan Region of Recife, Brazil. *Journal of Coastal Research* (ISSN: 0749-0208) SI14: 116-131, Fort Lauderdale, FL, U.S.A. Article Stable URL: <http://www.jstor.org/stable/25735704>.
- Raabe, A.L.A.; Klein, A.H.F.; González, M.; Medina, R. (2010) - MEPBAY & SMC: Software tools to support different operational levels of headland bay beach coastal engineering projects. *Coastal Engineering*, 57(2):213-226. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2009.10.008.
- Schiaffino, C.F.; Brignone, B.; Ferrari, M. (2012) - Application of the parabolic bay shape equation to sand and gravel beaches

- on Mediterranean coasts. *Coastal Engineering*, 59(1):57–63. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2011.07.007.
- Silveira, L.F.; Klein, A.F.; Tessler, M.G. (2010) - Headland-bay beach planform stability of Santa Catarina state and of the northern coast of São Paulo state. *Brazilian Journal of Oceanography*, 58(2):101-122. DOI: 10.1590/s1679-87592010000200003.
- Silvester, R.; Hsu, J. R.C. (1993) - *Coastal stabilization: Innovative concepts*. 578p., Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, U.S.A. ISBN: 0131403109.
- Silvester, R.; Hsu, J. R.C. (1997) - *Coastal Stabilization - Advanced Series on Ocean Engineering vol.14*. 578 p., World Scientific, Singapore. ISBN: 9810231377.