

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
CURSO DE GEOLOGIA**

CAROLINE DE ARAUJO HALUCH

**CARACTERIZAÇÃO DOS PROCESSOS PERIGOSOS RECENTES ASSOCIADOS
AO CARSTE NA REGIÃO DE TRANQUEIRA - ALMIRANTE TAMANDARÉ, PR**

**CURITIBA
2023**

CAROLINE DE ARAUJO HALUCH

**CARACTERIZAÇÃO DOS PROCESSOS PERIGOSOS RECENTES ASSOCIADOS
AO CARSTE NA REGIÃO DE TRANQUEIRA - ALMIRANTE TAMANDARÉ, PR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Geologia da Universidade Federal do
Paraná como requisito parcial à obtenção do grau
de Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Me. Renato Eugenio de Lima.

CURITIBA

2023

Dedico este trabalho a meu pai e meu filho, também a toda minha família de onde vem
minha força.

RESUMO

A região de Tranqueira no município de Almirante Tamandaré, está situada em unidades litológicas carbonáticas da formação Capirú, os mármore calcíticos da unidade Rio Branco que ocorrem na área de estudo, são rochas propícias ao desenvolvimento de sistema cárstico. O termo carste se refere a sistemas compostos por rochas com alta solubilidade, facilmente intemperizadas através dos processos de dissolução química e intemperismo mecânico através percolação hídrica em sistema de alta permeabilidade devido porosidade primária e secundária bem desenvolvidas. Estes processos a níveis subterrâneos produzem sistema complexo de percolação hídrica, composto por canais e cavidades através dos quais ocorre remobilização e transporte de material, podendo envolver materiais como a água, o solo ou rocha (carbonática ou não). As feições geradas por estes processos cársticos são denominadas dolinas, e naturalmente fazem parte do sistema geológico. Porém é possível observar que na área de estudo estes processos vêm ocorrendo com maior frequência em curto período de tempo, indicando que os mesmos estão ativos no sistema e ocorrendo de maneira acelerada. A região vem crescendo e expandindo o uso e diversificando a ocupação do solo local, com ocupações rurais, industriais e urbanas, com usos diversos do solo, mas principalmente agrícola, atividade minerária e residencial. Estes processos de colapso e subsidência são considerados perigosos pois oferecem risco ou causam danos a estruturas empresariais, moradias, vias de acesso, cercas, muros e também à população local. Através de etapas aquisição, processamento e análise dos dados obtidos em campo e também de outros dados temáticos como geologia local, dados morfológicos do terreno, taxas médias de pluviosidade dos meses próximos aos últimos eventos dos processos perigosos, levantamento de histórico prévio dos colapsos e subsidências, dados de solos, uso e ocupação, atividade minerária, entre outros. Esta pesquisa tem como objetivos criar banco de dados com classificações e descrições das feições observadas em campo, através de fichas descritivas inseridas em software VICON SAGA 7.4. Também a confecção do mapa de ocorrências das subsidências e colapsos na região estudada, contido neste mesmo software. E a compreensão dos processos perigosos ativos no local, quais os principais fatores controladores, deflagradores e indicativos destes processos ativos no sistema cárstico da região. A geologia local e a composição do solo, são fatores considerados como controladores, e as taxas de pluviosidade como controladora e deflagradora naturais dos processos cársticos no local. O uso e ocupação sem devidos cuidados do solo como atividade minerária utilizando explosivos, bombeamento hídrico excessivo, avanço na ocupação em áreas indevidas e com influência direta ao aquífero karst são considerados fatores que interferem ou modificam os processos cársticos e que podem acelerar os processos de dissolução, sufusão, deflagrando processos de subsidências e colapsos de solo ou rocha locais. As principais feições indicadoras observadas em campo foram: Rachaduras em casas, subsidências e colapsos no terreno, danos a vias de acesso, cercas e presença de sumidouros.

Palavras chave: carste; dolina; controladores; deflagradores; indicadores.

ABSTRACT

The Tranqueira region in the municipality of Almirante Tamandaré, is located in carbonate lithological units of the Capirú formation, the calcitic marbles of the Rio Branco unit that occur in the study area, are rocks conducive to the development of a karst system. The term karst refers to systems composed of rocks with high solubility, easily weathered through chemical dissolution processes and mechanical weathering through water percolation in a high permeability system due to well-developed primary and secondary porosity. These processes at underground levels produce a complex system of water percolation, composed of channels and cavities through which material remobilization and transport occurs, which may involve materials such as water, soil or rock (carbonate or not). The features generated by these karst processes are called dolines, and naturally form part of the geological system. However, it is possible to observe that in the study area these processes have been occurring more frequently in a short period of time, indicating that they are active in the system and occurring at an accelerated rate. The region has been growing and expanding the use and diversifying the occupation of local land, with rural, industrial and urban occupations, with different land uses, but mainly agricultural, mining and residential activities. These processes of collapse and subsidence are considered dangerous as they pose a risk or cause damage to business structures, housing, access roads, fences, walls and also to the local population. Through stages of acquisition, processing and analysis of data obtained in the field and also of other thematic data such as local geology, morphological data of the terrain, average rainfall rates in the months close to the last events of the dangerous processes, survey of previous history of collapses and subsidences, soil data, use and occupation, mining activity, among others. This research aims to create a database with classifications and descriptions of the features observed in the field, through descriptive sheets inserted in VICON SAGA 7.4 software. Also the making of the map of occurrences of subsidences and collapses in the region studied, contained in this same software. And the understanding of the dangerous processes active in the place, which are the main controlling, triggering and indicative factors of these active processes in the karst system of the region. The local geology and soil composition are factors considered as controllers, and the rainfall rates as a natural controller and trigger of the karst processes at the site. The use and occupation without due care of the soil as a mining activity using explosives, excessive water pumping, advances in occupation in undue areas and with direct influence on the karst aquifer are considered factors that interfere or modify the karst processes and that can accelerate the dissolution processes, suffusion, triggering processes of subsidence and collapse of local soil or rock. The main indicator features observed in the field were: Cracks in houses, subsidence and collapses in the land, damage to access roads, fences and the presence of sinkholes.

Keywords: karst; doline; controllers; triggers; indicators.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Proposta de macrozoneamento para uso e ocupação com relação a influência sobre o aquífero karst. Fonte: COMEC (2002).	2
Figura 2: Localização de área estudo.	3
Figura 3: Unidades Geológicas na área de estudo. Fonte: CPRM (2021).	4
Figura 4: Exemplos de terrenos cársticos. Fontes: CENACID (2007) e RPC (2022).	6
Figura 5: Curva de alcalinidade e estabilidade dos compostos. Fonte: Engenheiro Planilheiro, (2019).	7
Figura 6: Reações químicas envolvidas nos processos de precipitação e dissolução de minerais de carbonato CaCO_3 . Fonte: site C2O, (2023).	7
Figura 7: Classificação de dolinas em rocha e solo segundo os processos. Fonte: Gutiérrez <i>et al.</i> , (2014).	11
Figura 8: Classificação de dolinas em rocha e solo segundo os processos de sufusão, subsidência e colapso. Fonte: Gutiérrez <i>et al.</i> , (2014).	12
Figura 9: Classificação dolinas Simétrica, Assimétrica e Assimétrica estrutural. Fonte: Bögli (1980).	12
Figura 10: Classificação morfogenética de dolinas simples, compostas e complexas. Fonte: Angel <i>et al.</i> (2004).	13
Figura 11: Fluxograma da pesquisa.....	17
Figura 12: Modelo de ficha para descrição das estruturas cársticas em campo.	21
Figura 13: Mapa de ocorrências dos processos cársticos perigosos de subsidências e colapsos no carste. Fonte: VICON SAGA 7.4 (2022).	21
Figura 14: Área de estudo, com histórico das ocorrências antigas de feições cársticas como dolinas e lagos, desde 2003 a 2022. Figura de declividade, demonstrando maior	

concentração dos colapsos nos locais de menor declividade (em tons vermelhos vermelho). Fonte: Google Earth (2003 – 2022).22

Figura 15: (A) Afloramento rochoso (2), (B) composto por Mármore Calcítico de cor branca, com bandamento marcado por intercalação de porções Carbonáticas e Quartzosas. Fonte: Fotos Lima, R.E. (2022).23

Figura 16: (A) Mármore Calcítico de cor branca e estrutura bandada, (B) Destaque para bandamento marcado por intercalação de camadas mm a cm de carbonato (branca) e quartzo (cinza) e (C) Visão 3D do afloramento, é possível observar inclinação das camadas e ainda fraturas destacadas em amarelo.24

Figura 17: Feições de colapso. (A) Dolinas colapso de solo, (B) e (C) Dolinas compostas e de subsidência de solo (D) Colapsos na borda das estruturas e que delimitam as feições de dolinas. Fonte: Fotos Lima, R.E. (2022).25

Figura 18: Dolinas Colapso de Solo (A) Simétrica e Simples, (B) Assimétrica estrutural e Simétricas alinhadas indicando controle estrutural, (C) Assimétrica estrutural e (D) Assimétrica Estrutural. Fonte: Fotos Lima, R.E. (2022).26

Figura 19: Dolinas Colapso e processos de sufusão no solo. (A) Campo de dolina Norte, (B) Dolinas alinhadas, indicativo de controle estrutural. (C) Campo de dolinas Sul. Consideradas assimétricas estruturais e simétricas, e como um sistema complexo. Fonte: Fotos Lima, R.E. (2022).27

Figura 20: (A) e (B) Feições indicativas de processos ativos no local, rachaduras cm nas paredes do imóvel. Fonte: Fotos Lima, R.E. (2022).29

Figura 21: Feições indicativas de processos cársticos ativos no local. (A) Sumidouro, (B) Subsidências na superfície do terreno. Fonte: Fotos Lima, R.E. (2022).29

Figura 22: Dolina Colapso de solo próximo a via de acesso, e outros indicadores como inclinação de postes e cercas.30

Figura 23: Figuras para análise do terreno, contendo histórico prévio de ocorrências. (a) Relevo Sombreado e unidades geológicas, (b) Relevo Sombreado, (c) DEM Mapa Digital de Elevação e (d) Declividade. Fonte: ALOS PALSAR; Google Earth (2022) e CPRM (2021).	31
Figura 24: (a) Figura uso e ocupação do solo, (b) unidades aquíferas (karst) e uso dos solos em hachuras e (c) Figura zonas de influência direta e indireta aquífero Karst. Fonte: ITCG (2008) e COMEC (2002)	32
Figura 25: Figura relacionada a atividade minerária na área de estudo. (a) Substâncias requeridas, (b) Principais usos e (c) Fase atual dos requerimentos. Fonte: ANM (2022).	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dados importantes para um bom levantamento cartográfico de dolinas em etapa de campo, para se compor o banco de dados. Fonte: Gutiérrez <i>et al.</i> , (2014).	14
Tabela 2: Dados a serem analisados para compreensão do sistema local e que auxiliam na cartografia destes processos no carste. Fonte: Gutiérrez <i>et al.</i> (2014) e Vestena, Kobiyama e Santos (2010).	15

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Níveis médios de Pluviosidade de acordo com os meses selecionados próximos aos eventos de colapso no solo estudados e situação atual. Fonte: CEMADEN (2021 a 2023).	34
Gráfico 2: Frequências de ocorrências das subsidências e colapsos em série histórica desde 2003 a 2022. Fonte: Google Earth (2003 a 2022).	35
Gráfico 3: Idade de última atividade dos processos atuantes no local estudado. Fonte: VICON SAGA (2022).	36

Gráfico 4: Ocorrência dos colapsos e subsidências identificados em campo com relação a unidade litológica. Fontes: VICON (2022) e CPRM (2021).	37
Gráfico 5: Divisão das ocorrências de dolinas registradas em campo de acordo com classificação proposta por Bögli (1980). Fonte: Dados Vicon (2022).	38
Gráfico 6: Divisão das ocorrências de dolinas registradas em campo de acordo com classificação proposta por Angel et al. (2004). Fonte: Dados Vicon (2022).	39
Gráfico 7: Divisão das dolinas registradas na etapa de campo de acordo com processo atuante e material envolvido conforme classificação de Gutiérrez et al. (2014). Fonte: Dados Vicon (2022).	39
Gráfico 8: Velocidade de ocorrência dos processos perigosos de subsidências e colapsos na área de estudo, segundo dados obtidos em campo. Fonte: Dados Vicon (2022).	40
Gráfico 9: Principais feições indicativas de processos ativos observados em campo. Fonte: Dados Vicon (2022).	40

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA	1
1.2 OBJETIVOS	3
1.3 LOCALIZAÇÃO	3
1.4 CONTEXTO GEOLÓGICO	4
2. REVISÃO TEÓRICA	5
2.1 SISTEMA CÁRSTICO	5
2.2 PROCESSOS PERIGOSOS ASSOCIADOS AO CARSTE; FATORES CONTROLADORES, DEFLAGRADORES E INDICADORES	8
2.2 CLASSIFICAÇÕES UTILIZADAS	10
2.4 CARTOGRAFIA	13
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	15
3.1 REVISÃO TEÓRICA (FASE 1).....	17
3.2 AQUISIÇÃO DE DADOS (FASES 2 E 3)	18
3.3 PROCESSAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS (FASE 4).....	19
4. RESULTADOS	20
4.1 HISTÓRICO DE OCORRÊNCIAS.....	22
4.2 PROCESSOS CÁRSTICOS PERIGOSOS, OBSERVADOS EM CAMPO.....	23
4.4 MAPAS TEMÁTICOS.....	30
4.3 PLUVIOSIDADE.....	34
5. DISCUSSÃO	35
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	42
7. REFERÊNCIAS	47

ANEXOS

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA

A carstificação é um processo geológico natural que ocorre lentamente controlado pela dissolução química dos minerais que formam a rocha, estando relacionado principalmente as rochas carbonáticas devido sua composição de maior solubilidade. Os processos ativos neste tipo de sistema cárstico como a sufusão que é definido como processo ligado ao transporte do solo através de canais com permeabilidade conferida por porosidade primária e secundária principalmente fraturas tectônicas, até níveis subsolo (Gutiérrez *et al.*, 2014), também as subsidências e os colapsos, produzem feições topográficas negativas no terreno que são denominadas Dolinas. O desenvolvimento destes processos pode ocorrer de maneira natural e lenta ou então acelerada, seja por fatores naturais como a solo ou bombeamento hídrico excessivo do aquífero. Aumentando a taxa de ocorrência das subsidências e colapsos no solo, causando danos físicos a edificações, vias de acesso, entre outros e ainda oferecendo risco a população e indústrias. O uso indevido do solo sem planejamentos, também pode estar associado a contaminações ambientais, rebaixamento do freático, entre outros danos. O município de Almirante Tamandaré – PR possui 121.420 habitantes segundo censo IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2021) e está em constante expansão no crescimento populacional, ocupação urbana, industrial e rural. Na área de estudo localizada na região de Tranqueira em Almirante Tamandaré, ocorrem as unidades litológicas carbonáticas da Formação Capiru do Grupo Açungui (Fiori, 1991 e Santos, 2017). O local selecionado para o estudo, possui características essenciais para o desenvolvimento de sistema cárstico como: Composição litológica de maior solubilidade, estruturas tectônicas que conferem permeabilidade ao sistema, e também aquífero com alta permeabilidade. Pode se afirmar então, que os processos de subsidências e colapsos no solo na região se desenvolvem de maneira natural. Mas conforme os dados indicam, as taxas de ocorrência cresceram com o tempo (dez novas dolinas no período dos dois últimos anos), isto indica que os processos do sistema cárstico estão ocorrendo de maneira acelerada. O que pode estar associado ao crescimento na ocupação local com desenvolvimento de novas residências, indústrias, propriedades rurais e também aos usos indevidos e sem planejamentos do



1.2 OBJETIVOS

Esta pesquisa tem como objetivos: A) Compôr banco de dados acerca dos processos perigosos associados aos processos cársticos na região de estudo utilizando software VICON SAGA 7.4; B) Confeccionar mapa de ocorrências de processos perigosos (produzido através do mesmo software VICON) e possibilitar a geração de mapas acessórios de temas específicos; C) compreender melhor o funcionamento do sistema cárstico na área estudada como gerador de processos perigosos do tipo colapsos e subsidências, estudando a influência de fatores geológicos, morfológicos, climáticos e a ação antrópica relacionada.

1.3 LOCALIZAÇÃO

Situada na região norte do município de Almirante Tamandaré a área de estudo está localizada na região de Tranqueira, próximo ao Km 22 sentido norte da rodovia PR-092 também nomeada Rodovia dos Minérios, a 7,8 km do centro de Almirante Tamandaré, próximo a empresa Água Mineral Timbu (Figura 2). Localidade com ocupações residenciais, propriedades rurais e empresas de pequeno a grande porte como comércios e mineração. A área de estudo possui 0,3 km² e foi escolhida devido a ocorrência de diversos colapsos e subsidências nos terrenos da região.

