

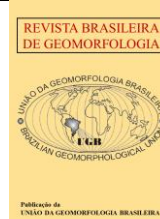


<https://rbgeomorfologia.org.br/>
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 24, n° 4 (2023)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v24i4.2395>



Artigo de Pesquisa

Proposta metodológica para a classificação de unidades de relevo na porção central da planície costeira do Paraná - Brasil

Methodological proposal for geomorphologic mapping of the central portion of the coastal plain of Paraná - Brazil

Táisa Comerlato, Marcelo Renato Lamour² e Claudinei Tabora da Silveira³

¹ Universidade do Estado de Santa Catarina, Departamento de Geografia, Florianópolis, Brasil. E-mail: taisa.c@udesc.br

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0356-1280>

² Universidade Federal do Paraná, Centro de Estudos do Mar, Pontal do Paraná, Brasil. E-mail: mlamour@ufpr.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1238-5756>

³ Universidade Federal do Paraná, Departamento de Geografia, Curitiba, Brasil. E-mail: claudineits@ufpr.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6289-6306>

Recebido: 20/04/2023; Aceito: 26/11/2023; Publicado: 14/12/2023

Resumo: As formas de relevo das regiões costeiras frequentemente representam um desafio aos métodos de mapeamento geomorfológico, principalmente pela suavidade das feições topográficas. Considerando essa dificuldade, o objetivo do trabalho é de propor um método para a classificação de unidades de relevo nesse tipo de ambiente, apoiado em informações geomorfométricas calculadas de um MDT, na resposta espectral da vegetação adaptada aos diferentes ambientes que são condicionados pelo relevo e na análise sedimentar. A área de estudo localiza-se na porção central da planície costeira do Paraná, e abrange integralmente o município de Pontal do Paraná e parcialmente os municípios de Paranaguá e Matinhos, nos ambientes de sedimentação. Por meio das assinaturas geomorfométricas foram identificadas duas formas de relevo associadas a gênese fluvial, as assinaturas espectrais permitiram identificar duas formas de relevo com gênese estuarina e as características sedimentares resultaram em três distintas formas de relevo com gênese marinha e eólica. A integração destas assinaturas permitiu a classificação de sete unidades de relevo: 1) 2) 3) 4) 5) 6) e 7), compatíveis com a escala 1:10.000 com impressão na escala 1:25.000.

Palavras-chave: Mapeamento Geomorfológico. Geomorfometria. Processamento Digital de Imagem. Sedimentologia.

Abstract: The coastal landforms in a regional perspective represent a challenge to geomorphological mapping methods, mainly due to the smoothness of the topographic features. Considering this difficulty, the aim of this work is to propose a method for classifying relief units in this type of environment, based on geomorphometric information calculated from an MDT, the spectral response of vegetation adapted to the different environments that are conditioned by the relief and sedimentary analysis. The study area is in the central portion of the Paraná coastal plain and covers the entire municipality of Pontal do Paraná and partially the municipalities of Paranaguá and Matinhos, in sedimentation environments. The geomorphometric signatures identified two landforms associated with fluvial genesis, the spectral signatures made it possible to identify two landforms with estuarine genesis and the sedimentary characteristics resulted in three distinct landforms with marine and eolian genesis. The integration of these signatures led to the classification of seven relief units: 1) 2) 3) 4) 5) 6) and 7), compatible with the 1:10,000 scale with an imprint on the 1:25,000 scale.

Keywords: Geomorphologic Mapping. Geomorphometry. Digital Image Processing. Sedimentology.

1. Introdução

Perdura no país uma lacuna por métodos para a realização da cartografia geomorfológica em escala de semidetalhe e detalhe, compreendidas como escalas grandes, superior a 1:25.000. Apesar do legado deixado pelo Projeto RADAMBRASIL, que cartografou o relevo brasileiro na escala do milionésimo (BARBOSA et al., 1984), como também dos manuais técnicos de geomorfologia (NUNES et al. 1995; IBGE, 2009) que contemplaram a representação do relevo para escalas menores que 1:250.000. A proposta de Ross (1992), apesar e contemplar táxons geomorfológicos de maior detalhe, não apresentam um conjunto de técnicas e nem um arcabouço amplo que consiga abranger os distintos relevos, como é o caso do ambiente costeiro.

Apesar da retomada no país de discussões acerca da cartografia geomorfológica, bem como do esforço atual para a construção de um Sistema Brasileiro de Classificação do Relevo (SBCR), com diretrizes e estrutura estabelecidas (IBGE, 2020), com a atuação colaborativa de especialistas do IBGE, do Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM) e da comunidade de geomorfólogos representados pela União da Geomorfologia Brasileira (UGB), ainda está distante o tratamento dos táxons inferiores, para escalas grandes, visto que apenas as classes de relevo do 1º táxon, em escala regional para o Brasil, foram estabelecidas, apesar de terem sido compostos grupos de trabalho para tratar de ambientes específicos, dentre eles o denominado (Sub)Sistema Costeiro (COMITÊ EXECUTIVO NACIONAL – CEN/SBCR, 2022).

Hodiernamente, um dos impulsos ao desenvolvimento das pesquisas de cartografia geomorfológica é o incremento de métodos de representação cartográfica dos fatos geomorfológicos, pois as geotecnologias assumiram um papel dominante com procedimentos automatizados e/ou semi-automatizados (PIKE, 2000). Neste contexto destaca-se o uso de técnicas de modelagem digital, com abordagem quantitativa e computacional, empregadas na classificação do relevo nas diversas escalas. Dentre as mais relevantes, a geomorfometria configura como ferramenta essencial para a cartografia geomorfológica (HENGL; REUTER, 2009; SEIJMONSBERGEN et al., 2011; BISHOP et al., 2012), principalmente pela capacidade de processamento em ambiente informatizado (OTTO; SMITH, 2013).

No entanto, quando voltadas para os ambientes costeiros, a aplicação da geomorfometria ao mapeamento geomorfológico enfrenta dificuldades técnicas, pois a ausência de modelos digitais de terreno de alta resolução acaba sendo uma limitação, dada a pequena diferença altimétrica entre as formas de relevo (CARVALHO; LATRUBESSE, 2004). Além disso, o que se percebe, muitas vezes, em mapas geomorfológicos realizados nesses ambientes, é a generalização por meio da agregação de unidades de formas de relevo, que por terem limites de difícil detecção são agrupadas, como é o caso no Mapeamento Geomorfológico do Paraná, na escala 1:250.000 (OKA-FIORI et al.; 2006; SANTOS et al., 2006) e também no Novo Mapa Geomorfológico do Paraná, na escala 1:100.000, onde as planícies costeiras são denominadas por planícies fluvio-marinhas (SILVEIRA et al., 2023).

Uma alternativa viável para superar as limitações altimétricas é analisar as características sedimentares dos diferentes ambientes costeiros, no sentido de desvendar, entre outras situações, o ambiente original de deposição dos sedimentos (LANA; CASTRO, 2008; SILVA, et al., 2006; SILVA; ZANZINI, 2016). Desta forma, a identificação do ambiente deposicional focando os agentes de erosão, transporte e deposição, podem diferenciar e/ou identificar as diferentes formas de relevo dispostas na zona costeira. Neste sentido, cada entidade geomorfológica pode apresentar uma assinatura sedimentar comum e notável, a qual, certamente, auxilia no mapeamento e na delimitação de cada entidade no terreno. No geral os processos sedimentares são seletivos o suficiente para a diferenciação nos sedimentos que formam cada feição, onde a energia ambiental controla pequenas variações que podem ser detectadas em análises laboratoriais simples e de baixo custo, como as análises granulométricas e/ou sedimentológicas, por exemplo. No mesmo sentido, pode empregar também técnicas de processamento digital de imagem, onde as diferenças na resposta espectral da vegetação, cuja fitofisionomia é influenciada pelas formas de relevo, auxilia na detecção de unidades de relevo nesses ambientes.

Neste contexto, o objetivo principal deste trabalho foi elaborar um método para a classificação de unidades de relevo em ambiente costeiro, que atenda a escala 1:10.000, compreendida como de detalhe, sendo compilada para 1:25.000 para publicação, apoiando-se em técnicas de geomorfometria, processamento digital de imagem e análises sedimentológicas, cada qual identificando ambientes de gêneses distintas, respeitadas as limitações de cada técnica. Nesta abordagem foi eleito como recorte geográfico para o estudo de caso uma área situada na porção

central da Planície Costeira do Estado do Paraná, onde a planície costeira é ampla e teve a evolução deposicional relacionada aos diversos eventos de variação do nível relativo do mar ao longo do Período Quaternário.

2. Área de Estudo

Compreende a porção central da planície costeira do Estado do Paraná, abrangendo integralmente o município de Pontal do Paraná/PR e parcialmente os municípios de Paranaguá/PR e Matinhos/PR (Figura 1). Os limites foram definidos pelo conhecimento a respeito da evolução geológica, bem como, a disponibilidade de dados cartográficos, como as cenas das imagens de satélite de uma única data (RapidEye, com 5 m de resolução espacial, 2014) e o modelo digital do terreno com resolução espacial de detalhe (2,5 m).

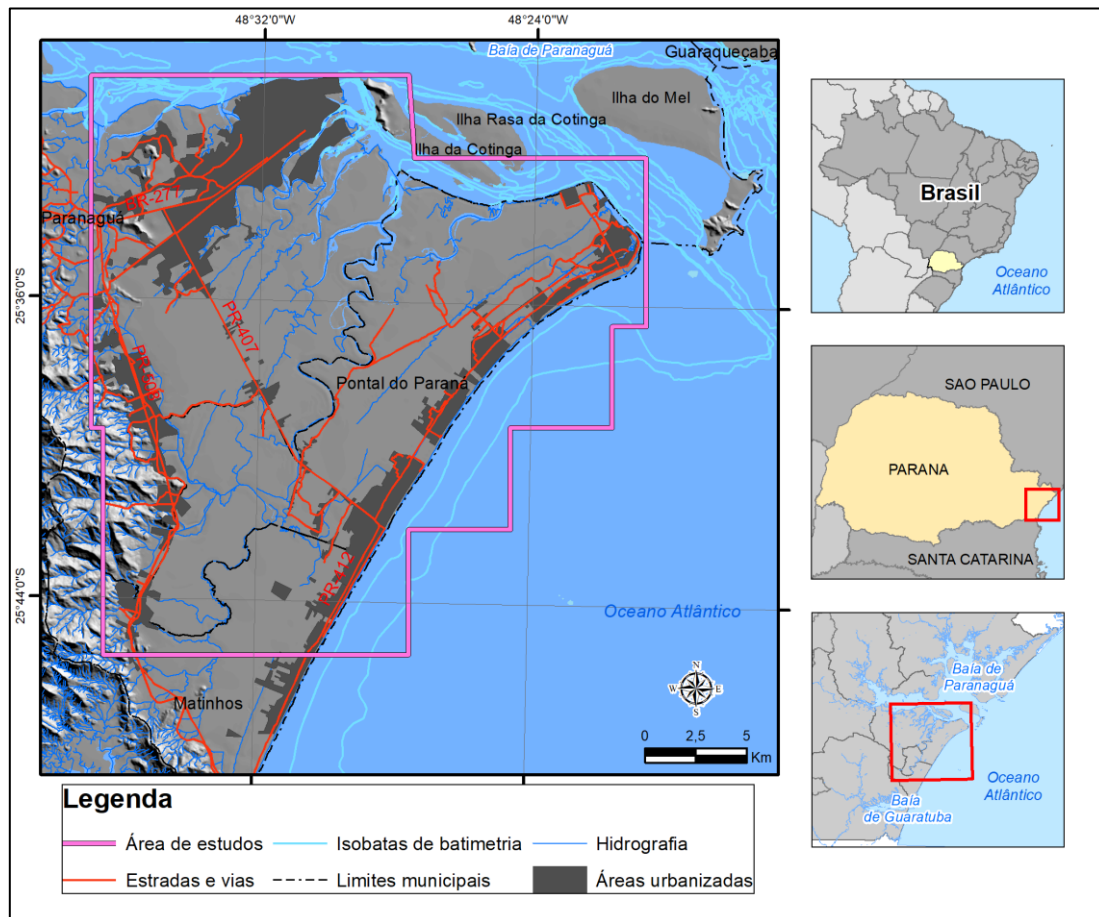


Figura 1. Mapa de localização da área de estudos.

O Litoral Paranaense tem aproximadamente 120 km de extensão (IBGE, 2021), sendo que a área mapeada corresponde a 22% desta (26,80 km) com uma planície costeira caracterizada por praias arenosas expostas e recortada por corpos estuarinos. Neste contexto a baía de Guaratuba apresenta uma área aproximada de 50 km² e o Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP), com área de 612 km² (LANA et al., 2001), o qual consiste em diversos subestuários (Antonina, Paranaguá, Laranjeiras, Guaraqueçaba e Pinheiros) que centralizam as bacias de drenagem na Zona Costeira. O CEP faz parte do Complexo Estuarino Lagunar Paranaguá-Cananéia-Iguape, que é considerado o 3º maior estuário do mundo em termos de produção primária (IAT, 2019). O principal tipo de vegetação que cobre as planícies dos estuários é a de mangue, um ecossistema costeiro de transição entre os ambientes terrestres e marinhos que atua como fixador dos sedimentos, tanto costeiros como marítimos (IAT, 2019).

Quanto a evolução geológica/geomorfológica da área de estudos Suguio et al. (1985), apontam que toda a faixa litorânea da costa brasileira esteve submetida a oscilações do nível relativo do mar, ocorridas durante o Período

Quaternário, onde as formas resultantes são representadas por planícies litorâneas arenosas, com estuários e lagunas recortando a costa (ANGULO et al., 2009). Na planície costeira paranaense, formaram-se dois terraços marinhos como sistemas de laguna-barreira, que prograram em pelo menos duas fases, após os dois últimos máximos transgressivos do nível relativo do mar: um no Pleistoceno Superior (há aproximadamente 120.000 anos), quando o nível relativo do mar estaria a cerca de + 8,5 m (± 2 m), e outro no Holoceno (há cerca de 5.100 anos) a aproximadamente +2,5 m ($\pm 0,5$ m) (LESSA et al., 2000). Estas As barreiras incorporam pelo menos cinco ambientes deposicionais (LESSA et al. 2000, ARAÚJO, 2001, SOUZA 2005), sendo dunas eólicas, deltas de marés cheias, foreshore, shoreface e a plataforma interna.

