

PIRATARIA FLUVIAL NA SERRA DO ESPIGÃO: DIVISÓRIA DOS RIOS URUGUAI E IGUAÇU-AMÉRICA DO SUL

RIVER PIRACY IN THE SERRA DO ESPIGÃO: URUGUAY AND IGUAÇU RIVERS DIVIDE - SOUTH AMERICA

MAÍRA ONEDA DAL PAI⁽¹⁾, ANDRÉ AUGUSTO RODRIGUES SALGADO⁽²⁾, EDUARDO VEDOR DE PAULA⁽¹⁾

Resumo:

As capturas fluviais constituem um rearranjo de drenagem em que ocorre a transferência de fluxo e área de contribuição de uma bacia hidrográfica para outra. Trata-se da expansão de um sistema hidrográfico em detrimento de outro, movida pela vantagem erosiva adquirida por fatores como: gradiente topográfico, litoestrutura, regime pluviométrico e nível de base. Na região Sul do Brasil constatou-se uma dinâmica incomum de capturas fluviais entre as bacias hidrográficas dos rios Uruguai e Iguaçu (sub-bacia do Paraná). Na área da Serra do Espigão, divisor entre as duas bacias hidrográficas, foram identificadas capturas fluviais para ambos os lados, mas sem que fosse possível identificar uma bacia agressora e uma vítima. O presente estudo investigou a ocorrência de piratarias fluviais na área, buscando identificar os fatores responsáveis por essa dinâmica anômala. Com o mapeamento das capturas fluviais por sensoriamento remoto, e a posterior validação em trabalho de campo, verificou-se que de fato há capturas fluviais para ambos os lados do divisor sem clara definição de qual seria a bacia hidrográfica mais agressiva. Uma análise dos perfis longitudinais dos canais envolvidos nas capturas possibilitou a identificação de um controle local na rede de drenagem. Este controle corresponde a um limite litoestrutural entre duas unidades geológicas – basaltos do Grupo Serra Geral e arenitos da Formação Botucatu- que estabelece um nível de base local nos afluentes do rio Iguaçu (Paraná). Dependendo da posição geográfica deste nível de base, os canais que drenam para a bacia hidrográfica do rio Iguaçu (Paraná) se tornam mais ou menos agressivos do que os que vertem para o rio Uruguai e por isso capturam ou tem áreas capturadas pela bacia hidrográfica vizinha. Por esta razão, não é possível identificar uma bacia que esteja unicamente agredindo e tem-se de fato uma mútua disputa entre as bacias hidrográficas dos rios Uruguai e Iguaçu (Paraná). Este fato destaca a importância dos níveis de base locais para os processos de pirataria fluvial.

Palavras-chaves: Captura Fluvial; Rearranjo de Drenagem; Nível de Base Local; Regressão de Knickpoint; Brasil.

Abstract:

Stream capture is a drainage rearrangement where a flux transference occurs and a contribution area from a drainage basin is incorporated to another. It is about expanding a river system over another one, caused by erosive advantage earned by conditioning factors such as lithostructure, pluviometric regime, topographic gradient, and base level. However, in the southern region of Brazil, a rare dynamic of stream piracy was verified between the drainage basins of the Uruguay and Iguaçu (Paraná) rivers. Stream captures were observed along the Serra do Espigão, part of the drainage divide between the two basins. Still, it was not possible to identify which basin was advancing over the other. This paper investigated the occurrence of stream captures, identifying which factors are responsible for this atypical stream dynamic. Mapping the stream captures by remote sensing and further validation with field work, it was verified that there is stream piracy for both sides of the drainage divide. Still it is not clear which basin is behaving more aggressively. A longitudinal profile analysis of the channels involved in the stream captures showed a local control in the drainage network. This control sets a local base level to the Iguaçu river tributaries. It indicates the lithostructural limit between two different geological units: the Serra Geral group basalts and the Botucatu formation sandstones. Depending on the geographic location of this base level, channels that drain to the Iguaçu (Paraná) river become more aggressive or less aggressive than the ones that drain to the Uruguay basin, and so they capture or lose areas for the other basin. Therefore, it is impossible to identify a river basin that exclusively pirates the other, prevailing, in this case, a mutual competition between the Uruguay and Iguaçu (Paraná) rivers basins. This fact highlights the significance of local base levels to promote stream capture processes.

Keywords: Stream Capture; Drainage Rearrangement; Local Base Level; Knickpoint Retreat; Brazil.

Received: 24 February, 2021 ; Accepted: 9 December, 2021

1. INTRODUÇÃO

O processo de rearranjo da rede drenagem por meio de capturas fluviais é caracterizado pela expansão de um sistema fluvial em detrimento de outro. A captura ocorre pela ação de um ou mais canais de maior poder erosivo que avançam sobre o divisor hidrográfico e capturam canais fluviais e áreas drenadas da bacia

vizinha (BISHOP, 1995). A tectônica, o regime pluviométrico, a resistência litoestrutural, o gradiente, e os níveis de base locais e gerais constituem-se como os fatores responsáveis pela ocorrência deste processo (SUMMERFIELD, 1991; TWIDALE, 2004). Entretanto, o desenvolvimento do processo de captura fluvial é raramente observado à escala de vida humana (STOKES *et al.*, 2018). Sendo assim, os estudos acerca dos

⁽¹⁾Departamento de Geografia, Universidade Federal do Paraná - Email: maira.dalpai@gmail.com, edugeo@ufpr.br

⁽²⁾Departamento de Geografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais - Email: aarsalgadoufmg@gmail.com

rearranjos de drenagem visam identificar processos que ocorreram no passado e que são reconhecidos através das geoformas que deixaram na paisagem como, por exemplo, cotovelos de captura, vales secos, vales superdimensionados, baixos divisores, depósitos sedimentares fluviais em interflúvios, entre outros (BISHOP, 1995). Contudo, principalmente em regiões de clima tropical ou subtropical úmido, essas geoformas são difíceis de encontrar, pois após se efetivar a captura fluvial, elas tendem a ser rapidamente erodidas, destruídas e descaracterizadas (CHEREM *et al.*, 2013; SORDI *et al.*, 2018).

Nesse contexto, uma série de índices morfométricos como índice χ e Métricas de Gilbert, vem sendo desenvolvidos para, indiretamente, aferir se um divisor hidrográfico está em equilíbrio (sem tendência aos rearranjos de drenagem) ou desequilíbrio (com tendência à ocorrência de rearranjos de drenagem). Graças às dificuldades de se encontrar as evidências de campo, ou seja, as geoformas que comprovam os rearranjos de drenagem, esses índices morfométricos têm se tornado populares nos estudos acerca da mobilidade dos divisores hidrográficos. No entanto, assim como outros métodos, possuem as suas limitações relacionadas a escolha e qualidade dos dados de entrada. Além disso, tais índices respondem mais sobre uma tendência presente-futura de mobilidade do divisor, não sendo muito confiável para dinâmicas passadas (WILLET *et al.*, 2014; WHIPPLE *et al.*, 2017; FORTE E WHIPPLE, 2018). Por isso o reconhecimento em campo das geoformas indicativas dos processos de rearranjo de drenagem (BISHOP, 1995; CHEREM *et al.*, 2013), por mais difícil que seja, ainda é o método que, com segurança, comprova a ocorrência destes processos.

Apesar da dificuldade em comprovar os rearranjos de drenagem, principalmente em regiões úmidas, estudos desenvolvidos nos últimos anos têm apontado que as capturas fluviais são comuns e relevantes para a compreensão da morfogênese do território brasileiro (SALGADO *et al.*, 2012; CHEREM *et al.*, 2013; NASCIMENTO, 2013; REZENDE *et al.*, 2018). De forma geral, o nível de base se apresenta como o principal fator condicionante do processo, principalmente em meso e macro escalas. Esse fato é bastante observado nos casos das grandes bacias hidrográficas continentais brasileiras que perdem área para as pequenas e médias bacias que drenam diretamente para o Oceano Atlântico, contribuindo para o recuo da escarpa de margem passiva Sul-Americana em direção ao interior do continente (SALGADO *et al.*, 2018). Entretanto, o processo de migração de divisores hidrográficos é complexo. Na região Sul do Brasil, SORDI *et al.*

(2018) comprovaram a existência de capturas fluviais na área do tríplice divisor hidrográfico entre as bacias dos rios Itajaí-Açu, Iguaçu (Paraná) e Uruguai. Nesse caso, a bacia do rio Itajaí-Açu por ter trajeto mais curto e íngreme até o Oceano Atlântico, possui maior poder erosivo e pirateia as áreas drenadas pelas bacias dos rios Uruguai e Iguaçu (Paraná). Paralelamente, entre as bacias Uruguai-Iguaçu (Paraná), na região da Serra do Espigão em Santa Catarina, também foram observadas capturas fluviais (SORDI *et al.*, 2018). Estas aparentavam ocorrer nas duas direções: tanto a bacia hidrográfica do rio Uruguai pirateava para si áreas da bacia hidrográfica do rio Iguaçu (Paraná), quanto o processo inverso também acontecia. Logo, não foi possível identificar claramente a expansão de uma bacia hidrográfica em detrimento da outra.

