

Relação entre feições doliniformes e a evolução de uma voçoroca em cabeceira de drenagem na Bacia Hidrográfica do Arroio Sarandi, municípios de Santa Maria e Dilermando de Aguiar-RS

Dra. Andréa Valli Nummer
Universidade Federal de Santa Maria – UFSM
a.nummer@gmail.com

Me. Luciele Oliveira De Ávila
Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS
lucieleavila@pop.com.br

Me. Vinícius Duarte Guareschi
Universidade Federal de Santa Maria – UFSM
vdguareschi@yahoo.com.br

Dr. Rinaldo José Barbosa Pinheiro
Universidade Federal de Santa Maria – UFSM
rinaldo66@hotmail.com

Resumo

Este trabalho analisa a contribuição de depressões do tipo dolinas para a evolução de uma voçoroca localizada na Bacia Hidrográfica do Arroio Sarandi, em Santa Maria e Dilermando de Aguiar/RS. Para isso, foram realizados ensaios de caracterização física e avaliação da erodibilidade, com métodos indiretos, dos materiais que compõem a referida voçoroca. Os resultados dos ensaios indicaram que o arenito, que está na base da voçoroca, é mais erodível que o horizonte A/B do solo localizado acima dele, fato que pode estar relacionado à perda da resistência devido à sucção e à aparente fragilidade do agente cimentante entre as suas partículas. A diferença de erodibilidade entre o arenito e o solo explicaria em parte a gênese das feições doliniformes, pois a percolação da água, ao longo do arenito, daria origem a dutos pelo carreamento de partículas e/ou dissolução do cimento, provocando o colapso do material acima (camadas superficiais). Esse processo ocorre mais facilmente no entorno dos lineamentos estruturais. Uma vez estabelecidas na paisagem, as depressões doliniformes tendem a unir-se devido ao fluxo superficial, evoluindo para canais incisos que se aprofundam e promovem o avanço da voçoroca para montante.

Palavras-chave: voçoroca, erodibilidade, feições doliniformes.

Abstract

This paper analyzes the contribution of doline type depressions for the evolution of a gully located on the watershed of Sarandi Stream, in Santa Maria and Dilermando de Aguiar/RS. In order to do that, physical characterization and evaluation of erodibility tests with the use of indirect methods were performed on the materials composing the said gully. The results of the tests indicated that sandstone, which is in the basis of gully, is more erodible than the horizon A/B of the soil located above it, a fact which can be related to the loss of resistance due to suction and the apparent fragility of the cementing agent between the particles. The difference in erodibility between the sandstone and the soil could partly explain the genesis of karst features, because water percolation along the sandstone would result in ducts originated from the entrainment of particles and/or from the dissolution of the cement, thus provoking the collapse of the material above them (surface layers). This process occurs more easily in the surroundings of structural lineaments. Once established on the landscape, dolineform depressions tend to join due to surface flow, evolving into incised channels that deepen and promote the advance of the gully upstream.

Keywords: gully, erodibility, doliniformes features.

Introdução

As feições cársticas são geralmente associadas a relevos formados por rocha calcária, como resultado de processos geoquímicos de dissolução do carbonato de cálcio, principalmente em regiões de clima úmido. O resultado é expresso em uma diversidade de formas definida por depressões fechadas de tamanhos variados, feições ruiformes, drenagens descontínuas em superfície, cavernas, afloramentos rochosos e sistemas de drenagens subterrânea.

Dentre a variedade de morfologias originadas pelos processos de dissolução em terrenos cársticos, as dolinas são consideradas a forma fundamental. As dolinas são depressões circulares ou elípticas fechadas que podem atingir de poucos metros a centenas de metros de profundidade por várias centenas de metros de diâmetro. O processo inicial de formação das dolinas está ligado à circulação da água em zonas de descontinuidades estruturais por onde começa o ataque químico, por dissolução, e físico, com remoção de materiais (FORD; WILLIAMS, 2007). A união de duas ou mais dolinas origina uma depressão com formato mais alongado, denominada de uvala, indicando a evolução morfológica do carste. As taxas de ampliação das depressões estão diretamente relacionadas à eficiência do processo de realimentação hidrológica e ao desenvolvimento das rotas de drenagem subterrânea (PILÓ, 2000).

Embora o conceito tradicional de carste esteja ligado à dissolução da rocha calcária, outras litologias, como o arenito e os quartzitos, podem apresentar processos de dissolução, e as feições resultantes assemelham-se muito às formas originadas no carste de rochas carbonáticas.

