





Avaliação de Subsidência Planície Deltaica do Rio São Francisco a partir dos Vértices de Referência de Nível da Rede Altimétrica Brasileira

Evaluation of the Deltaic Plain Subsidence of the São Francisco River from the Brazilian Altimetric Network Level Reference Vertices

Elmo Leonardo Xavier Tanajura¹ , Admilson da Penha Pacheco² ,
José Maria Landim Dominguez³ , Junia Kacenenbogen Guimarães⁴ 

¹Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Recife, PE, Brasil

²Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Cartográfica, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Recife, PE, Brasil

³Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Sedimentologia, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Recife, PE, Brasil

⁴Universidade Federal da Bahia, Departamento de Geografia, Salvador, BA, Brasil

E-mails: elmo.tanajura@ufba.br; pacheco3p@gmail.com; landim@ufba.br; jkg@ufba.br

Autor Correspondente: Elmo Leonardo Xavier Tanajura; elmo.tanajura@ufba.br

Resumo

Os deltas são relevantes para a vida e o desenvolvimento econômico, social e ambiental de um país. Os deltas dos rios estão entre os ambientes mais vulneráveis à subsidência de terras. Processos de subsidência são caracterizados pelo movimento de uma porção da superfície da Terra, provocando um afundamento súbito ou recalque gradual do terreno. Os ambientes sedimentares deposicionais, como é o caso dos sistemas deltaicos, são propensos à subsidência devido à compactação de sedimentos. O delta do Rio São Francisco é uma planície arenosa do Quaternário construída em um baixo estrutural do Rio São Francisco na Bacia de Sergipe-Alagoas. A parte norte desta planície é composta por regiões constantemente inundadas. Trabalhos anteriores indicaram a existência de subsidência nesta região. Diversos estudos de subsidência de deltas têm sido realizados nas últimas décadas a partir da utilização de métodos geodésicos clássicos e tecnologias geoespaciais modernas. Este trabalho tem como objetivo avaliar a subsidência da planície deltaica do Rio São Francisco a partir dos vértices de referência de nível da Rede Altimétrica Brasileira. A subsidência de alguns trechos da superfície é apontada pelo decréscimo das altitudes dos vértices, onde detectou-se um rebaixamento nas imediações da sede do município de Piaçabuçu-AL. As constatações de rebaixamentos embasaram o projeto de uma Rede Geodésica para Monitoramento da Subsidência composta por 26 vértices geodésicos já materializados na planície deltaica. O rebaixamento pôde ser quantificado pelo desnível total no trecho 04-11 em AL-01 (-2,914 m) e o desnível total no trecho 20-11, em AL-02 (-5,433 m). Os resultados deste estudo servirão de referência para campanhas futuras de rastreamento GNSS (*Global Navigation Satellite System*) e composição de um banco de dados de coordenadas geodésicas tridimensionais para monitoramento da subsidência no delta do São Francisco.

Palavras-chave: Ambientes sedimentares; Movimento vertical; Monitoramento

Abstract

Deltas are relevant to the life and economic, social and environmental development of a country. River deltas are among the environments most vulnerable to land subsidence. Subsidence processes are characterized by the movement of a portion of the Earth's surface, causing a sudden sinking or gradual settlement of the ground. Depositional sedimentary environments, such as deltaic systems, are prone to subsidence due to sediment compaction. The delta of the São Francisco River is a Quaternary sandy plain built on a structural low of the São Francisco River in the Sergipe-Alagoas Basin. The northern part of this plain is made up of regions that are constantly flooded. Previous work has indicated the existence of subsidence in this region. Several delta subsidence studies have been carried out in recent decades using classical geodetic methods and modern geospatial technologies. This work aims to evaluate the subsidence of the deltaic plain of the São Francisco River from the level reference vertices of the Brazilian Altimetric Network. The subsidence of

some stretches of the surface is indicated by the decrease in the heights of the vertices, where a lowering was detected in the vicinity of the seat of the municipality of Piaçabuçu-AL. The downgrade findings were the basis for the design of a Geodetic Network for Subsidence Monitoring composed of 26 geodetic vertices already materialized in the deltaic plain. The lowering could be quantified by the total unevenness in stretch 04-11 in AL-01 (-2.914 m) and the total unevenness in stretch 20-11, in AL-02 (-5.433 m). The results of this study will serve as a reference for future GNSS (Global Navigation Satellite System) tracking campaigns and composition of a three-dimensional geodetic coordinate database for subsidence monitoring in the San Francisco Delta.

Keywords: Sedimentary environments; Vertical movement; Monitoring

1 Introdução

A complexidade do fenômeno da subsidência gerou nas últimas décadas diferentes discussões de abordagens de estudos e esforços cooperativos entre diferentes disciplinas (geodésia, geologia, geofísica, mecânica dos solos, hidrologia e meteorologia), envolvendo as fases de coleta, análise e modelagem de dados (Daito et al. 2015; Johnson et al. 1986). A busca por estratégias metodológicas, capaz de integrar análise e modelagem entre diferentes campos científicos e identificar os principais processos, que atuam em escala local a regional, é um alvo prioritário para a estimativa de subsidência de terras (Vitagliano et al. 2020).

Deltas são definidos como uma protuberância da linha de costa causada pela inserção de um sistema fluvial em um ambiente de mais baixa energia, em um contexto onde o suprimento sedimentar é maior do que a capacidade dos agentes da bacia receptora (ondas, correntes, marés) de redistribuí-los (Bhattacharya & Giosan 2003; Bittencourt et al. 2007).

Os ambientes sedimentares deposicionais, como é o caso dos deltas, são propensos à subsidência devido à compactação de sedimentos (Yuill et al. 2009). De acordo com Vitagliano et al. (2020), no caso dos deltas, os processos dependentes do clima são as principais fontes a serem consideradas. Tais fontes são agrupadas em processos dependentes de massa e pressão de água. O primeiro grupo é associado à resposta elástica da superfície da Terra à mudança da massa de água (chuva, rio e água do mar), enquanto o último está relacionado à compactação elástica e expansão do fino de grão fino camadas dentro do aquífero, causadas por mudanças na pressão dos poros (fluxo de água subterrânea) (Vitagliano et al. 2020).

A compactação de sedimentos é, frequentemente, citada como o processo de subsidência contemporâneo dominante em regiões deltaicas. Sua importância, tanto em deltas quanto em estuários, tem sido destacada por uma série de estudos (Horton & Shennan 2009; Meckel et al. 2006; Törnqvist et al. 2008). Yuill et al. (2009), por exemplo, destacam seis parâmetros de controle relacionados com a subsidência: (a) tectônica; b) compactação de sedimentos

holocênicos; (c) carregamento de sedimentos; (d) ajuste isostático glacial; (e) retirada de fluido (f) drenagem e gestão de águas superficiais.

De acordo com O'Leary et al. (2020), a relação entre subsidência, compactação, sedimentação, nível do mar, salinidade, vegetação, erosão e perda de terra apresenta-se complexa. A complexidade associada à subsidência decorre do fato que esses processos não são independentes uns dos outros e frequentemente exercem mecanismos de feedback, o que torna difícil a identificação de mecanismos causais (O'Leary et al. 2020).

O delta do rio São Francisco é uma planície arenosa quaternária construída sobre um baixo (Santos et al. 2019; Souza-Lima 2006). O delta do rio São Francisco é classificado como um delta dominado por ondas (Bhattacharya 2006; Bhattacharya & Giosan, 2003).

O limite interno do delta do rio São Francisco é definido por falésias retilíneas entre a planície do delta e a Formação Barreiras, que coincidem com importantes falhas que delimitam o Baixo São Francisco: na plataforma continental, a clinoforma deltaica desenvolveu-se sobre um baixo topográfico limitado por escarpas retilíneas que apresentam orientação compatível com o arcabouço estrutural de Sergipe-Alagoas (Santos et al. 2019).

A existência de regiões constantemente inundadas na parte norte da planície deltaica do Rio São Francisco sugere a existência de subsidência nesta região. Lima et al. (2014) realizaram um estudo no delta do São Francisco que teve como objetivo principal o processo de reativação de falhas no Quaternário, considerado como o principal agente controlador da deposição de sedimentos e da morfologia do delta. Este controle se daria a partir da geração de espaço adicional para acomodação de sedimentos (Lima et al. 2014).

Os estudos de estratigrafia e geofísica da porção mais superior da bacia sedimentar Sergipe/Alagoas foram conduzidos por Medeiros et al. (2007).

Guimarães (2010) conduziu investigações com dados oriundos de 15 furos de sondagem SPT (*Standard Penetration Test*), distribuídos na planície deltaica do Rio São Francisco, com profundidades de até 40 m. A cada 66 cm, o amostrador era trazido à superfície e as amostras eram descritas, fotografadas e coletadas. Dezesesseis amostras

de matéria orgânica e conchas foram datadas pelo método 14C-AMS (*Accelerator Mass Spectrometry*). Baseado nas informações estratigráficas juntamente com as datações realizadas, o autor constatou uma grande disparidade entre as altitudes de amostras com a mesma idade, o que pode ser um forte indicativo de que processos de subsidência estão ocorrendo na região. Ainda segundo Guimarães (2010), dois tipos de subsidência podem estar ocorrendo delta do São Francisco: uma subsidência provocada pela compactação de sedimentos, e a outra crustal, associada a processos isostáticos e gláciohidro-isostáticos.