Maack (1947, 1968), Bigarella (1946) e Bigarella et al. (1978), dividiram o litoral do Paraná em duas subzonas geográficas naturais: Planície Costeira e Serra do Mar, onde a primeira foi entendida como sendo composta por sedimentos arenosos e manguezais, com relevo plano e suavemente ondulado, com altitudes inferiores a 20 m na forma de morros e colinas de diversos tamanhos e a segunda entendida como sendo constituída por uma serra marginal de borda de planalto, mais escarpada do lado Atlântico que do lado continental, dotada de taludes íngremes e vertentes vigorosas, tanto em relação ao primeiro planalto como em relação à zona pré-Serra do Mar e a planície costeira Atlântica (BIGARELLA et al. 1978).

O primeiro mapa de compartimentos geomorfológicos da planície costeira foi elaborado por Oka-Fiori et al. (2002) (E=1:500.000), separou 3 grandes compartimentos para o mesmo trecho do Estado do Paraná: Serras e Morros, Planície Costeira e Mangues, sem maiores detalhamentos das feições geomorfológicas que as compõe. Santos et al. (2006) utilizou a compartimentação do relevo por táxons (ROSS, 1992), com apoio de campo e interpretação de modelo digital de terreno (MDT) e representa a planície costeira como uma única unidade de relevo, não apresentando detalhamento sobre os diferentes compartimentos geomorfológicos da planície costeira (E=1:60.000). Por sua vez, Angulo (2004) apresentou informações sobre a geologia e geomorfologia do ambiente costeiro, com uma ampla discussão dos ambientes e fácies sedimentares da planície costeira do Paraná (E=1:100.000).

Silveira (2019) apresentou uma proposta metodológica para o mapeamento semiautomatizado da geomorfologia do estado do Paraná, integrando elementos morfométricos, morfográficos, morfogenéticos, morfodinâmicos e morfocronológicos, utilizando exclusivamente variáveis quantitativas mensuradas a partir de uma base planialtimétrica, com a obtenção de um MDT e dos atributos geomorfométricos derivados. Na porção da planície costeira o mapa identificou a morfogênese como fluviomarina em dois processos morfogenéticos: destrutivo e construtivo. Também representou, em nível de morfografia, a delimitação linear de terraços fluviomarinhos e na categoria morfométrica, os pontos cotados.

Por fim, o último o mapeamento geomorfológico elaborado nas imediações da Baía de Guaratuba/PR (COMERLATO et al., 2020), foi produzido com emprego de método semiautomático, apoiado nas análises dos atributos geomorfométricos derivados de um MDT, e do Processamento Digital de Imagem, pela análise das diferenças espectrais dos níveis de umidade da vegetação. Os trabalhos de campo evidenciaram um nível de acerto de 98% das feições mapeadas por esta técnica, que foi produzido em escala 1:10:000 e compilado para a publicação em escala 1:25.000.

3. Método

Foram executadas seis etapas operacionais: 1) obtenção do modelo digital do terreno (MDT) e geração de atributos geomorfométricos; 2) processamento digital de imagem; 3) seleção dos alvos e o melhor algoritmo de classificação dos objetos da imagem; 4) trabalhos de campo; 5) análises sedimentológicas e; 6) Identificação das formas de relevo pelas melhores respostas das assinaturas;

3.1. Obtenção do MDT e cálculo dos atributos geomorfométricos

O MDT utilizado nas análises geomorfométricas possui resolução espacial de 2,5 metros. Foi elaborado por aerolevanteamento com radar de abertura sintética, das bandas X e P, na escala 1:10.000 (ITCG, 2016). Foi escolhido por estar disponível como um dado público e oficial do estado do Paraná (<https://www.iat.pr.gov.br>), pela sua escala estar adequada ao objetivo do trabalho e por se apresentar como um modelo digital de representação da superfície do relevo.

Foram utilizados os atributos geomorfométricos primários (declividade, Índice de Posição Topográfica (IPT) e Black Top Hat (BTH)), derivados diretos do MDT, que foram computados a partir de uma janela móvel 3x3 células locais, no caso da declividade e regional, no caso do IPT e BTH, cujos algoritmos contemplaram a análise da célula central em relação às oito do seu entorno.

O Índice de Posição Topográfica (WEISS, 2001) é um algoritmo que calcula a diferença entre a elevação de um ponto central (Z0) e a média da elevação do seu entorno a partir de um raio predeterminado (Z). A análise de vizinhança necessária para a geração deste índice foi realizada por uma janela circular de 500 m (raio), que, segundo Dikau (1990), pode melhor representar as formas de relevo. Na interpretação deste índice, os valores positivos indicam que a célula se situa mais elevada que o entorno, valores negativos representam células mais rebaixadas e valores próximos a zero indicam células com declive constante.

O atributo geomorfométrico derivado do método da transformação Top Hat também considerou a análise de vizinhança regional a partir do MDT para sua obtenção. Essa função, aplicada inicialmente à análise digital do relevo por Rodriguez et al. (2002), é dividida em duas: i) Black Top Hat (BTH), com uma função de abertura, que mensura a altimetria mínima da altimetria máxima; ii) White Top Hat (WTH), com uma função de fechamento, que mensura a altimetria máxima da altimetria mínima, ambas a partir de um raio ou janela móvel predefinida. Assim como o IPT, a função Top Hat também é afetada diretamente pelo fator de escala.

3.2. Processamento Digital de imagem

Inicialmente foi realizado o mosaico das cenas com o uso do *software* ENVI (versão 5.0), ferramenta Mosaicking > Georeferenced Mosaicking. Já a composição de bandas (5, 4, 3) foi realizada no *software* ArcGis (ESRI), versão 10.8, ferramenta Data Management Tools >Raster>Raster Processing > Composite Bands. As imagens de satélite utilizadas foram as RapidEye, com 5 m de resolução espacial e data de imageamento de 2014, pois apresentavam a maior cobertura sem interferência de nuvens para a mesma data, fundamental para garantir uma mesma resposta espectral. Apesar da data do imageamento não ser atual, as áreas alvo desta técnica são áreas não urbanizadas, portanto sofrem alterações apenas pelas variações de maré e não no uso da terra. Este produto foi escolhido pela sua qualidade espectral e resolução espacial, e por ser de acesso gratuito à comunidade acadêmica (Contrato MMA nº 30/2012)¹. Foi realizada a correção atmosférica das cenas para garantir que a influência teste parâmetro não alterasse a resposta espectral, utilizando-se o modelo Cos (t) (CHAVEZ, 1988).

A primeira etapa desse procedimento foi a conversão dos valores digitais dos pixels para radiância no nível do sensor, a qual é obtida multiplicando-se os valores digitais originais por um fator de escala radiométrica. A segunda etapa foi a conversão da radiância no nível do sensor para reflectância no topo da atmosfera (ρ_{TOA}), obtida considerando-se a distância entre o Sol e a Terra e a geometria da radiação solar incidente. Como a assinatura espectral das formas de relevo da planície costeira pode ser associada ao comportamento espectral da cobertura vegetal, onde as folhas são os elementos da vegetação que mais contribuem para o sinal detectado pelos sensores ópticos (COLWELL, 1974). Assim, dentre as características do sensor RapidEye destaca-se a banda 4 (Red Edge - 690-730 nm) que permitiu a identificação das mudanças no teor de clorofila o que auxiliou na identificação de diferenças na reflectância e transmitância das folhas, o que por sua vez ajudou na discriminação dos tipos de vegetação (gramíneas ou arbustivas) pelas diferenças de umidade do ambiente próximo ao estuário da baía de Paranaguá.

Outro procedimento aplicado a imagem, para garantir que a técnica de classificação de imagens baseada em objetos foi a segmentação de imagem, realizada mediante análise do pixel e sua vizinhança em função dos atributos espectrais como a cor e a textura e possibilita a classificação das formas de relevo pelas características espectrais semelhantes detectáveis pelos algoritmos. Este processo foi realizado pela função Segment Mean Shift, do ArcGis 10.8 (ESRI) onde o algoritmo do *software* agrupa os pixels em segmentos adjacentes que têm características espectrais semelhantes.

Os parâmetros utilizados no procedimento foram: Spectral Detail (que especifica o nível de importância dada às diferenças espectrais das características dos objetos) com 20 pixels, Spatial Detail (que especifica o nível de importância dada à proximidade entre as características dos objetos) com 5 pixels e o Minimum Segment Size In

¹<http://geocatalogo.mma.gov.br/>

Pixels (que determina a menor área a ser mapeada e realiza a junção de segmentos menores do que o tamanho determinado com o seu segmento vizinho mais adequado) de 16 pixels. Estes parâmetros foram empregados levando em conta a escala para publicação do mapeamento, 1:25.000, onde áreas menores que 25.000 cm² ou 2.500 m² não serão visualizadas.

3.3. Seleção dos alvos e o melhor algoritmo de classificação dos objetos da imagem

As áreas de treinamento foram elencadas baseadas no critério das diferenças e semelhanças de cor e texturas das áreas adjacentes ao estuário sob a imagem segmentada (Figura 2), bem como, pelo reconhecimento em campo das diferentes formas de relevo, como as planícies e terraços estuarinos.

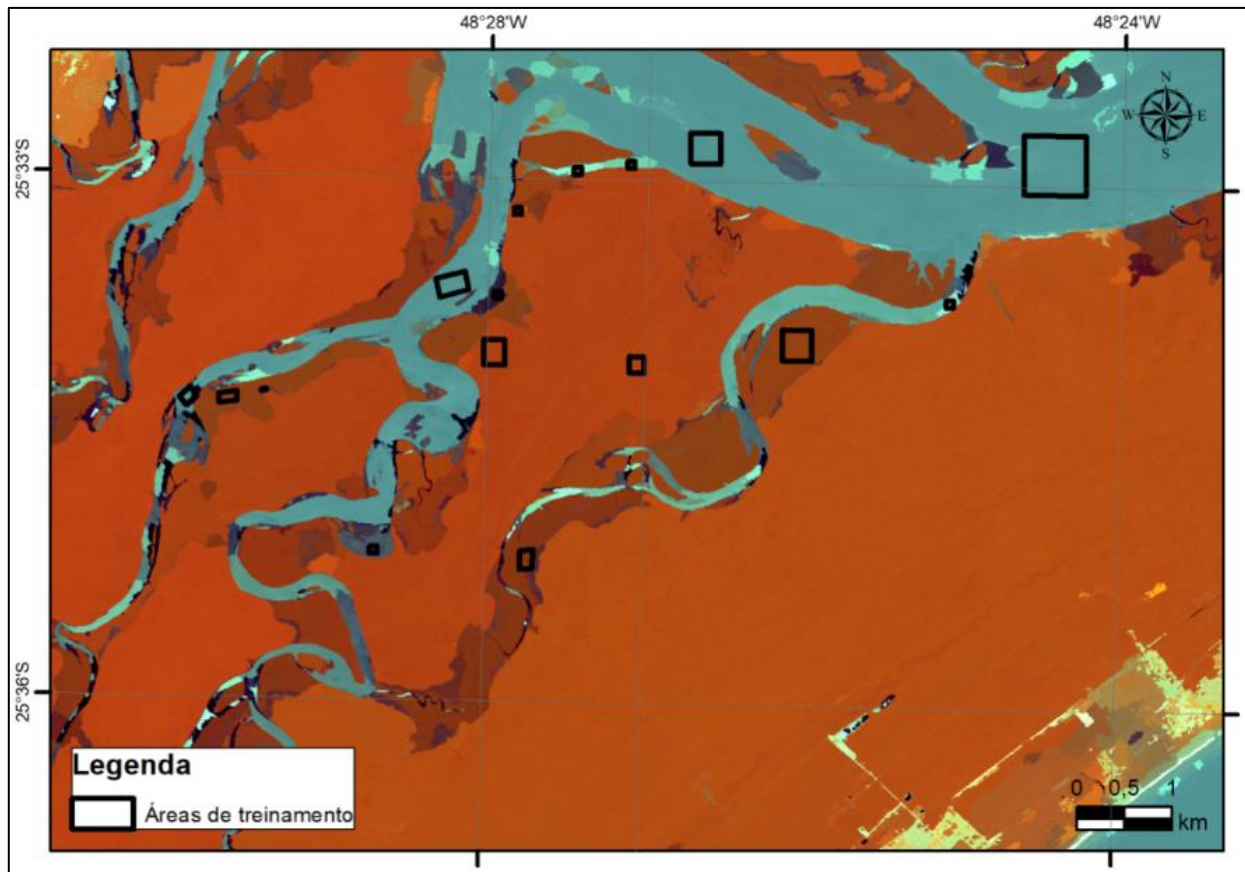


Figura 2. Localização das áreas de treinamento das feições associadas ao estuário sob a imagem de satélite segmentada.

O algoritmo usado para esta etapa foi o classificador por máxima verossimilhança (Maxver) (disponível na ferramenta ou Maximum Likelihood Classifier (MLC) do ArcGis 10.8 (ESRI). Este algoritmo se baseia no cálculo da distância estatística entre cada pixel e a média dos níveis de cinza da classe previamente definida a partir de amostras de treinamento (DUTRA et al., 1981). A ferramenta utilizada para realizar o treinamento foi: Image Classification> Training Sample Manager (delimitação das áreas de treinamento atribuindo-as às respectivas classes)>Train Maximum Likelihood Classifier>Classify Raster, para a classificação supervisionada.

3.4. Trabalhos de campo

Foram realizadas 4 campanhas em campo com objetivos específicos de, primeiramente, reconhecer as diferentes formas de relevo da área de estudos e sua disposição geográfica, realizando registro fotográfico ao localizando espacialmente e, posteriormente, a coleta de amostras de sedimentos dos locais onde as técnicas de geomorfometria e de processamento digital de imagem não puderam defini-las com precisão (

Tabela 1).

Tabela 1. Coordenadas métricas (Fuso 22 S) da localização dos 36 pontos de coleta de sedimentos na área de estudos com os respectivos parâmetros de cada amostra.