Conforme argumenta Piló (2000, p. 89),

atualmente existe uma tendência em incluir rochas siliciclásticas no grupo das rochas cárstificáveis. Esta propensão deriva de demonstrações de que a dissolução da sílica, anteriormente considerada de baixa solubilidade, tem tido um papel importante na configuração de morfologias superficiais e subterrâneas tipicamente cársticas (PILÓ, 2000, p. 89).

Autores como Jennings (1983) e Wray (2003), na Austrália, e Doerr (1999), na Venezuela, comprovam a dissolução da sílica em arenitos e quartzitos. Já no Brasil, destacam-se as pesquisas realizadas por Uagoda, Avelar e Coelho Netto (2006), que descrevem a ocorrência de depressões fechadas em quartzitos na Bacia do Ribeirão Santana (MG/RJ); Hardt et al. (2009), na Chapada dos Guimarães (MT) e na Serra do Itaqueri (SP), ambas as áreas em arenito; Sallum Filho e Karmann (2007), em arenitos da Bacia Sedimentar do Paraná, no Mato Grosso do Sul e no Paraná; e Spoladore (2005) e Robaina e Bazzan (2006), que descrevem a formação de cavernas em arenito no Paraná e no Rio Grande do Sul, respectivamente.

Além dos exemplos referidos anteriormente, Hard e Pinto (2009, p. 103) citam exemplos no território brasileiro de diversas áreas potencialmente cársticas em rochas não carbonáticas, tais como: na Chapada Diamantina (BA), com evidências de carste em quartzito; Noroeste da Amazônia Brasileira (quartzitos e arenitos); Região centro-norte de Minas Gerais (quartzitos); Região da Serra da Capivara e Sete Cidades (PI) (arenito); Estado do Tocantins (rochas siliciclásticas, em especial o arenito); Serra

Geral, desde o sul de Minas Gerais ao Rio Grande do Sul (arenitos da formação Botucatu e Piramboia).

Na Depressão Periférica do Rio Grande do Sul, alguns estudos têm buscado compreender a relação entre a presença de depressões fechadas em cabeceiras de drenagem e a ocorrência de processos de dissolução e erosão. No centro do Estado, Maciel Filho, Cabral e Spinelli (1993) e Cabral et al. (2005) atribuem a gênese das feições doliniformes à ocorrência de dissolução de carbonato de cálcio, óxido de ferro e da própria sílica, componentes significativos das estruturas sedimentares na área em questão (CABRAL et al., 2005).

