



Centro de Estudos de Geografia
e Ordenamento do Território

QUEIROZ, PEDRO

Universidade Estadual do Ceará, Programa de Pós-Graduação em Geografia

Avenida Dr. Silas Munguba, 1700, Campus do Itaperi, Fortaleza, Ceará, Brasil
pedrobalduino@hotmail.com

PINHEIRO, LIDRIANA

Universidade Estadual do Ceará, Programa de Pós-Graduação em Geografia

Avenida Dr. Silas Munguba, 1700, Campus do Itaperi, Fortaleza, Ceará, Brasil
lidriana.lgco@gmail.com

CAVALCANTE, ANDREA

Universidade Estadual do Ceará, Programa de Pós-Graduação em Geografia

Avenida Dr. Silas Munguba, 1700, Campus do Itaperi, Fortaleza, Ceará, Brasil
andrea.uece@gmail.com

TRINDADE, JORGE

Universidade de Lisboa, Instituto de Geografia e Ordenamento do Território-IGOT,

Rua Branca Edmée Marques, Cidade Universitária, 1600-276 Lisboa, Portugal
jorge.trindade@uab.pt

Formação e evolução morfológica de barras e ilhas em rios semiáridos: o contexto do baixo curso do Rio Jaguaribe, Ceará, Brasil

Formation and morphological evolution of bar and islands in semi-arid rivers: the context of the low course of the Jaguaribe River, Ceará, Brazil

Referência: Queiroz, Pedro et al. (2018). Formação e evolução morfológica de barras e ilhas em rios semiáridos: o contexto do baixo curso do Rio Jaguaribe, Ceará, Brasil. *Revista de Geografia e Ordenamento do Território (GOT)*, n.º 13 (junho). Centro de Estudos de Geografia e Ordenamento do Território, p. 363-388, [dx.doi.org/10.17127/got/2018.13.016](https://doi.org/10.17127/got/2018.13.016)

RESUMO

Este estudo trata da formação e evolução morfológica de barras e ilhas fluviais no baixo curso do rio Jaguaribe, particularmente no segmento a jusante da barragem do açude Castanhão, em anos secos e chuvosos. Metodologicamente, recorreu-se a determinação de anos-padrão secos e chuvosos, a utilização das ferramentas de sensoriamento remoto, através do uso de fotografias aéreas e *softwares* de geoprocessamento para o mapeamento das diferentes tipologias de barras e ilhas fluviais. Os resultados indicaram que a formação destas feições reflete as variações de vazão e precipitação no baixo curso do rio Jaguaribe, como comprovaram os dados do coeficiente de correlação linear de Pearson e do coeficiente de determinação, ou seja, nos anos considerados secos observou-se uma redução das feições devido à ausência de fluxos significativos para promover o transporte de sedimentos, ao passo que, em anos chuvosos verificou-se um incremento de barras fluviais, sobretudo pela ação cíclica dos processos erosivos e sedimentares que promovem a distribuição e redistribuição dos sedimentos no canal.

Palavras-chave: Rios Semiáridos, Barras e ilhas fluviais, Morfologia

ABSTRACT

This study deals with the morphological evolutionary formation of bars and islands in the lower reaches of the Jaguaribe river, particularly without a segment downstream of the Castanhão dam, in dry and rainy years. Methodologically, we used the determination of dry and rainy standard years, the use of remote sensing tools, through the use of aerial photographs and geoprocessing software to map the different typologies of bars and river islands. The results indicated that the formation of these features reflects the flow and precipitation variations in the lower Jaguaribe river, as evidenced by the data of Pearson's linear correlation coefficient and the coefficient of determination, that is, in the years considered dry there was a due to the absence of significant flows to promote sediment transport, whereas, in rainy years, there was an increase in bars, mainly due to the cyclical action of the erosive and sedimentary processes that promote the distribution and redistribution of the sediments in the channel.

Keywords: Rivers Semi-Arid, Bars and River Islands, Morphology

1. Introdução

As barras e ilhas fluviais configuram-se como elementos morfológicos marcantes nos variados padrões de canais e refletem o ajuste nas condições de fluxo e no transporte de sedimentos. Assim, são resultantes de sucessivos eventos erosivos e sedimentares na planície e no canal, diferenciando-se quanto aos processos formativos e evolutivos, sobretudo no que se refere à instabilidade morfológica e ao comportamento frente ao nível de margens plenas.

O termo barra fluvial é empregado para caracterizar desde uma simples feição deposicional até complexas formas decorrentes de múltiplos eventos erosivos e deposicionais (COLLINSON, 1986), cujas taxas de migração podem variar de horas, dias, meses ou até anos, dependendo de condicionantes climáticos, topográficos e hidrológicos (SMITH, 1974; STEVAUX *et al.* 1992).

As ilhas fluviais, por sua vez, caracterizam-se pela relativa estabilidade diante dos processos erosivos e sedimentares, sobretudo pela presença de vegetação, que, embora constitua um bom indicador de estabilidade e forneça uma distinção entre uma barra e uma ilha, não é necessariamente um requisito para conceituar uma ilha fluvial (LEOPOLD e WOLMAN, 1957; BRICE, 1964; STEVAUX, 1992; OSTERKAMP, 1998; WYRICK, 2005; SÁNCHEZ MOYA e SOPEÑA, 2010). O desenvolvimento da vegetação nas ilhas fluviais é controlado, dentre outros fatores, pelo tempo de emersão da superfície da barra, pelo tipo de sedimentos e pelo tipo

de vegetação disponível para colonização (DORING e TOCKNER, 2009; SÁNCHEZ MOYA e SOPEÑA, 2010), de modo que tais fatores influenciam diretamente na natureza das ilhas, no tamanho potencial e na capacidade de resistência frente aos processos erosivos. Este estudo visa contribuir para o avanço das pesquisas em Geomorfologia fluvial, particularmente no semiárido, onde o regime de escoamento e o transporte de sedimentos nos canais fluviais são fortemente condicionados pelo regime pluviométrico e pela dinâmica de barramentos, em razão da construção de açudes e barragens. Embora bastante estudada, a planície fluvial do rio Jaguaribe ainda suscita pesquisas relacionadas à sua dinâmica morfológica, especialmente acerca dos processos evolutivos em barras e ilhas fluviais. O baixo Jaguaribe ocupa uma área de aproximadamente 8.893km², drenando a área de 13 municípios. O recorte de estudo desta pesquisa abrange o canal fluvial do rio Jaguaribe em seu baixo curso, contemplando uma extensão de aproximadamente 130 km, drenando de modo mais expressivo os municípios de Tabuleiro do Norte, Russas, Limoeiro do Norte, Fortim, Jaguaruana, Itaicaba e Aracati (Ver Figura 1).

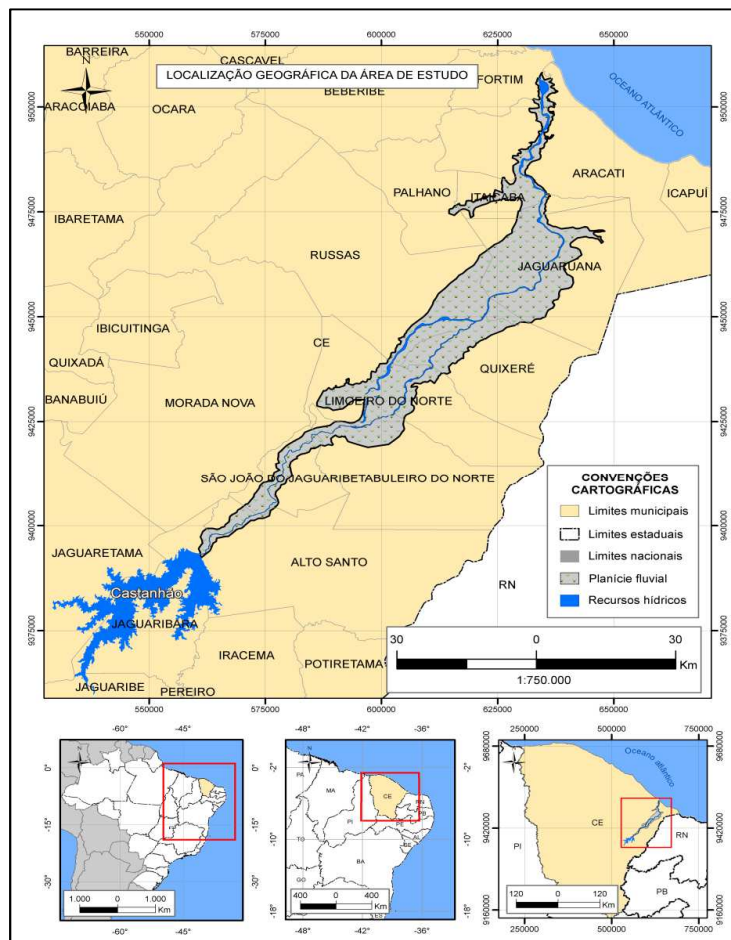


Figura 1- Localização geográfica da área de estudo.
Fonte: elaborado pelo autor, 2017.

2. Materiais e métodos

Em termos gerais, a metodologia empregada compreendeu três etapas específicas e complementares, a saber: 1ª) definição de anos-padrão secos e chuvosos, 2ª) mapeamento morfológico da quantidade e área de barras e ilhas fluviais, 3ª) tratamento estatístico dos dados e discussão dos resultados.

Considerando que em regiões semiáridas a precipitação é a variável mais importante a definir um padrão para um sistema fluvial, observou-se que os regimes pluvial e fluvial no rio Jaguaribe apresentam características semelhantes, ou seja, os anos mais chuvosos correspondem aos momentos de maior energia no canal. Em contrapartida, nos anos menos chuvosos, observam-se os menores fluxos de energia no rio. Desse modo, para o estudo da evolução morfológica em barras e ilhas no rio Jaguaribe, optou-se pela determinação de anos-padrão secos (baixa energia) e chuvosos (alta energia), com o intuito de compreender as repercussões das variações pluviométricas na morfologia de barras e ilhas fluviais.

Assim, o processo de eleição de anos padrão se desenvolveu levando em conta um tratamento estatístico em torno do método de Tavares (1976), denominado Desvio Percentual das Precipitações Sazonais (DPPS), que propõe por meio de dados mensais, sazonais e anuais uma análise temporal a cerca da realidade de distribuição pluviométrica durante uma série histórica. O método propõe uma classificação de três tipos de anos-padrão: o ano seco, o habitual e o chuvoso.