Amostra	Coordenada x	Coordenada y	Diâmetro médio (Mz)	Grau de seleção (6L)	Assimetria (Ski)	Curtose (Kg)
TC01	763813	7171540	Areia fina	muito bem selecionada	aproximadamente simétrica	Mesocúrtica
TC02	764665	7169711	Areia fina	bem selecionada	negativa	Mesocúrtica
TC03	764740	7168409	Areia fina	muito bem selecionada	aproximadamente simétrica	Mesocúrtica
TC04	766219	7169355	Areia fina	bem selecionada	negativa	Mesocúrtica
TC05	765209	7167719	Areia fina	bem selecionada	aproximadamente simétrica	Mesocúrtica
TC06	763976	7167221	Areia fina	bem selecionada	negativa	Leptocúrtica
TC07	761007	7165692	Areia fina	muito bem selecionada	negativa	Leptocúrtica
TC08	760955	7165752	Areia fina	bem selecionada	negativa	Leptocúrtica
TC09	760920	7165801	Areia fina	bem selecionada	negativa	Mesocúrtica
TC10	757248	7162690	Areia fina	bem selecionada	negativa	Leptocúrtica
TC11	757946	7161644	Areia fina	moderadamente selecionada	positiva	Platicúrtica
TC12	757949	7161628	Areia fina	moderadamente selecionada	positiva	Platicúrtica
TC13	756017	7159227	Areia fina	bem selecionada	negativa	Mesocúrtica
TC14	755998	7159242	Areia fina	bem selecionada	aproximadamente simétrica	Mesocúrtica
TC15	755546	7157783	Areia fina	moderadamente selecionada	aproximadamente simétrica	Mesocúrtica
TC16	755552	7157757	Areia média	moderadamente selecionada	positiva	Leptocúrtica
TC17	756995	7165005	Areia fina	bem selecionada	aproximadamente simétrica	Mesocúrtica
TC18	757111	7164883	Areia fina	bem selecionada	negativa	Leptocúrtica
TC19	758464	7165487	Areia fina	bem selecionada	aproximadamente simétrica	Mesocúrtica
TC20	751177	7151601	Areia fina	bem selecionada	negativa	Mesocúrtica
TC21	751290	7156664	Areia fina	Pobrememente selecionada	positiva	Mesocúrtica
TC22	751306	7160745	Areia fina	bem selecionada	aproximadamente simétrica	Mesocúrtica
TC23	750776	7159954	Areia fina	bem selecionada	negativa	Mesocúrtica
TC24	750398	7159539	Areia fina	moderadamente selecionada	aproximadamente simétrica	Mesocúrtica
TC25	749213	7156436	Areia fina	moderadamente selecionada	aproximadamente simétrica	Mesocúrtica
TC26	747253	7162804	Areia fina	bem selecionada	negativa	Mesocúrtica
TC27	747896	7163441	Areia fina	bem selecionada	negativa	Mesocúrtica

TC28	757963	7162192	Areia fina	moderadamente selecionada	aproximadamente simétrica	Mesocúrtica
TC29	757888	7162128	Areia fina	moderadamente selecionada	aproximadamente simétrica	Platicúrtica
TC30	758314	7162561	Areia fina	bem selecionada	negativa	Mesocúrtica
TC31	758369	7162591	Areia fina	moderadamente selecionada	aproximadamente simétrica	Mesocúrtica
TC32	751599	7155240	Areia fina	bem selecionada	negativa	Mesocúrtica
TC33	751231	7152464	Areia fina	moderadamente selecionada	negativa	Mesocúrtica
TC34	746947	7165237	Areia fina	bem selecionada	negativa	Mesocúrtica
TC35	749437	7156979	Areia fina	bem selecionada	negativa	Mesocúrtica
TC36	749220	7156155	Areia fina	moderadamente selecionada	aproximadamente simétrica	Platicúrtica

3.5. Análise sedimentológica

Os esforços desta etapa foram direcionados para a preparação das amostras, análises granulométricas, retirada de matéria orgânica e carbonatos e as consequentes análises sedimentológicas, buscando um padrão (assinatura) de distinção categórica entre os sedimentos que formam as feições geomorfológicas que não puderam ser dissociadas pelos métodos até então aplicados. Fundamentalmente partiu-se do princípio de que cada agente de transporte sedimentar seleciona partículas com características próprias e detectáveis, conforme afirma Suguio (1973). Neste caso, os depósitos eólicos são melhor selecionados que os fluviais, e estes possuem diferenças marcantes no diâmetro médio em relação aos estuarinos e em formas (arredondamento e esfericidade) com os praias. Assim, uma análise integrada de todas as variáveis sedimentológicas tende a evidenciar o principal agente de transporte e de deposição sedimentar, o que leva a interpretação do ambiente deposicional, e por consequência, à elucidação de dúvidas quanto as características geomorfológicas costeiras.

As amostras foram coletadas utilizando um trado pedológico manual, em 36 pontos distribuídos pela área de estudo e a escolha dos locais de coleta das amostras levou em consideração a qualidade (probabilidade de pouca ou nenhuma intervenção humana) além da possibilidade de acesso ao local buscando realizar as coletas onde ainda não havia sido possível a individualização das formas de relevo. Foram coletadas, pelo menos, uma amostra em cada ponto e no máximo 3, com aproximadamente 0,5 kg de material. Os primeiros 20 cm foram descartados para evitar a coleta de excesso de matéria orgânica, onde a primeira coleta foi entre 40 e 60 cm de profundidade, a segunda entre 60 e 80 cm e a terceira, entre 80 cm e 1 m de profundidade. As coletas abaixo de 1 m de profundidade não foram realizadas devido a influência do nível freático, que em alguns pontos se manifestou entre 60 e 80 cm de profundidade.

A preparação das amostras iniciou-se com a heterogeneização do material armazenado nas embalagens de *pvc* (agitação manual), retirou-se aproximadamente 200g de partículas que foram acondicionadas em recipientes de *pvc* e levados a estufa, aquecida a 60° Celsius, por 72 horas, até que estivessem completamente secas. Então as amostras foram desagregadas manualmente com uso de Pistilo e Graal e em seguida quarteadas, quando uma das frações quarteadas de cada amostra (cerca de 20 g) foi armazenada em béqueres de *pvc*.

Então partiu-se para o processo de eliminação matéria orgânica que foi realizado através da queima por ataque químico utilizando Peróxido de Hidrogênio (H₂O₂) 30 volumes, adicionando o produto diretamente das amostras, dentro dos béqueres e após a agitação manual, elas permaneceram em capela por 48 horas. Em seguida as amostras retornaram para a estufa por mais 72 horas e após este período foram pesadas em balança de precisão. Os fragmentos carbonáticos foram eliminados, pois estas partículas, alteramos resultados granulométricos e morfométricos (arredondamento e esfericidade). O processo de eliminação de carbonatos (CO₃) foi realizado por ataque químico, utilizando Ácido Clorídrico (HCl) diluído em 10%, que foi adicionado às amostras secas e pesadas (~20 g). Posteriormente as amostras foram lavadas com água morna utilizando filtros semiquantitativos, um funil e um Frasco Erlenmeyer para garantir que todo o resíduo químico fosse eliminado. Após esta lavagem, as amostras

retornaram à estufa por mais 72 horas, dentro dos próprios filtros e após a completa secagem, as amostras retornaram para o respectivo béquer (previamente numerado), devidamente lavado, e realizada a pesagem final.

As análises granulométricas foram executadas pelo método de dispersão a laser (Bluewave - MICROTRAC), que estabeleceu com *software* próprio os parâmetros estatísticos granulométricos (Diâmetro médio, grau de Seleção, Assimetria e Curtose; FOLK; WARD, 1957) e morfométricos (grau de arredondamento e esfericidade) necessários para a caracterização sedimentar. Foram utilizadas aproximadamente 2.000 partículas de cada amostra para o cálculo do valor modal que pode ser útil na interpretação do ambiente sedimentar aos quais as partículas pertencem.

A discriminação das formas de relevo pelas características sedimentares se deu, primeiramente, pela análise dos resultados de 3 tipos de agrupamentos das informações estatísticas dos dados granulométricos: 1) K-means (VIEIRA et al., 2008); 2) HeatMap (mapa de calor), ambas através do *software* R, versão 2.3.0 (R Core Team, 2016) e; 3) e posteriormente a análise das curvas de frequência acumulada de cada amostra, entendida como a representação gráfica da distribuição granulométrica dos sedimentos. Todas estas curvas foram sobrepostas na busca de um agrupamento gráfico entre as amostras, que foi realizado no *software* ArcGis 10.8 (ESRI). Desta análise, foram criados 3 grupos com características granulométricas semelhantes e levaram em conta o comportamento gráfico das curvas de frequência das amostras.

3.6. Classificação das formas de relevo

Os critérios que definiram as formas de relevo baseadas nas assinaturas geomorfométricas foram as fundamentadas na definição de critérios de classificação dos parâmetros propostos pelo IPT/Emplasa (1990) e complementarmente, por Ponçano et al. (1981) e Ross (1992), que foram definidos a partir da integração de índices morfométricos básicos (amplitude altimétrica e declividade) por meio da combinação de álgebra de mapas.

Para a determinação dos intervalos das classes morfométricas pelo IPT, foram realizados testes de limites de valores altimétricos considerando que estas formas de relevo (planícies e terraços fluviais) estão associadas às margens de cursos d'água, assim determinou-se 3 classes (Classe 1 = $10 = < -0,5$ m, Classe 2 = $20 = -0,5$ a 1 m e Classe 3 = $20 = > 1$ m). Estes intervalos representam as formas de relevo fluviais na paisagem dentro da própria concepção do índice. Visando a identificação das formas associadas aos ambientes fluviais, e sendo mais um parâmetro de confirmação e refinamento da modelagem digital do relevo pelo IPT, o BTH foi discretizado em 3 classes, também com intervalos métricos observando a concepção do modelo (Classe 1 = $< 1,5$ m, Classe 2 = 1,5 a 3 m e Classe 3 = > 3 m). Assim como na discretização do IPT, a definição destes valores foi realizada a partir de testes limiares que pudessem representar as planícies e terraços fluviais. Portanto a classificação das formas de relevo associadas à dinâmica fluvial foi realizada pela integração dos modelos IPT e BTH, via álgebra de mapas (função soma – Raster Calculator) garantindo que áreas de relevo abrupto (>22 m) fossem excluídas da análise.

A combinação dos modelos IPT e BTH constituiu 9 classes que, após análise destes atributos, foram novamente reclassificadas visando o agrupamento das feições semelhantes, e resultaram em 3 novas classes, o que configurou nas assinaturas geomorfométricas de 3 formas de relevo (**Tabela 2**).

Tabela 2. Assinaturas geomorfométricas das formas de relevo associadas aos ambientes fluviais.

Classes	IPT	BTH	Assinaturas	Forma de relevo
Classe 1	< -0,5	< 1,5	<-0,5 a > 1,5	Planície fluvial
Classe 2	-0,5 a 1	1,5 a 3	>-0,5 a > 1,5	Terraço fluvial
Classe 3	> 1	> 3	> 1 a > 3	Planícies marinhas indiferenciadas

A definição das assinaturas espectrais dos alvos para distinção das formas de relevo foi realizada para a identificação e delimitação das formas de relevo associadas às áreas de influência estuarina e fluvial, que não foram detectadas de forma distinta com o uso dos atributos geomorfométricos. A técnica aplicada para esta etapa foi a da classificação de imagens baseada em objetos que é a metodologia para estudos em imagens de alta resolução. A definição das assinaturas espectrais das formas de relevo foi realizada pela obtenção dos valores de refletância obtidos a partir dos diagramas de dispersão das amostras de treinamento que resultou no mapa de assinaturas espectrais contemplando 2 formas de relevo associadas ao estuário.

A determinação das assinaturas sedimentares das formas de relevo ainda não discretizadas pelas técnicas aplicadas (geomorfometria e processamento digital de imagem), foi realizada, primeiramente, pela comparação das amostras de cada agrupamento criado pelas análises estatísticas no *Software R*, versão 2.3.0 (R Core Team, 2016) (k-means e HeatMap), buscando compreender como tais grupos foram criados, porém estes agrupamentos não indicaram resultados satisfatórios, logo optou-se por realizar um novo agrupamento gerado pela análise do comportamento gráfico das curvas de frequência acumulada das amostras, onde 3 grupos foram criados. Este, permitiu a visualização da distribuição granulométrica de cada amostra, revelando a variabilidade desta distribuição e as amostras com comportamento gráfico semelhante foram agrupadas.

Para a configuração do mapa de formas de relevo pela perspectiva sedimentar, os 3 grupos criados pela comparação das curvas de frequência acumulada foram plotados sob um modelo hipsométrico (2,5 x 2,5 m) interpretadas as suas características em relação aos ambientes sedimentares buscando compreender a gênese de formação de cada feição de relevo associada aos grupos. Os locais onde não haviam sido coletadas amostras, mas que se encontravam na mesma classe altimétrica dos locais foram identificados como as áreas de feições correlatas, resultando em 5 formas de relevo.

4. Resultados e Discussões

Os modelos do IPT e BTH foram aplicados para toda a área de estudos considerando os mesmos parâmetros o que definiu os limites das planícies e dos terraços fluviais. A discretização dos valores (WEISS, 2001) foi realizada a partir de testes limiares que representaram as formas fluviais, que foram certificadas pelas evidências de campo e pela sobreposição com a rede hidrográfica contida na base cartográfica.

Com a combinação dos atributos geomorfométricos foram identificadas 3 classes, duas constituídas por padrões de formas de relevo com gênese fluvial e outra marinha (Figura 3 e Quadro 1). Estes valores foram determinados tendo-se em vista que as feições fluviais não variam mais do que 2 m verticais, entre elas, e estão localizados na transição entre as demais formas de relevo (Planícies, Terraços, Dunas, etc.).

