



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS, LETRAS E ARTES
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA

ANDERSON DE VITO

**ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL QUALI-QUANTITATIVA DE UMA VOÇOROCA
NA BACIA DO CÓRREGO BANDEIRA, NO MUNICÍPIO DE NOVA LONDRINA,
REGIÃO NOROESTE DO PARANÁ**

Maringá - PR

2017

ANDERSON DE VITO

**ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL QUALI-QUANTITATIVA DE UMA VOÇOROCA
NA BACIA DO CÓRREGO BANDEIRA, NO MUNICÍPIO DE NOVA LONDRINA,
REGIÃO NOROESTE DO PARANÁ**

Monografia apresentada junto ao Departamento de Geografia da Universidade Estadual de Maringá, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Geografia.

Orientador: Prof. Dr. Leandro Zandonadi

Maringá

2017

Aos meus pais, pelo apoio incondicional e por acreditarem e investirem sem medir esforços na conclusão dessa etapa de minha vida.

À minha companheira, pelo carinho, paciência durante todo este tempo.

AGRADECIMENTOS

Ao meu pai Natalino e minha mãe Silvia, por nunca terem deixado de acreditar e investir em meu potencial para chegar até este momento, concretizando uma importante etapa em minha vida que será base para outras grandes conquistas.

À minha companheira Milaine por todo incentivo, obrigado pela paciência, força, suporte, compreensão e carinho, enfrentaremos juntos e venceremos juntos as batalhas da vida.

Agradeço o professor Dr. Hélio Silveira, pela orientação inicial, sugestões e adaptações deste trabalho, por acreditar e sempre me incentivar durante estes quatro anos de caminhada, sendo um exemplo de profissional para se espelhar.

Meus sinceros agradecimentos ao professor Dr. Leandro Zandonadi por aceitar a orientação deste trabalho ao fim do semestre devido às forças maiores. Sem essa orientação final a conclusão deste trabalho não seria possível, agradeço a disponibilidade, tempo dedicado e toda a atenção prestada.

Aos professores Dr. Nelson Nelson Vicente Lovatto Gasparetto e Dr. Eduardo Souza de Moraes, meu agradecimento por aceitarem o convite para participar como membros da banca avaliadora e por dedicarem tempo e atenção para este trabalho.

Ao professor Dr. Otávio Cristiano Montanher pelo apoio na construção da metodologia de quantificação utilizada neste trabalho.

A todos os professores do Departamento de Geografia pelo suporte prestado durante a graduação.

Aos amigos pelo companheirismo, incentivo e apoio durante esta etapa

RESUMO

Solos de textura média e arenosa, aliado à situação topográfica de cabeceira de drenagem de um rio de primeira ordem são fragilidades naturais que, aliadas ao uso do solo e manejo inadequado, acarretaram em um processo erosivo avançado de uma voçoroca no município de Nova Londrina na Região Noroeste do estado o Paraná. O presente trabalho realiza uma análise espaço-temporal para qualificar e quantificar a voçoroca em estudo, com técnicas de fotointerpretação, geoprocessamento, sensoriamento remoto, métodos de classificação quanto a sua forma e gênese.

Palavras-chave: voçoroca; quantificação; classificação.

ABSTRACT

Medium-textured and sandy soils, allied to the topographical situation of a River drainage headboard of first order are natural weaknesses, combined with the use of the soil and inadequate management, concluded in an erosive process of a gully in the municipality of Nova Londrina in Paraná, northwestern region. The present work accomplishes a spatio-temporal analysis to qualify and quantify the gully in study, with photointerpretation techniques, GIS, remote sensing, grading methods about your shape and genesis.

Keywords: Gully; Quantification; Classification

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Modelo de evolução de voçorocas	15
Figura 2: Tipos de encostas segundo Troeh (1965).....	17
Figura 3: Localização da área de estudo	21
Figura 4: Localização das bacias hidrográficas do Ribeirão do Tigre e do Córrego Bandeira	22
Figura 5: Localização da bacia hidrográfica do Córrego Bandeira	23
Figura 6: Compartimentos geomorfológicos e suas características	24
Figura 7: Solos das bacias hidrográficas do Ribeirão do Tigre e Córrego Bandeira	25
Figura 8: Solos da bacia hidrográfica do Córrego Bandeira	26
Figura 9: Processo de Vetorização manual.....	28
Figura 10: União de dois vetores.....	29
Figura 11: Transformação de vetor para raster	29
Figura 12: Resultado da calculadora raster.....	30
Figura 13: Resultado da síntese cartográfica	31
Figura 14: Formas das voçorocas	33
Figura 15: Evolução da área nos anos de 2015 a 2017 (Vetor)	37
Figura 16: Evolução da área nos anos de 2015 a 2017 (Imagem).....	38
Figura 17: Frequência de ocorrência da voçoroca de 12/08/2015 a 09/08/2017	42
Figura 18: Formas constatadas na voçoroca em estudo.....	43
Figura 19: Classificação das formas mapeadas.....	44
Figura 20: Localização das interferências antrópicas, retirada do software Google Earth Pro	46
Figura 21: Análise anterior e posterior à intervenção antrópica	48

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Evolução da voçoroca em área	39
Gráfico 2: Evolução da voçoroca em área e taxa de crescimento	40

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	11
2.1 Tipos de processos erosivos	13
2.2 Fatores condicionantes de processos erosivos	16
2.4 Voçorocas no Noroeste do Paraná.....	19
3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	20
4. MÉTODOS, TÉCNICAS E MATERIAIS	26
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
6. CONCLUSÕES	48
7. REFERÊNCIAS.....	50

1. INTRODUÇÃO

Processos erosivos avançados como os de uma voçoroca são extremamente danosos ao meio ambiente, causando um grande impacto ambiental. Solos de textura média e arenosa são mais susceptíveis aos referidos processos, e este fator, aliado à situação topográfica de cabeceira de drenagem de um rio de primeira ordem são fragilidades naturais que, aliadas ao uso da terra e manejo inadequado, favoreceram a ocorrência de uma voçoroca situada no município de Nova Londrina, no estado do Paraná.

A erosão pode ser entendida como um processo natural de desprendimento, transporte e deposição de partículas de solo e rocha, e este processo, embora natural, pode ser acelerado em tempo e em potência através da influência antrópica, quando há mau uso do solo, ocasionando grandes prejuízos ambientais, sociais e econômicos. Desta forma, tanto na cidade quanto no campo é necessária grande atenção para a gestão ambiental.

Os processos erosivos começam com o impacto da gota d'água na superfície do solo desprovida de cobertura vegetal causando a desagregação das partículas em sua camada superficial. Esse efeito gera a escavação de pequenos sulcos onde a precipitação escoar por ação da gravidade no caminho de menor esforço, e sua continuidade causa o aprofundamento destes canais formando as ravinas. A falta de controle sobre este processo faz com que este canal escave até o nível de saturação do lençol freático, sendo este último nível denominado de Voçoroca, que para Bigarella et al. (2003, p.929) é “um canal de drenagem de paredes abruptas, com fluxos efêmeros ou, eventualmente, pequenos. A erosão geralmente é intensa. Termina numa cabeceira extremamente íngreme e escarpada”.

A dinâmica dos processos erosivos naturais segue na escala do tempo geológico, devido a atuação de agentes erosivos como águas pluviais, fluviais e marinhas e a atuação eólica e das geleiras, ou seja, os processos erosivos naturais não são perceptíveis na escala de vida humana, estes são fundamentais, pois sem eles não seria possível o intemperismo como conhecemos hoje e o relevo não seria modificado (SUGUIO, 2003).

Estes processos erosivos somente são percebidos na escala de vida humana quando o equilíbrio dinâmico entre a formação do solo e a desagregação de suas

partículas é interrompido. Dessa maneira, pode-se afirmar que determinadas condições ambientais podem ser mais vulneráveis devido as estruturas geológicas, condições climáticas, oscilações do nível d'água subterrâneo, condições topográficas e de cobertura vegetal. Estas são condicionantes naturais dos processos erosivos e sua relação com a atividade antrópica é o que muitas vezes ocasiona desequilíbrio de alguns destes fatores naturais (SAMPAIO, 2014).

Portanto, a intensidade dos processos erosivos naturais é dependente dos fatores acima mencionados, tais como o clima, a litologia, declividade, cobertura da terra, nível do lençol freático entre outros, e a ação antrópica acarreta em um grande acréscimo de intensidade nestes processos. Uma voçoroca é um processo erosivo em avançado estágio, sendo extremamente danosa ao meio ambiente e a sociedade, gerando risco civil na ocupação do entorno destas áreas. Entender a dinâmica e os processos atuantes em uma voçoroca é algo complexo por envolver muitas outras variáveis e vários processos erosivos atuando concomitantemente.

A região Noroeste do Terceiro Planalto paranaense está inserida na formação geológica Caiuá, uma formação de origem arenítica, que possibilita a formação de solos de textura média e arenosa que são mais propensos a processos erosivos acelerados de natureza antrópica, tornando-se naturalmente uma área com grande suscetibilidade à erosão.

Este trabalho tem por objetivo fazer uma análise espaço-temporal para qualificar e quantificar a voçoroca em estudo. Para se alcançar tais objetivos, para a quantificação foram utilizadas técnicas de fotointerpretação, geoprocessamento e sensoriamento remoto, enquanto que para a qualificação utilizou-se métodos de classificação quanto a sua forma. Por meio de referenciais teóricos abordou-se também a sua gênese, analisada em conjunto com as intervenções antrópicas cometidas na área.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O solo é considerado uma coleção de corpos naturais, constituídos por partes sólidas, líquidas e gasosas, tridimensionais, dinâmicos, formados por materiais minerais e orgânicos que ocupam a maior parte do manto superficial das extensões continentais do nosso planeta, contêm matéria viva e podem ser vegetados na

natureza onde ocorrem e, eventualmente, são modificados por interferências antrópicas (EMBRAPA, 2013).

No Brasil, a perda da camada superficial é a principal forma de degradação dos solos. Tal processo é potencializado em razão da ampliação da fronteira agrícola e do uso intensivo do solo (HERNANI et al, 2002).

O estudo do estágio atual dos processos erosivos deve levar em consideração a evolução histórica geomorfológica do relevo, além de interferências antrópicas. Para entender o significado dessas abordagens precedentes é necessário admitir que a conformação atual do relevo, ou da vertente enquanto categoria deste, resulta das relações processuais ao longo do tempo, considerando uma determinada situação morfológica e suas características estruturais (GUERRA, 1999).

Segundo o IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1992), a erosão hídrica consiste na desagregação e remoção do solo, fragmentos de partículas de rochas, pela ação da gravidade e escoamento de águas.

A capacidade de transporte da água que escoar superficialmente depende do volume, da velocidade da água e da declividade do terreno. Dessa forma, o escoamento superficial pode ser difuso ou concentrado. O escoamento difuso tem início quando a quantidade de água precipitada é maior que a velocidade de infiltração, podendo transportar partículas de solo e provocar, de início, sulcos poucos profundos, com possibilidade de evoluir para ravinas e voçorocas (EMBRAPA, 2011).

Segundo Bertoni e Lombardi Neto (1985, p. 64):

Erosão é o processo de desprendimento e arraste acelerado das partículas do solo causado pela água ou pelo vento. A erosão do solo constitui, sem dúvida, a principal causa de depauperamento acelerado das terras. As enxurradas, provenientes das águas de chuva que não ficaram retidas sobre a superfície ou não se infiltraram, transportam partículas de solo em suspensão e elementos nutritivos essenciais em dissolução. Outras vezes, esse transporte de partículas de solo se verifica, também, por ação do vento.

De acordo com Magalhães (1995), a força erosiva da água depende do volume e velocidade do escoamento, da espessura da lâmina d'água, da declividade e comprimento da vertente, além da presença de vegetação, além de vários outros fatores, como o clima, topografia, natureza do solo e o seu tipo de uso.

A erosão provocada sem a interferência antrópica através de vários agentes erosivos, tais como as águas pluviais, fluviais e marinhas, além dos ventos e geleiras é denominada de erosão natural ou erosão geológica (SUGUIO, 2003). A erosão se

desenvolve ao longo do tempo, passando por estágios, primeiramente com sulcos rasos e erosão laminar e, posteriormente, ravinas e voçorocas.

2.1 Tipos de processos erosivos

Os estágios de processos erosivos são de erosão laminar, sulcos, ravinas e voçorocas. A erosão laminar também é conhecida como erosão em lençol, causado pelo escoamento superficial difuso, não concentrado. Retira finas camadas de solos, quase imperceptíveis, que podem ser evidenciadas por tonalidades claras de solos (ALMEIDA FILHO, 2001; LIMA, 1999; DAEE, 1989).

Já o escoamento superficial concentrado, ajudado pela erosão laminar que retira sedimentos finos e expõe os grossos, depende das condições hidráulicas do escoamento superficial, subsuperficial e infiltrações (OLIVEIRA, 1999; LIMA, 1999; FOSTER et al. 1985).

Segundo Lepsch (2010), erosão laminar é a uniforme remoção de uma delgada superfície do solo desnudo em que as gotas de chuva rompem os agregados, reduzindo-os as partículas menores, passíveis de serem arrastadas pela energia da enxurrada. É um desgaste do solo em que os agricultores normalmente não notam ou até acham normal.

Os sulcos são pequenas erosões no formato de valas, sem muita profundidade, que convergem para outros sulcos, podendo-se ampliar. Quando ampliados podem gerar grandes cavidades ramificadas. A erosão em sulcos resulta de irregularidades na superfície do solo, devido à concentração da enxurrada em determinados locais. O escoamento da água subsuperficial poderá transformá-los em voçorocas, podendo atingir profundidades de vários metros (LEPSCH, 2010).

As ravinas são sulcos em um nível mais avançado e que não podem ser controladas por métodos simples de contenção. Também provocadas pelo escoamento superficial concentrado das águas pluviais.

As voçorocas são a fase mais avançada dos processos erosivos, e nesta etapa a erosão superficial se encontra com a subsuperficial, desgastando o subsolo e chegando ao lençol freático. Cortam as vertentes e podem atingir profundidades de vários metros.

Guerra e Guerra (2006), definem voçoroca como uma escavação ou rasgão do solo ou da rocha decomposta, ocasionada pela erosão de escoamento superficial e também pelo escoamento subsuperficial.

Conforme Bigarella et al. (2003, p.929) “a voçoroca constitui um canal de drenagem de paredes abruptas, com fluxos efêmeros ou, eventualmente, pequenos. A erosão geralmente é intensa. Termina numa cabeceira extremamente íngreme e escarpada”. O comportamento das voçorocas pode caracterizar um ciclo de quatro fases: 1 - erosão do canal e encaixamento; 2 - retrocesso da cabeceira e rápido alargamento; 3 - recomposição; 4 - estabilização. Porém, estes ciclos podem ser reativados devido a mudanças de cunho climáticas, geológicas ou antrópicas. Este último tipo de erosão provoca inúmeros problemas ambientais, perda de solo, podendo afetar a ocupação urbana e vegetal, além da rede de drenagem.

Um fenômeno associado às voçorocas e comumente abordado na literatura é o *piping*, que é a erosão tubular regressiva resultante da ação da água de subsuperfície que, ao retirar partículas do solo, cria vazios subterrâneos responsáveis por colapsos e subsidências no terreno (OLIVEIRA, 1994).

Dentre os processos que aparecem em tais circunstâncias evidencia-se o *piping*, comumente relacionado às diferenças texturais de sequências litoestratigráficas ou de horizontes pedológicos estruturais que respondem por escoamento de subsuperfície, podendo ser acompanhado pela solução química de certos componentes minerais. O processo evolutivo de formas associadas ao *piping* responde pela origem de sistema de cavernas ou dutos. Na área de saída do fluxo confinado pode-se ter a presença de alvéolos nas paredes, também denominados de “alcovas de regressão”, por encontrarem-se associadas à erosão remontante (GUERRA, 2013).