O monitoramento de subsidência tem sido realizado nas últimas décadas por nivelamento geométrico (Stein 1981), Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS), (Cenni et al. 2013) e Interferometria de Abertura Sintética Radar (InSAR) (Fiaschi et al 2018).

Historicamente, o nivelamento preciso repetido por décadas tem sido a principal fonte de dados para o monitoramento de subsidência de terras em áreas planas e deltaicas (Cenni et al. 2021). No entanto, o alto os custos e os tempos de execução muito longos dessa técnica limitam sua aplicação nas atividades de monitoramento atuais, apesar da alta precisão alcançável, da ordem de 2 mm/km (Stein 1981).

A evolução e proliferação das técnicas geodésica de posicionamento espacial contínuo, geraram benefícios de precisão, simplicidade operacional, rapidez e baixo custo em estudos subsidência de solos e monitoramentos costeiros. Em particular, o GNSS (*Global Navigation Satellite System*), que inclui o GPS (*Global Positioning System*), fornece posicionamento geoespacial com cobertura global, então usada para derivar deslocamentos locais ao longo do tempo (Vitagliano et al. 2020). Isto decorre basicamente devido às recentes melhorias nos instrumentos e metodologias GNSS, que permitem posicionamento de alta precisão, disponibilidade 24 horas e processamento semiautomático de dados (Barzaghi et al. 2018). O posicionamento por GNSS permite a obtenção de coordenadas de forma pontual ou próximo a superfície da Terra, em relação a um arcabouço geocêntrico pré-estabelecido (Hofmann-Wellenhof et al. 2008).

A combinação e integração de observações InSAR e GNSS é potencialmente a melhor abordagem a ser adotada para monitorar a distribuição espacial e a variabilidade temporal da subsidência da terra em áreas deltaicas (Corbau et al. 2019). Os dados e informações fornecidos por ambos os métodos são necessários para proteger deltas de rios e comunidades baixas contra os riscos relacionado ao aumento da propagação de subsidência de terra (Vitagliano et al. 2020).

A utilização dos Sistemas Geodésicos de Referência (SGR) são imprescindíveis à elaboração de estudos georeferenciados de aplicações geológicas e/ou geofísicas.

O Sistema Geodésico Brasileiro é definido como “o conjunto de pontos geodésicos implantados na porção da superfície terrestre delimitada pelas fronteiras do país. Em outras palavras é o sistema ao qual estão referidas todas as informações espaciais no Brasil” (IBGE 1983). A rede altimétrica é um conjunto de estações geodésicas, denominadas referências de nível, que materializam a componente altimétrica do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) por meio de medições de nivelamento geométrico de alta precisão (IBGE 2016b). O Datum Altimétrico ou vertical, associado a uma rede altimétrica, é definido por Blitzkow et al. (2011) como sendo a superfície de referência usada para definir as altitudes de pontos da superfície terrestre. Sendo, portanto, a Superfície de referência para as altitudes do tipo Ortométrica ou Elipsoidal (IBGE 2016b).

A componente vertical do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), isto é, o sistema de referência para medição de altitudes no território nacional, é realizado através de sua Rede Altimétrica de Alta Precisão, comumente denominada RAAP: (a) RAAP é formada pelas estações geodésicas altimétricas tradicionalmente denominadas Referências de Nível (RRNN), implantadas ao longo da malha viária por todo o território nacional; (b) os desníveis entre RRNN sucessivas são observados por meio do chamado nivelamento geométrico de alta precisão, permitindo que as altitudes de cada RN sejam obtidas com incerteza da ordem de poucos milímetros em relação às RRNN vizinhas (IBGE 2019).

O estabelecimento da Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP), sob coordenação inicial do então Conselho Nacional de Geografia (CNG), teve início em 1945, no extremo sul do Brasil (Alencar, 1990). A partir da década de 1970, a implantação da RAAP foi direcionada ao interior do país, à substituição das redes de outras instituições e à reconstituição dos trechos destruídos (IBGE 2019).

Em IBGE (2019), são apresentados a metodologia desenvolvida para uma completa revisão da rede de circuitos e incorporação da informação gravimétrica aos desníveis nivelados, bem como os resultados referentes ao reajustamento da RAAP em termos de seus números geopotenciais e a análise comparativa das novas altitudes normais em relação aos ajustamentos anteriores.

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo avaliar a subsidência da planície deltaica do Rio São Francisco a partir dos vértices de referência de nível da Rede Altimétrica Brasileira.

2 Materiais e Métodos

2.1 Área de Estudo

A área de estudo corresponde à planície deltaica associada à desembocadura do Rio São Francisco, situada na Bacia Sedimentar Sergipe-Alagoas. Esta bacia se apresenta na forma de um graben que se alinha na direção NE-SW, mergulhando para sudeste. A planície deltaica do Rio São Francisco é composta por depósitos quaternários (pleistocênicos e holocênicos), sendo delimitada por sedimentos clásticos terciários da Formação Barreiras, discordantes sobre as rochas mais antigas (Guimarães 2010; Neto et al. 2007). Os depósitos presentes nos limites noroeste possuem formato tabular com espessuras variando de 20 a 30 m, onde recobrem a borda da bacia e alcançam espessuras de 100 a 120 m nas proximidades do litoral (Dominguez & Araújo 2008; Guimarães 2010; Ponte 1969).

O Delta do Rio São Francisco é um dos mais proeminentes da costa brasileira, se estendendo por uma linha de costa de cerca de 75 km e abrangendo uma área de aproximadamente 800 km², Figura 1 (Dominguez 1996; Guimarães 2010; Ponte 1969).

2.2 Aspectos da Geologia Regional

O delta do Rio São Francisco é composto por depósitos sedimentares quaternários, limitados a noroeste por depósitos terciários da Formação Barreiras. Ambos os pacotes sedimentares se sobrepõem a depósitos sedimentares da Bacia Sergipe-Alagoas, que ocorre na parte emersa do continente e se prolonga pela parte submersa, onde se encontra a maior parte da bacia (Guimarães 2010; Lima et al. 2002; Neto et al. 2007).

A Bacia Sergipe-Alagoas (Figura 2) dispõe-se de forma alongada com orientação NE-SW, com cerca de 350 km de extensão e 37 km de largura média em terra, apresentado uma área total de aproximadamente 45.760 km², sendo 13.000 km² na porção continental. A parte submersa se estende por uma área de 32.760 km², até a cota batimétrica de 3.000 m. A norte, limita-se com a Bacia de Pernambuco-Paraíba, pelo Alto de Maragogi; a sul, o limite da porção emersa é constituído pela Plataforma de Estância e, no mar, pela Bacia de Jacuípe, através do sistema de falhas do Vaza-Barris (Agência Nacional do Petróleo 2015; Feijó 1994).

O embasamento da Sub-bacia de Sergipe é formado por rochas metamórficas proterozoicas de baixo grau dos grupos Miaba (quartzitos, metapelitos, metacarbonatos) e Vaza-Barris (metadiamicritos, metacarbonatos, metassiltitos

e filitos) (Moraes Rego 1933; Uhlein et al. 2011). Também ocorrem rochas metassedimentares do Grupo Estância (arenitos, conglomerados, carbonatos, siltitos) (Silva Filho et al. 1978; Silva Filho et al. 1979), possivelmente de idade cambriana, que foram depositados por sistemas alúvio-fluviais, deltaicos e de marés. O embasamento da Sub-bacia de Alagoas é constituído por rochas graníticas proterozoicas do maciço Pernambuco-Alagoas. O preenchimento sedimentar da Bacia de Sergipe-Alagoas constitui-se de vinte e três sequências deposicionais. Essas sequências são correlacionáveis aos estágios evolutivos que ocorreram nas bacias da margem leste brasileira e que culminaram com a formação do Atlântico Sul (Ponte & Asmus 1976): sinéclise, pré-rifte, rifte e margem passiva (drifte).

Sobre o embasamento pré-cambriano, foram depositadas em condições intracratônicas, uma seqüência carbonífera representada pela Formação Batinga (ex. conglomerados, arenitos imaturos, siltito listrado) e, posteriormente, uma seqüência Permiana, que corresponde à Formação Aracaré (ex. arenito médio avermelhado, folhelho e calcário). Essas sequências representam o registro sedimentar de sinéclises paleozóicas que cobriam extensas áreas do super continente Gondwana (Neto et al. 2007; Schaller 1969).

2.3 Feições Geológico-Geomorfológicas da Planície Deltaica

Os depósitos presentes nos limites noroeste da planície deltaica, possuem formato tabular com espessuras variando de 20 a 30 m, onde recobrem a borda da bacia e alcançam espessuras de 100 a 120 m nas proximidades do litoral (Figura 3). As espessuras são também controladas por altos e baixos estruturais (Guimarães 2010; Ponte 1969). As rochas caracterizam-se por serem exclusivamente terrígenas, sendo formadas por arenito e conglomerado com matriz argilosa. Compreendem depósitos de origem continental, originários de um sistema de leques aluviais coalescentes (Ministério das Minas e Energia 1983). Há, no entanto, trabalhos mais recentes que atestam uma origem marinha (Dominguez & Araújo 2008).

