

Artigo de Pesquisa

Retificação de canais fluviais e os efeitos geomorfológicos (des)contínuos no sistema fluvial do rio Macaé - RJ

Rivers channelization and the (dis)continuous geomorphological effects on the fluvial system of the Macaé River - RJ

Gustavo Kiss Pinheiro Cabral¹, Mônica dos Santos Marçal²

¹ Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituição, Departamento de Geografia, Doutorando do programa de Pós-graduação em Geografia, Rio de Janeiro, Brasil. gustavocabral@ufrj.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7647-8962>

² Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituição, Departamento de Geografia, Programa de Pós-graduação em Geografia, Rio de Janeiro, Brasil. monicamarcal@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2674-5380>

Recebido: 09/12/2024; Aceito: 07/04/2025; Publicado: 08/05/2025

Resumo: As intervenções hidráulicas desempenham papel crítico que podem mudar o comportamento natural de uma paisagem fluvial. Uma das intervenções mais comuns é a retificação de canais, que envolve diretamente o alargamento e aprofundamento do leito e na geometria transversal do canal. No Brasil, esse tipo de obra foi comumente realizada nos espaços das baixadas e em centros urbanos como forma de garantir saneamento básico e avanço das atividades econômicas. Apesar de sua ampla distribuição, há uma lacuna significativa de trabalhos preocupados com os efeitos dessas obras na evolução dos ambientes fluviais e suas implicações na evolução da paisagem fluvial. Do ponto de vista geomorfológico, essa intervenção pode desencadear uma série de mudanças no padrão dos processos hidrossedimentológicos no sistema fluvial que não se restringem somente aos segmentos alterados. Esse trabalho discute os efeitos da retificação de canais fluviais na bacia do rio Macaé, a partir de uma abordagem geomorfológica da trajetória recente de evolução dos canais. Os resultados indicaram que a intervenção intensificou os processos erosivos a montante, caracterizados pela rápida incisão vertical do leito, erosão marginal acentuada com afloramento de terraços e migração dos meandros em direção à retificação.

Palavras-chave: Intervenções Hidráulicas; Nível de Base; Zonas de Ajuste; Supressão de Meandros.

Abstract: Hydraulic interventions play a critical role in altering the natural behavior of a river landscape. One of the most common interventions is channelization, which directly involves widening and deepening the riverbed and modifying the channel's cross-sectional geometry. In Brazil, this type of work has often been conducted in floodplain areas and urban centers to ensure basic sanitation and promote economic activities. Despite its widespread use, there is a significant gap in research focused on the effects of these works on the evolution of river environments. From a geomorphological perspective, this intervention can trigger a series of changes in the pattern of hydrosedimentological processes in the river system, not limited to the altered segments. This study discusses the impacts of river channelization in the Macaé River catchment, from a geomorphological approach and the recent trajectory of channel evolution. The results indicated that the intervention intensified erosive processes upstream, characterized by rapid vertical incision of the riverbed, increased bank erosion with terrace exposure, and migration of meanders towards the channelized areas.

Keywords: Hydraulic Interventions; Base Level; Adjustment Zones; Meander Suppression.

1. Introdução

O avanço da técnica sobre os ambientes fluviais apresenta um marco na reestruturação do pensamento geomorfológico, na medida que novas demandas surgem e buscam compreender as múltiplas facetas das intervenções humanas passíveis de assumirem um papel marcante como controladores da paisagem (Goudie, 1993; Szabó et al., 2010; Goudie; Viles 2016).

Parte-se da ideia de que os impactos humanos, sejam quais forem suas formas, podem induzir novos processos como também alterar, intensificar ou descaracterizar àqueles em curso, ou “naturalmente” atribuídos a determinado ambiente. Apesar do crescente interesse sobre a temática (Kelly et al., 2018), o conjunto das questões que ainda persistem reforçam as principais lacunas dos tradicionais modelos que buscam compreender a dinâmica dos processos da paisagem (Ghosh et al., 2022): O que é natural? O que é antrópico? Qual a escala de atuação? O que altera? Como altera?

Os sistemas fluviais são importantes representantes de como as atividades antropogênicas estão mudando de forma significativa a dinâmica dos processos geomorfológicos (Gregory, 2006). Apesar das históricas mudanças do uso da terra possuírem um papel determinante no contexto da alteração dos ambientes fluviais, é o recorte das intervenções hidráulicas que representam o grau mais avançado de influência humana direta na dinâmica dos processos e nas alterações morfológicas da paisagem fluvial (Gregory, 2006).

No Brasil, as obras hidráulicas de grande porte, apesar de datarem já desde meados do século XIX, tomaram notoriedade a nível nacional a partir de 1930 com a criação do Departamento Nacional de Obras e Saneamento (DNOS), autarquia que atuava em conjunto com os Estados para controle e reestruturação da rede de drenagem (Goes, 1942). A instituição foi responsável por obras de grande magnitude em todas as regiões do país, com destaque para as regiões sul e sudeste e sobretudo nos rios da região norte do estado do Rio de Janeiro, associados às extensas planícies de inundação da região considerada sob o pretexto de defesa contra inundações e saneamento básico (Soffiati, 2005).

No entanto, a principal motivação para a execução de obras nessas áreas de planícies estaria mais atrelada às limitações impostas a instalação das atividades agropastoris e urbanas, motivadas pela pujança das indústrias açucareiras e agropastoril. A proximidade com o mar e a abundância de canais fluviais, principais meios de acesso e escoamento da produção, foram as principais motivações para a ocupação dessas áreas já desde a invasão europeia no século XVI.

Apesar da diversidade de intervenções na região norte fluminense, a retificação de canais é um elemento comum aos principais rios em todo o estado (Soffiati, 2021). Esse tipo de obra ocorreu, sobretudo, nas áreas das amplas planícies fluviais e fluviomarinhas dos rios localizados na vertente atlântica da Serra do Mar, que veio acompanhada da criação de canais artificiais, em regiões prioritariamente próximas às principais cidades que seguiram a premissa de controle da drenagem e saneamento.

A bacia do rio Macaé, localizada na região norte do estado do Rio de Janeiro, é um dos exemplos em que teve parte da sua rede de drenagem retificada, incluindo tanto o canal principal, seu principal afluente e inúmeros canais tributários no domínio das áreas de baixadas (Assumpção; Marçal, 2012). Apesar da bacia apresentar outras intervenções hidráulicas diretas como barragens e transposição em afluentes, extrações de areia ao longo do médio e baixo curso (Freitas et al., 2015), e barramentos e reservatórios no domínio colinoso da bacia (Giesebart, 2022), a retificação de canais fluviais recebe destaque pela extensão e magnitude que essa intervenção assume na rede de drenagem.

O principal desafio inerente à investigação de eventuais impactos relacionados à retificação de canais direciona às questões de quais são as possíveis respostas do canal e se podemos associar tais respostas às mudanças empenhadas pela intervenção. Essas questões não se restringem somente ao entendimento dos impactos diretos causados pela retificação de canais, mas também sobre a distribuição do seu impacto no sistema, onde esses impactos se encontram e qual seria a dinâmica espacial a eles associada.

Apesar de importantes trabalhos terem teorizado acerca dos efeitos esperados das retificações de canais fluviais em bacias hidrográficas (Brookes, 1988), é preciso buscar a construção de modelos que incorporem, em primeira instância, os fatores locais de um determinado espaço em detrimento do uso de leis e modelos globais, dada a imprecisão e dificuldade de reproduzir análises de um local para outro, sem fazer alterações teórico-metodológicas (Philips, 2007).

Nesse contexto, qual o ponto de partida dos estudos em geomorfologia fluvial? em casos em que o canal é aprofundado devido a obra da retificação, pode-se criar um desnivelamento significativo entre o curso modificado e o curso original, estabelecendo um novo nível de base local, ou ruptura de declive que na literatura é também conhecido como *Knickpoint* artificialmente introduzido (Bowman, 2023). O estabelecimento dessa feição local pode condicionar um reajuste do caráter do gradiente longitudinal do canal principal, no processo de migração a remontante que passa a transmitir o distúrbio longitudinalmente (Brookes, 1988; Schumm, 1993; Charlton, 2007; Magalhães jr; Barros, 2020; Bowman, 2023).

Outros efeitos podem não se restringir ao canal principal, o processo de migração a remontante pode estabelecer mudanças do gradiente local dos tributários, fazendo com que haja um rejuvenescimento dos canais tributários, com aumento da velocidade das águas e da incisão do canal (Brookes, 1988; Charlton, 2007).

Além das mudanças nas características longitudinais, as transformações do padrão transversal do canal alteram a natureza dos processos geomorfológicos na escala local, os quais em trechos retificados, intensificam-se processos associados ao transporte sedimentar longitudinal (Brookes, 1989) em detrimento da complexa natureza dos processos hidrossedimentares típicos de trechos sinuosos, geralmente atribuídos às dinâmicas de meandros arenosos (Hooke, 2013; 2022).

Embora o assunto seja considerado em alguns contextos como "um impacto de grandes proporções" (Freitas et al., 2015, p.20), o que sabemos sobre as retificações de canais no Brasil? Há uma lacuna significativa de trabalhos preocupados com os efeitos dessas obras na evolução dos ambientes fluviais. Os estudos acerca da retificação de canais se limitam a uma avaliação das mudanças na paisagem e se restringem a uma discussão sobretudo histórica do contexto de execução dessas obras (Zanirato, 2011; Zola, 2018; Pessoa, 2019).

O objetivo do trabalho consiste em investigar os efeitos geomorfológicos desencadeados pelas obras de retificação dos canais na bacia do rio Macaé, nas áreas de domínio das planícies fluviais e fluviomarinha. Procura-se evidenciar como estas obras impactam na reorganização dos processos geomorfológicos e suas implicações na evolução dos ambientes fluviais.

Diante das alterações sistemáticas feitas pelo extinto DNOS e sobretudo a retificação de canais, entende-se que há uma necessidade primária em levantar informações sobre as obras realizadas e buscar investigar que papel estas desempenharam e podem continuar desempenhando no sistema fluvial da bacia do rio Macaé.

2. Área de Estudo

A bacia do rio Macaé (Figura 1) está localizada na vertente atlântica da Serra do Mar e se insere no domínio dos Cinturões Móveis Neoproterozóicos do sudeste brasileiro com presença dos depósitos Sedimentares Quaternários no baixo curso da bacia (IBGE, 2023). No alto curso, a organização da rede de drenagem é fortemente influenciada pelas estruturas regionais NW-SE, W-E e NE-SW (Dantas; 2000; Silva; Cunha, 2001) e pela variação litológica (Almeida et al., 2012; Geraldles et al., 2012) que atuam nas assimetrias de vale e no estabelecimento de níveis de base locais (Cabral et al., 2023). Já a transição do médio curso, representado pelo compartimento de morros e colinas isoladas, insere a transição dos vales altamente confinados e de vertentes íngremes rumo ao domínio das planícies fluviais e flúvio-marinhas (Dantas, 2000; Marçal et al., 2015).