Inicialmente foram corrigidas as falhas para a cada uma das estações consideradas no estudo, ao passo que, a etapa seguinte consistiu na organização dos dados em torno dos totais mensais, respeitando seus limites anuais. Em seguida, os dados foram agrupados em períodos trimestrais, correspondentes a cada uma das estações do ano (verão, outono, inverno e primavera), permitindo assim, o cálculo da precipitação média de cada uma das estações. Na sequência, calculou-se o desvio médio para cada estação do ano, a partir do valor da média trimestral subtraído pelo valor da média geral. Pelo desvio médio, chegou-se ao desvio percentual, que é resultado da divisão do desvio médio pela média geral do ano, multiplicado por 100. Conforme Tavares (1976) os desvios próximos de 0 (zero) são

considerados *habituais*; aqueles que apresentaram grandes desvios positivos são os *chuvosos*; e os de grandes desvios negativos correspondem aos *secos*.

Estabelecidos os anos-padrão e considerando a disponibilidade de imagens de satélite para a área, optou-se por estudar os anos de 1958, 1984, 2001, 2009, 2014. A escolha dos anos citados permitiu avaliar a evolução morfológica de barras e ilhas numa perspectiva temporal de 56 anos, com ênfase nas variações do regime pluviométrico (anos secos e chuvosos), concomitantemente.

O ano de 1958 marca o início da disponibilidade de imagens para a área, e mesmo não tendo sido considerado na determinação dos anos-padrão (em razão da falha de dados na série histórica), estudos anteriores realizados Cavalcante (2012) o evidenciam como um ano bastante seco. Conforme a aplicação da metodologia dos anos-padrão, 1984 foi definido como um ano chuvoso (cuja precipitação média anual foi de 1144,9mm ano⁻¹ e a vazão média anual registrada foi 153,5m³ s⁻¹); o ano de 2001 foi considerado seco (cuja precipitação média anual foi de 437,8mm ano⁻¹ e a vazão média anual foi 8,62m³ s⁻¹); o ano de 2009 foi considerado chuvoso (cuja precipitação média anual foi elevada, em torno de 1305mm ano⁻¹, e a vazão média anual foi de 195, m³ s⁻¹); 2014 foi considerado um ano seco (cuja precipitação média anual foi de 448,2mm ano⁻¹ e a vazão média anual foi de 10,3m³ s⁻¹) e marca o mapeamento mais recente da área.

Para o ano de 1958, foram utilizadas fotografias aéreas cedidas pelo Instituto do Desenvolvimento Agrário do Ceará-IDACE na escala de 1:25.000; para os anos de 1984, 2001, 2009 foram utilizadas imagens de satélite do sensor *Landsat 5/Thematic Mapper* (TM), disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE; e para o ano de 2014 foram utilizadas imagens do *Landsat 8*, sensor *Operational Land Imager* (OLI), obtidas junto ao Serviço Geológico Americano-USGS.

O passo seguinte consistiu no georreferenciamento das imagens para compatibilizar as fotografias aéreas com as imagens de satélite do *Landsat 5* e do *Landsat 8*. A sobreposição destas imagens possibilitou uma análise da mobilidade das ilhas e barras fluviais, permitindo assim inferir algumas questões sobre a dinâmica morfológica do canal. Cabe salientar que as datas das imagens correspondem ao período pós-estação chuvosa na região, quando se verificou uma menor dinâmica de fluxos no rio, bem como uma menor cobertura de nuvens nas imagens. Ademais, o processamento das imagens de satélite e das fotografias aéreas,

bem como a quantificação das feições morfológicas, foram realizados utilizando-se as ferramentas do *software* ArcGIS 10.1.

As diferentes tipologias de barras e ilhas fluviais identificadas no canal do rio Jaguaribe foram classificadas tomando como base as propostas de Charlton (2007), Stevaux *et al.* (1992), Stevaux (1993), Morais (2002, 2006) e Leli (2015), considerando, para tanto, as condições específicas de semiaridez do rio Jaguaribe.

A etapa final envolveu a sistematização, a integração e a interpretação das informações obtidas nas etapas anteriores. Inicialmente foram pormenorizados os dados referentes à quantidade, à área e à variação percentual das feições morfológicas. Em seguida, de posse dos dados de vazão média anual, obtidos juntos à Agência Nacional de Águas-ANA, e da quantidade de barras fluviais para cada uma das tipologias, foram estipulados os Coeficientes de Correlação de Pearson (r) e de Determinação (R^2) para avaliar o grau de associação entre essas variáveis. Para este estudo, considerou-se como uma correlação positiva entre as variáveis os valores superiores a 0,5 (TRIOLA, 1999; NAGHETTINI e PINTO, 2007).

3. Resultados e discussões

Inicialmente foram analisados os dados morfológicos referentes ao total de barras fluviais. Assim, no ano de 1958, considerado seco, foram contabilizadas 154 barras fluviais recobrando uma área de aproximadamente 30,5km², ao passo que, no ano de 1984, considerado chuvoso, essas feições passaram a ocupar uma área de 37,1km², distribuída em 203 barras, evidenciando, portanto, um aumento de 31,8% na quantidade e 21,6% na área de barras fluviais.

No ano de 2001, considerado um ano seco e, portanto, de baixos fluxos no canal, as barras apresentaram uma redução em relação ao ano de 1984, de modo que se verificou a existência de 157 barras fluviais, ocupando uma área de cerca de 30 km², o que relevou uma redução percentual na quantidade e na área de 22,6% e 19,1%, respectivamente. Como se pode observar, o aumento da precipitação e da vazão entre os anos de 1958 e 1984 e, em

seguida, a redução entre os anos de 1984 e 2001 mantiveram relação direta com a dinâmica de formação de barras fluviais no canal.

Em 2009, verificou-se um novo ciclo de agradação no canal, evidenciado pelo incremento quantitativo e areal das feições, de forma que foram identificadas 205 barras recobrimdo uma área no canal de cerca de 36km², o que percentualmente revelou um aumento quantitativo e areal de 30,5% e 20%, respectivamente, em relação ao ano de 2001. Em anos chuvosos, como 2009, por exemplo, acredita-se que, mesmo após o período de picos de fluxos, os materiais depositados lateralmente e na parte superior (*top bar*) das barras fluviais possam ser expostos à ação de pequenas correntes erosivas que remodelam essas feições, levando-as a adquirir diferentes morfologias.

No ano de 2014, ainda que as barras fluviais tenham apresentado uma redução quantitativa, totalizando 153 feições (52 barras fluviais a menos que no ano de 2009), registrou-se um sensível incremento areal de 1,2km², ocupando uma área de 37,2km². Assim, entre 2009 e 2014, as barras fluviais apresentaram um decréscimo percentual em quantidade de 25,3% e um acréscimo percentual em área de 3,3%. Nota-se que, apesar do intervalo temporal de análise, entre 2001 e 2014 ser reduzido (13 anos), o retrabalhamento das feições manteve-se praticamente igual àquele verificado no período de 1984 e 2001 (portanto, um intervalo temporal maior, de 20 anos), quando se verificou uma média de formação de aproximadamente 48 a 50 barras entre um período e outro. Essa dinâmica indica que no rio Jaguaribe o ciclo de vida das barras fluviais é curto, em função da rápida mobilidade dos sedimentos entre o período seco e chuvoso, fazendo com que essas feições não se estabilizem por longos períodos no canal, sobretudo em eventos de cheias.

Sumarizando, nota-se que a dinâmica de formação de barras fluviais no baixo curso do rio Jaguaribe se dá em consonância com a dinâmica das precipitações e vazões, de modo que, nos anos considerados secos (2001 e 2014) observou-se uma redução das feições devido à ausência de fluxos significativos para promover o transporte de sedimentos, ao passo que, em 1984 e 2009 houve um incremento de barras fluviais, sobretudo pela entrada de novos fluxos no canal, que, pela ação cíclica dos processos erosivos e sedimentares, promoveram a redistribuição dos sedimentos no canal, culminando em feições morfológicas de diferentes tamanhos e formas geométricas, a saber, barras laterais, centrais, longitudinais, em pontal.

Tal afirmação pode ser validada com base nos dados de correlação linear e do coeficiente de determinação, obtidos a partir da intersecção das variáveis precipitação, vazão e quantidade total de barras fluviais. Inicialmente, para a relação entre a vazão média anual e a quantidade total de barras fluviais, obteve-se um coeficiente de correlação de 0,9869 e um coeficiente de determinação 0,974 ($R^2 = 97\%$), ao passo que para a relação entre a precipitação média anual e a quantidade total de barras fluviais, obteve-se um coeficiente de correlação de 0,9911 e um coeficiente de determinação de 0,982 ($R^2 = 98\%$). Em ambas as análises, os valores da correlação linear de Pearson são superiores a 0,5, indicando uma associação linear forte positiva entre as variáveis, ou seja, à medida que houve oscilações de precipitação e vazão, ocorreram variações na quantidade total de barras laterais no baixo curso do rio Jaguaribe, como retratam as figuras 2 e 3.

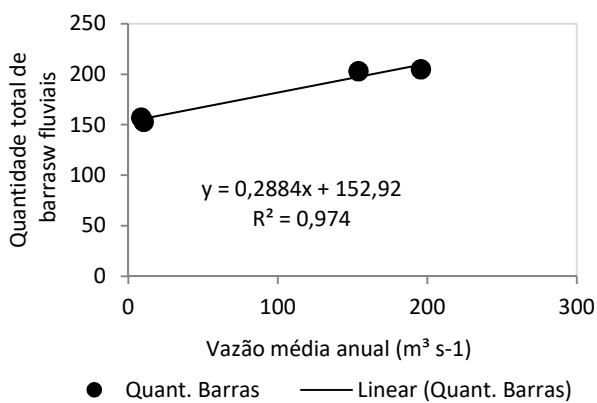


Figura 2- Gráfico de correlação linear entre as variáveis vazão média anual ($m^3 s^{-1}$) e quantidade total de barras fluviais no baixo curso do rio Jaguaribe. Fonte: elaborado pelo autor, 2017.