Diante do fato incomum descrito por SORDI *et al.* (2018) na área da Serra do Espigão onde há indícios de rearranjos de drenagem e não há aparente prevalência de uma bacia hidrográfica sobre outra, abre-se a necessidade de um estudo mais aprofundado nesta região. Neste contexto, o presente estudo objetiva verificar se de fato há um equilíbrio erosivo entre as bacias dos rios Uruguai e Iguaçu (Paraná) e, se sim, por qual razão esse equilíbrio ocorre. Para tanto, procurou-se identificar em campo as geoformas que comprovam os processos de rearranjo de drenagem e verificar se de fato há capturas fluviais nos dois sentidos. A opção por este método se deu em razão de que, embora as provas de campo sejam geralmente raras e muitas vezes mal preservadas na paisagem, quando encontradas constituem evidências realmente capazes de comprovar este complexo processo.

2. ÁREA DE ESTUDO

O divisor hidrográfico estudado situa-se ao longo de toda extensão da Serra do Espigão, na região norte do estado brasileiro de Santa Catarina e, em linhas gerais, subdivide a norte os afluentes do rio Iguaçu (Paraná) e, a sul, os do rio Uruguai (Figura 1A e 1C). A área é bastante homogênea em termos litológicos, sendo totalmente embasada pelas rochas basálticas do Grupo Serra Geral (Figura 1B) (NARDY *et al.*, 2011). Logo abaixo, estão as rochas sedimentares do Grupo São Bento, cuja última seção estratigráfica é composta pelos arenitos da Formação Botucatu, seguidos das rochas sedimentares da Formação Rio do Rastro (SCHOBENHAUS *et al.*, 1984; MILANI, 1997). As principais estruturas da área apresentam as direções NW-SE, NE-SW, e E-W (ZALÁN *et al.*, 1987; SCHEIBE *et al.*, 1989).

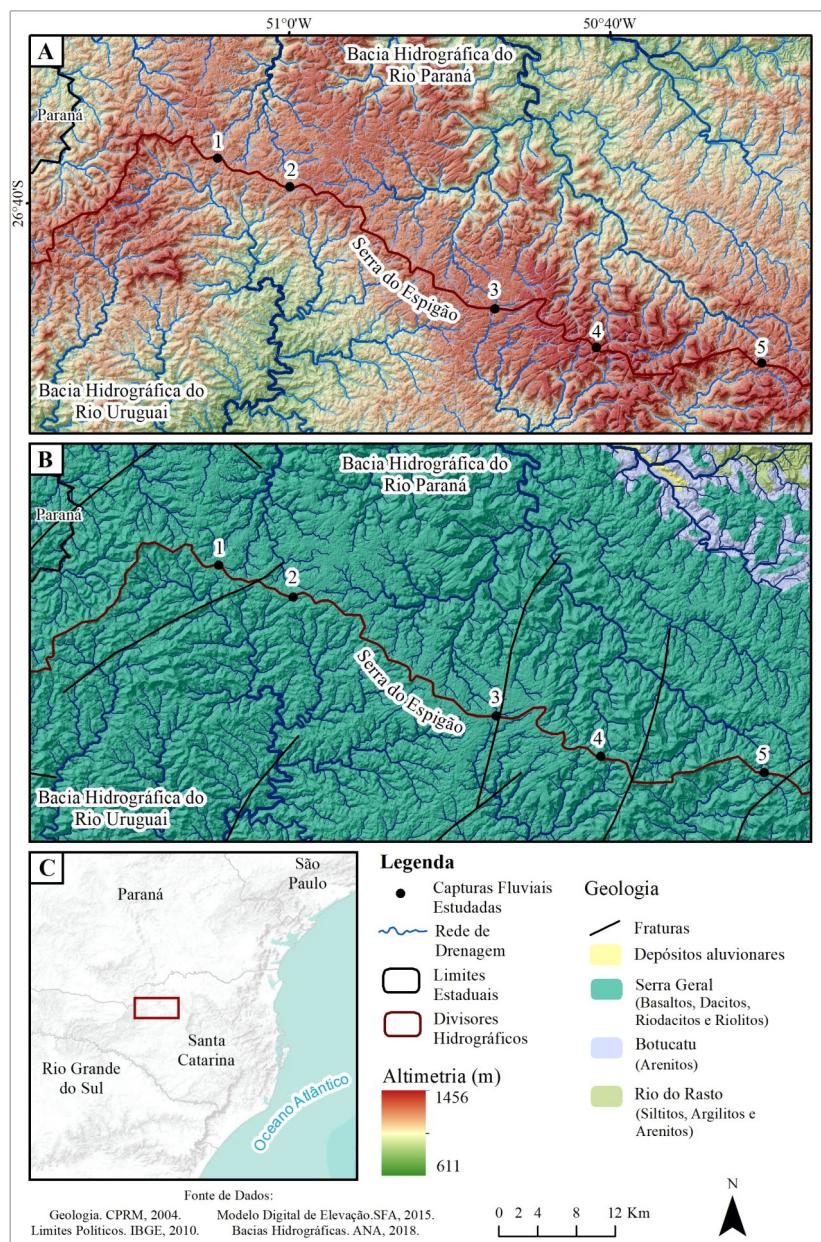


Fig. 1. A) Altimetria da área de estudo e das capturas fluviais investigadas. **B)** Geologia da área de estudo. **C)** Localização da área de estudo.

Fig. 1. A) Altimetry of the study area and river catchments investigated. **B)** Geology of the study area. **C)** Location of the study area.

Em termos geomorfológicos, a Serra do Espigão está inserida na Superfície de Caçador (Figura 2), que se apresenta como um patamar elevado ($\geq 1.200\text{m}$) de relevo plano a suave ondulado (PAISANI *et al.*, 2019). Nas bordas, este patamar é dissecado pelos afluentes dos rios Uruguai e Iguaçu (Paraná), que apresentam seus vales escalonados alternando entre vales de fundo chato e em forma de V (SORDI *et al.*, 2018). Essas duas grandes bacias hidrográficas drenam para o interior do continente, até desaguarem no Oceano Atlântico pela foz do rio da Prata.

O atual clima é subtropical-úmido (Cfa) conforme a classificação de Köeppen, com temperatura média anual de 15°C (IBGE, 2012).

As precipitações são bem distribuídas ao longo do ano, com médias anuais de 1.600mm . Registros paleoclimáticos indicam que há ~ 44.86 mil anos AP o clima era mais frio e úmido. Porém, há ~ 28 mil anos AP, gradativamente, ele se altera para um regime mais seco, cambiando mais recentemente (~ 2.6 mil anos AP) para um regime frio e úmido novamente (BEHLING *et al.*, 2004; PAISANI *et al.*, 2019). Os solos da área, principalmente os situados nas porções planas, apresentam maior desenvolvimento vertical. Devido ao regime climático, é comum verificar acúmulo significativo de matéria orgânica nos horizontes superficiais, e que tenham caráter hidromórfico (VOLKMER E FORTES, 2003; POTTER *et al.*, 2004).