A evolução quaternária da planície deltaica do Rio São Francisco foi fortemente controlada por sucessivas variações relativas do nível do mar durante este período, conforme demonstrado em diversos estudos (Barbosa 1985; Barbosa et al. 1986; Bittencourt et al. 1982, 1983; Dominguez & Barbosa 1994; Leão & Dominguez 2000; Martin et al. 1979; Villwock et al. 1986).

Os depósitos do quaternário que formam a planície deltaica compreendem ambientes definidos por (Figura 3):

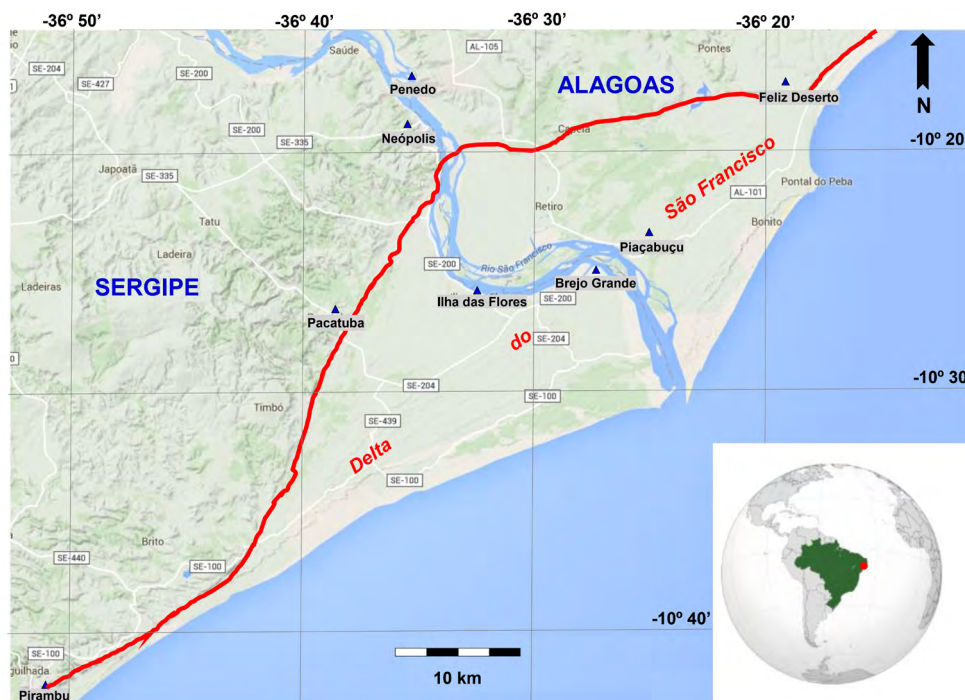


Figura 1 Mapa de localização da área de estudo (Adaptado de *Piaçabuçu* 2016).

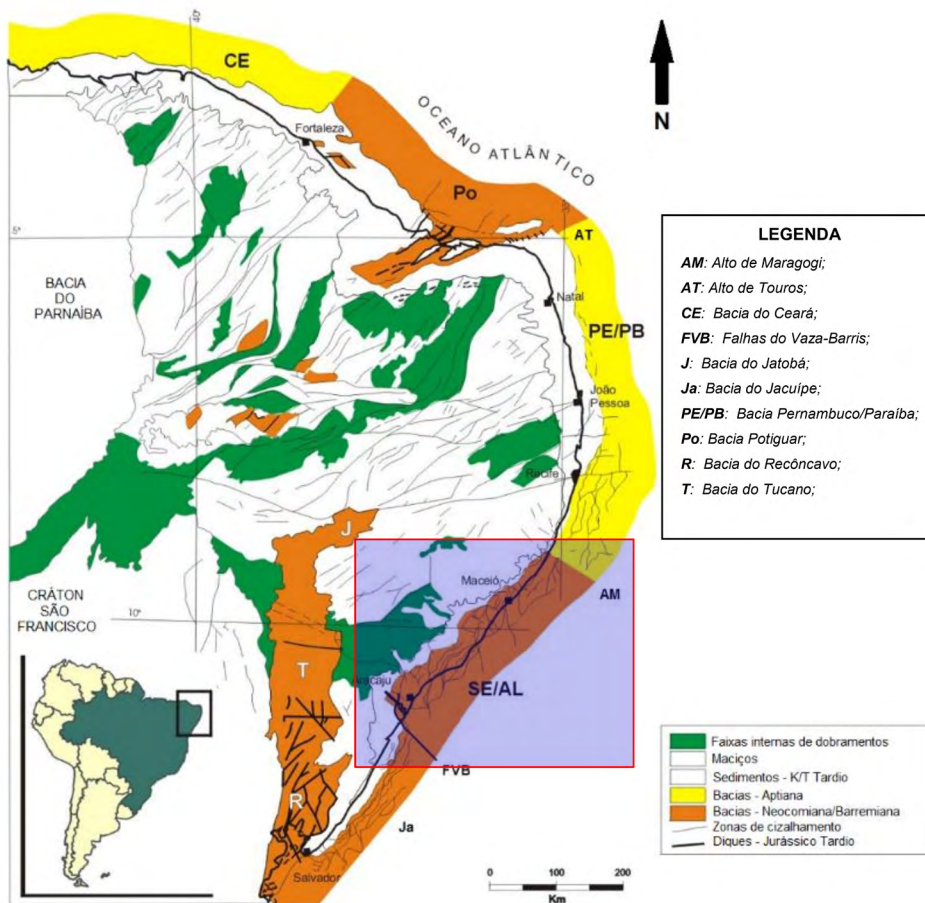


Figura 2 Bacias sedimentares do nordeste brasileiro. No detalhe, a Bacia de Sergipe-Alagoas. Adaptado de Matos 1999.

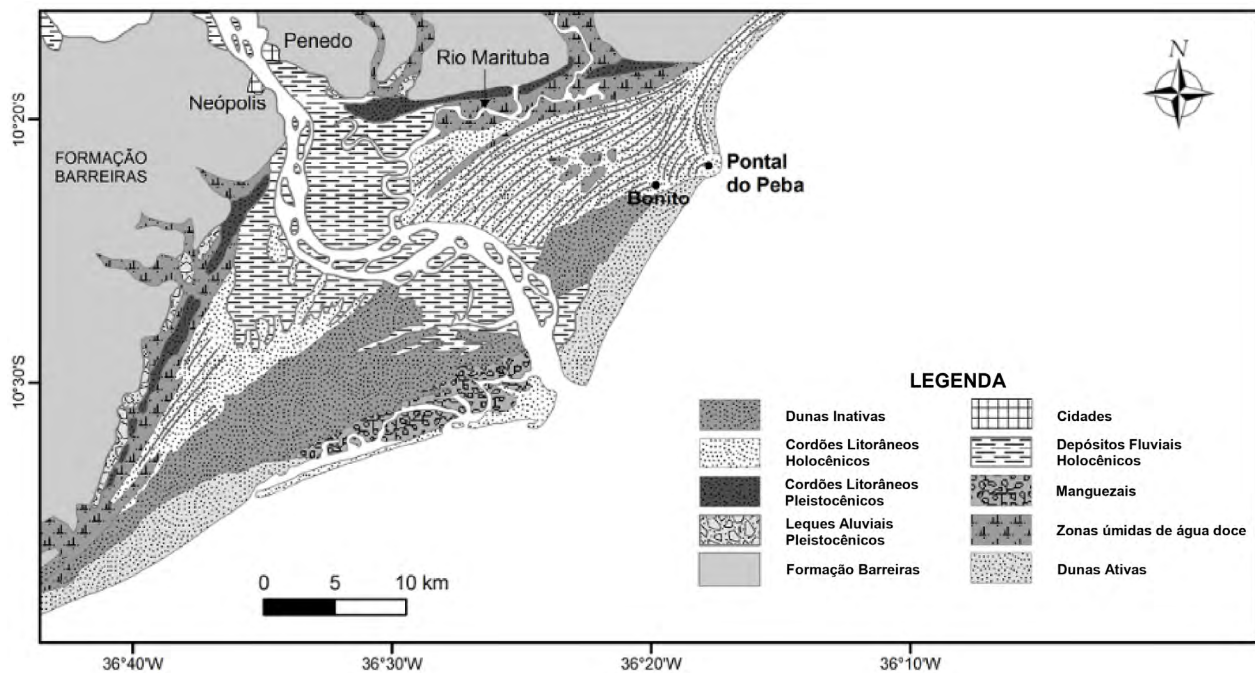


Figura 3 Principais feições geológico-geomorfológicas da planície deltaica do Rio São Francisco. Modificado de Guimarães 2010.

a) Leques Aluviais Pleistocênicos: adjacente às falésias que separam o delta dos depósitos da Formação Barreiras, no sopé das feições, depositaram-se leques aluviais coalescentes de idade pleistocênica, com altitudes variando de 10 a 20 m. Na porção sul do delta, onde são bem desenvolvidos, apresentam-se praticamente contínuos, enquanto que na porção norte restringem-se apenas a ocorrências pequenas e isoladas dentro de um pequeno vale escavado na Formação Barreiras. Esses depósitos mal consolidados contêm sedimentos predominantemente arenosos e mal selecionados, constituídos de grãos de cores variadas, finos a grosseiros e, localmente, contendo argila e grandes quantidades de seixos (Bittencourt et al. 1982; Dominguez 1996; Guimarães 2010).