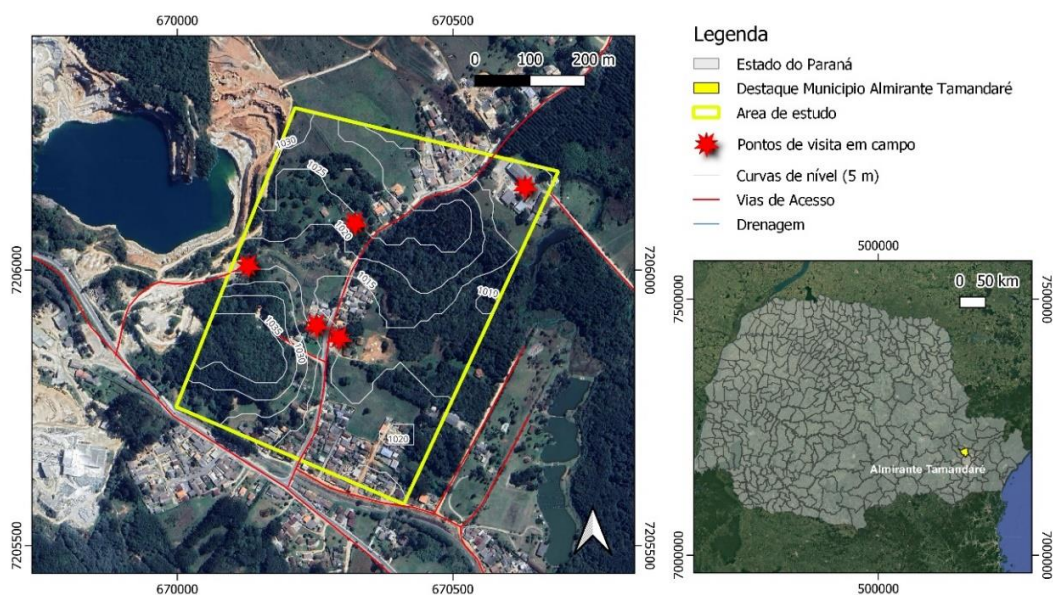


Figura 2: Localização da área de estudo. Destaques para o estado do Paraná e município de Almirante Tamandaré. Fontes: Google Earth (2022) e IBGE (2021).

1.4 CONTEXTO GEOLÓGICO

A área de estudo está situada sobre rochas carbonáticas pertencentes a Formação Capiru do Grupo Açungui, com idade Proterozóica Superior, metamorfizadas regionalmente a baixo grau em fácies xisto verde, conforme descrito por Santos (2017). Dentre os litotipos em destaque para a ocorrência dos processos perigosos associados ao carste na área de estudo (Figura 3) estão: Mármore, Metadolomitos, Metamargas, Metacalcarenitos, Metacalcários Dolomíticos e Metamargas. Há presença de falha transcorrente com direção aproximada EW, correlacionada a zona de cisalhamento do Sistema de transcorrência da Lancinha (Santos, 2017 e Fiori, 1993).

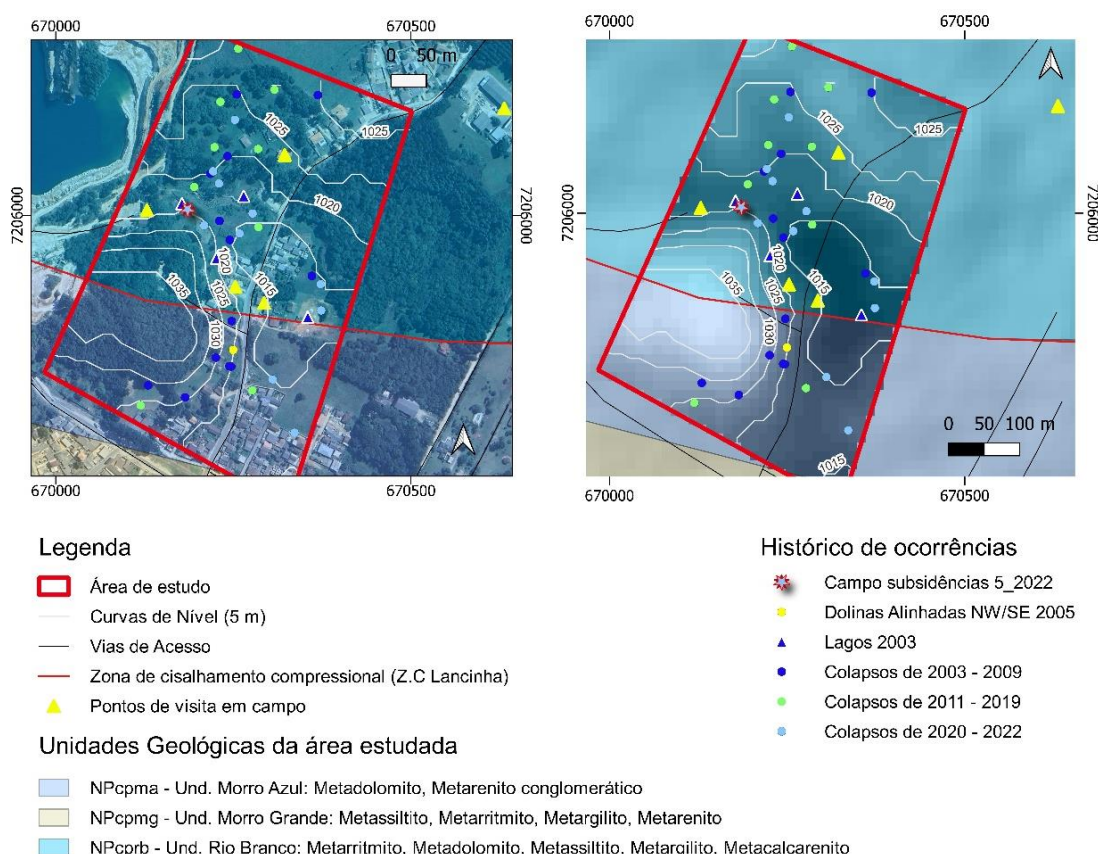


Figura 3: Imagem de satélite e Relevo Sombreado da região estudada com unidades geológicas, zona de cisalhamento e histórico de ocorrências anteriores ao presente trabalho de campo. Fontes: Dados geológicos, mapas 1:250.000 CPRM (2021); Histórico de ocorrências e imagem de satélite Google Earth (2003 a 2022).

2. REVISÃO TEÓRICA

2.1 SISTEMA CÁRSTICO

Carste é o termo utilizado para se referir a sistema movido por dissolução química das rochas, com formas de relevo superficiais e subterrâneas como sumidouros, dolinas, subsidências, lapiás, nascentes, cavernas, entre outros (Figura 4). Sua gênese está relacionada ao processo de dissolução química dos minerais Calcita e Dolomita em rochas como calcários e mármore altamente solúveis. Solubilizados por percolação hídrica superficial e subterrânea através da permeabilidade conferida por porosidades primária (porosidade textural da rocha) e principalmente secundária bem desenvolvidas (estruturas tectônicas como foliações, fraturas e falhas) (Ford e Williams, 2007). Os fatores que controlam a gênese e evolução de um sistema cárstico são determinados pelo grau de dissolução da rocha, volume hídrico e características ambientais associadas à litosfera, biosfera e atmosfera, Köhler (1995, *apud* Vestena, Kobiyama e Santos, 2010).

Sendo apenas os processos de dissolução química insuficientes para o desenvolvimento efetivo de um sistema evoluído, vale ressaltar a importância do fator percolação hídrica para evolução do sistema, que ocorrerá principalmente através das estruturas tectônicas como fraturas e falhas (Ford e Williams, 2007).



Figura 4: Exemplos de terrenos cársticos. (A) vista aérea propriedade na região de Tranqueira. (B) e (C) Colapsos de solo, região vizinha a área de estudo. Fontes: RPC – Rede Globo, março (2022) e CENACID – Centro de Apoio Científico a Desastres, (2007).

O processo de carstificação está relacionado a dissolução química de rochas, e ocorre da seguinte maneira: O gás carbônico CO_2 é disponibilizado para o sistema através da respiração das plantas, raízes e atividade microbial estando presente nos solos. Estando associado ao aumento na acidez e pressão parcial de CO_2 no local, o que irá favorecer aos processos de solubilização de alguns minerais (Bögli, 1980).

Ao reagir com a água H_2O , o CO_2 gera o ácido carbônico H_2CO_3 , este irá se dissociar em H^+ e íons bicarbonato HCO_3^- , os íons bicarbonato HCO_3^- se dissociam em H^+ e CO_3^{2-} carbonato (Figura 5). Quando a solução atinge ponto de saturação em Ca^{2+} e CO_3^{2-} , ocorre o processo de precipitação mineral com geração normalmente de calcita CaCO_3 ou dolomita quando $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ (Figura 6). O ácido carbônico H_2CO_3 ao reagir com os minerais de CaCO_3 carbonato de cálcio, como por exemplo a calcita, e irá dissociá-los em moléculas de Ca^{2+} cálcio e 2HCO_3^- íons bicarbonato, sendo necessário o dobro da quantidade em (mols) de ácido para dissolução da dolomita com relação a calcita (Bögli, 1980 e Albrecht, 1998).

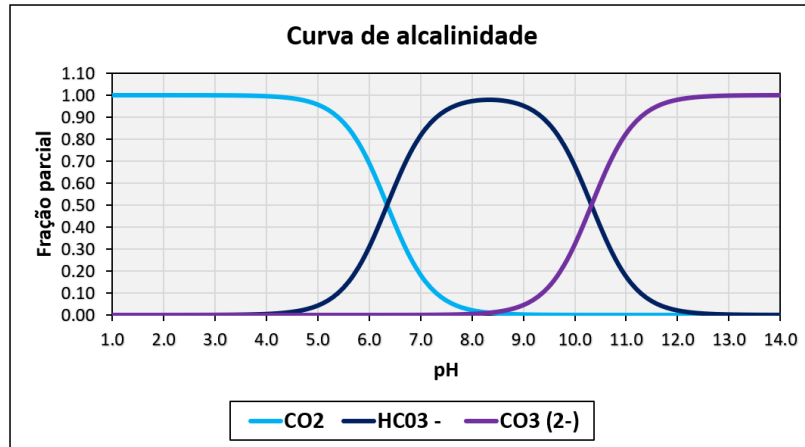


Figura 5: Curva de alcalinidade e estabilidade dos compostos. Demonstra que o CO_2 , irá reagir com a H_2O presente e gerar H_2CO_3 Ácido Carbônico, que irá se dissociar em H^+ e Íons Bicarbonato HCO_3^- causando respectivo decaimento e aumentos nas concentrações destes compostos, até certo ponto médio em que, o HCO_3^- se dissocia em H^+ e CO_3^{2-} carbonato, novamente causando respectiva diminuição e aumento nas as concentrações destes compostos. Fonte: Engenheiro Planilheiro, 2019.

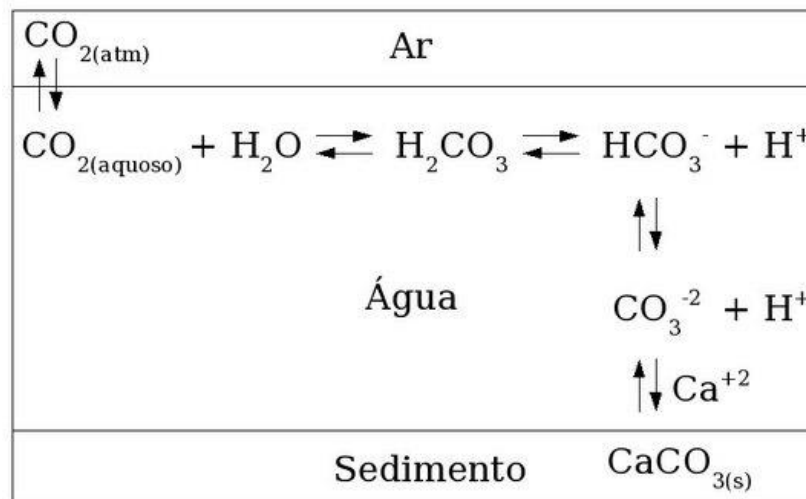


Figura 6: Reações químicas envolvidas nos processos de precipitação e dissolução de minerais de carbonato CaCO_3 . Fonte: site C2O, acesso janeiro (2023).

Como os processos de solubilização química dos minerais não ocorrem exclusivamente em carbonatos, as feições de dissolução e formação de relevo cárstico estão associadas também a terrenos compostos por rochas siliciclásticas, ígneas e metamórficas como por exemplo arenitos, quartzitos, gnaisses, entre outros. O termo utilizado para se referir a feições cársticas em rochas de composição não carbonáticas é primocarste (Rodet, 2014), baseado neste conceito de dissolução cárstica e de que os minerais possuem solubilidades distintas.

De maneira geral o que os diversos estudos existentes acerca do tema carstificação têm em comum, é a observação dos processos ocorridos, material envolvido e morfologia dos produtos resultantes em escalas distintas, buscando melhor compreensão sobre o funcionamento do sistema em cada local.

2.2 PROCESSOS PERIGOSOS ASSOCIADOS AO CARSTE; FATORES CONTROLADORES, DEFLAGRADORES E INDICADORES

Uma das maneiras de buscar entender e estudar a natureza, é compreender os processos ativos no funcionamento dos sistemas em cada local. Em um sistema existem fatores que irão controlar o funcionamento do mesmo, outros que irão deflagrar os processos formadores e há ainda as feições indicadoras, que são a expressão de atividade dos processos atuantes representados em superfície (Gutiérrez *et al.*, 2014).

Os fatores controladores são aqueles que controlam o funcionamento do sistema local de maneira natural, ou seja, para o desenvolvimento de sistema cárstico em determinado local por exemplo serão fatores geológicos controladores: Composição das litologias, a questão textural de porosidade primária que juntamente às estruturas tectônicas como foliações e principalmente fraturas, falhas conferem a porosidade secundária, e irão controlar a permeabilidade do sistema.

Os processos de sufusão subsidência e colapso ocorrem de maneira natural no carste, porém podem ser acelerados por fatores naturais como clima incluindo variações de pluviosidade por exemplo, ou ação antrópica devido ao uso incorreto do solo, entre outros. O clima é um controlador natural também relacionado a formação do perfil de solo local. Em climas tropicais que apresentam maiores taxas de intemperismo, tendem a se formar camadas mais espessas de solo, que por sua vez é afetado pela cobertura, por exemplo se há vegetação permitindo infiltração da água no solo ou então impermeabilização em áreas ocupadas, entre outros (Ford e Williams, 2007; Gutiérrez *et al.*, 2014).

Os deflagradores podem ser naturais ou induzidos, e dizem respeito aos aspectos essenciais para a ocorrência dos processos como por exemplo no caso estudado as subsidência e colapsos no terreno, por exemplo. O clima é um fator que

pode ser considerado um fator controlador, mas também como deflagrador natural, pois influí diretamente no sistema hídrico com relação as taxas de pluviosidade, que quando baixas causam o rebaixamento do nível freático e aumento na instabilidade do terreno, podendo haver remobilização de material e colapsos de teto em cavidades subterrâneas que antes estavam preenchidas. Por outro lado, as altas taxas pluviométricas aumentam a dissolução química e mecânica (Ford e Williams, 2007).

Existem os fatores deflagradores, que podem ser ditos induzidos ou antrópicos. Segundo Vestena, Masato e Santos (2010) são fatores relevantes quanto aos principais usos e ocupação do solo e seus impactos no sistema, por exemplo a ocupação urbana sem planejamento podendo provocar mudanças físicas no meio e sistema cárstico através de retirada de cobertura vegetal e consequente exposição de rochas solúveis ao intemperismo, ou então impermeabilização do solo através de construções e edificações. A atividade de mineração pode influir através de sismos quando há utilização de explosivos para retirada de rocha, e também no nível do freático se houver bombeamento hídrico excessivo para uso na mineração. Atividades agrícolas próximas também podem interferir, alterando a cobertura do solo, modificando o nível freático pelo uso da água na irrigação e também podem ser fonte de contaminantes que alterem o comportamento químico do sistema cárstico.

As feições indicadoras serão aquelas que demonstram a presença de um sistema ativo no local, como por exemplo: Aparecimento de fendas e depressões no terreno, danos materiais como rachaduras nas edificações, inclinação de troncos de árvores, postes, muros e cercas, surgências de água, subsidências e colapsos no terreno, lagoas, entre outros (Gutiérrez *et al.*, 2014). Quando as ocorrências destes processos afetam a integridade do meio físico ou biológico causando danos por exemplo a edificações, vias de acesso ou então perdas de vida, contaminações ambientais entre outros, passam a ser considerados como processos perigosos (Vestena, Kobiyama e Santos, 2010).

2.2 CLASSIFICAÇÕES UTILIZADAS

As principais feições no terreno, formadas por processos perigosos de subsidência e colapso associadas ao carste, são as dolinas. Tem sua gênese relacionada ao fluxo hídrico subterrâneo, e se formam ao ocorrer remobilização através do fluxo de material para os canais subterrâneos com percolação e transporte de matéria provocando afundamentos no material de cobertura, resultando em subsidências no terreno, ou então evoluindo para colapsos no solo ou colapsos de cavidades subterrâneas (Colapsos de teto em cavernas) (Gutiérrez *et al.*, 2014).

Existem diversas classificações propostas para as subsidências e colapsos relacionados ao carste e no presente trabalho serão apresentadas três. A classificação de Gutiérrez *et al.* (2014) que considera o material e o processo envolvidos na gênese das dolinas. As outras duas classificações consideram a morfologia a proposta de Bögli (1980) classifica as feições de acordo com sua forma em secção no terreno em simétricas assimétricas e assimétricas estruturais, e pôr fim a classificação de Angel *et al.* (2004) que separa as dolinas em três tipos de acordo com sua morfologia e estágio de evolução em simples, composta e complexa. Ambas indicam características de fluxo hídrico e estado de evolução da dolina.

A classificação de Gutiérrez *et al.* (2014) separa as dolinas de acordo com dois fatores: Primeiramente o material afetado por processos de dissolução, erosão e deformação, referindo se ao material envolvido como coberturas de solos, rocha solúvel exposta em superfície ou então carste encoberto por rocha não solúvel. O segundo fator relevante para esta classificação está relacionado ao processo atuante neste material podendo ocorrer sufusão, subsidência ou colapso. A sufusão é um processo ligado ao transporte do material de cobertura (solo) através de canais principalmente da porosidade secundária que conferem permeabilidade a rocha, até níveis subterrâneos, causando sedimentação progressiva dos mesmos (Gutiérrez *et al.*, 2014).