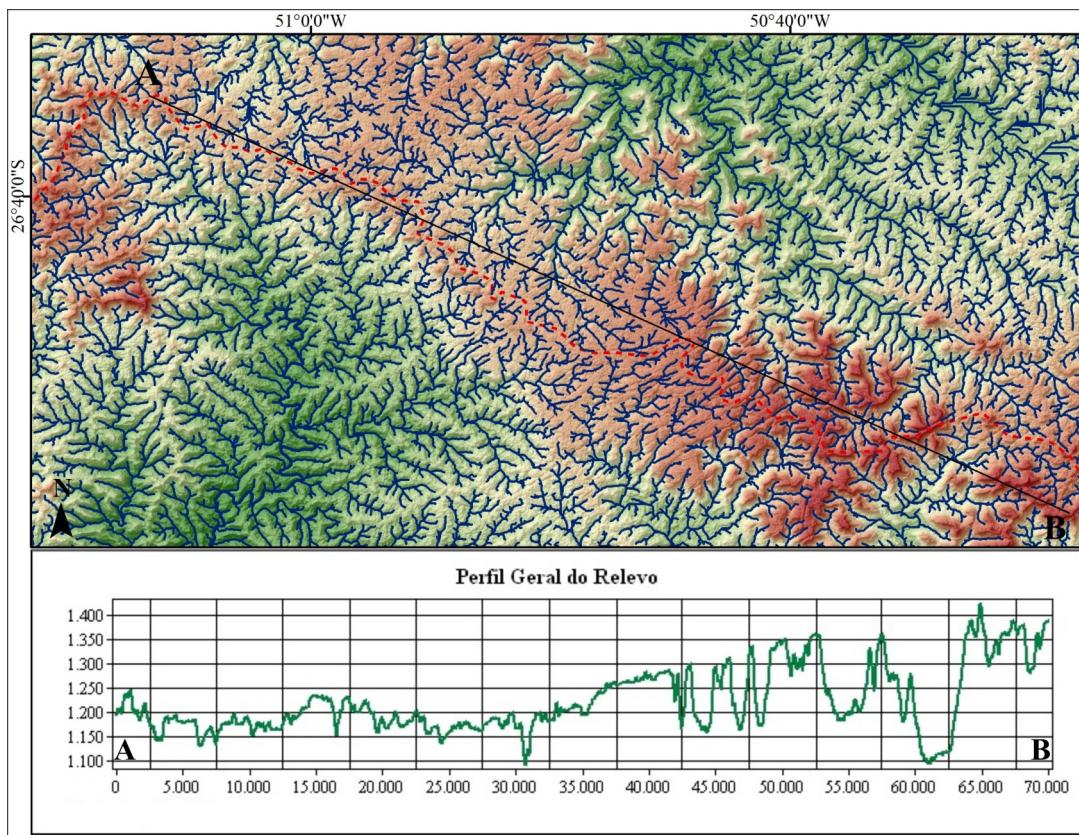


Fig. 2. Perfil topográfico geral da área de estudo. Na figura está evidenciada a Superfície de Caçador, em altitudes médias que aumentam gradualmente de oeste para leste. Também estão destacados os fundos de vale em V e de fundo chato.
Fig. 2. General topographic profile of the study area. The figure shows the Caçador Surface, at average altitudes that increase gradually from west to east. The V-shaped and flat-bottomed valley are also highlighted.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a análise topográfica da área optou-se pelo uso do modelo MDE-PALSAR de resolução espacial de 12,5 metros, obtido da plataforma da *Alaska Satellite Facility* (ASF). Os demais dados temáticos foram obtidos de bases de dados nacionais e estaduais disponíveis: INDE, Epagri-SC, SIG-SC.

De forma a obter uma análise da rede de drenagem, foi feita a sua extração de forma automática, a partir do modelo selecionado previamente. Para isso, primeiro foi necessário transformar o MDE do sistema de coordenadas geográficas WGS84 para o sistema UTM SIRGAS 2000 zona 22S. Em seguida, foi utilizada a função *flow accumulation* da TopoToolBox (SCHWANGHART e SCHERLER, 2014) no software MATLAB®. A rede fluvial foi gerada utilizando o método D-8, com área mínima de contribuição de aproximadamente 0,45 km², o que posteriormente em campo foi validado como uma área de contribuição condizente com a realidade.

Em seguida realizou-se o mapeamento das geoformas de capturas fluviais: cotovelos de captura, baixos divisores, vales secos ou superdimensionados, conforme descrito por BISHOP (1995). O mapeamento foi elaborado no

software *QuantumGis 3.12®*, ao longo da Serra do Espigão, utilizando as informações de relevo sombreado, hipsometria, rede de drenagem e divisor hidrográfico gerados anteriormente. Na sequência realizou-se trabalho de campo para a validação das capturas interpretadas, com a obtenção de registros fotográficos das evidências tanto com câmera fotográfica convencional, quanto com uso de aeronave remotamente pilotada. Devido ao grande número de geoformas de pirataria fluvial encontradas, nesta pesquisa foram validadas em campo somente capturas fluviais em rios de ordem dois ou maior, segundo o método de hierarquização de STRAHLER (1957).

Com as capturas fluviais identificadas, foram então gerados os perfis longitudinais dos rios capturadores e dos rios capturados. Para tanto foi utilizada a função *profile* também da TopoToolBox (SCHWANGHART e SCHERLER, 2014) no software MATLAB®. Em seguida, foi feita uma análise comparativa entre as quebras de gradiente (*knickpoints*), identificados nos perfis longitudinais com as informações litoestruturais contidas no mapa geológico da área. Por fim, foram calculados os gradientes médios dos canais, considerando a amplitude altimétrica em metros por quilômetros percorridos.

4. RESULTADOS

Foram identificadas cinco (5) capturas fluviais entre canais de segunda ordem ou superior na área da Serra do Espigão, totalizando 77,5 km² de área transferida entre as bacias (Figura 1A). A bacia hidrográfica do rio Uruguai foi responsável por três das capturas, com um ganho de área total de 65,8 km². Já a bacia hidrográfica do rio Iguaçu (Paraná) foi responsável pelas outras duas capturas e, graças a elas, obteve um incremento de área de 11,7 km².

A captura 1 (Figura 1A), localizada no extremo oeste da área de estudo, representa sozinha, a maior parte da área incrementada para a bacia hidrográfica do Uruguai: 50,3 km². Ocorreu através da pirataria das cabeceiras do rio do Peixe, que atualmente é afluente do rio Uruguai. Os canais à montante do cotovelo de

captura estão estabelecidos rumo à bacia hidrográfica do rio Iguaçu (Paraná), sentido divergente em que o canal principal drena após o cotovelo de drenagem. De fato, desde a nascente e por cerca de 7 km o rio do Peixe drena na direção SW-NE, se aproveitando de um fraturamento, até mudar abruptamente para o sentido NW-SE (Figura 3A e C). Na área onde ocorre esta mudança de sentido foi verificado um baixo divisor hidrográfico. Este está 120 metros mais rebaixado que a cota altimétrica das nascentes do rio capturado, fato extremamente anômalo, mas nítido na paisagem regional. A jusante do cotovelo, atravessando o atual divisor, foi verificado um vale seco que ainda preserva umidade, por onde o antigo canal passava em direção a bacia hidrográfica do rio Iguaçu (Paraná) antes de ser capturado pela bacia hidrográfica do rio Uruguai (Figura 3A e B).

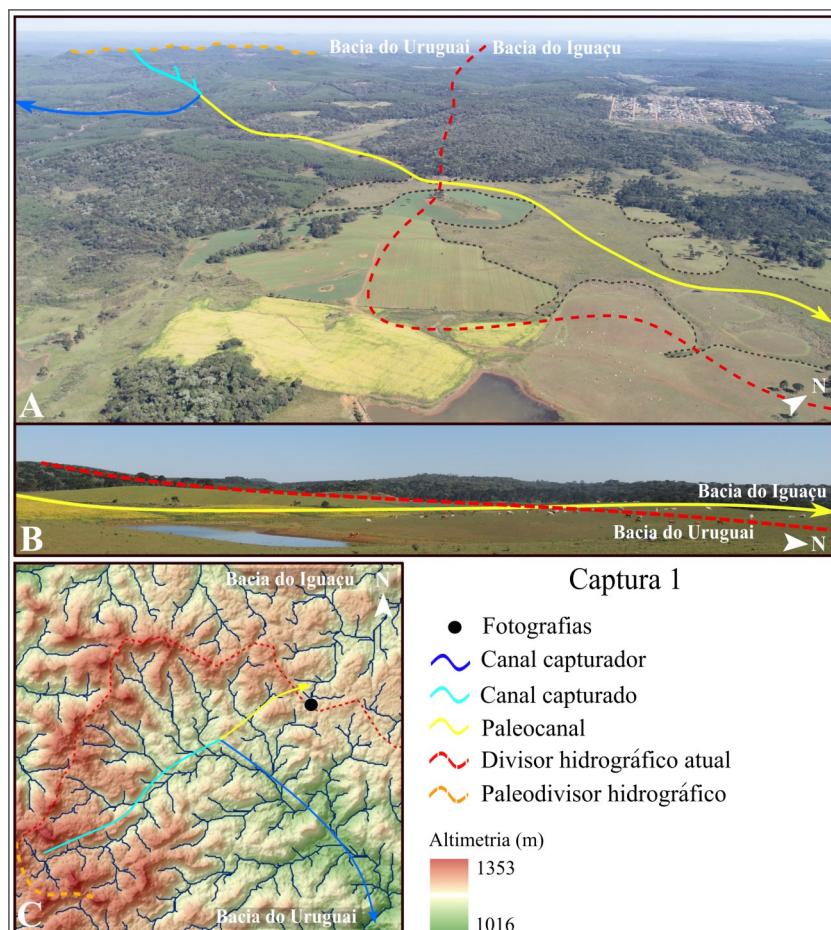


Fig. 3. Esquema fotográfico da captura 1. Em A, na fotografia aérea da captura é possível verificar ao fundo o paleodivisor bem mais alto que o divisor atual, além da grande área úmida presente no vale seco, por onde percorria o canal capturado. Notar que o paleovalle seco atravessa o atual divisor hidrográfico, prova de que o atual divisor é recente e registro da ocorrência a captura fluvial. Em (B), na fotografia do terreno, vista para o vale seco e o atual baixo divisor entre as bacias dos rios Uruguai e Iguaçu (Paraná). O modelo digital do terreno localiza os elementos fotografados (C), bem como destaca o fato de muitos canais à montante apresentarem direção divergente àquela que o rio do Peixe assume após o cotovelo de drenagem.