b) Cordões Litorâneos Pleistocênicos: ocupando a porção mais interna da planície deltaica e dispostos numa faixa de altitude que varia entre 7 e 10 m, essas feições possuem, provavelmente, idade de 123.000 anos AP. São estabelecidos na forma de terraços compostos por sedimentos esbranquiçados, arenosos, com grãos finos a grosseiros, apresentando, localmente, diversos níveis de seixos intercalados ao longo de toda a sequência vertical. Os terraços são interrompidos, localmente, por pequenos cursos de água, e sua origem marinha é atestada ao se observar o padrão de antigas cristas dos cordões litorâneos paralelos e separados por largas zonas intercordões alagadas (Barbosa & Dominguez 2004; Bittencourt et al. 1982; Martin et al. 1982).

c) Cordões Litorâneos Holocênicos: com altitudes entre 3 e 7 m acima do nível do mar atual, essas feições possuem idade de cerca de 5.100 anos AP. Os depósitos são caracterizados por sedimentos arenosos, com granulometria fina a média, apresentando coloração normalmente castanha e um acamamento plano-paralelo mergulhando ligeiramente em direção ao mar. Assemelham-se com os terraços marinhos pleistocênicos. No entanto, as cristas de cordões litorâneos, diferentemente dos pleistocênicos, são bem marcadas, além de serem próximas e paralelas entre si. A progressiva diminuição na altitude desses cordões, da parte mais interna para a mais externa da planície deltaica, é uma forte evidência da regressão que sucedeu a última transgressão, durante o holoceno (Barbosa & Dominguez 2004; Bittencourt et al. 1982).

d) Zonas Úmidas de Água Doce: durante a máxima transgressão, há cerca 5.200 anos AP, o mar atingiu as proximidades das falésias das zonas baixas dos terraços, formando lagunas em ambos os lados do delta. Com a regressão que se seguiu, começou a ser formada uma segunda geração de cordões litorâneos arenosos, mais baixos que os anteriores. As lagunas formadas começaram a desaparecer progressivamente, evoluindo para os pântanos atuais (Bittencourt et al. 1982). Os depósitos típicos dessas zonas são formados por lamas de origem orgânica, uma espécie de turfa constituída de restos vegetais semidecompostos, de coloração variando de marrom a preta, intercalada com lentes de argila e silte (Braz Filho 1980). Essa lama preenche

as áreas mais baixas, separando os terraços dos cordões litorâneos pleistocênicos dos holocênicos. Atualmente, encontram-se abrangidas por zonas úmidas de água doce. Datações de radiocarbono destes depósitos apontam uma idade de 5730 ± 200 anos BP (Barbosa 1985; Barbosa et al. 1986).

e) Depósitos Fluviais Holocênicos: são os depósitos de planície de inundação que são encontrados nas zonas baixas e planas que margeiam o Rio São Francisco na parte central do delta. Ocupam vales escavados por pequenos cursos de água na Formação Barreiras, e são compostos de materiais predominantemente síltico-argilosos, ricos em matéria orgânica (Bittencourt et al. 1982).

f) Manguezais: os depósitos de mangue estão praticamente restritos no setor sudeste da desembocadura do Rio São Francisco. Seu processo de formação está associado à remobilização, pela deriva litorânea, de barras de desembocadura no sentido de sotamar. Esta remobilização origina pontais arenosos e na retaguarda dos mesmos se formam áreas protegidas, onde se desenvolvem os manguezais (Bittencourt et al. 1982).

g) Dunas: as dunas da planície deltaica do São Francisco encontram-se dispostas ao longo da parte externa do delta, abrangendo quase a totalidade de sua extensão. Duas gerações de dunas são identificadas na planície, sendo uma delas mais interna composta de dunas inativas já fixadas pela vegetação. A segunda geração, mais próxima do mar, compreende dunas ativas. As dunas mais antigas (inativas) são posteriores à formação dos terraços marinhos holocênicos. Têm altitudes equivalentes, variando entre 20 e 30 m, sendo que seus sedimentos constituem areia fina a muito fina, cinza-amareladas (Bittencourt et al. 1982). Segundo Barbosa & Dominguez (2004), no campo de dunas mais recente (ativas), três províncias morfológicas são reconhecidas: (i) lençóis de areia (*sand-sheets*); (ii) dunas isoladas e interdunas; e (iii) dunas compostas.

2.4 A Rede Altimétrica do Sistema Geodésico Brasileiro

O Sistema Geodésico Brasileiro é definido como “o conjunto de pontos geodésicos implantados na porção da superfície terrestre delimitada pelas fronteiras do país. Em outras palavras é o sistema ao qual estão referidas todas as informações espaciais no Brasil” (IBGE 1983). A rede altimétrica é um conjunto de estações geodésicas, denominadas referências de nível, que materializam a componente altimétrica do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) por meio de medições de nivelamento geométrico de alta precisão. O Datum Altimétrico ou vertical, associado a uma rede altimétrica, é definido por Blitzkow et al.,

(2011) como sendo a superfície de referência usada para definir as altitudes de pontos da superfície terrestre. Sendo, portanto, a Superfície de referência para as altitudes do tipo Ortométrica ou Elipsoidal (IBGE 2016b).

Um *datum* vertical requer uma origem unidimensional com escala obtida geralmente a partir do registro de observações de nível numa determinada localidade. Sua materialização é definida num ponto na superfície da Terra em que a altura é um valor definido (por exemplo, altura zero numa estação maregráfica). Essa origem é obviamente acessível e atende aos requisitos para a definição de um *datum*. A partir deste ponto de origem, diferenças de altura podem ser medidas para qualquer outro ponto usando procedimentos de nivelamento padrão. Cada *datum* vertical, sendo assim definido em relação a uma origem arbitrária, não está vinculado a uma origem global, acordado internacionalmente. Este último, de fato, ainda não existe (Jekeli 2016).

Segundo Rapp (1991), uma superfície fundamental da geodésia gravimétrica e de alta importância para os sistemas de referência vertical é o geóide. Definido como uma superfície equipotencial específica do campo de gravidade, pode ser localizado em relação a um elipsoide de referência através de ondulações do geoidais. Essas ondulações podem ser determinadas a partir do conhecimento do campo de gravidade terrestre.

Cabe ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) a missão de estabelecer e gerenciar o Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), que é materializado por pontos com coordenadas geodésicas no território nacional. Como gestor do SGB, o IBGE tem a responsabilidade pela qualidade das informações altimétricas, planimétricas e gravimétricas associadas a estes pontos e utilizadas para realização do mapeamento brasileiro, obras de engenharia diversas, planejamento e gestão municipal, estadual e federal, estudos científicos, entre outros. A componente vertical do SGB, isto é, o sistema de referência para medição de altitudes no território nacional, é realizado através de sua Rede Altimétrica de Alta Precisão, comumente denominada RAAP (IBGE 2019a).

Os elementos principais de um Sistema Geodésico de Referência Vertical (SGRV) são as componentes verticais, isto é, as altitudes físicas ou números geopotenciais das estações da rede de referência, e a superfície de referência, ou nível de referência, a partir do qual são estabelecidas as coordenadas verticais (Ihde et al. 2017). Tradicionalmente, a definição e realização dos SGRVs continentais e nacionais baseava-se na adoção do nível médio do mar (NMM) como *datum* vertical, considerado uma aproximação adequada do geóide, e na utilização exclusiva do nivelamento geométrico de alta precisão, com a correção da gravidade normal

(teórica), para propagação desse *datum* em toda a região de interesse. Assim foi estabelecida a componente vertical do Sistema Geodésico Brasileiro.

A rede é materializada pelas estações geodésicas altimétricas tradicionalmente denominadas Referências de Nível (RRNN), implantadas ao longo da porção continental do território nacional (Figura 4).

Os desníveis entre RRNN sucessivas são observados por meio do chamado nivelamento geométrico de alta

precisão, permitindo que as altitudes de cada RN sejam obtidas com incerteza da ordem de milímetros em relação às RRNN vizinhas.

O IBGE disponibiliza no seu Banco de Dados Geodésicos (BDG) as monografias dos marcos geodésicos, com informações de localização, situação de conservação, foto, coordenadas, datas de levantamento, cálculo e visita, entre outras. Estas informações são essenciais para adequada utilização por parte dos usuários do SGB.