Dolinas de dissolução, são aquelas formadas por processos diretos de dissolução nas rochas até níveis subterrâneos com baixa espessura de solos; a gênese destas feições está relacionada a percolação por fluxos com direções preferenciais em locais de maior permeabilidade e solubilidade o que gera dissolução

concentrada em determinados pontos (Ford e Williams, 2007 e Gutiérrez *et al.*, 2014). A subsidência é a expressão de uma deformação mais dúctil no material, que gera afundamentos como flexões na superfície do terreno, este processo é gerado por ação da gravidade conjunto a falta de suporte basal. Dolinas de subsidência resultam de dois mecanismos principais, dissolução em superfície e subterrâneo, bem como movimentação vertical descendente do material por ação gravitacional devido ao seu peso, quando há erosão ou deformação em níveis subsuperficiais e subterrâneos.

E por fim o colapso que é representado por deformação rúptil do material e consequente desenvolvimento de limites bruscos nas estruturas e algum brechamento do material (Figura 7). As dolinas de colapso irão se formar principalmente associadas a colapso no teto de cavidades subterrâneas, que são formadas por processos de dissolução subsuperficial, que quando em estágios avançados não suportará o peso do material de cobertura e ocorre o colapso de material para dentro desta cavidade, geralmente esse tipo de dolina apresenta limites bruscos bem definidos segundo Gutiérrez *et al.* (2014) (Figura 8).

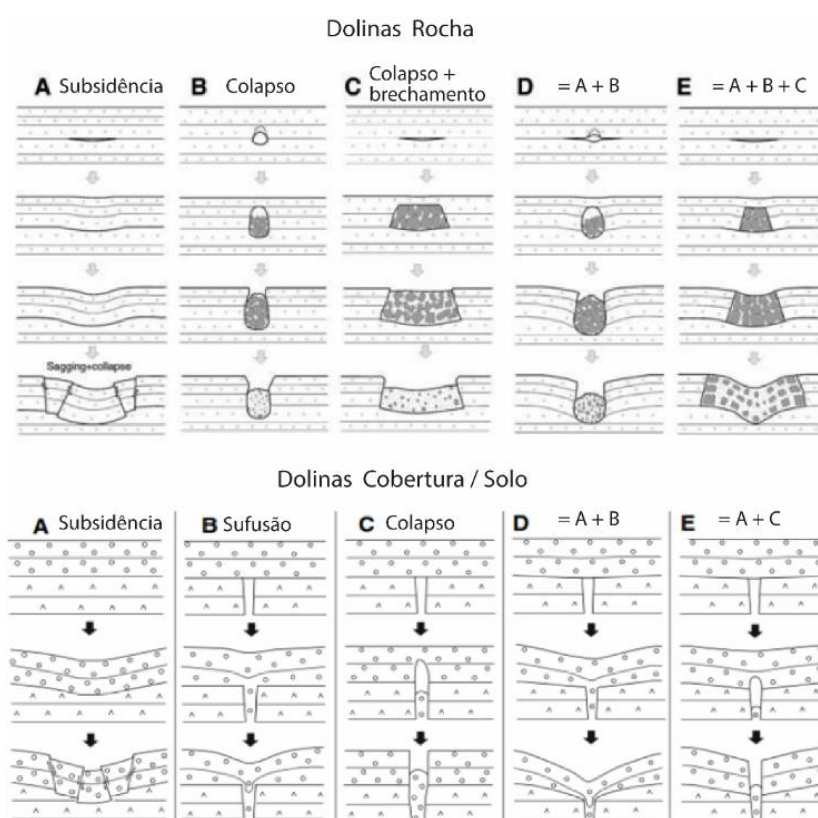


Figura 7: Classificação de dolinas em rocha e solo segundo os processos. Fonte: Adaptado de Gutiérrez *et al.*, (2014).

CLASSIFICAÇÃO			
MATERIAL	PROCESSO		
	Subsidência	Sufusão	Colapso
Solo			
Rocha menos solúvel			
Rocha solúvel			

Figura 8: Classificação de dolinas em rocha e solo segundo os processos de subsidência, sufusão e colapso. Fonte: Adaptado de Gutiérrez *et al.*, (2014).

Algumas classificações propõem uma subdivisão morfogenética para as dolinas, por exemplo Bögli (1980) que faz a separação em: Simétricas de formato arredondado a arredondado elíptico, assimétricas que são alongadas e morfogeneticamente ligadas caminhos preferenciais de percolação hídrica, por fim as dolinas assimétricas estruturais que relacionadas a feições estruturais como inclinação das camadas, ou então condicionadas por plano de falha e ou outras estruturas tectônicas (Figura 9).

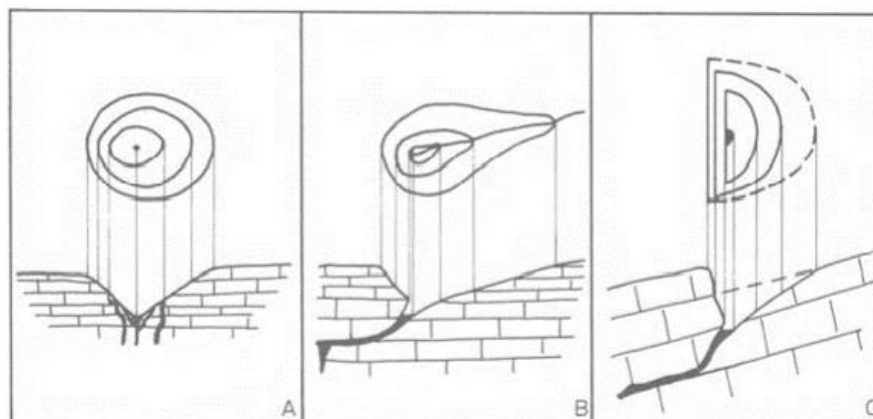


Figura 9: Vista em plano e perfil de dolinas. (A) Simétrica, (B) Assimétrica e (C) Assimétrica estrutural. Fonte: Bögli (1980).

A segunda classificação morfogenética escolhida é a de Angel *et al.* (2004) que define: Dolinas simples como aquelas que apresentam apenas um contorno simples normalmente arredondado, complexas que são conjuntos de dolinas simples (dolina ocorrendo dentro de outra maior), e as ditas compostas são as que possuem grande contorno, ocorrendo conjuntos com duas ou mais outras dolinas dentro desta depressão maior. O mesmo autor descreve a possibilidade da ocorrência de lagoas dentro destas feições, quando há depressão coberta por solo e acúmulo de água superficial dentro destas cavidades (Figura 10).

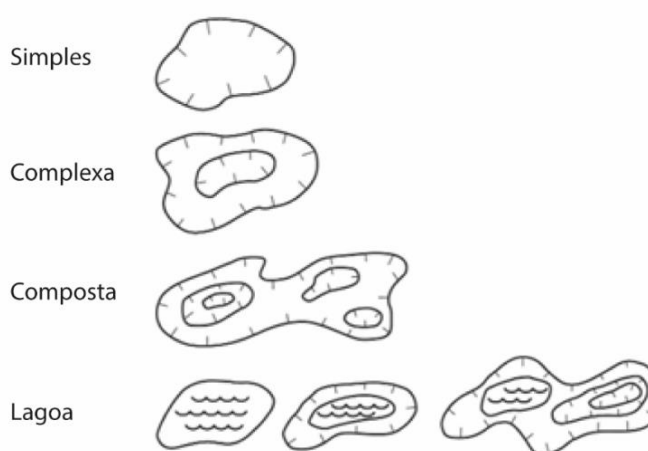


Figura 10: Classificação morfogenética de dolinas proposta por Angel *et al.* (2004). Fonte: Adaptado de Angel *et al.* (2004).

2.4 CARTOGRAFIA

Segundo Gutiérrez *et al.* (2014) para realizar um bom inventário cartográfico das dolinas são necessários diversos dados como: Localização, descrição morfométrica (forma e tamanho), classificação genética, envolvendo material e processos, classificação morfológica, cronologia dos eventos em idade relativa para cálculo das taxas de ocorrência, atividade e por fim fatores controladores, deflagradores e feições indicadoras quando presentes (Tabela 1).

Tabela 1: Dados importantes para um bom levantamento cartográfico de dolinas em etapa de campo, para se compor o banco de dados. Fonte: Dados segundo Gutiérrez *et al.*, (2014).

Levantamento cartográfico		
Método de análise	Tipo do dado	Resultado
Observação em campo e registro de dados	Localização	Banco de dados
	Descrição morfométrica	
	Classificação genética	
	Classificação morfológica	
	Cronologia inventário de eventos	
	atividade	
	Fatores controladores	
	Fatores deflagradores Feições indicadoras	

Para o entendimento do sistema local são importantes dados como: Histórico de ocorrências para cálculo das taxas de ocorrências e desenvolvimento das feições de colapsos, geologia local principalmente quanto a litologia e porosidade primária textural da rocha, porosidade secundária relacionada as estruturas tectônicas, que influem diretamente na permeabilidade hídrica do sistema (Gutiérrez *et al.*, 2014 e Albrecht, 1998), e ainda dados climáticos como pluviosidade, e hidrológicos como rede hídrica, surgências, sumidouros, influência do aquífero, dados de solos, uso e ocupação local, mapas de imagem de satélite, terreno como (MDE) Modelo Digital de Elevação, (Hillshade) Relevo Sombreado e Slope para valores de Declividade, podem ser úteis nas análises e interpretações também (Gutiérrez *et al.*, 2014 e Vestena, Kobiyama e Santos, 2010) (Tabela 2).

Tabela 2: Dados a serem analisados para compreensão do sistema local e que auxiliam na cartografia destes processos no carste. Fonte: Dados segundo Gutiérrez *et al.* (2014) e Vestena, Kobiyama e Santos (2010).

Análise de dados		
Método de análise	Tipo do dado	Resultado
Imagem de Satélite Google Earth (2003 – 2022)	Histórico de ocorrências por série histórica	Taxa de ocorrência conforme os anos.
Mapas de Geologia	Litologia, e estruturas tectônicas	Porosidade e permeabilidade do sistema. Possíveis controles, estratigráficos ou estruturais.
Média de pluviosidade mensal próximo ao período de ocorrência dos últimos eventos	Dados Pluviosidade – Estação pluviométrica Tranqueira - CEMADEN	Influência da pluviosidade no freático e sistema hídrico local.
Mapa de solos PR	Dados de Solo	Tipo de solo, qual a participação da cobertura como material nos processos atuantes.
Mapa uso e ocupação do solo	Dados de Uso e Ocupação do solo	Possíveis análises sobre fatores deflagradores induzidos por uso e ocupação antrópica.
Mapas de terreno	MDE, Relevo Sombreado e Declividade.	Permitem melhor reconhecimento da morfologia do terreno, como a visualização dos baixos topográficos e locais de baixa declividade onde normalmente se desenvolvem os colapsos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os principais objetivos desta pesquisa são: Criar banco de dados acerca dos processos perigosos associados ao carste e confeccionar mapa de ocorrências de processos perigosos possibilitando a geração de mapas acessórios específicos através do software VICON, e compreender o funcionamento do sistema cárstico na área estudada como gerador de processos perigosos do tipo colapsos e subsidências, estudando a influência de fatores geológicos, morfológicos, climáticos e a ação antrópica relacionada. Estes objetivos foram alcançados através do desenvolvimento da pesquisa dividido em cinco fases conforme (Figura 11).

Em uma primeira fase foi definido o tema e escopo do trabalho, selecionada a área de pesquisa e realizada revisão bibliográfica do tema carstificação e processos perigosos associados. Posteriormente nesta mesma fase foi definida a metodologia

de trabalho para concluir os objetivos propostos. Confeccionadas fichas descritivas para uso em campo a partir da seleção dos itens que compõem o banco de dados dos registros. Sendo assim para esta fase foi utilizado software VICON para construção da estrutura de coleta do banco de dados.

A segunda e terceira fase correspondem a etapa de levantamento de dados para a pesquisa, composta pela confecção da série histórica das ocorrências de subsidências e colapsos na área, com uso das imagens de satélite no software Google Earth durante período de 2003 a 2022, etapa de campo com registros dos eventos de colapso e subsidência ocorridos, incluindo descrição morfológica, classificação morfológica das estruturas de relevo, classificação das dolinas a partir do material e processo envolvido na data de 22 novembro, 2022. Para esta fase foram utilizados softwares como VICON para registro dos dados em campo, Google Earth e materiais de campo como lupa, ácido clorídrico (10%), martelo, bússola, caderneta, entre outros.

Durante a terceira fase foram obtidos dados através de mapas temáticos da região, como os mapas do ITCG – Instituto de Terras Cartografia e Geociências: Geológico 1: 250.000 (2006) contendo unidades litológicas e estruturas tectônicas, unidade aquífera 1: 2.000.000 (2008), e outros mapas como proposta de macrozoneamento 1:50.000 (2002) e uso e ocupação 1: 50.000 (2003) COMEC, ou então mapas das atividades minerárias na região ANM – Agência Nacional de Mineração (2022). Para finalizar o banco de dados a ser analisado, foram obtidos dados pluviométricos durante os períodos dos meses selecionados (dezembro 2021 a janeiro 2023) para o local.

Posteriormente a fase 4 corresponde ao processamento e análise dos dados reunidos, tratamento dos dados pluviométricos, confecção de mapa com ocorrências dos processos perigosos com inserção de série histórica no banco de dados e ainda mapas acessórios de temas específicos através do software VICON. Incluindo também a análise do mapa de ocorrências com relação aos mapas temáticos e dados pluviométricos, para possíveis correlações. Posteriormente a fase 5 corresponde a confecção de mapas finais e deste trabalho, reunindo as principais conclusões acerca do tema da pesquisa. As etapas citadas acima serão melhor descritas a seguir. Nesta fase foram utilizados softwares como Q.GIS 3.26.3 e Adobe Illustrator 2020 e programa Excel para processar os dados pluviométricos.

Pré campo	Aquisição de dados		Processamento e análise de dados	Interpretação
FASE 1	FASE 2	FASE 3	FASE 4	FASE 5
Definição do tema				
Revisão teórica				
Escolha da área	Confecção de série histórica	Obtenção ou construção de mapas temáticos prévios: Declividade Solos (IAT 2008)	Avaliação geral dos dados e mapas	Confecção do Relatório
Definição da Metodologia	Levantamentos de campo	Geológico (CPRM 2021) Uso e ocupação (IAT 2001/2002) Atividade minerária (ANM 2022) proposta de macro zoneamento (COMEC 2002)		
Seleção dos itens para compor fichas e banco de dados	Inserção de dados no VICON (concomitante) classificação das dolinas	Levantamento de dados pluviométricos (CEMADEN 2021 / 2022)	Produção de mapas finais	

Figura 11: Fluxograma indicando cronograma das cinco fases para realização desta pesquisa divididas em quatro etapas, com duas fases durante a etapa de aquisição de dados.

3.1 REVISÃO TEÓRICA (FASE 1)

Nesta fase foram definidos o escopo da pesquisa, área de estudo, objetivos, entre outros. Durante todas etapas de desenvolvimento da pesquisa, a revisão bibliográfica foi de grande auxílio. Foram realizadas buscas acerca do tema e conceitos de carstificação, esclarecimento de quais são os principais fatores controladores, deflagradores (naturais ou antrópicos) e feições indicadores na gênese deste tipo de relevo cárstico, bem como os processos mais comuns desde sufusões, simples subsidências até colapsos instantâneos. E como realizar a cartografia destes eventos, e posteriores análises.

A partir dos conceitos e classificações obtidos em revisão teórica, foram confeccionadas fichas para registro, descrição e caracterização das feições cársticas de colapsos e subsidências, presença de feições indicadoras dos processos perigosos ativos, pontos de afloramento rochoso, poços hídricos e pontos de visita domiciliar ou empresarial, inseridas no software VICON para uso em etapa de campo. Nesta etapa foram selecionadas as três classificações de dolinas, Angel *et al.* (2004); Bögli (1980) e Gutiérrez *et al.* (2014).

3.2 AQUISIÇÃO DE DADOS (FASES 2 E 3)

O levantamento prévio do histórico das ocorrências de feições cársticas foi obtido através de série histórica desde 2003 a 2022, das imagens de satélite do terreno contidas no software Google Earth. Este foi utilizado como ferramenta de auxílio em campo. E para compor banco dos dados de ocorrências das dolinas a ser usado na fase de análise e interpretação, juntamente com todas outras informações obtidas.

A etapa de campo foi realizada com dados e evidências de campo na região de Tranqueira município de Almirante Tamandaré. Com o total de cinco pontos de visita técnica incluindo residências e empresas, identificação e descrição de treze feições cársticas consideradas como processos perigosos relacionados ao carste, três pontos de afloramento rochoso, três pontos com feições indicadoras de processos ativos e também dois poços hídricos na área de estudo.

Para auxiliar na compreensão dos processos perigosos atuantes no local, além da revisão teórica, dados com histórico de ocorrências e dados adquiridos em campo, foram confeccionadas figuras temáticas que indicam: Morfologia do terreno, solos, unidade aquífera, uso e ocupação e atividade minerária presentes na região. Analisados quanto possíveis fatores controladores ou deflagradores e indicativos dos processos envolvidos no sistema local. A geologia local foi identificada em campo através de três pontos compostos por mármores calcíticos expostos em superfície, e confirmada através dos dados litológicos 1: 600.000 da CPRM – Serviço Geológico do Brasil (2021) que forneceram informações adicionais sobre outras litologias que ocorrem na área, porém não identificadas e descritas em campo.

Os dados morfológicos do terreno foram obtidos através de imagem (DEM) Modelo Digital de Elevação do terreno, retirada do site ASF – Alaska Satélite Facility (NASA) com base em dados do satélite ALOS PALSAR, de resolução 12,5 m. As outras figuras como relevo sombreado, declividade e dados topográficos, foram geradas no software QGIS 3.26.3, através das ferramentas Hillshade, Slope e Contorno respectivamente.

As figuras temáticas específicas da área de estudo foram obtidas através do recorte dos mapas contidos no site do IAT, foram selecionados os seguintes mapas: Solos, uso e ocupação e unidades aquíferas. Processadas no software QGIS 3.26.3.

Os dados foram cruzados para correlação e análise de como estes podem influir no sistema cárstico como fatores controladores ou então deflagradores dos processos perigosos na região.