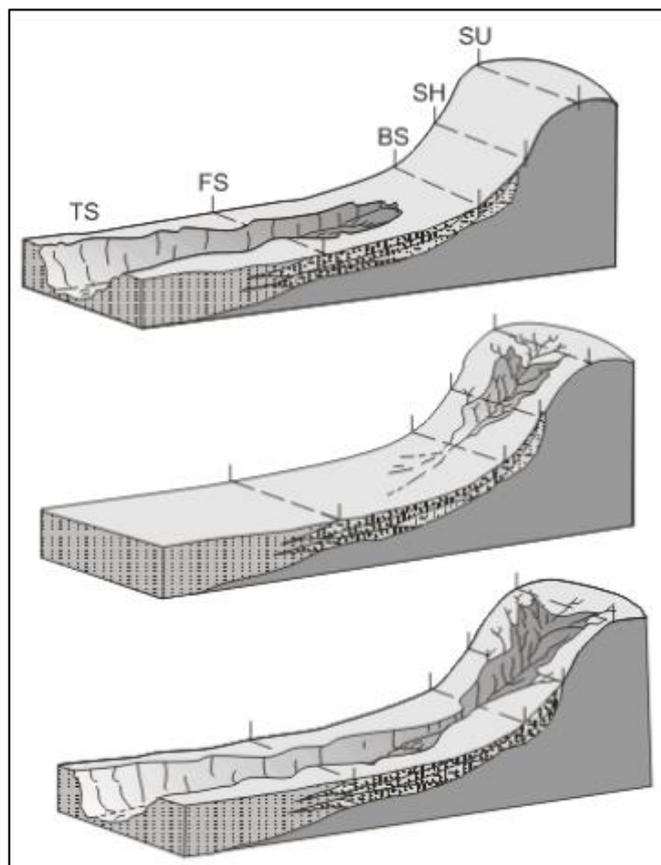
Diversos autores apontam uma relação entre a existência do *piping* e a formação de voçorocas, porém sua comprovação não é fácil, sendo difícil detectar o aparecimento de canais superficiais por colapso de túnel. Devido à influência do *piping* no escoamento sub-superficial, pouco se sabe sobre as condições reais de campo e o aparecimento de dutos (*pipes*). Trabalhos como Beckedahl e Dardis (1988) estudaram uma difícil relação entre a drenagem superficial e a ocorrência de dutos, considerando a feição antrópica como principal influenciador de processos formadores de dutos e voçorocas (JONES, 1987 apud AUGUSTIN e ARANHA, 2006).

Outro tipo de erosão é a erosão remontante, considerada por Suguio (2003) um processo de erosão que atua nas cabeceiras de um vale fluvial, conduzindo o aumento de sua extensão, seja por intemperismo ou gravidade, atuando junto aos processos fluviais.

Oliveira (1999) salienta que é necessário foco nas incisões erosivas formadas nas cabeceiras de vale, onde ocorre convergência de fluxos superficiais e subterrâneos. O autor também relata que existe uma relação entre rede de drenagem de primeira ordem e o desenvolvimento de voçorocas.

A figura 1 representa o modelo de evolução de voçorocas segundo Caseti (2005), que se baseia em estudos de Ruhe (1974), Oliveira e Meis (1985) e Oliveira (1989). Pode-se notar que, de cima para baixo, a primeira representa uma voçoroca conectada à rede hidrográfica; na segunda uma voçoroca desconectada à rede hidrográfica; e na terceira a integração entre os tipos.

Figura 1: Modelo de evolução de voçorocas



Fonte: Caseti (2005).

2.2 Fatores condicionantes de processos erosivos

No Brasil e no Estado do Paraná a erosão mais comum é a hídrica, causada por forças ativas, características de chuva, fatores topográficos e capacidade do solo em absorver água, além de forças passivas, como a resistência do solo e a densidade da cobertura vegetal (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1985). Para encontrar uma solução aos problemas de erosão, as suas condicionantes devem ser compreendidas. Para tanto, Lepesch (2010) criou 3 tópicos para tais condicionantes, e outros autores complementaram os mesmos. Uma síntese deles é apresentada a seguir.

1. Solo: Suas propriedades influenciam na erodibilidade que diz respeito ao grau de facilidade que as partículas se desagregam, à textura do solo e a impermeabilidade. O tamanho e disposição de espaços porosos tem uma maior influência na velocidade de infiltração do solo, e quando um solo já está saturado, o escoamento superficial tem início. Em solos arenosos, com grandes espaços porosos, existe uma alta velocidade de infiltração em comparação à solos argilosos. Além disso, a umidade do solo no começo da chuva e o grau de agregação do solo também são condicionantes à erosão (LEPSCH, 2002; BERTONI e LOMBARDI NETO, 1985).

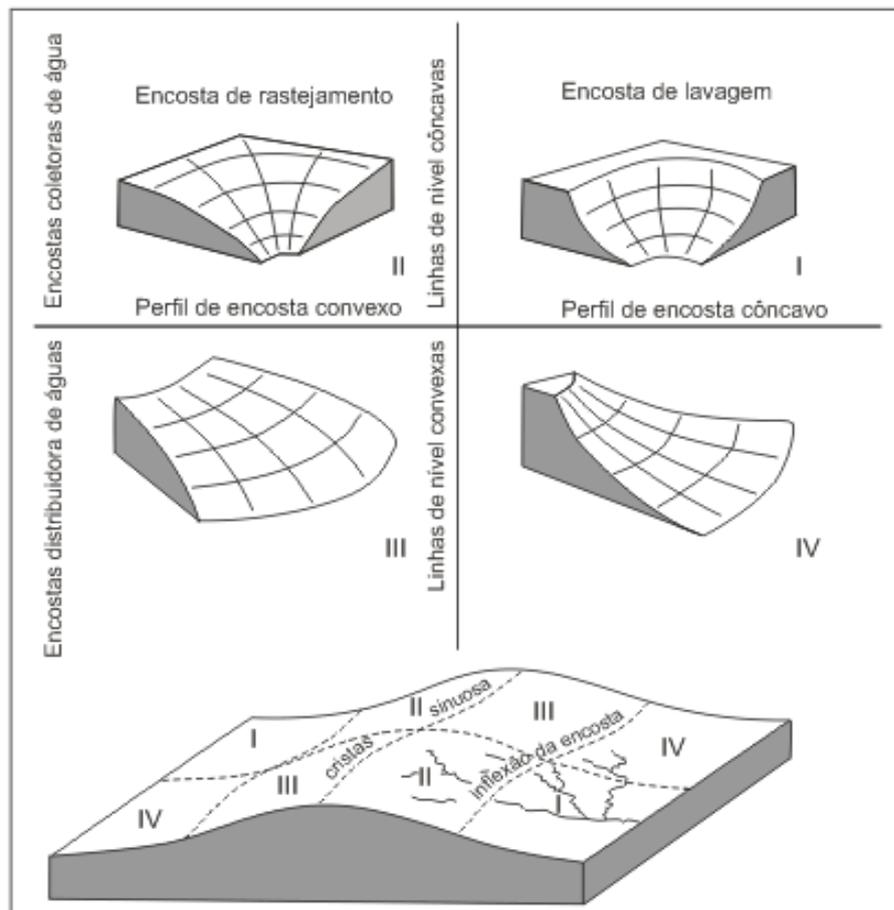
2. Clima/Chuva: Diz respeito à precipitação, sua distribuição, quantidade e intensidade. A chuva é um dos fatores climáticos mais importantes, pois na erosão dos solos, o volume e a velocidade da enxurrada dependem da intensidade, duração e frequência da chuva. No que se refere à erosão, a duração e frequência da chuva são os fatores que mais influenciam na erosão. Quando todos os fatores, com exceção da chuva, são constantes, a perda de solo de um terreno desprotegido tende a ser diretamente proporcional ao produto da energia cinética pela intensidade máxima em 30 minutos. (LEPSCH, 2002; BERTONI e LOMBARDI NETO, 1985; WISCHMEIER e SMITH, 1958).

3. Topografia: Sua inclinação exerce influência na concentração, dispersão e velocidade da enxurrada, e em consequência, no maior ou menor arrastamento superficial das partículas do solo. Isso afeta também na infiltração, escoamento e resistência. O tamanho e a quantidade do material suspenso arrastado pela água precipitada dependem da velocidade de escoamento, sendo ela resultante do grau de declividade da vertente. Seu comprimento de rampa também influencia a erosão, pois à medida que o caminho a ser percorrido pelas águas escoadas for aumentado, vão

se avolumando proporcionalmente, igualmente sua velocidade (LEPSCH, 2002; BERTONI e LOMBARDI NETO, 1985).

O tipo de encosta importa a partir do momento que acelera ou diminui, espalha ou concentra o escoamento superficial. Caseti (2005), em seu livro 'Geomorfologia', cita a classificação de Troeh (1965) e seus tipos de encostas, como pode ser observado na figura 2.

Figura 2: Tipos de encostas segundo Troeh (1965)



Fonte: Caseti (2005).

4. Cobertura Vegetal: Quanto mais cobertura vegetal, maior é a resistência do solo. Depende do tipo de plantação, do tamanho de raiz, estratos vegetais e estágio de evolução da cobertura vegetal. Quanto maior a folha, maior o espaço que ela protegerá o solo contra as gotas de chuva. Suas raízes podem abrir espaços e criar poros maiores nos solos, facilitando a infiltração. Também há o fator matéria orgânica, que as folhas das plantas caem no solo e se decompõem, promovendo proteção. As gotas de chuva, quando caem em uma densa vegetação, se dividem em partículas,

diminuindo sua energia cinética, já em solos descobertos, o desprendimento e salpicamento das partículas do solo são frequentes (LEPSCH,2002; BERTONI e LOMBARDI NETO, 1985).

2.3 A ação antrópica e a aceleração no desenvolvimento de voçorocas

As ações do ser humano constituem o fator que mais influencia os processos erosivos atualmente, desequilibrando o meio físico e natural. Os processos erosivos são acelerados através de pavimentações de vias (impedindo a infiltração natural das águas e criando uma nova rota), desmatamento (removendo a proteção natural do solo, com destaque para a remoção de Áreas de Proteção Permanente), lançando resíduos no ecossistema, extinção de animais, mudanças de rumos de rios com barragens e hidrelétricas e construções em lugares inapropriados.

Ações antrópicas, portanto, aceleram drasticamente os processos erosivos e dentre as atividades que mais podem contribuir para o agravamento de tais processos destacam-se o desmatamento e o uso indevido do solo. E neste sentido, Côrrea (2006, p.8) salienta que:

“A intensidade dos processos erosivos depende de alguns fatores naturais como a litologia, clima, declividade, cobertura do terreno, entre outros. Essa intensidade pode aumentar pela ação antrópica, que se torna o principal agente modificador da paisagem. Entre as atividades antrópicas que contribuem para acelerar os processos erosivos pode-se destacar o desmatamento, o uso indevido do solo nas atividades agropecuárias, extração mineral e a urbanização inadequada. A destruição das matas, o uso indevido do fogo e o cultivo das terras fora de sua capacidade de uso retiram a proteção da cobertura vegetal, o que ocasiona a ação da chuva diretamente sobre o solo desprotegido, de forma que as enxurradas passam a levar a camada fértil do solo, a matéria orgânica etc., para os vales e leitos das drenagens. É o fenômeno da erosão, em que a atividade antrópica tem um papel considerável.”

As perdas de solos em condições naturais alcançam o valor anual de 0.0045 à 0.045 ton.ha, enquanto que as áreas agrícolas causam perdas entre 45 e 450 ton.ha. Essas acelerações de processos erosivos são causadas pelo impacto humano na terra (YOUNG, 1969 apud MORGAN, 2005).

Segundo Guerra (2000), existem duas grandes áreas de problemas antrópicos, a rural e a urbana. A primeira influenciada pelo mau uso da terra, pela mecanização intensa e a monocultura, que somados à concentração de chuvas e ao baixo teor de

matéria orgânica, contribuem para o aumento da degradação nessas áreas. Nas áreas urbanas, o descalçamento, o corte de encostas e a desestabilização de encostas são as causas principais. Porém, uma das principais causas, em ambas as situações, é o desmatamento, contribuindo para a desagregação do solo e escoamento superficial. Para Suguio (2003), a ação antrópica é o principal agente modificador da paisagem, contribuindo com atividades como desmatamento, atividades agropecuárias, extração mineral e urbanização inadequada.

2.4 Voçorocas no Noroeste do Paraná

Gasparetto (1999), verificou que as alterações das formações superficiais ocorrentes no Noroeste do Paraná são originadas do Arenito Caiuá por alteração *in situ*, e se houve retrabalhamento ao longo de vertentes, são de difícil identificação, onde o quartzo é o material predominante, muito poroso e de fácil desagregação. Concluiu ainda que existe uma íntima relação entre morfologia e dinâmica da cobertura pedológica.

Fidalsk (1997), analisou áreas agrícolas já terraceadas na região Noroeste Paranaense, com o intuito de quantificar qual tipo de erosão é mais frequente. Os resultados apresentaram que 5% da erosão total são voçorocas, 32% são sulcos e 51% são erosão laminar.

Cunha et al. (1999), observaram o comportamento de um sistema pedológico em Umuarama, Noroeste do Paraná. Foi realizada uma topossequência, caracterização pedológica, macro e micromorfológica e física-hídrica. A topossequência apresentou declividade de 3,5% e terminou junto a uma voçoroca, e sua evolução mais recente expôs o retalhamento do córrego. Essa voçoroca criou uma situação de desequilíbrio na vertente e passou a sofrer aprofundamento e alargamento.

Matiazo e Kramer (2014), monitoraram uma voçoroca em Paranavaí, situada na Formação Caiuá e área de Latossolo Vermelho. Os autores utilizaram o método de estacas fixadas em 30 metros de distância uma da outra. O comprimento da voçoroca se alterou de 28,10 metros para 32,20 metros, e sua profundidade aumentou em 50 cm, chegando a 5,20 metros, e o aumento de sua largura variou entre 12 cm a 60 cm,

enquanto que o volume erodido foi de 32,475 m², sendo considerada uma erosão pequena, porém de grande potencial erosivo.

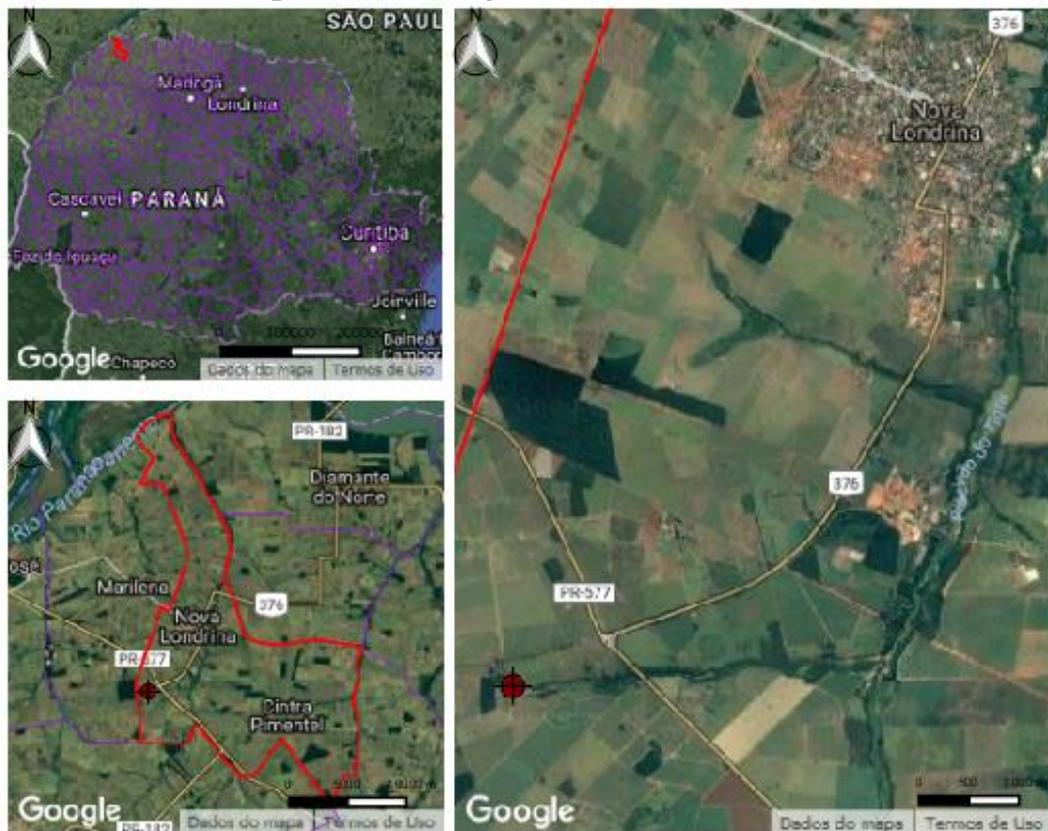
Segundo Machado (2015), uma voçoroca situada no município de Campo Mourão se desenvolveu a partir de um pequeno rio, com pouca vazão e profundidade, em 1970. Com a primeira pavimentação asfáltica, a impermeabilização do solo e a instalação de galerias pluviais, o volume de água recebido pelo córrego foi aumentando e iniciando o processo de desenvolvimento da voçoroca. No ano de estudo a voçoroca já possuía 490 metros de comprimento, 30 de largura e 10 de profundidade. As principais consequências registradas foram os danos estruturais às residências no entorno da voçoroca e a poluição no córrego, gerada por sedimentos e resíduos sólidos carregados.