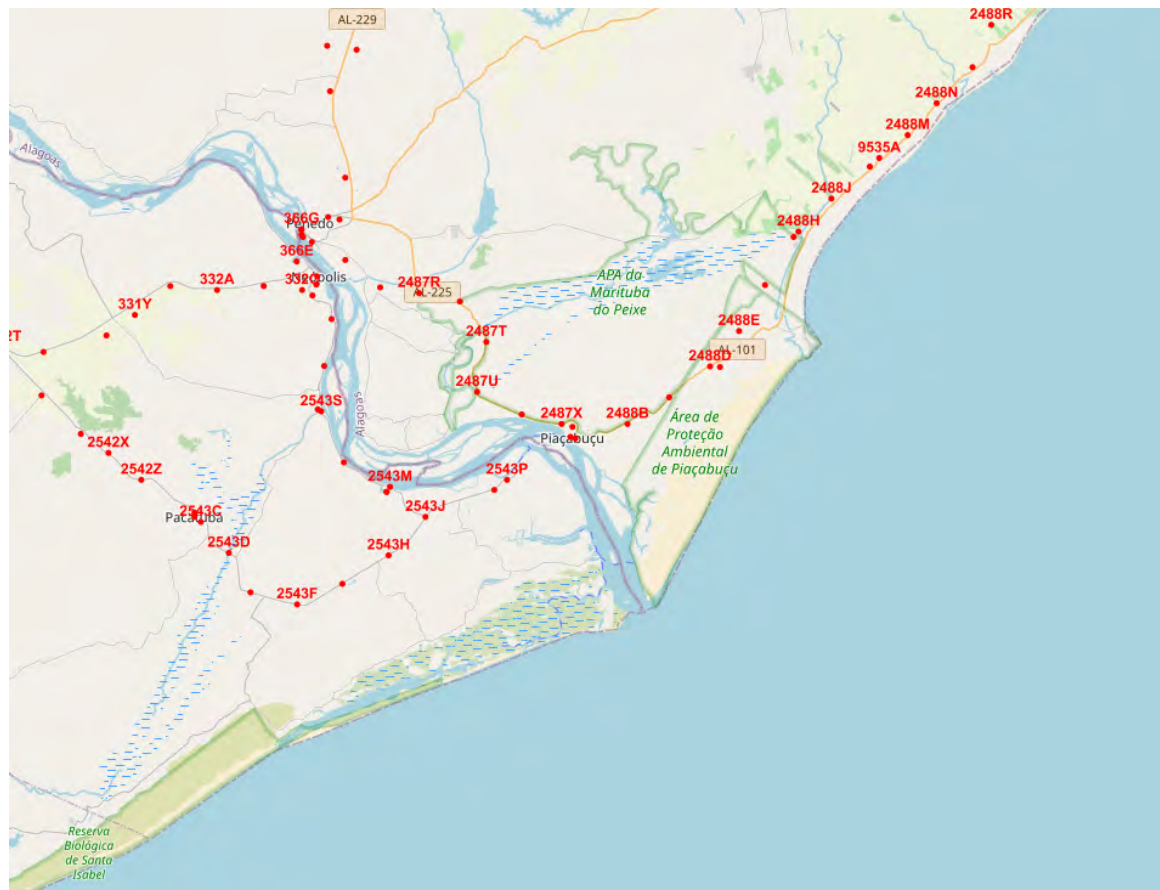


Figura 4 Vértices da Rede Altimétrica do SGB na Planície Deltaica. Adaptado de IBGE 2019b.

3 Resultados e Discussão

3.1 Avaliação das Altitudes das RRNN

A planície deltaica do Rio São Francisco é formada por sedimentos depositados em vários estágios do quaternário. As flutuações do nível relativo do mar, associadas a variações climáticas nesse período, desempenharam um papel fundamental para estabelecer a configuração atual

dessa planície. Essas variações eustáticas contribuíram, entre outros aspectos, para a formação dos terraços marinhos que são os depósitos mais abundantes. Esses terraços definem os principais elementos geomorfológicos da feição deltaica. As análises a seguir foram realizadas na porção norte da planície (Estado de Alagoas), através de perfis altimétricos oriundos de dois circuitos da rede vertical do SGB: Circuito AL-1 (NW-SE), compreendendo 11 RRNN (Referências de Níveis); Circuito AL-2 (NE-SW), compreendendo 13 RRNN conforme apresentado na Figura 5:

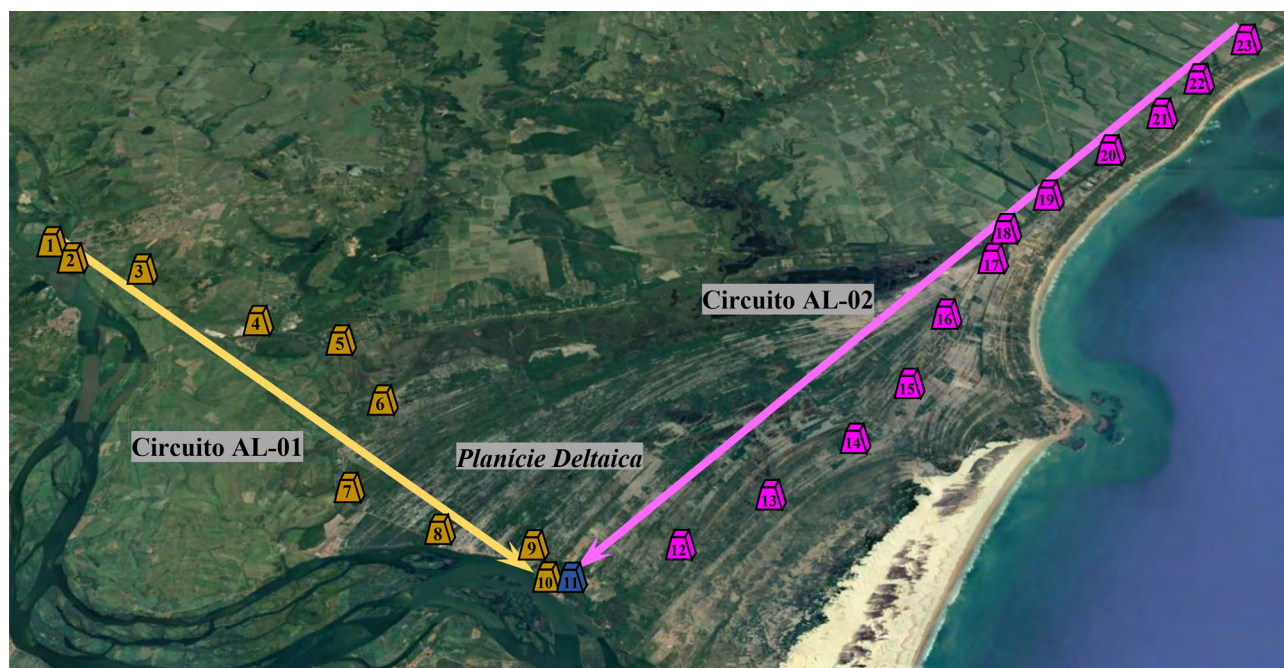


Figura 5 Localizações dos vértices de RN. Adaptado de *Piaçabuçu* 2019.

Os circuitos AL-01 e AL-02 acompanham as rodovias Engenheiro Joaquim Gonçalves (Trecho Penedo-Piaçabuçu) e AL-101 (Trecho Piaçabuçu-Coruripe). As respectivas monografias de todos os vértices que compõem os circuitos indicam que os monumentos estavam em boas condições na ocasião da última visita do IBGE.

A Tabela 1 apresenta o detalhamento dos circuitos com as RRNN ordenadas no sentido das avaliações.

Os vértices 1, 2 e 3 estão localizados fora da planície. Os vértices 6, 12, 14, 15, 16 e 20 foram implantados em marcos sobre o terreno natural. Os vértices, 4, 5, 8, 9, 19 e 22, por sua vez, foram implantados em bueiros ao longo da rodovia, estando assim um pouco mais altos que o terreno natural. Na base da igreja da soleira de uma igreja, foram implantados os vértices 7, 10, 13, estando assim, um pouco mais alto que o terreno natural. Os vértices 11, 17, 18 localizam-se em área urbana. O vértice 21 num terreno urbanizado e por último, o vértice 23, localizado na base de uma coluna, estando assim um pouco mais alto que o terreno natural.

A confluência dos dois circuitos acontece na RN 2488A, localizada na sede do município de Piaçabuçu. A Figura 6 apresenta as altitudes dos vértices de RN em sequência para os dois circuitos integrados.

As RRNN 2487L, 2487M, 2487N possuem suas altitudes discrepantes das outras, por se encontrarem fora da planície deltaica. As demais têm valores na mesma ordem de grandeza, variando 2,917m a 9,339 m.

Dois aspectos importantes podem ser verificados nas altitudes do conjunto dos 20 vértices dos circuitos presentes na planície deltaica. O primeiro aspecto relaciona duas características pontuais dentro dos circuitos que são 2 vértices com altitudes que não acompanham a tendência dos vizinhos, são eles: 2487S e 2488C. O vértice 2487S com um desnível médio de 3,638 m em relação aos seus vizinhos, encontra-se instalado num bueiro nas proximidades do leito do Rio Marituba, o que sugere, ser este o motivo do rebaixamento do terreno nessa localidade. A situação do vértice 2488C é oposta à do vértice anterior, pois ele possui um desnível médio de -1,525 m em relação aos seus vizinhos.

Esse vértice está situado na base da soleira de uma igreja na localidade dos Dendezeiros. A princípio, não foi constatado nenhum fator preponderante que justificasse tal aspecto. No entanto, é provável que naquelas imediações, o terreno tenha apresentado certa resistência ao rebaixamento.