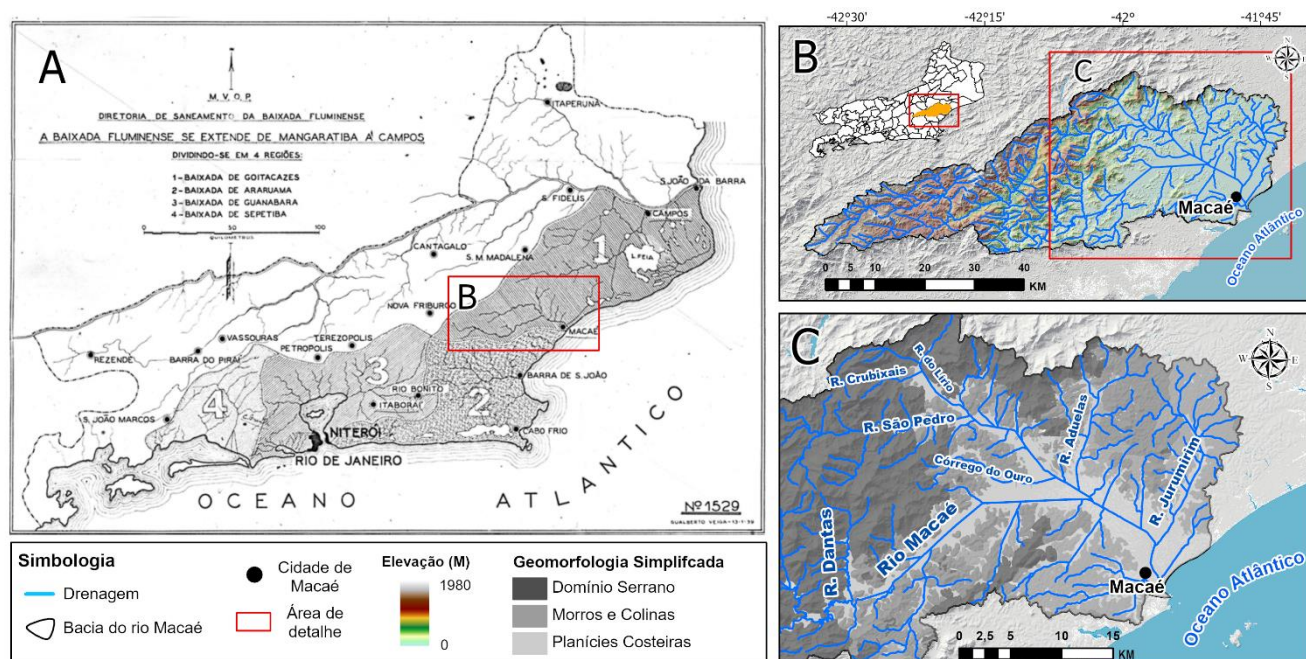


Figura 1. Localização da área de estudo com detalhamento do baixo curso da bacia do rio Macaé. Em (A) Mapa do Departamento Nacional de Obras e Saneamento destacando as grandes áreas de baixada das bacias da vertente atlântica do Rio de Janeiro [s.d.]; Em (B) bacia do rio Macaé; e em (C) destaque para o baixo curso com a geomorfologia simplificada e a drenagem principal adaptados de IBGE (2018; 2023).

A geologia local é formada majoritariamente por rochas Cambrianas com grande presença da Unidade São Fidélis (inclui kinzigitos, quartzitos e sillimanita-biotita gnaisses) no alto e médio curso e dos sedimentos quaternários no baixo curso. Essa variação entre segmentos com presença de rochas Cambrianas (Unidade São Fidélis) com transição para os Depósitos Quaternários é vista em grande parte dos principais canais da bacia, com destaque para o Rio Macaé e seu principal afluente, o rio São Pedro. No domínio central da bacia, vale destacar a presença do Granito Sana, formação pós-tectônica cuja origem associa-se ao ciclo Brasileiro entre 650 e 550 m.a. (Silva; Cunha, 2001), responsável pelos maiores valores de declividade e associado aos segmentos do alto curso (Cabral et al., 2023).

A rede de drenagem do baixo curso da bacia foi totalmente descaracterizada pelas obras de retificação e criação de canais artificiais, o que representa uma mudança drástica de ambiente. Assumpção e Marçal (2012) destacam que grande parte da rede de drenagem já havia sido retificada até o ano de 1968, enquanto os principais afluentes rio Macaé, São Pedro e Dantas ocorreram em momentos posteriores. Naturalmente, o domínio das planícies é descrito como um ambiente de baixo gradiente topográfico associado, com uma paisagem fluvial próxima de um ambiente lântico, com canais meândricos de elevada sinuosidade, associados às áreas brejosas e pantanosas. Atualmente, esse espaço apresenta canais retilíneos, cuja redução abrupta da sinuosidade natural do canal é uma das mais importantes alterações morfológicas na rede de drenagem das áreas de planície na bacia (Assumpção; Marçal, 2012).

A evolução urbana do norte-fluminense, sobretudo o eixo entre os rios Macaé e o Paraíba do Sul, é marcada pelo contexto da ocupação da região vinculado aos tempos coloniais. Assim, os grandes impulsos de ocupação da região derivaram-se da inserção da economia açucareira ao longo dos séculos XVII e XVIII, seguido pelo fortalecimento do setor Agropastoril nos séculos posteriores (Lamego, 1946). A história da região segue uma trajetória de “conquista dos rios” marcada pela apropriação dos seus cursos para viabilizar a expansão do sistema econômico vigente (Chrysostomo, 2010), como também pelo desmatamento da Mata Atlântica progressivamente impulsionada pelos processos de ocupação e exploração que se intensificaram desde o período colonial (Dean, 1996).

Apesar dos anos recentes demonstrarem um recuo das áreas pastoris e o avanço de um domínio de vegetação natural (composto por restinga, mangue e fragmentos de Mata Atlântica), desde a década de 1980 o campo agropastoril foi indicado como o maior modificador da paisagem da bacia do Rio Macaé (Guimarães, 2017). Nessa

perspectiva, as propensões atuais nas mudanças do uso e cobertura da terra indicam uma tendência de o desenvolvimento econômico não ocorrer sem diversos outros problemas socioambientais graves, como vistos ao longo das décadas de 1980 até 2015 (Guimarães, 2017), o que indica a importância de práticas de gestão e manejo que discutam cenários futuros sobre o funcionamento da bacia do rio Macaé a curto e longo prazo (Marçal et al., 2017).

3. Materiais e Métodos

A primeira etapa consistiu no levantamento de dois grupos de dados: (I) Arquivos históricos, documentais e cartográficos nos acervos como o Arquivo Nacional e as bibliotecas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE); (II) Materiais de sensoriamento remoto entre os anos de 1969 e 2023.

Dos dados de base, utilizou-se cartas topográficas disponibilizadas pelo IBGE na escala de 1:50.000 relativas às cartas de Macaé (SF-24-M-I-3); Casemiro de Abreu (SF-23-Z-B-IN-4-MI2717-4); Trajano de Moraes (SF-23-Z-B-III-2) e Conceição de Macabu (SF-24-M-1-1); imagens *Landsat-5* para os anos de 1984 e 1993 através do endereço: ; sequenciamento de imagens do *Google Earth* entre os anos de 2003, 2013 e 2023, corrigidas por meio de ajuste manual; imagens ortorretificadas da plataforma *Planet* para o ano de 2023, disponíveis em: <https://www.planet.com/>. As imagens foram georreferenciadas e manipuladas em ambientes GIS, por meio do *software Arcgis Pro*.

Em seguida executaram-se os seguintes mapeamentos: dos trechos retificados, a partir da integração dos documentos cartográficos do Departamento Nacional de Obras e Saneamento (DNOS) resgatado no Arquivo Nacional, com auxílio da base cartográfica contínua do estado do Rio de Janeiro, disponibilizada pelo IBGE (2018) na escala de 1:25.000; delimitação dos segmentos dos meandros arenosos, com auxílio das imagens de satélite e com base em trabalhos anteriores (Marçal et al., 2017; Brierley et al., 2019); dos terraços fluviais a partir da identificação de prováveis pontos por interpretação de imagens e visita em campo.

A etapa posterior consistiu no cálculo de índices e análise das mudanças morfológicas segundo alguns passos da metodologia proposta por Hooke (2013; 2022) e Fryirs e Brierley (2013). A etapa contou com as seguintes tarefas: mapeamento dos traçados de cada segmento dos meandros arenosos dos canais de interesse para os anos de 1969 até o ano de 2023; Cálculo do índice de Sinuosidade (IS) para série 1969 até 2023 e Amplitude máxima do meandro contemplando 20 anos de análise no recorte de 2003 a 2013; e 2013 a 2023; Caracterização dos ajustes morfológicos de acordo com os critérios de Hooke (2013; 2022) e Individualização e codificação de meandros para análise espacial dos ajustes.

Para a análise de sinuosidade dos dados de 1969 a 2023, foi utilizado o método de correlação, com o emprego do teste estatístico de significância (valor P) e da análise de tendências por meio do teste de *Mann-Kendall*. O teste de significância foi aplicado para verificar a relação entre as variáveis, avaliando se as correlações observadas eram estatisticamente significativas, com base em um nível de significância preestabelecido (95%). A análise de tendências foi realizada utilizando o teste de *Mann-Kendall*, o qual permite identificar e quantificar a presença de tendências monotônicas nos dados ao longo do período analisado (Kendall, 1975).

Como proposta para o detalhamento na escala local, foram criados códigos para individualização de cada meandro na área de ajuste de acordo com as iniciais de cada rio e um número que varia conforme sua posição em relação ao início da retificação. Assim, como exemplo do rio São Pedro, os meandros foram designados como SP e um dígito. O Código SP1 representa o meandro mais próximo da retificação até o último meandro com maior dígito que representa o meandro mais a montante do sistema indicado.

O padrão de ajustes procurados segue os tipos discutidos em Hooke (2013; 2022). A identificação de eventuais padrões de movimentações, como a magnitude dos eventos e distribuição ao longo da drenagem podem ser importantes indicativos na compreensão da natureza dos eventos nos segmentos analisados. A figura 2 mostra um quadro ilustrativo e elucida os padrões de ajuste encontrados na bacia do rio Macaé, a partir de uma comparação entre o padrão dos anos de 2003 e 2023.

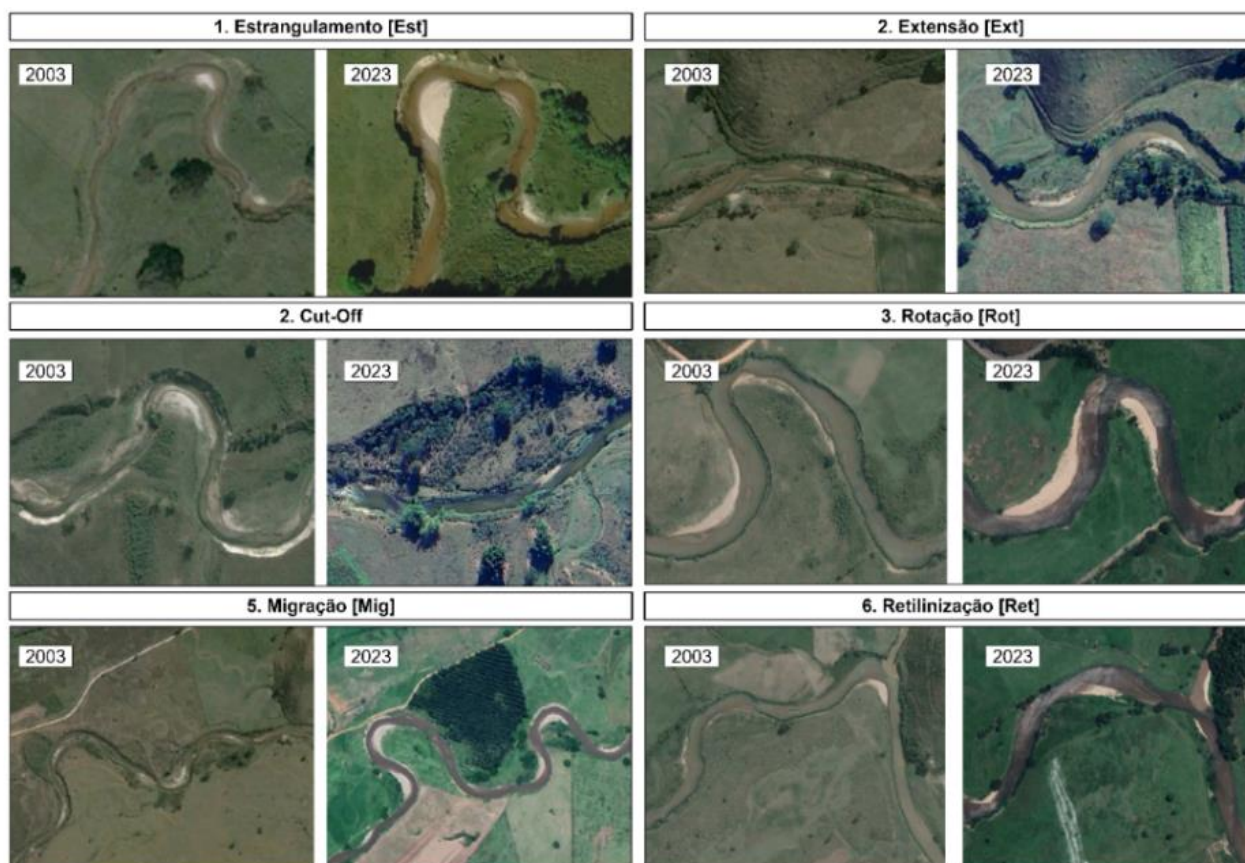


Figura 2. Quadro dos ajustes identificados nos meandros arenosos para a bacia do rio Macaé. Imagens retiradas do Google Earth dos anos 2003 e 2023.