Stipp (2006), relacionou a ocupação do solo e a problemática da erosão com o processo de desenvolvimento de voçorocas em Paranavaí. A voçoroca estudada foi medida de dois e dois meses no decorrer de um ano, sendo também analisados conjuntamente os índices pluviométricos e carta de fragilidade ambiental. Foram definidos 5 pontos de medição, ambos com problemas evidentes relacionados à falta de mata ciliar e galerias de água pluvial. Concluiu-se que o uso inadequado de solos arenosos, que possuem baixa capacidade de retenção de nutrientes, levam a troca de culturas por pastagens e, posteriormente, um abandono de terras, acelerando assim, o desenvolvimento das voçorocas. Constatou-se também a influência da área urbana e dos ventos nos processos erosivos existentes.

3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A voçoroca objeto deste estudo está situada na região Noroeste do Estado do Paraná, na cidade de Nova Londrina (Figura3), no Terceiro Planalto Paranaense, sobre a Formação Caiuá. Encontra-se ainda na porção Oeste da bacia do Ribeirão do Tigre e a Noroeste da bacia de primeira ordem do Córrego Bandeira, com distância de aproximadamente 7 km da malha urbana do município, conforme é representado nas figuras 4 e 5.

Figura 3: Localização da área de estudo

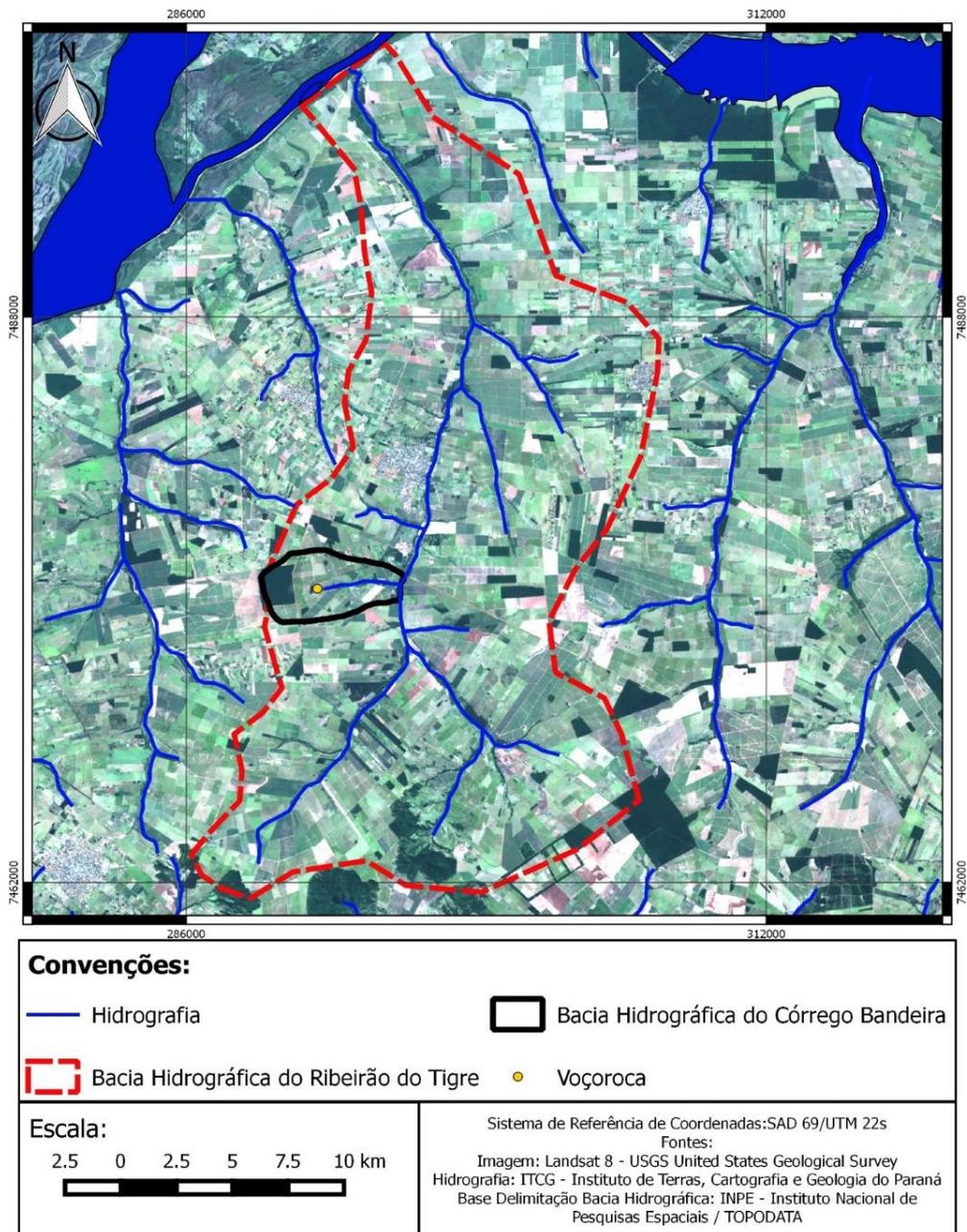


Legenda:

-  Municípios Paranaenses
-  Município de Nova Londrina
-  Voçoroca em estudo

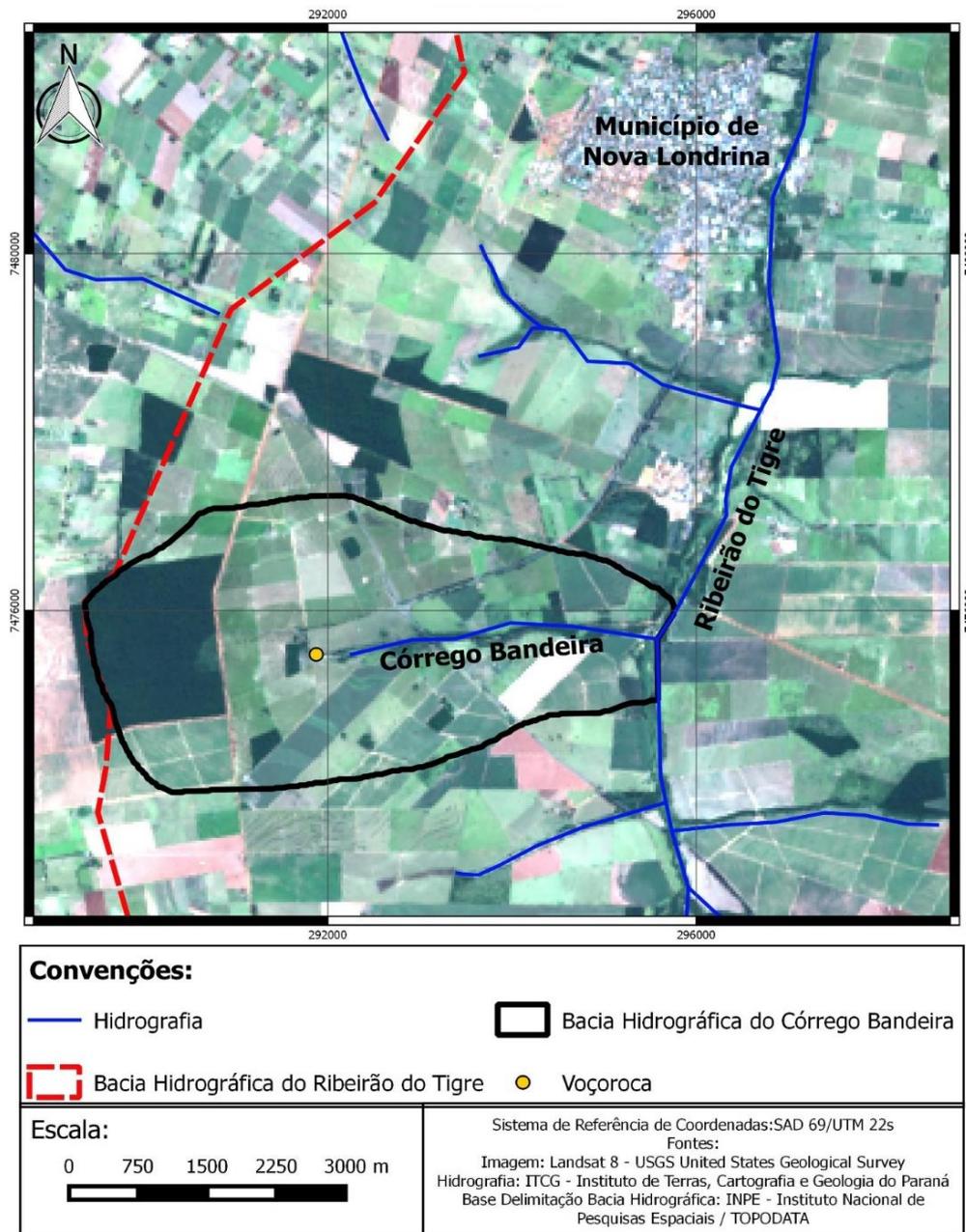
- Fontes:
Imagem: Google Hybrid
Municípios Paranaenses: ITOG - Instituto de Terras Cartografia e Geologia

Figura 4: Localização das bacias hidrográficas do Ribeirão do Tigre e do Córrego Bandeira



Organizado pelo autor.

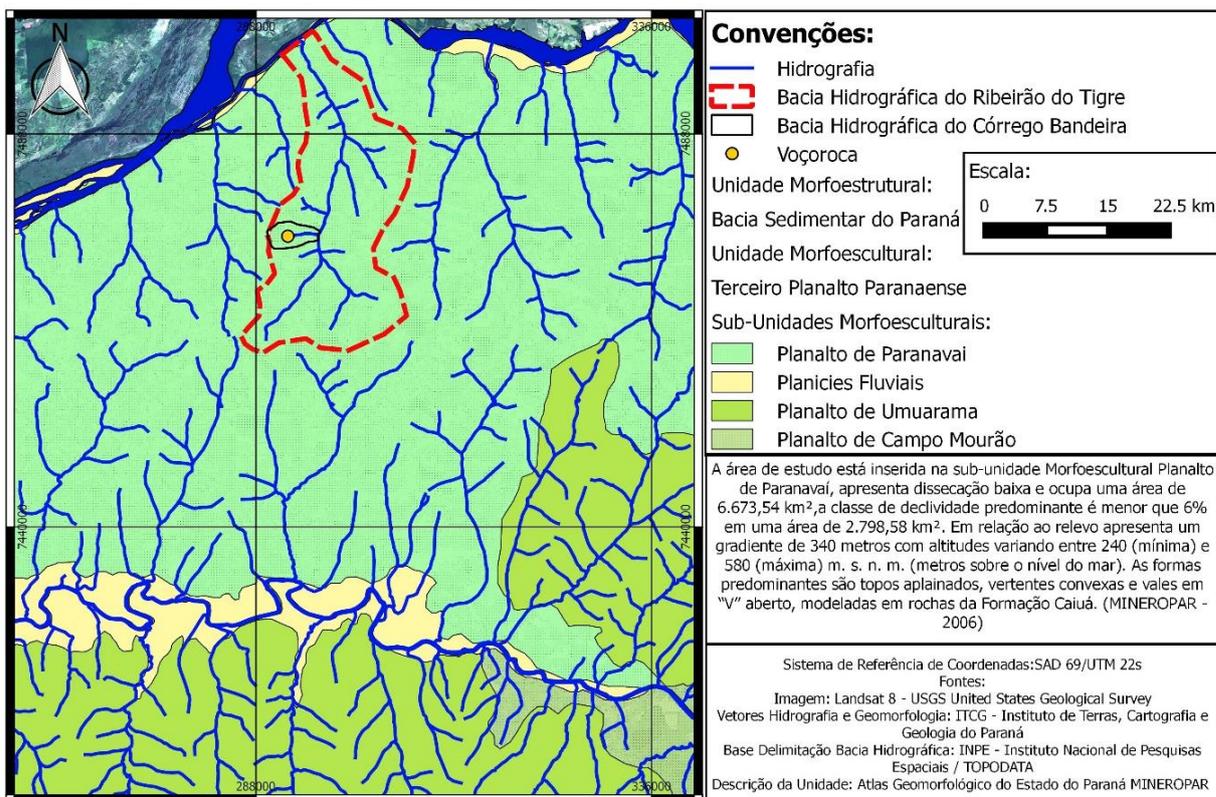
Figura 5: Localização da bacia hidrográfica do Córrego Bandeira



Organizado pelo autor.

Segundo o ITCG, a área de estudo está inserida na formação do Arenito Caiuá, contida na Unidade Morfoestrutural da Bacia Sedimentar do Paraná, com sua unidade Morfoescultural no Terceiro Planalto Paranaense, na Sub-Unidade Morfoescultural do Planalto de Paranaíba, conforme descrito na figura 6.

Figura 6: Compartimentos geomorfológicos e suas características



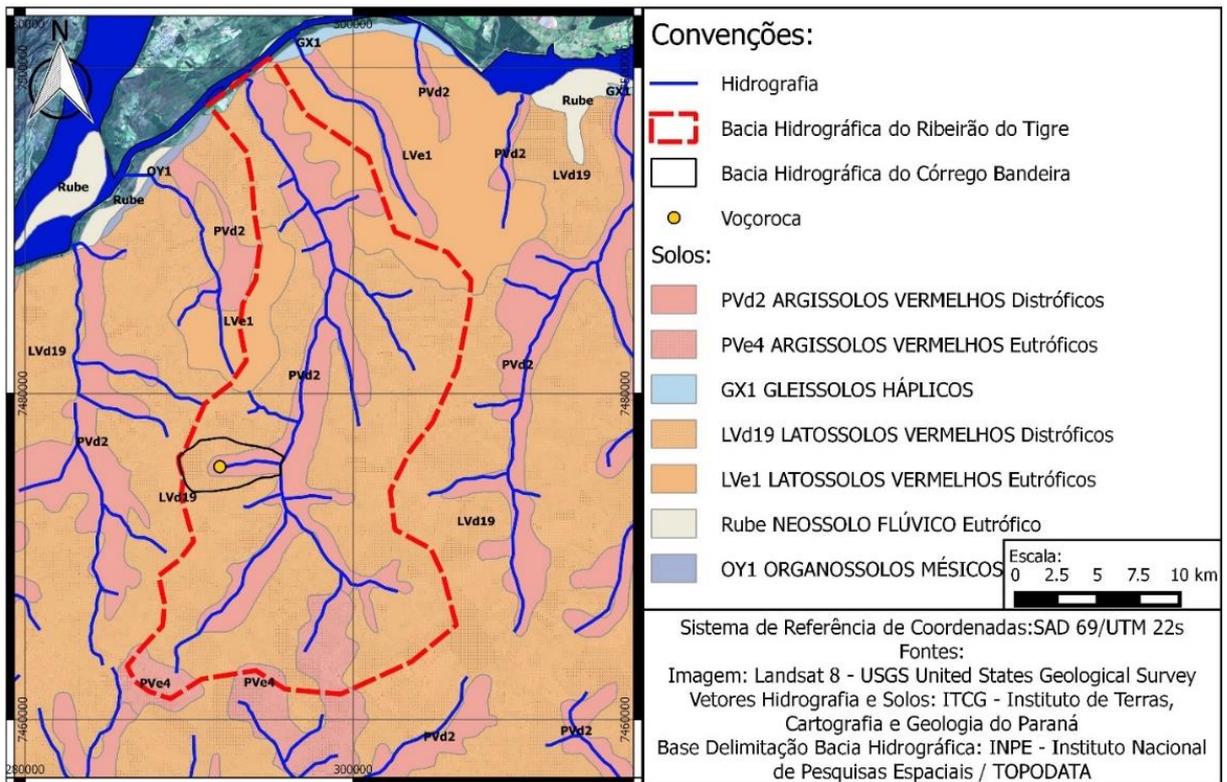
Organizado pelo autor

Segundo o Instituto de Terras, Cartografia e Geologia do Paraná, a área de estudo está inserida na sub-unidade morfoescultural do Planalto de Paranavaí dentro da formação geológica de origem arenítica Caiuá, conseqüentemente, sua dinâmica pedológica é em função da topografia, formando solos de textura média e arenosa, que de maneira geral originam as seguintes tipologias: Latossolos Vermelhos, Argissolos Vermelhos e Neossolos Quartzarênicos (Figura 6). Complementando sobre a geologia da formação Caiuá e sua dinâmica pedológica, a EMBRAPA (1999) retrata que:

“A Formação Caiuá é constituída predominantemente de arenitos finos a muito finos, apresentando cores que variam do vermelho-arroxeadado ao vermelho-escuro, com pequenos teores de matriz lamítica, agregados por cimento silicoso, carbonático, ferruginoso e argila. Bancos individualizados de dimensões variadas, com estratificação cruzada e subhorizontal, predominam nos arenitos finos a médios bem selecionados, enquanto nos bancos com estrutura maciça ocorrem arenitos finos mal selecionados. A essa formação geológica está associada uma cobertura pedológica caracterizada por solos de textura média e arenosa, derivada do arenito sotoposto, originando, de modo geral, os seguintes tipos de solos: Latossolos Vermelhos, Argissolos Vermelhos e Neossolos Quartzarênicos“.