O segundo aspecto avaliado é referente à presença de 3 gradientes negativos dos valores de altitude existentes nos circuitos. O primeiro gradiente sugere um rebaixamento no terreno indicado pelo decréscimo das altitudes desde a RN 2488L (9,386 m) até a RN 2488D (5,551 m) totalizando um desnível de -3,835 m no sentido Feliz Deserto-Piaçabuçu. O segundo gradiente, no mesmo sentido do anterior, está localizado no trecho que vai desde a RN 2488C (6,670 m) até vértice 2487Z (3,773 m) produzindo um desnível de

-2,897 m. O terceiro e último gradiente identificado, está situado no trecho entre as RN 2487R e RN 2487Z no sentido Penedo-Piaçabuçu. Nesse caso, foi retirado da avaliação, o vértice 2487S, já caracterizado anteriormente como um rebaixamento pontual. O desnível total obtido foi de -3,093 m. Todas essas evidências, apontam para uma possível ocorrência de processos de subsidência na Planície Deltaica do Rio São Francisco sendo que a principal região afetada se encontra nas imediações da sede do município de Piaçabuçu, conforme as análises dos gradientes de altitude.

3.2 Implantação de uma Rede de Monitoramento da Subsidência

As constatações de rebaixamentos na planície, detectadas nas investigações realizadas, embasaram o projeto de uma Rede Geodésica para Monitoramento da Subsidência na Planície Deltaica do Rio São Francisco.

A proposta para implantação da rede está fundamentada em estudos realizados na planície deltaica e seu entorno durante o desenvolvimento de atividades de pesquisa entre os anos de 2013 e 2019 sendo complementado por estudos geológicos anteriores a este período. Essas atividades contribuíram para a elaboração de um banco de dados geoespaciais com uma variedade de informações da área de estudo que proporcionaram os requisitos essenciais para o dimensionamento geométrico e a disposição dos vértices que compõem a rede geodésica de monitoramento, totalizando 26 vértices geodésicos, Figura 7.

O conjunto de monumentos é composto por alguns marcos de RN do SGB/IBGE, marcos geodésicos da rede do Baixo São Francisco/CHESF e alguns marcos implantados nas campanhas de levantamentos pela equipe do Laboratório de Estudos Costeiros da UFBA (LEC/UFBA). As distâncias entre os monumentos variam de 655 m (vértices 01-02) a 18,67 km (vértices 14-25).

Tabela 1 Informações de Altitude e desvio padrão das RRNN.

Circuito	Ordem	Estação	Município	Alt. (m)	Sigma (m)
AL-01	1	2487L	Penedo	44,640	0,088
	2	2487M	Penedo	58,029	0,088
	3	2487N	Penedo	60,812	0,088
	4	2487R	Penedo	6,866	0,089
	5	2487S	Penedo	2,917	0,089
	6	2487T	Piaçabuçu	6,243	0,089
	7	2487U	Piaçabuçu	5,749	0,089
	8	2487V	Piaçabuçu	4,039	0,089
	9	2487X	Piaçabuçu	3,861	0,089
	10	2487Z	Piaçabuçu	3,773	0,089
AL-01/02	11	2488A	Piaçabuçu	3,952	0,089
	12	2488B	Piaçabuçu	4,740	0,090
	13	2488C	Piaçabuçu	6,670	0,090
	14	2488D	Piaçabuçu	5,551	0,090
	15	2488E	Piaçabuçu	5,749	0,090
	16	2488F	Feliz Deserto	6,406	0,090
AL-02	17	2488G	Feliz Deserto	7,047	0,090
	18	2488H	Feliz Deserto	7,910	0,090
	19	2488J	Feliz Deserto	8,662	0,090
	20	2488L	Coruripe	9,386	0,090
	21	2488M	Coruripe	7,979	0,090
	22	2488N	Coruripe	7,904	0,089
	23	2488P	Coruripe	6,875	0,089

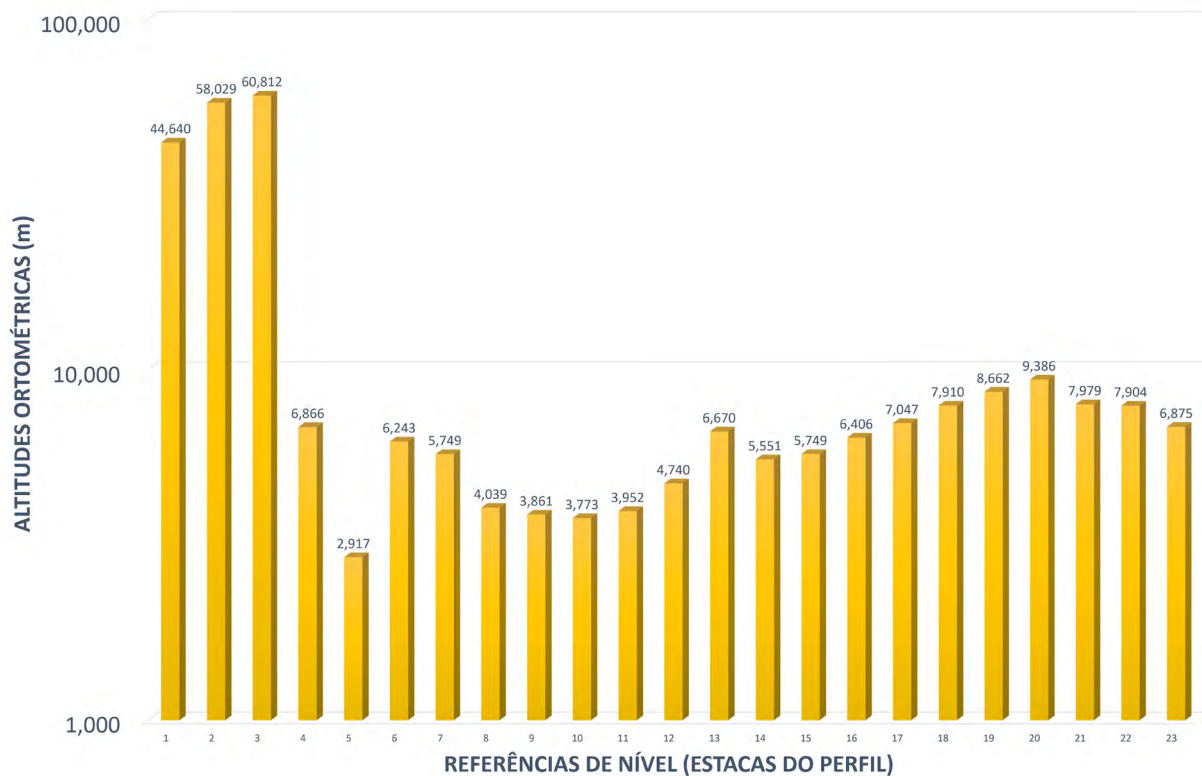


Figura 6 Altitudes das RRNN dos circuitos avaliados.

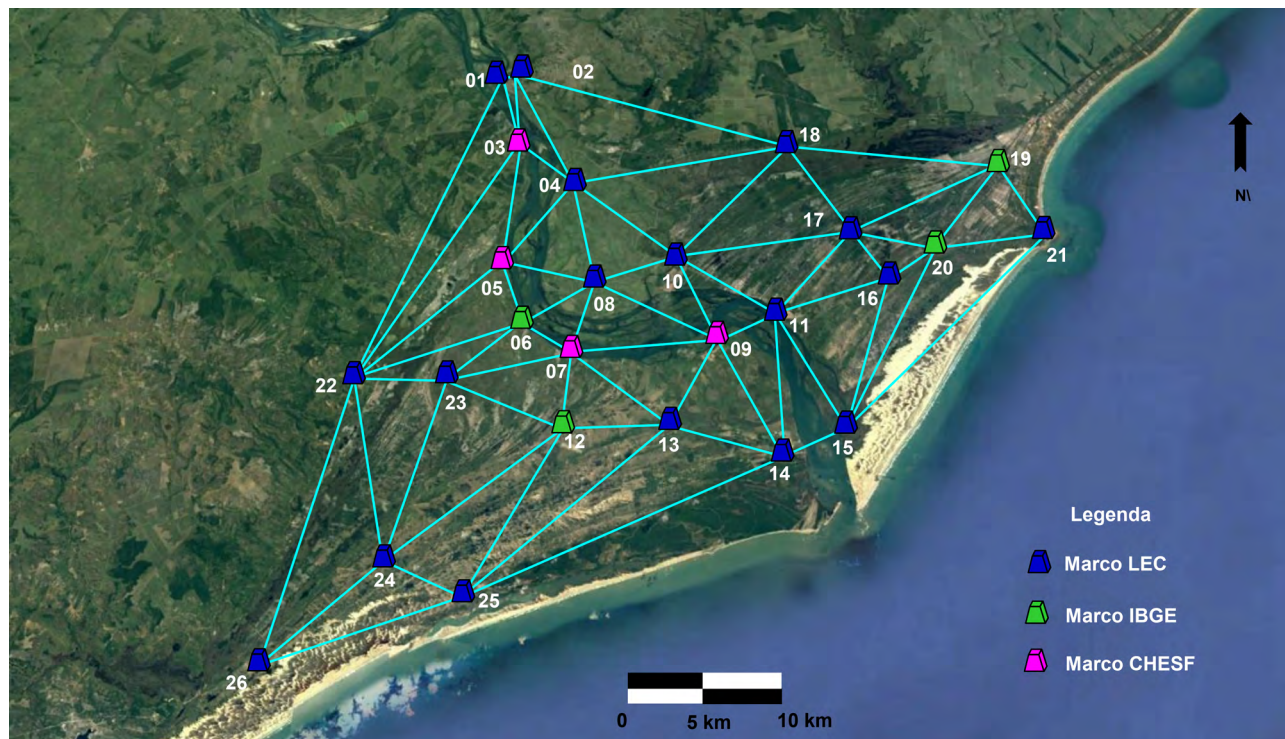


Figura 7 Rede geodésica para monitoramento da subsidência do Delta do São Francisco. Adaptado de *Piaçabuçu* 2019.