Fig. 3. Photographic scheme of capture 1. In A, in the aerial photograph of the capture it is possible to verify in the background the paleodivisor much higher than the present divisor, besides the great humid area present in the dry valley, through where the captured channel ran. Note that the dry palaeovalley crosses the present hydrographical divisor, proving that the present divisor is recent and a record of the occurrence of the fluvial capture. In (B), the terrain photo, view for the dry valley and the present low divisor between the Uruguay and Iguaçu (Paraná) river basins. The digital terrain model locates the photographed elements (C), and highlights the fact that many upstream channels present a divergent direction to that which Peixe River assumes after the drainage elbow.

Na captura 2 (Figura 1A), tem-se a menor área transferida para o rio Uruguai: 1,7 km². Nesse caso, um rio de segunda ordem tem seu trecho inicial estabelecido no sentido SE-NW, rumo à bacia hidrográfica do rio Iguaçu (Paraná). No entanto, um quilômetro à jusante da nascente, o rio apresenta um cotovelo de captura e passa a drenar sentido NE-SW, fluindo em direção a bacia do rio Uruguai. No caso dessa captura, um fraturamento parece ter colaborado para o avanço erosivo do canal capturador (figuras 1B e 4C). Ainda, próximo a localização desse cotovelo, foi verificado um paleovalle seco atravessando o baixo divisor que, na área, é ressaltado pelo fato de a rodovia aproveitar seu traçado (Figura 4A e B). A existência da rodovia acompanhando o baixo divisor permite ainda melhor visualizar o colo que marca por onde passava o paleovalle que no passado ligava a drenagem capturada à bacia hidrográfica do rio Iguaçu (Paraná) (Figura 4B).

Diferente dos casos anteriores, na captura 3 (Figura 1A) foi a bacia hidrográfica do rio Iguaçu (Paraná) que incorporou fluxo e área da bacia hidrográfica do rio Uruguai. Esta captura ocorreu sobre o patamar plano da Serra do Espigão e totalizou 3,3 km² de área transferida. O canal que inicialmente drena sentido ENE-WSW, passa a percorrer na direção S-N após um cotovelo agudo (Figura 5A e C). Um fraturamento S-N também parece ter favorecido o avanço do canal capturador nessa captura (Figura 5C). Em termos morfográficos, vale ressaltar que os canais de primeira ordem localizados à montante deste cotovelo tem direção bem marcada para a bacia hidrográfica do rio Uruguai. Um vale seco que ainda preserva área úmida foi observado próximo ao cotovelo, no sentido NE-SW, por onde o canal capturado drenava em direção ao a bacia hidrográfica do rio Uruguai. Na área da captura é possível visualizar um baixo divisor que está, topograficamente, 10 metros mais baixo que as nascentes do rio capturado.

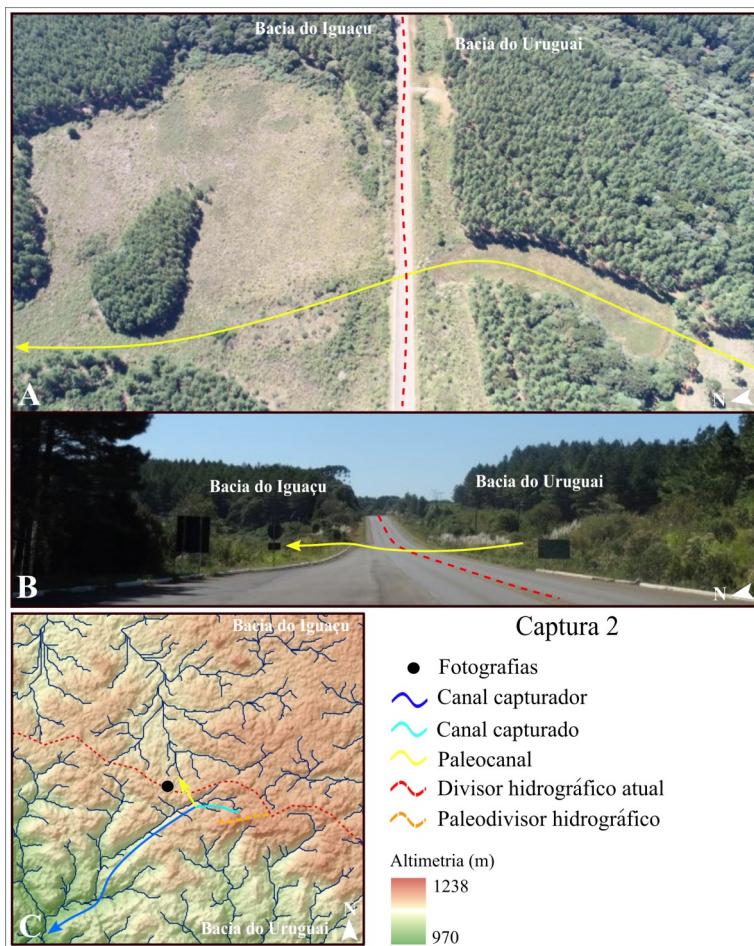


Fig. 4. Esquema fotográfico da captura 2. Em A, tem-se a vista aérea do divisor próximo da captura com um vale seco atravessando-o. Notar que o paleovalle seco atravessa o atual divisor hidrográfico, prova de que o atual divisor é recente e de que ocorreu a captura fluvial. Em B, com a fotografia do terreno, é possível observar o colo por onde passava o canal antes de ser capturado. O modelo digital do terreno localiza os elementos fotografados (C).

Fig.4. Photographic scheme of capture 2. In A, there is an aerial view of the near divider capture with a dry valley crossing it. Note that the dry palaeovalley crosses the current hydrographic divisor, evidence that the current divisor is recent and that fluvial capture has occurred. In B, with the terrain photograph, it is possible to observe way where the channel passed before being captured. The digital terrain model locates the photographed features (C).

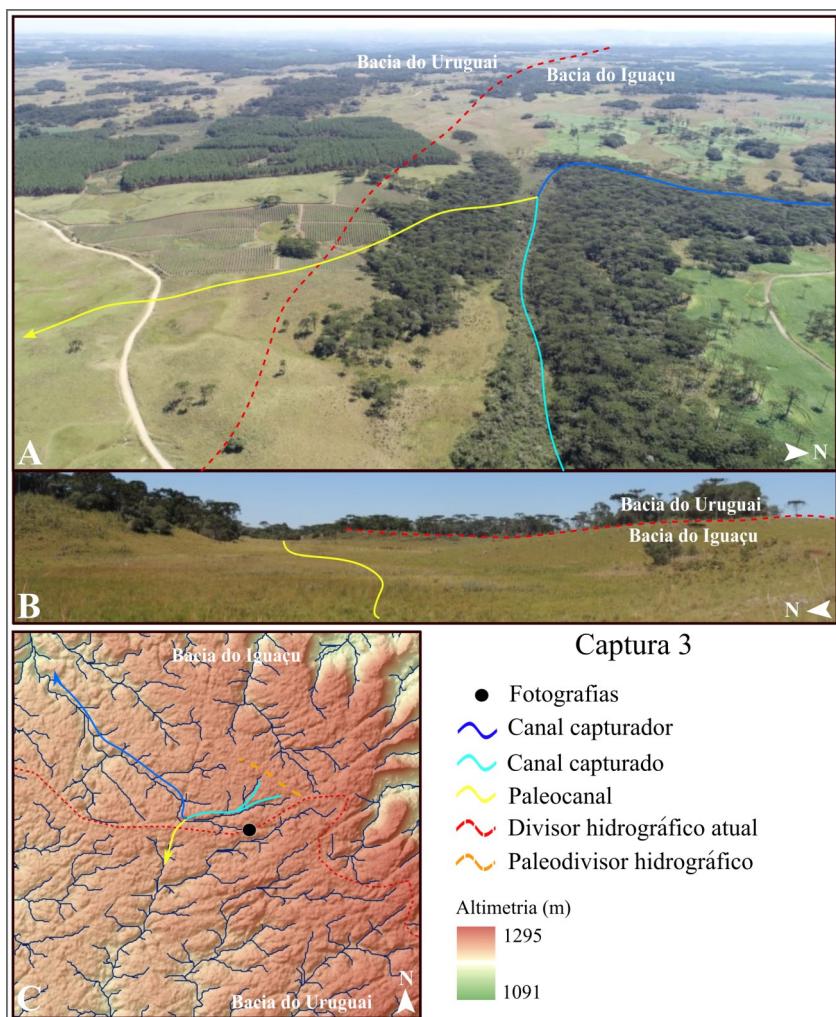


Fig. 5. Esquema fotográfico da captura 3. Na fotografia aérea A, está marcado o cotovelo de drenagem no rio capturado, bem como o paleovalle por onde antes ele drenava em direção à bacia do rio Uruguai. Notar o baixo divisor próximo ao cotovelo de drenagem atravessado pelo paleovalle em configuração típica de captura fluvial. Notar ainda no canto esquerdo da foto o início da zona úmida que marca o paleovalle. Na foto B, tem-se a visão horizontal do baixo divisor hidrográfico. O modelo digital do terreno (C) localiza os elementos fotografados, bem como destaca as cabeceiras localizadas à montante do cotovelo com nítida direção para a bacia do rio Uruguai.