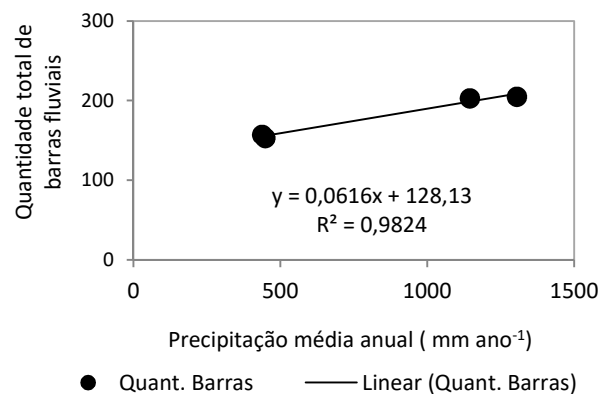


Figura 3- Gráfico de correlação linear entre as variáveis precipitação média anual ($mm ano^{-1}$) e quantidade total de barras fluviais no baixo curso do rio Jaguaribe. Fonte: elaborado pelo autor, 2017.

Em seguida, foram analisados dos dados morfológicos relacionados às barras laterais e centrais. Os resultados mostraram que, no ano de 1958, considerado seco, as barras laterais somavam 107 feições ocupando uma área de $19,1km^2$, enquanto, em 1984, foram contabilizadas 147 feições recobrando uma área de $29,6km^2$, revelando um aumento percentual de 37,3% na quantidade e 55% na área de barras laterais.

Em contrapartida, no ano de 2001, considerado seco, as barras laterais apresentaram um decréscimo quantitativo e areal, de modo que foram contabilizadas 113 feições laterais

ocupando uma área de 27,2km². Em termos percentuais, os dados demonstraram uma diminuição de 23,1% na quantidade e 8,1% na área dessas feições em relação ao ano de 1984. Decerto, a redução de barras laterais entre 1984 e 2001 está relacionada ao fato de que os baixos fluxos propiciaram o desenvolvimento de vegetação na superfície das barras, favorecendo a anexação destas à planície de inundação.

Contudo, no ano de 2009, as barras laterais voltaram a apresentar um aumento em função dos elevados fluxos registrados, de modo que foram identificadas 133 feições, abrangendo uma área de 27,7km². Esses valores equivalem a um aumento percentual de 17,7% na quantidade e 2,5% na área em relação ao ano de 2001.

No ano de 2014, considerado seco, as barras laterais apresentaram uma redução na quantidade, de modo que, foram mapeadas 122 feições, no entanto, com uma área de 30,7 km², representando em termos absolutos, uma redução quantitativa de 11 barras, e um aumento areal de 3km².

Outra investigação importante realizada nesse momento, diz respeito aos dados do coeficiente de correlação linear e de determinação estimados para a relação vazão, precipitação e quantidade de barras laterais. A relação entre a vazão média anual e a quantidade total de barras laterais revelou um coeficiente de correlação de 0,8052 e um coeficiente de determinação de 0,6484 ($R^2= 65\%$), ao passo que para a relação entre a precipitação média anual e a quantidade total de barras laterais, obteve-se um coeficiente de correlação de 0,8234 e um coeficiente de determinação de 0,678 ($R^2=68\%$).

As barras centrais expressaram importantes alterações do ponto de vista quantitativo e areal ao longo do período analisado, indicando diferentes ajustes no comportamento morfológico do canal. Assim, no ano de 1958, foram contabilizadas 47 feições ocupando uma área de 11,4km², ao passo que, em 1984, os dados indicaram um aumento quantitativo para 56 barras centrais, no entanto, com uma redução areal de 7,4km², indicando, em termos percentuais, um aumento de 19,1% na quantidade, com uma redução areal da ordem de 35%.

Os valores observados para os anos de 1958 e 1984 revelaram que o retrabalhamento das barras centrais pela ação dos processos erosivos contribuiu para o incremento quantitativo, no entanto, as feições apresentaram menores dimensões em termos de área. A justificativa para isso pode estar associada ao fato de que as barras de tamanho médio e grande,

desprovidas de vegetação, possam ter se fragmentado em barras menores, o que contribuiu para um incremento quantitativo de feições em 1984. De todo modo, essa dinâmica observada em 1984 revelou um canal bastante entrelaçado, cujo surgimento de novas barras centrais esteve diretamente associado à divisão da linha de fluxo.

Em 2001, cuja precipitação e vazão médias anuais foram reduzidas, as barras centrais apresentaram uma diminuição na quantidade e na área, de forma que foram contabilizadas 44 feições (12 feições a menos que em 1984) ocupando uma área de 2,9km², revelando, portanto, uma redução percentual de 21,4% na quantidade e 60,8% na área. Esse decréscimo na quantidade de barras centrais verificado em 2001 indica uma sensível tendência de retificação do canal, com a diminuição do número de fluxos secundários, e a incorporação de barras centrais às margens do rio.

No ano de 2009, considerado chuvoso, verificou-se uma nova fase de agradação no rio, evidenciada pelo acréscimo das feições, que passaram a ocupar uma área de 8,4km², correspondendo a 72 barras centrais, que equivalem a um aumento percentual de 63,6% na quantidade e de 189,6% na área, denotando, portanto, que o canal encontrava-se mais entrelaçado por barras e ilhas fluviais em relação ao ano de 2001. Porém, no ano de 2014, essas feições voltaram a apresentar uma redução, de maneira que foram mapeadas 31 feições centrais ocupando uma área de 6,4km², equivalente a uma redução percentual de 56,9% na quantidade e 23,8% na área de barras centrais.

Considerando que o índice de entrelaçamento do canal por barras fluviais aumenta com a carga de sedimentos e diminui com a presença de vegetação (COULTHARD, 2005), é possível presumir que em anos secos, como 1958, 2001 e 2014, por exemplo, os baixos fluxos associados ao desenvolvimento da vegetação sobre as barras centrais tenderam a estabilizar o padrão de canal, diminuindo a erosão e a disponibilidade de sedimentos (inibindo a formação de novas barras centrais), e, portanto reduzindo o índice de entrelaçamento. Por outro lado, em anos chuvosos como 1984 e 2009, o entrelaçamento do canal é maior em virtude do maior aporte de água e sedimentos.

A relação entre a vazão média anual e quantidade total de barras centrais revelou um coeficiente de correlação de 0,9262 e um coeficiente de determinação de 0,8579 ($R^2= 85\%$), ao passo que para a relação precipitação média anual e a quantidade total de barras laterais obteve-se um coeficiente de correlação de 0,9178 e um coeficiente de determinação de

0,8425 ($R^2=84\%$). Tanto para as barras laterais, quanto para as barras centrais, os valores da correlação linear de Pearson foram superiores a 0,5, indicando uma associação linear forte positiva entre as variáveis.

O mapeamento mostrou a predominância de barras laterais e centrais ao longo de toda a escala temporal, especialmente nos segmentos que drenam os municípios de São João do Jaguaribe, Tabuleiro do Norte (Distrito de Peixe Gordo) e Limoeiro do Norte. Em adição, observou-se que as barras laterais e centrais de menor porte apresentaram uma maior mobilidade ao longo da escala temporal estudada, ao passo que as de médio e grande porte, especialmente as que se encontravam vegetadas, demonstraram um retrabalhamento preferencial nas bordas, exceto em períodos de grandes fluxos no canal. Do ponto de vista comparativo, acredita-se que, mesmo nos períodos de cheias, as barras de grande porte em rios de áreas semiáridas sofram de modo mais acentuado a erosão nas bordas quando comparadas às barras de grande porte em rios de áreas úmidas/subúmidas, haja vista a intensidade dos fluxos fluviais durante o período chuvoso. Esse processo contribui, inclusive, para que ocorram alterações na morfologia das barras centrais e laterais, mudando completamente a geometria entre os períodos seco e chuvoso.

Essa dinâmica observada no rio Jaguaribe corrobora com a ideia de Stevaux (1992) de que, dependendo da dimensão areal das barras, o comportamento deposicional parece ser mais significativo para a evolução de barras laterais, enquanto, para as barras centrais, os processos erosivos são mais importantes, contribuindo para um retrabalhamento contínuo.

Em alguns trechos do canal, foi possível observar a ocorrência de barras centrais com prolongamento do tipo *flank bar* (RICE, *et al.* 2009), como mostra a figura 4, em que uma das extremidades da barra apresenta um alongamento longitudinal formando uma espécie de “cauda”. Cant e Walker (1978) e Asworth *et al.* (2000) ressaltam que, em planta, essas barras apresentam configurações variadas, onde a barra unitária atua como um núcleo em cujos extremos se aderem outras. Com frequência, a acreção se produz preferencialmente em um dos lados, de modo que a morfologia final é assimétrica.



Figura 4- Em *a* e *b*- formação de barras centrais próximo ao Distrito de Peixe Gordo no ano de 2008 em *c*- formação de barras centrais com prolongamento do tipo “*flank bar*”, próximo ao município de Aracati.

As barras em pontal foram mapeadas em trechos onde o canal apresenta um padrão meândrico, permitindo avaliar as condições hidrodinâmicas que se desenvolvem nas margens côncavas e convexas das curvas do rio. No caso do rio Jaguaribe, a dinâmica de sedimentação observada em ambas as margens (côncava e convexa) contradiz o esquema teórico tradicional acerca do comportamento morfológico dos meandros, demonstrando que a acreção lateral não se produz exclusivamente nas margens convexas.

Quanto aos dados, verificou-se que no ano de 1958 foram contabilizadas 19 barras em pontal, ocupando uma área de 4,2km², ao passo que, em 1984, ocorreu um incremento de 26 feições ocupando uma área de aproximadamente 5,7km², distribuídas ao longo dos trechos sinuosos do canal. Em termos percentuais, verificou-se um aumento de 35,7% na área e 36,4% no número de feições.

Quando confrontados os mapas de evolução dos anos de 1958 (seco) e 1984 (chuvoso), observou-se que, além do aumento quantitativo e areal, as barras em pontal no baixo curso do rio Jaguaribe apresentaram mutações morfológicas importantes, sobretudo na posição e forma ao longo do canal, tendo em vista que algumas dessas feições evoluíram para barras centrais e vice-versa. De outro modo, verificou-se que as variações de fluxo produziram impactos significativos na morfologia dessas feições, haja vista que, após um período de cheias, como observado no ano de 1984, os processos deposicionais ocorreram predominantemente nas extremidades da barra, ou seja, na cauda da barra (*bar tail*), favorecendo o desenvolvimento areal desse setor em detrimento de outros, como, por exemplo, a cabeça da barra (*bar head*), como mostram as figuras 5 e 6.