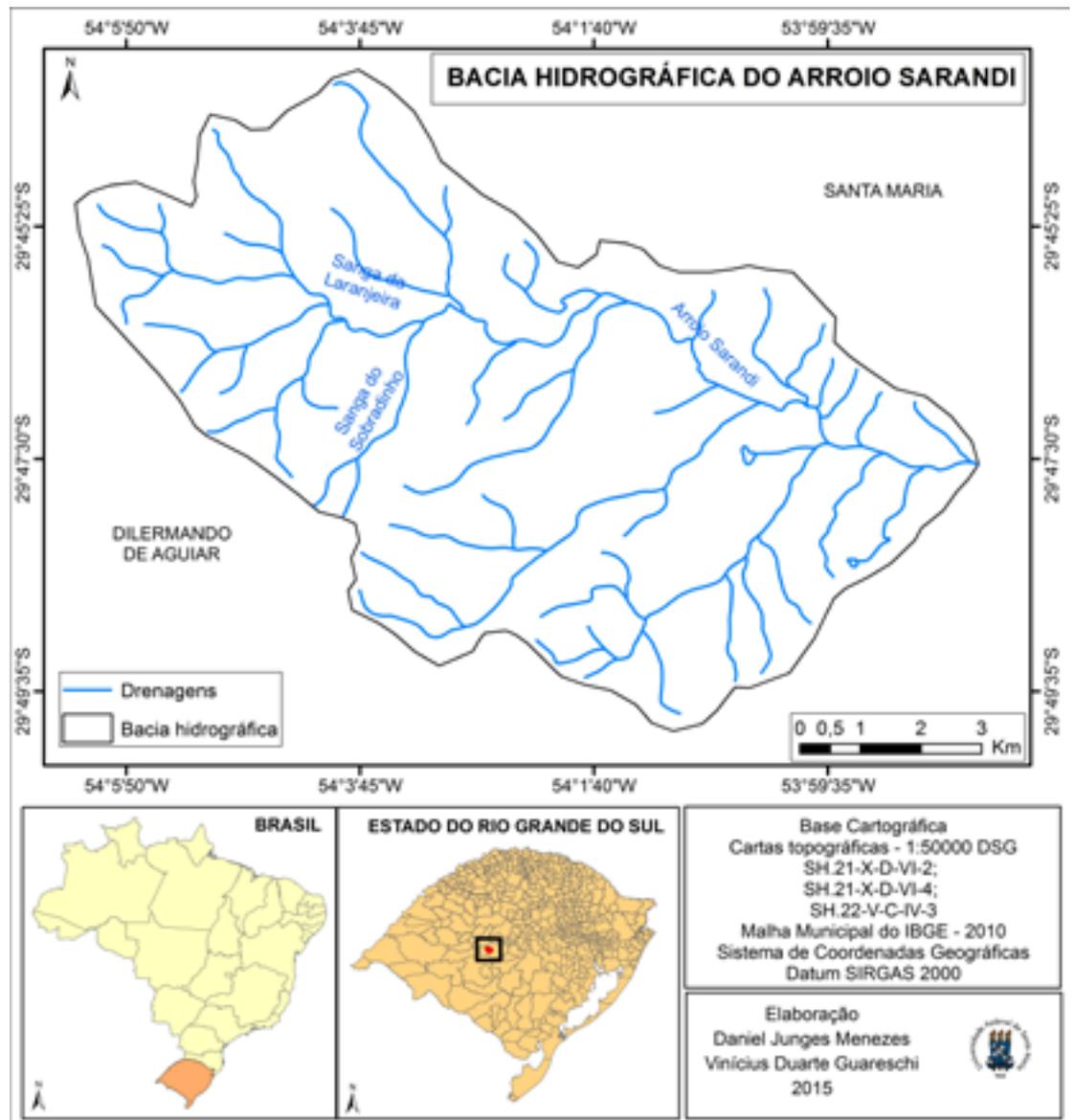
No oeste do Estado do Rio Grande do Sul, Fujimoto, Gonçalves e Zancanaro (2010), na busca por respostas sobre a origem dos processos de arenização no Estado, descrevem a ocorrência de degraus de abatimentos em cabeceiras de drenagem com formato arredondado ou semicircular, tendo sua gênese relacionada à perda de óxido de ferro em superfície.

Essas feições resultantes da denudação química e física adquirem grande importância quando se trata de compreender a gênese das feições erosivas no contexto da evolução das cabeceiras de drenagem. Como destaca Coelho Netto (2003, p. 70), “as cabeceiras de drenagem desenvolvem-se no domínio das encostas e apresentam topografia côncava sobre as quais se originam ou avançam as cabeças de canais constituindo-se em áreas preferenciais para a convergência de água e sedimentos”.

Nesse sentido, autores como Filizola e Boulet (1995) e Castro e Coelho Netto (2002) relacionam a evolução dessas feições doliniformes com a abertura de vales de cabeceira (UAGODA, 2006, p. 38). Estudando a formação e o crescimento da rede de canais na bacia hidrográfica do rio Bananal (SP/RJ), Coelho Netto (2003) interpreta as depressões fechadas como protovales estruturais, as quais, por processos erosivos, podem romper a sua circularidade e dar origem aos vales de cabeceiras de drenagem. Outra característica apontada é a associação das depressões com os lineamentos estruturais, o que facilita a perda vertical de água, através dos sistemas de falhas, e favorece a sua ampliação.

A microbacia do Arroio Sarandi, localizada nos municípios de Santa Maria e Dilermando de Aguiar/RS, apresenta inúmeros focos de erosão, como sulcos, ravinas e voçorocas (Figura 1). A erosão mais significativa, por apresentar grandes dimensões, é uma voçoroca conhecida na região como “Buraco Fundo”. Nas vertentes onde essa voçoroca está instalada, são encontradas diversas depressões circulares que se desenvolvem nas camadas superficiais do solo, estendendo-se em direção às cabeceiras de drenagem. Partindo do pressuposto de que as depressões circulares interpretadas como feições doliniformes condicionam a expansão da voçoroca, este artigo tem por objetivo investigar os processos responsáveis pela gênese e desenvolvimento destas feições ao longo da vertente, bem como compreender a contribuição destas feições para o avanço da voçoroca em direção a montante. Para isso, foram analisadas as características geológicas e geotécnica dos materiais que compõem a voçoroca, através da caracterização dos sedimentos, determinação de índices físicos e químicos e avaliação do comportamento dos materiais frente à ação da água.