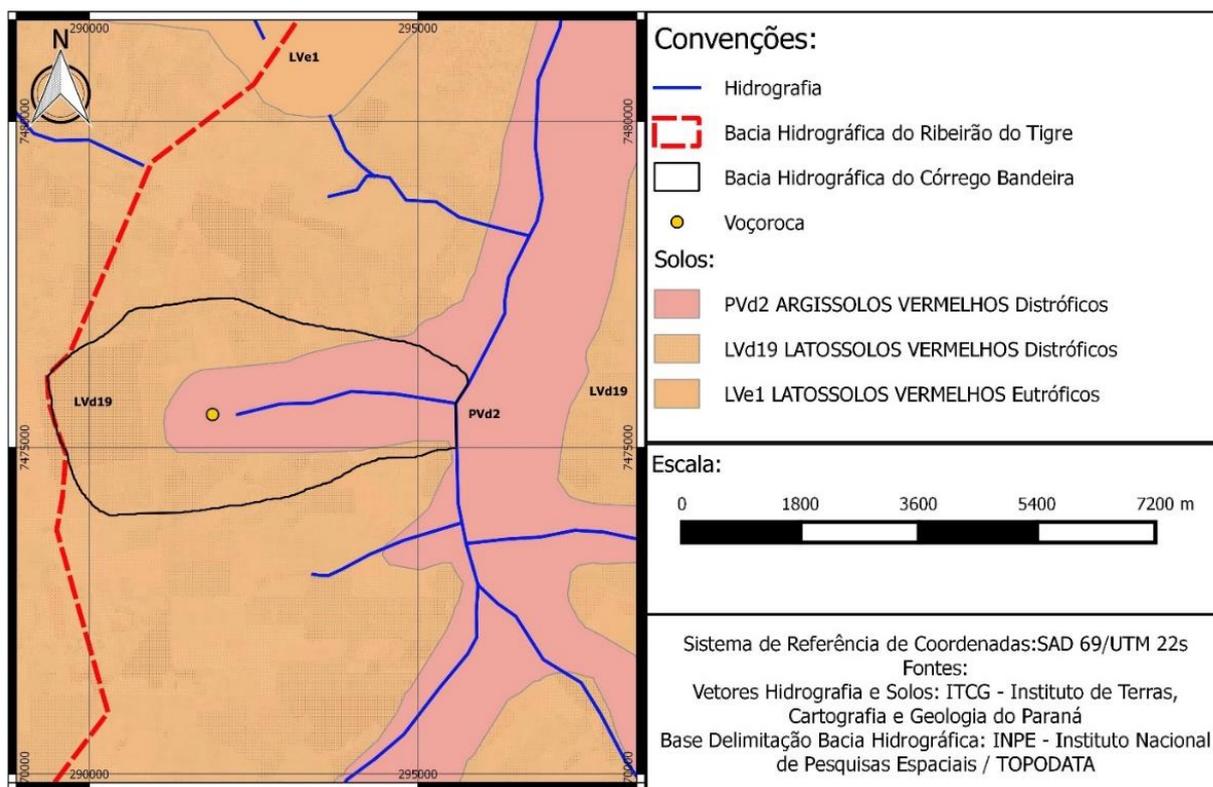
Os solos mapeados e disponíveis na base cartográfica do ITCG, na escala 1:250.000, apontam que na região de estudo a dinâmica pedológica é comum aos solos do Noroeste do Paraná. Composta de Latossolos no topo e Argissolos nas Vertentes (Figuras 7 e 8).

Figura 7: Solos das bacias hidrográficas do Ribeirão do Tigre e Córrego Bandeira



Organizado pelo autor.

Figura 8: Solos da bacia hidrográfica do Córrego Bandeira



Organizado pelo autor.

4. MÉTODOS, TÉCNICAS E MATERIAIS

A presente pesquisa pode ser dividida em três etapas que foram realizadas paralelamente, sendo respectivamente, o levantamento bibliográfico conceitual e teórico sobre o tema de erosão e sua ocorrência no Noroeste Paranaense; o uso de *softwares* e técnicas em SIG (Sistema de Informação Geográfica); e, por fim, aplicar uma metodologia de classificação morfológica com os produtos cartográficos e geográficos gerados.

A primeira etapa é caracterizada pelo levantamento de referenciais bibliográficos que dão base ao estudo, para compreender o termo erosão, sua gênese, seus estágios, fatores e agentes, tipos, processos e mecanismos atuantes. Dessa maneira pôde-se levantar as características físicas da área de estudo, tais como pedologia, uso e ocupação, clima e geomorfologia, como visto nos tópicos anteriores.

A segunda etapa é caracterizada pelo trabalho de gabinete, com uso de softwares e técnicas computacionais. Os materiais da base deste estudo foram imagens adquiridas no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, no catálogo

de imagens *online* da Divisão de Geração de Imagem – DGI, e o satélite usado foi o CBERS-4 (*China-Brazil Earth Resources Satellite/Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres*). Este satélite é dotado de Câmera Pancromática e Multiespectral - PAN, Câmera Multiespectral Regular - MUX, Imageador Multiespectral e Termal - IRS, e Câmera de Campo Largo – WFI. O sensor utilizado foi a Câmera Pancromática com resolução espacial de 5 metros. Foram adquiridas seis imagens datadas de 12/08/2015 à 09/08/2017.

A escolha do sensor foi devido a sua alta resolução, se comparado com outros satélites, que disponibilizam imagens gratuitas. De início, pensou-se em trabalhar com imagens multiespectrais como material e usar métodos de classificação automática ou semiautomática para poder quantificar a área da erosão objeto de estudo, porém, levando em consideração o tamanho da feição a ser mapeada, não foi compatível com imagens multiespectrais disponíveis gratuitamente, sendo assim, a imagem pancromática do satélite CBERS-4, com 5 metros de resolução espacial, foi a melhor opção encontrada.

Os *softwares* usados como material para a confecção deste estudo são: *Qgis* (*Quantun Gis*), na versão 2.8.1 e não foram usados complementos; Pacote *Office* 2013 (*Excel e Word*) e *Google Earth Pro*.

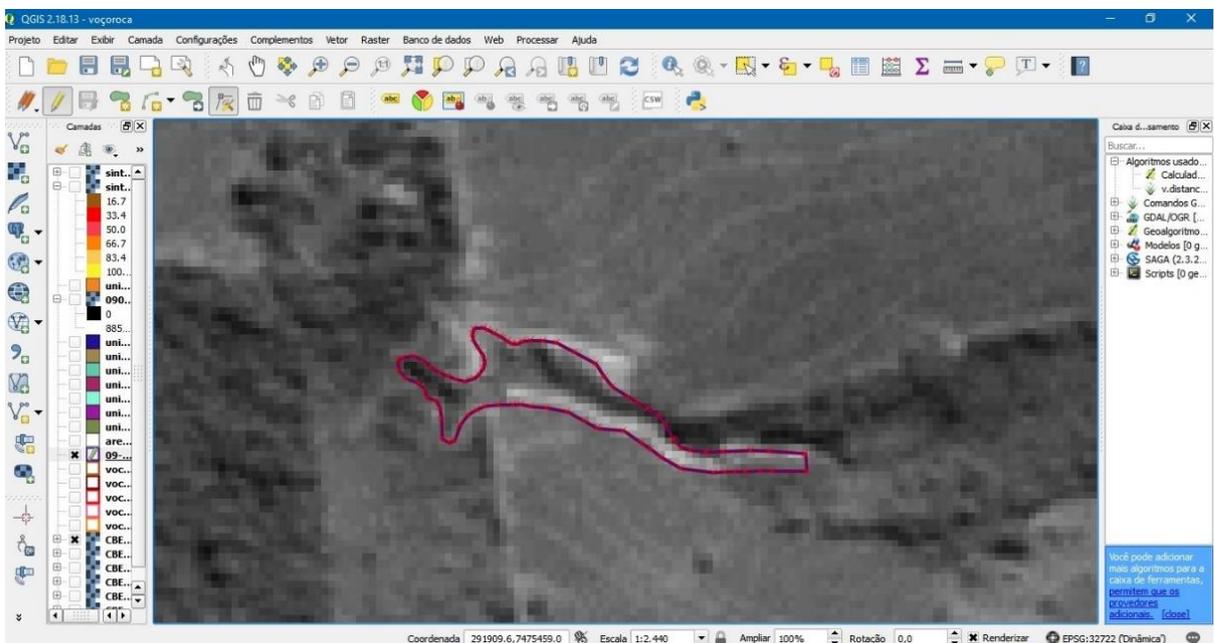
Inicialmente, dentro do ambiente do *software Qgis*, foram adicionadas as imagens e, em seguida, foi efetuado o recorte da faixa de imageamento próximo da área de estudo para assim facilitar o processamento da imagem posteriormente.

Para que todas as imagens estivessem alinhadas, e assim poder comparar umas com as outras, foi necessário o processo de georreferenciamento dessas imagens com a ferramenta “Georreferenciador” do *Qgis*. Todas as imagens foram georreferenciadas a partir de atributos como árvores, construções, bordas de mata e estradas, dentre outros, e todos os pontos foram padrão para todas as imagens. Posteriormente, o contraste foi aplicado para melhor definição do alvo a ser mapeado.

A quantificação da feição erosiva contida na área de estudo foi escolhida em função da resolução espectral da imagem utilizada. Imagens pancromáticas não são passíveis de qualquer tipo de processamento digital, seus dados de reflectância não são particionados dentro do espectro eletromagnético em bandas como as cores do visível e o infravermelho. Sendo assim, classificações supervisionadas, dentre outras técnicas, são impossíveis de serem executadas neste tipo de imagem.

Levando estas particularidades em consideração, utilizou-se a técnica de vetorização pela interpretação visual e pelas características da feição alvo, que é a erosão. Este método só foi possível graças a resolução espacial da imagem utilizada (5 metros). O método não conta com acurácia na sua precisão quanto a quantificação da área, porém, é utilizado para comparação e caracterização da erosão, bem como para elaborar uma síntese através da utilização de seus dados, tais como a taxa de frequência de ocorrência. Estes dados dão subsídio para entender a dinâmica de crescimento da erosão. (Figura 9).

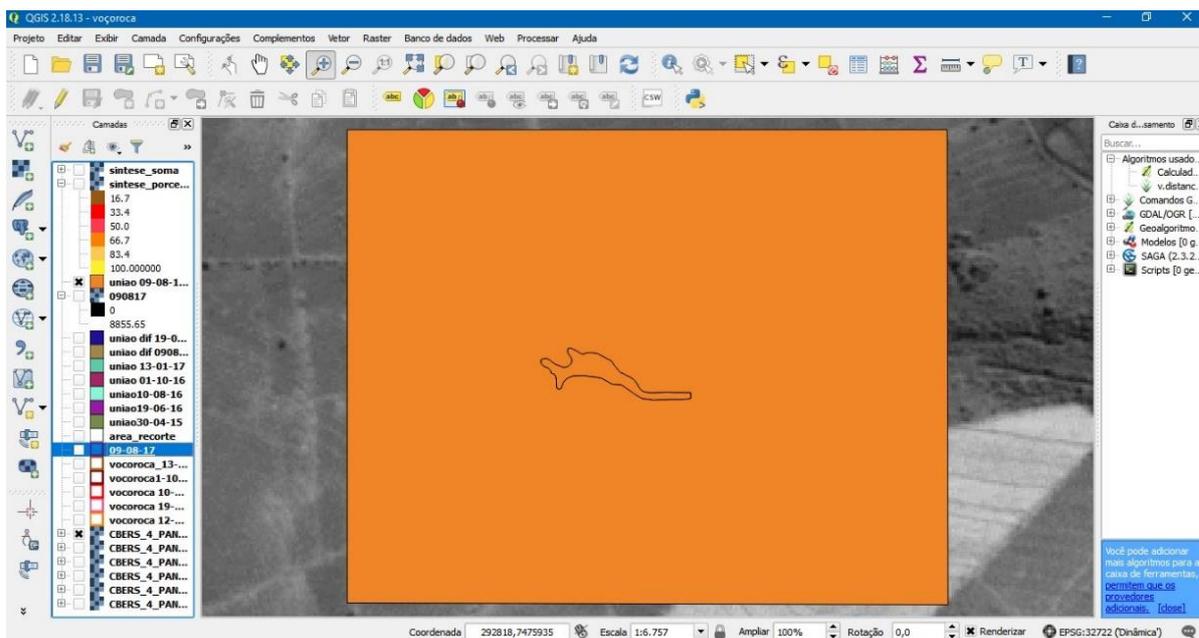
Figura 9: Processo de Vetorização manual



Fonte: Print Screen da interface do programa QGIS.

Outra técnica utilizada neste estudo foi a transformação de informação do tipo *vetor* para o tipo *raster*. Esta técnica consiste em utilizar um vetor com a informação de uma área de recorte padrão para todas as imagens do estudo e nela unir, através de técnica de geoprocessamento e utilização de ferramenta inclusa no *software*, a área padrão do vetor com a informação da área da erosão estudada. Este processo foi utilizado em todos os vetores com informações da área da erosão de todos os anos. Após unir os vetores foi preciso alterar a tabela de atributos, categorizando a área recorte como sendo de peso 0 e a área da erosão como de peso 1 (Figura 10).

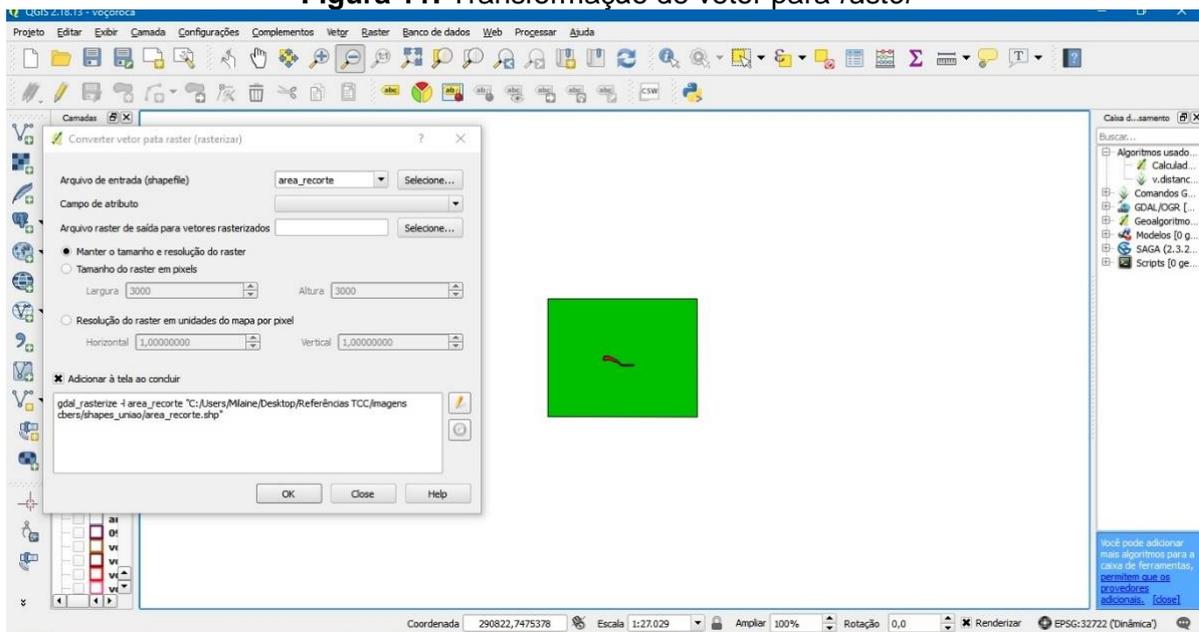
Figura 10: União de dois vetores



Fonte: Print Screen da interface do programa QGIS.