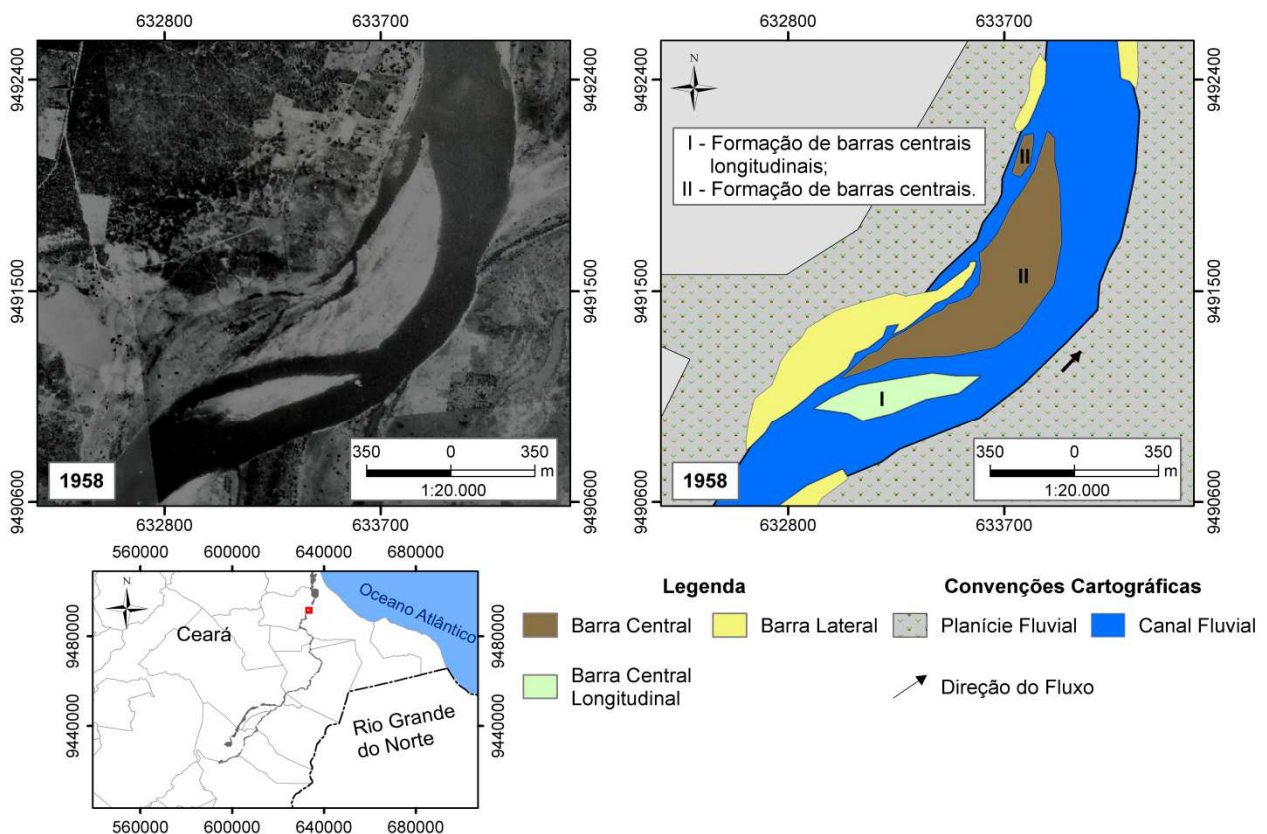


Figura 5 - Evolução morfológica de uma barra central para uma barra em pontal em um trecho do canal próximo ao município de Aracati no ano de 1958 (seco). Fonte: elaborado pelo autor, 2017.

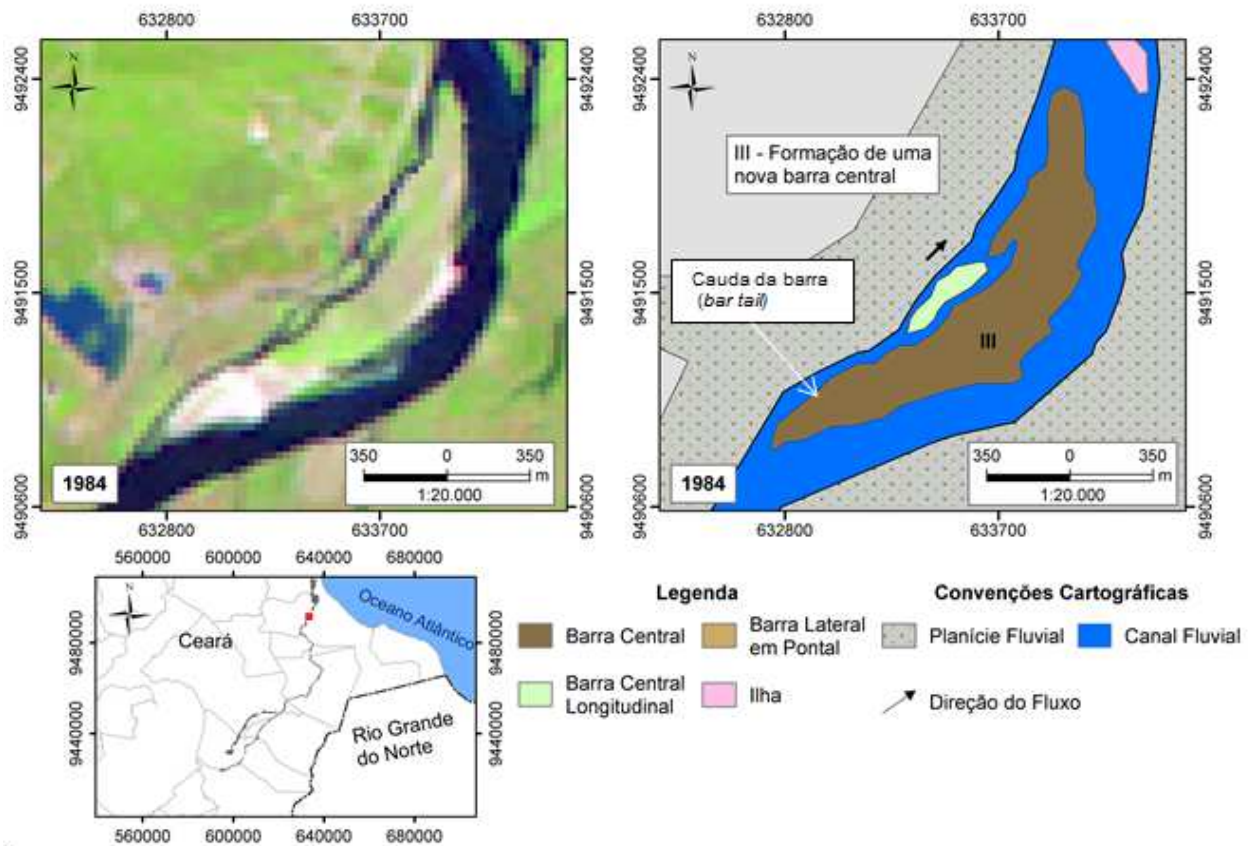


Figura 6 - Evolução morfológica de uma barra central para uma barra em pontal em um trecho do canal próximo ao município de Aracati no ano de 1984 (chuvoso). Fonte: elaborado pelo autor, 2017. Em 2001, essas feições apresentaram uma significativa redução, de modo que foram identificadas 16 barras em pontal, recobrando uma área de 4,7km². Entre 1984 e 2001, observou-se uma redução percentual de 38,4% na quantidade e 17,7% na área dessas feições. No ano de 2001, no segmento em estudo, verificou-se a desagregação da barra central, resultando em uma barra central de menor dimensão areal (III) em relação ao ano de 1984, e a formação de uma nova barra central longitudinal (IV), cenário bastante semelhante àquele verificado em 1958 (Figura 7).

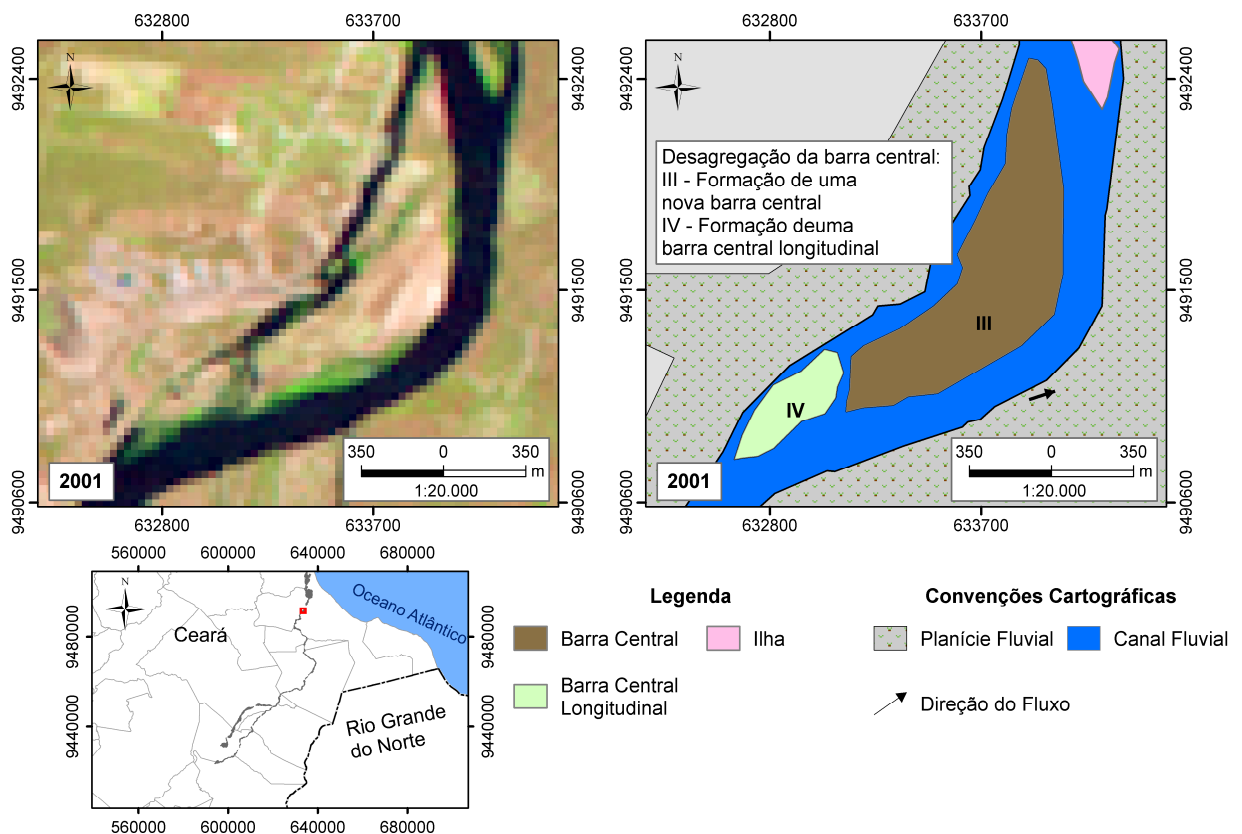


Figura 7 - Evolução morfológica de uma barra central para uma barra em pontal em um trecho do canal próximo ao município de Aracati no ano de 2001 (seco). Fonte: elaborado pelo autor, 2017.