Com base no sistema de posições relativas construído, a principal variável analisada foi a variação da amplitude dos meandros em relação a sua posição. Para a etapa, foram produzidas análises estatísticas com objetivo de: (1) analisar possíveis correlações não lineares entre as variáveis de interesse e (2) verificar a existência de grupos de variáveis semelhantes e suas respectivas posições.

Para análise de correlação, foi empregado o método de *Random Forest* (RF)¹ que se constitui como um algoritmo de aprendizado baseado em árvores de decisão. Diferente dos modelos estatísticos de decisões tradicionais que têm por base decisões binárias (sim/não) nas variáveis preditoras, o RF é um método que combina múltiplas árvores de decisão para melhorar a precisão do modelo, de modo a minimizar erros de classificação e precisão nas estimativas de regressão (Liaw; Wiener, 2002; Genuer et al., 2010). No presente trabalho, o algoritmo foi utilizado por meio do *Software R* a partir do pacote base *randomForest* disponibilizado pelo programa.

Os gráficos de correlação foram apresentados em conjunto com gráficos em formato “*Box-Plot*” com objetivo de identificar e expressar visualmente as amostras passíveis de serem consideradas como “*Outliers*” do conjunto de dados. Os gráficos foram construídos com base nas variações de amplitude para cada posição dos meandros estabelecidas na série de 2003 a 2013; e 2013 a 2023.

Para o agrupamento estatístico dos dados, utilizou-se o algoritmo de clusterização *K-means* processo em *Software R*. A aplicação consiste em definir grupos de dados com características estatisticamente semelhantes a partir do estabelecimento de clusters, ou grupos K (Bishop, 2006). O número ideal de clusters é definido a partir do algoritmo, de modo que o produto seja um agrupamento de dados em que os centroides que delimitam tais agrupamentos não mudem significativamente com o acréscimo de novos grupos (Steinley; Brusco, 2011). O

¹ Optou-se pela utilização do *Random Forest* pois no teste de precisão, considerando métricas de avaliação para correlações, o modelo retornou uma precisão que varia de 0.70 a 0.87 pelo coeficiente de determinação (R^2), o que indica de moderada a boa explicação da variabilidade dos dados pelo modelo. Além disso, nas avaliações de erros, com base nas métricas de avaliação padrão, de erro absoluto médio (*Mean Absolute Error* – MAE) e raiz do erro quadrático médio (*Root Mean Square Error* – RMSE), o modelo retornou os menores valores comparados a outras correlações.

estabelecimento do número de clusters (grupos K) adequados foi feito a partir do teste de *elbow* (teste de cotovelo). Nesse teste, a soma dos Quadrados dos Erros (*Sum of Squares Error* - SSE) entre os pontos e os centroides dos clusters é calculada para diferentes valores de K. O valor de K é escolhido no ponto em que a redução do SSE ocorre de forma acentuada. Esse ponto indica o número de clusters que melhor representam os dados, equilibrando a variabilidade explicada e a complexidade do modelo (Steinley; Brusco, 2011).

4. Resultados

4.1. Características morfométricas e as respostas morfológicas da rede de drenagem as retificações de canais

A bacia do rio Macaé apresenta um extenso domínio de baixo curso², com diversos afluentes restritos aos compartimentos de baixo controle topográfico que nascem no domínio de morros e colinas isoladas e correm pelas extensas planícies fluvio-marinhas. Esse contexto de baixo controle topográfico, em conjunto com as características litológicas do baixo curso (sedimentos quaternários) são características do segmento que pouco limitaram as retificações de canais fluviais e criação de canais artificiais. A partir da análise do projeto de atividades do DNOS para o baixo curso da bacia do rio Macaé, destaca-se que esse domínio foi sistematicamente alterado com as retificações de grande parte dos rios no segmento e pela criação de canais artificiais (figura 3).

1) Indicação do recorte espacial do projeto do DNOS para bacia do rio Macaé - 1967

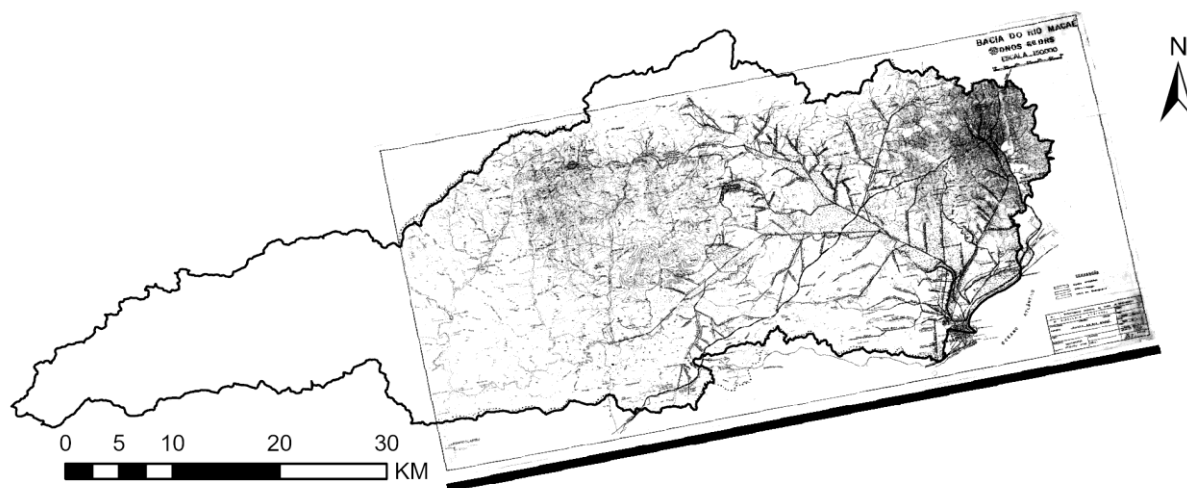


Figura 3. Mapa da bacia do rio Macaé com destaque para o Projeto de atividade do DNOS de 1967 para o baixo curso da bacia. A partir do projeto, foram realizadas a análise e vetorização dos trechos retificados a partir do projeto de atividades do DNOS para o baixo curso do rio Macaé na escala de 1:150.000, ano 1967. Fonte: Secretaria de Obras Públicas e Planejamento Urbano do município de Macaé.

A Tabela 1 apresenta informações referentes à extensão e quantidade de canais alterados no baixo curso da bacia, em conjunto com a distinção por hierarquia e uma caracterização dos principais canais que apresentam extensas retificações. Pontua-se tais alterações como sistemáticas pois não se restringiram a trechos isolados ou aos principais rios da rede de drenagem. Ao todo, mais de 370 km de canais de distintas hierarquias tiveram sua morfologia alterada pelas obras de retificação e chegam a representar aproximadamente 50% da morfologia

² Levando em consideração apenas as unidades geomorfológicas, o baixo curso da bacia do rio Macaé, caracterizado pelas planícies fluviais e litorâneas, representa aproximadamente 12% (cerca de 224 km²) do total relacionado a área da bacia (aproximadamente 1800 km²). Em alguns casos como no rio Macaé e São Pedro, parte da drenagem corresponde a cerca de 30% e 50% respectivamente de sua extensão associada ao baixo curso da bacia.

antropicamente modificada em relação à sua condição natural (a exemplo dos rios São Pedro e do Lório e o Córrego do Ouro).

Tabela 1. dados morfométricos dos principais canais retificados do baixo curso.

Da rede de drenagem no baixo curso					
Alteração			Extensão (km)		
Canais retificados			375,26		
Canais artificiais			505,23		
Quantidade de canais retificados					
132					
Dos principais Canais					
Atributos	Rio Macaé	Rio São Pedro	Rio Dantas	Rio do Lírio	Córrego do Ouro
Extensão do Canal (km²)	140	44	17	18	30
Extensão da Retificação (km²)	44	20	2,4	9	15
Percentual de retificação (%)	30%	50%	15%	50%	50%
Hierarquia Fluvial	8ª	7ª	5ª	5ª	4ª
Nível de base Final	Oceano Atlântico	Rio Macaé	Rio Macaé	Rio São Pedro	Rio São Pedro

A retificação representa uma organização comum em todo o baixo curso da bacia, abrangendo desde os canais artificiais até os de maior hierarquia. Nesse contexto, há uma configuração espacial caracterizada pela interação entre diferentes compartimentos geomorfológicos. Um desses arranjos é resultado de canais limitados às planícies fluvio-marinhas, enquanto o outro ocorre em uma zona de transição entre segmentos de morros e colinas em direção às planícies.

Os canais restritos aos domínios das planícies são característicos por apresentarem ajustes morfológicos poucos expressivos em face do baixo gradiente topográfico associado. Entretanto, a retificação dos meandros e o aprofundamento do canal alteram as características daquele ambiente em direção a um sistema lótico, face a condição natural de um ambiente de baixa energia.

Assim, podemos delinear dois padrões gerais em relação à ocorrência de canais retificados e suas interações com os compartimentos geomorfológicos: (1) canais retificados que conservaram segmentos de meandros arenosos a montante da retificação e acompanham transição entre segmentos de morros e colinas em direção às planícies; e (2) canais retificados restritos aos domínios das planícies característicos pelo baixo gradiente topográfico.

As respostas morfológicas identificadas em campo indicam que os segmentos de meandros arenosos nos trechos anteriores a retificação, que acompanham a transição do médio curso para as planícies, apresenta um padrão comum de incisão vertical e deslocamento lateral do canal dos meandros arenosos (figura 4). Os afloramentos têm apresentados padrões semelhantes de altura entre 5 e 8 metros, distribuídos de forma assimétrica localizados na margem esquerda.