Outro dado que foi considerado útil é o mapa de proposta para macrozoneamento do uso e ocupação conforme zona de influência sobre aquífero karst. Este dado confirmou que a área de estudo corresponde a zona de influência direta à unidade aquífera local, indicando também locais com proposta de reversão do uso e ocupação, esse mapa foi georreferenciado e sobreposto a outros dados temáticos (como área de estudo, ocorrências, uso e ocupação) no QGIS 3.26.3, para análise de influência sobre aquífero local. Os dados de mineração na área foram obtidos a partir do site da ANM Processados no software QGIS 3.26.3 onde foram separados por atributo para compor figuras temáticas de acordo com substância requerida, principais usos para cada área e fase atual dos requerimentos.

Foram reunidos dados diários de pluviosidade, obtidos através da estação pluviométrica monitorada por CEMADEN – Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais, na região de Tranqueira durante o período de dezembro 2021 a janeiro 2023 em meses específicos selecionados para comparação (dezembro 2021 a março de 2022, próximos aos últimos eventos de colapso na região, e dezembro 2022 a janeiro 2023 para comparações com período atual), afim de correlacionar e compreender influência deste fator climático no sistema.

3.3 PROCESSAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS (FASE 4)

A partir da organização e processamento dos dados obtidos em etapa de campo, foi confeccionado mapa de ocorrências através do mesmo software utilizado para registros em campo VICON SAGA 7.4 que permite a visualização espacial e consulta dos dados locais como: Descrição das ocorrências dos processos perigosos de subsidência e colapso, afloramentos rochosos, locais com presença de feições indicadoras dos processos ativos, locais de pesquisa domiciliar ou empresarial, e dados de poços hídricos, que ficam disponíveis em plataforma online do software. Neste mapa foram inseridos também os dados de levantamento prévio do histórico de dolinas na área, dados geológicos como unidades litológicas que afloram e estrutura tectônica correlacionada a falha de cisalhamento compressional de direção EW que secciona a área de estudo e dados de uso e ocupação do solo. A inserção destes

dados permitiu a análise da correlação entre estes fatores às feições de colapso e subsidência observadas.

Os outros dados que foram analisados como: Solos, unidade aquífera, zona de influência sobre o aquífero local, atividade minerária e por fim banco de dados com o total de registros dos colapsos e subsidências na área, foram sobrepostos no software QGIS 3.26.3, permitindo uma boa visualização espacial das informações e também fazer possíveis correlações entre estes dados. Por exemplo locais com maior número de ocorrência dos processos perigosos, e que estão associados a uso e ocupação indevida ou diferente da indicada pelos dados do mapa temático correspondente, ou então o fato da maior concentração das ocorrências em locais com baixos valores de declividade, entre outras observações.

Os dados pluviométricos foram obtidos no site do órgão responsável CEMADEN pela estação pluviométrica, no formato de valores diários da pluviosidade em mm, posteriormente no software Excel estes dados foram recalculados para valores médios mensais em mm. Ao plotar os dados em gráfico de barras gerado no programa foi possível correlacionar os valores médios mensais em dois períodos: Próximo ao último evento de processos perigosos ativos na área de estudo e para o mesmo período porém no ano seguinte (dezembro 2022 e janeiro 2023), estas análises permitiram avançar no entendimento de quais são os principais fatores controladores, deflagradores e as feições indicativas dos processos cársticos perigosos ativos na região. A fase 5 corresponde a redação desta monografia com as observações, estudos e conclusões alcançadas.

4. RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos a partir de etapas de aquisição, processamento e análise dos dados seguindo as fases 2, 3 e 4 conforme proposto. As fichas descritivas elaboradas (Figura 12) foram inseridas no software VICON, com acesso em campo diretamente através de aplicativo no celular para a construção do banco de dados, possibilitando posterior confecção de mapa de ocorrências dos processos perigosos associados ao carste presentes na região (Figura 13).

Feições Carstícas (13)			
1	Nome	Tipo de resposta	Descrição
# C1	Identificação do ponto	Texto Livre	Ponto 1 - Casa da Dona Maria
# C2	Tipo de material envolvido	Múltipla Escolha	Solo, Rocha solúvel e Rocha pouco solúvel
# C3	Tipo do processo	Múltipla Escolha	Sufusão, Subsidência, Colapso, Drenagem
# C4	Velocidade de ocorrência / evolução	Única Escolha	Instantâneo, rápido, lento ou muito lento
# C5	Tipo do produto	Múltipla Escolha	Feições superficiais de dissolução; Dolina;
# C6	Dimensões (Altura; Diâmetro)	Texto Livre	1,0 x 0,5 m
# C7	Classificação segundo (Gutiérrez et al., 2014)	Múltipla Escolha	Sufusão, Subsidência de solo, Subsidência
# C8	Morfologia Bogli (1980) e Angel et al (2004)	Múltipla Escolha	Simétrica, Assimétrica, Assimétrica estrutural
# C9	Cobertura	Múltipla Escolha	Solo, Edificação, Entulho, Vegetação, Estrada
# C10	Uso e Ocupação do solo no local	Múltipla Escolha	Edificações urbanas; Plantio de árvores com
# C11	Feições Indicadoras vistas em campo próximo ao local	Múltipla Escolha	subsídências no terreno, colapsos no terreno
# C12	Idade e Atividade	Única Escolha	> 1 ano ou < 1ano, Ativa ou Inativa
# C13	Possíveis Fatores Deflagradores Naturais e Induzidos antrópicamente	Texto Livre	Geologia local, Atividade rural, Atividade M
# C14	Outras informações relevantes	Texto Livre	Segundo relato de pessoa x

Figura 12: Modelo de ficha para descrição das feições cársticas em campo, inseridas no software VICON (2022).

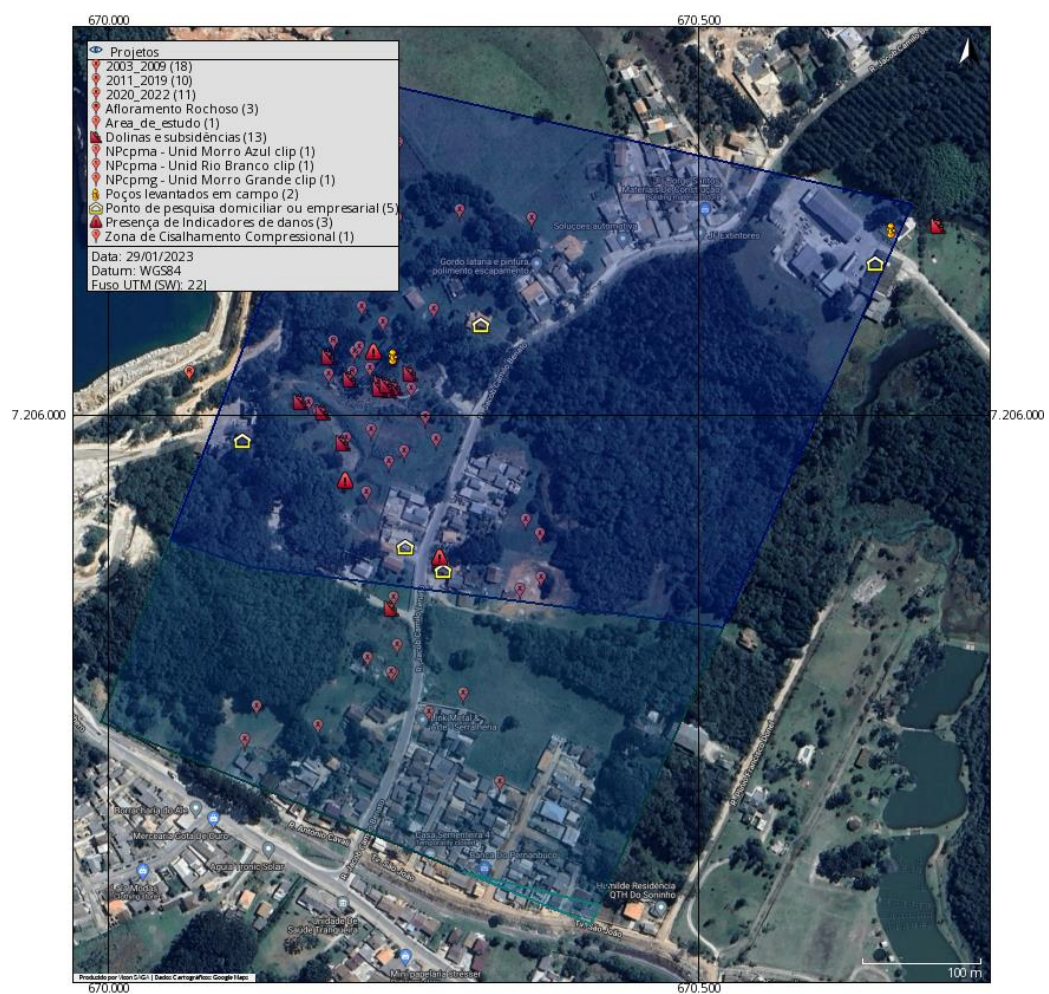


Figura 13: Mapa produzido através do software VICON com dados das ocorrências dos processos perigosos associados ao carste na região de Tranqueira, Almirante Tamandaré.

Fonte: VICON (2023).

4.1 HISTÓRICO DE OCORRÊNCIAS

O resumo dos dados históricos sobre as feições de colapso e subsidência associadas ao carste na área de estudo (desde 2003 a 2022) estão reunidos e projetados nas figuras temáticas, com intuito de permitir a visualização espacial dos mesmos, que retratam feições que por vezes já não se encontram com a morfologia original, ou nem mesmo expostas em superfície para identificação atual de possíveis processos atuantes (Figura 14). Estes dados constituíram importante ferramenta de auxílio em campo para procura das possíveis regiões com colapsos de solo antigos.

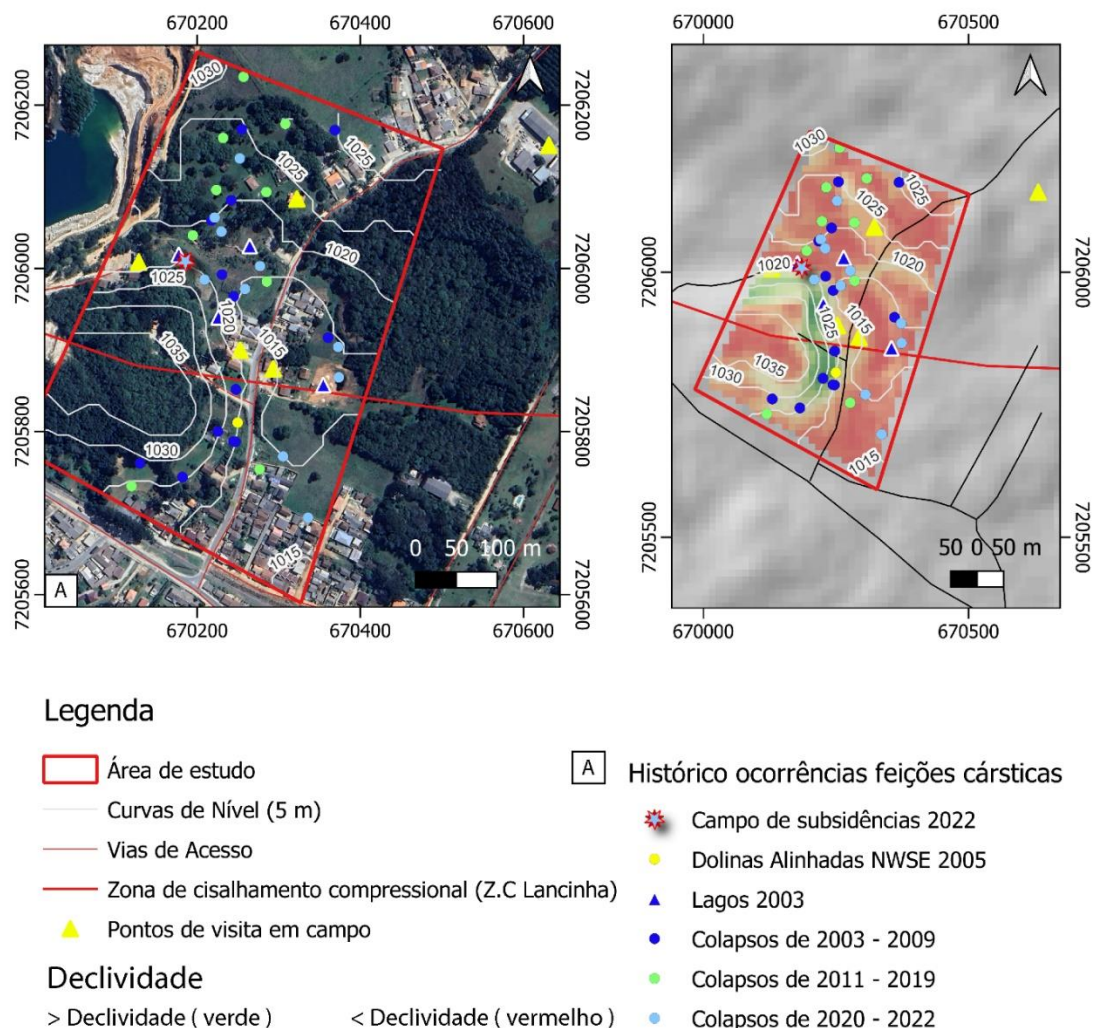


Figura 14: Área de estudo contendo histórico prévio das ocorrências antigas de estruturas cársticas como dolinas e lagos e valores de declividade, demonstrando maior concentração dos colapsos nos locais com menor declividade (em tons vermelhos vermelho). Fontes: Histórico através de Imagem Satélite Google Earth, (2003 – 2022).

4.2 PROCESSOS CÁRSTICOS PERIGOSOS, OBSERVADOS EM CAMPO

Foram realizados o total cinco pontos de visitação residencial e industrial para consulta em campo, com entrevistas aos moradores locais e coleta de dados acerca das feições observadas. Também foram identificados três pontos com exposição de afloramento rochoso, compostos por mármore calcítico de cor branca, com bandamento marcado por intercalação de porções carbonáticas e quartzosas (Figura 15). Bandas claras CaCO_3 possuem textura equigranular fina a criptocristalina, e bandas cinza textura inequigranular fina havendo concentração de cristais maiores (mm) de quartzo. Rocha altamente reagente ao HCl (10%). Mineralogicamente composta por: (60 %) calcita, (40 %) quartzo, (10 %) talco, litologia identificada como mármore calcítico.



Figura 15: (A) Afloramento rochoso (2), (B) Mármore Calcítico de cor branca, com bandamento marcado por intercalação de porções Carbonáticas e Quartzosas. Destaque em linhas vermelhas para o bandamento Sn. Fonte: Fotos Lima R.E., novembro (2022).

Dentre as estruturas tectônicas observadas estão Sn paralela ao bandamento composicional S0 que é marcado por intercalações mm a sub mm entre bandas claras ricas em carbonato e outras cinzas ricas em quartzo. Ocorrem também dobras assimétricas de pequeno porte e fraturas de direção NE, mas preferencialmente NW sendo esta a direção das fraturas mais expressiva na carstificação local (Figura 16).

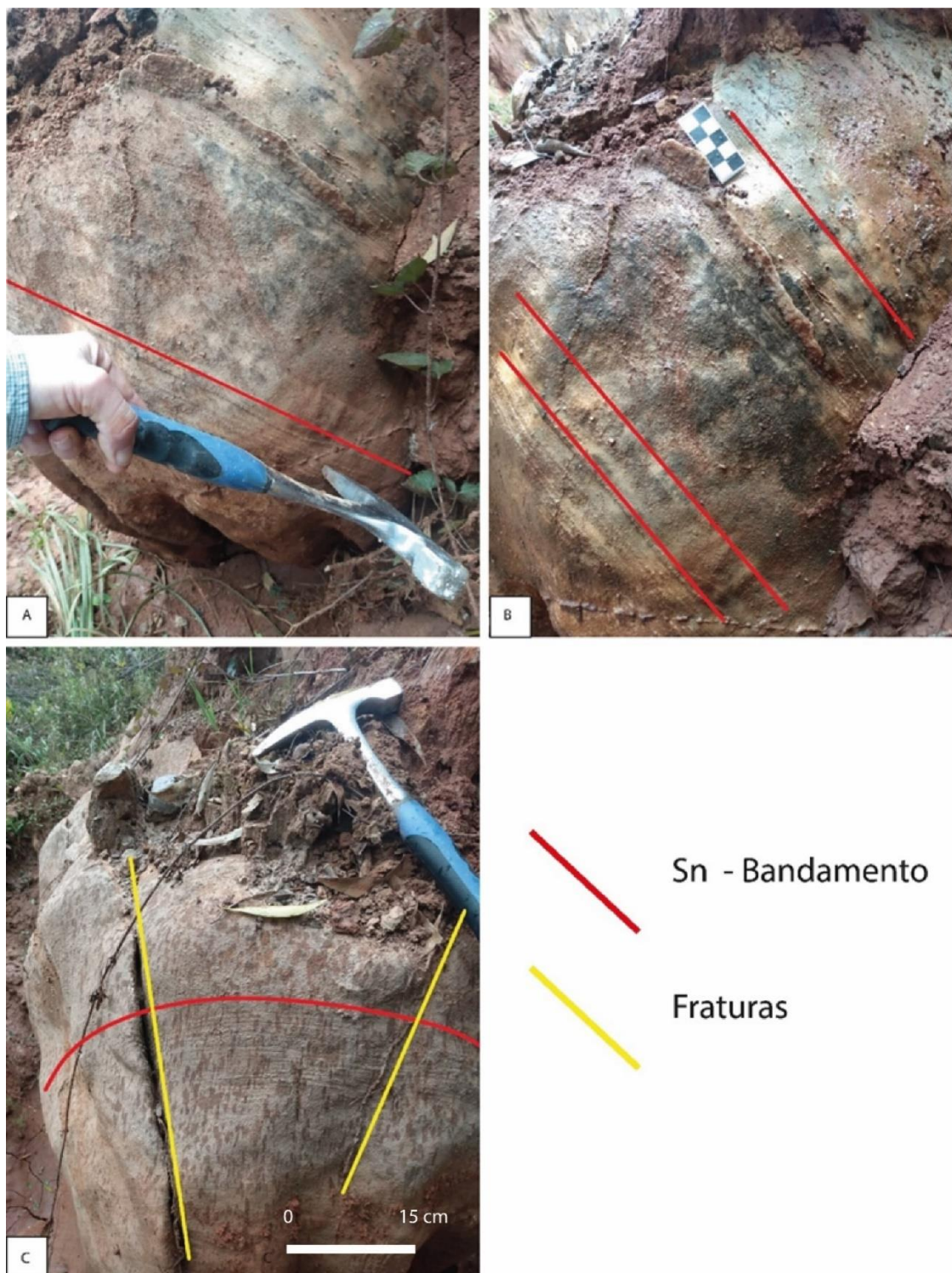


Figura 16: (A) Mármore Calcítico de cor branca e estrutura bandada, (B) Destaque para bandamento S0 marcado por intercalação de camadas mm a cm de carbonato (branca) e quartzo (cinza) e (C) Visão 3D do afloramento, é possível observar inclinação das camadas e ainda fraturas destacadas em amarelo.