Contudo, no ano de 2009, as barras em pontal voltaram a apresentar significativo acréscimo, de maneira que foram mapeadas 36 feições, abrangendo uma área de 9,4km², revelando, portanto, um aumento percentual em quantidade e área da ordem de 125% e 100%, respectivamente, em relação ao ano de 2001. No ano de 2014, essas feições apresentaram um novo acréscimo, sendo contabilizadas 39 feições, ocupando uma área de 9,6km², o que indicou um aumento percentual de 8,3% na quantidade e 2,1% na área dessas feições. Acredita-se que uma parcela dos sedimentos que adentraram o canal para a formação dessas barras em pontal sejam provenientes do próprio aporte do rio (sobretudo em 2009, por se tratar de um ano chuvoso, cuja dinâmica de fluxos e sedimentos foi intensa), bem como em decorrência de processos erosivos nas margens do rio em trechos desprovidos de vegetação.

As figuras 8 e 9 mostram, respectivamente, que, no ano de 2009 (no setor em análise), teve início o processo de anexação da barra central à planície de inundação (V), que, por sua vez,

se concretizou no ano de 2014, resultando na formação de uma barra lateral em pontal (VI). Em alguns trechos do rio próximo ao distrito de Peixe Gordo, essas barras em pontal encontram-se parcialmente recobertas por vegetação e em processo de anexação à planície de inundação.

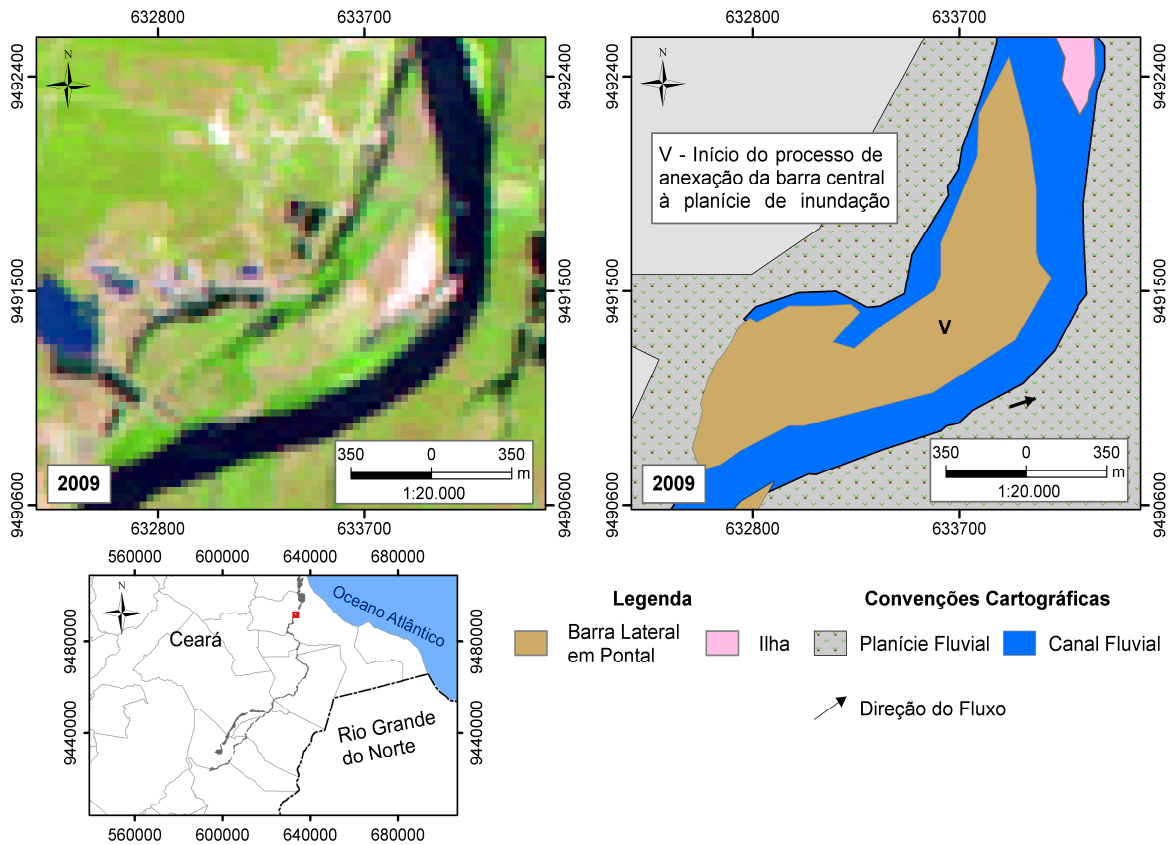


Figura 8 - Evolução morfológica de uma barra central para uma barra em pontal em um trecho do canal próximo ao município de Aracati no ano de 2009 (chuvoso). Fonte: elaborado pelo autor, 2017.

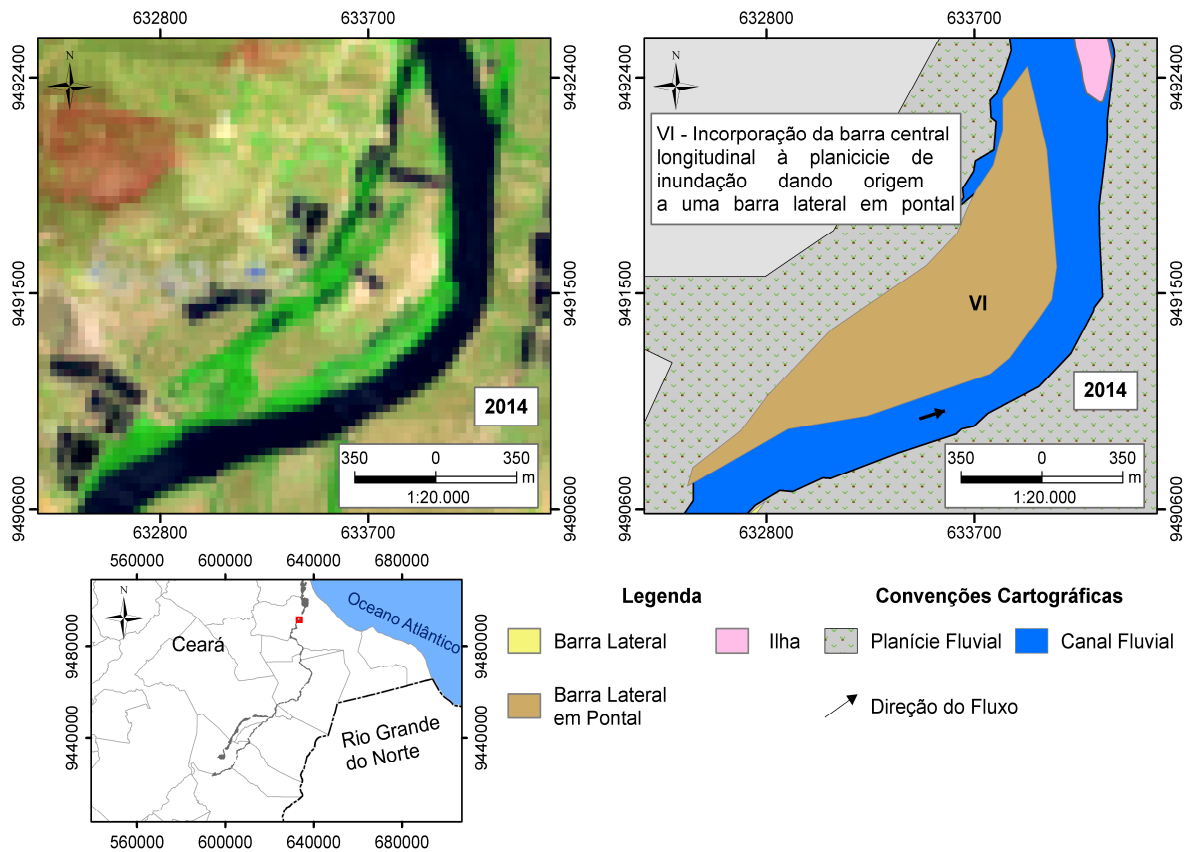


Figura 9 - Evolução morfológica de uma barra central para uma barra em pontal em um trecho do canal próximo ao município de Aracati no ano de 2014 (seco). Fonte: elaborado pelo autor, 2017.

Nota-se que, no ano de 2014, considerado seco, o comportamento das barras em pontal não seguiu o ritmo dos demais anos secos, como, por exemplo, 1958 e 2001, onde foi registrada uma redução das barras em pontal, indicando que a formação dessas tipologias de barras está associada ainda a outros fatores, sobretudo de caráter geomorfológico. Os dados de correlação linear e do coeficiente de determinação corroboraram para o entendimento desta questão. Assim, para a relação entre a vazão e a quantidade de barras em pontal verificou-se um coeficiente de correlação de 0,2659 e um coeficiente de determinação de 0,0708, ao passo que para a relação entre a precipitação e a quantidade de barras em pontal, o coeficiente de correlação e o coeficiente de determinação obtidos foram da ordem de 0,2560 e 0,0656. Para ambos os casos, os dados revelaram uma correlação positiva fraca ($< 0,5$), ou seja, vazão e precipitação não são variáveis determinantes na formação de barras em pontal.