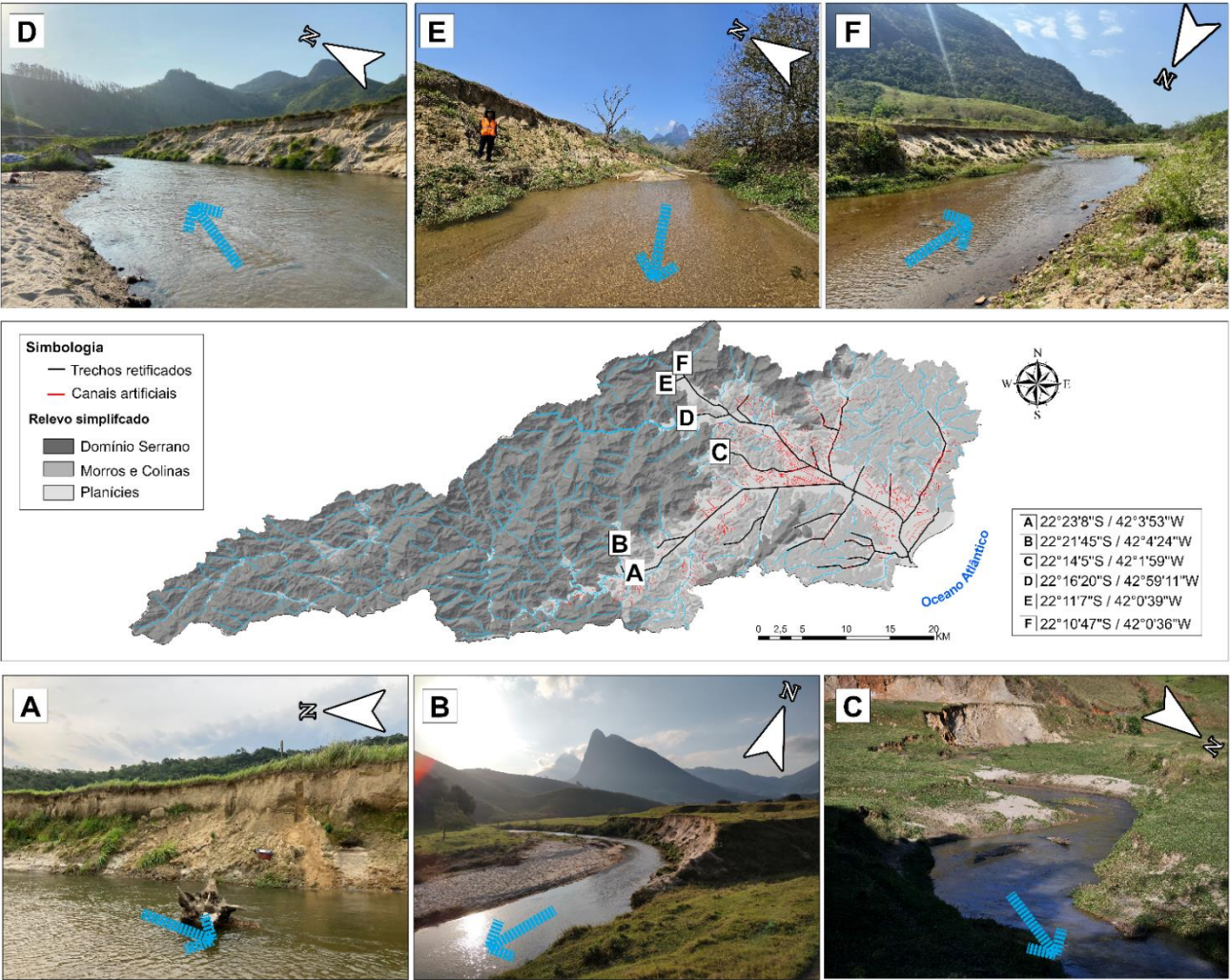


Figura 4. Mapa da bacia do rio Macaé mostrando exemplos de alguns pontos de afloramento de terraços fluviais a montante das retificações: nos rios (A) Macaé, (B) Dantas, (C) Córrego do Ouro, (D) São Pedro, (E) Rio Crubixais, (F) Rio do Lírio. Fonte: Dados retirados do IBGE (2018), Geomorfologia adaptada de IBGE (2023). Em azul, seta indicado a direção do fluxo. Fotografias tiradas em campo entre os anos de 2022 e 2024.

Outro arranjo comum de respostas morfológicas identificadas foi a tendência crescente de aumento da sinuosidade dos canais principais. A tabela 2 apresenta os índices de sinuosidade encontrados para os principais canais retificados na bacia, seguindo dos anos de 1969 até 2023. Nos afluentes, as análises se restringiram à série dos anos 1969, 2003 e 2023, devido a resolução das imagens LANDSAT utilizadas serem incompatíveis com a largura média do canal.

Tabela 2. Variação do Índice de Sinuosidade (adimensional) por ano da série 1970 até 2023.

Índice de Sinuosidade (IS) por ano						
Rios	1969	1984	1993	2003	2013	2023
Macaé	1,98	1,97	2,04	2,16	2,18	2,25
São Pedro	1,27	1,29	1,32	1,48	1,45	1,55
Dantas	1,22	1,28	1,34	1,29**	1,33	1,39

**** Retificação de um segmento do rio Dantas entre 1993-2003.**

A tabela 3 apresenta os resultados do teste de tendência de Mann-Kendall aplicado aos dados de sinuosidade dos rios Macaé, São Pedro e Dantas, com ênfase nas interpretações dos valores de Tau e P. De forma geral, os canais apresentam tendências crescentes, o que sugere que o índice de sinuosidade desses rios tem aumentado de forma consistente ao longo do tempo.

Tabela 3. Teste de Tendência de Mann-Kendall com Interpretação dos Valores de Tau (τ) e P

Rios	Valor P*	Valor (τ)**	Interpretação (τ)	Interpretação P
Macaé	0.02417	0.8666	Crescente	Significativa
São Pedro	0.02413	0.8853	Crescente	Significativa
Dantas	0.0628	0.7333	Crescente	Não Significativa

*P < 0,05, rejeita a hipótese nula; P ≥ 0,05, aceita a hipótese nula

**(τ) = 1, tendência crescente; (τ) = -1 tendência decrescente

Apesar dos valores do teste P retornados para o rio Dantas (0.0628) não fornecerem evidências suficientes e confirmarem a hipótese nula, ou seja, que não há uma tendência significativa no índice de sinuosidade ao longo do tempo, é preciso considerar, dentro desse contexto, as intromissões realizadas no rio Dantas entre os anos de 1993 e 2003 que mudaram drasticamente a morfologia do canal.

4.2. Movimentação dos meandros: tendências e ajustes

As análises na escala do canal demonstram importantes tendências gerais para organização daquele segmento na série analisada entre os anos de 1968 e 2023, com importantes variações na escala local que podem indicar trechos de maior e menor ajuste. Pela complexa natureza dos ajustes em meandros arenosos, nem sempre as análises nas escalas da rede de drenagem expressam tendências nítidas de ajuste (Hooke, 2013; 2022). Diversos mecanismos associados ou não a ocorrência de ajustes em meandros arenosos está relacionada aos elementos na escala local de canal meandro e precisam ser vistos com maior nível de detalhe (Hooke, 2013; 2022).

Entre os anos de 2003 e 2023, foram identificados 6 padrões de ajustes em 82 meandros individualizados (Tabela 4). O padrão de extensão (aumento da amplitude) e migração (deslocamento a jusante ou montante) são os dois ajustes predominantes nos meandros arenosos.

Tabela 4. Tabela de códigos e padrões de ajuste encontrados na bacia do rio Macaé

Ajustes identificados e individualizado por Canal																				
Rio Macaé																				
CÓD	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17	M18	M19	M20
Ajuste 1	Ext	Mig	CS	Rot	Ext	Mig	Ext	-	Rot	Est	-	-	Rot	-	-	Ext	Ext	-	Ext	Ext
Ajuste 2	Mig			Mig			Est		Ext				Trans					-		
Rio São Pedro																				
CÓD	SP1	SP2	SP3	SP4	SP5	SP6	SP7	SP8	SP9	SP10	SP11	SP12	SP13	SP14						
Ajuste 1	Ext	Ext	Ext	-	Est	Ext	Mig	CutOff	MS	CutOff	Ext	Mig	Mig	Mig						
Ajuste 2	Mig	Mig	Mig	Mig	Mig	Mig			Ext	Mig	Mig		Ext	Ext						
Rio Dantas																				
CÓD	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13	D14	D15	D16	D17	D18	D19	
Ajuste 1	-	Ext	Ext	Ext	Ext	Trans	Ext	Rot	Ext	Mig	Mig	Ext	Ext	Ext	Ext	Mig	Mig	Mig	Ext	
Ajuste 2																Ext	Ext	Ext		
Rio do Lirio																				
CÓD	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	L12								
Ajuste 1	Ext	Ext	Ext	Ext	Est	MS	Ext	Ext	Ext	Ext	MS	-								
Ajuste 2	Mig	Mig	Mig	Mig	Mig	Est	-	-	Mig	Mig	Ext									
Corrego do Ouro																				
CÓD	CO1	CO2	CO3	CO4	CO5	CO6	CO7	CO8	CO9	CO10	CO11	CO12	CO13	CO14	CO15	CO16	CO17			
Ajuste 1	Ext	Ext	MS	Ext	Ext	CutOff	MS	Ext	Ext	Ext	Ext	CutOff	CutOff	Ext	Ext	Ext	Ext			
Ajuste 2					Mig		Mig	Mig	Mig	Mig	Mig	Mig	Mig		Mig	Mig				

Os dois padrões de ajustes de meandros mais identificados nos canais, tanto a migração como a extensão podem ser atribuídos aos mecanismos de ajustes naturais em segmentos de meandros arenosos. Apesar de naturais, a ocorrência desses eventos pode não se dar necessariamente nas mesmas magnitudes ao longo de todos os segmentos meândricos. Em função das características locais que podem ser diversas, como um maior confinamento de vale, presença de intervenções hidráulicas, mudanças na litologia local, dentre outras, alguns trechos podem apresentar eventos de maior magnitude e outros não necessariamente algum tipo de ajuste.

A figura 5 apresenta a análise de correlação não linear entre as variáveis de mudança da amplitude e sua relação com a posição do meandro. Para a condição de origem da análise referente ao deslocamento, definiu-se o ano de 2003 como ano de referência, ou ano base, para comparação na série analisada. Os resultados contemplam 20 anos de intervalo, considerando duas séries de 2003-2013 e 2013-2023 (figura 5).