Figura 1. Localização da Bacia Hidrográfica do Arroio Sarandi.



Elaboração: Daniel Junges Menezes e Vinícius Duarte Guareschi.

A microbacia do Arroio Sarandi está localizada no centro do Estado do Rio Grande do Sul, com uma área de aproximadamente 22 km², e está inserida na unidade geomorfológica da Depressão Periférica Sul-rio-grandense. Os sedimentos recentes do Quaternário são provenientes da unidade Rebordo do Planalto e depositam-se ao longo dos cursos d'água, constituindo as planícies aluviais. As formas de relevo predominantes são colinas suaves e alongadas, que podem aparecer em conjunto ou isoladamente (WERLANG, 2004).

A geologia local, conforme Maciel Filho (1990), corresponde a arenitos finos a conglomeráticos com estratificações cruzadas, acanaladas e planares de pequeno a médio porte, pertencentes à Formação Santa Maria, Membro Passo das Tropas. Também ocorrem siltitos e pelitos, avermelhados dispostos em camada lenticulares. Predominam argissolos, caracterizados pela ocorrência de um horizonte A, seguido

por um horizonte E ou B. Grande parte da área é coberta por herbáceas e arbustos típicos dos campos gaúchos.

Procedimentos metodológicos

A metodologia adotada para a elaboração deste trabalho desenvolveu-se em três etapas. Primeiramente, na etapa de gabinete, foram levantados dados bibliográficos sobre a área de estudo. Posteriormente, na etapa de campo, foram realizadas as observações em relação aos processos erosivos, tipos de rocha e solos, presença de descontinuidades geológicas, relevo, forma das vertentes e relação entre a voçoroca e a presença das feições doliniformes. Também foi realizada coleta de amostras de rocha e solo de um perfil típico, localizado no interior da voçoroca, para ensaios de laboratório. Finalmente, na etapa de laboratório, foram realizados os ensaios de caracterização e os ensaios de avaliação direta e indireta da erodibilidade.

Dentre os fatores responsáveis pelos processos erosivos, destacam-se a declividade, o comprimento da vertente, a cobertura vegetal, o volume e a intensidade da chuva e a característica dos materiais superficiais. Dois elementos são centrais no desencadeamento do processo, a erosividade da água e a erodibilidade do solo. Conforme Vilar e Prandi (1993), a erodibilidade é definida como a falta de capacidade de os solos resistirem aos processos erosivos e depende não só das características intrínsecas do solo, mas também de fatores subsidiários, como ciclos de umedecimento e secagem, além da composição química da água presente.

Para avaliar a erodibilidade, foram utilizados métodos indiretos, tais como: os ensaios de desagregação e os critérios baseados na metodologia MCT (infiltrabilidade e perda de massas por imersão). A avaliação direta foi realizada com ensaios de rampa, denominados de Inderbitzen.

O ensaio de desagregação (*slaking test*) consiste em avaliar qualitativa e visualmente a desagregação de uma amostra de solo circular e não confinada quando submetida à ascensão do nível de água destilada, até estar totalmente submersa, totalizando 25 horas de ensaio. Este ensaio foi realizado com amostras indeformadas, nas condições de umidade natural e seca ao ar, por, no mínimo, 72 horas, conforme a metodologia apresentada por Bastos (1999).

A metodologia MCT (NOGAMI; VILLIBOR, 1979) está fundamentada na obtenção de dois parâmetros: o coeficiente de sorção (s), obtido no ensaio de infiltrabilidade, e a perda de massa por imersão modificada (P_i), obtida no ensaio de erodibilidade específica. Os autores propõem uma relação adimensional obtida da divisão do parâmetro “ P_i ” por “ s ” (P_i/s), com a qual é possível classificar os solos em relação ao grau de erodibilidade, sendo considerados, por eles, como solos erodíveis quando esta relação for superior ao valor 52.