Considerando que os dados de correlação linear são insuficientes para justificar o aumento na quantidade de barras em pontal no baixo curso do rio Jaguaribe, efetuou-se a estimativa

do índice de sinuosidade para cada um dos anos-padrão em estudo. Assim, o índice de sinuosidade foi de 1,32 para o ano de 1958, 1,33 para 1984, 1,34 para o ano de 2001, 1,38 para 2009 e 1,40 para o ano de 2014. Com base nos dados obtidos, pode-se afirmar que o aumento na quantidade de barras em pontal entre 1958 e 2014 se justifica em função do aumento da sinuosidade do rio ao longo da escala temporal, revelando um canal mais curvilíneo, portanto de fluxos mais lentos, favorecendo, assim, a sedimentação de barras do tipo em pontal.

A análise da evolução morfológica das ilhas fluviais no baixo curso do rio Jaguaribe ao longo da escala temporal considerada evidenciou mudanças significativas, como o aparecimento de novas ilhas, a presença de ilhas residuais que aumentaram e reduziram suas áreas, e o desaparecimento de ilhas por incorporação à planície de inundação.

Em 1984, foram identificadas 13 ilhas fluviais, recobrando uma área de 2,3km², ao passo que, em 2001, apesar da redução do número de ilhas, observou-se um aumento areal de 0,4 km² (40 ha), uma vez que foram identificadas 12 feições, abrangendo uma área de 2,7km². Assim, entre os anos de 1984 e 2001, notou-se um decréscimo percentual na quantidade de 7,6% e um acréscimo na área de 17,3%. Possivelmente, o desaparecimento de uma única ilha fluvial entre os anos de 1984 e 2001 está relacionado a dois processos pontuais: 1) aos eventos de alta energia verificados nesse intervalo temporal, especificamente nos anos de 1985 e 1989, cujas precipitações médias anuais registradas foram de 1907,7mm ano⁻¹ e 1046mm ano⁻¹, respectivamente, e que podem ter ocasionado a remoção da cobertura vegetal da ilha e, conseqüentemente, a remobilização do material sedimentar e 2) que a ilha fluvial tenha se anexado à planície de inundação nesse intervalo temporal.

As figuras 10 e 11 mostram a dinâmica morfológica de ilhas fluviais em um trecho do rio Jaguaribe próximo a foz, no município de Aracati, nos anos de 1984 e 2001. No ano de 1984, foram mapeadas ilhas fluviais formadas a partir de processos de avulsão do canal, como a Ilha Grande e a dos Veados (I), bem como ilhas formadas a partir de barras centrais, como a Ilha do Pinto e do Caldereiro (II), ao passo que, no ano de 2001, notou-se o processo de anexação da Ilha do Mel à Ilha dos Veados (III).

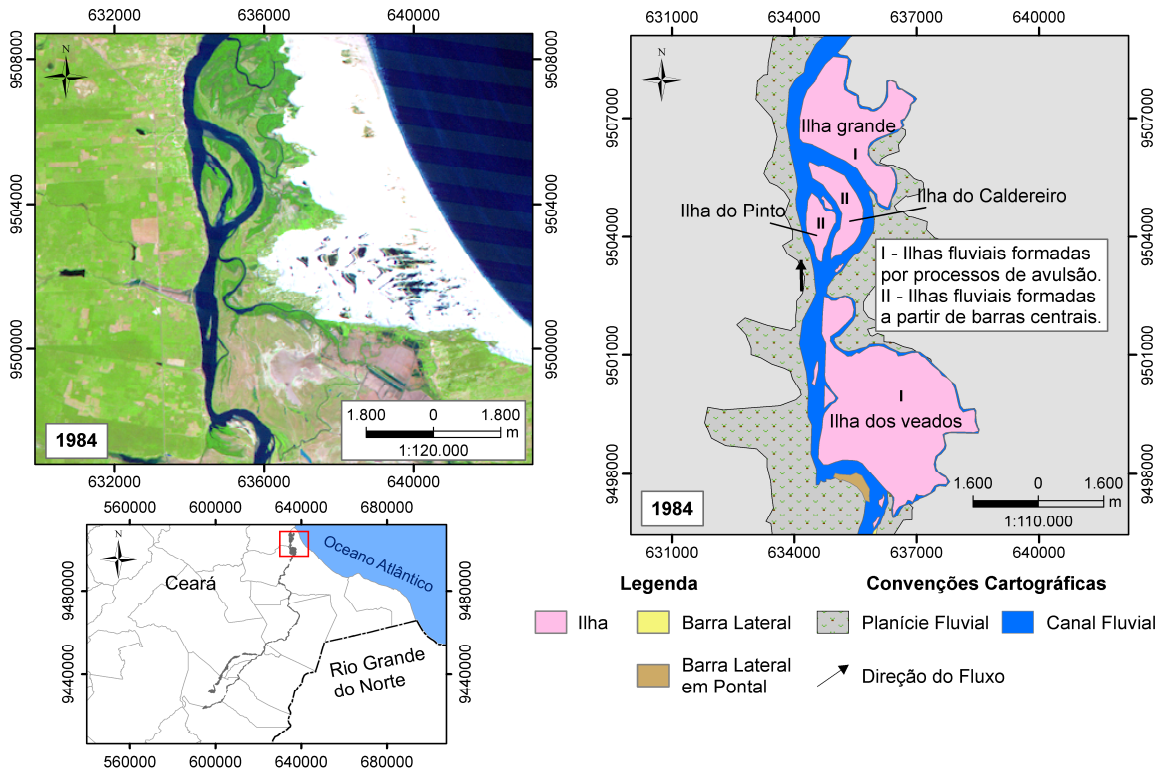


Figura 10 - Dinâmica morfológica de ilhas fluviais no baixo curso do rio Jaguaribe, próximo ao município de Aracati, no ano de 1984 (chuvoso). Fonte: elaborado pelo autor, 2017.

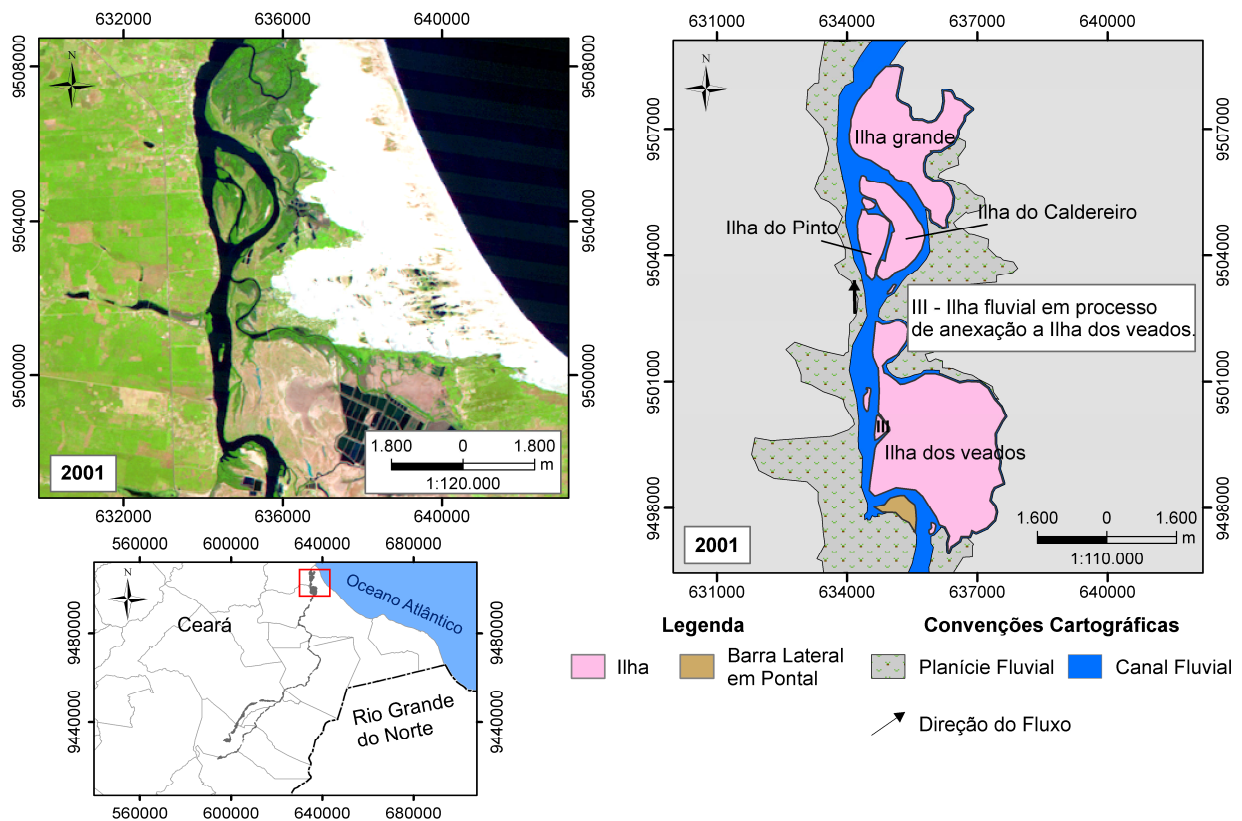


Figura 11 - Dinâmica morfológica de ilhas fluviais no baixo curso do rio Jaguaribe, próximo ao município de Aracati, no ano de 2001 (seco). Fonte: elaborado pelo autor, 2017.

No ano de 2009, foram mapeadas 18 feições, recobrando uma área 2,8km², representando, portanto, um aumento quantitativo de 6 ilhas fluviais e um acréscimo areal de 0,1km² em relação ao ano de 2001. Entre 2001 e 2009, houve um acréscimo percentual na quantidade e na área de 50% e 3,6%, respectivamente. No ano de 2014, observou-se um aumento considerável de ilhas fluviais, uma vez que foram contabilizadas 28 feições recobrando uma área de 3,2km², representando, em relação a 2009, um aumento percentual quantitativo de 55,6% e 14,3% na área. De modo direto, nota-se que a evolução de ilhas fluviais nos anos-padrão não corresponde às variações de precipitação e vazão, o que releva a existência de outros fatores na formação dessas feições.