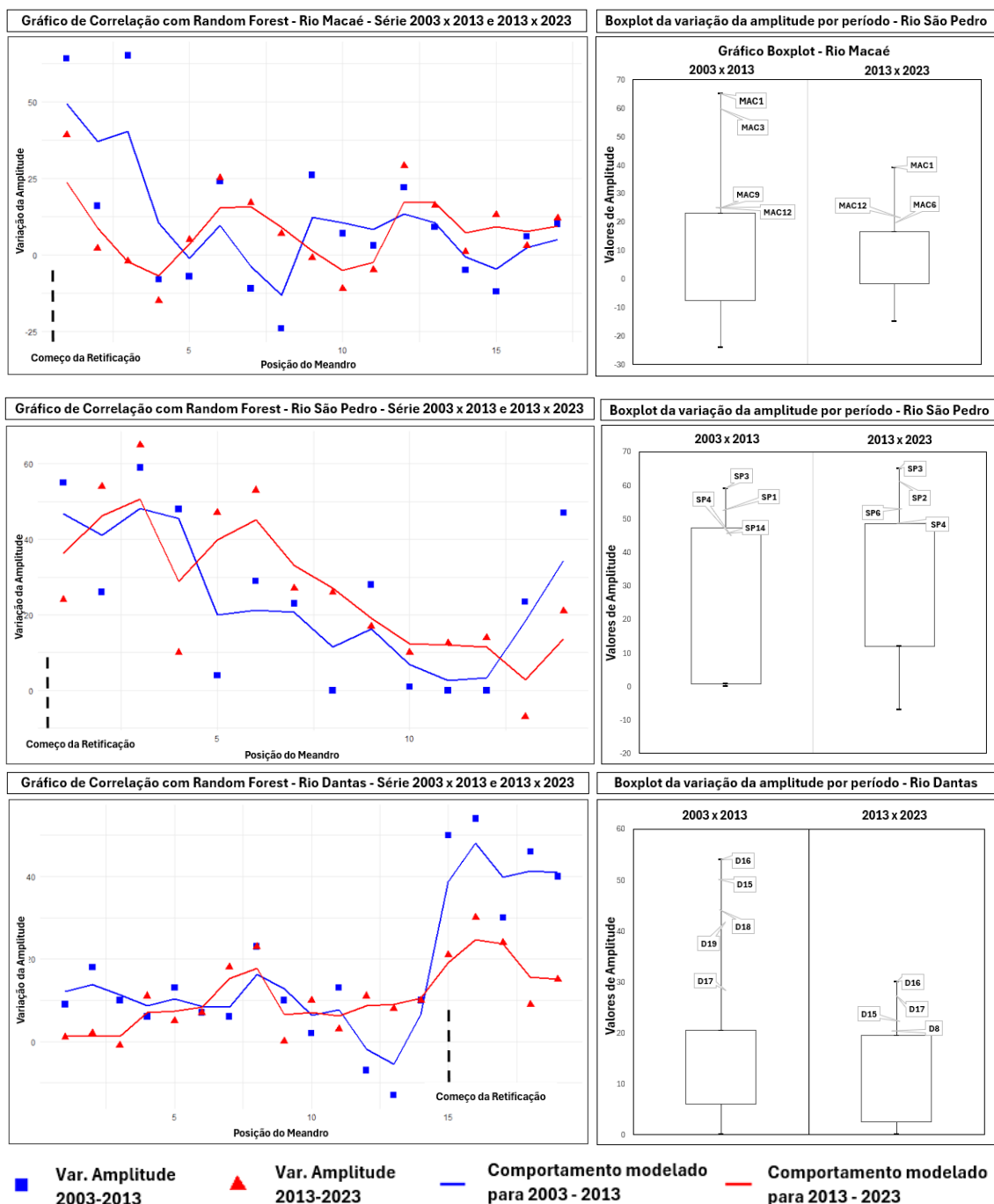


Figura 5. Relação entre a variação da amplitude (em metros) e a posição do meandro nos rios Macaé, São Pedro e Dantas, calculada utilizando o método de correlação não linear *Random Forest*. Os pontos azuis e os triângulos

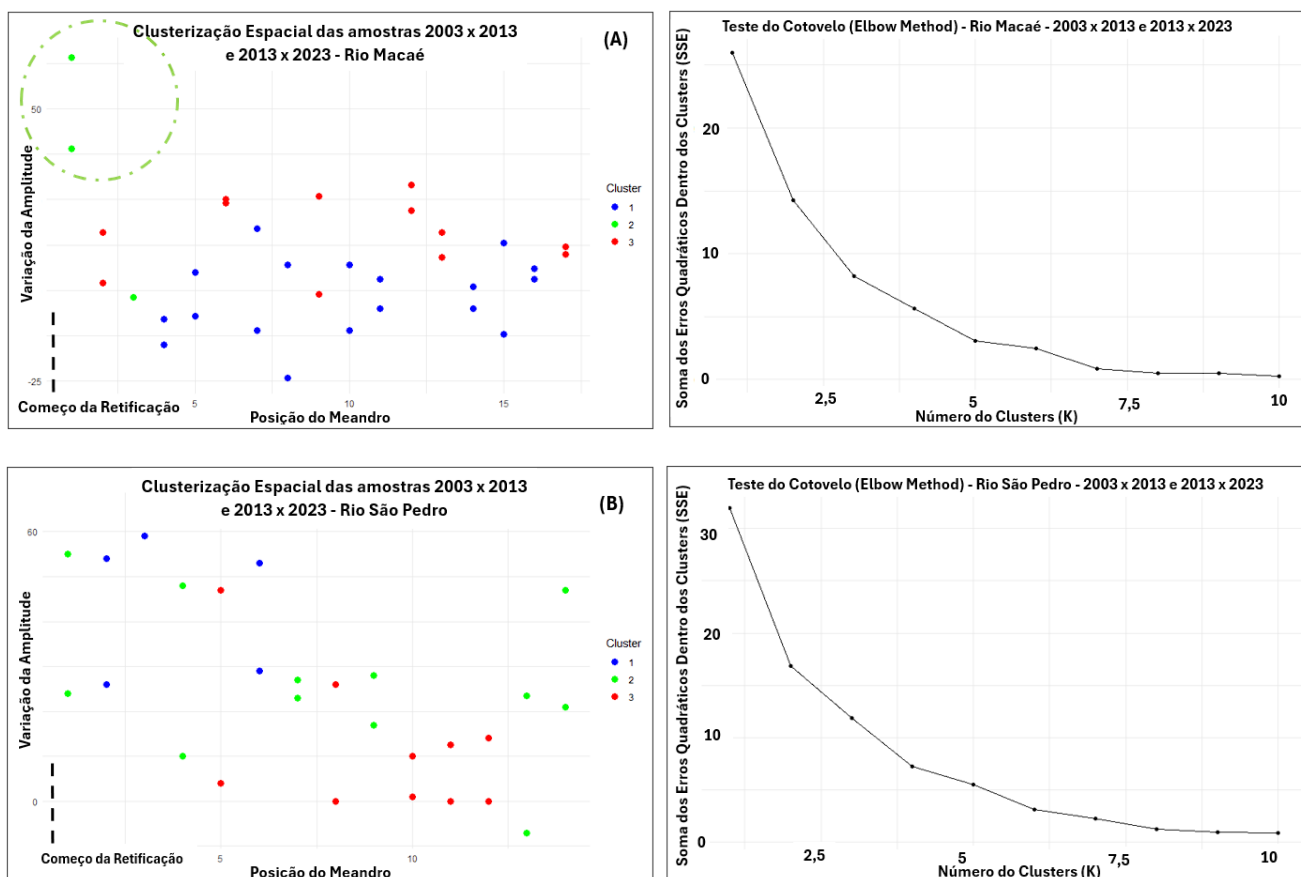
vermelhos representam os valores de amplitude nos períodos de 2003-2013 e 2013-2023, respectivamente. A linha pontilhada indica o início da retificação do rio. A direita, gráficos Boxplots com indicação dos códigos de posição.

No contexto geral dos canais principais, existe uma variabilidade significativa na relação entre a amplitude e a posição dos meandros ao longo dos anos, indicando que outros fatores além da simples localização influenciam a morfologia do rio. Do conjunto analisado, os canais principais dos rios Macaé e Dantas foram os que mais apresentaram alguma tendência mais visível de comportamento. Apesar dos três comportamentos serem distintos, não há indícios de tendências mais uniformes, o que indica um comportamento das respostas não lineares, com trechos mais expressivos e outros menos expressivos em termos de magnitude dos eventos.

Apesar disso, o comportamento dos *outliers* chama atenção nos três canais principais (Rios Macaé, São Pedro e Dantas). Com exceção do rio São Pedro que apresentou uma tendência geral de aumento da amplitude em majoritariamente todo o segmento dos meandros arenosos, no rio Macaé e no rio Dantas, os principais *outliers* estão nos pontos próximos a retificação, com ajustes expressivos tanto na série dos anos 2003 x 2013 como em 2013 x 2023.

Vale destacar que o rio Dantas possui dois trechos de retificação que não são contíguos, isto é, há meandros arenosos entre trechos retificados. Essa particularidade torna a interpretação dos resultados mais complexa e levanta questões sobre a distribuição espacial dos efeitos das intervenções, bem como os locais onde podem estar induzindo novas dinâmicas de ajuste. Dessa forma, em ambos os períodos a retificação a montante do canal indica um ponto de distúrbio significativo, com os maiores valores de variação da amplitude concentrados nesse segmento.

Na análise da variação geral entre as séries (anos de 2003 e 2013; 2013 e 2023) os pontos próximos a retificação são semelhantes do ponto de vista estatísticos e constituem-se como *clusters* nas amostras gerais (figura 6). Com exceção do rio São Pedro (figura 6B) que não apresentou necessariamente um agrupamento próximo a retificação, apesar dos maiores valores se concentrarem nesse segmento, o rio Macaé (figura 6A) e o rio Dantas (figura 6C) são dois exemplares de agrupamento de dados cujos valores mais altos em termos de variação da amplitude encontram-se nos meandros imediatamente próximos à retificação.



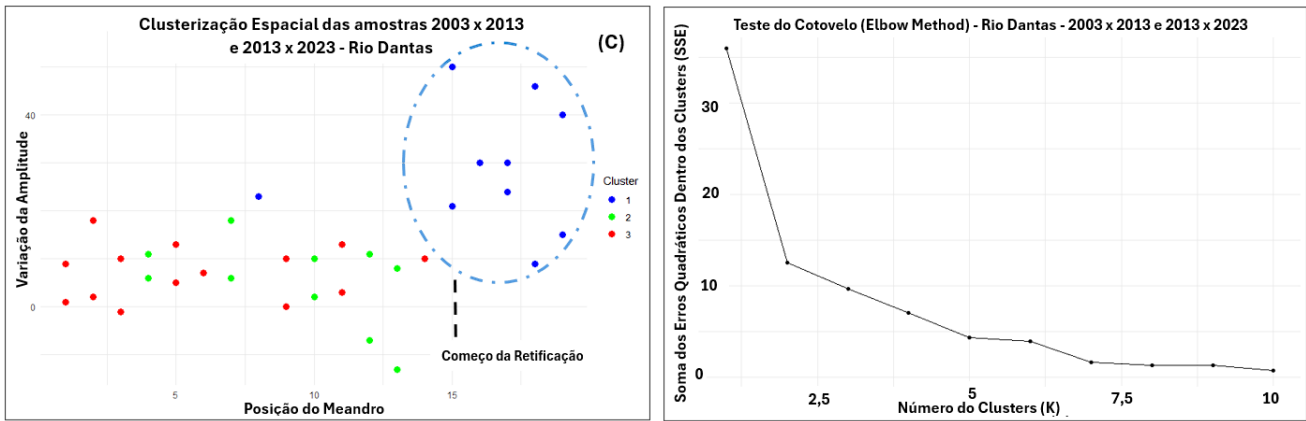


Figura 6. Análise de Clusterização Espacial e Teste de Cotovelo para três rios: Rio Macaé (A), Rio São Pedro (B) e Rio Dantas (C). Os gráficos à esquerda mostram a variação da amplitude em função da posição do meandro para cada rio, com os pontos coloridos representando diferentes *clusters* (*Cluster 1* em vermelho, *Cluster 2* em verde, *Cluster 3* em azul). As linhas pontilhadas indicam o começo da retificação dos rios. Os gráficos à direita apresentam o Teste de Cotovelo (*Elbow Method*) para determinar o número ideal de *clusters* (K) com base na soma dos erros quadráticos dentro dos *clusters* (SSE).

Do ponto de vista morfológico, as mudanças mais expressivas da magnitude acontecem em alguns casos conjuntamente com os processos de migração. A figura 7 aponta as principais mudanças morfológicas nos segmentos anteriores à retificação, considerando os traçados das margens dos anos de 1969, 1984, 1993, 2003, 2013 e 2023.