Com os arquivos vetores unidos e categorizados, iniciou-se o processo de *rasterização* que consiste na transformação de arquivo do tipo vetor para tipo *raster*. Assim, após o processo foi possível obter seis arquivos do tipo *raster*, onde cada um contém a área de recorte com peso 0 e a área da erosão com peso 1 (Figura 11).

Figura 11: Transformação de vetor para *raster*

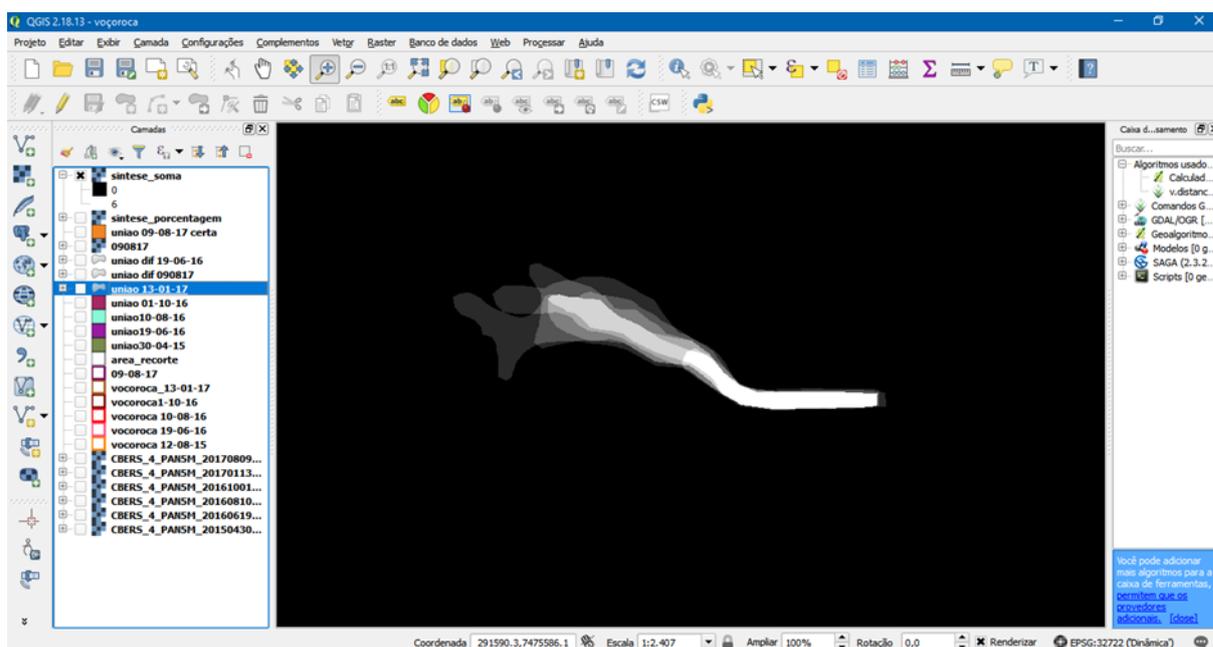


Fonte: Print Screen da interface do programa QGIS.

O processo de *rasterização* foi feito tendo em vista um processamento digital de imagens, e para isto utilizamos a calculadora *raster* do *software* Qgis para aplicar uma equação que fosse possível obter uma síntese sobre a frequência de ocorrência na erosão ao longo dos anos (Figura 12). A fórmula utilizada foi:

$$((\text{Imagem 1} + \text{Imagem 2} + \text{Imagem 3} + \text{Imagem 4} + \text{Imagem 5} + \text{Imagem 6}) / 6 * 100)$$

Figura 12: Resultado da calculadora *raster*



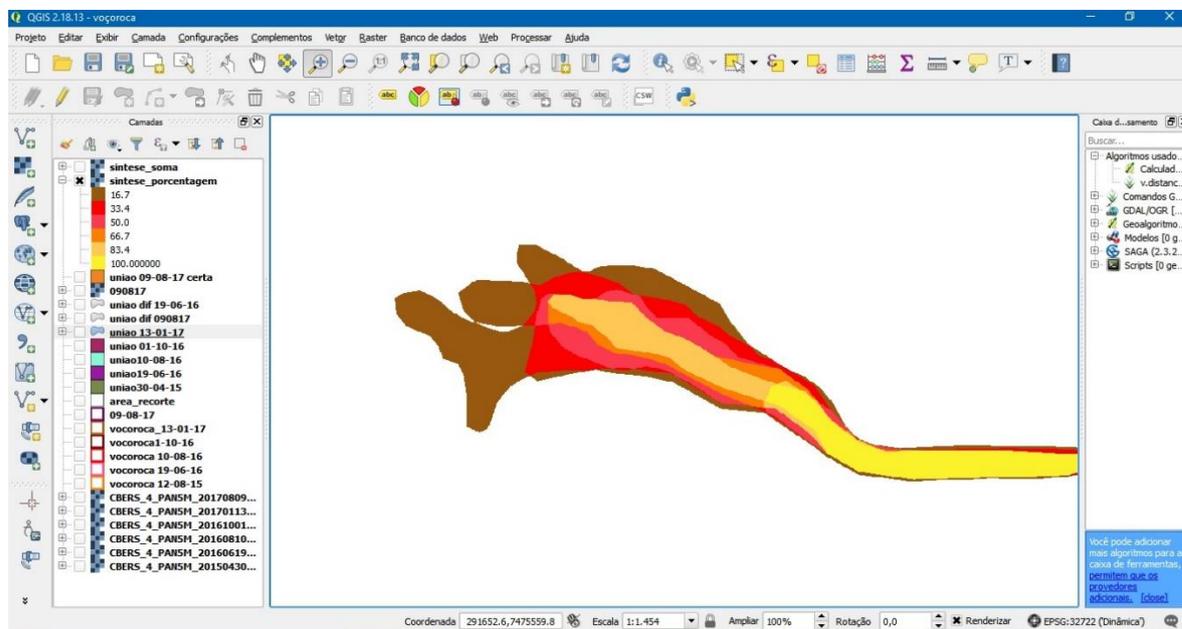
Fonte: Print Screen da interface do programa QGIS.

Com este processo foi possível criar um arquivo do tipo *raster* com a informação sobre a porcentagem da frequência da ocorrência da erosão. Esta imagem síntese é apresentada inicialmente em escala de cinza, e para facilitar a interpretação dos dados sintetizados, optou-se pela *renderização* Banda Simples Falsa Cor, com o método de interpolação Linear com intervalo igual de seis classes que foram geradas com cores aleatórias, e então foi escolhido uma paleta de cores quentes até o amarelo. A escolha destas cores foi feita em função da cartografia temática, pensando justamente numa adequação cromática para o momento da leitura.

Erosões do tipo voçoroca são de grande impacto para a natureza e tem sua gênese acelerada pela ação antrópica, logo, elas associam-se a algo que não é benéfico para a natureza e para a sociedade, e assim se justifica a escolha de cores quentes para a representação das classes, partindo das áreas maiores para as

menores (dos 16.7% aos 100%). A figura 13 demonstra um exemplo da classificação e sua paleta de cores finalizada.

Figura 13: Resultado da síntese cartográfica



Fonte: Print Screen da interface do programa QGIS.

Paralelo a estes processos, no software Excel foi elaborada uma planilha com as seguintes informações: Data; Area (m²); dif_tempo (dias); dif_area (m²) e taxa de crescimento (m²/dia), conforme demonstrado na Tabela 1.

Tabela 1: Tabulação baseada nos dados analíticos construídos

Data	Area (m ²)	Diferença tempo (dias)	Diferença area (m ²)	Taxa de crescimento (m ² /dia)
12/08/2015	1.919			
19/06/2016	5.509	312	3.590	11,50653846
10/08/2016	2.930	52	-2.578	-49,58432692
01/10/2016	4.027	52	1.096	21,08417308
13/01/2017	5.089	104	1.062	10,21258654
09/08/2017	8.865	208	3.776	18,15322115

Organizado pelo autor.

A Terceira etapa consiste, numa primeira parte, de revisões teóricas de trabalhos já realizados sobre técnicas de interpretação e métodos de análise e

classificação de formas de voçorocas e, em um segundo momento, da aplicação destes métodos e classificações na área de erosão em estudo.

Este trabalho conta com o objetivo de se realizar uma análise da evolução espaço-temporal e classificar de forma quantitativa e qualitativa sua dimensão e forma, sendo assim, procedeu-se uma pesquisa para verificar os trabalhos com temáticas parecidas em nível nacional e regional.

Durante a pesquisa encontraram-se trabalhos que abordam a evolução espaço-temporal de uma voçoroca através de fotointerpretação de imagens orbitais e aéreas, que foram referenciais para a análise quantitativa, com a mensuração através de fotointerpretação e que serão apresentados a seguir.

Oliveira (2007) ressaltou que em um período de 12 anos erosões conectadas à rede hídrica apresentaram maior taxa de erosão ($2.504,29 \text{ m}^3.\text{ano}$) quando comparadas à uma erosão não conectada à rede hídrica ($48,15\text{m}^3.\text{ano}$). Relata também que a incisão conectada à rede de drenagem expandiu-se para a montante linearmente ao longo de 83,15 metros. E por último, aponta que as alcovas de regressão se desenvolvem em cabeceiras ativas de voçorocas e que a extensão regressiva da incisão conectada estaria associada à interação sinérgica entre escoamento superficial e subterrâneo.

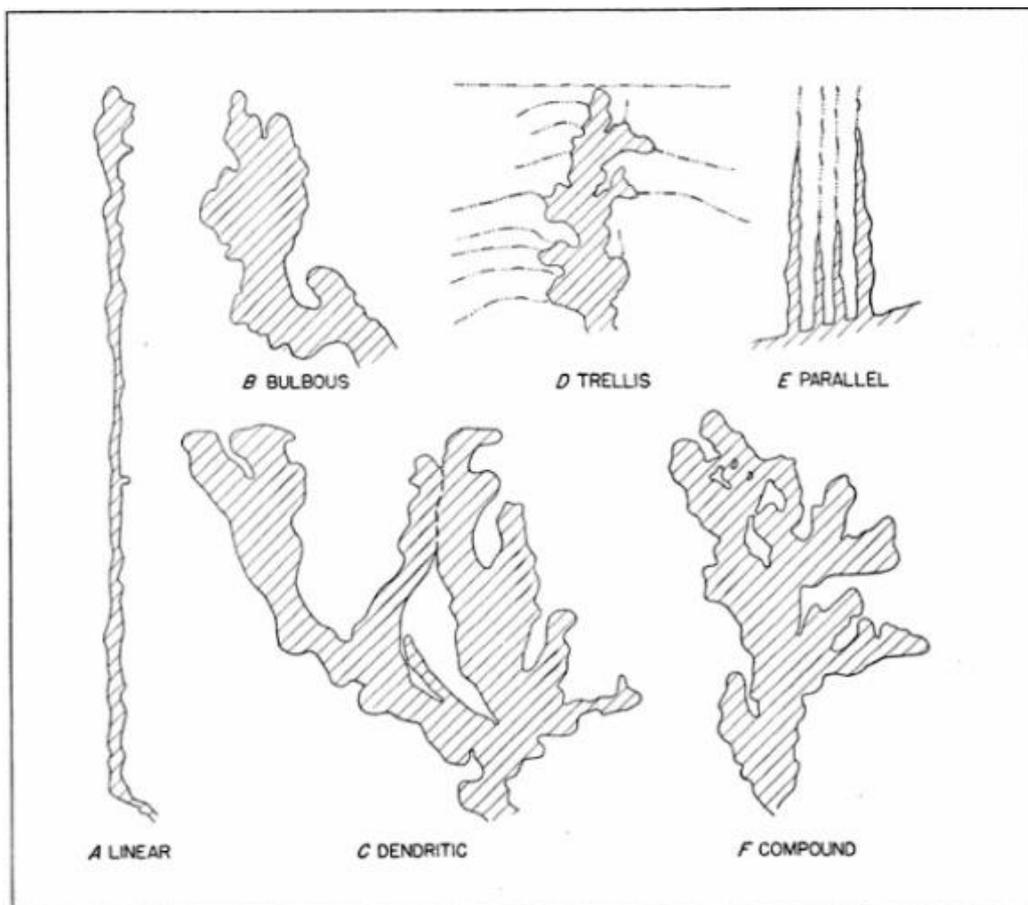
Marchioro et al. (2016) analisou a evolução espaço-temporal de voçorocas no Estado do Espírito Santo utilizando fotografias áreas de 1970, 2007 e 2012 e pode representar e mensurar as voçorocas analisadas por meio de técnicas de geoprocessamento. Como exemplo, uma das voçorocas analisadas em 1970 apresentava área de 332m^2 , e em 2007 a mesma erosão apresentava área de 6.642m^2 , enquanto que em 2012 sua área era de 6.727m^2 . Sua gênese foi associada às mudanças no uso e cobertura da terra, bem como à ocorrência de *pipes* em seu interior.

Fortes e Matiazio (2016) caracterizaram e analisaram espacialmente as ocorrências de voçorocas em parte da bacia hidrográfica do córrego Taquara no ano de 2014, e por meio de fotointerpretação e geoprocessamento puderam levantar atributos morfométricos destas voçorocas que ocupam uma área total de 22.385m^2 em uma vertente de 1,5km de comprimento. E os próprios autores ressaltam que usaram como base os trabalhos de Marchioro (2014) e Marchioro et al. (2016).

Os referenciais usados para as análises qualitativas tiveram como objetivos classificar a voçoroca segundo sua forma, tanto em relação à feição erosiva, quanto à geomorfologia local e, por fim, correlatar com a sua gênese e os mecanismos atuantes.

As formas das voçorocas variam quanto ao seu estágio e aos processos erosivos associados concomitantemente, e dependem de fatores naturais e de interferências antrópicas. Todos estes múltiplos fatores influenciam diretamente a forma da voçoroca. Para classificar a forma da voçoroca objeto deste estudo foi utilizado como base referencial a classificação morfológica das voçorocas de Ireland et al. (1939), obtida através de *e-book* em língua inglesa, onde os autores classificam as formas dos processos erosivos no estado na Carolina do Sul, nos Estados Unidos da América. A figura a seguir, retirada do artigo consultado, ilustra as classificações.

Figura 14: Formas das voçorocas



Fonte: Ireland *et al.* (1939).

Segundo Ireland et al. (1939), as formas das voçorocas são divididas entre seis classes, que são, respectivamente:

A – Lineares, longas e estreitas, com cabeceira estreita e poucos afluentes importantes ao longo de seus lados. É comum ao longo de linhas de propriedade e segue valas de idade de drenagem antigas ou existentes, podendo evoluir para um padrão bulboso.

B – Bulbosas, larga e espatulada na extremidade superior, podendo ser linear na parcela de fluxo descendente, geralmente em terras altas, muitas vezes seguindo o curso de uma antiga drenagem natural com cabeceira semicircular ou em forma de anfiteatro, com pequenas entradas em todos os lados. O padrão provavelmente se tornará dendrítico à medida que o barranco crescer.