No caso do rio Jaguaribe, em seu baixo curso, acredita-se que formação das ilhas fluviais, especialmente aquelas mapeadas a partir de 2009, deu-se, sobretudo, a partir da fixação de barras centrais. A figura 12, que trata da correlação linear entre a quantidade de ilhas fluviais e a quantidade de barras centrais, indicou uma correlação linear negativa que, apesar de baixa ($r = -0,4778$), revelou a existência de associação entre as duas variáveis avaliadas, ou seja, à medida que houve a diminuição na quantidade de barras centrais ocorreu o aumento gradativo de ilhas fluviais. Ainda no ano de 2009, verificou-se que a dinâmica intensa de fluxos favoreceu a formação de novas barras fluviais nas adjacências das ilhas fluviais próximas a foz, resultando em ilhas de barras centrais compostas (ver figura 13), ao passo que, no ano de 2014 constatou-se a formação de novas ilhas de pequena dimensão areal (ver Figura 14).

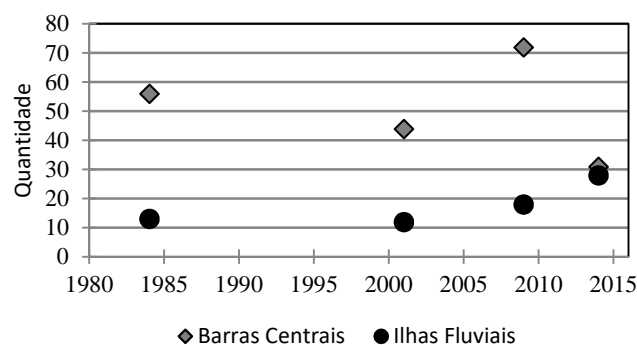


Figura 12- Correlação entre a quantidade de ilhas fluviais e a quantidade de barras centrais no baixo curso do rio Jaguaribe-1984/2014. Fonte: elaborado pelo autor, 2017.

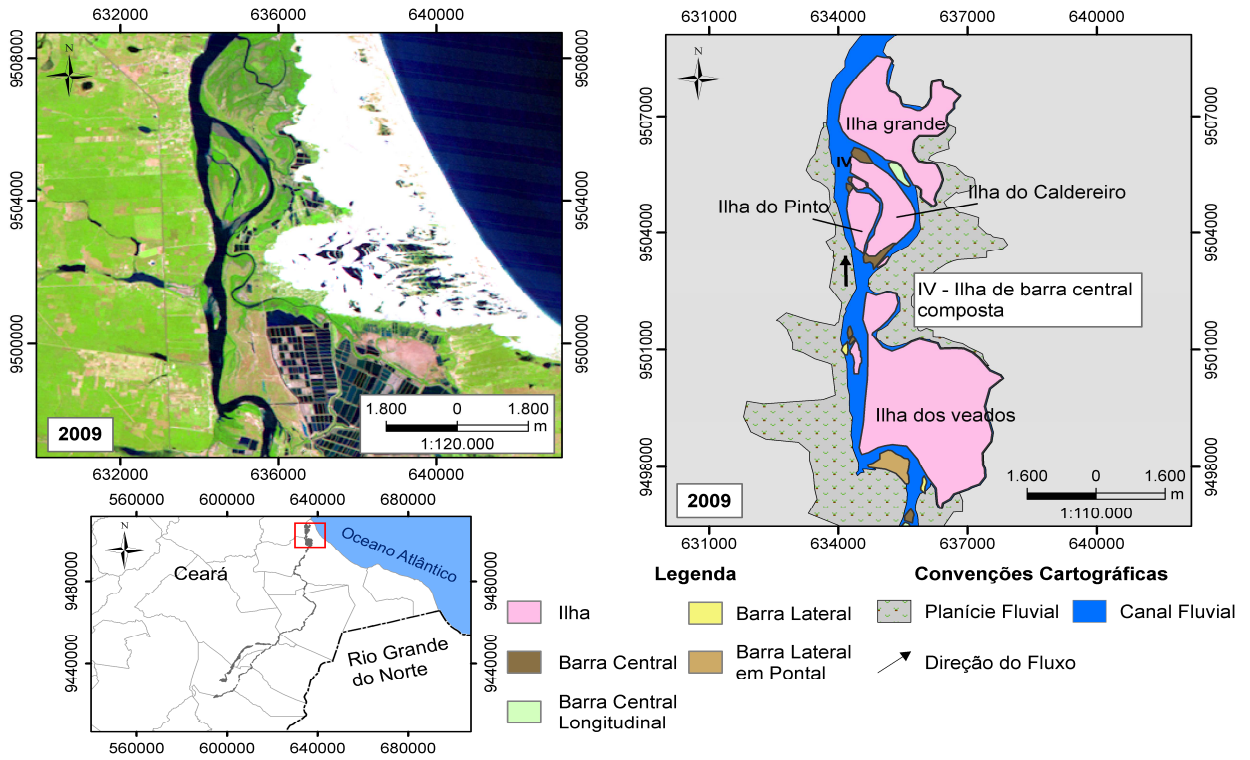


Figura 13 - Dinâmica morfológica de ilhas fluviais no baixo curso do rio Jaguaribe, próximo ao município de Aracati, no ano de 2009 (chuvoso). Fonte: elaborado pelo autor, 2017.

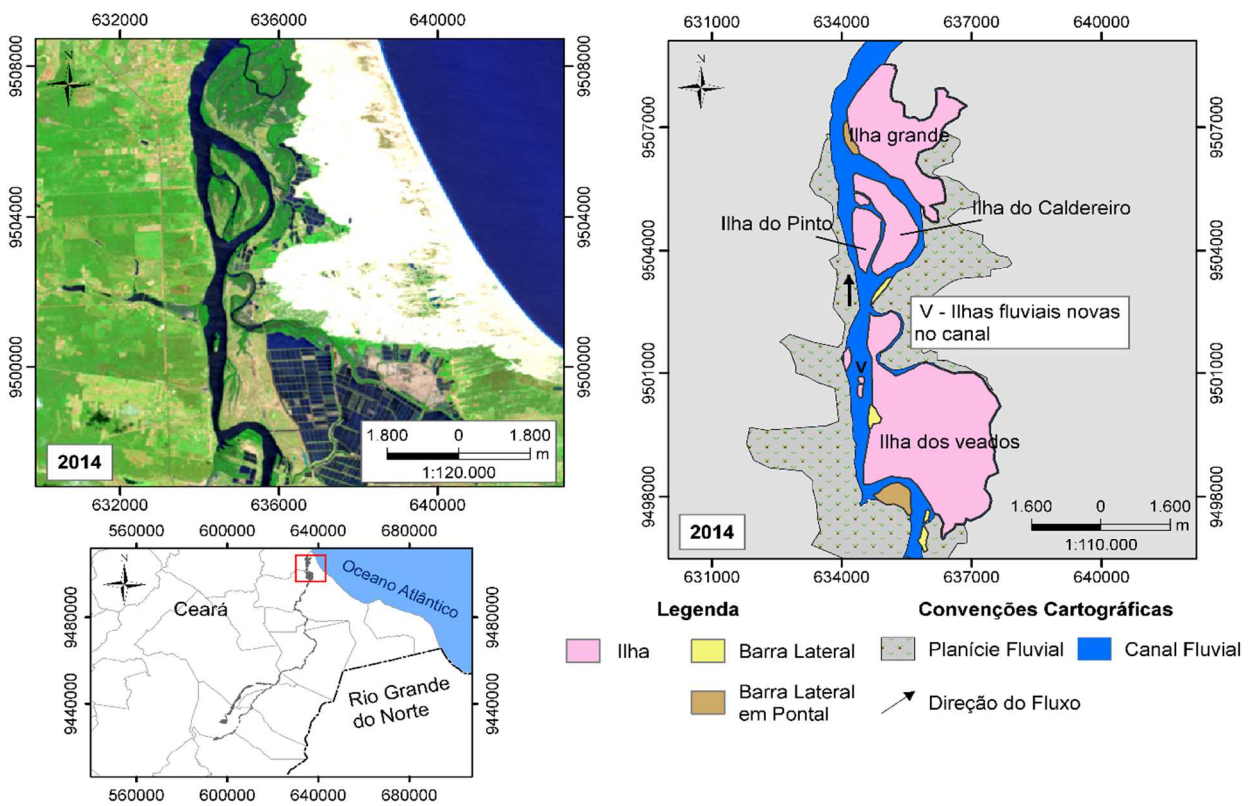


Figura 14 - Dinâmica morfológica de ilhas fluviais no baixo curso do rio Jaguaribe, próximo ao município de Aracati, no ano de 2014 (seco). Fonte: elaborado pelo autor, 2017.

A justificativa para esse incremento significativo na quantidade de ilhas fluviais entre 2009 e 2014 pode estar relacionada à regularização das vazões exercida pela Barragem do Castanhão e pelas diversas passagens molhadas presentes ao longo do rio, associada, sobretudo, à ausência de grandes cheias entre esse período. Assim, a ausência de grandes fluxos registrados nos anos de 2010 (cuja precipitação média anual foi de 476mm ano⁻¹ e a vazão média anual foi de 32m³ s⁻¹), 2012 (cuja precipitação média anual foi de 320mm ano⁻¹ e a vazão média anual foi de 28,9m³ s⁻¹), 2013 (cuja precipitação média anual foi de 529mm ano⁻¹ e a vazão média anual foi de 30m³ s⁻¹) e 2014 (cuja precipitação média anual foi de 448,2mm ano⁻¹ e a vazão média anual foi de 10,3m³ s⁻¹) contribuiu para que a tensão de cisalhamento fosse mínima, sendo insuficiente para superar os efeitos de ligação da vegetação (LAGASSE, 1981) e, conseqüentemente, a redistribuição dos sedimentos nas ilhas. Assim, a redução dos picos de cheias e as descargas de baixos fluxos liberadas pela barragem do Castanhão forneceram a água necessária para o crescimento da vegetação e a colonização e estabilização das barras fluviais, favorecendo, assim, a formação de novas ilhas fluviais.