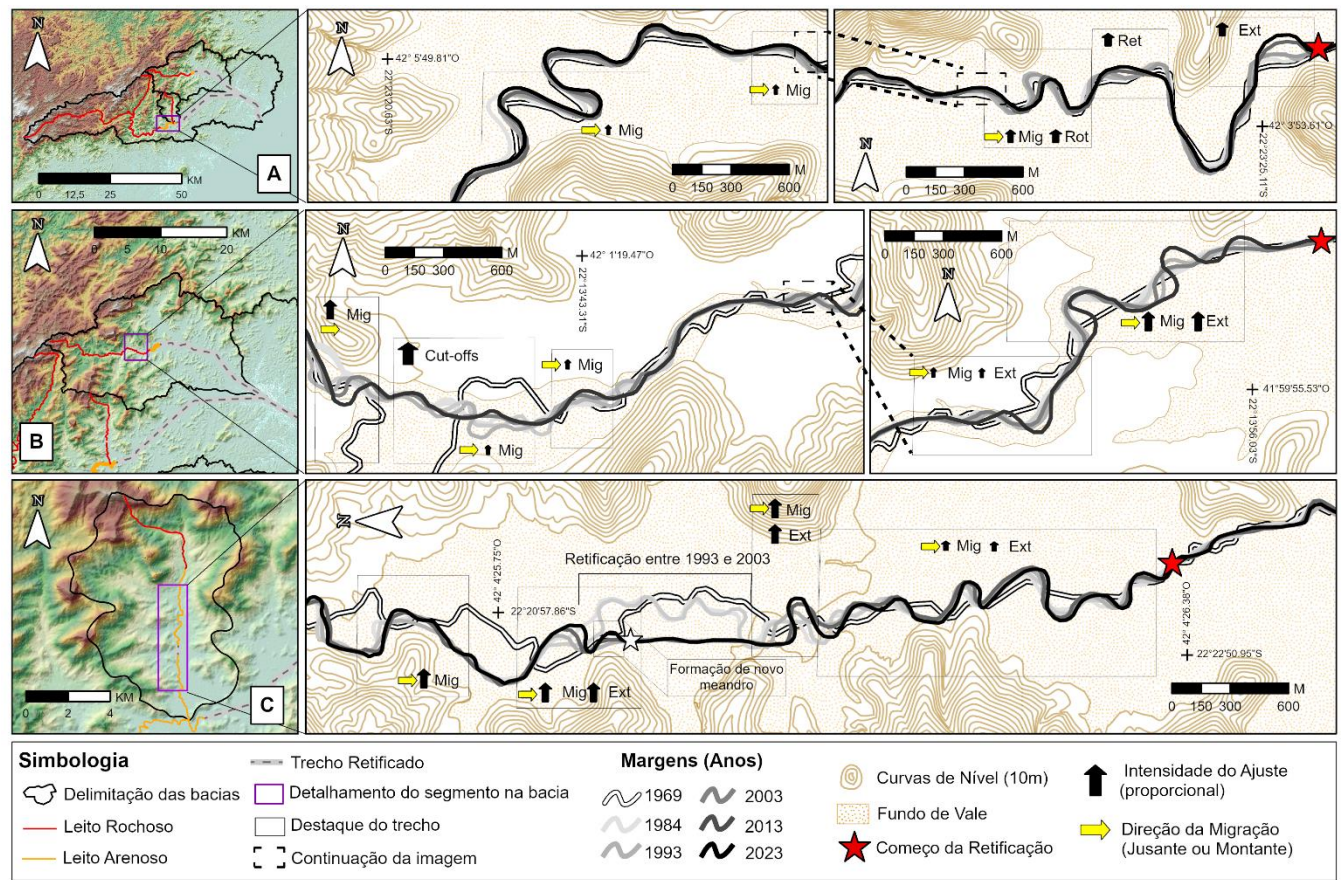


Figura 7. Análise da evolução morfológica em diferentes anos (1969, 1984, 1993 e 2023) e identificação dos ajustes em meandros para os rios Macaé (A), São Pedro (B) e Dantas (C). Em detalhamento, indicação e localização dos processos de migração (Mig), ampliação (Amp), retificação (Ret), rotação (Rot) e formação de novos meandros, com análise da intensidade e direção do ajuste.

A partir da interpretação na forma em planta das mudanças no traçado da drenagem, é possível perceber que os pontos próximos a retificação são também os de maiores mudanças morfológicas do canal (figuras 7A, B e C). Chama atenção, nesse caso, os rios São Pedro (figuras 7B) e rio Dantas (figura 7C) em que ambos apresentam maiores alterações em trechos próximos à intervenção. Essas alterações são importantes evidências de processos de reorganização da rede de drenagem que podem ter sido induzidas, ou aceleradas, pelos efeitos deflagrados a jusante pelas obras de retificação.

5. Discussão

O que os ajustes nos dizem? A retificação, a redução do nível de base e as implicações geomorfológicas

Os resultados encontrados para o contexto da Bacia do rio Macaé indicam que a retificação de diversos canais influencia de maneira semelhante alguns aspectos dos ajustes morfológicos recentes identificados. Esses aspectos são representados por mecanismos semelhantes de ajustes, sobretudo a migração dos meandros a jusante e o aumento da sinuosidade geral e individual dos meandros, os quais direcionam a discussão para redução do nível de base, das mudanças das propriedades transversais do canal e os efeitos gerados na transferência de energia longitudinal do sistema.

A questão central se concentra no entendimento de que todos os níveis de base, sejam eles regionais, locais, ou antropicamente impostos, são controladores primários da rede de drenagem (Leopold; Bull, 1979; Schumm, 1993). Os processos de queda ou subida do nível de base, em ambos os casos, alteram diretamente as características longitudinais do canal e consequentemente influenciam na dinâmica de energia erosiva. (Leopold; Bull, 1979; Schumm 1993; Charlton, 2007; Magalhães jr; Barros, 2020; Bowman, 2023).

Quando o canal fluvial é afetado por uma subida ou descida do nível de base, a resposta no sistema esperado é de aumento do potencial erosivo ou de agradação, na medida que os ajustes fluviais vão ocorrer no sentido dessa drenagem retomar o seu perfil de equilíbrio, isto é, pelo ajuste em direção a uma nova condição de gradiente longitudinal, em que se busca um equilíbrio na transferência de energia de montante a jusante (Charlton, 2007; Bowman, 2023).

Esses processos de ajustes podem ser compreendidos como efeitos propagados longitudinalmente através de uma sequência complexa de *feedbacks* (Charlton, 2007) que não se limitam somente ao ajuste do gradiente, mas também, a partir dos processos de erosão ou deposição além de mudanças morfológicas do canal, da rugosidade do leito e do formato da drenagem (Leopold; Bull, 1979; Schumm, 1993; 2005).

Dois processos chamam atenção na Bacia do rio Macaé: (1) Os extensos segmentos retificados dos canais principais e; (2) Diversos afluentes de diferentes hierarquias retificados. A redução do nível de base do canal principal naturalmente afeta os seus tributários, uma vez que o nível de base final desses é a própria confluência com o rio principal, e pode se esperar que esse efeito se propague a montante nos mesmos mecanismos discutidos anteriormente no processo de rejuvenescimento dos tributários (Charlton, 2007), com menor magnitude a depender das características do segmento e do evento ou distúrbio (Schumm, 1993).

Os canais afluentes afetados pela retificação do canal principal, como também pela sua própria retificação, respondem a dois eventos de rebaixamento do nível de base, o que pode implicar em ajustes mais complexos e de maior magnitude em um curto intervalo de tempo. Assim, esse é um dos elementos que podem ajudar a explicar o porquê dos afluentes de menor hierarquia apresentarem mudanças abruptas quando comparados aos principais canais.

Os rios de menor hierarquia naturalmente contemplam áreas de menor captação efetiva e espera-se que possuam um menor volume de fluxo e energia associada. Esse pode ser um dos elementos relacionados ao complexo padrão de ajuste identificado nesses canais. Apesar disso, é importante ressaltar o papel das chuvas e principalmente dos eventos extremos que podem alterar, em um curto intervalo de tempo, as características morfológicas desses trechos, fazendo com que a natureza dos ajustes esteja próxima de um padrão esporádico e caótico em detrimento de ajustes contínuos.

Apesar das mudanças esperadas acontecerem próximo ao ponto do distúrbio (Schumm, 1993) diante do contexto das extensas planícies de inundação de baixo controle topográfico e, pela natureza dos sedimentos quaternários, os segmentos dos meandros arenosos apresentam plena capacidade de ajuste tanto lateral como longitudinal, capazes dessa forma de distribuir eventuais distúrbios através de diversos mecanismos.

Essas características fazem desses trechos importantes indicadores de tendências uma vez que: (1) são as primeiras áreas em que o canal possui capacidade de ajuste, pois encontram-se entre os segmentos morfológicamente controlados pela retificação a jusante e a montante pelo leito rochoso; (2) são segmentos sujeitos a ajuste que podem se propagar mais facilmente a montante e numa escala de tempo muito curta, condicionados sobretudo à dinâmica hidroclimática local e ao uso e cobertura da terra; (3) da variada gama da natureza dos possíveis ajustes, as alterações na morfologia do canal têm sido expressivas e identificáveis no curto prazo.

Nessa perspectiva, na condição anterior a retificação, os ajustes relacionados às mudanças do nível de base eram atribuídos principalmente às variações no regime de precipitação, das próprias oscilações do nível do mar, como também dos possíveis eventos neotectônicos regionais (Brêda 2018; West; Mello, 2020). Com a retificação, os efeitos atuais respondem não somente a esses fatores, como também ao desnivelamento causado pelas mudanças nas propriedades transversais do canal, sobretudo pelo rebaixamento do leito, e pela mudança na sua forma em planta (figura 8).

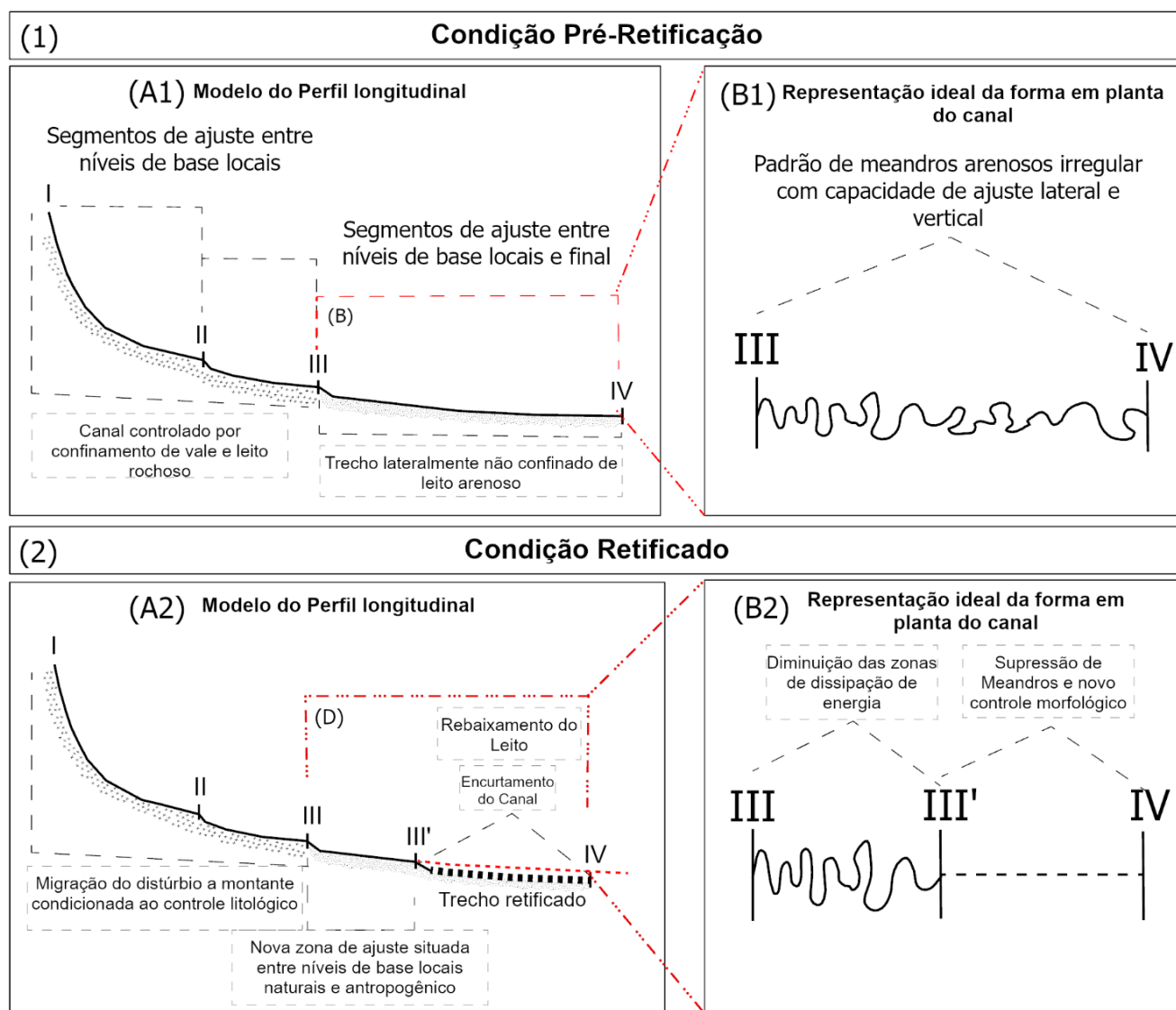


Figura 8. Modelo Teórico baseado em SCHUMM (1993) e BOWMAN (2023) apresentando o perfil longitudinal idealizado (A e C) e representação ideal da forma em planta do canal (B e D) antes da retificação (1) e após a retificação (2). Em detalhes, pontos I, II, III, III' e IV representam trechos com mudanças de nível de base.