Fig.5. Photographic scheme of capture 3. In aerial photo A, the drainage elbow in the captured river is marked, as well as the paleovalley through where it previously drained into the Uruguay River basin. Note the low divider near the drainage elbow crossed by the paleovalley in a typical configuration of fluvial capture. Note also in the photo's left corner the beginning of the humid zone that marks the paleovalley. Photo B shows the horizontal view of the lower hydrographic divide. The digital terrain model (C) locates the photographed elements and highlights the headwaters located upstream of the elbow with a clear direction towards the Uruguay River basin.

A captura 4 (Figura 1A), ocorreu com a transferência de 8,4 km² da bacia hidrográfica do rio Uruguai para a bacia hidrográfica do rio Iguaçu (Paraná). O tributário que inicialmente drena no sentido NE-SW, após formar um cotovelo à 1,5km de sua nascente, tem seu curso estabelecido para a direção SE-NW (Figura 6A e C). No ponto em que se localiza o cotovelo, foi verificado um afluente alinhado com um fraturamento no mesmo sentido (NE-SW) que o trecho inicial do rio capturado. Neste caso, esse afluente corresponde ao antigo curso que o rio percorria no sentido da bacia hidrográfica do rio Uruguai. Em decorrência da captura, este trecho teve seu fluxo invertido e se tornou também um

afluente do rio Iguaçu (Paraná) (Figura 6A). Outro fator que corrobora para a afirmação sobre o afluente corresponder ao antigo curso principal é seu vale superdimensionado. Ademais, foi verificado na sequência deste afluente um paleovalle seco que, em um colo, atravessa o atual baixo divisor hidrográfico, fato que comprova este ser um paleovalle entalhado pelo canal pré-captura. Por fim, é nítido nesta área que o divisor hidrográfico se localiza, topograficamente, mais baixo do que as nascentes dos cursos fluviais e que o rio capturador atravessa o antigo divisor que topograficamente se destaca na paisagem (Figura 6).

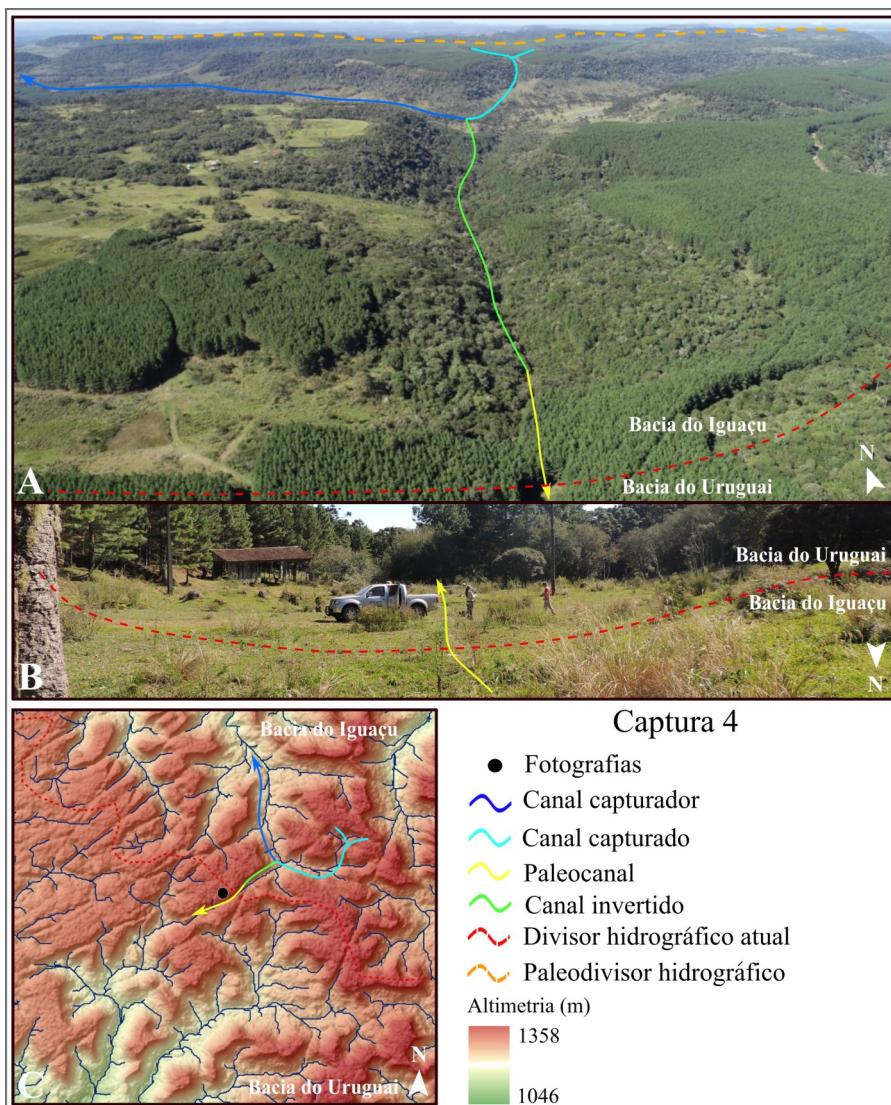


Fig. 6. Esquema fotográfico da captura 4. O conjunto de evidências mapeadas é visível na foto A, e fica evidente que o rio pirata atravessa o paleodivisor e captura em um pronunciado cotovelo um curso fluvial que drenava em direção ao rio Uruguai. O alinhamento entre o trecho capturado e o canal com fluxo invertido que, mais adiante, na forma de vale seco atravessa o atual divisor hidrográfico em mais uma prova do rearranjo da drenagem. Na foto B, é possível observar o colo sobre o divisor atual, que corresponde ao paleovalle entalhado pelo rio pré-captura. O modelo digital do terreno localiza os elementos fotografados (C), bem como destaca as cabeceiras localizadas à montante do cotovelo com nítida direção para a bacia do rio Uruguai.

Fig.6. Photographic scheme of capture 4. The set of mapped evidences is visible in photo A, and it is evident that the pirate river crosses the paleodivisor and captures in a pronounced elbow a fluvial course that drained towards the Uruguay River. The alignment between the captured stretch and the channel with inverted flow that further on in the form of a dry valley crosses the present hydrographic divider in yet another evidence of the drainage rearrangement. In photo B, it is possible to observe the lap over the current divider, which corresponds to the paleovalley carved by the pre-capture river. The digital terrain model locates the photographed elements (C), as well as highlights the headwaters located upstream of the elbow with a clear direction towards the Uruguay River basin.

Na porção leste da área está localizada a captura 5 (Figura 1A). Esta última foi responsável pela transferência 13,8 km² de área da bacia hidrográfica do rio Iguaçu (Paraná) para a bacia hidrográfica do rio Uruguai. É marcada pela presença de um baixo divisor hidrográfico bem pronunciado na paisagem (Figura 7B e C). As nascentes do rio capturado encontram-se em uma altitude de 145 metros acima do atual divisor entre as bacias hidrográficas dos rios Uruguai e Iguaçu (Paraná) em uma configuração típica de áreas que sofreram rearranjo de drenagem. O rio capturado tem seu trecho inicial orientado no sentido SE-

NW, e após cerca de 4 quilômetros seu curso muda gradativamente para o sentido NE-SW, caracterizando um cotovelo de captura pouco agudo, mas ainda assim pronunciado. Ainda, o canal capturador parece ter tido seu avanço erosivo facilitado por um lineamento NE-SW. De qualquer forma, os canais localizados à montante deste cotovelo drenam no sentido da bacia do rio Iguaçu (Paraná) em direção claramente divergente à do canal principal à jusante do cotovelo (Figura 7C).