O solo local é classificado segundo mapa de solos 1: 2.000.000 ITCG (2008) como Latossolo, o que se confirmou em campo ao serem observadas espessas camadas de solo, este material tende a ser poroso, de fácil intemperismo e friável (EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2021), este fato corrobora com a abundância das feições de colapso e subsidência de solo identificadas em campo. No total foram descritas dez dolinas e dois campos de dolinas, dentre os processos atuantes podemos dizer que há sufusão e subsidências em menor quantidade, ocorrendo principalmente os processos de colapso no solo, com desenvolvimento rápido as vezes envolvendo material rochoso. Segundo classificação proposta por Gutiérrez *et al.*, (2014) de acordo com processos e material envolvidos, estas feições foram então classificadas como dolinas de sufusão, subsidência e com maior número ocorrências de dolinas com colapso de solo principalmente (Figura 17).

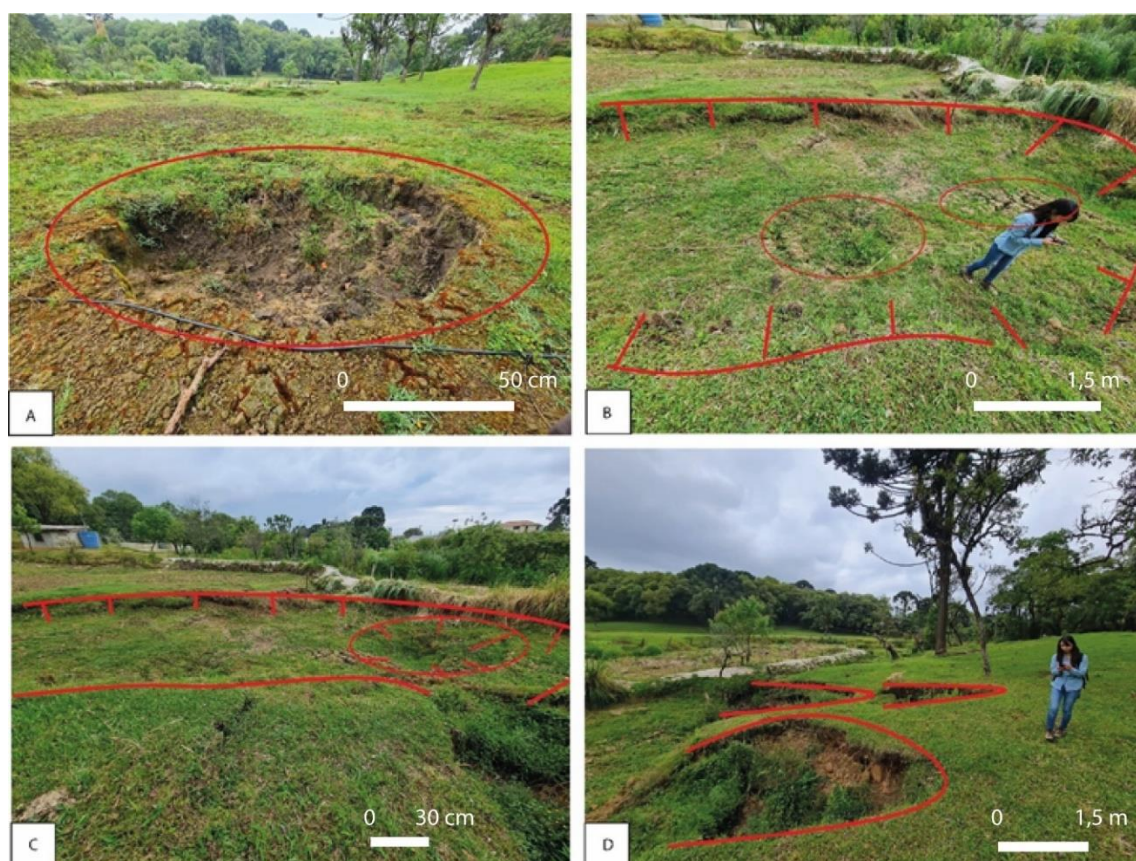


Figura 17: Feições de colapso destacadas em vermelho. (A) Dolinas colapso de solo, (B) e (C) Dolinas compostas e de subsidência de solo, colapso eminente, (D) Destaque para os colapsos que delimitam as feições de dolinas. Fonte: Fotografia Renato Eugenio de Lima, novembro 2022.

Conforme as classificações morfológicas escolhidas (Bögli, 1980 e Angel *et al.*, 2004) foram identificadas em campo dolinas com formatos diversos, em sua maioria assimétricas, com forma ovalada a alongada, mas também dolinas simétricas e assimétricas (Figura 18). Possuem em média 0,5 a 2 m de profundidade e diâmetros de 1 a 7 m, a maior parte com 3 a 4 m. As dolinas foram classificadas também segundo (Angel *et al.*, 2004) como feições singulares, simples ou complexas com ocorrência de dolinas mais recentes e menores dentro de antigas dolinas maiores, formando como por exemplo o que foi identificado em campo no ponto 2, como dois campos de dolinas em subsidência ainda maior que compõem antigo lago no local (Figura 19). Vale ressaltar que todas estiveram ativas a menos de 1,5 anos e apresentam fundo seco pois toda rede hídrica foi capturada para o subsolo.



Figura 18: Dolinas por Colapso de Solo (A) Simétrica e Simples, (B) Assimétrica estrutural e Simétricas alinhadas indicando controle estrutural, (C) Assimétrica estrutural e (D) Assimétrica Estrutural. Fonte: Fotos Lima. R.E., novembro (2022).

Em alguns casos não há feições de colapso na superfície do terreno, porém há feições indicadoras de movimentação do solo, como inclinação de postes, cercas, ou então rachaduras em casas, estradas, entre outros, sendo assim interpreta-se que existem processos ativos atuantes porém com velocidades de desenvolvimento mais lentas, podendo estar correlacionadas aos processos de sufusão, em que o solo vai sendo drenado para canais subterrâneos promovendo pequenas subsidências na superfície com o decorrer do tempo, até possivelmente evoluir e passar a envolver processos de colapso também.



Figura 19: Dolinas de Colapso e processos de sufusão no solo, destacados em vermelho. (A) Campo de dolina Norte, (B) Destaque para dolinas alinhadas, indicativo de controle estrutural. (C) Campo de dolinas Sul. Consideradas assimétricas estruturais e simétricas, e ainda como um sistema complexo. Fonte: Fotos Lima, R.E. novembro 2022.

Ao realizar visitação à empresa água mineral Timbu Ltda. (ponto de visitação técnica 5) foram identificadas surgências de água em lagoas no local, que são preservadas para estudos de qualidade da água, e extração da mesma para comercialização. No local há também poço hídrico artesiano com vazão média de 200 - 300 m³/h. O outro poço identificado em campo está no ponto 1, porém o estado atual é seco e não há dados antigos de monitoramento. Nesta situação foi discutida a hipótese de interferências antrópicas como modificações de drenagem e mineração, na produção da empresa.

Durante a etapa de campo foram encontradas feições indicativas de processos cársticos ativos do sistema cárstico em ao menos quatro locais, ocorrendo de maneira mais intensa e ficando mais claramente visíveis no ponto de visitação residencial 3, onde o imóvel apresenta rachaduras centimétricas na parede, bem como deslocamentos e rachaduras no chão (Figura 20). Dentre os principais indicadores registrados em campo estão: Subsidências, sumidouros, colapsos no solo (Figura 21), e rede hídrica capturada para o subterrâneo com consequente estiagem dos antigos poços hídricos de abastecimento e antigas drenagens locais. E por fim foram identificados locais com danos a vias de acesso e inclinação de cercas (Figura 22).

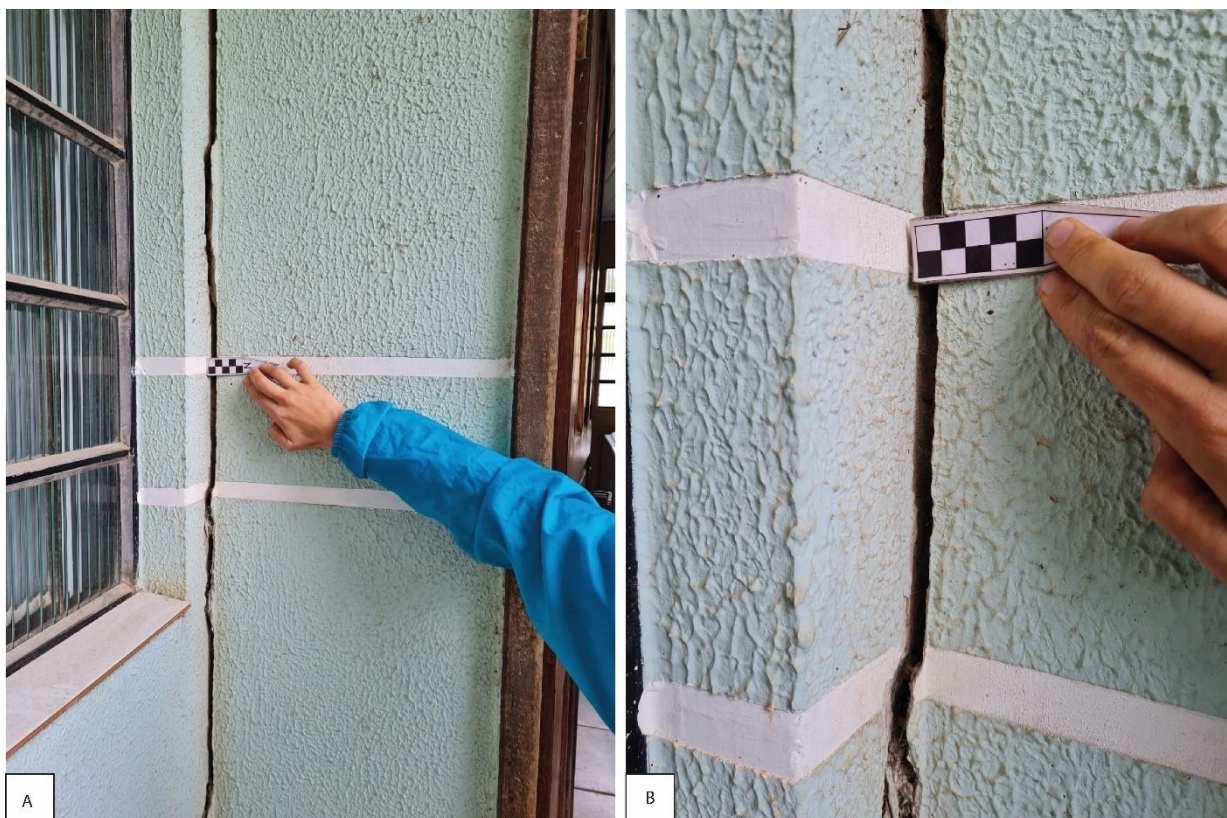


Figura 20: (A) e (B) Feições indicativas de processos ativos no local, rachaduras cm nas paredes do imóvel. Fonte: Fotos Lima, R.E. novembro 2022.

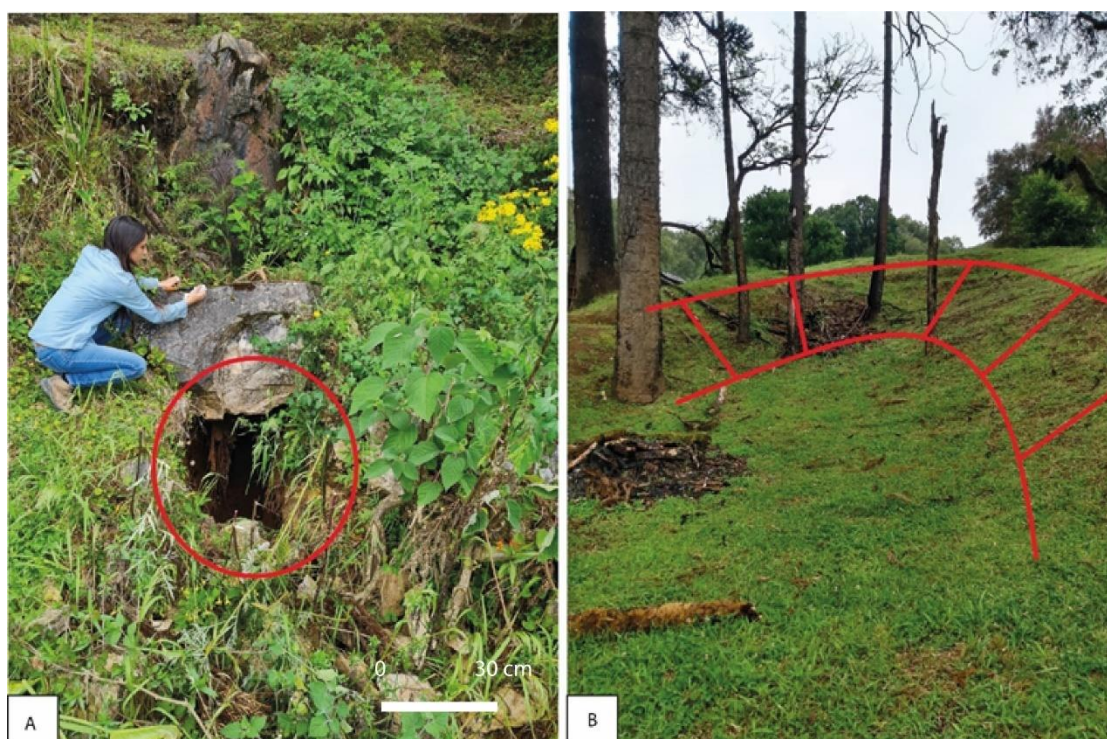


Figura 21: Feições indicativas de processos cársticos ativos no local. (A) Sumidouro, (B) Subsidiências na superfície do terreno da propriedade 1. Fonte: Fotos Lima, R.E. novembro 2022.

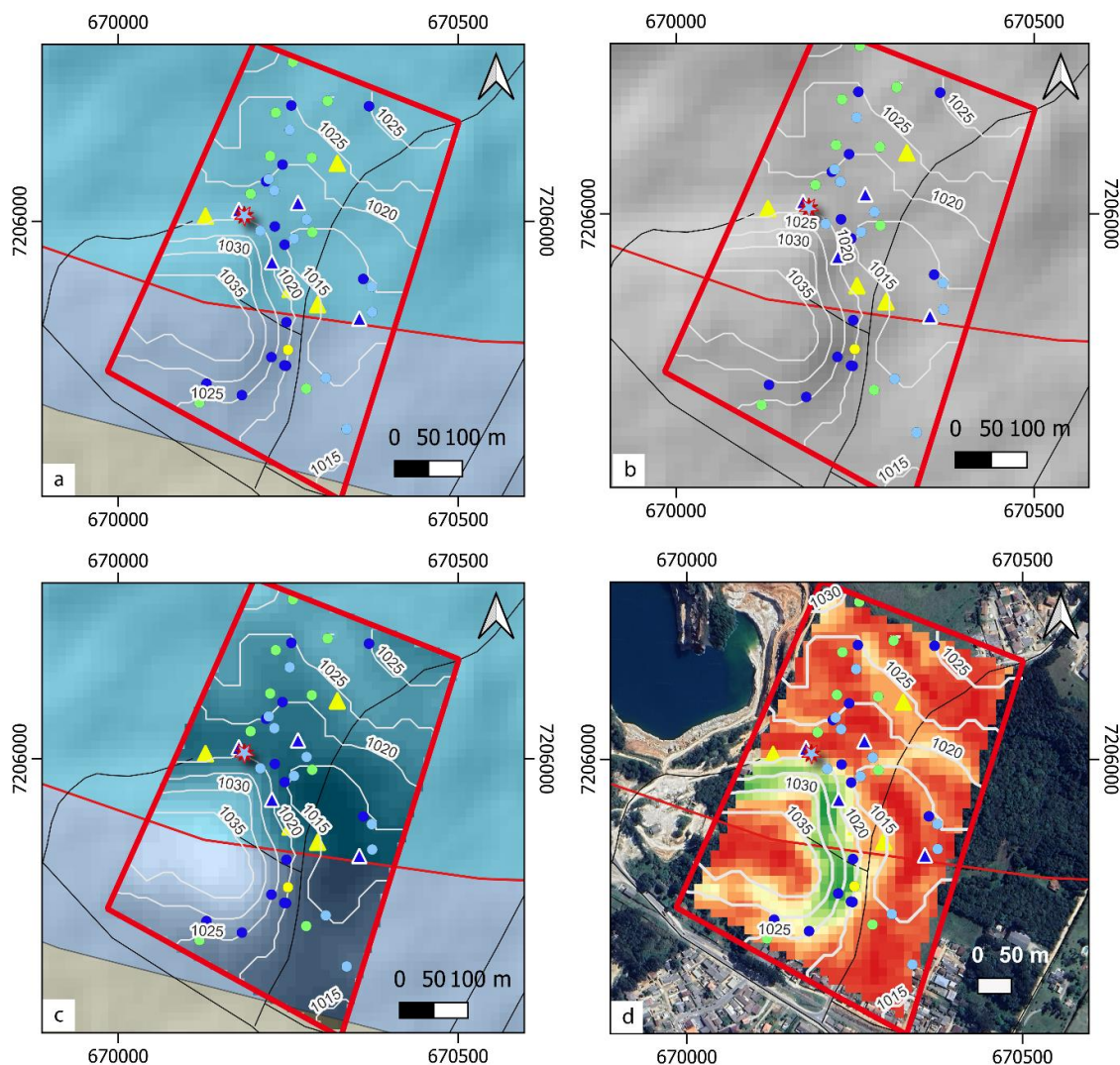


Figura 22: Dolina Colapso de solo próximo a via de acesso, e outras feições indicadoras como inclinação de postes e cercas.