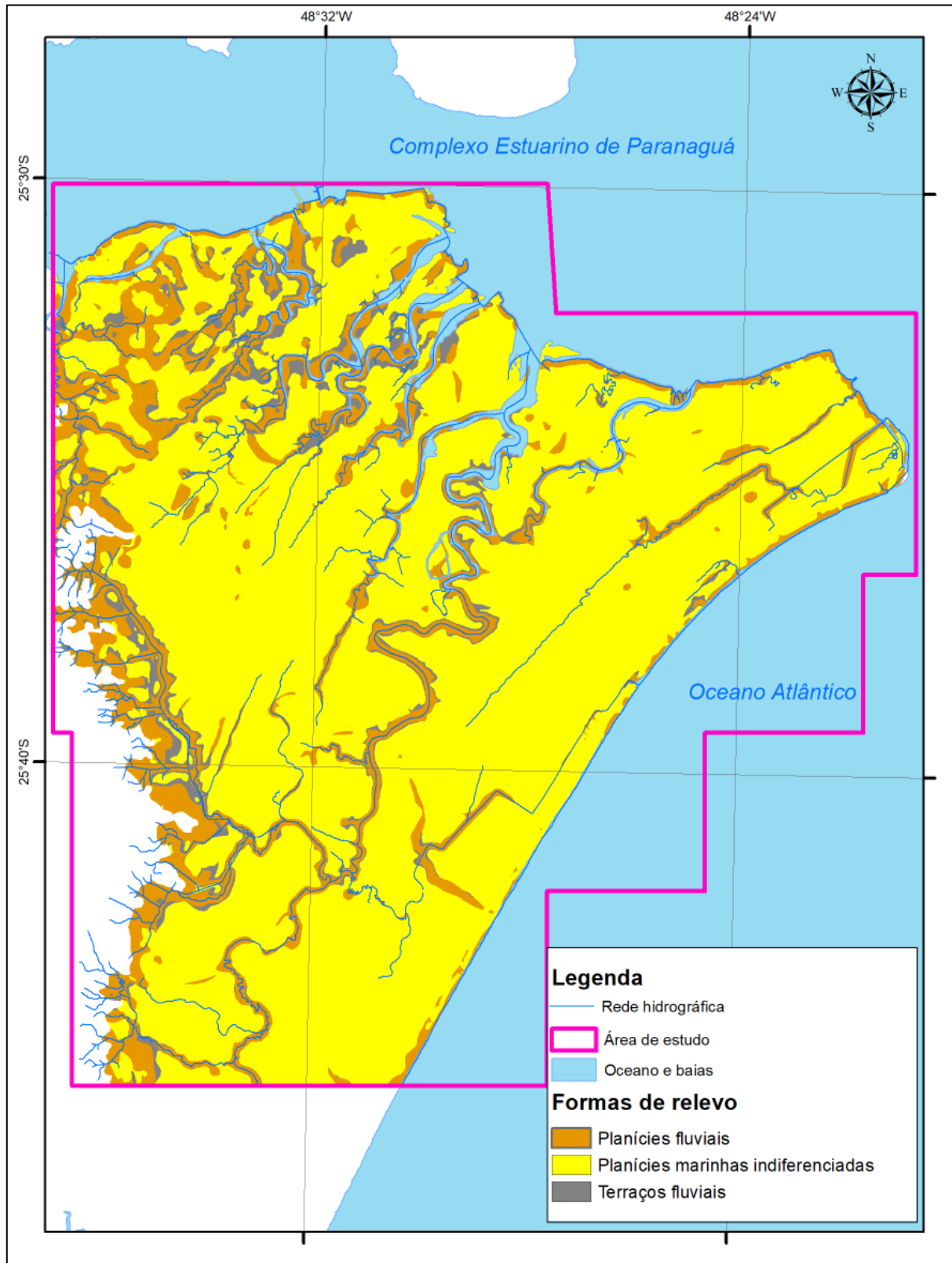


Figura 3. Classes obtidas pela combinação dos atributos geomorfométricos (IPT e BTH) onde podem ser observados os limites das planícies e terraços fluviais da área de estudo.

Quadro 1. Quadro resumo das classes mapeadas pela técnica de Geomorfometria

Classe	Descrição
Planícies fluviais	São as formas de relevo que seguem os canais fluviais (naturais ou não) e possuem assinatura geomorfométrica $<-0,5$ a $>1,5$ m, indiferentes às altitudes em referência ao MDT, acima da calha ou margem fluvial.
Terraços fluviais	São as formas de relevo localizados aproximadamente 1 m acima das planícies fluviais, bordejando-as.
Planícies marinhas indiferenciadas	Classe atribuída às formas de relevo que não obtiveram resultado satisfatório com a técnica de geomorfometria. Assim denominada, para ser alvo de mapeamento por outras técnicas (PDI ou sedimentologia).

As planícies fluviais são as formas de relevo que seguem os canais fluviais (naturais ou não) e possuem assinatura geomorfométrica $<-0,5$ a $>1,5$ m, indiferentes às altitudes em referência ao MDT, acima da calha ou margem fluvial, enquanto os terraços fluviais possuem assinatura $>-0,5$ a $>1,5$ m, localizados aproximadamente 1 m acima das planícies fluviais, bordejando-as (Gráfico 1 e Figura 4).

Gráfico 1. Perfil longitudinal de planície fluvial e terraço fluvial.

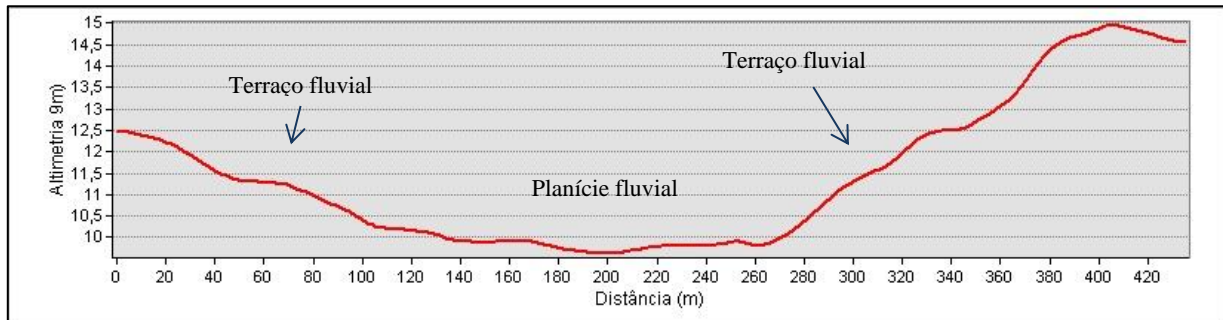


Figura 4. Análise e confirmação em campo da delimitação das planícies e terraços fluviais.

Nas demais áreas, os atributos geomorfométricos não se mostraram suficientemente claros para a distinção das feições por esta técnica, mas foram identificadas genericamente como Planícies Marinhas Indiferenciadas, onde as assinaturas variaram entre > 1 a > 3 m. As assinaturas geomorfométricas distinguidas por esta técnica consideraram as formas pela sua morfometria e que são apresentadas pela combinação dos índices aplicados, e não por sua gênese. Logo, apenas as formas de planície e terraços fluviais foram consideradas, já que podem ser distinguidas das demais pela sua disposição na paisagem, ou seja, associadas aos canais de drenagem (artificiais ou não). A modelagem digital da área de estudo, portanto, somente identificou as formas de relevo considerando os intervalos definidos pelas assinaturas geomorfométricas predeterminadas para as formas de origem fluvial.

Contudo constatou-se que o algoritmo identificou equivocadamente as áreas de origem estuarina como sendo fluviais, pois ambas apresentam a mesma combinação dos valores dos atributos geomorfométricos. De uma forma geral, a classificação destas formas estuarinas não se confirmou nas observações de campo, nem mesmo quando contrastadas com as imagens de satélite. O que se verificou foi que embora os índices tenham obtido êxito no mapeamento das planícies e terraços estuarinos, a área mapeada (Figura 5B) é comparativamente menor que a abrangência real da forma (Figura 5A) que vai além dos limites geomorfométricos definidos para as formas em questão.

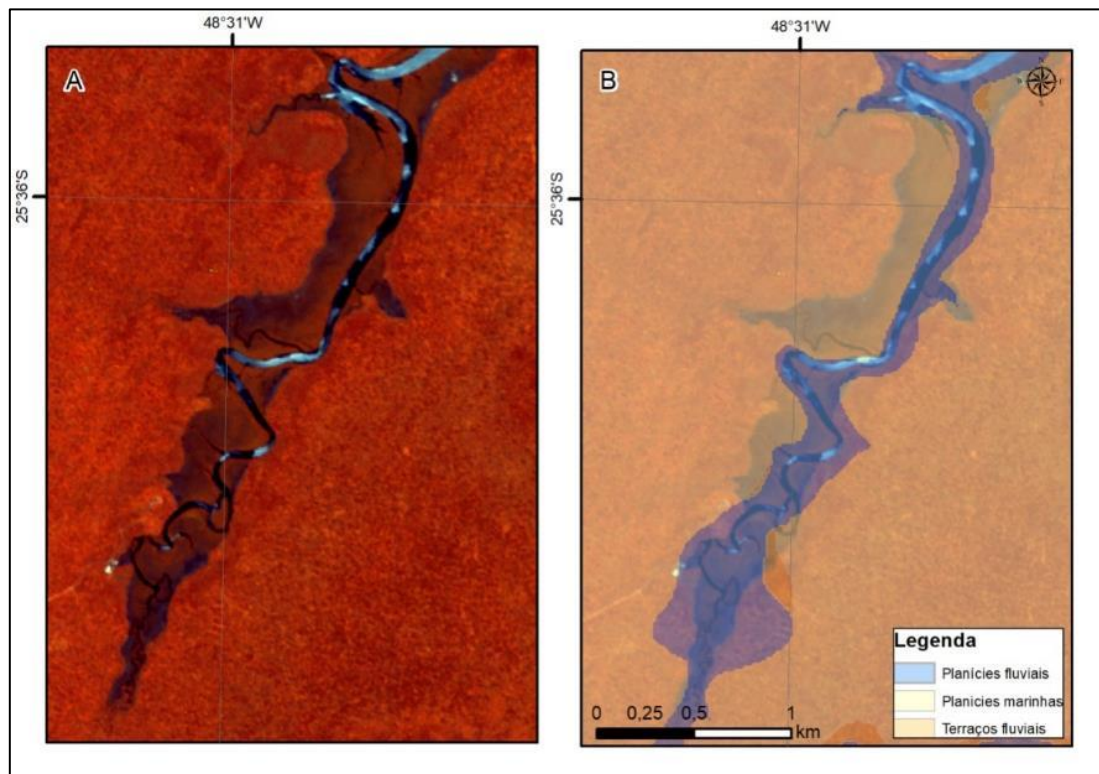


Figura 5. A. Imagem de satélite sobre uma forma estuarina identificada no estudo. B. Classificação geomorfométrica de planícies e terraços sobreposta em transparência à mesma forma estuarina.

As técnicas de modelagem aplicadas não distinguiram estas formas de relevo automaticamente pela técnica da geomorfometria, então buscou-se a identificação pela análise espectral da vegetação que as recobre, partindo-se do princípio de que possuem diferenças espectrais passíveis de serem detectadas por algoritmos sob a imagem de satélite que são distintas das planícies e terraços de origem fluvial. Então as diferenças texturais e de tonalidades identificadas pela análise espectral da vegetação foram determinantes para a delimitação das formas de planícies estuarinas onde a textura foi lisa e a tonalidade mais escura que a observada nos terraços estuarinos (Figura 6) que foram representados por texturas rugosas e tonalidades mais claras.

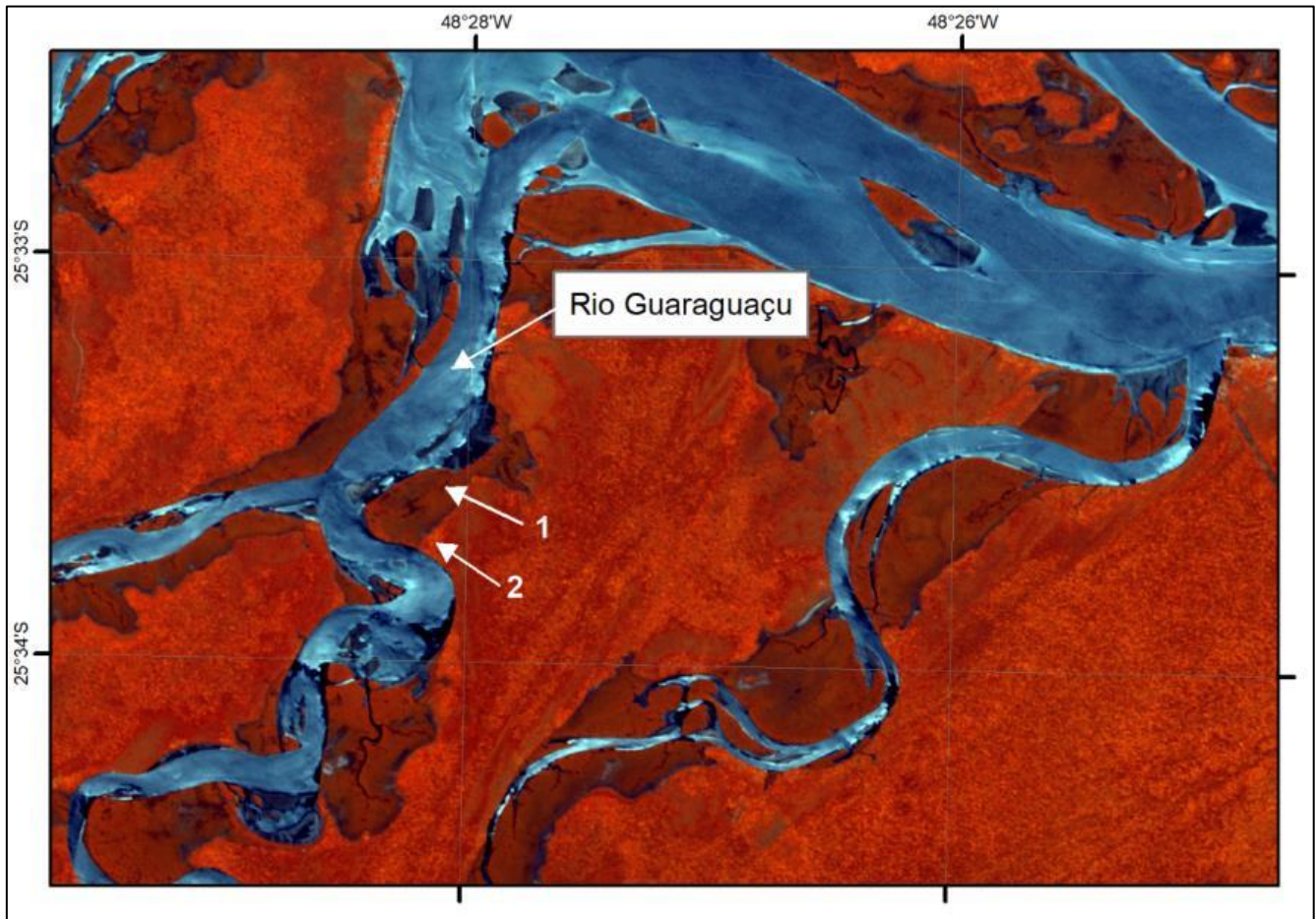


Figura 6. Imagem de satélite RapidEye com composição 5, 4, 3 de uma porção da área de estudos, demonstrando as diferenças de textura e tonalidades da vegetação que recobre as formas de relevo associadas à dinâmica estuarina, onde 1 indica uma porção de planície estuarina e 2, terraço estuarino.