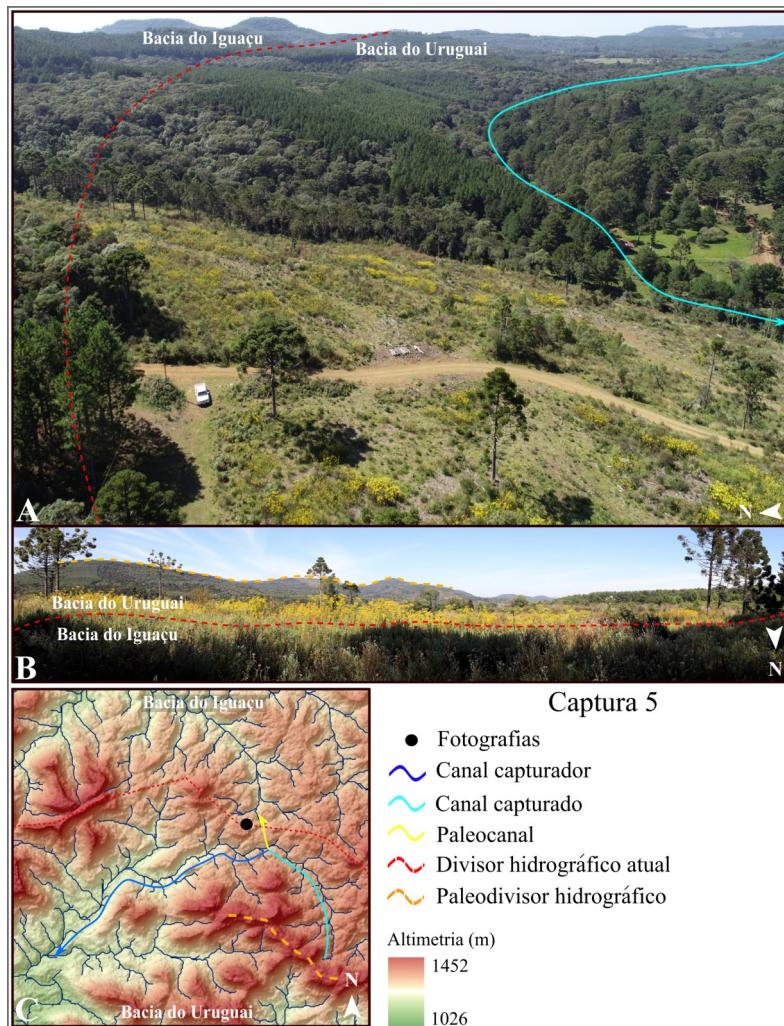


Fig. 7. Esquema fotográfico da captura 5. Notar que em ambas as fotografias é possível verificar como o divisor atual está em uma cota mais baixa que as nascentes do rio capturado.

Ainda, há marcado o cotovelo de drenagem, não necessariamente agudo, mas pronunciado. O modelo digital do terreno localiza os elementos fotografados (C), bem como comprova que os canais fluviais de primeira e segunda ordem localizados à montante do cotovelo drenam em direção contrária à do canal principal. Destaca ainda o alto paleodivisor isolado na bacia do rio Uruguai e sensivelmente mais elevado do que o atual baixo divisor.

Fig. 7. Photographic scheme of capture 5. Note that in both photos it's possible to see how the actual divider is at a lower elevation than the headwaters of the captured river.

There is also a marked drainage elbow, not necessarily acute, but pronounced. The digital terrain model locates the photographed elements (C) and proves that the first and second order fluvial channels located upstream of the elbow drain in the opposite direction of the main channel. It also highlights the isolated high paleodivider in the Uruguay River basin and appreciably higher than the current low divider.

5. DISCUSSÃO

Geoformas que comprovam os rearranjos de drenagem são difíceis de encontrar em áreas serranas tropicais ou subtropicais úmidas, como é o caso da Serra do Espigão (Estado do Paraná, Brasil), pois os processos geomorfológicos tendem a rapidamente descaracterizá-las e até apagá-las da paisagem. Entretanto, estas geoformas ainda são profícias na área de estudo (Figuras 3, 4, 5, 6 e 7). Além disso, apresentam-se interrelacionadas entre si como, por exemplo, com cotovelos de drenagem seguidos de vales secos (Figuras 3 e 5), com paleovalves secos atravessando baixos divisores hidrográficos (Figuras 3, 4 e 5) ou com áreas serranas onde se

localizam as nascentes dos cursos fluviais bem mais elevadas do que os atuais divisores hidrográficos (Figuras 3 e 7). Deste modo, duas são as primeiras questões que podem ser levantadas. A primeira faz referência à idade dessas capturas. Por estarem ainda tão preservadas, embora não seja possível determinar uma idade exata, é plausível considerá-las holocênicas ou, no máximo, do Pleistoceno Superior. A segunda consideração diz respeito ao uso do drone. A ferramenta permitiu ver a interrelação entre as geoformas indicativas de capturas fluviais, fato que não permite dúvidas acerca da ocorrência do processo.

Em paralelo, na análise das cinco capturas percebe-se que, em questão de transferência de

área, a bacia hidrográfica do rio Uruguai pirateou quase seis vezes mais que a bacia hidrográfica do rio Iguaçu (Paraná). No entanto, a exemplo do que foi observado por SORDI *et al.* (2018) na área do tríplice divisor hidrográfico, de fato ocorrem capturas fluviais nos dois sentidos. Logo, torna-se fundamental identificar as causas para esse aparente equilíbrio dinâmico, visto que o fenômeno de mútuas pirataria fluvial é incomum no Brasil (SALGADO *et al.*, 2018).

De acordo com as características ambientais das bacias hidrográficas e do divisor, foi possível eliminar alguns possíveis fatores como condicionantes para o processo de mútuas capturas. Em primeiro lugar, descarta-se a possibilidade de o nível de base geral ser o responsável pelo processo, uma vez que ambas as bacias hidrográficas podem ser consideradas demasiado interiores e possuem seu nível de base geral estabelecido na foz do rio da Prata, situado a cerca de 1.800 km. A possibilidade de vantagem erosiva por meio de diferenças no grau de coesão das rochas do embasamento também é descartada, pois ambas são embasadas pela mesma litologia: os basaltos do Grupo Serra Geral. Por sua vez, o regime climático é homogêneo para as duas faces do divisor hidrográfico. Logo, o regime pluviométrico também foi desconsiderado como fator condicionante para a ocorrência do fenômeno de mútuas capturas. Por fim, não há um claro padrão espacial para o fenômeno, visto que as capturas estão numeradas de oeste para leste e, sendo assim, não é possível identificar um setor do divisor onde prevaleça uma bacia hidrográfica e outro onde prevaleça a outra (Figura 1). Dessa maneira, a explicação para o fenômeno necessita ser definida em escala local ou, no máximo regional.

Neste contexto, os perfis longitudinais dos rios capturador e capturado de cada pirataria mapeada (Figura 8) permitem verificar algumas singularidades e padrões. Os perfis foram plotados desde a nascente e seguem até desembocarem nos seus respectivos rios principais - Uruguai e Iguaçu - que, do ponto de vista regional, constituem os níveis de base principais para seus afluentes aqui investigados.

De modo geral, os afluentes do rio Uruguai têm perfis três a quatro vezes mais extensos que os dos afluentes do rio Iguaçu. Além disso, os perfis dos afluentes do rio Uruguai apresentam-se mais suavizados e ajustados, enquanto os dos que drenam para o rio Iguaçu apresentam um *knickpoint* pronunciado em torno da cota de 900 metros (Figura 8). Esse *knickpoint* presente nos perfis dos afluentes do rio Iguaçu resulta em duas cachoeiras de mais de 70 metros de altitude: o Salto do rio dos Pardos (nos canais fluviais envolvidos nas capturas 1 e 2) e Salto rio Bonito (nos canais fluviais envolvidos nas capturas 3, 4 e 5). Além disso, verifica-se que os *knickpoints* situam-se no limite litoestrutural entre os basaltos do Grupo Serra Geral e os arenitos da Formação Botucatu (Figura 8).

Considerando-se que esses *knickpoints* estabelecem um nível de base local/regional para canais afluentes do rio Iguaçu, os mesmos constituem-se como base para a comparação dos gradientes dos canais. Deste modo, observando-se a amplitude altimétrica (m) percorrida pelos rios capturador e capturado, divididos pela mesma extensão percorrida (km) até o *knickpoint* dos afluentes do Iguaçu, é possível identificar que o afluente que possui o maior gradiente é justamente o que capturou áreas da bacia vizinha (Tabela 1). De fato, no caso das capturas 1, 2 e 5 os afluentes do rio Uruguai apresentaram um gradiente mais elevado e avançam sobre a bacia hidrográfica do rio Iguaçu. Já para as capturas 3 e 4, ocorre o contrário, pois são os afluentes do rio Iguaçu que possuem gradientes maiores (Tabela 1) e, por isso mesmo, são eles que pirateiam áreas. Em adição, a análise dos perfis longitudinais (Figura 8) permite ratificar essa observação. De fato, quando os afluentes do rio Uruguai alcançam o contato entre o Grupo Serra Geral com a Formação Botucatu em cota altimétrica semelhante ou inferior à que os afluentes do rio Iguaçu alcançam - topo dos *knickpoints* - as capturas fluviais favorecem a expansão da face sul do divisor hidrográfico (capturas 1, 2 e 5). Por outro lado, quando os afluentes do rio Uruguai alcançam esse contato em cota altimétrica superior à dos afluentes do rio Iguaçu, são as bacias hidrográficas da face norte do divisor que se expandem (capturas 3 e 4).