Todos os locais de visitação em campo com identificação das feições de processos perigosos relacionadas ao carste estão dispostos conforme (Figura 13), resumidos e representados em (Anexo 1 e 2). Nestes documentos constam identificação e localização dos pontos, descrição das feições e estruturas, com caracterização e classificação das mesmas, dados de locais com indicadores dos processos de movimentação no solo ativos e dados de poços identificados em campo.

4.4 MAPAS TEMÁTICOS

Para melhor observação e compreensão do terreno foram geradas figuras temáticas como MDE, relevo sombreado e declividade (Figura 23). Onde podemos observar que os valores baixos na superfície são representados em tons mais escuros tanto no MDE quanto em relevo sombreado, e na figura de declividade estes serão representados em tons vermelho que são de baixa declividade, ou seja, locais mais planos, os valores em verde irão representar as altas declividades. As ocorrências de dolinas registradas no histórico prévio ocorrem concentradas principalmente nestas regiões de baixa declividade ou representadas como baixos no terreno.



Legenda

 Área de Estudo



Campo subsidências 2022



Dolinas Alinhadas NWSE 2005



Lagos 2003



Colapsos 2003 - 2009



Colapsos 2011 - 2019



Colapsos 2020 - 2022



Curvas de Nível (5 m)



Vias de Acesso



Zona de cisalhamento compressional (Z.C Lancinha)



Pontos de visita em campo

Unidades Geológicas da área estudada

NPcpma

NPcpmg

NPcprb

a - Relevo Sombreado e Unid Geológicas

b - Relevo Sombreado

c - Filled DEM

d - Declividade

< Baixa declividade em vermelho

> Alta declividade em verde

Figura 23: Figuras para análise do terreno, contendo histórico prévio de ocorrências. (a) Relevo Sombreado e unidades geológicas, (b) Relevo Sombreado, (c) DEM Mapa Digital de Elevação e (d) Declividade. Fonte: Dados do DEM, imagens de satélite ALOS PALSAR; outras figuras e curvas topográficas foram geradas no software QGIS 3.26.3, Imagem de Satélite Google Earth (2022) e dados geológicos CPRM (2021).

Através dos dados de uso e ocupação pode se observar que a área de estudo é composta majoritariamente por atividade agrícola, em sua parte sul e sudoeste contêm porção que deveria ser de cobertura florestal, porém o avanço da expansão na ocupação urbana local demonstra que esta não é a realidade, ocorrendo nesta porção que deveria ser de cobertura florestal atividade minerária (Figura 24, a).

Os dados das unidades aquíferas do Paraná indicam a presença do aquífero Karst em toda área de estudo e regiões no entorno (Figura 24, b). Ao analisar o mapa de planejamento para uso e ocupação com relação a influência ao aquífero carste, observa se que a área de estudo está inserida em zona de influência direta ao aquífero Karst em local de proposta para ocupação com reversão de uso urbano para área rural e algumas áreas com restrição a ocupação e determinação de proteção ambiental (COMEC – Mapa 1:50000, 2002) (Figura 24, c).

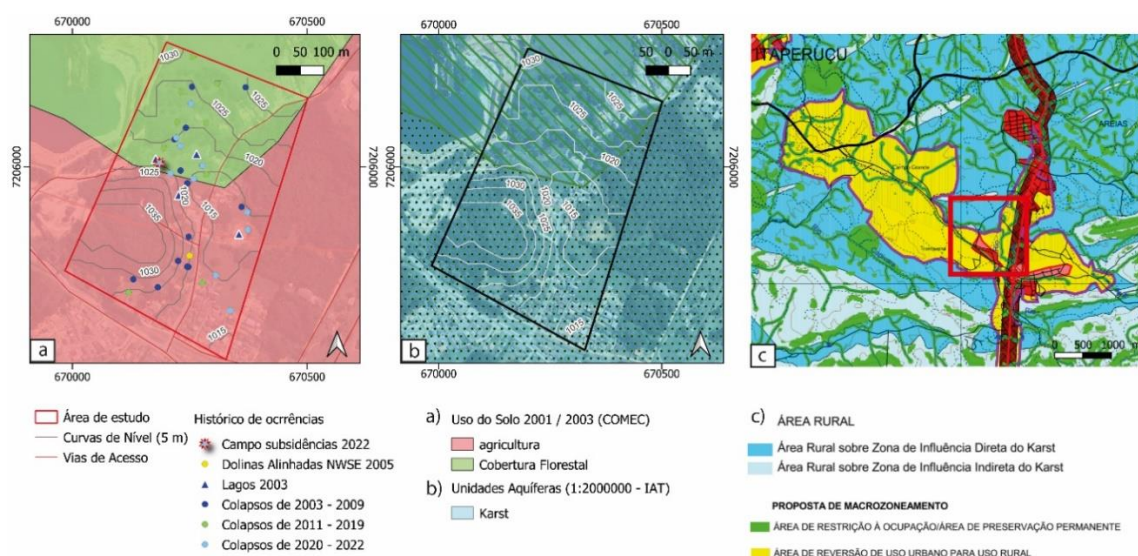


Figura 24: (a) Figura uso e ocupação do solo, (b) unidades aquíferas (karst) e uso dos solos em hachuras e (c) Figura zonas de influência direta e indireta sobre aquífero Karst. Fonte: Dados uso do solo COMEC (2003), Unidades aquíferas ITCG (2008) e Zonas de influência ao aquífero COMEC (2002).

Segundo os dados da ANM, vemos que há ao menos cinco processos minerários na área de estudo envolvendo substâncias como calcário calcítico, mármore e dolomito (Figura 25, a). Com usos para fabricação de cimento, revestimento e corretivo de solo respectivamente (Figura 25, b). Atualmente estas áreas encontram se em direito de requerer lavra e apta para disponibilidade nos locais de calcário calcítico. Autorização de pesquisa para a área de mármore e concessão de lavra para dolomito (Figura 25, c). A mineração local pode influenciar de diversas maneiras no desenvolvimento dos processos cársticos locais, através do uso de explosivos para extração de material rochoso, bombeamento hídrico excessivo entre outros.

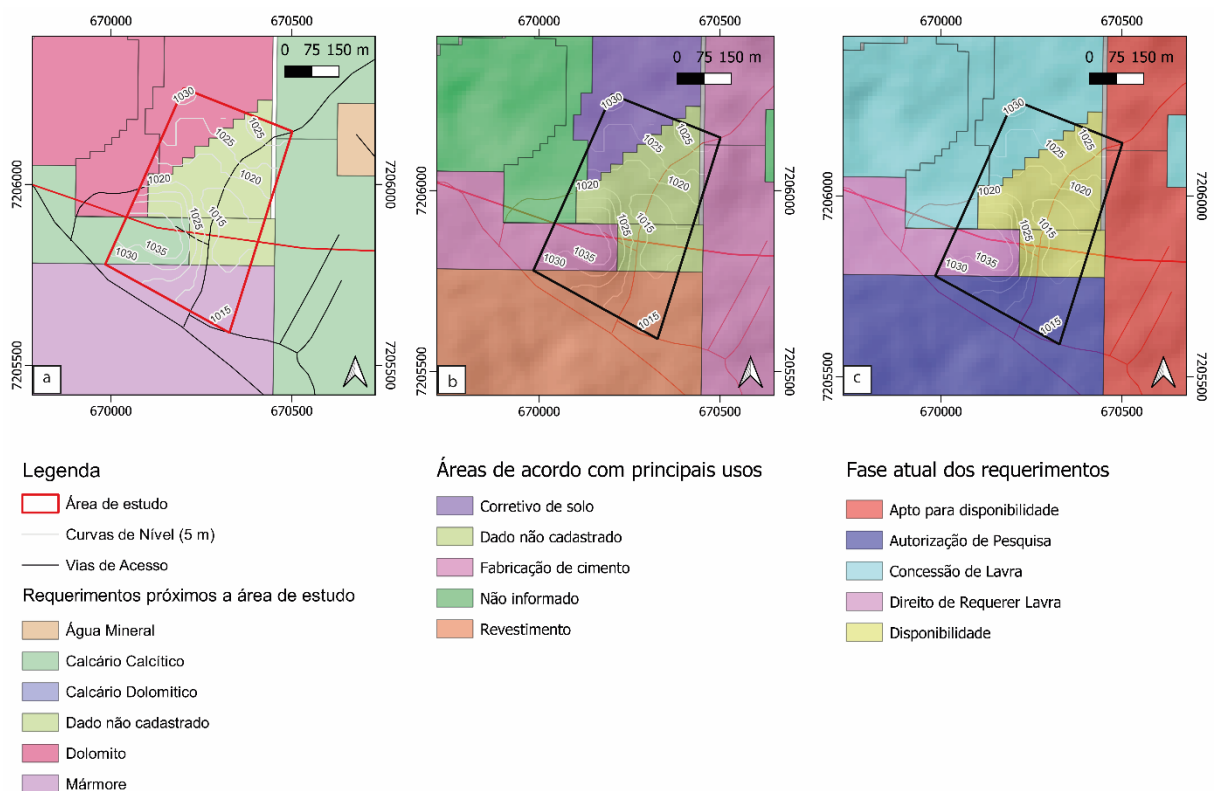


Figura 25: Figura relacionada a atividade minerária na área de estudo. (a) Substâncias requeridas, (b) Principais usos e (c) Fase atual dos requerimentos. Fonte: Dados mineração ANM (2022).

4.3 PLUVIOSIDADE

Foram obtidos registros de pluviosidade dos meses próximos à ocorrência dos últimos eventos de colapso na região (no ano de 2022), e também dados de meses atuais para comparação (Gráfico 1). Organizados e representados em gráfico de barras que permite observação do nível médio de pluviosidade para cada mês, e possibilita identificação de padrões de comportamento pluviométrico ao decorrer do tempo bem como possíveis correlações climáticas com a gênese das dolinas.

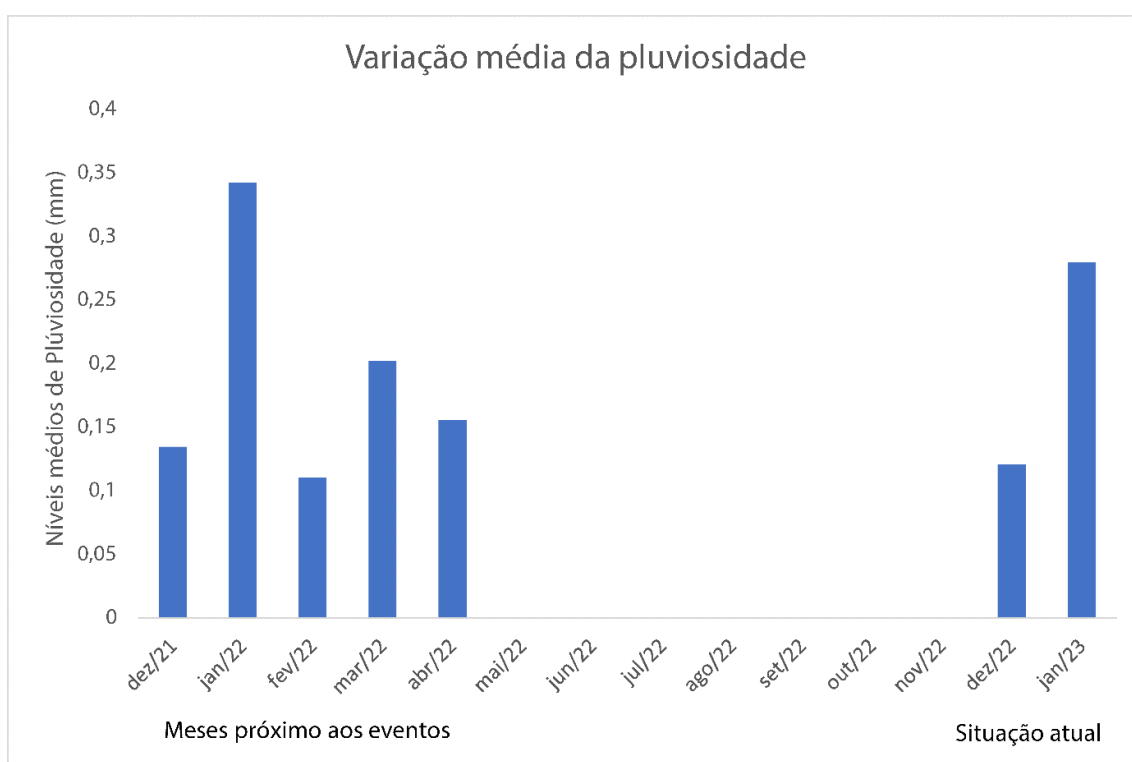


Gráfico 1: Níveis médios de Pluviosidade de acordo com os meses selecionados próximos aos eventos de colapso no solo estudados e situação atual. Fonte: Dados estação pluviométrica Tranqueira, CEMADEN (2021 a 2023).

O valor médio de pluviosidade mensal para todos os valores de meses selecionados é 0,20 mm. A média de dezembro e janeiro 2021/2022 é 0,23 mm e a de dezembro e janeiro 2022/2023 é 0,18 mm. Demonstrando que nas datas próximas as ocorrências dos eventos de colapso no solo os valores médios de pluviosidade estavam maiores do que o mesmo período de meses, porém no ano seguinte. E a

média entre estes mesmos meses é de 0,21 mm o que concorda com a média geral de 0,20 mm e nos mostra que os valores estão dentro do padrão esperado para este período no ano. Vale ressaltar que no mês de ocorrência dos colapsos, em janeiro de 2022 o nível médio de pluviosidade era de 0,34 mm, ou seja, acima da média. Com tendência de queda e depois tendendo a normalidade conforme fevereiro e março respectivamente.

5. DISCUSSÃO

No levantamento prévio do histórico de ocorrências das subsidências e colapsos na região estudada, foram identificados 12 colapsos 2003 - 2009 (6 anos), 9 colapsos 2011 - 2019 (8 anos) e 10 colapsos 2020 - 2022 (2 anos) conforme (Gráfico 2), indicando que a intensidade da atividade no sistema é variável conforme fatores externos e climáticos. Nos últimos dois anos houve uma grande densidade de ocorrências novas em curto período de tempo, demonstrando que os processos estão ativos e ocorrendo de maneira acelerada.

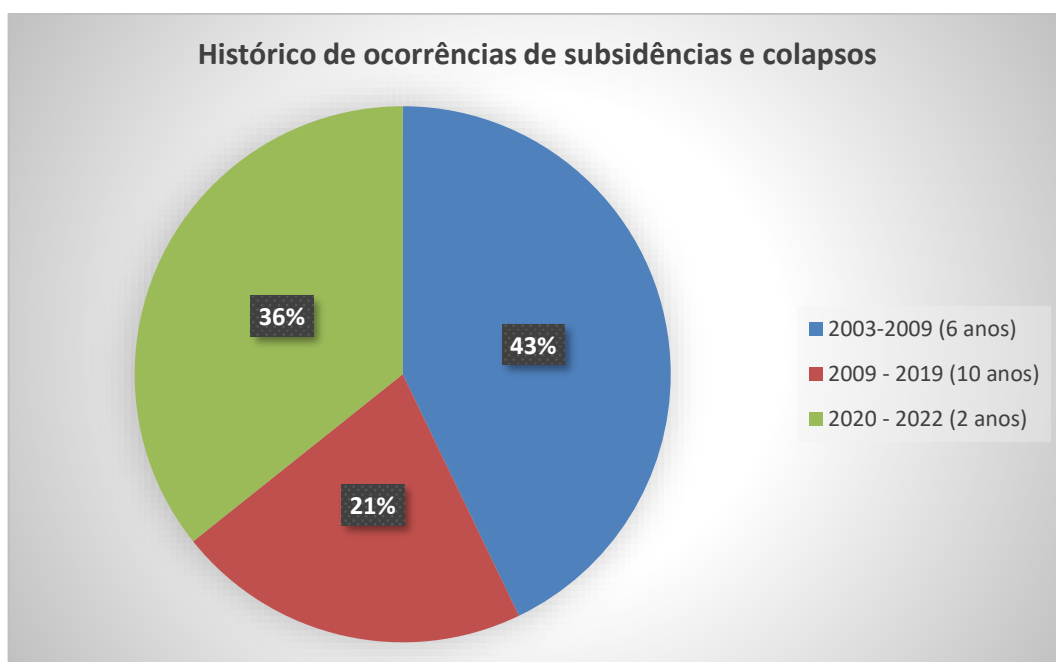


Gráfico 2: Frequências de ocorrências das subsidências e colapsos em série histórica desde 2003 a 2022. Fonte: Dados obtidos a partir de imagem de satélite no software Google Earth (2003 a 2022).

Foram registradas o total de 13 estruturas e feições associadas aos processos cársticos em campo, e apenas duas estiveram ativas a mais de um ano, as outras 12 feições identificadas estiveram ativas a menos de um ano, ou seja, são resultantes de processos com atividade recente conforme indicado por (Gráfico 3).