As diferenças espectrais entre as formas, juntamente com as observações de campo das planícies e terraços estuarinos foram os elementos determinantes para criação das áreas de treinamento para o algoritmo, posterior classificação supervisionada e determinação das classes de formas de relevo: 1. Terraços Estuarinos; 2. Planícies Estuarinas, e 3. Planícies indiferenciadas (Figura 7), para que o algoritmo não classificasse equivocadamente formas com mesmas respostas espectrais apesar das diferenças geomorfométricas/espectrais.

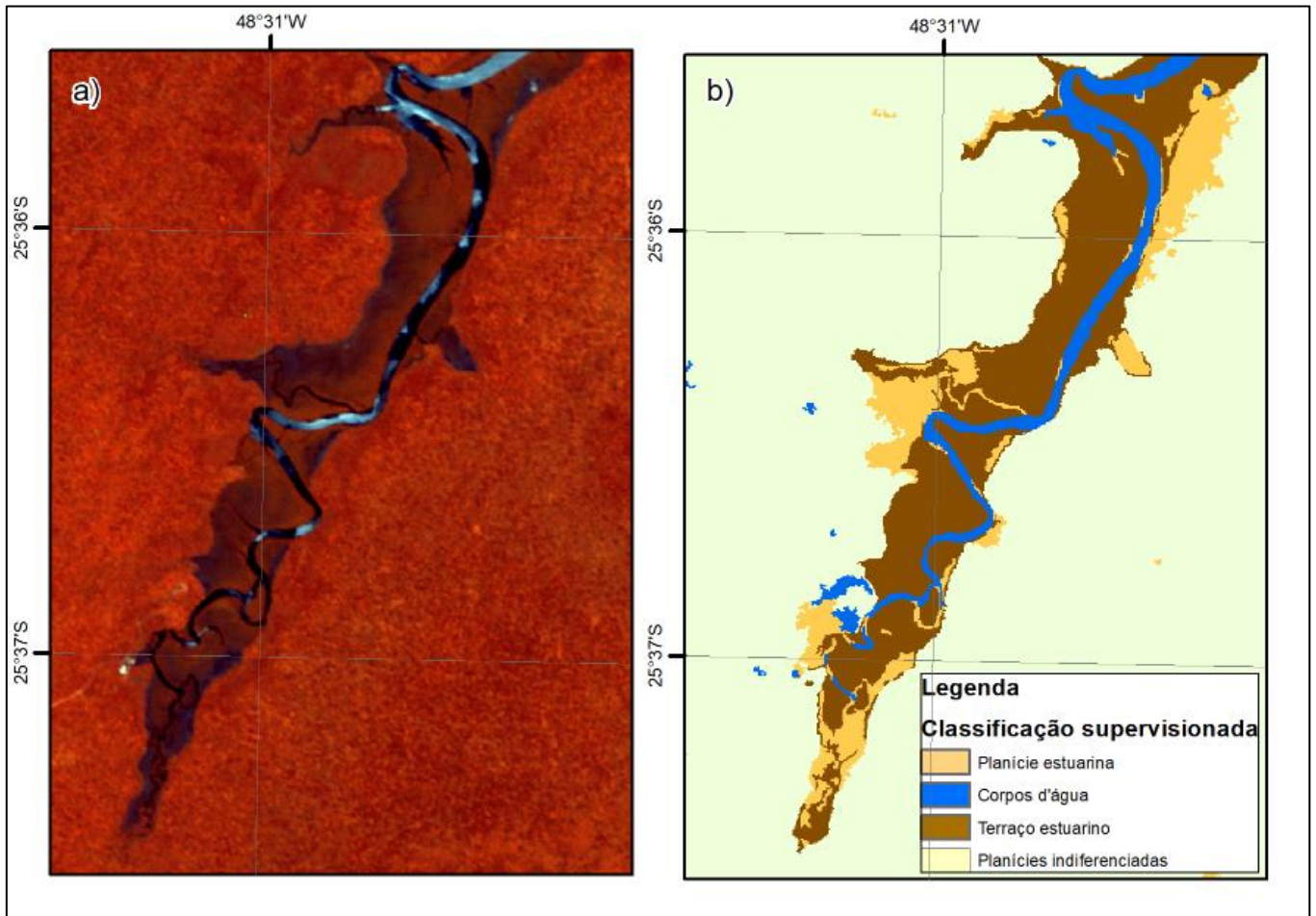


Figura 7. Recorte do resultado da classificação supervisionada orientada ao objeto. Onde: A. Imagem de satélite não classificada e B. Classificação supervisionada das formas de terraços e planícies estuarinas.

As assinaturas espectrais destas formas foram determinadas pelos valores de reflectância de cada objeto mapeado pela banda espectral da composição 5, 4, 3 (Tabela 3), demonstrando as diferenças dos valores espectrais das formas em cada banda, as distinguindo e mapeando consistentemente (Figura 8).

Tabela 3. Assinaturas espectrais das planícies e terraços estuarinos

Feição	B3	B4	B5
Planície Estuarina	2,2279	1,0750	0,5648
Terraço Estuarino	2,5034	1,1263	0,6253

As áreas urbanizadas, por exemplo, foram classificadas pelo algoritmo, como sendo de corpos de água. Pequenas áreas em meio às planícies marinhas, com muita umidade, referente aos brejos intercordões, também foram classificadas como corpos de água. Esta foi a maior limitação deste método, a qual não permitiu correções simples, mesmo quando se decidiu aumentar o número de áreas de treinamento, o que acarretou a fragmentação das entidades.

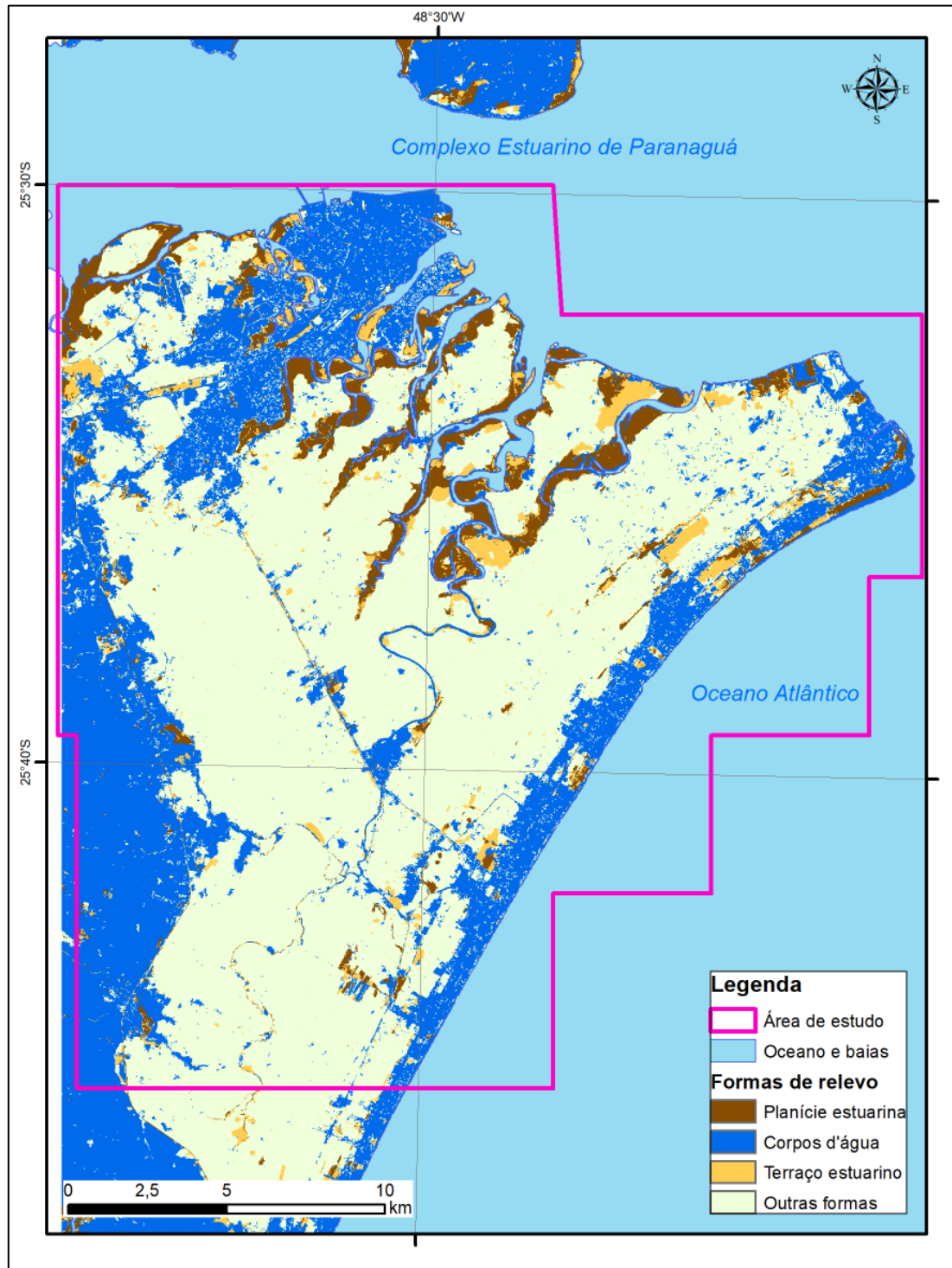


Figura 8. Classes obtidas por meio da classificação orientada a objetos sobre imagem de satélite RapidEye, onde podem ser observados os limites das planícies e dos terraços estuarinos na área de estudo.

As imagens do sensor RapidEye na composição RedEdge (infravermelho próximo e abanda vermelha) foram determinantes da detecção das nuances de umidade na vegetação que recobre as formas de relevo. Os testes com outras formas, como por exemplo, sobre as planícies e terraços marinhos, não obtiveram o mesmo resultado, pois o porte vegetacional generalizadamente semelhante impediu a distinção dos níveis de umidade. Logo as feições de origem marinha/eólica, não puderam ser mapeadas por nenhuma das técnicas aplicadas até então, direcionando os esforços da pesquisa para o reconhecimento e mapeamento das feições por outras técnicas.

Neste sentido a sedimentologia foi selecionada como uma via exploratória possível para a solução deste problema metodológico, já que os diferentes ambientes e formas de deposição esculpem e selecionam as partículas sedimentares semelhantes em cada processo. Assim as assinaturas sedimentares da planície costeira foram usadas para a distinção de formas pela análise da distribuição das características granulométricas e a morfometria das partículas. As amostras foram coletadas em locais onde perduravam as dúvidas sobre a compartimentação geomorfológica e os critérios sedimentares foram definidos após a investigação detalhada dos parâmetros que representam características sedimentares semelhantes das formas de relevo (Figura 9).