C – Dendrítica, é a evolução do padrão bulboso e é formado de muitas aflorações do lençol freático ramificados; geralmente seguindo as linhas de drenagem naturais.

D – Trelixa, são ramificações erosivas tributárias conectadas ao canal principal em ângulos aproximando-se de 90°, geralmente desenvolvido em uma área plana ou inclinada.

E – Paralela, composto por dois ou mais processos erosivos paralelos que se esvaziam em um barranco principal, comum à drenagem de estradas antigas, onde o fluxo superficial corre paralelamente.

F - Composta, são combinações de duas ou mais das formas de erosões, e o canal principal pode ter ramificações erosivas tributárias que entram no padrão de trelixa e as próprias feições tributos podem ser dendríticos, paralelos ou bulbosos.

Esta classificação é usada por pesquisadores brasileiros para a identificação quanto à forma, tais como fizeram Augustin e Aranha (2006), que realizaram a classificação morfológica das voçorocas no município de Gouveia, no estado de Minas Gerais, Marchioro (2014) e Marchioro et al. (2016), com a evolução espaço temporal de voçorocas no estado do Espírito Santo, e Matiazo e Fortes (2016), que caracterizaram e analisaram espacialmente a ocorrência de voçorocas em parte da bacia hidrográfica do córrego Taquara, no município de Terra Rica, no Noroeste do estado do Paraná.

Além da classificação, a caracterização também é objetivo deste trabalho. A sua localização, posição na vertente, ligação com a rede hidrográfica, dentre outros

fatores, serão caracterizados nos resultados com base em referenciais obtidos através de estudo como o de Oliveira (2007), que analisou a evolução morfogenética de determinados setores de bacias hidrográficas, como por exemplo, a sensibilidade de redes de drenagem de primeira ordem à processos erosivos intensos, e com isto criou uma proposta com base no conceito de bacia de drenagem contemplada na Legislação de Proteção Ambiental. Ainda segundo Oliveira (2007, p.86), o mesmo observa que:

“As áreas de cabeceiras de vale, também conhecidas como áreas de contribuição em vales não canalizados, são os pontos da Rede Hidrográfica que demonstram maior sensibilidade às oscilações hidrodinâmicas ao longo do tempo. Devido a sua dinâmica pretérita e atual, e as características mecânicas herdadas desta dinâmica, cabeceiras de vale são áreas de risco potencial de erosão por voçorocas”.

Augustin e Aranha (2006) atribui que a erosão fluvial sub-superficial, promovida pelo retrocesso da nascente com ocorrência de olhos d'água avança o processo erosivo remontante a partir do entalhe da cabeceira (*headward erosion*) e que algumas voçorocas surgiriam pelo colapso do teto por túneis criados pela ocorrência da surgência de minas ou olhos d'água e de dutos subsuperficiais, formados por *piping*.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com base nos referenciais teóricos consultados, e das técnicas e métodos aplicados, os resultados obtidos através da análise espaço-temporal foram elaborados quanto à natureza de seus dados, ou seja, quantitativos quanto a sua área, perímetro, gráficos analíticos e etc., e qualitativos quanto a classificação de sua forma, interferências naturais e antrópicas. Entretanto, para uma análise conjunta é necessário utilizar-se das duas naturezas de dados para estabelecermos a gênese correlatada às interferências antrópicas e suas fragilidades naturais.

Os resultados quantitativos, frutos do mapeamento efetuado, são divididos em analíticos e de síntese. Os mapas analíticos são resultados da vetorização da erosão conforme abordado nós métodos, e sua construção foi elaborada pensando na quantificação das áreas e, posteriormente, a análise da sua evolução.

O primeiro mapa analítico não apresenta imagem, somente os polígonos dos vetores preenchidos com cores quentes que variam do roxo (maior área) ao amarelo (menor área) – a escolha das cores foi abordada na metodologia – e a escala utilizada foi a mesma para todas as visadas de mapa, pois assim auxilia na compreensão do tamanho e de sua evolução. A sua legenda traz a identificação pela cor, data e área dimensionada, e apresenta um gráfico com a evolução da área, além de demonstrar o crescimento em área, o objetivo deste mapa é evidenciar as formas da voçoroca durante sua evolução para posteriormente classificar segundo sua forma. A Figura 15 exemplifica a área e a forma da voçoroca ao longo dos anos.

Pôde-se constatar que do mês de agosto de 2015 para o mês de agosto de 2017 a voçoroca evoluiu, respectivamente, de 1.919m² para 8.865m². Sua área praticamente quadruplicou de tamanho em 3 anos de análise e sua forma também variou bastante com o decorrer da sua evolução.

O mapa analítico apresenta a mesma informação e arranjo de *layout* do mapa apresentado anteriormente, mas o diferencial deste mapa está nas imagens contidas nele, pois os polígonos vetores ainda estão no mapa e o layout visualmente apresenta-se sem preenchimento interno, havendo apenas o contorno da erosão sobreposto à imagem.

O mapa demonstrado na Figura 16 apresenta uma interação de duas classes de informações Geográficas, ou seja, vetor e imagem, e mesmo com o fato da imagem estar em escala de cinza (pancromática) é possível entender o relevo, o uso do solo ao redor coberto com mata e/ou construção, e a dinâmica do escoamento superficial como depósito de “areia” – solo alóctone – ao redor da erosão. A escala deste mapa teve que ser alterada em função da resolução da imagem. Embora tenha 5 metros de resolução espacial, seu arranjo no layout com a mesma escala do mapa anterior ocasionou a quebra de visualização, expondo os pixels da imagem e causando uma poluição visual, atrapalhando a leitura e entendimento do mapa. Quanto ao contraste que foi aplicado foi tomada a precaução de não poluir as informações, clareando muito ou saturando demais, tendo em vista o solo de origem arenítica da região e também o fato de ser claro e na escala de cinza representar o tom mais próximo ao branco. Assim, percebemos que muito brilho e contraste modifica o entendimento do mapa, misturando o solo exposto ao redor da erosão com ela própria e também o solo coberto com pouca cobertura vegetal.

Figura 15: Evolução da área nos anos de 2015 a 2017 (Vetor)

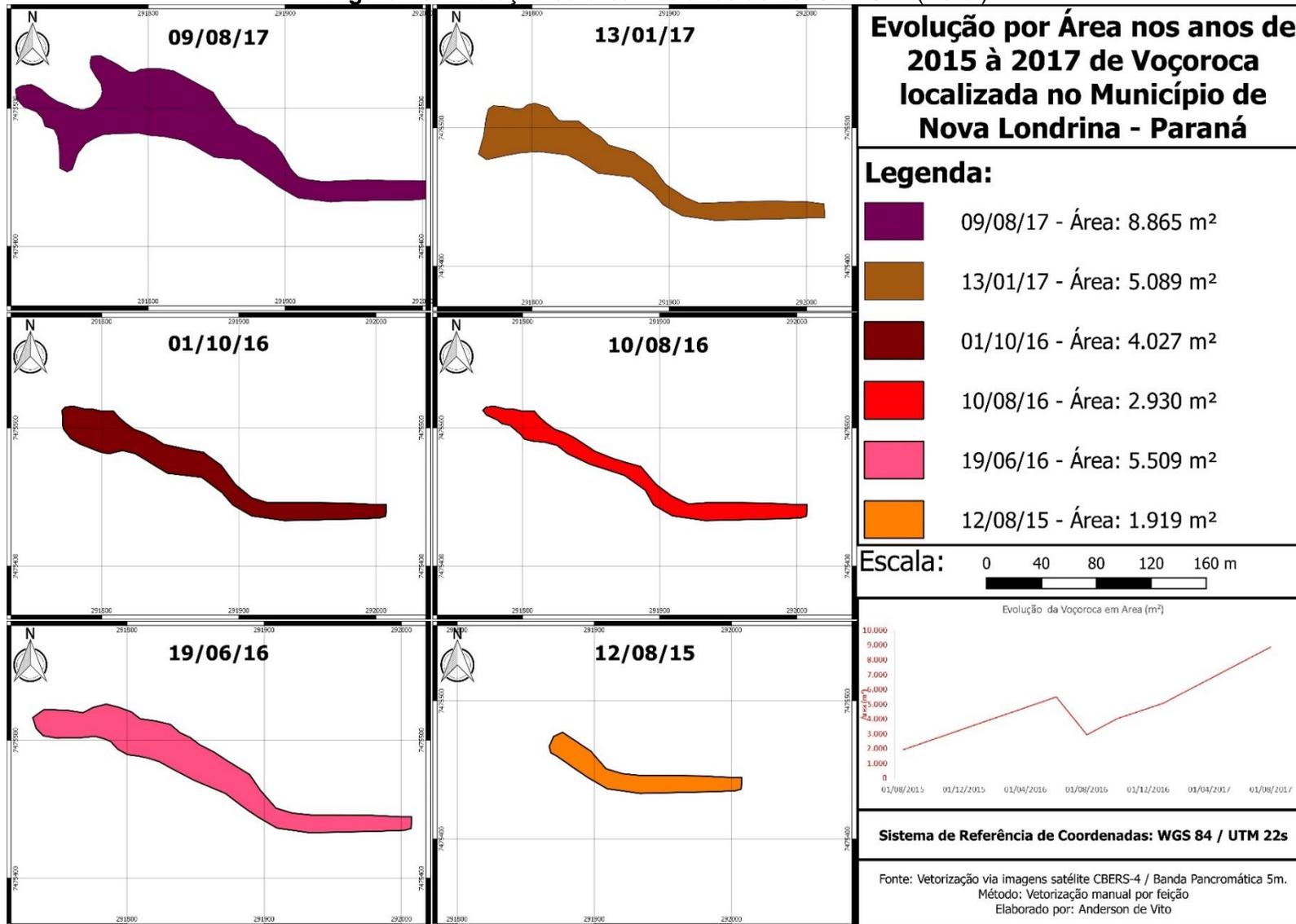
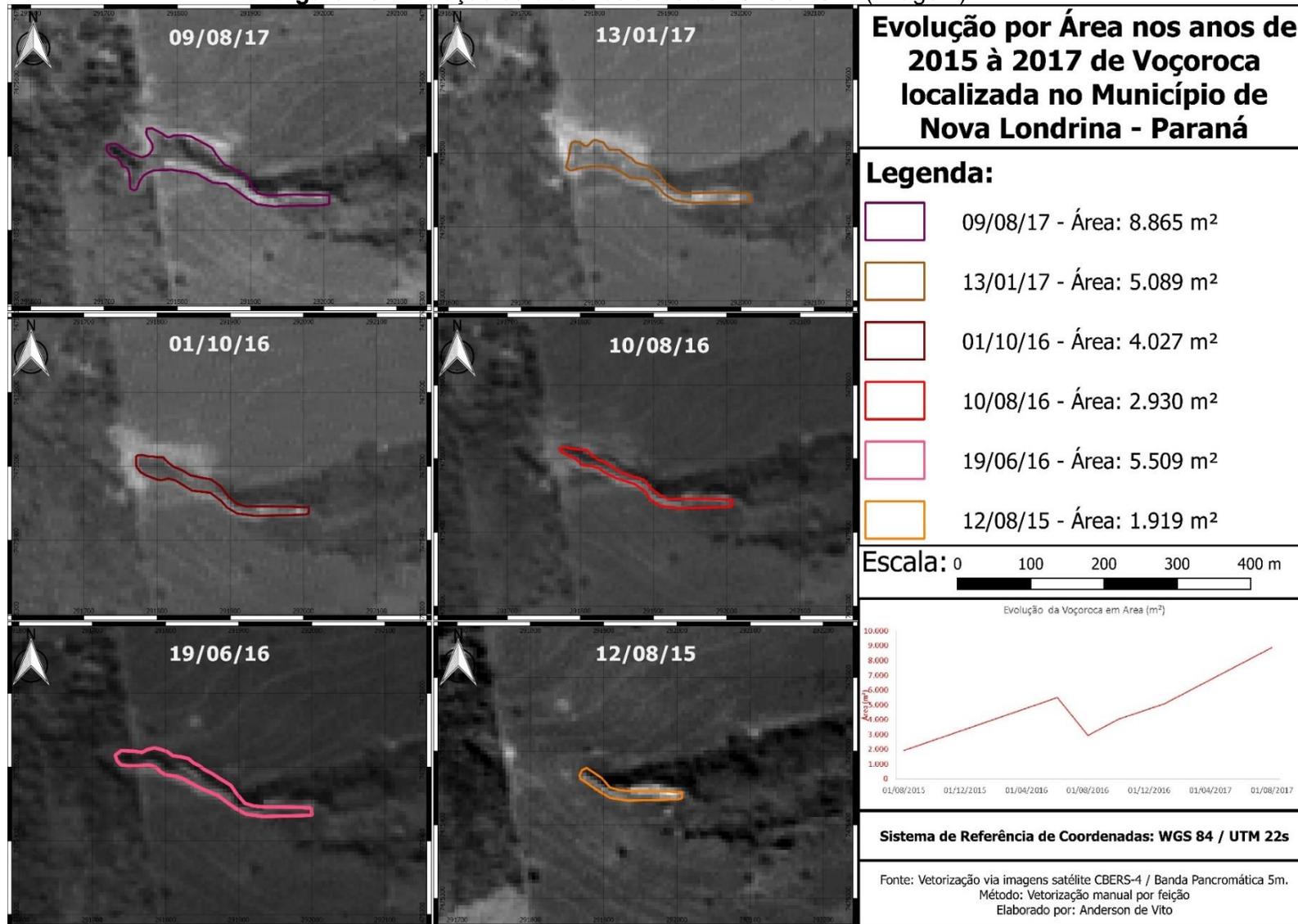


Figura 16: Evolução da área nos anos de 2015 a 2017 (Imagem)

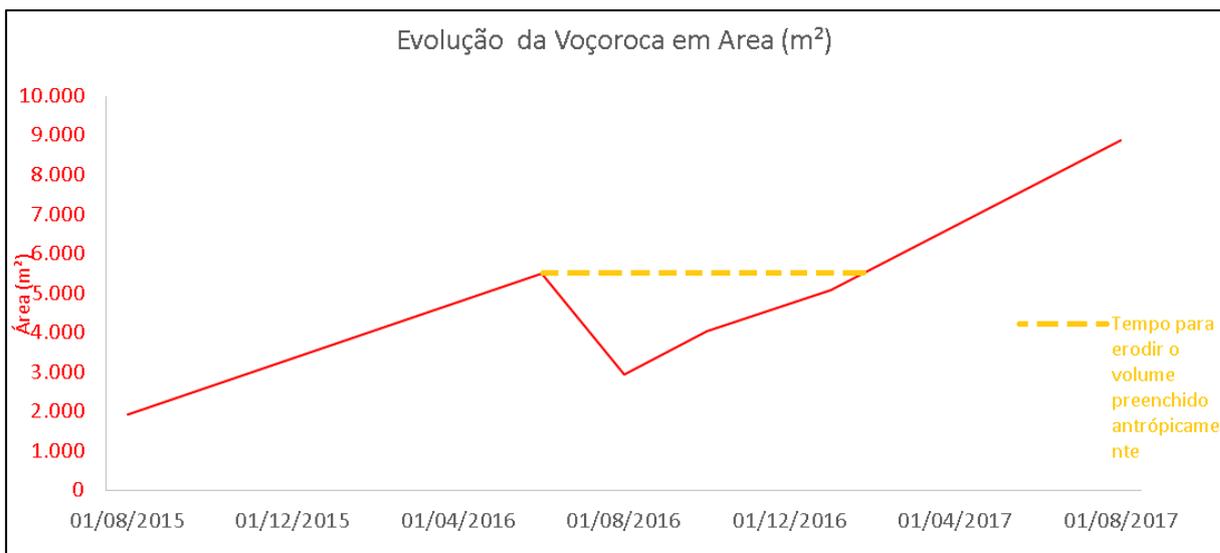


Os mapas analíticos apresentados em duas versões foram de grande subsídio para entendimento e formulação do mapa síntese. Avaliando o mapa pôde-se perceber uma certa tendência de crescimento em direção a montante, e que entre os meses de junho e agosto do ano de 2016 houve uma intervenção antrópica na voçoroca, ocasionando o preenchimento da erosão, entretanto, pôde-se constatar que a mesma praticamente dobrou de tamanho até outubro de 2016.