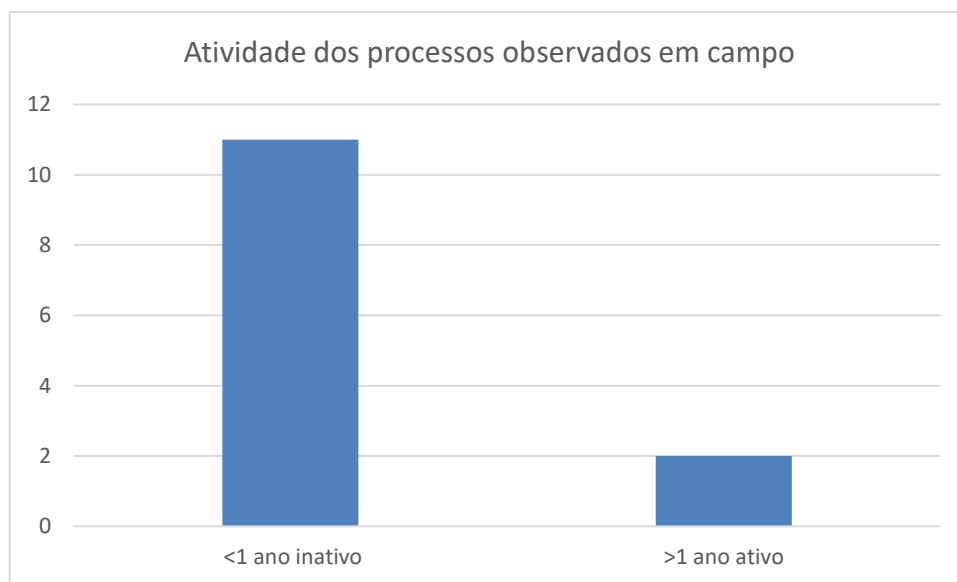


Gráfico 3: Idade de última atividade dos processos atuantes no local estudado. Fonte: Dados de campo VICON SAGA (2022).

Foram descritos dois afloramentos compostos por mesma litologia, de Mármore Calcítico com cor branca, estrutura variando de maciça a bandada, isto corrobora com as litologias de mármore calcítico, metadolomitos, mármore impuros e calcarenitos da unidade Rio Branco, pertencente a Formação Capiu conforme descrito por Santos (2017).

Estas litologias contêm minerais como calcita e dolomita, que possuem alta solubilidade o que por si só favorecem a ocorrência natural de cavidades de dissolução e subsidências no terreno. Outras unidades identificadas na área de acordo com dados litológicos CPRM (2021) são: Metadolomitos, mármore dolomíticos, metamargas, metapelitos, Quartzitos, da Unidade Morro Azul e no extremo sudestes da área metassiltitos, metarritmitos, metarenitos quartzosos, metargilitos, pertencentes a unidade Morro Grande. Do total de 13 ocorrências das feições de colapso e subsidência associadas ao carste registradas em campo, apenas uma dela está relacionada mármore dolomíticos da unidade Morro Azul e as outras

12 ocorrem associadas aos mármore calcíticos e dolomíticos da unidade Rio Branco, conforme (Gráfico 4).

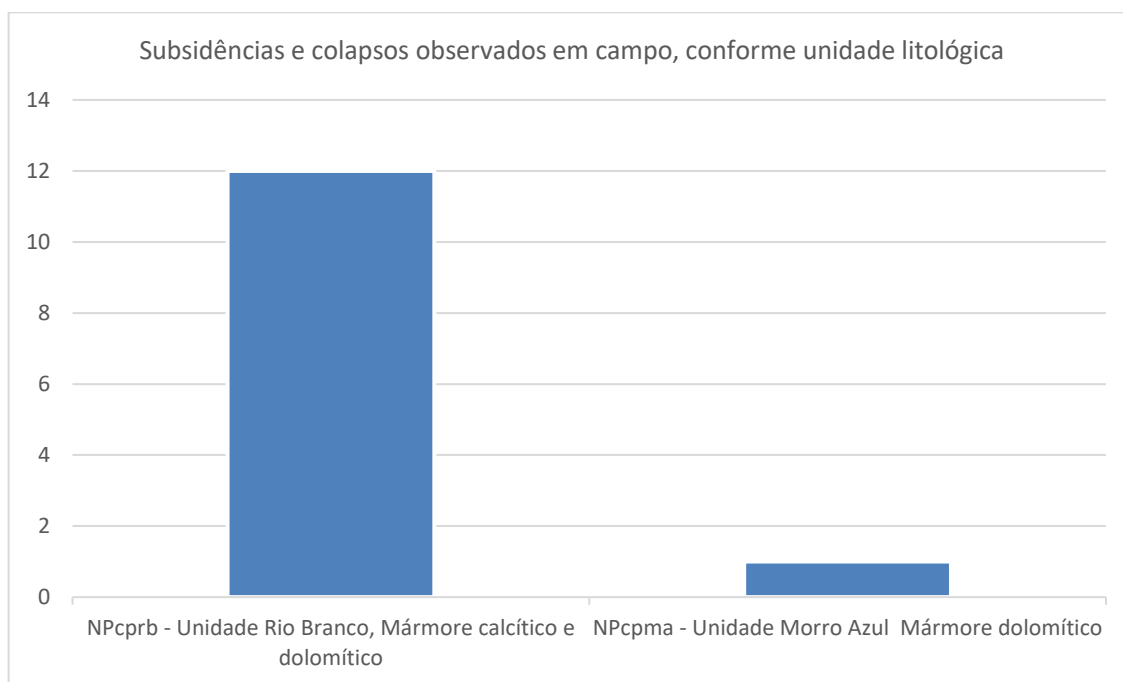


Gráfico 4: Ocorrência dos colapsos e subsidências identificados em campo com relação a unidade litológica. Fonte: Dados ocorrências, VICON (2022) dados unidades litológicas CPRM (2021).

Conforme explicado no capítulo 2 locais com litologias compostas por minerais como a calcita, são predispostos a dissolução natural e formação de cavidades e colapsos. A composição litológica é um dos fatores controladores mais importantes, porém não o único que irá controlar o avanço dos processos de carstificação e consequentes colapsos em determinada região (Ford e Williams, 2007). Sendo assim pode se considerar que a litologia encontrada em campo bem como as identificadas a partir de dados geológicos CPRM (2021), são considerados fatores controladores no desenvolvimento do sistema cárstico local.

Outro fator de importância são as estruturas tectônicas presentes, pois estas conforme descrito por Bögli (1980) podem agir como planos, canais preferenciais de percolação dos fluídos, com gênese controlada por descontinuidades como planos de foliação, falhas e fraturas, conferindo aspecto alongado por vezes orientado as dolinas, no sentido destas estruturas tectônicas. A área de estudo é seccionada na porção meridional por zona de cisalhamento compressional, que está relacionada a

zona de cisalhamento da Lancinha, mais a norte da região conforme dados geológicos estruturais CPRM (2021).

Esta zona de cisalhamento compressional apesar de estar associada a ZCL Zona de Cisalhamento da Lancinha com direção geral NE/SW, possui direção aproximada EW no local. O que condiz com a direção da foliação metamórfica Sn, variando de NW a EW com inclinação de mergulhos para sul, e trends direcionais das fraturas NW, N e NE.

Na área de estudo as dolinas assimétricas estruturais foram o principal tipo identificado, porém ocorrem também dolinas simétricas próximas conforme (Gráfico 5). Pode se observar também que as dolinas apresentam em sua maioria formato alongado a ovalar, indicando o controle estrutural no desenvolvimento destas feições cársticas. Também ocorrem dolinas circulares.

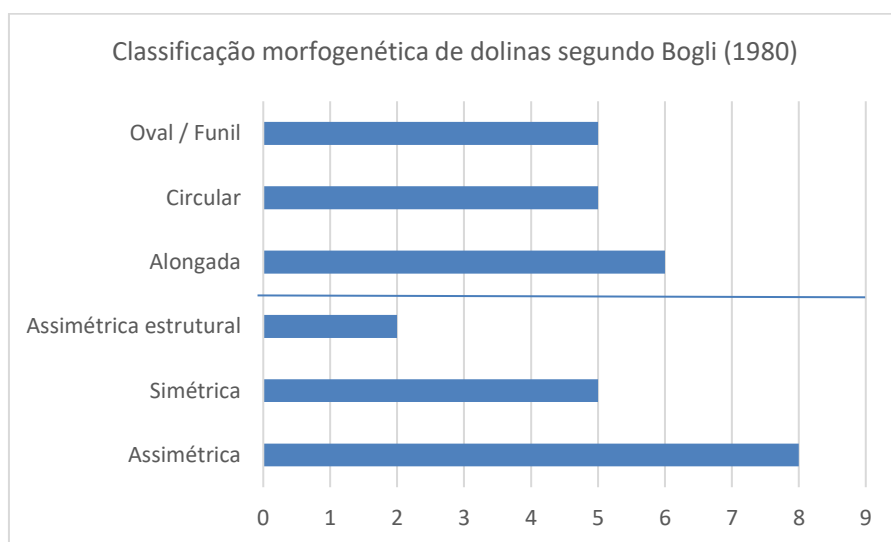


Gráfico 5: Divisão das ocorrências de dolinas registradas em campo de acordo com classificação proposta por Bögli (1980). Fonte: Dados registrados no Vicon (2022).

As dolinas identificadas em campo foram classificadas morfogêneticamente, como: Dolinas simples e complexas principalmente. Ocorrem dois campos de dolinas, que podem ser classificados como dolinas compostas (Gráfico 6). Os tamanhos encontrados são diversificados com em média 0,5 a 2 m de profundidade, em sua maioria 3 a 4 m de diâmetro, ou seja, colapsos desde pequeno a médio porte. Estas observações demonstram a evolução da carstificação local devido a considerável número de ocorrências, formas e estágio de evolução das feições observadas em campo.

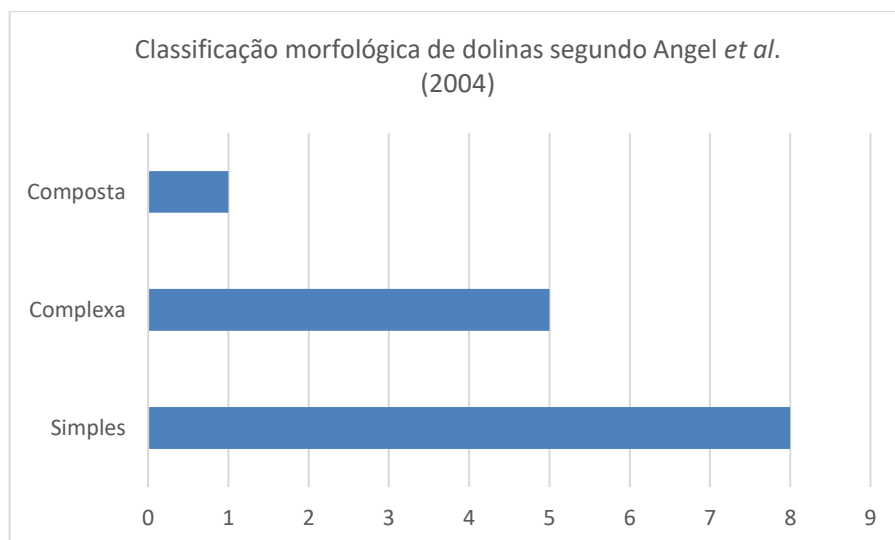


Gráfico 6: Divisão das ocorrências de dolinas registradas em campo de acordo com classificação proposta por Angel *et al.* (2004). Fonte: Dados registrados no Vicon (2022).

As feições identificadas e descritas em campo foram classificadas em Dolinas de colapso, seguidos da sufusão sendo a subsidência menos recorrente; e dentre os materiais envolvidos nos processos estudados está majoritariamente o solo, mas por vezes pode haver material rochoso mobilizado (Gráfico 7). Estes colapsos ocorrem de maneira rápida a instantânea conforme indicado por (Gráfico 8).

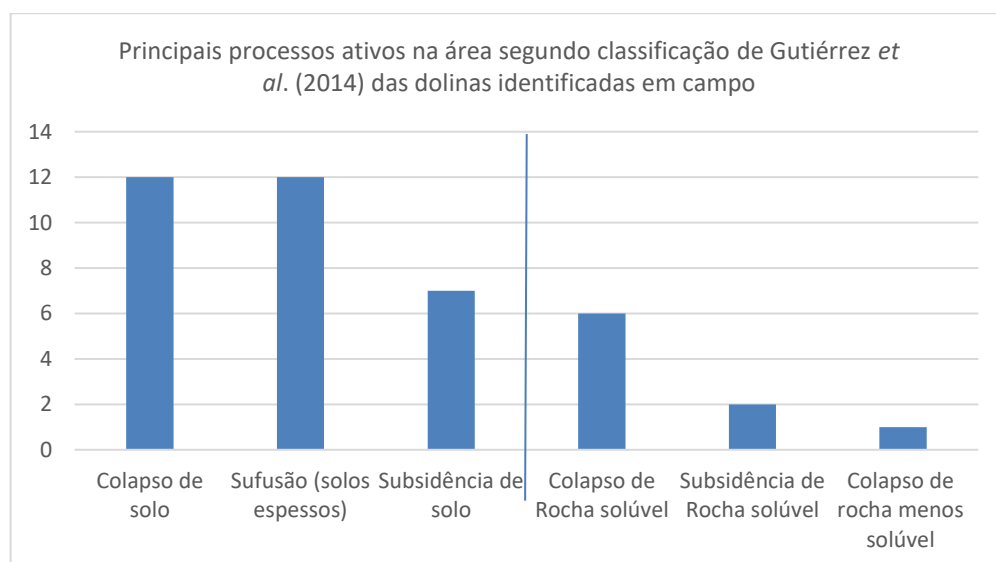


Gráfico 7: Divisão das dolinas registradas na etapa de campo de acordo com processo atuante e material envolvido conforme classificação de Gutiérrez *et al.* (2014). Fonte: Dados registrados no Vicon (2022).

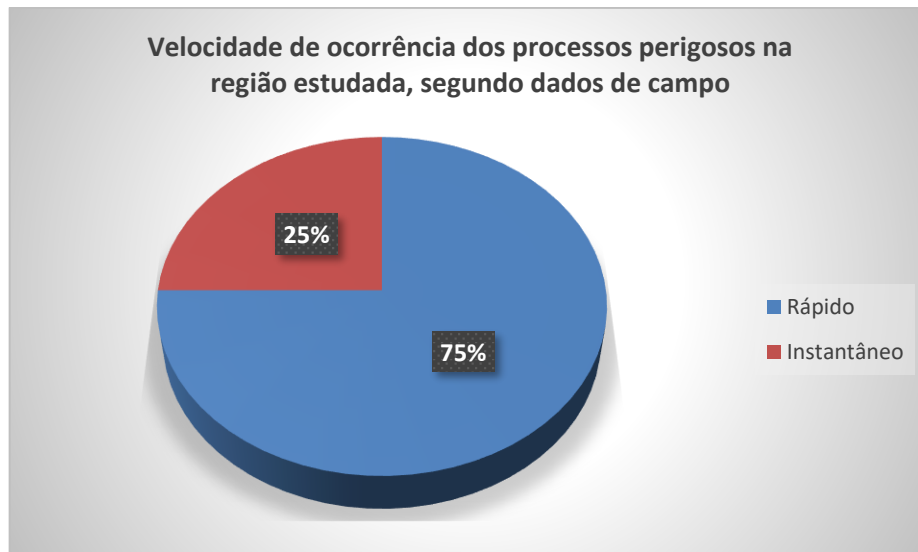


Gráfico 8: Velocidade de ocorrência dos processos perigosos de subsidências e colapsos na área de estudo, segundo dados obtidos em campo. Fonte: Dados registrados no VICON (2022).

No ponto 3 não há feição de colapso, porém ocorre a presença de feições indicativas de movimentação do solo, como rachaduras nas paredes e piso de moradia indicando movimentação ativa, porém de ocorrência mais lenta, podendo estar relacionados a processos no subsolo de sufusão. O (Gráfico 9) produzido automaticamente no VICON apresenta a distribuição de frequência de estruturas e outros indicadores de processos cársticos na área estudada, onde se observa que 59% dos registros são dos tipos colapsos, danos em estruturas e subsidências.

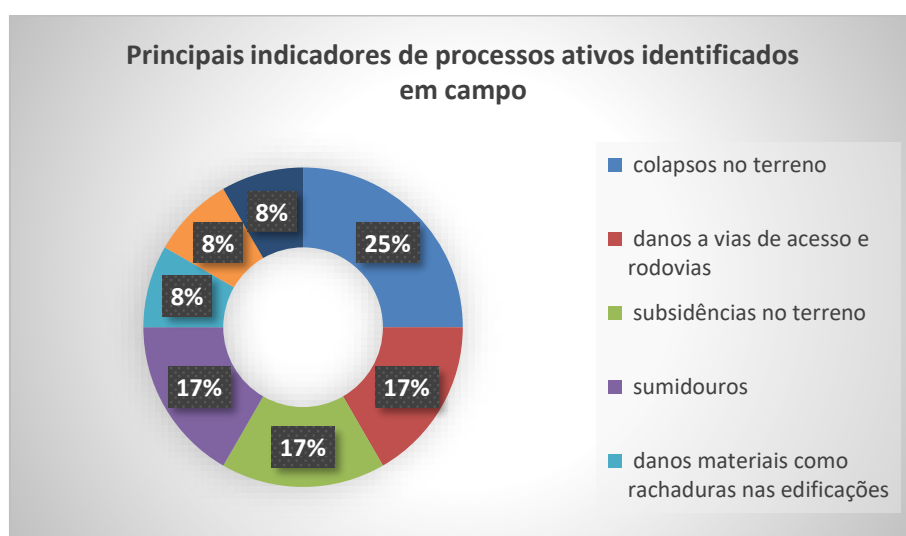


Gráfico 9: Indicando principais feições indicativas de processos ativos observados em campo. Fonte: Dados registrados VICON (2022).