Na condição anterior a retificação, idealmente podia atribuir-se longitudinalmente (Figura 8, A1) zonas de ajustes delimitadas entre níveis de base locais naturais (Bowman, 2023) em função das variações litológicas e/ou estruturais comuns na área (Cabral et al., 2023). Nessa condição, o padrão dos canais (Figura 8, B1) no baixo curso associava-se a segmentos meândricos sinuosos e irregulares (Assumpção; Marçal, 2012), característico de rios em extensas planícies.

Na atual condição retificada (figura 8, Janela 2), o rebaixamento do leito em função da retificação pode ter operado uma importante mudança na característica do perfil longitudinal, a partir da inserção de uma ruptura antropicamente introduzida (Bowman, 2023) que segmenta agora um novo trecho de ajuste delimitado entre níveis de base locais naturais (figura 8, A2, pontos III a III') e antrópicos (pontos III' a IV). Do ponto de vista da morfologia do canal, a principal alteração é representada pela supressão de um extenso segmento do baixo curso que veio também associado ao encurtamento do canal (Figura 8, B2).

Dessa forma, podemos pensar nos efeitos da retificação para além de um padrão pontual de alteração, mas sobre efeitos contínuos no sistema. Essa ótica pode ser compreendida através das mudanças na propagação da energia a jusante e montante alteradas pela nova condição morfológica do canal. Essas mudanças direcionam para duas discussões:

(1) As mudanças morfológicas diretas no canal, sobretudo pelo rebaixamento do leito, podem ter introduzido uma nova zona de ajuste delimitada entre níveis de base locais. Na condição anterior (Figuras 8, A1 e B1), o extenso segmento meândrico que acompanhava a transição do médio para o baixo curso e se estendia até a foz foi abruptamente reduzido para um pequeno trecho, delimitado a montante pelo começo do leito rochoso (Figura 8, A1, ponto III) e a jusante pelo começo da retificação (Figura 8, A2 ponto III'). Assim, foi estabelecido um pequeno segmento de meandros arenosos, que pelas características litológicas e pela condição de baixo confinamento de vale, possuem mecanismos de ajustes morfológicos diversos e podem ser áreas representativas de eventuais mudanças hidrossedimentológicas da bacia; (2) o extermínio das áreas de dissipação de energia, função exercida pelos meandros arenosos, pode ter alterado a forma que a energia tem sido propagada a jusante do sistema fluvial (Figura 9).

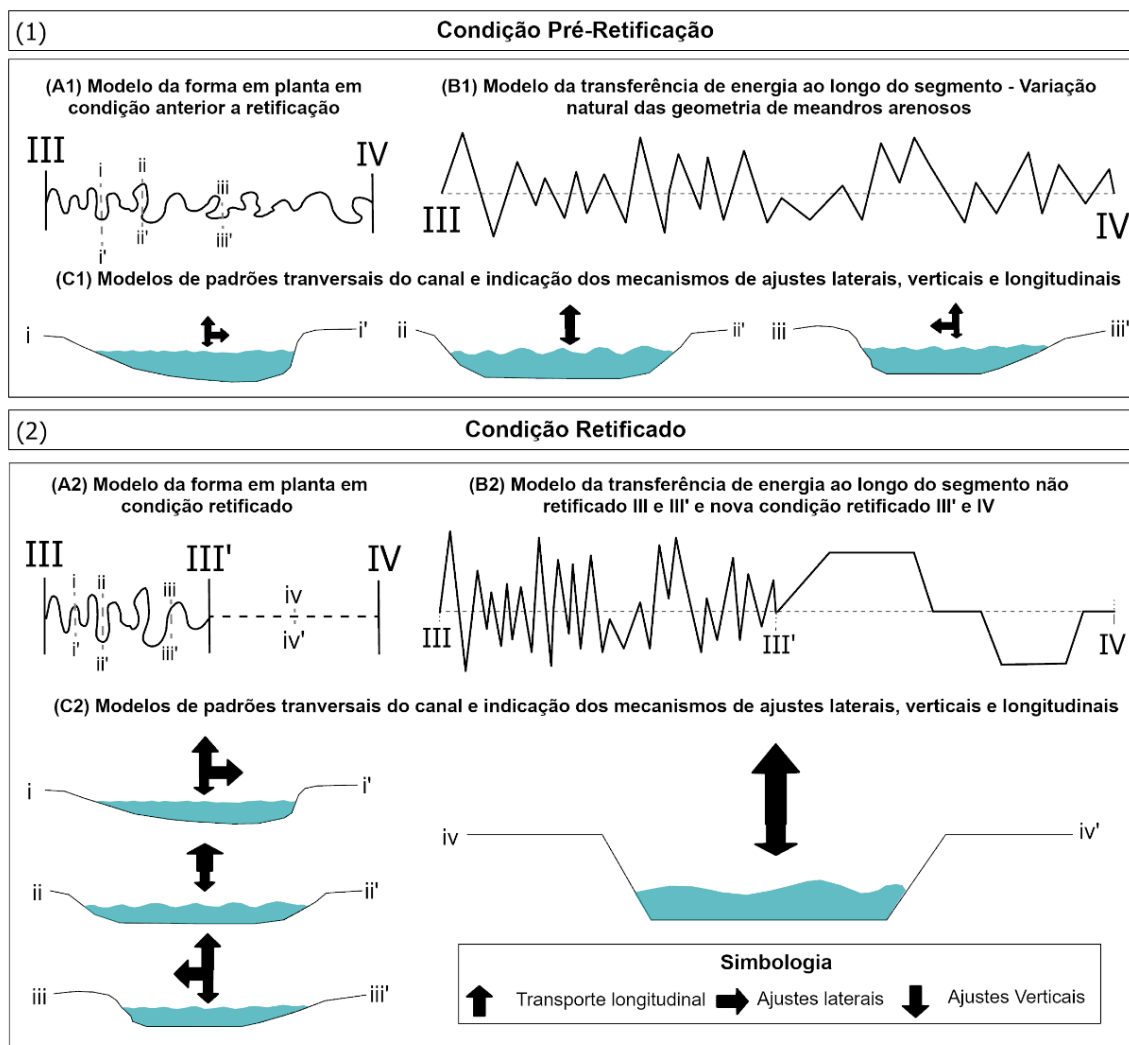


Figura 9. Modelos esquemáticos dos padrões transversais de canal e mecanismos de ajuste antes e após a retificação de um trecho fluvial. Condição pré-retificação (1): (A1) Perfil longitudinal do canal, evidenciando a variação da energia ao longo do segmento. (B1) Forma em planta do canal antes da retificação, mostrando a geometria meândrica natural e (C1) Modelos de padrões transversais com indicação de ajuste para as diferentes geometrias em meandros; (2) Condição retificada: (A2) Perfil longitudinal do canal, comparando a condição pré-retificação (III-IV) com a nova condição após a retificação (III-III'-IV). (B2) Forma em planta do canal após a retificação, mostrando a geometria retilínea imposta e (C2) Modelos de padrões transversais com indicação de ajuste para as diferentes geometrias em meandros após a retificação; Os modelos esquemáticos dos padrões transversais do canal (i-i', ii-ii', iii-iii', iv-iv') indicam os mecanismos de ajuste lateral, vertical e longitudinal, representados pelos símbolos proporcionais (setas em cor preta).

A condição anterior a retificação (figura 9, A1) representa a significativa complexidade atribuída aos processos geomorfológicos em segmentos meândricos, representados pela diversidade em termos de dimensões dos processos (laterais, verticais e longitudinais) que acompanham as diferentes geometrias transversais possíveis nesses segmentos (figura 9, A1 e C1, pontos i-i', ii-ii', iii-iii'). Pela diversidade de processos atribuídos, os segmentos meândricos também são marcados pela alternância natural de intensidade da natureza dos processos geomorfológicos (figuras 9, B1).

Com a retificação de grande parte do canal, há significativa redução na quantidade de meandros (Figura 9, A2) que exercem hoje a função que todo segmento de rio retificado exercia antes da intervenção. Essa mudança representa uma linearização do comportamento do canal (Figura 9, B2), uma vez que os ambientes em meandros com leito de canais arenosos apresentam complexos mecanismos de funcionamento, enquanto canais retificados pelas mudanças operadas pela intervenção que impuseram novas características transversais, não compartilham da mesma dinâmica (Figura 9, C2, pontos iv - iv').

Apesar das importantes mudanças imediatas, os ajustes morfológicos relacionados à dinâmica natural da sinuosidade, como a aumento da amplitude e o estrangulamento dos meandros até os eventos de “Cut-offs” podem ser considerados como esperados diante da própria dinâmica topográfica e climática local. Entretanto, as mudanças do comportamento de todo segmento meândrico, em face das alterações anteriormente discutidas, podem representar um novo padrão de respostas do canal aos eventos de maior e menor energia.

Assim, as mudanças morfológicas como a própria sinuosidade dos segmentos não representam, necessariamente, um comportamento gradual de ajuste. As próprias características da distribuição sazonal das chuvas e o padrão de eventos extremos podem alterar drasticamente um trecho pontual, processo que pode ter sido intensificado pelas alterações imediatas e contínuas impostas pela retificação.

Ao contrário dos processos citados anteriormente, a migração é um ajuste majoritariamente direcional. A indicação de migração implica necessariamente na compreensão de qual direção os ajustes estão se encaminhando na tentativa de se estabelecer novas zonas de dissipação de energia. Schumm (1987) destaca que esse mecanismo de ajuste é comum nos casos de subida ou descida de níveis de base locais, cujo sentido de migração vai depender se a mudança ocorreu a jusante ou a montante, e a intensidade de acordo com a magnitude do evento.

Nessa perspectiva, os pontos próximos a retificação, que apresentaram os maiores valores de variação nas respectivas amplitudes, são também os pontos em que foram identificadas tendências mais expressivas de migração a jusante dos meandros. Esse arranjo de mudanças mais expressivas, espacialmente concentradas, indica que a retificação se configura como um ponto do distúrbio que têm alterado a magnitude dos processos geomorfológicos a montante.

É importante ressaltar que a retificação aconteceu em meados da década de 1960 e que o universo de dados imagéticos de maior detalhe representa uma ausência de informações com cerca de quase 40 anos de ajustes sem caracterização. Ainda assim, a análise dos ajustes recentes indica trechos nos quais as respostas em relação as retificações de canais na bacia do rio Macaé possam estar ocorrendo em uma taxa e magnitude maiores e podem, ou não, representar diferentes, ou os mesmos mecanismos dos canais principais.