Analisando mais adiante na escala temporal, verificou-se que a voçoroca cresceu exponencialmente, mais que dobrando de tamanho em um período de menos de um ano, que abrange de outubro de 2016 até agosto de 2017. Foi observando essas variações na área da erosão ao longo dos anos que, então, foi elaborada uma planilha e, através dela, foi possível elaborar dois gráficos que foram essenciais para entender a dinâmica de crescimento da erosão.

O primeiro gráfico (Gráfico 1), que também está contido nos dois mapas apresentados anteriormente (Figura 15 e 16), expõe o crescimento da área da erosão ao longo dos anos, e através dele podemos observar o ângulo de crescimento da linha do gráfico. Também é possível observar a ação antrópica promovida e que, mesmo preenchendo a área, as forças erosivas continuaram a atuar com a mesma força agressiva, continuando a tendência de crescimento natural da erosão.

Gráfico 1: Evolução da voçoroca em área

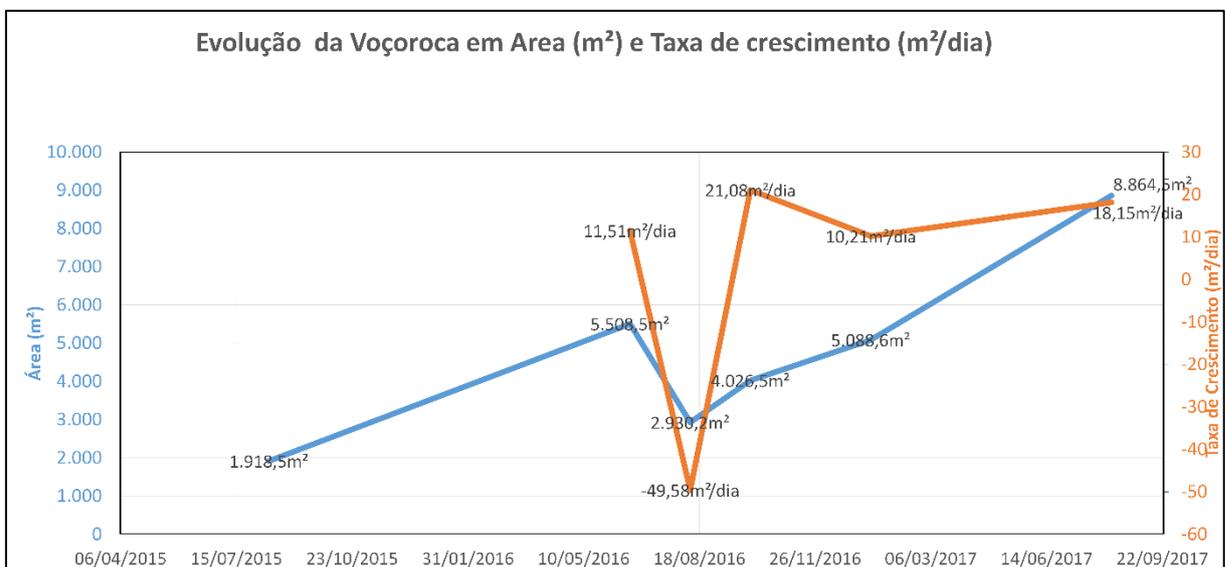


Organizado pelo autor

Com a área e as imagens datadas foi possível elaborar outro gráfico (Gráfico 2), que retrata o crescimento da voçoroca na razão da Diferença de área (m^2) dividida pela Diferença de tempo (dias). Assim foi possível estabelecer uma taxa de crescimento por dia que favoreceu observar que a taxa de crescimento após a intervenção antrópica cresceu em maior proporção, se comparada com o período antes da intervenção.

Analisando o gráfico, portanto, é possível observar que a taxa de crescimento diário antes da intervenção antrópica era de $11,51 m^2/dia$ e que após a intervenção a taxa praticamente dobrou para $21,08 m^2/dia$ em um intervalo de dois meses. Também é possível observar que após a voçoroca erodir todo o material depositado, a taxa de crescimento baixou para $10,21 m^2/dia$, ou seja, podemos afirmar que houve queda na taxa de crescimento após a voçoroca erodir todo o volume depositado antropicamente, a ponto de ela retomar índices de avanço parecidos com o anterior à intervenção realizada no local.

Gráfico 2: Evolução da voçoroca em área e taxa de crescimento



Organizado pelo autor

Com o aporte de todos os mapas, gráficos e análises realizadas, foi ainda possível realizar uma álgebra de processamento digital de imagens, conforme foi descrito na metodologia, e de onde foi obtida uma síntese de porcentagem de frequência de ocorrência da erosão.

Esta síntese foi dividida em seis classes, em função do número de imagens analisadas, em que foi possível constatar a frequência da ocorrência e, a partir dela, estabelecer uma análise, avaliar a tendência de crescimento da erosão e determinar se ela está evoluindo em largura ou em comprimento. Tal análise pode ser realizada através da figura 17.

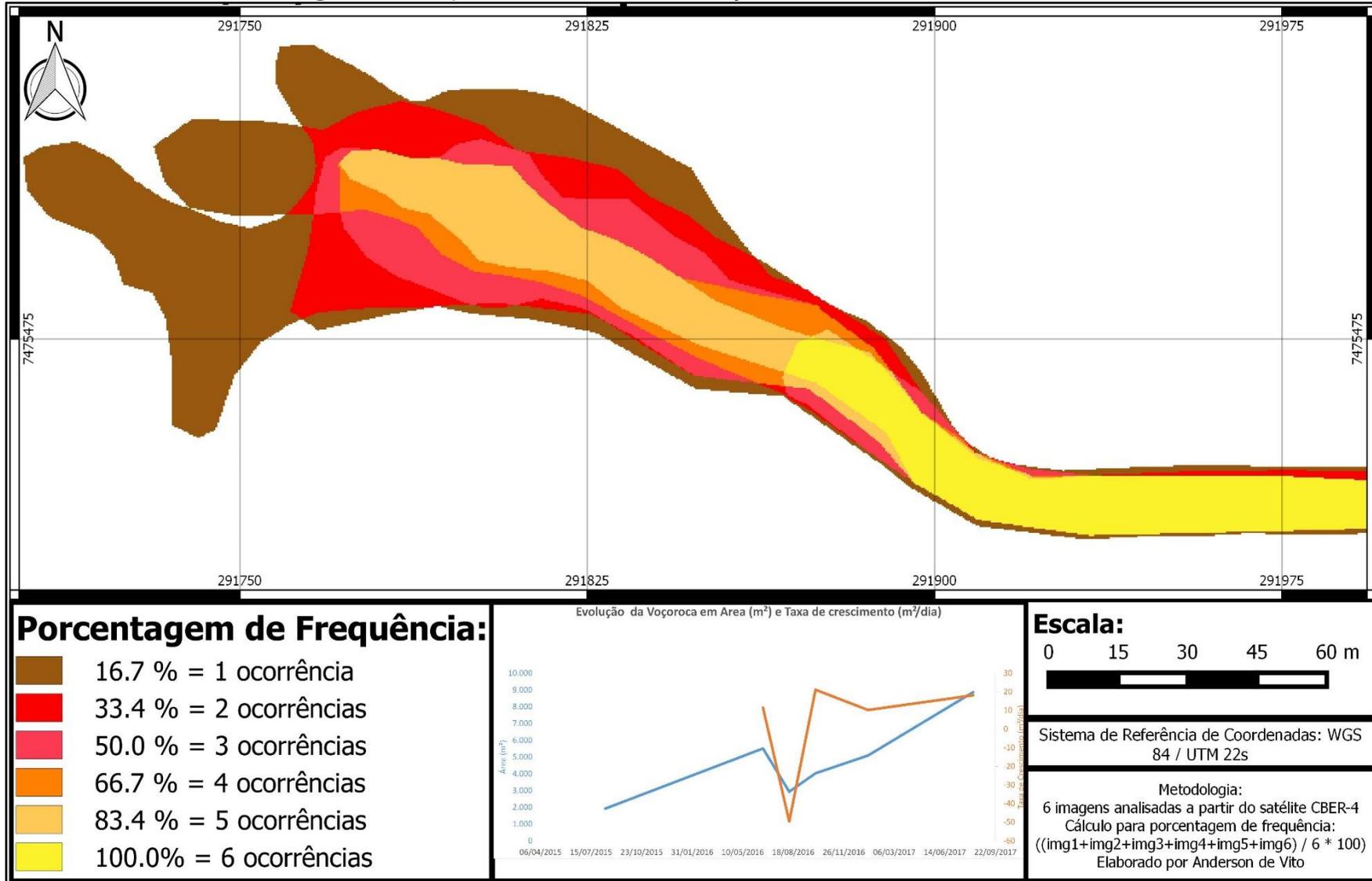
A graduação de cores foi pensada em relação ao seu tamanho e evolução e, neste caso, as menores porcentagens são os locais onde a voçoroca esteve por pouco tempo, são as mais recentes e as maiores em área. Já as porcentagens maiores são os locais onde a voçoroca esteve por um tempo maior e representam menor área por se tratar de uma regressão, ou seja, 100% indica a primeira imagem e 16,7% indica a última imagem analisada.

Ainda sobre as taxas de frequência da voçoroca, pôde-se analisar sua evolução e seus estágios. Constata-se que a erosão sempre avança na direção do interflúvio com regressão de cabeceira e em progressão para montante, escavando seu talvegue no contato com o lençol freático e evoluindo mais em comprimento do que em largura, entretanto, os últimos avanços foram maiores em largura do que em comprimento. Esta constatação evidencia os estágios da voçoroca passando de inicial, de escavação de talvegue e estabelecimento de um leito perene, para um estágio intermediário, de fixação do leito a alargamento das laterais.

Com todos os subsídios que são resultados quantitativos das técnicas aplicadas foi elaborada uma análise qualitativa da voçoroca. A sua forma foi a primeira constatação através dos mapas gerados, conforme descrito nas metodologias apresentadas, e observando-se a variação de suas formas ao longo dos anos foi possível classificar as suas formas durante o tempo.

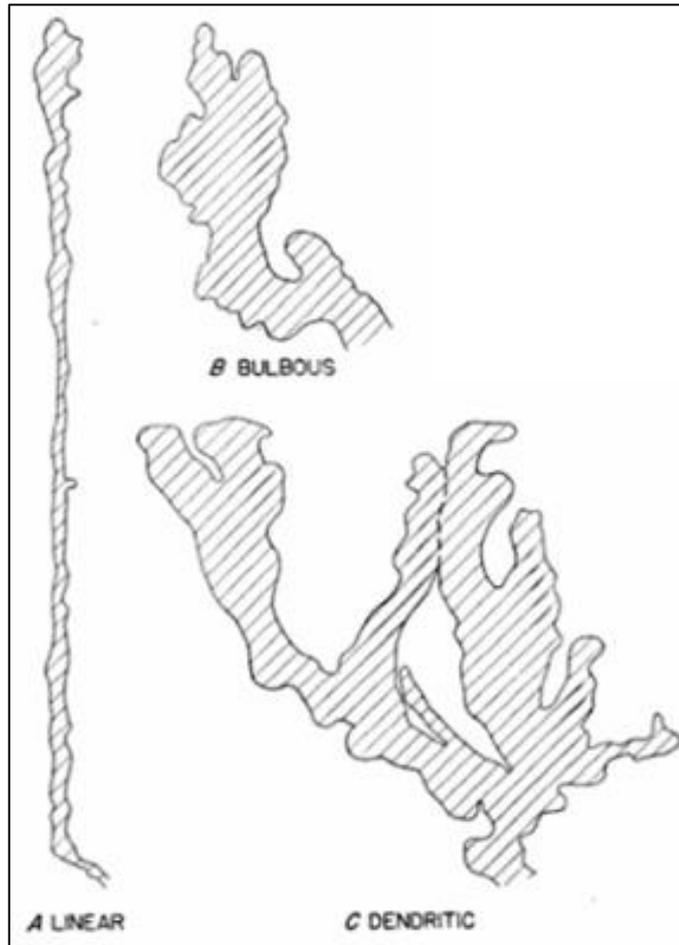
As formas encontradas durante a análise espaço-temporal efetuada nesta pesquisa foram aquelas apresentadas por Ireland (1939) e estão representadas na figura 18.

Figura 17: Frequência de ocorrência da voçoroca de 12/08/2015 a 09/08/2017



Organizado pelo autor

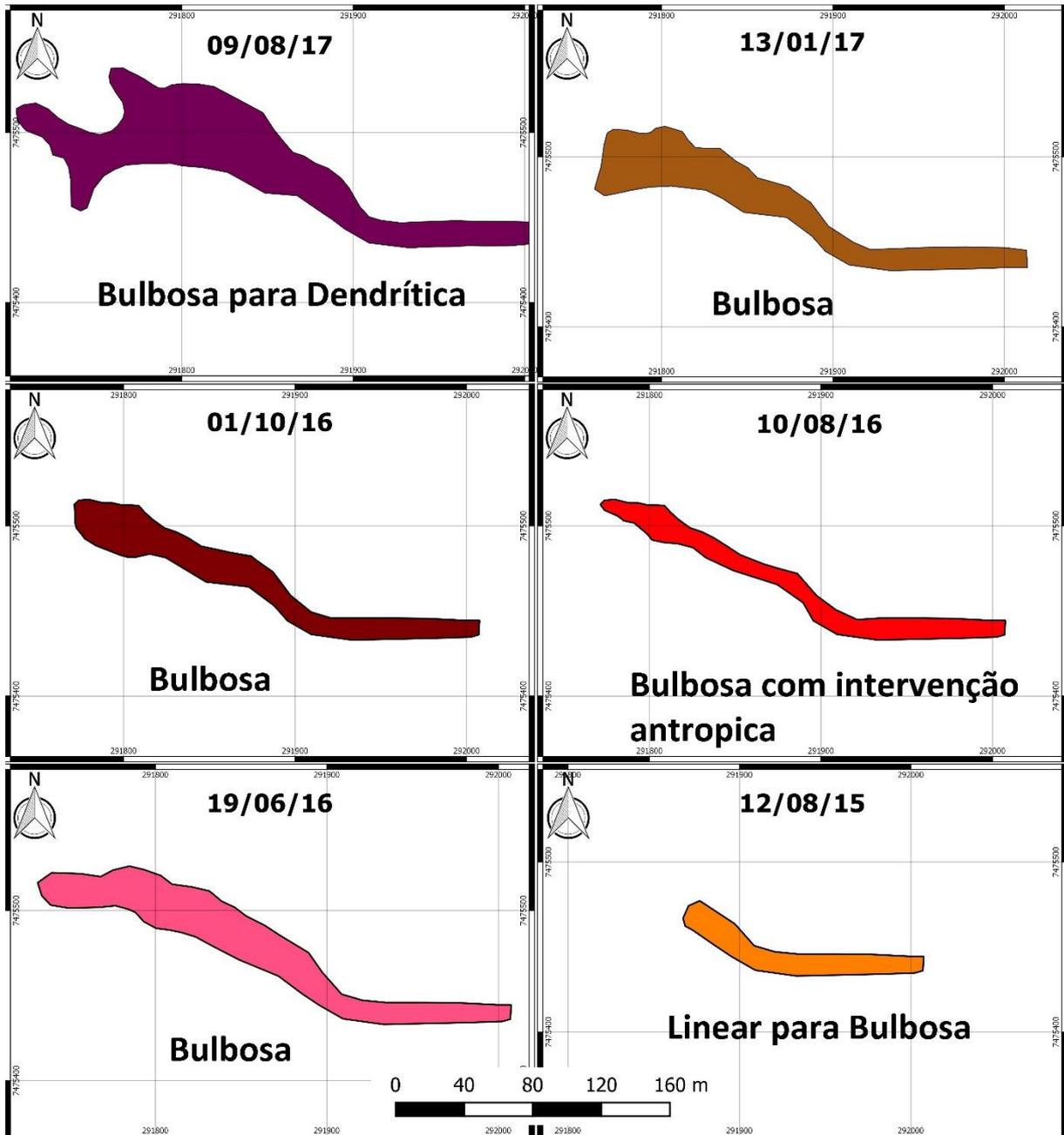
Figura 18: Formas constatadas na voçoroca em estudo



Adaptado de Ireland (1939).