No local estudado foram identificados sumidouro e poço semi artesiano atualmente seco, pois na data de ocorrência das últimas subsidências todo o fluxo hídrico da região foi capturado e drenado para níveis subterrâneos secando os corpos hídricos locais. O único poço artesiano registrado que não se encontra seco está contido na empresa de Água Mineral Timbu Ltda., sob manutenção e cuidados da mesma. No local ocorrem também surgências que fornecem água para captação e comercialização da empresa. As Lagoas na empresa Timbu são naturais e apesar de estarem inseridas em empreendimento são muito bem conservadas, já a lagoa presente na cava da mineração próxima a área de estudo é de origem antrópica, e relacionada com a atividade de exploração mineral local.

A pluviosidade é outro fator de grande importância no controle do desenvolvimento das feições de colapso relacionadas ao carste (Gutiérrez *et al.*, 2014), influenciando diretamente no nível freático local. Quando há baixa taxa de pluviosidade pode ocorrer rebaixamento do freático, este rebaixamento pode ser provocado também por bombeamento excessivo para usos diversos como agrícola ou na mineração por exemplo. No local os principais usos da água subterrânea são abastecimento residencial, agrícola, atividade minerária e extração para comercialização. A unidade aquífera presente na área é o aquífero Karst, que é considerado susceptível a contaminações devido alto grau de permeabilidade do sistema hídrico superficial e subterrâneo até o freático (Vestena, Kobiyama e Santos, 2010).

As figuras e mapas temáticos selecionados para análise do local estudado auxiliaram muito na reflexão sobre como os fatores controladores naturais, morfologia do terreno, solos e aquífero local por exemplo quando comparados aos controladores e deflagradores antrópicos como uso e ocupação, principalmente atividade minerária que é intensa na região do estudo. Os dados de declividade e histórico de ocorrências indicam a maior ocorrência de dolinas associadas aos locais de menor declividade planos e baixos no terreno. Os valores em tons verdes que apresentam maiores declividades estão relacionados a encosta de morrote na área, estes acabam se destacando no terreno como feições residuais.

Os dados de uso e ocupação do solo analisados indicam que dentre as 13 ocorrências de dolinas registradas em campo apenas três estão em área de uso

agrícola e as outras dez restantes ocorrem em área que deveria ser de cobertura florestal, mas estão em área com uso residencial, agrícola, pequenos comércios e mineração de calcário. As áreas de cobertura florestal ajudam na manutenção do sistema, diminuem a área exposta aos processos externos, porém na área de estudo a região que deveria ser composta por cobertura florestal tem boa parte ocupada por atividade minerária, que além do bombeamento excessivo e rebaixamento do freático pode causar remobilização dos materiais em níveis subterrâneos através de sismos gerados por explosões e tráfego de veículos pesados.

A ocupação antrópica muitas vezes está associada a mudanças físicas no meio como construções, usos diversos do solo, possíveis contaminações no aquífero e bombeamento hídrico excessivo causando rebaixamento do freático, causando aumento no grau de perigo dos processos que ocorrem naturalmente. Sendo assim a ocupação e uso indevido do solo local podem ser considerados fatores deflagradores.

A região de estudo estando localizada sobre zona de influência direta ao aquífero deveria apresentar maior grau de cuidado no planejamento do uso e ocupação local, evitando riscos de contaminação ambiental e atividades que atuem como fatores aceleradores ou deflagradores dos processos cársticos na região, pois a ocupação residencial vem aumentando com o tempo. Estes dois fatores aumento populacional e aumento das atividades deflagradoras, se combinados oferecem maior grau de perigo ao meio.

As litologias presentes na área de estudo apresentam interesse econômico e possuem usos diversos como fabricação de cimento, revestimento, corretivo de solo entre outros, constituindo assim área de potencial para atividade minerária. Ao consultar os processos minerários (consultar Figura 25) pode se observar que a única área disponível para requerimento, ou seja, livre de atividade minerária está em local de ocupação urbana, todo o restante da região possui requerimentos junto a ANM e nos extremos W e NW da área os processos estão em fase de concessão de lavra, correlatos a mineradora de calcário que vemos em imagem de satélite e que faz divisa com o polígono da área de estudo.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com base nos resultados discutidos acima organizados em banco de dados digital, conclui se que a elaboração de fichas descritivas e uso do software

VICON permitiu registro e descrição das feições em campo de maneira eficiente, facilitando as fases posteriores de processamento e interpretação dos dados, através da confecção de gráficos com dados temáticos como classificações das dolinas identificadas, velocidade e atividade da ocorrência dos processos, quais os principais feições indicativas de processos ativos presentes, entre outros. O levantamento prévio do histórico das ocorrências também foi de grande auxílio em campo, visto que a região vem crescendo em ocupação urbana e os terrenos vão sendo modificados por diversas ações antrópicas, por vezes mascarando antigas feições.

Através dos estudos foi possível observar, que estas feições de colapso são comuns na região e naturalmente fazem parte do funcionamento do sistema geológico local, porém as taxas de ocorrência estão maiores do que em períodos anteriores, isto demonstra que os processos ativos no sistema estão ocorrendo de maneira acelerada. Surge então o questionamento de quais são os fatores que controlam e deflagram estes eventos.

A litologia local é composta por mármore calcítico identificado em campo, e pode ser considerada como fator controlador natural pois apresenta em sua composição minerais de alta solubilidade favorecendo os processos de dissolução química. O bandamento composicional e a foliação tectônica Sn podem conferir caminhos preferenciais de dissolução e consequente permeabilidade.

As estruturas tectônicas identificadas como fraturas tem papel importante como porosidade secundária, e conferem maior permeabilidade ao sistema, permitindo o desenvolvimento de rede subterrânea de percolação hídrica com geração de possíveis cavidades subterrâneas, favorecendo subsidências e colapsos no terreno. Na área de estudo vemos este controle estrutural no caminho de percolação hídrica e dissolução, expresso na morfologia das dolinas registradas em campo, em sua maioria com formatos assimétricos alongados em direção preferencial variando entre NW, N a NE correlata aos planos de fratura, que demonstram estar associados a zona de cisalhamento compressional de direção aproximada E/W que secciona a área de estudo ao meio.

Ocorrem também dolinas simétricas, e por vezes estas ocorrem alinhadas, neste mesmo trend direcional das fraturas, o que também é indicativo do controle estrutural na região. Quando há instabilidades no terreno estes planos podem se deslocar causando remobilização do material que antes os preenchiam, para níveis

subterrâneos mais profundos, capturando novo material para preenchimento e consequentemente gerando colapsos de solo e rocha. Sendo assim as estruturas tectônicas podem ser consideradas como fatores controladores principalmente em questão do controle na morfologia das feições cársticas, e também como fatores deflagradores dos eventos de desenvolvimento das feições cársticas.

Foram identificadas majoritariamente dolinas classificadas como simples, mas também dolinas complexas, e dois campos de dolinas que podem ser classificados como feições compostas. Os colapsos na região possuem em média 2 m de profundidade e 4 m de diâmetro, com porte médio. O elevado número de ocorrências e a própria ocorrência de feições compostas indica que o sistema local não é jovem e avança no seu estágio de evolução. As estruturas identificadas em campo foram classificadas como Dolinas de Colapso ou Subsidência de Solo, por vezes havendo material rochoso envolvido.

Feições encontradas em campo como inclinação de cercas, rachaduras nas paredes e piso de residência, presença de sumidouros e subsidências no terreno são consideradas indicativas de que os processos de evolução cárstica, que promovem deformações no solo e terreno, resultando em possíveis subsidência e colapso estão ativos na região.

Dentre os poços identificados em campo, o primeiro localizado no ponto 1 de visita  o a residência local, encontra-se em estado atual seco, devido a captura da rede hídrica superficiais para níveis subterrâneos. E o segundo no ponto 5 de visita  o técnica empresarial, que não sofreu interferência em sua vazão nos últimos tempos. Isto pode ocorrer pois o sistema cárstico possui desenvolvimento complexo, condicionado por diversos fatores e no local podem estes dois pontos corresponder a células distintas dentro do conjunto, não sendo diretamente influenciadas pelos fatos que ocorreram próximo ao ponto 1 de visita  o na área estudada.

A pluviosidade é um fator de extrema importância tanto para as taxas de intemperismo, dissolu  o e consequente desenvolvimento do sistema cárstico, quanto para o desenvolvimento de colapsos e subsidências no terreno devido a rebaixamento do freático em períodos de baixa pluviosidade. Os valores médios obtidos demonstram que nos meses próximos as últimas ocorrências de colapso os índices de pluviosidade estavam acima da média esperada para este período no ano, e apresentando forte varia  o mensal de baixos níveis para altos e seguinte baixa

novamente nos valores médios de pluviosidade de dezembro 2021 a fevereiro 2022, o que pode ter provocado variações no nível freático que acabam acarretando a remobilização de material a níveis subsuperficiais a subterrâneos.

Sendo assim a variação do nível freático causada pelos altos índices de pluviosidade no mês de janeiro 2022 pode ter favorecido tanto o intemperismo químico quanto físico no local, e serem considerados fatores controladores, mas também deflagradores dos processos cársticos locais. Porém como dito anteriormente, a pluviosidade não é o único fator que controla o nível freático, estes rebaixamentos podem ser causados por bombeamento excessivo, o que com o constante avanço no uso e ocupação do solo, principalmente das atividades minerárias na região tende a se tornar recorrente.

Dentre os dados temáticos selecionados para análises pode se observar através das correlações das figuras, que locais com baixa declividade são favoráveis ao surgimento de dolinas. O solo local é classificado como Latossolo que constitui classe de solos espessos, altamente intemperizáveis e friáveis, podendo este ser considerado fator controlador nos processos ativos do sistema.

Os dados de uso e ocupação do solo disponíveis não refletem a realidade. Através das análises das imagens e mapas produzidos vemos que na área de estudo existe atividade agrícola rural, além de ocupação residencial, industrial e minerária. Estas são atividades que podem interferir de maneira negativa no sistema.

Como discutido anteriormente a ocupação e uso indevido do solo nestes locais podem ser considerados fatores deflagradores dos processos de carstificação, pois prejudicam a manutenção do mesmo.

Destaca-se a questão da atividade minerária que apresenta maior impacto potencial no sistema devido a fatores como bombeamento hídrico e o uso de explosivos que geram sismos e remobilização de material. Podendo esta atividade ser considerada como um dos principais fatores deflagradores dos processos de subsidência e colapsos no local de estudo.

A região compõe zona de influência direta ao aquífero karst, e deveria haver maior grau de cuidado no planejamento do uso e ocupação local, evitando riscos de contaminação ambiental e atividades que atuem como fatores deflagradores favorecendo a aceleração dos processos cársticos na região. Podem ainda facilitar a

prevenção e preparação para processos perigosos do tipo colapsos e subsidências neste ambiente

Concluiu se finalmente que os estudos acerca dos processos perigosos associados a processos cársticos na região de estudo, utilizando o software VICON SAGA 7.4, mapas temáticos, registro histórico, análises de campo e de escritório, permitiram compreender melhor o funcionamento do sistema cárstico na área estudada. Podem ainda facilitar a prevenção e preparação para processos perigosos do tipo colapsos e subsidências neste ambiente. Neste sentido é muito importante para o entendimento de problemas ambientais e principalmente para planejamentos futuros do uso e ocupação local.

REFERÊNCIAS

- Albrecht, K. J. (1998). Avaliação geológica-geotécnica de terrenos sujeitos a problemas cársticos. Tese Doutorado em Geotecnia. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998. doi:10.11606/T.18.2018.tde-23082018-151621
- Angel, J. C.; Nelson, D. O.; Panno, S. V. (2004). Comparison of a new GIS-based technique and a manual method for determining sinkhole density: An example from Illinois' sinkhole plain. *Journal of Cave and Karst Studies*, v. 66, n. 1, p. 9–17
- Bögli, A. 1980. *Karst hydrology and physical speleology*. Berlin: Springer, 284p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-67669-7>
- Ford, D.; Williams, P. 2007. *Karst hydrogeology and geomorphology*. 2ª ed. Chichester: Wiley, 576 p. doi.org/10.1002/9781118684986
- Gutiérrez, F.; Parise, M.; De Waele, J.; Jourde, H. (2014). *A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst*. *Earth Science Reviews*, v. 138, p. 61–88. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.08.002>
- Rodet, Joel. 2014. *The primokarst, former stages of karstification, or how solution caves can born*. *Geologica Belgica*. 17. 58-65.
- Santos, L. R. 2017. *Metamorfismo de baixo grau nas rochas metassedimentares terrígenas da formação Capiu – região do Morro Grande, Colombo – Pr*. Dissertação mestrado em geologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba PR. URI: <http://hdl.handle.net/1884/49489>
- Vestena, L. & Kobiyama, M. & Santos, L. (2010). *Considerações sobre gestão ambiental em área cársticas*. *Raega - O Espaço Geográfico em Análise*. 6. Disponível em: www.revistas.ufpr.br/raega/article/view/18518. Acesso em: 10 Dez. 2022. doi: [dx.doi.org/10.5380/raega.v6i0.18518](https://doi.org/10.5380/raega.v6i0.18518).

ANEXO I : Resumo das estruturas de processos perigosos relacionadas ao carste observados em campo.

Pontos de visitação	Coordenadas UTM	ID do ponto	Feições Observadas	Material Envolvido	Classificação (Gutiérrez et al., 2014)	Classificação Morfológica (Bögli, 1980 e Angel et al. 2004)	Indicadores	Afloramento rochoso	Poços	Descrição	Outras obs.
P1	7206081,96 670324,38	Casa Sr Antônio Carlos	Dolinas 1 a 6, 8 e 9	Solo e Rocha	Sufusão, Subsidência e Colapso de Solo e Rocha	Assimétrica e Assimétrica Estrutural, simétrica. Dolinas Simples e Complexas	Subsidência e colapsos no solo, fluxo hidrico local drenado para subterrâneo	Mármore Calcítico de Cor branca, estrutura bandada. Com bandas claras CaCO3 textura equigranular fina a criptocristalina, nas bandas cinza inequigranular fina havendo concentração dos maiores cristais (mm) de quartzo. (60 %) Calcita, (40 %) Quartzo, (10 %) Talco. Reagente ao HCl (10%). Com Sn evidenciada nos bandamentos, há ocorrência de possíveis dobras assimétricas de pequeno porte.	Seco	Local com ocorrência de afloramento rochoso exposto em superfície e feições associadas a processos cársticos perigosos, como dolinas métricas. Segundo o proprietário Sr Carlito, haviam nascentes de água no terreno que foram secando com o tempo, e o mesmo nos indicou um poço hidrico semi artesiano com estado atual inativo / seco, coberto por tampa de cimento ao lado do antigo tanque de pesca em meio a dolinas e que era utilizado para abastecimento familiar.	Segundo relato do Sr Carlito por volta do horário de almoço houveram explosões na mineração vizinha e logo após na parte da tarde toda água do local começou a fluir para o subsolo muito rapidamente, secando seu tanque de pesca, inclusive matando os peixes e deixando buracos enormes no terreno
P2	7205896,08 670258,72	Casa Sra Margarete	Campos de Dolinas Sul / Norte e dolina 7	Solo	Sufusão e Colapso de Solo	Dolinas Simétricas e Assimétricas. Simples e Complexas	-	-	-	Local com ocorrência de processos cársticos e geração de ao menos dois campos de dolina, denominados em campo sul e campo norte com ocorrência de dolinas métricas e outras menores em grande densidade.	Estes campos foram formados no fundo de antigo tanque de pesca, atualmente seco. A proprietária confirma relato do Sr Carlos de que por volta do horário do almoço se escutaram as explosões e logo após a água fluiu para o subsolo
P3	7205875,58 670290,27	Casa Sr Renato	Dolina 10	Solo	Dolina Colapso de Solo	Dolina Simétrica, Simples	Colapso de solo, Danos a vias de acesso, Danos materiais como rachaduras nas edificações	-	-	Casa Renato e Renan, o local foi visitado por ter sido identificada antiga estrutura cárstica de subsidência em imagem de satélite, porém não está mais presente no terreno atualmente. A edificação da casa apresenta diversas feições indicativas de movimentação no solo como rachaduras no chão e paredes, com deslocamentos por vezes centimétricos.	Relataram que já houve quebra dos vidros na residência devido a impacto de explosão na mineradora próxima. E que as rachaduras nas paredes e chão iniciaram por volta de três anos atrás. Os moradores disseram ainda que havia antiga nascente no terreno porém atualmente encontra se seca.
P4	7205987,316 70120,72	Casa Sr Patrício	Mina de Calcáreo, Lago	Rocha	-	-	-	=	-	Casa do Sr. Patrício, proprietário de parte do local. Mineração de Dolomito ativa desde 1900 segundo o mesmo, cava apresenta lago com aproximadamente 40 m nos locais de maior profundidade.	Sr Patrício informou que a mineração local é dividida em três partes e atualmente apenas a dele esta inativa, porém ao consultar o processo minerário na ANM ele consta como ativo. Ele nos contou também que o nível do lago no local vem subindo.
P5	7206129,69 670660,57	Água Mineral Timbu Ltda.	Surgências	Água e Solo	-	-	Alagamentos	-	200 - 300 m³/h	Foi realizada visita a empresa Água Mineral Timbu, conversamos com a responsável local Daniele. No local há presença de nascentes, surgências preservadas para captação como produto da empresa. A técnica nos informou que não houveram mudanças anômalas significativas nos níveis hídricos locais durante o período de Fevereiro 2022, quando ocorreram os maiores colapsos na região próxima, até os dias atuais.	Poço artesiano

ANEXO II: Mapa de ocorrências de estruturas formadas por processos perigosos associados ao carste na região de Tranqueira, Almirante Tamandaré – Pr.