6. Conclusões

A retificação de canais fluviais na bacia do rio Macaé alterou importantes características transversais de grande parte da rede de drenagem do baixo curso, relacionado as áreas de grandes planícies fluviais. Apesar dessas importantes alterações, os efeitos da intervenção não se restringiram às modificações pontuais ocorridas ao longo da obra.

Do ponto de vista geomorfológico, o rebaixamento do leito dos canais principais e dos principais rios afluentes ao rio Macaé podem ter induzido um reajuste no caráter longitudinal dos rios que por meio dos processos de erosão a montante podem ter estabelecido uma nova condição de dinâmica longitudinal. Não restrito às características longitudinais dos canais, a mudança do padrão morfológico resultou em uma perda significativa da natureza complexa dos ajustes associados aos antigos meandros arenosos. A condição anterior à retificação de canais exercia uma importante função de dissipação de energia ao longo de todo baixo curso, padrão objetivamente inverso ao estabelecido pela retificação.

Na condição pré-retificação, tratava-se de um sistema mais próximo a ambientes lênticos de pouca energia associada, na condição atual e recente, a magnitude desses ajustes é elevada, caracterizada pela rápida incisão do leito, formação de novas planícies e afloramento de terraços fluviais. A trajetória das mudanças morfológicas recentes indica que essa área continuará com mudanças expressivas, o que representa diversos desafios para gestão e manejo da bacia e que estes devem buscar compreender a relação da retificação como um modificador geral da paisagem fluvial.

Contribuições dos Autores: Concepção, metodologia, software, análise formal, pesquisa, preparação de dados, escrita do artigo, CABRAL, G.K.P; revisão, supervisão, MARÇAL, M.S. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

Financiamento: Esta pesquisa contou com auxílio da bolsa institucional PROEX/CAPES – Programa de Excelência Acadêmica - proveniente do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (nível mestrado) e apoio financeiro através do projeto Universal - Chamada CNPq/MCTI/FNDCT No 18/2021 - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico,

Agradecimentos: Os autores agradecem aos pareceristas pela revisão feita.

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

Referências

1. ALMEIDA, J. (Org.). *Geologia e recursos minerais da folha Macaé SF.24-Y-A-I, estado do Rio de Janeiro escala 1:100.000*. Belo Horizonte: CPRM, 2012.
2. ASSUMPCÃO, A. P.; MARÇAL, M. S. Retificação dos canais fluviais e mudanças geomorfológicas na planície do Rio Macaé (RJ). *Revista de Geografia (UFPE)*, v. 29, n. 3, 2012.
3. BISHOP, C. M. Mixture models and EM. In: BISHOP, C. M. *Pattern Recognition and Machine Learning*. Cambridge: Springer, 2006. p. 429-455.
4. BOWMAN, D. *Base-level Impact: A Geomorphic Approach*. Chichester: Springer, 2023. 154 p.
5. BREDÁ, T. C.; MELLO, C. L.; MORAES, A. Significado tectônico de padrões de lineamentos na porção emersa das bacias marginais do sudeste do Brasil e áreas de embasamento adjacentes. *Anuário do Instituto de Geociências (UFRJ)*, v. 41, p. 305-318, 2018.
6. BRIERLEY, G.; FRYIRS, K.; MARÇAL, M.; LIMA, R. The use of the River Styles Framework as a tool to 'work with nature' in managing rivers in Brazil: examples from the Macaé Catchment. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, São Paulo, v. 20, n. 4, p. 751-771, 2019.
7. BROOKES, A. *Channelized Rivers: Perspectives for Environmental Management*. Chichester: Wiley, 1988. 400 p.
8. CABRAL, G. K. P.; MARÇAL, M. S.; SILVA, T. P.; SILVA, L. O.; RAMOS, R. R. C. Estudo geomorfológico da rede de drenagem para investigação da influência da tectônica ativa na bacia do Rio Macaé-RJ. *William Morris Davis - Revista de Geomorfologia*, v. 4, n. 1, p. 1-21, 2023.
9. CHARLTON, R. *Fundamentals of Geomorphology*. Londres: Routledge, 2007.
10. CHRYSOSTOMO, M. I. J. Uma Veneza no Sertão Fluminense: os rios e os canais em Campos dos Goitacazes. *História Revista*, Goiânia, v. 14, n. 2, 2010.
11. DANTAS, M. E. *Geomorfologia do Estado do Rio de Janeiro*. In: *Estudo geoambiental do Estado do Rio de Janeiro*. Brasília: CPRM, 2000. Mapa. 63 p.
12. DEAN, W. *A ferro e fogo: a história e a devastação da Mata Atlântica brasileira*. 1. ed. São Paulo: Cia. das Letras, 1996. 484 p.
13. FREITAS, L. E.; NUNES, F. S. B.; CRISÓSTOMO, J. H.; CRUZ, O.; VILELA, C.; MENDES, S.; SILVA, A. C.; BORGES, G. *Atlas Ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Macaé*. Rio de Janeiro: Editora Nova Triade do Brasil Ltda., 2015.
14. FRYIRS, K. A.; BRIERLEY, G. J. *Geomorphic Analysis of River Systems: An Approach to Reading the Landscape*. Hoboken: Wiley-Blackwell, 2013. 416 p.
15. GENUER, R.; POGGI, J. M.; TULEAU-MALOT, C. Variable selection using random forests. *Pattern Recognition Letters*, v. 31, n. 14, p. 2225-2236, 2010.
16. GERALDES, M. C. (Org.). *Geologia e recursos minerais da folha Casimiro de Abreu SF.23-Z-B-I, estado do Rio de Janeiro, escala 1:100.000*. Belo Horizonte: CPRM, 2012.
17. GHOSH, S.; ISLAM, A.; DAS, P.; MUKHOPADHYAY, A.; GUPTA, A. D.; SINGH, A. K. Fluvial systems in the Anthropocene: important concepts, issues and research needs. In: ISLAM, A.; DAS, P.; GHOSH, S.; MUKHOPADHYAY, A.; GUPTA, A. D.; SINGH, A. K. (Orgs.). *Fluvial Systems in the Anthropocene: Process, Response and Modelling*. Cham: Springer, 2022.
18. GIESEBART, C. B. *Comportamento geomorfológico de canais fluviais e interferências antrópicas nas áreas de domínio colinoso e planície do Rio Macaé/RJ*. 2022. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Programa de Pós-graduação em Geografia.
19. GOES, Hildebrando de Araujo. *A Baixada de Sepetiba*. Rio de Janeiro: Imprensa Nacional, 1942. 388 p.
20. GOUDIE, A. S. *The human impact on the natural environment*. 4. ed. Chichester: Wiley-Blackwell, 1993.
21. GOUDIE, A. S.; VILES, H. A. Introduction to the Anthropocene and Anthropogeomorphology. In: *Geomorphology in the Anthropocene*. Cambridge: Cambridge University Press, 2016.
22. GREGORY, K. J. The human role in changing river channels. *Geomorphology*, v. 79, n. 3-4, p. 172-191, 2006.
23. GUIMARÃES, L. G. *Mudanças no uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do Rio Macaé*. 2017. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais e Conservação.
24. HOOKE, J. M. Morphodynamics of a meandering channel over decadal timescales in response to hydrological variations. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 47, n. 8, p. 1889-2169, 2022.

25. HOOKE, J. M. River meandering. In: SHRODER, J.; WOHL, E. (Eds.). *Treatise on Geomorphology*. San Diego: Academic Press, 2013. v. 9, p. 260-288.
26. IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). *Base cartográfica contínua do estado do Rio de Janeiro. Escala 1:25.000*. Rio de Janeiro: IBGE, 2018.
27. IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). *Mapeamento geomorfológico Brasil. Escala 1:250.000*. Rio de Janeiro: IBGE, 2023.
28. KELLY, J. M.; SCARPINO, P. V.; BERRY, H.; SYVITSKI, J.; MEYBECK, M. *Rivers of the Anthropocene*. Berkeley: University of California Press, 2018. 242 p.
29. KENDALL, M. *Rank Correlation Methods*. 4. ed. Londres: Oxford University Press, 1990.
30. LAMEGO, A. R. (2007 [1946]). *O Homem e o Brejo*. Rio de Janeiro: IBGE, 2007.
31. LEOPOLD, L. B.; BULL, W. B. Base level, aggradation, and grade. *Proceedings of the American Philosophical Society*, v. 123, n. 3, p. 168-202, 1979.
32. LIAW, A.; WIENER, M. Classification and regression by randomForest. *R News*, v. 2/3, 2002.
33. MAGALHÃES JR, A. P.; BARROS, L. F. P. *Hidrogeomorfologia - Formas, processos e registros sedimentares fluviais*. 1. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2020. 417 p.
34. MARÇAL, M. S.; BRIERLEY, G.; LIMA, R. Using geomorphic understanding of catchment-scale process relationships to support the management of river futures: Macaé Catchment, Brazil. *Applied Geography*, v. 84, p. 23-41, 2017.
35. MARÇAL, M. S.; RAMOS, R. R. C.; SESSA, J. C.; FEVRIER, P. V. R. Sedimentação fluvial quaternária no vale do alto curso do Rio Macaé, estado do Rio de Janeiro, Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 16, n. 3, 2015.
36. PESSOA, D. F. O processo de retificação do Rio Tietê e suas implicações na cidade de São Paulo, Brasil. *Paisag. Ambiente: Ensaios*, São Paulo, v. 30, n. 44, 2019.
37. PHILIPS, J. D. The perfect landscape Geomorphology. *Geomorphology*, v. 84, n. 3-4, p. 159-169, 2007.
38. SCHUMM, S. A. River response to base level change: Implications for sequence stratigraphy. *The Journal of Geology*, v. 101, n. 2, p. 279-294, 1993.
39. SCHUMM, S. A. *River Variability and Complexity*. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
40. SCHUMM, S. A.; MOSLEY, M. P.; WEAVER, W. E. *Experimental fluvial geomorphology*. New York: John Wiley & Sons, 1987.
41. SILVA, L. C.; CUNHA, H. C. S. (Org.). *Geologia do Estado do Rio de Janeiro: texto explicativo do mapa geológico do estado do Rio de Janeiro* (escala de 1:500.000). Brasília: CPRM, 2001.
42. SOFFIATI, A. A grande transformação da planície do norte do Rio de Janeiro (1933-1990). *Ambientes*, v. 3, n. 1, p. 151-189, 2021.
43. SOFFIATI, A. DNOS: uma instituição mítica da República Brasileira. *Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais*, v. 7, n. 2, p. 29-46, 2005.
44. STEINLEY, D.; BRUSCO, M. J. Choosing the number of clusters in K-means clustering. *Psychological Methods*, v. 16, n. 3, p. 285-297, 2011.
45. SZABÓ, J.; DÁVID, J.; LÓCZY, D. *Anthropogenic Geomorphology: A Guide to Man-Made Landforms*. Cham: Springer, 2010. 299 p.
46. WEISBERG, S. Multiple regression. In: WEISBERG, S. *Applied Linear Regression*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005. p. 19-68.
47. WEST, D. C.; MELLO, C. L. Distribuição da formação Barreiras na região sul do Espírito Santo e sua relação com a deformação neotectônica. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, São Paulo, v. 21, n. 1, p. 155-170, 2020.
48. ZANIRATO, S. H. História da ocupação e das intervenções na várzea do Rio Tietê. *Revista Crítica Histórica*, v. 2, n. 4, 2011.
49. ZOLA, J. A. B. Algumas divergências entre os projetos e as ações que antecederam as obras de retificação do Rio Tietê na cidade de São Paulo. In: *Anais do XV Seminário de História da Cidade e do Urbanismo*. Rio de Janeiro: UFRJ, 2018.



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.