4 Conclusões

As avaliações dos vértices altimétricos apontaram algumas ocorrências de rebaixamentos de superfície na planície deltaica. A redução significativa de nível à medida que se aproxima da sede do município de Piaçabuçu é uma evidência de que nessas imediações houve o rebaixamento da superfície no Holoceno. O rebaixamento pôde ser quantificado pelo desnível total no trecho 04-11 em AL-01 (-2,914 m) e o desnível total no trecho 20-11, em AL-02 (-5,433 m).

A rede geodésica de monitoramento proporcionará apoio às atividades de pesquisa na região. Toda estrutura implantada e as informações estão organizadas para a realização da mensuração dos processos de subsidência na planície. A proposta é que seja iniciado um projeto contínuo de coleta de dados geodésicos a partir de campanhas periódicas de rastreios GNSS nos 26 vértices da rede. Essas informações darão contribuições para a determinação das taxas de subsidência na planície deltaica modelando suas tendências a médio e longo prazo.

Os resultados deste estudo servirão de referência para campanhas futuras de rastreamento GNSS (*Global Navigation Satellite System*) e composição de um banco de dados de coordenadas geodésicas tridimensionais para monitoramento da subsidência no delta do São Francisco.

5 Referências

Agência Nacional do Petróleo 2015, ANP, Brasília, acessado 10 Dezembro 2015, <<http://www.anp.gov.br/brasil-rounds/round2/pdocs/pbacias/PBframe02.htm>>.

Alencar, J.C.M. 1990, 'Datum Altimétrico Brasileiro', *Cadernos de Geociências*, vol. 5, pp. 69-73.

Barbosa, L.M. & Dominguez, J.M.L. 2004, 'Coastal dune fields at the São Francisco River strandplain, northeastern Brazil: morphology and environmental controls', *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 29, no. 4, pp. 443-56. <https://doi.org/10.1002/esp.1040>

Barbosa, L.M. 1985, 'Quaternário costeiro no Estado de Alagoas: influências das variações do nível do mar', Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Bahia.

Barbosa, L.M., Bittencourt, A.C.S.P., Dominguez, J.M.L. & Martin, L. 1986, 'The Quaternary deposits of the state of Alagoas: influence of the relative sea level changes', *Quaternary of South America and Antarctica Peninsula*, Rotterdam, pp. 269-90. <https://doi.org/10.1201/9781003079316>

Barzaghi, R., Cazzaniga, N.E., De Gaetani, C.I., Pinto, L. & Tornatore, V. 2018, 'Estimating and comparing dam deformation using classical and GNSS techniques', *Sensors*, vol. 18, no. 3, p. 756. <https://doi.org/10.3390/s18030756>

Bhattacharya, J.P. & Giosan, L. 2003, 'Wave-influenced deltas: geomorphological implications for facies reconstruction',

Sedimentology, vol. 50, pp. 187-210. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3091.2003.00545.x>

Bhattacharya, J.P. 2006, 'Deltas', *Facies Models Revisited, Society for Sedimentary Geology*, pp. 237- 92. <https://doi.org/10.2110/pec.06.84.0237>

Bittencourt, A.C.S.P., Dominguez, J.M.L., Fontes, L.C.S., Sousa, D.L., Silva, I.R. & Silva, F. 2007, 'Wave refraction, river damming, and episodes of severe shoreline erosion: The São Francisco river mouth, northeastern Brazil', *Journal of Coastal Research*, vol. 23, no. 4, pp. 930-8. <https://doi.org/10.2112/05-0600.1>

Bittencourt, A.C.S.P., Dominguez, J.M.L., Martin, L. & Ferreira, Y.D.A. 1982, 'Dados preliminares sobre a evolução do delta do Rio São Francisco (SE/AL) durante o Quaternário: influência das variações do nível do mar', *IV Simpósio do Quaternário no Brasil*, Rio de Janeiro, pp. 49-62.

Blitzkow, D., Matos, A.C.O.C., Guimarães, G.N. & Costa, S.M.A. 2011, 'O conceito atual dos referenciais usados em Geodésia', *Revista Brasileira de Cartografia, Edição Especial de Geodésia*, Brasília, no. 63/5, pp. 633-48.

Braz Filho, P.A. 1980, *Prospecto turfa (Baixo Rio São Francisco)*, Relatório CC 2606/010, CPRM/SUREG, p. 27.

Cenni, N., Fiaschi, S. & Fabris, M. 2021, 'Monitoring of land subsidence in the Po river delta (Northern Italy) using geodetic networks', *Remote Sensing*, vol. 13, no. 8, p. 1488. <https://doi.org/10.3390/rs13081488>

Cenni, N., Viti, M., Baldi, P., Mantovani, E., Bacchetti, M. & Vannucchi, A. 2013, 'Present vertical movements in Central and Northern Italy from GPS data: Possible role of natural and anthropogenic causes', *Journal Geodynamic*, vol. 71, pp. 74-85. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2013.07.004>

Corbau, C., Simeoni, U., Zoccarato, C., Mantovani, G. & Teatini, P. 2019, 'Coupling land use evolution and subsidence in the Po Delta, Italy: Revising the past occurrence and prospecting the future management challenges', *Science Total Environment*, vol. 654, pp. 1196-208. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.104>

Daito, K. & Galloway, D. 2015, 'Prevention and Mitigation of Natural and Anthropogenic Hazards due to Land Subsidence', IAHS, Wallingford, UK, p. 372. <https://doi.org/10.5194/piahs-372-555-2015>

Matos, R.M.D. 1999, 'History of the northeast Brazilian rift system: kinematic implications for the break-up between Brazil and West Africa', *Geological Society*, vol. 153, no. 1, pp. 55-73. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1999.153.01.04>

Dominguez, J.M.L. & Araújo, L.M. 2008, 'Formação Barreiras: o registro de um *onlap* costeiro durante o Mioceno', *44º Congresso Brasileiro de Geologia*, Curitiba, PR, p. 613.

Dominguez, J.M.L. 1996, 'The São Francisco strandplain: a paradigm for wave-dominated deltas?', *Geological Society*, vol. 117, no. 1, pp. 217-31. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1996.117.01.13>

Dominguez, J.M.L. & Barbosa, L.M. 1994, 'Controls on Quaternary evolution of the Sao Francisco strandplain: Roles of sea-level history, trade winds and climate. Field trip guide', *14th International Sedimentological Congress*, IAS, Recife.