O ensaio de infiltrabilidade tem como objetivo quantificar a velocidade de ascensão capilar em amostras de solos indeformadas, nas condições de umidade natural, seca ao ar (por, no mínimo, 72 horas) e pré-umedecidas (reensaando as amostras), estando confinadas em anéis cilíndricos de PVC, com 5 cm de altura e 5 cm de diâmetro. O ensaio de perda de massa por imersão modificada foi executado para

a avaliação quantitativa do potencial de desagregação de uma amostra indeformada de solo, quando submersa em água. Para a realização deste ensaio, foram utilizadas amostras de solos nas condições de umidade natural, seca ao ar (por, no mínimo, 72 horas) e pré-umedecidas (amostras oriundas do ensaio de infiltrabilidade), confinadas em anéis cilíndricos idênticos aos utilizados no ensaio de infiltrabilidade.

Para avaliação direta da erodibilidade, foi realizado o ensaio de Inderbitzen (1991), cujo equipamento consiste em uma rampa hidráulica articulada de 25 cm de largura e 60 cm de comprimento, cuja inclinação pode variar entre 0° e 54°. A rampa possui uma abertura circular central de 10 cm de diâmetro, onde é acoplado um anel contendo a amostra indeformada, de tal maneira que o seu nível superior coincida com o nível da rampa, para que o escoamento laminar entre em contato com o topo da amostra. A água e o solo desagregado pelo fluxo são coletados em baldes e passados por um conjunto de peneiras. As variáveis de ensaio adotadas nesta pesquisa foram as mesmas utilizadas por Bastos (1999).

Discussão dos resultados

A voçoroca do Buraco Fundo possui 300 m de extensão, 180 m de largura e 10 m de profundidade, e, segundo moradores da região, nos últimos 30 anos, o processo erosivo avançou aproximadamente 40 metros em direção a sua cabeceira. Encontra-se encaixada na rede de drenagem segundo direção preferencial N15°-50°W e subordinadamente N30°-55°E (Figura 2A), mesma direção em que se encontram alinhadas as feições doliniformes condicionadas pelo controle estrutural. Um dos indícios destas falhas é o alinhamento dos pináculos que se encontram no interior da voçoroca.

A voçoroca está localizada numa vertente convexo-côncava com declividade em torno de 12°. Na porção convexa, o avanço do processo erosivo dá-se preferencialmente por escorregamentos circulares. Já na porção côncava, devido à concentração das linhas de fluxo subterrâneo e superficiais, a evolução para montante está associada à presença das feições doliniformes (Figuras 2B e 2C).

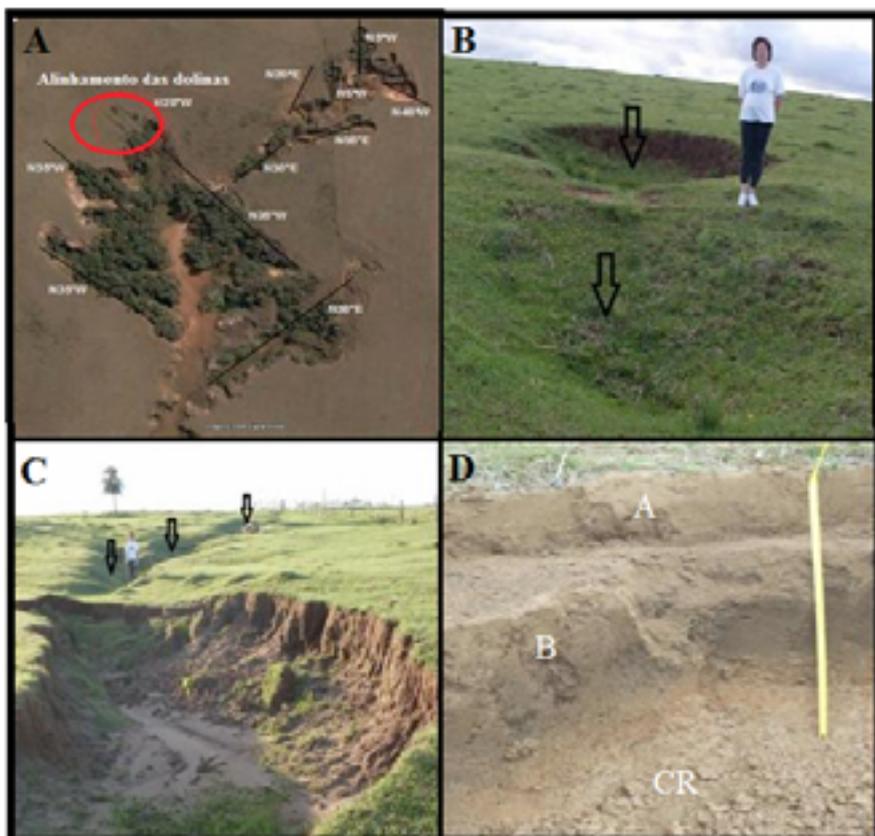
Figura 2. Imagens de satélite e fotografias de campo.