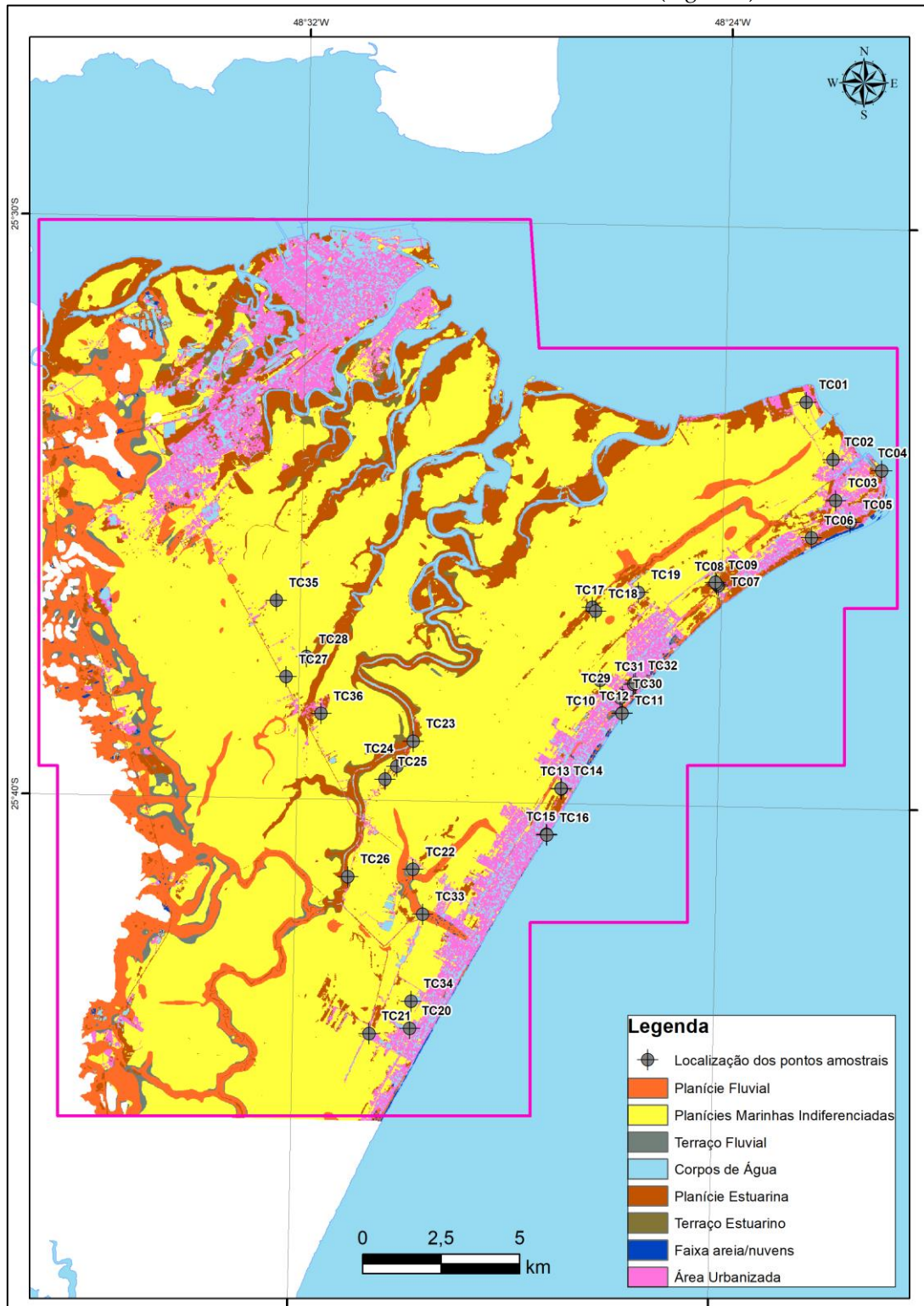
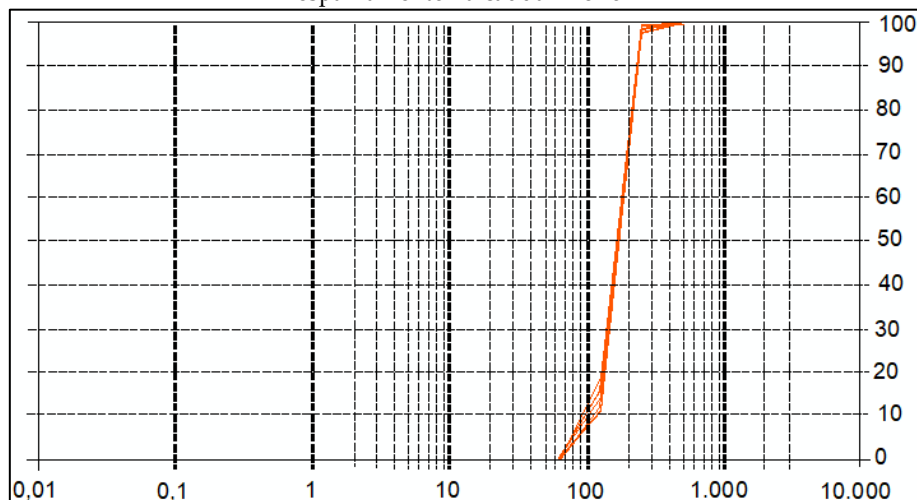


Figura 9. Mapa das assinaturas morfométricas e espectrais e localização dos pontos amostrais.

Em princípio as análises estatísticas realizadas com o *software* R não demonstraram bons resultados quanto a representação das formas de relevo, pois apresentaram agrupamento de amostras que não compactuaram com a realidade de campo. O que se verificou através da análise das curvas de frequência acumulada de cada grupo de cada algoritmo, foi que os agrupamentos não apresentaram um comportamento regular das curvas, indicando um desvio padrão muito alto entre as frações de sedimentos. A sobreposição das curvas de frequência dos agrupamentos também não revelou similaridades evidentes, e estas constatações foram fundamentais para a tomada de decisão de que nenhum dos agrupamentos (k-Means ou HeatMap) seriam utilizados na determinação das assinaturas sedimentares da área de estudos, logo, este método não se mostrou satisfatório. Assim, o agrupamento através da análise gráfica das curvas de frequência acumulada das amostras foi a opção escolhida para a delimitação das assinaturas sedimentares, que é uma das ferramentas mais usuais quando se almeja comparar populações, pois é a representação gráfica da distribuição granulométrica dos sedimentos. Logo, foram determinados 3 grupos que foram associados às formas de relevo ainda não identificadas pelas outras técnicas de mapeamento.

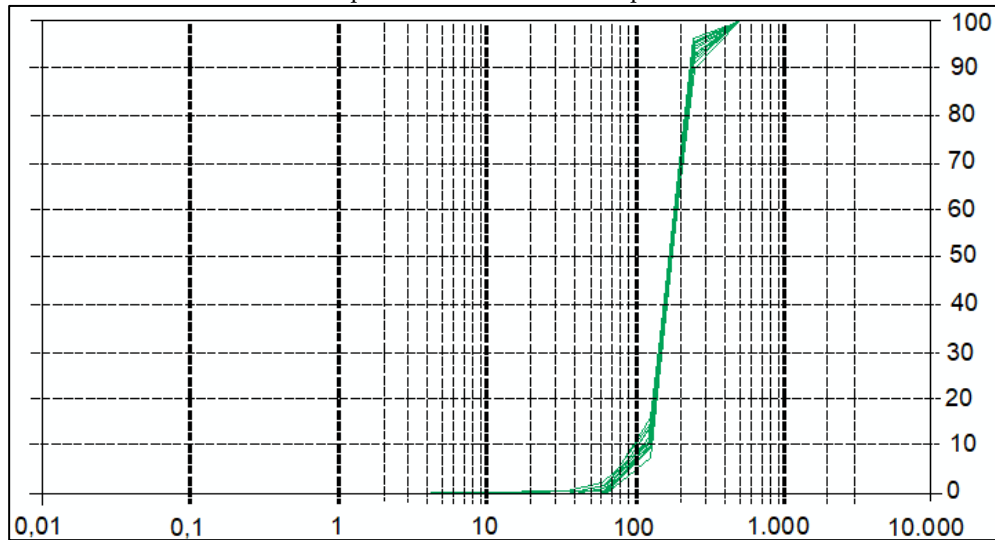
O Grupo 01 contemplou 9 amostras, compostas por areias finas (85,50%), areias muito finas (2,61%) e areias médias (1,20%), muito arredondadas e muito esféricas, bem selecionadas e muito bem selecionadas com curvas de distribuição diferentes, mesocúrtica e leptocúrticas e com graus de assimetria diferentes, negativas e aproximadamente simétricas. As curvas de frequência acumulada das amostras (Gráfico 2) indicou um comportamento modal das areias finas e a curva superior muito coincidentes, já que a variação de areias finas e médias é praticamente o mesmo em todas estas amostras, mas há espalhamento na cauda inferior, o que é justificado pela concentração desigual de areias muito finas. A análise do desvio padrão das frações das areias médias indicou o valor de desvio de 0,84, 2,13 das areias finas, 2,46 das areias muito finas, 2,46 e 0,13 dos siltes grossos, o que justifica a sobreposição das curvas no gráfico (areias finas) e o espalhamento na cauda inferior (areias muito finas e silte grosso).

Gráfico 2. Curvas de frequência acumulado do grupo 01. Curvas com comportamento modal semelhante, mas há espalhamento na cauda inferior



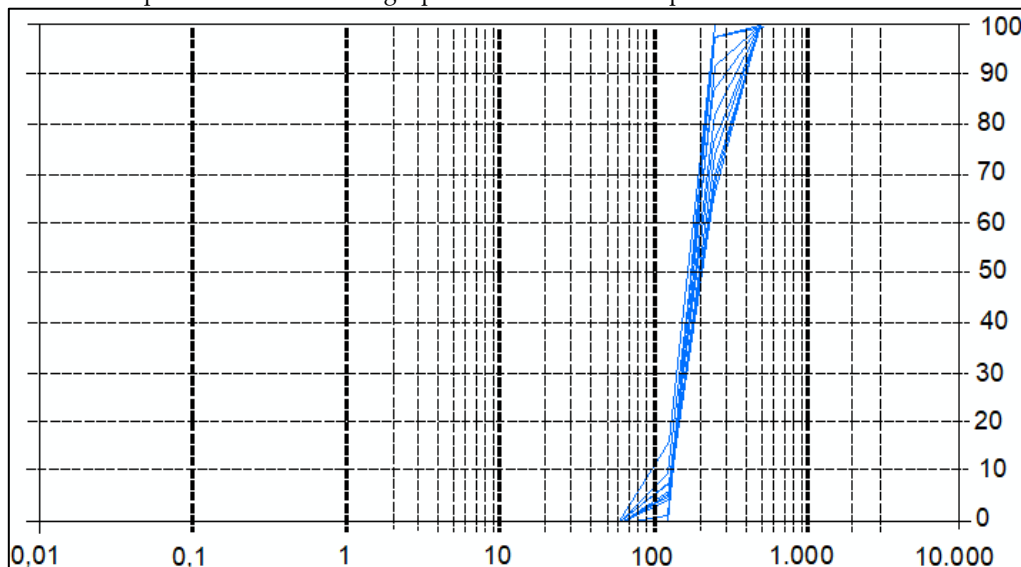
O Grupo 02 contemplou 16 amostras compostas por areias finas (82,92%), areias muito finas (10,63%), silte grosso (0,32%) e areias médias (6,08%), muito arredondadas e muito esféricas, bem selecionadas e moderadamente selecionadas com curvas de distribuição diferentes, platicúrticas, mesocúrticas e leptocúrticas, com graus de assimetria diferentes, positivas, negativas e aproximadamente simétricas. O comportamento das curvas de frequência acumulada das amostras desta fácies (Gráfico 3) indicou um comportamento modal semelhante, mas não coincidente, ou seja, as curvas não estão exatamente sobrepostas, fato que ocorre nas caudas superiores e inferiores que se apresentam espalhadas. A análise do desvio padrão das frações das areias médias indicou o valor de desvio de 2,25, das areias finas, 2,81 e das areias muito finas, 2,23. Já o silte grosso, está presente em somente em 4 amostras e em pequenas proporções, evidenciado pelas curvas inferiores do gráfico.

Gráfico 3. Curvas de frequência acumulado do grupo 02. Curvas com comportamento modal semelhante, mas não coincidente, com espalhamento nas caudas superior e inferior.



O Grupo 03 contemplou 11 amostras compostas por areias finas (70,35%), areias muito finas (4,78%) e areias médias (24,81%), muito arredondadas e muito esféricas, muito bem selecionadas, bem selecionadas e moderadamente selecionadas com curvas de distribuição diferentes, platicúrticas, mesocúrticas e a leptocúrticas, e com graus de assimetrias diferentes, positivas, negativas e aproximadamente simétricas. As curvas de frequência acumulada das amostras (Gráfico 4) indicou um comportamento modal distinto, não coincidente, ou seja, nenhuma curva se sobrepõe fato que também ocorre nas caudas superiores e inferiores. A análise do desvio padrão das frações das areias médias indicou o valor de desvio de 21,67, 21,67 das areias finas e 21,74 das areias muito finas, o que justifica o espalhamento das curvas no gráfico.

Gráfico 4. Curvas de frequência acumulada do grupo 03. Curvas com comportamento modal distinto e não coincidente.



Apesar das similaridades das curvas de frequência acumulada dos grupos 01 e 02, quando espacializados sob o modelo hipsométrico (Figura 10) verificou-se que não há correlação espacial entre as amostras dos grupos, indicando que dentro de um mesmo grupo, há formas de relevo diferentes, demonstrando que este método também não se mostrou satisfatório.

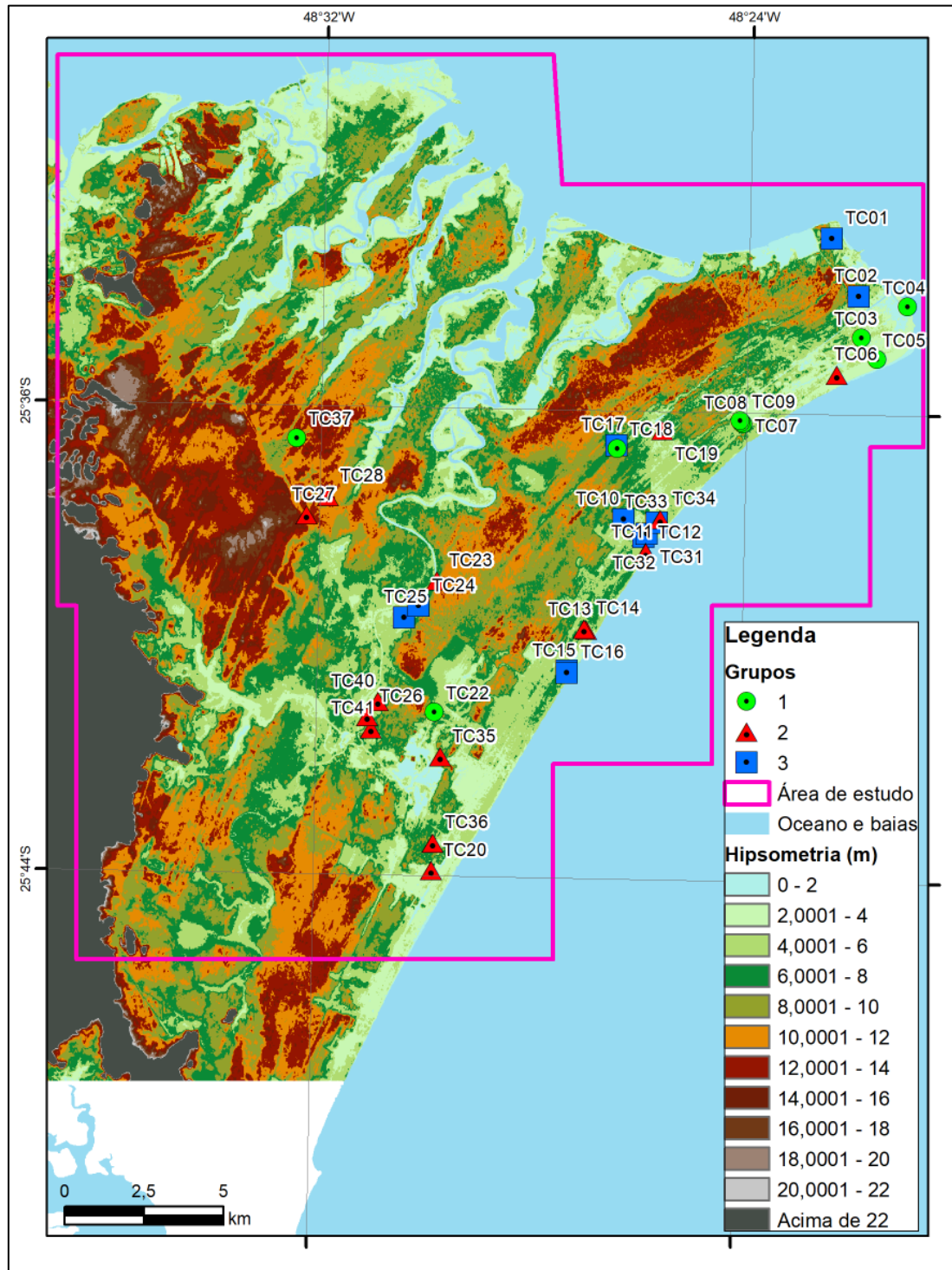


Figura 10. Pontos dos 3 agrupamentos criados pela sobreposição das curvas de frequência acumulada das amostras sobrepostos ao modelo hipsométrico baseado no MDT (ITCG, 2016).