- Feijó, F.J. 1994, 'Bacias de Sergipe e Alagoas'. *Boletim de Geociências da Petrobras*, vol. 8, no.1, pp. 149-61.
- Fiaschi, S., Fabris, M.; Floris, M. & Achilli, V. 2018, 'Estimation of land subsidence in deltaic areas through differential SAR interferometry: The Po River Delta case study (Northeast Italy)', *International Journal of Remote Sensing*, vol. 39, pp. 8724-45. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1490977>
- Guimarães, J.K. 2010, 'Evolução do delta do Rio São Francisco—Estratigrafia do Quaternário e Relações Morfodinâmicas', Tese de Doutorado, Universidade Federal da Bahia.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. & Wasle, E. 2007, *GNSS - Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*, Springer Science & Business Media, Graz, Austria.
- Horton, B.P. & Shennan, I. 2009, 'Compaction of Holocene strata and the implications for relative sea level change on the east coast of England', *Geology*, vol. 37, no. 12, pp. 1083-6. <https://doi.org/10.1130/G30042A.1>
- IBGE - vide Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.
- Ihde, J., Sanchez, L., Barzaghi, R., Drewes, H.; Foerste, C., Gruber, T., Liebsch, G., Marti, U. Pail, R. & Sideris, M. 2017, 'Definition and Proposed Realization of the International Height Reference System (IHRs)', *Surveys in Geophysics*, vol. 38, no. 3, pp. 549-70. <https://doi.org/10.1007/s10712-017-9409-3>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística 1983, *Especificações e Normas Gerais para Levantamentos Geodésicos*, Rio de Janeiro, Resolução nº 22.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística 2019a, Cartograma da Rede Altimétrica do Sistema Geodésico Brasileiro, Rio de Janeiro.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística 2019b, *Reajustamento da Rede Altimétrica com Números Geopotenciais*, Rio de Janeiro.
- Jekeli, C. 2016, *Geometric Reference Systems in Geodesy*, Ohio State University.
- Johnson, A.I., Carbognin, L. & Ubertaini, L. 1986, 'Land Subsidence', *3rd International Symposium on Land Subsidence*, IAHS, Wallingford, UK, p. 151.
- Knopper, B., Medeiros, P.R.P., Souza, W.F.L. & Jennerjahn, T. 2006, 'The São Francisco Estuary, Brazil', *The Handbook of Environmental Chemistry*, Springer Verlag Berlin Heidelberg, vol. 5, pp. 51-70. https://doi.org/10.1007/698_5_026
- Leão, Z.M. & Dominguez, J.M.L. 2000, 'Tropical coast of Brazil', *Marine Pollution Bulletin*, vol. 1, no. 41, pp. 112-22.
- Lima, C.U., Bezerra H.R., Nogueira C.C., Rubson P. & Souza O.L. 2014, 'Quaternary fault control on the coastal sedimentation and morphology of the São Francisco coastal plain, Brazil', *Tectonophysics*, vol. 633, pp. 98-114. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2014.06.026>
- Lima, W.S., Andrade, E.J., Bengtson, P. & Galm, P.C. 2002, 'A Bacia de Sergipe-Alagoas: evolução geológica, estratigrafia e conteúdo fóssil', *Fundação Paleontológica Phoenix*, vol. 1, pp. 1-34.
- Martin, L., Bittencourt, A.C.S.P. & Vilas Boas, G.S. 1982, 'Primeira ocorrência de corais pleistocênicos na costa brasileira, datação do máximo da Penúltima Transgressão', *Revista Ciência da Terra*, vol. 1, pp. 16-7.
- Martin, L., Flexor, J.M., Vilas Boas, G.S., Bittencourt, A.C.S.P. & Guimarães, M.M.M. 1979, 'Courbe de variation du niveau relatif de la mer au cours des 7000 dernières années sur un secteur homogène du littoral brésilien (Nord de Salvador-Bahia)', *International Symposium on Coastal Evolution in the Quaternary Shorelines*, São Paulo, pp. 264-71.
- Matos, R.M.D. 1999, 'History of the northeast Brazilian rift system: kinematic implications for the break-up between Brazil and West Africa', *Geological Society*, vol. 153, no. 1, pp. 55-73. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1999.153.01.04>
- Meckel, T.A., Brink, U.S. & Williams, S.J. 2006, 'Current subsidence rates due to compaction of Holocene sediments in southern Louisiana'. *Geophysical Research Letters*, vol. 33, pp. L11403. <https://doi.org/10.1029/2006GL026300>
- Medeiros, P.R.P., Knoppers, B.A., Santos, R.C. & Souza, W.F.L. 2007, 'Discharge and dispersion of suspended matter in the coastal zone of the São Francisco River estuary (SE/AL-Brazil)', *Geochimica Brasiliensis*, vol. 21, pp. 209-28.
- Ministério das Minas e Energia 1983, Projeto RADAMBRASIL, Programa de Integração Nacional, Levantamento de Recursos Minerais, vol. 30, Folhas SC24/25 - Aracaju/Recife, Rio de Janeiro, RJ.
- Moraes Rego, L.F. 1933, 'Notas sobre a geologia, a geomorfologia e os recursos minerais de Sergipe', *Anais da Escola de Minas de Ouro Preto*, vol. 24, pp. 24-31.
- Neto, O.P.A.C., Souza-Lima, W. & Cruz, F.E.G. 2007, 'Bacia de Sergipe-Alagoas', *Boletim de Geociências da Petrobras*, vol.15, no. 2, pp. 405-15.
- O'Leary, M. & Gottardi, R. 2020, 'Relationship between Growth Faults, Subsidence, and Land Loss: An Example from Cameron Parish, Southwestern Louisiana, USA'. *Journal of Coastal Research*, vol. 36, no. 4, pp. 812-27. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-19-00108.1>
- Piaçabuçu 2016, Google Maps, acessado 1 Março 2016, <<https://www.google.com.au/maps/place/Pia%C3%A7abu%C3%A7u+-+AL/@-10.4014882,-36.4709352,12z/data=!3m1!4b1!4m5!3m4!1s0x704f7af52d26a79:0x96316e97c3aa6ef0!8m2!3d-10.40592314d-36.431617>>.
- Piaçabuçu 2019, Google Earth, acessado 1 Novembro 2019, <<https://earth.google.com/web/@-10.42218448,-36.39059535,5.70313052a,28242.50632494d,35y,0h,0t,0r>>.
- Ponte, F.C. & Asmus, H.E. 1976, 'The Brazilian marginal basins: current state of knowledge', *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, vol. 48, pp. 215-439.
- Ponte, F.C. 1969, 'Estudo morfoestrutural da Bacia Sergipe-Alagoas', *Boletim Técnico da Petrobras*, vol. 12, no. 3, pp. 439-74.
- Rapp, R.H. 1991, *Geometric Geodesy Part I*, Ohio State University, Columbus.
- Santos, A.A., Dutra, A.C. & Dominguez, J.M.D. 2019, 'Structural Control of the São Francisco River Delta from the Aeromagnetic Data, Brazil', *Journal of Geography, Environment and Earth Science International*, vol. 22, no. 2, pp. 1-12. <https://doi.org/10.9734/jgeesi/2019/v22i230143>

- Schaller, H. 1969, 'Revisão estratigráfica da bacia de Sergipe/Alagoas', *Boletim Técnico da Petrobrás*, vol. 12, no. 1, pp. 21-86.
- Silva Filho, M.A., Bomfim, L.F.C. & Santos, R.A. 1978, 'Evolução tectono-sedimentar do grupo Estância: suas correlações', *30º Congresso Brasileiro de Geologia*, 30, Recife, pp. 685-99.
- Silva Filho, M.A., Bomfim, L.F.C., Santos, R.A., Leal, R. A., Santana, A.C. & Braz Filho, P. A. 1979, 'Geologia da geossinclinal sergipana e do seu embasamento: Projeto Baixo São Francisco/Vaza Barris, DNPM, Brasília.
- Souza-Lima, W. 2006, 'Litoestratigrafia e evolução tectono-sedimentar da bacia de Sergipe-Alagoas (Introdução)', *Fundação Paleontológica Phoenix*, vol. 8, no. 89, pp. 1-10.
- Stein, R.S. 1981, 'Discrimination of tectonic displacement from slope-dependent errors in geodetic leveling from southern California, 1953-1979', *Earthquake Prediction: an international review*, vol. 4, pp. 441-56. <https://doi.org/10.1029/ME004p0441>
- Törnqvist, T.E., Wallace, D.J., Storms, J.E., Wallinga, J., Van Dam, R.L., Blaauw M., Derksen, M.S., Klerks, C.J.W., Meijneken, C. & Snijders, E.M.A. 2008, 'Mississippi Delta subsidence primarily caused by compaction of Holocene strata', *Nature Geoscience*, vol. 1, no. 3, pp. 173-6. <https://doi.org/10.1038/ngeo129>
- Uhlein, A., Caxito, F.A.; Sanglard, J.C.D., Uhlein, G.J. & Suckau, G.L. 2011, 'Estratigrafia e tectônica das faixas neoproterozóicas da porção norte do Cráton do São Francisco', *Revista Geonomos*, vol. 19, no. 2, pp. 8-31. <https://doi.org/10.18285/geonomos.v19i2.38>
- Villwock, J.A., Tomazelli, L.J., Loss, E.L., Dehnhardt, E.A., Bachi, F.A. & Dehnhardt, B.A. 2020, 'Geology of the Rio Grande do Sul coastal province', *Quaternary of South America and Antarctic Peninsula*, CRC Press, pp. 79-97.
- Vitagliano, E., Riccardi, H., Piegari, E., Boy, Jean-Paul & Di Maio, R. 2020, 'Multi-Component and Multi-Source Approach for Studying Land Subsidence in Deltas', *Remote Sensing*, vol. 12, no. 1465. <https://doi.org/10.3390/rs12091465>
- Yuill, B.; Lavoie, D. & Reed, D. J. 2009, 'Understanding subsidence processes in coastal Louisiana', *Journal of Coastal Research*, vol. 1, no. 54, pp. 23-36. <https://doi.org/10.3390/rs12091465>

Contribuições dos Autores

Elmo Leonardo Xavier Tanajura: conceituação; análise formal; metodologia; validação; rascunho original escrito; redação – revisão e edição; visualização. **Admilson da Penha Pacheco:** conceituação; redação – revisão e edição; visualização; supervisão – ciências geodésicas; orientação geral. **José Maria Landim Dominguez:** redação – revisão; visualização; supervisão – geociências; coordenação. **Junia Kacelenbogen Guimarães:** conceituação; redação – revisão e edição; visualização; supervisão – geociências.

Conflito de interesse

Os autores não possuem potenciais conflitos de interesse.

Declaração de disponibilidade de dados

Todos os dados incluídos neste estudo estão disponibilizados publicamente na literatura.

Financiamento

Não aplicável

Editora chefe

Dra. Claudine Dereczynski

Editor Associado

Dr. Patrick Führ Dal' Bó

Como citar: Tanajura, E.L.X., Pacheco, A.P., Dominguez, J.M.L. & Guimarães, J.K. 2022, 'Avaliação de Subsidência Planície Deltaica do Rio São Francisco a partir dos Vértices de Referência de Nível da Rede Altimétrica Brasileira', *Anuário do Instituto de Geociências*, 45:36503. https://doi.org/10.11137/1982-3908_45_36503