Figura 2A - Imagem de satélite mostrando a voçoroca e o alinhamento das feições doliniformes seguindo a direção preferencial dos lineamentos estruturais.

Figura 2B - União de duas dolinas pelo fluxo superficial de água.

Figura 2C - Formação de canais incisivos conectando-se a um “braço” da voçoroca.

Figura 2D - Contato entre os horizontes A/B com o material de alteração do arenito (CR).



Fonte: elaborada pelos autores.

Na área de entorno, ocorrem argissolos de espessuras variáveis em substrato de rochas sedimentares pertencentes à Formação Santa Maria, Membro Passo das Tropas, onde se vê uma intercalação de camadas de areias finas, médias e grossas com lentes silto-argilosas.

Para tentar compreender a relação entre a evolução da voçoroca para montante e a presença das feições doliniformes, foi analisado um perfil de 8,5 m de espessura, dentro da voçoroca e próximo à ocorrência de diversas destas feições, denominado de Perfil II (Figura 2 D). Este perfil foi descrito em detalhes e as suas amostras foram ensaiadas para caracterização física e de erodibilidade.

No perfil, foram identificadas três unidades distintas: arenito na base (A), acima deste, rocha alterada (RA) e, no topo, o horizonte pedológico (A/B). A camada de arenito é rosada e mostra estratificação cruzada planar, que pode variar de milimétrica a centimétrica, com diferentes graus de cimentação, caracterizada por uma parede vertical que mede em torno de 3,80 m de espessura. Já a camada de rocha alterada, também de cor rosada, apresenta uma espessura média de 3,7 m e está localizada sob a camada de arenito. Sobre a rocha alterada, é possível verificar escorregamentos dos horizontes superficiais, com material depositado no degrau inferior (Figura 3). A unidade superficial é constituída de um horizonte A pedológico com espessura de até 1 m e um horizonte B com espessuras variáveis de 10 a 30 cm ou, às vezes, inexistentes, de cor marrom-escuro, e contém, em profundidade, óxido de ferro, raízes e matéria orgânica.

Figura 3. Perfil mostrando a disposição dos materiais no interior da voçoroca Buraco Fundo.



Fonte: modificado de ÁVILA, 2009.

A Tabela 1 apresenta os resultados dos ensaios para caracterização (peso específico real dos grãos, limites de consistência e granulometria), índices físicos e análise química. O peso específico apresentou valores entre 26,0 e 28,0 kN/m³, consistentes com a mineralogia destas camadas. O horizonte A/B e o arenito apresentaram de média a baixa plasticidade, com um limite de liquidez inferior a 40% e um índice de plasticidade inferior a 15%. A camada de rocha alterada (siltito alterado) apresentou-se mais plástica.

O horizonte A/B e o arenito apresentaram a menor porcentagem de finos (silte + argila) e predomina na fração grossa a areia média a fina. Texturalmente, estes horizontes/camadas foram classificados como areias argilo-siltosas. De acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos, o horizonte A/B é um silte elástico (MH) e o arenito foi classificado como uma areia argilosa (SC).

Tabela 1. Resumo dos ensaios de caracterização, índices físicos e análise química.

| | Horizonte A/B | Rocha Alterada | Arenito |
|--|----------------------|-----------------------|----------------|
| Peso esp. real dos grãos - gs (kN/m ³) | 26,4 | 27,7 | 26,6 |
| Limite de liquidez - wl (%) | 36 | 64 | 34 |
| Índice de plasticidade - IP (%) | 9 | 29 | 15 |
| Fração areia grossa (%) | 30 | 2 | 0 |
| Fração areia média (%) | 17 | 2 | 13 |
| Fração areia fina (%) | 15 | 17 | 54 |
| Fração silte (%) | 18 | 28 | 16 |
| Fração argila (%) | 20 | 51 | 17 |
| Teor de umidade (%) | 13,4 | 27 | 13,9 |
| Peso esp. natural - g (kN/m ³) | 15,9 | 17,1 | 17,8 |
| Índice de vazios - e | 0,92 | 1,1 | 0,72 |
| Porosidade - n (%) | 46,9 | 51,5 | 41,3 |
| Grau de saturação - S (%) | 39,9 | 71,1 | 53,2 |
| CTC | 10,2 | 25,1 | 10,6 |
| MO | 1,7 | 0,9 | 0,1 |
| pH | 4,5 | 4,6 | 4,8 |
| Classificação geotécnica | MH | MH | SC |

CTC = capacidade de troca catiônica; MO = matéria orgânica; MH = silte elástico; SC = areia argilosa.