A individualização das formas de relevo pelos grupos criados pela sobreposição das curvas de frequência acumulada também não foi possível, pois não havia correlação entre os grupos e as formas de relevo associadas. Portanto esta análise foi realizada considerando cada amostra individualmente, onde a correlação com outras semelhantes e que correspondiam ao mesmo tipo de forma de relevo. Logo, o entendimento foi de que o controle do tipo de sedimento é dado pelo tipo de feição e não o contrário do que se imaginava na hipótese inicial deste trabalho. Assim, a hipsometria e a declividade da área de estudos foram utilizadas como critérios balizadores das

interpretações das formas de relevo e juntamente com as características sedimentares, definiram o mapa geomorfológico da porção central planície costeira do Paraná.

Após a identificação das características sedimentares das formas de relevo, analisou-se as descrições realizadas por Bigarella et al. (1978), Tessler e Suguio (1987), Martin et al. (1988) e por Angulo (1992; 2004), e fez-se a associação de cada ponto amostral às formas de relevo avaliadas em campo, pela interpretação do modelo hipsométrico e por sua declividade. Os locais onde não havia pontos amostrais, mas que apresentavam as mesmas características hipsométricas e de declividade dos locais amostrados, foram classificadas com as mesmas formas de relevo.

As paleodunas foram interpretadas como as formas de relevo que possuem declividades variando entre 8 e 20%, altimetrias que acima de 5 até 10 m, localizadas muito próximas a faixa de praia atual e ocupam 0,34% da área mapeada e que estão recobertas vegetação parcial/totalmente, não havendo mais movimentação nem aporte sedimentar atual, porém suas formas foram preservadas. Possuem formas alongadas e em alguns pontos, apresentam-se isoladas em meio às planícies marinhas. São compostas por areias finas (71,25%), muito finas (7,44%), médias (20,79%) e silte grosso (0,50%) muito arredondadas e muito esféricas, bem selecionadas com curvas de distribuição mesocúrtica, leptocúrtica e platicúrtica, e com graus de assimetria diferentes, negativas, positivas e aproximadamente simétricas.

Os terraços marinhos foram interpretados como formas de relevo que possuem declividade 0 a 8%, podendo chegar a 20% nas porções mais altas. São formas de relevo deposicionais, mais elevadas da planície costeira com altimetrias acima de 8 m podendo alcançar até 22 m nas regiões interiorizadas da área de estudos e ocupam 37,36% da área. Apresentam cordões regressivos/transgressivos menos expressivos que os cordões das planícies marinhas, recobertos por vegetação arbórea/arbustiva densa. São compostos por areias finas (15,08%), muito finas (0,45%) e médias (84,48%) muito arredondadas e muito esféricas, bem selecionadas com curvas de distribuição mesocúrtica, e com graus de assimetria aproximadamente simétrica.

As planícies marinhas com cordões litorâneos são as formas de relevo que se apresentam suavemente inclinadas, variando de 0 a 8% com ondulações que mostram as posições dos cordões e intercordões litorâneos. São caracterizadas por extensas áreas planas recobertas por vegetação arbustiva/herbácea e cotas altimétricas não ultrapassaram os 8 m e ocupam 10,78% da área de estudos. São compostas por areias finas (86,13%), muito finas (10,24%), médias (3,47%) e siltes grossos (0,07%) muito arredondadas e muito esféricas, bem selecionadas, moderadamente selecionadas e muito bem selecionadas com curvas de distribuição mesocúrtica, leptocúrtica e platicúrtica, com graus de assimetria diferentes, negativa, positiva e aproximadamente simétrica.

As planícies estuarinas são as formas de relevo com declividade de 0 a 3% e cotas acima de 2 até 6 m, possuem origem atribuída às oscilações do Nível Relativo do Mar (NRM), e atualmente estão sob a ação fluvial de rios costeiros com influências das correntes de maré, representando 15,98% da área de estudos. São compostas por areias finas (79,39%), muito finas (10,77%), médias (9,70%) e siltes grossos (0,11%) muito arredondadas e muito esféricas, bem selecionadas com curvas de distribuição mesocúrtica, mas com graus de assimetria diferentes, negativa e aproximadamente simétrica.

Os terraços estuarinos estão localizados nas altimetrias acima de 6 até 8 m, representando 8,43% da área de estudos, porém esta feição não foi alvo de coleta de amostras, já que a mesma, foi definida pela assinatura espectral. As características sedimentológicas das feições, exceto dos terraços marinhos, possuem uma proporção de areias finas acima de 70% em todas as amostras, sendo que as planícies marinhas apresentaram porcentagem acima de 86%. Os siltes grossos não aparecem nas amostras dos terraços marinhos, onde a concentração de areias médias é predominante (acima de 84%).

A utilização das assinaturas geomorfométricas, espectrais e sedimentares permitiu individualmente a identificação de classes que se complementam. A combinação resultou na classificação de unidade de relevos que permitiu a composição de um mapa geomorfológico da porção central da planície costeira do Paraná (Figura 11). Sobre a composição da legenda, as unidades de relevo mapeadas foram associadas as suas gênese distintas, denominadas de morfogênese e a composição de cada classe, referem-se a morfografia do ambiente (Quadro 2).

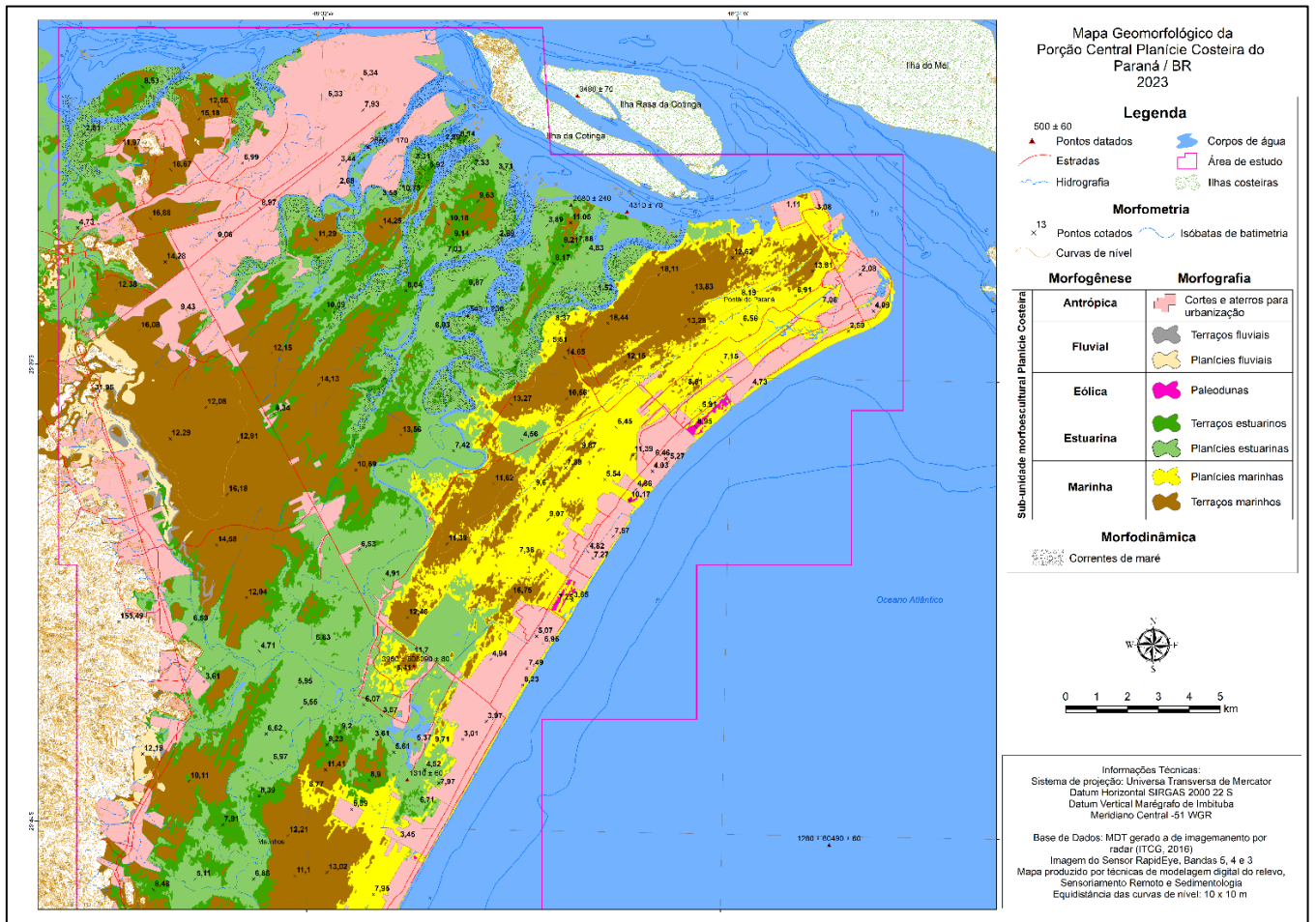


Figura 11. Mapa Geomorfológico da Porção Central da Planície Costeira do Paraná/PR.

Quadro 2. Classes mapeadas de acordo com a técnica empregada e breve descrição.

Classe	Técnica empregada	Descrição
Planícies fluviais	Geomorfometria	São as formas de relevo que seguem os canais fluviais (naturais ou não) e possuem assinatura geomorfométrica de $<-0,5$ a $>1,5$ m, indiferentes às altitudes em referência ao MDT, acima da calha ou margem fluvial.
Terraços fluviais	Geomorfometria	São as formas de relevo localizados aproximadamente 1 m acima das planícies fluviais, bordejando-as, com assinatura geomorfométrica de $>-0,5$ a $>1,5$ m
Paleodunas	Sedimentologia	São as formas de relevo que possuem declividades variando entre 8 e 20%, altimetrias que acima de 5 até 10 m, localizadas muito próximas a faixa de praia atual e que estão recobertas por vegetação, não sendo mais movimentadas nem aportadas por sedimentos atuais, mas suas formas foram preservadas.
Planícies estuarinas	PDI	Apresentam declividade de 0 a 3% e cotas acima de 2 até 6 m, possuem origem atribuída às oscilações do Nível Relativo do Mar (NRM), e atualmente estão sob a ação fluvial de rios costeiros com influências das correntes de maré.
Terraços estuarinos	PDI	São as formas localizadas nas altimetrias acima de 6 até 8 m, bordejando as planícies estuarinas. Possuem origem atribuída às oscilações do Nível Relativo do Mar (NRM), e atualmente não sofrem influência das correntes de maré.
Planícies marinhas	Sedimentologia	São formas que se apresentam suavemente inclinadas, variando de 0 a 8% com ondulações que mostram as posições dos cordões e intercordões litorâneos e estão recobertas por vegetação arbustiva/herbácea.

Terraços marinhos	Sedimentologia	São formas que apresentam declividade 0 a 8%, podendo chegar a 20% nas porções mais altas. São formas de relevo deposicionais, mais elevadas da planície costeira com altimetrias acima de 8 m podendo alcançar até 22 m nas regiões interiorizadas da área de estudos. Apresentam cordões regressivos/transgressivos menos expressivos que os cordões das planícies marinhas e estão recobertos por vegetação arbórea/arbustiva densa.
-------------------	----------------	---

5. Conclusões

O uso das ferramentas de geomorfometria e processamento digital de imagem (PDI), quando aplicadas sobre produtos cartográficos com alta resolução espacial mostrou-se eficaz na identificação das diferenças sutis, tanto morfométricas, como espectrais das formas de relevo costeiras. Na perspectiva geomorfométrica, o uso desta técnica não é novidade no mapeamento geomorfológico, mas ainda não havia sido testada em ambientes com pequenas diferenças altimétricas com as áreas costeiras. O mapeamento destas das formas de relevo foi possível devido à utilização de um MDT de alta resolução, o que conferiu o mapeamento das formas de relevo dos ambientes fluviais.

Na perspectiva do PDI, também foi possível obter uma assinatura espectral das formas de relevo de origem estuarina, graças ao uso de imagem com a banda espectral Red Edge que foi fundamental para a detecção das diferenças no teor de umidade das áreas mais sucessíveis a alagamentos periódicos. Além disso, estas imagens podem ser obtidas gratuitamente dentro do ambiente acadêmico, o que pode ser acessado por qualquer pesquisador.

Sobre as assinaturas sedimentares, apesar de poucas amostras coletadas e analisadas, foi possível realizar a distinção das assinaturas que cada forma de relevo e replicá-las as demais áreas com características hipsométricas e de declividade semelhantes, e isso só foi possível graças a um MDT com alta resolução espacial. Porém, as análises estatísticas realizadas, que buscaram um agrupamento automático não foram determinantes na definição das formas de relevo, demonstrando que o uso indiscriminado desta metodologia, pode trazer resultados incoerentes com a realidade de campo. Neste caso permanecem os conceitos tradicionalmente aplicados no reconhecimento de populações sedimentares, onde as curvas de frequência acumulada descrevem em detalhes as espécies sedimentológicas que se diferenciam pelos processos de erosão, transporte e deposição nos ambientes costeiros quaternários. Destaca-se então que a definição das assinaturas sedimentares foi possível graças a uma análise detalhada das curvas de frequência acumulada de cada amostra e devido ao fato de as formas de relevo possuírem características de declividade e hipsométricas regulares, o que pode ser extrapolado para as áreas não amostradas.