Esse mesmo processo foi verificado por Ham e a Church (2002) estudando o rio Fraser, no Canadá, onde se constatou que a redução do regime de cheias e a ausência de grandes fluxos entre 1977 e 2002, portanto 25 anos, possibilitaram o crescimento da vegetação na superfície das barras, propiciando a formação de novas ilhas fluviais. Outros estudos desenvolvidos no Rio Grande, no Novo México (MEYER e HEPLER, 2007) evidenciaram esse mesmo processo, ou seja, os autores constataram que os fluxos elevados entre o período de 1973 a 1985 foram capazes de perturbar a estabilidade das ilhas fluviais, ocasionando a remoção da vegetação e a redistribuição dos sedimentos no rio. Contudo, os baixos fluxos registrados a partir de 1986 possibilitaram a fixação da vegetação, ocasionando um aumento de ilhas fluviais de 50 (em 1985) para 203 em 1992. Os baixos fluxos registrados em anos subsequentes, especialmente entre o período de 1990 a 2000, favoreceram ainda mais a estabilização das ilhas fluviais.

Em suma, considerando os fatores de formação de ilhas fluviais citados por Osterkamp (1998), pode-se afirmar que, no caso do rio Jaguaribe, em seu baixo curso, três destes fatores parecem ser mais relevantes, a saber: 1) a partir da evolução de barras centrais; 2)

processos de avulsão no canal e 3) a construção de reservatórios, a exemplo da barragem do Castanhão.

Por último, verificou-se que as ilhas fluviais de pequenas dimensões ocorrem predominantemente no início do baixo curso, enquanto as de maiores dimensões ocorrem a partir do município de Itaiçaba em direção à foz do rio. Assim, quando comparadas às grandes ilhas, as pequenas ilhas apresentam menor estabilidade no sistema fluvial, sofrendo um retrabalhamento mais intenso pela ação dos processos erosivos. Em contrapartida, as grandes ilhas, como a do Pinto, do Caldereiro, dos Veados e a ilha Grande, são praticamente estáveis, de modo que o retrabalhamento se dá frequentemente nas bordas dessas feições. Assim, não apenas a vegetação presente na ilha como também a existência de troncos, galhos e folhas auxiliam na estabilização dos sedimentos mais finos, fazendo com que a área de deposição da ilha aumente significativamente, levando-a a adquirir maior estabilidade no sistema fluvial.

4. Conclusões

Os resultados obtidos neste estudo indicaram que a dinâmica quantitativa de barras fluviais no baixo curso do rio Jaguaribe se dá em consonância com a dinâmica de vazões, de modo que, nos anos considerados secos, observou-se uma redução das feições devido à ausência de fluxos significativos para promover o transporte de sedimentos, ao passo que, em anos chuvosos, houve um incremento na quantidade de barras fluviais (laterais e centrais) em decorrência de novos ciclos de agradação no canal fluvial. Tal afirmação pôde ser ratificada com base nos dados de correlação linear de Pearson, que evidenciaram uma correlação linear positiva em boa parte dos cenários analisados.

A exceção a essa regra foi observada nas barras em pontal, cujo comportamento quantitativo não correspondeu às variações de vazão nos diversos anos estudados, de modo que os dados de correlação linear revelaram uma associação positiva fraca, indicando a influência de outros fatores de caráter geomorfológico na elaboração dessas feições. Logo, tal cenário pode ser justificado, em parte, pelo aumento da sinuosidade do rio ao longo da

escala temporal, revelando um canal mais curvilíneo, portanto, de fluxos mais lentos, o que favoreceu a sedimentação de barras do tipo em pontal.

No caso das ilhas fluviais, constatou-se um incremento dessas feições nos últimos anos no baixo curso do rio Jaguaribe, fato que pode estar relacionado à regularização das vazões exercida pela barragem do Castanhão e pelas diversas passagens molhadas presentes ao longo do rio, associada, sobretudo, à ausência de grandes cheias entre esse período. Assim, a ausência de grandes fluxos nos últimos anos contribuiu para que a tensão de cisalhamento fosse mínima, sendo insuficiente para superar os efeitos de ligação da vegetação e, conseqüentemente, a redistribuição dos sedimentos na ilha. Assim, a redução dos picos de cheias e as descargas de baixos fluxos liberadas pela barragem forneceram a água necessária para o crescimento da vegetação e a colonização e estabilização das barras fluviais, favorecendo, assim, a formação de novas ilhas fluviais.

Por fim, tem-se a expectativa de que os resultados dessa pesquisa possam suscitar novos estudos, enriquecendo o debate sobre a morfologia de canais fluviais em regiões semiáridas. Assim, espera-se que os estudos futuros possam contemplar diferentes perspectivas, dentre elas a datação geológica de ilhas fluviais a partir de técnicas de termoluminescência, visando estabelecer uma ordem cronológica dos processos de deposição que levaram à formação das feições, estudos que contemplem os processos de uso e ocupação nas ilhas fluviais, especialmente nas de maior dimensão areal, próximas à foz do rio, e que já experimentam certa dinâmica de uso dos recursos naturais, dentre outros.

5. Agradecimentos

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pela concessão da bolsa de Doutorado Sanduíche no Exterior, junto ao Instituto de Geografia e Ordenamento do Território-IGOT, na Universidade de Lisboa, em Portugal (Processo nº 88881.134997/2016-01). Aos Professores Jorge Manuel do Rosário Trindade (Instituto de Geografia e Ordenamento do Território/Universidade de Lisboa) e José Cândido Stevaux (Universidade Estadual de Maringá) pelas contribuições científicas a este estudo.

6. Referências bibliográficas

- ASHWORTH, P. J. *et al.* Morphological evolution and dynamics of a large, sand braid-bar, Jamuna River, Bangladesh. *Sedimentology*, v. 47, p. 533-555, 2000.
- BRICE, J.C. Channel patterns and terraces of the Loup Rivers in Nebraska. *USGS Professional Paper 422-D*. Washington: US Government Printing Office, 1964.
- CANT, D.J., WALKER, R.G. Fluvial processes and facies sequences in the sandy braided South Saskatchewan River, Canada. *Sedimentology*, v.25, n.5, p.625-648, 1978.
- CAVALCANTE, A. A. *Morfodinâmica Fluvial em Áreas Semiáridas: o rio Jaguaribe à jusante da Barragem do Castanhão*, CE – Brasil. Niterói: UFF, 2012. 228f. Tese (Doutorado em Geografia) – Programa de Pós-graduação em Geografia, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2012.
- CHARLTON, R. *Fundamentals of Fluvial Geomorphology*. Rutledge: London, 2243p, 2007.
- COLLINSON, J. D. Alluvial sediments. In: *Sedimentary environments and facies* (ed. Reading H. G), Blackwell Scientific Publications, v. 2, p. 20-62, 1986.
- COULTHARD, T. Effects of vegetation on braided stream pattern and dynamics. *Water Resources Research*, v.41, p.1-9, 2005.
- DORING, M., TOCKNER, K. Morfologia e dinâmica de zonas ripícolas. In: ARIZPE, *et al.* (Eds.). *Zonas ribeirinhas sustentáveis: um guia de gestão*. ISA Press/ Eurodois: Portugal, p.24-50, 2009.
- HAM, D.G., CHURCH, M. Bed-material transport estimated from channel morphodynamics: Chilliwack River, British Columbia. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 25, p.1123-1142, 2002.
- LAGASSE, P. F. Geomorphic response of the Rio Grande to dam construction. *New Mexico Geological Society*, Special Publication, n.10, p.27-46, 1981.
- LELI, I. T. *Gênese, evolução e geomorfologia das ilhas e planície de inundação do Alto Rio Paraná, Brasil*. 129p. Tese de Doutorado em Geografia, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, São Paulo, 2015.
- LEOPOLD, L.; WOLMAN, M. River channel pattern, braided, meandering and straight. U. S. *Geological Survey*, 282p, 1957.
- MORAIS, R. P. *Mudanças históricas na morfologia do canal do rio Araguaia no trecho entre a cidade de Barra do Garças (Mt) e a foz do rio Cristalino na Ilha do Bananal no período das décadas de 60 e 90*. 2002. 176 p. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Estudos Sócio-Ambientais, Universidade Federal de Goiás, Goiânia. 2002.
- MORAIS, R.P. *A Planície Fluvial do Médio Araguaia: processos geomorfológicos e suas implicações ambientais*. Goiânia: UFG, 2006. 178f. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais). Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Universidade Federal do Goiás, Goiânia, 2006.
- MEYER, G. A.; HEPLER, C. W. *Vegetated Island Formation and Change in the Middle Rio Grande Near Albuquerque, New Mexico*, 47p, 2007.
- NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. *Hidrologia Estatística*, CPRM, Belo Horizonte, 2007.
- OSTERKAMP, W. R. Processes of fluvial island formation, with examples from Plum Creek, Colorado and Snake River, Idaho: *Wetlands*, v.18, p. 530-545, 1998.
- RICE, S.P. *et al.* Morphology and evolution of bars in a wandering gravel-bed river; lower Fraser River, British Columbia, Canada. *Sedimentology*, v. 56, n.3, p. 709-736, 2009.
- SOPENA, A.; SANCHEZ-MOYA, Y. Sistemas aluviales de baja sinuosidad. In: ARCHE, A. *Sedimentología: del proceso físico a la cuenca sedimentaria*, Textos Universitários, 2010.1290p.

SMITH, N.D. The braided stream depositional environment: comparison of the Platte river with some Silurian clastic rocks: north-central Appalachians. *Geol. Soc. Am. Bull.*, v. 81,p.2993-3041, 1974.

STEVAUX, J.C., SANTOS, M.L., FERNANDEZ, O. V. Q. Aspectos morfogenéticos das barras de canal do rio Paraná, trecho Porto Rico, PR. *Boletim de Geografia da UEM*, ano10, nº1, p.11-24, 1992.

STEVAUX, J. C. *O rio Paraná: geomorfogênese, sedimentação, e evolução quaternária do seu curso superior* (região de Porto Rico, PR) 242f. Tese (Pós-graduação Instituto de Geociências), Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, 1993.

TAVARES, Antonio Carlos. Critérios para a escolha de anos padrões para análise rítmica. *Revista Geografia*, São Paulo, v. 1, n.1, p.79-87, 1976.

TRIOLA, M. F. *Introdução a Estatística*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos Científicos, 1999.

WYRICK, J. R. *On the formation of fluvial islands*. PhD Thesis, Oregon State University, Corvallis, OR. 302 p, 2005.