Captura	Afluente	Gradiente	Área Capturada
1	Agressor	Uruguai	8,5 m/km
	Vitima	Iguaçu	6,7 m/km
2	Agressor	Uruguai	8,5 m/km
	Vitima	Iguaçu	6,5 m/km
3	Agressor	Iguaçu	6,6 m/km
	Vitima	Uruguai	5,9 m/km
4	Agressor	Iguaçu	6,3 m/km
	Vitima	Uruguai	5,8 m/km
5	Agressor	Uruguai	5,5 m/km
	Vitima	Iguaçu	4,6 m/km

Tab. 1. Gradientes dos canais envolvidos nas capturas. Nota-se que o canal de menor gradiente topográfico é sempre a vítima e o de maior é o agressor.

Tab. 1. Gradients of the channels involved in the captures. Notice that the channel with the lowest topographic gradient is always the victim and the one with the highest is the aggressor.

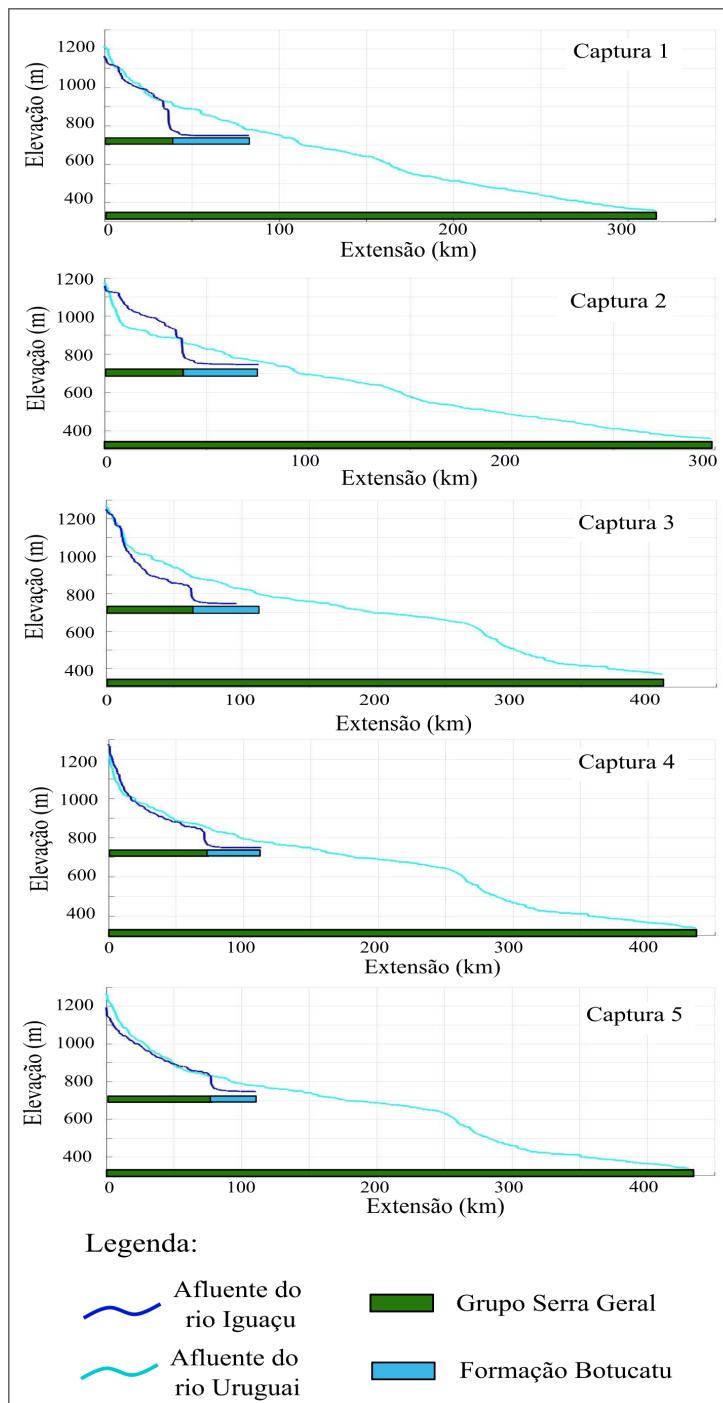


Fig. 8. Perfis longitudinais dos rios envolvidos nas capturas fluviais associados ao embasamento litológico.
Fig.8. Longitudinal profiles of the rivers involved in the fluvial catches associated with the lithological enbasement.

Logo, pode-se afirmar que o fator condicionante para a ocorrência das capturas fluviais na Serra do Espigão está intimamente relacionado ao nível de base estabelecido pelo contato litológico dos basaltos do Grupo Serra Geral com os arenitos da Formação Botucatu. Esse contato não está bem marcado no perfil dos afluentes do rio Uruguai, mas por outro lado ele estabelece níveis de base locais-regionais - *knickpoints* - para os afluentes do rio Iguaçu (Figura 8). É a posição altimétrica desses níveis de

base que determina o grau de agressividade dos afluentes do rio Iguaçu. Quando mais elevados que suas contrapartes no rio Uruguai, favorecem a perda de áreas para a bacia hidrográfica do rio Iguaçu (Paraná). Quando mais baixos, condicionam perfis mais agressivos (Tabela 1) e a expansão das bacias hidrográficas localizadas na face norte da Serra do Espigão. Portanto, é pelo estabelecimento deste controle da erosão nos afluentes do rio Iguaçu que os canais que possuírem maior gradiente dentre as duas bacias

hidrográficas, conseguirão avançar sobre o divisor e capturar áreas. É por esta razão que ocorre essa disputa incomum entre as bacias hidrográficas Uruguai-Iguaçu (Paraná), onde não se verifica a clara dominância de uma bacia hidrográfica em detrimento de outra.

Ainda, cabe destacar o papel das fraturações nas capturas fluviais mapeadas (Figura 1A). No caso das capturas 2, 3 e 5, pode-se observar que o canal capturador se aproveitou de fraturamentos para escavar seu leito e capturar fluxo e área da bacia vítima. Por outro lado, nas capturas 1 e 4, os canais capturados estabeleceram seus leitos sobre fraturamentos, mas foram desviados por consequência da captura fluvial. Tal fato mostra que os canais podem sim se aproveitar dos fraturamentos para avançar sobre outros canais, mas que também, dependendo do poder erosivo, um canal pode desviar o fluxo de outro que já estava encaixado em fraturamento.

Por fim, analisando o contexto atual da área é possível observar uma tendência para maior avanço da bacia hidrográfica do rio Uruguai sobre a do rio Iguaçu. No entanto, conforme os afluentes do Iguaçu forem trabalhando na regressão do *knickpoint*, a tendência é de que seus gradientes aumentem e que, por consequência, a bacia hidrográfica do rio Iguaçu recapture áreas antes pirateadas pela do rio Uruguai. Tal raro fenômeno, onde uma bacia hidrográfica antes pirateada se torna pirata, já foi narrado na literatura (STRUTH *et al.*, 2019). Na península Ibérica a bacia hidrográfica do rio Ebro se expandiu à custa da do rio Douro. Entretanto, tal tendência tem sido revertida em decorrência de o canal principal do rio Douro ter vencido barreiras litológicas que determinavam níveis de base regionais topograficamente elevados para seu curso (STRUTH *et al.*, 2019). Fenômeno semelhante parece estar ocorrendo na área de estudo em uma escala de menor dimensão. Apesar de certo equilíbrio, na atualidade a bacia hidrográfica do rio Uruguai mais agride do que é agredida. No entanto, a tendência é para que pouco a pouco, o processo se inverta e a bacia hidrográfica do rio Iguaçu (Paraná) se torne a grande agressora.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

De modo geral, os resultados desta pesquisa apontam que, de fato, é verificada a ocorrência incomum de mútua pirataria fluvial entre as bacias hidrográficas dos rios Uruguai e Iguaçu (Paraná) ao longo da Serra do Espigão no estado de Santa Catarina. Este fato incomum ocorre em função de que, uma vez que as bacias hidrográficas dos rios Uruguai e Iguaçu (Paraná) possuem na área de estudo praticamente as mesmas características ambientais (nível de base geral, substrato litológico e regime climático), são fatores locais ou, no máximo, regionais, que condicionam a ocorrência das capturas fluviais. No caso, destaca-se o nível de base local/regional que é determinado pelo contato dos basaltos do Grupo Serra Geral com os arenitos da Formação Botucatu. Em sua atual posição esse contato estabelece *knickpoints* para os afluentes do rio

Iguaçu. Esses *knickpoints*, por sua vez, permitem que se estabeleça uma leve tendência para que a bacia hidrográfica do rio Uruguai seja mais agressora que agredida. No entanto, não há uma clara definição de que haja uma bacia predominantemente agressora e outra agredida e, a longo prazo, o recuo erosivo lateral dos *knickpoints* tende a favorecer um maior poder erosivo para a bacia hidrográfica do rio Iguaçu (Paraná).