Portanto, as classes de formas constatadas na área de estudo são, respectivamente, Linear, por serem mais estreitas e também com cabeceira estreita; Bulbosa, que apresenta maior largura e cabeceira semicircular ou em forma de anfiteatro; e por último a forma Dendrítica, que é a evolução do padrão bulboso, formado de muitas ramificações de afloramento do lençol freático. As formas da voçoroca, constatadas através do mapeamento e classificadas segundo adaptação da metodologia de Ireland (1939), são apresentadas através da Figura 19.

Figura 19: Classificação das formas mapeadas



Organizado pelo autor.

A adaptação da classificação de Ireland (1939) foi necessária visto que as formas constatadas no mapeamento não foram iguais às formas apresentadas por este autor em sua classificação. O fato de não haver total correspondência visual com as classes prévias se dá por diversos motivos, como a diferença climática, geológica, pedológica e intempérica do local das classificações e o local estudado, bem como pelo fato de que o mapeamento identificou a transição de duas classes em mais de

uma imagem. As classes adotadas para este estudo são descritas doravante, com suas respectivas características:

- **Linear para bulbosa:** mapeada em sua fase de transição, a feição analisada apresenta características das duas classes mencionadas, ou seja, é linear em sua maior parte e no sentido de ser profunda e estreita (estágio de escavação do talvegue no canal recém-criado). Além disso, apresenta o início do padrão bulboso em sua cabeceira.
- **Bulbosa:** apresenta a mesma descrição da classificação original de Ireland (1939). O seu avanço tornou o canal mais largo que a feição anterior e apresenta cabeceira semicircular em forma de anfiteatro, com erosão remontante atuando em sua cabeceira e, juntamente, forças erosivas que favorecem o avanço erosivo nas laterais, provocando o alargamento da feição.
- **Bulbosa com intervenção antrópica:** esta classe foi criada para evidenciar que mesmo com a intervenção antrópica o padrão da voçoroca continuou a evoluir como bulbosa.
- **Bulbosa para dendrítica:** é a fase de transição, com características do padrão bulboso e do padrão dendrítico. É diferenciada das outras classes pelas três evidentes ramificações, frutos de olhos d'água resultantes do afloramento do lençol freático, além da erosão regressiva para montante. Essas surgências de águas subterrâneas fazem com que a voçoroca se ramifique em outros canais tão profundos e largos quanto o seu canal principal.

A análise qualitativa engloba, além da sua classificação, todas as informações adquiridas com o mapeamento e estudo da área. Deste modo, é possível estabelecer uma análise sobre a gênese da voçoroca, suas fragilidades naturais e o impacto das ações antrópicas na área.

Para abordar a gênese da voçoroca estudada é necessário considerar-se as suas fragilidades naturais e sua condição pontual como, por exemplo, a posição na vertente, a ligação com a rede hidrográfica e os processos erosivos que levaram ao colapso de teto, ou seja, a estrutura pedológica e o contato permanente com o lençol freático.

A sua posição na vertente está ligada ao sistema hidrográfico e a cabeceira do vale do córrego Bandeira, conforme mapa de localização apresentado na caracterização da área. A cabeceira de vale também pode ser considerada como área de manancial e necessita de controle em seu uso e ocupação devido a sua fragilidade natural, pois são pontos sensíveis da bacia hidrográfica que devem ter seu uso e manejo muito bem planejado. Devido à união de fatores naturais, estas áreas quando são submetidas a mudanças ambientais induzidas por influência antrópica, como desconfiguração da declividade natural, aumento de fluxo superficial de águas e remoção da cobertura vegetal, ocasionam processos erosivos agressivos, frutos desta sinergia de fatores de influência.

Sendo uma área susceptível pela influência da ocupação antrópica ao seu redor, fatores antrópicos como estrada interna e APP ineficiente devido à pouca densidade modificam a dinâmica do escoamento superficial e são ineficientes em barrar a energia adquirida pelo escoamento, gerando um grande fluxo sobre a cabeceira e a nascente. A Figura 20 exemplifica as influências antrópicas na área de estudo.

Figura 20: Localização das interferências antrópicas, retirada do software Google Earth Pro



Fonte: Google Earth Pró

Todos os fatores citados acima agiram em conjunto para o surgimento da voçoroca em estudo, que já nasce conectada à rede de drenagem. Conforme Oliveira (1999, p.86) “as incisões erosivas são formadas nas cabeceiras de vale, porquê nessas áreas ocorrem convergência entre fluxos superficiais e fluxos subterrâneos”. Sendo uma área caracterizada pela convergência entre os fluxos superficiais e subterrâneos, sua gênese está intimamente ligada ao fluxo subterrâneo e à ocorrência de dutos escavados pelo fluxo superficial, gerados por uma diferença textural abrupta na quantidade de argila em seu perfil de solo.

Estes dutos são conhecidos na literatura internacional como *pipes*, e estão relacionados com o processo de erosão interna regressiva da voçoroca. Quando a força de percolação atinge valores altos e encontram uma barreira textural dentro do mesmo horizonte de solo ocorre um efeito parecido com o da liquefação que, aliado ao gradiente hidráulico e influenciado pela amplitude altimétrica da vertente, faz com que ocorra processos erosivos em subsuperfície.

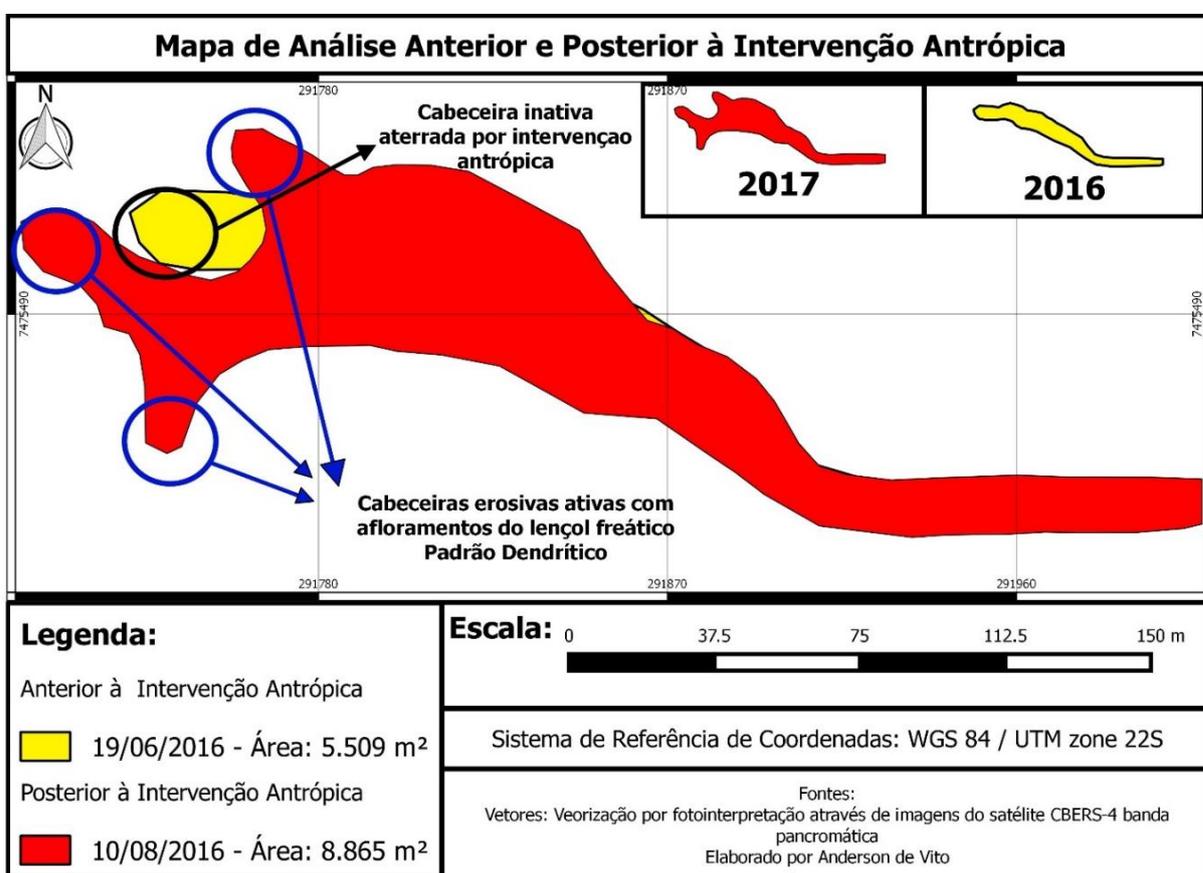
Segundo o mapeamento pedológico do ICTG, os solos encontrados na área da voçoroca são classificados como Argissolos, sendo este solo característico por apresentar um horizonte “E” eluvial com pouca argila, seguido de um horizonte “B textural”, característico pela presença de argila relativamente alta se comparado com seu horizonte anterior. Desta forma, levantamos a hipótese de que a gênese do colapso da estrutura pedológica – teto – tenha ocorrido em virtude da ação combinada entre processos erosivos subterrâneos, aliados ao alto escoamento e à erosão superficial, gerando um grande poder erosivo.

Durante a análise quantitativa foi constatada uma intervenção antrópica que contribuiu para o decréscimo da área da voçoroca, que em 19 de junho de 2016 apresentava área de 5.509m² e em 10 de agosto do mesmo ano apresentou área de 2.930m², ou seja, houve preenchimento de uma área de 2.579m².

O impacto desta ação antrópica é constatado na análise da evolução da voçoroca, e após a intervenção houve um aumento drástico na taxa erosiva diária, até que todo esse volume preenchido antropicamente fosse erodido, ou seja, este preenchimento causou uma instabilidade e uma perturbação no sistema erosivo natural da voçoroca, culminando para o drástico aumento do poder erosivo, por ter ligação permanente com a rede hídrica e apresentar um retrocesso da nascente na forma de voçoroca em direção à montante. O aterramento ocasionou na obstrução

dos olhos d'água, que são surgências perenes do lençol freático junto ao talude exposto da voçoroca. Esta obstrução gerou um alargamento da voçoroca e o surgimento de novos olhos d'água em locais que não foram obstruídos, ou seja, esta ação provocou o aparecimento de mais afloramentos do lençol freático, forçando uma mudança na sua forma e padrão, passando de Bulbosa para Dendrítica, justamente pelo surgimento de novos pontos do lençol freático na superfície. Estas “ramificações” no padrão dendrítico permitirão a formação de novas frentes erosivas e a fixação de novos canais independentes ligados a voçoroca inicial. A figura 21 evidencia a análise da intervenção antrópica.

Figura 21: Análise anterior e posterior à intervenção antrópica



6. CONCLUSÕES

Com todos os resultados e análises estabelecidas é possível concluir que a gênese da voçoroca foi causada por fatores naturais, mas também extremamente potencializada pelas ações antrópicas sofridas ao longo do tempo. Esta combinação

gerou uma feição erosiva de grande poder destrutivo que, se projetado seu ritmo de crescimento anual, que é de uma área com aproximadamente 3.000m², no final do ano de 2018 atingirá área de 0,5 alqueire paulista ou 12,100m².

Ainda sobre a influência antrópica, concluímos que uma intervenção como a que foi realizada na área de estudo, que foi a de aterrar a erosão, não surte efeito sem o devido estudo e planejamento da área, e como reflexo, é ainda extremamente danosa para a erosão, acentuando muito mais o desequilíbrio da área. Obstruir com sedimentos ou restos de construções as cabeceiras de voçorocas que apresentam nascentes ou surgência do lençol freático, além de não surtir o efeito desejado, potencializa o poder erosivo devido à instabilidade gerada no balanço erosivo da voçoroca, fazendo com que novas surgências de águas apareceram em outros locais e, a partir destes pontos, novas ramificações erosivas são adicionadas à voçoroca principal, ou seja, a intervenção antrópica acarretou em novas feições erosivas que surgiram em decorrência do aterramento sofrido.

Devido ao seu poder erosivo, é necessário um intenso monitoramento, além da elaboração de um PRAD – Plano de Recuperação de Áreas Degradadas – com todas as ações restauradoras e de mitigação para conter o avanço significativo da voçoroca e o acréscimo de passivos ambientais.

7. REFERÊNCIAS

Araújo, G., Almeida, J., & Guerra, A. **Gestão ambiental de áreas degradadas**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil. 2014.

Augustin, C., & Aranha, P. Piping em área de voçorocamento, Noroeste de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. 2006, ano 7, n.1.

Bertoni, J., & Lombardi, F. **Conservação do solo**. Piracicaba: Livroceres. 1985, p.

Casseti, V. **Geomorfologia**. 2005. Disponível em: <funape.org.br/geomorfologia/>

Corrêa, L. **Processos Erosivos Avançados em São Francisco de Assis - RS: Estudo de Caso**. Dissertação de mestrado, Pós-Graduação em Geografia, UFSM, RS. 2006.

Cunha, J., Castro, S., & Salomão, F. Comportamento erosivo de um sistema pedológico de umuarama, noroeste do Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 1999, 943-951.

Dardis, G., & Beckedahl, H. Soil Erosion forms in southern Africa. **Geomorphological Studies in Southern Africa**, 1988, p. 187-213.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solos**. Rio de Janeiro: EMBRAPA SOLOS. 2011.

Fidalski, J. Diagnóstico de manejo e conservação do solo e da água na região Noroeste do Paraná. **Revista Unimar**, 1997, p. 845-851.

Gasparetto, N. **As formações superficiais do Noroeste do Paraná e sua relação com o arenito Caiuá**. Tese de Doutorado. São Paulo: Instituto de Geociências. 1999.

Guerra, A. O início do processo erosivo. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. (Ed). **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999.

Guerra, A., & Guerra, A. **Novo Dicionário Geológico-Geomorfológico**. São Paulo: Bertrand Brasil, 1997.

Hernani, L., Freitas, P., Pruski, F., De Maria, I., Castro, C., & Landers, J. A erosão e o seu impacto. In: MANZATTO, C. V.; FREITAS JUNIOR, E. de; PERES, J. R. R(Ed). **Uso agrícola dos solos brasileiros**. Embrapa Solos, 2002, p. 47-60.

Instituto de pesquisas tecnológicas. **Sismotectônica e dinâmica superficial na área do Complexo Hidrelétrico Canoas**. São Paulo: IPT. 1992.

Lepsch, I. F. Formação e conservação do solo. São Paulo: Oficina de textos. 2010,

Machado, M. **Estudo Geoambiental de uma Voçoroca em Campo Mourão - PR.** Trabalho de Conclusão de Curso, - UTFPR 2015, 62 p.

Magalhães, A. Manejo da fertilidade dos solos irrigados: produtividade, degradação e correção. **Reunião Brasileira de Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas**, 1995, 77-86.

Matiazo, S., & Kramer, V. Análise e monitoramento de uma voçoroca urbana situada numa vertente de formação geológica arenito caiuíá com a presença de latossolo vermelho. **Revista Geonorte**, Edição especial 4, 2014 V. 10, N.1, pp. 5-10.

McCool, D., Foster, G., Mutchler, C., & Meyer, L. (1989). **Revised slope length factor for the universal soil loss.** Trans.ASAE, 1571-1576. 1989, vol.32.

Morgan, R. P. **Soil erosion and conservation.** EUA: Blackwell Science Ltd.2005, OLIVEIRA, M. A. T. Processos erosivos e preservação de áreas de risco de erosão por voçorocas. In: GUERRA, A. J. T., SILVA, A. S. da, BOTELHO, R. G. M.(org.).

Erosão e Conservação dos Solos conceitos, temas e aplicações. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999. 57-99p.

SAMPAIO, L. F. **Estudo Geológico-Geotécnico dos Processos Erosivos e Proposta de acrodrenagem: Voçoroca do Córrego do Cravo (Nazareno-MG).** São Carlos, Universidade de São Paulo. Dissertação de Mestrado. 2014, 233p.

Solos, E. B.-E. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** 3ª Edição. Rio de Janeiro: EMBRAPA Informação Tecnológica, 2013.

Stipp, M. **A ocupação do solo e a problemática da arenização e do voçorocamento no município de Paranavaí/PR.** Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo – USP. 2003.

Suguio, K. **Geologia Sedimentar.** São Paulo: Editora Edgard Blucher LTDA, 2003,

Wischmeier, W., & Smith, D. (1958). **Rainfall energy and its relationships to soil loss.** Trans. Am. Geophys. Union, Washington, 39: 285 - 291.