Nenhuma das técnicas aplicadas isoladamente proporcionou um resultado satisfatório na classificação das formas de relevo, mas a união delas pode ser considerada um método com boas perspectivas de subsídio à cartografia geomorfológica de detalhe e tem potencial de ser replicado para demais ambientes de planície costeira principalmente do Paraná, desde que os mesmos materiais (imagens de satélite e MDT) sejam empregados na análise.

Assim, a metodologia proposta utiliza 3 técnicas de mapeamento que em conjunto, podem resolver os problemas de mapeamento de unidades de relevo com gênese distintas. Cada técnica empregada complementa as deficiências da outra, onde a geomorfometria mapeou as unidades de relevo de gênese fluvial, as respostas espectrais da vegetação mapearam as de gênese estuarina e a sedimentologia as de gênese eólica e marinha.

A busca pela automatização dos processos de obtenção de classificação de formas de relevo ainda não é possível, mas o resultado aqui apresentado demonstrou que a aplicação conjunta de diferentes técnicas permitiu o aprimoramento e maior detalhe, representado de modo fidedigno, das formas do relevo costeiro da porção central do litoral do Estado do Paraná.

Por fim, a expectativa é de que o presente trabalho possa também contribuir, no momento oportuno, com a construção do Sistema Brasileiro de Classificação do Relevo (SBCR), em especial ao longo dos próximos anos, quando os táxons mais detalhados estiverem sendo discutidos e formulados.

Contribuições dos Autores: Todos os autores participaram do desenvolvimento de todas as etapas da pesquisa.

Agradecimentos: Ao CNPq pelo recurso de fomento ao projeto de pesquisa “Desenvolvimento Metodológico e Aplicações Modelagem Digital do Terreno e Mapeamento Geomorfológico”. À CAPES pela concessão de bolsas PROEX de doutorado para a realização da pesquisa, obtida por meio do Programa de Pós-Graduação UFPR.

Conflito de Interesse: Os autores declaram não haver conflito de interesse.

Referências

1. ANGULO R.J. **Ambientes de sedimentação da planície costeira com cordões litorâneos no Estado do Paraná**. Bol. Par. Geoc. Curitiba, 40:69-114. 1992.
2. ANGULO, R. J. **Mapa do Cenozóico do Litoral do Paraná**. Boletim Paranaense de Geociências, Editora UFPR. n. 55, p. 25-42, 2004.
3. ANGULO, R. J.; LESSA, G. C.; SOUZA, M. C. **A critical review of mid- to late-Holocene sea-level fluctuations on the eastern Brazilian coast line**. Quaternary Science Reviews. V 25, Issues 5–6, p. 486-506, 2006.
4. ÂNGULO, R.J., LESSA, G.C., SOUZA, M.C. The Holocene barrier systems of Paranaguá and northern Santa Catarina coasts, Southern Brazil. In: Dillenburg S.R., Hesp P.A. (org) Geology and geomorphology of Holocene coastal barriers of Brazil, Lecture Notes in Earth Sciences. Springer-Verlag, Berlin, 107:135-176. 2009
5. BARBOSA, G. V.; SILVA, T. C.; NATALI FILHO, T.; DEL'ARCO, D. M.; COSTA, R. C. R. Evolução da metodologia para mapeamento geomorfológico do Projeto Radambrasil. **Boletim Técnico, Série Geomorfologia**. Salvador n. 1, 187 p., 1984.
6. BIGARELLA J.J.; BECKER R.D.; MATOS D.J. de; WERNER A. (Ed.). **A Serra do Mar e a porção oriental do Estado do Paraná: um problema de segurança ambiental e nacional**. Curitiba: Governo do Paraná/SEPL/ADEA. 249 p. 1978.
7. BIGARELLA, J. J. **Contribuição ao Estudo da Planície Litorânea do Estado do Paraná**. Arquivos de Biologia e Tecnologia, v. 1, pp. 75-111, 1946. In: Brazilian Archives of Biology and Technology. Jubilee Volume (1946-2001): pp. 65 - 110, December, 2001. ISSN 1516-8913.
8. BISHOP, M. P.; JAMES, A.; SHRODER, J. F.; WALSH, S. J. **Geospatial Technologies and geomorphological mapping: concepts, issues and research directions**. Geomorphology. 137, p. 5–26, 2012.
9. CARVALHO, T.M; LATRUBESSE, E. (2004). **Aplicação de modelos digitais do terreno (MDT) em análises macrogeomorfológicas: o caso da bacia hidrográfica do Araguaia**. Revista Brasileira de Geomorfologia. Ano 5, Nº 1 (2004) 85-9. CHAVEZ, P.S. **An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data**. Remote Sensing of Environment, v. 24, n.34, p. 59-479, 1988.
10. COLTRINARI, L. **Geomorfologia e Dinâmica Quaternária no Sudeste do Brasil**. Revista do Departamento de Geografia, 6, 7-16. 2011. <https://doi.org/10.7154/RDG.1992.0006.0001>
11. COLWELL, J. E. **Vegetation canopy reflectance**. Remote Sensing of Environment, 3: 175–183. 1974.
12. COMERLATO, T.; LAMOUR, M. R.; SILVEIRA, C. T. **Mapeamento digital de formas de relevo no ambiente costeiro do Paraná**. Revista Caminhos de Geografia. Uberlândia. v. 21, n. 73. p. 477 - 491. Mar., 2020. <http://doi.org/10.14393/RCG217349608>
13. COMITÊ EXECUTIVO NACIONAL – CEN/SBCR. Breve estado da arte do Sistema Brasileiro de Classificação de Relevo (SCBR): contribuições de e para a sociedade científica geomorfológica. **Revista Brasileira de Geografia**, Rio de Janeiro, v. 67, n. 2, p. 212-227, 2022.
14. DRAMIS, F.; DOMENICO, G.; ANTONELLO, C. **Nature and Aims of Geomorphological Mapping**. In: SMITH, M. J.; PARON, P.; GRIFFITHS, J. eds. Geomorphological Mapping: Methods and Applications, Developments in Earth Surface Processes vol 15, Elsevier, 2011.
15. DUTRA, L.V.; SOUZA, R.C.M.; MITSUO, F.A.; MOREIRA, J.C. **Análise automática de imagens multiespectrais**. São José dos Campos: INPE, 1981. (INPE-2212-MD/009).
16. Esri Inc. **ArcMap (versão 10.8)**. Redlands, Estados Unidos, 2018.
17. GOLFARI, L.; CASER, R. L.; MOURA, V. P. G. **Zoneamento ecológico esquemático para reflorestamento no Brasil (2ª aproximação)**. Belo Horizonte: Centro de Pesquisa Florestal da Região do Cerrado, 1978. 66 p. (PRODEPEF. Série Técnica, 11).
18. IAT. Instituto Água e Terra. **Plano da bacia hidrográfica litorânea**. Produto 1: Caracterização geral. Revisão final, Agosto 2019. Disponível em: <http://www.iat.pr.gov.br/Pagina/Comite-da-Bacia-Litoranea>. Acesso em 04/01/2022.
19. IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual Técnico de Geomorfologia**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 175 p., 2009.
20. IBGE. **Relatório Técnico 1º Workshop sobre o Sistema Brasileiro de Classificação de Relevo**. Rio de Janeiro: IBGE, 2020. 77p. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101731.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2023.

21. IPT. **Carta de aptidão física ao assentamento urbano, escala 1:50.000 - guia de utilização**. São Paulo: IPT/ Emplasa, 1990.
22. ITCG. **Modelo Digital de Terreno**, escala: 10.000. Relatório final do projeto. BRADAR - Embraer Defesa & Segurança. Secretaria do Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Paraná – SEMA – PR. 2016
23. KLIMASZEWSKI, M. **The principles of the geomorphological map of Poland**. Geographical Studies, n. 46 (Problems of geomorphological mapping), p. 67-72, 1963.
24. KOHLER, H. **A Escala na Análise Geomorfológica**. Nº. 3. 21-31. 10.20502/rbg.v3 i 1.12, 2002.
25. LANA, C. E.; CASTRO, P. T. A. **Análise sedimentológica e de proveniência de sedimentos fluviais nas cabeceiras do rio das Velhas, município de Ouro Preto, MG**. Revista Escola de Minas. vol.61, n.1, Ouro Preto, Jan./Mar. 2008.
26. LANA, P. C.; MARONE, E.; LOPES, R. M.; MACHADO, E. C. **The subtropical estuarine complex of Paranaguá Bay**. In: SEELIGER, U.; KJERFVE, B. (Ed.). Coastal Marine Ecosystem of Latin America. Berlin, Springer, p. 132-145. 2001.
27. MARTIN L.; SUGUIO K.; FLEXOR J.M.; AZEVEDO A.E.G. **Mapa geológico do Quaternário costeiro dos Estados do Paraná e Santa Catarina**. Série Geol. DNPM. Brasília, n. 28, 40 p., 2 mapas. 1988.
28. NEMES, D. D.; MARONE, E. **Caracterização das ondas de superfície na plataforma interna do Estado do Paraná, Brasil**. Boletim paranaense de geociências. V. 68-69, 2013.
29. NUNES, B. A; RIBEIRO, M. I. C; ALMEIDA, V. J; FILHO, T. N. **Manual técnico de geomorfologia**. Manuais técnicos em geociências, n 5, 1995.
30. OKA-FIORI, C.; CANALI, N. E.; KOZCIK, S. Mapeamento geomorfológicos e hidrográfico do litoral sul. In: Meio ambiente e desenvolvimento no litoral do Paraná: Subsídios à ação. Org: Raquel R. B. Negrelle e Renato Eugenio de Lima. Editora NIMAD – UFPR. 2002.
31. OKA-FIORI, C., SANTOS, L.J.C., CANALI, N.E., FIORI, A.P., SILVEIRA, C.T., SILVA, J.M.F., ROSS, J.L.S. Atlas geomorfológico do estado do Paraná: Escala base 1:250.000 modelos reduzidos 1:500.000. Curitiba, Minerais do Paraná SA. - MINEROPAR; Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2006. 59p.
32. OTTO, J. C.; SMITH, M. J. **Geomorphological Mapping**. Geomorphological Techniques, cap. 2, seção 6, p. 1-10, British Society for Geomorphology, 2013.
33. PIKE, R. J. **Geomorphometry – diversity in quantitative surface analysis**. Progress in Physical Geography 24 (1), 1–20, 2000.
34. PIKE, R. J.; EVANS, I.; HENGL, T. **Geomorphometry: A Brief Guide**. In: HENGL, T.; REUTER, H. I. (eds.) Geomorphometry - Concepts, Software, Applications, Series Developments in Soil Science vol. 33, Amsterdam: Elsevier, pp. 3-30, 2009.
35. PONÇANO, W. L. (Coord.) et al. **Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo**. São Paulo: IPT, 2 v. (Publicação IPT, 1 183; Monografias, 5). 1981.
36. R Core Team. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. Vienna, Áustria, 2020. Disponível em: <<http://www.R-project.org/>>.
37. ROSS, J. L. S. **O registro cartográfico dos fatos geomórficos e a questão da taxonomia do relevo**. Revista do Departamento de Geografia da USP, São Paulo, n. 06, p. 17-30, 1992.
38. SANTOS, L. J. C. et al. Mapeamento Geomorfológico do Estado do Paraná. Revista Brasileira de Geomorfologia. Ano 7, n. 2. p. 03-11. 2006.
39. SANTOS, A. R. **A tectônica e as formas de relevo**. In. Geomorfologia: Conceitos e tecnologias atuais. Org. Florenzano, T. G (Org) São Paulo: Oficina de Textos, p. 129 – 158. 2008.
40. SEIJMONSBERGEN, A. C.; HENGL, T.; ANDERS, N. S. **Semi-automated extraction of geomorphological features using DEMs**. In: SMITH, M. J.; PARON, P.; GRIFFITHS, J. eds. Geomorphological Mapping: Methods and Applications, Developments in Earth Surface Processes vol 15, Elsevier, 2011.
41. SILVA, D. G; CORRÊA, A. C. B.; ALVES, R. S.; BARRETO, A. M. F.; MELO, J. S.; SOUZA, A. O. **Análise geomorfológica e sedimentológica dos depósitos de tanques em fazenda nova, brejo da Madre de Deus – PE**. In: VI Simpósio Nacional de geomorfologia / Regional Conference on Geomorphology. Anais. Goiânia, Goiania – GO. 6 a 10 de setembro de 2006.
42. SILVA, L. C. e ZANZINI, E. S. **Análise sedimentológica e microbiológica de areia de praia para interpretações ambientais**. Revista Educação (UNG). v. 11, n. 3. 2016.
43. SILVEIRA, C.T; SILVEIRA, R.M.P; BORTOLINI, W.; ALMEIDA, V.P. **Unidades de relevo do Novo Mapa Geomorfológico do Paraná: avanço na escala e táxon**. Geo UERJ, Rio de Janeiro, n. 42, 2023.
44. SUGUIO, K.; MARTIN, L.; BITTENCOURT, A. C. S. P.; DOMINGUEZ, J. M. L.; FLEXOR, J. M.; AZEVEDO, A. E. G. **Flutuações do nível relativo do mar durante o Quaternário Superior ao longo do litoral brasileiro e suas implicações na sedimentação costeira**. Revista Brasileira de Geociências, São Paulo, v.15, n.4, p.273-286, 1985.

45. TESSLER M.G.; SUGUIO K. **Características sedimentológicas da Formação Cananéia (Pleistoceno superior) na área Paranaguá-Antonina (Estado do Paraná, Brasil)**. Assoc. Bras. Est. Quat., São Paulo, Publ. Avulsa n. 2, p. 43-54, 1987.
46. VIEIRA, C. V.; FILHO HORN, N. O.; BONETTI, C. V. D. H. C.; BONETTI, J. **Caracterização morfo sedimentar e setorização do Complexo Estuarino da Babitonga/ SC**. Boletim Paranense de Geociências, n. 62-63. P. 85-105. Editora UFPR, 2008.
47. WEISS, A. **Topographic Position and Landforms Analysis**. Poster presentation, ESRI User Conference, San Diego, CA, 2001.



Esta obra está licenciada com uma Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.