Sendo assim, é relevante ressaltar que por meio deste estudo de caso foi possível compreender melhor como se dá a ação de fatores condicionantes locais-regionais nos processos de captura fluvial. Foi possível também descrever um processo – mútua captura - pouco narrado no território brasileiro. Isto permitiu verificar como os rearranjos de drenagem podem ser dinâmicos. Paralelamente, ressalta-se a necessidade de novos estudos científicos na Serra do Espigão, visto que ela possui características ímpares em termos de Geomorfologia Fluvial e pode ajudar na melhor compreensão da evolução dos divisores hidrográficos serranos do interior da América do Sul.

Em adição, embora não tenha sido possível estabelecer uma idade para as capturas fluviais identificadas, é razoável considerá-las como holocénicas ou, no máximo, do Pleistoceno Superior. Tanto pelo alto grau de preservação em que as geoformas ainda conservam, quanto as capturas fluviais ocorrem muito próximas ao divisor hidrográfico em canais de baixa ordem. Por fim, este trabalho mostrou que o drone é uma ferramenta excelente para este tipo de pesquisa e que com o uso dele ainda vale a pena procurar as evidências de campo dos rearranjos de drenagem, pois elas são as provas definitivas deste processo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES pelo apoio financeiro e incentivos à pesquisa.

BIBLIOGRAFIA

- BEHLING, H.; PILLAR, V.D.; ORLÓCI, L. & BAUERMANN, S.G. 2004. Late Quaternary Araucaria Forest grassland (Campos), fire and climate dynamics, studied by high-resolution pollen, charcoal and multivariate analysis of the Cambará do Sul core in southern Brazil. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 203: 277-297. DOI: 10.1016/S0031-0182(03)00687-4
- BISHOP, P. 1995. Drainage rearrangement by river capture, beheading and diversion. *Progress in Physical Geography*, 19(4): 449-473. DOI: 10.1177/030913339501900402
- CHEREM, L.F.S.; VARAJÃO, C.A.C.; JUNIOR, A.P.M.; VARAJÃO, A.F.D.C.; SALGADO, A.A.R.; OLIVEIRA, L.A.F. & BERTOLINI, W.Z. 2013. O papel das capturas fluviais na morfodinâmica das bordas interplanárticas do sudeste do Brasil. *Revista de Geomorfologia Brasileira*, 14(4): 299-308. DOI: 10.20502/rbg.v14i4.325

- FORTE, A.M. & WHIPPLE, K.X. 2018. Criteria and tools for determining drainage divide stability. *Earth and Planetary Science Letters*, 493: 102–117. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.04.026>
- IBGE. 2012. Manual Técnico da Vegetação Brasileira. Segunda ed. Rio de Janeiro: IBGE. 272p.
- MILANI, E. J. & RAMOS, V. A. 1998. Orogenias paleozoicas no domínio sul-oeste do Gondwana e os ciclos de subsidência da Bacia do Paraná. *Revista Brasileira de Geociências*, 28(4): 473-484. DOI: <https://doi.org/10.25249/0375-7536.1998473484>
- NARDY, A.J.; ROSA, M.C.; LUCHETTI, A.C.F.; FERREIRA, M.L.C.; MACHADO, F.B. & OLIVEIRA, M.A.F. 2011. Parâmetros físicos pré-eruptivos do magmatismo ácido da província magmática do Paraná: resultados preliminares. *Geociencias*, 30(4): 575-588.
- NASCIMENTO, E. R. 2013. Morfotectônica e origem das morfoestruturas da Serra do Mar Paranaense. Tese (Doutorado em Geologia). Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 154p.
- PAISANI, J.C.; LOPES-PAISANI, S.D.; LIMA, S.; RIBEIRO, F.J.; PONTELLI, M.E. & FUJITA, R.H. 2019. Paleoenvironmental Dynamics of Low-Order Paleovalleys in the Late Quaternary - Palmas/Caçador Summit Surface - Southern Brazil. *Catena*, 182. DOI: 10.1016/j.catena.2019.104171
- POTTER, R.O.; CARVALHO, A.P.; FLORES, C.A. & BOGNOLA, I. 2004. Solos do estado de Santa Catarina. Primeira ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 745p.
- REZENDE, E.A.; SALGADO, A.A.R. & PAULO, T.A.C. 2018. Evolução da rede de drenagem e evidências de antigas conexões entre as bacias dos Rios Grande e São Francisco no sudeste brasileiro. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 19(3): 483-501. DOI: 10.20502/rbg.v19i3.1304
- SALGADO, A.A.R.; SOBRINHO, L.C.; CHEREM, L.F.; VARAJÃO, C.A.C.; BOURLÈS, D.L.; BRAUCHER, R. & MARENT, B.R. 2012. Estudo da evolução da escarpa entre as bacias do Doce/Paraná em Minas Gerais através da quantificação das taxas de desnudação. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 13: 213– 222. DOI: 10.20502/rbg.v13i2.280
- SALGADO, A.A.R.; CHEREM, L.F. & SORDI, M.V. 2018. Grandes Capturas Fluviais no Brasil: Síntese das novas descobertas. *Estudos do Quaternário*, 19: 23-31. DOI: 10.30893/eq.v0i19.176
- SCHEIBE, L.F. & FURTADO, S.M.A. 1989. Proposta de alinhamentos Estruturais para um Esboço Geotectônico de Santa Catarina. *Revista Geosul*, 8 (4): 78-91.
- SCHOBENHAUS, C., CAMPOS, D.A., DERZE, G.R. & ASMUS, H.E. 1984. Mapa Geológico do Brasil e da Área Oceânica Adjacente. Ministério das Minas e Energia/DNPM. Brasília, Brazil.
- SCHWANGHART, W. & SCHERLER, D. 2014. Short Communication: TopoToolbox 2 – MATLAB-Based Software for Topographic Analysis and Modeling in Earth Surface Sciences. *Earth Surface Dynamics*, 2(1): 1-7. DOI: 10.5194/esurf-2-1-2014
- SORDI, M.V.; SALGADO, A.A.R.; SIAME, L.; BOURLÈS, D.; PAISANI, J.C.; LÉANNI, L.; BRAUCHER, R.; DO COU TO, E.V. & ASTER TEAM. 2018. Implications of drainage rearrangement for passive margin escarpment evolution in southern Brazil. *Geomorphology*, 306: 155-169. DOI: 10.1016/j.geomorph.2018.01.007
- STOKES, M.F.; GOLDBERG, S.L. & PERRON, J.T. 2018. Ongoing river capture in Amazon. *Geophysical Research Letters*, 45: 5545–5552. DOI: 10.1029/2018GL078129
- STRÄHLER, A.N. 1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Transactions American Geophysical Union*, 38(6): 913-920. DOI: 10.1029/TR038i006p00913.
- STRUTH, L.; GARCIA-CASTELLANOS D.; VIAPLANA-MUÑAS M. & VERGÉS J. 2019. Drainage network dynamics and knickpoint evolution in the Ebro and Duero basins: From endorheism to exorheism. *Geomorphology*, 327: 554-571. DOI: 10.1016/j.geomorph.2018.11.03
- SUMMERFIELD, M. A. 1991. Global Geomorphology. First ed. New York: John Wiley and Sons. 537p.
- TWIDALE, C.R. 2004. Drainage Patterns and their meaning. *Earth-Science Reviews*, 67: 159–218. DOI: 10.1016/j.earscirev.2004.03.001
- VOLKMER, S. & FORTES, E. 2003. Controle Tectônico e Geoquímico no Processo Evolutivo dos Materiais de Alteração Associados às Rochas Vulcânicas Ácidas Mesozóicas do Estado do Paraná - Brasil. In: IX Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário (ABEQUA), 9., 2003, Recife. Anais... São Paulo: ABEQUA.
- WHIPPLE, K.X.; FORTE, A.M.; DIBIASE, R.A.; GASPARINI, N.M. & OUIMET, W.B. 2017. Timescales of landscape response to divide migration and drainage capture: Implications for the role of divide mobility in landscape evolution. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 122: 248–273. DOI: 10.1002/2016JF003973.
- WILLETT, S.D.; MCCOY, S.W.; PERRON, J.T.; GOREN, L. & CHEN, C.Y., 2014. Dynamic reorganization of river basins. *Science* 343: 1248765. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1248765>.
- ZALÁN, P.V.; WOLFF, M.A.M.; CONCEIÇÃO, V.T.; ASTOLFI, I.S.; VIEIRA, J.C.J.; APPI, E.V.S. & ZANOTTO, O.A. 1987. Tectônica e Sedimentação da Bacia do Paraná. *Atas do III Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia*, 1: 441-477.