Fonte: dados de pesquisa.

A camada de rocha alterada apresenta uma porcentagem de finos superior a 70% e, na fração grossa, predomina areia fina, sendo classificada como uma argila silto-arenosa. Adotando o Sistema Unificado de Classificação de Solos, esta classificação inverteu-se, contudo, já são de conhecimento do meio geotécnico as limitações dos sistemas de classificações tradicionais, quando utilizados em solos de regiões tropicais.

A rocha alterada apresentou o maior índice de vazios, porosidade e grau de saturação. De acordo com a *International Association for Engineering Geology and the Environment* (IAEG, 1974), para que o arenito seja considerado com porosidade alta, deve apresentar valores entre $(1 < e < 0,8)$ e quanto ao grau de saturação é considerada úmida quando apresenta valores entre $(25\% < S < 50\%)$. A rocha alterada apresentou índices de porosidade muito alta $(e > 1)$ e muito úmida $(50\% < S < 80\%)$. Já a camada de arenito apresentou uma porosidade média $(0,55 < e < 0,8)$ e, ademais, muito úmida. Em relação aos valores de umidade e grau de saturação, estes materiais são considerados solos não saturados.

A saturação por bases (V) para o horizonte A/B e rocha alterada é baixa $(V < 35\%)$, portanto, estes horizontes/camadas são classificadas como distróficos, sendo pouco ou muito pouco férteis e sem reservas de nutrientes para os vegetais. O valor

de saturação de base é mais elevado no arenito que constitui a base da voçoroca. A saturação por alumínio (S) para horizonte A/B e rocha alterada situa-se entre 65 e 75%, caracterizando uma quantidade de alumínio a níveis tóxicos para plantas, tratando-se de um solo álico. A capacidade de troca catiônica em torno de 10 cmolc/dm³ caracteriza uma argila de atividade baixa para o horizonte A/B e o arenito. Para a rocha alterada, o valor de CTC é típico de uma argila de atividade média a alta. A faixa do pH situou-se entre 4,3 e 5,2 (ácido).

A avaliação da erodibilidade foi realizada por meio de ensaios da metodologia MCT, ensaio de desagregação e ensaio de Inderbitzen, com as amostras do Perfil II correspondentes ao arenito e ao horizonte superficial A/B. Já a avaliação qualitativa da erodibilidade foi realizada de maneira visual, analisando o comportamento de amostras indeformadas frente à ascensão capilar. Fernandes (2011) realizou estes mesmos ensaios para avaliação da erodibilidade, também com base na metodologia MCT, para a camada de rocha alterada (RA).

O horizonte A/B, independentemente da sua condição de umidade, mostrou-se muito resistente frente à inundação, pois permaneceu praticamente intacto ao final do ensaio. É possível justificar tal comportamento pela presença de matéria orgânica, raízes e óxido de ferro, que tendem a estabilizar os agregados.

Conforme Fernandes (2011, p. 92), na camada de rocha alterada, predomina a fração argila (51%), a qual foi decisiva para que, ao término do ensaio (inundação completa), a amostra não desagregasse totalmente. Essa camada, durante o processo, desagregou mais que no horizonte A/B, mas com menor intensidade do que a camada de arenito.

Nas amostras de arenito, as partículas foram se desprendendo facilmente desde os primeiros estágios do ensaio, tendo a sua estrutura totalmente desagregada sob a ação da inundação completa, após 24 horas imersão (Figura 4). O processo de ruína das amostras pode estar associado à baixa cimentação do arenito e à frente de avanço capilar que expulsa o ar preso nos poros, causando a desestruturação do material, bem como a remoção de óxidos de ferro que atuam como agente cimentante.

Figura 4. Ensaio de desagregação: (A) horizonte A/B do solo e (B) arenito, após 24 horas de imersão.



Fonte: acervo pessoal dos autores.

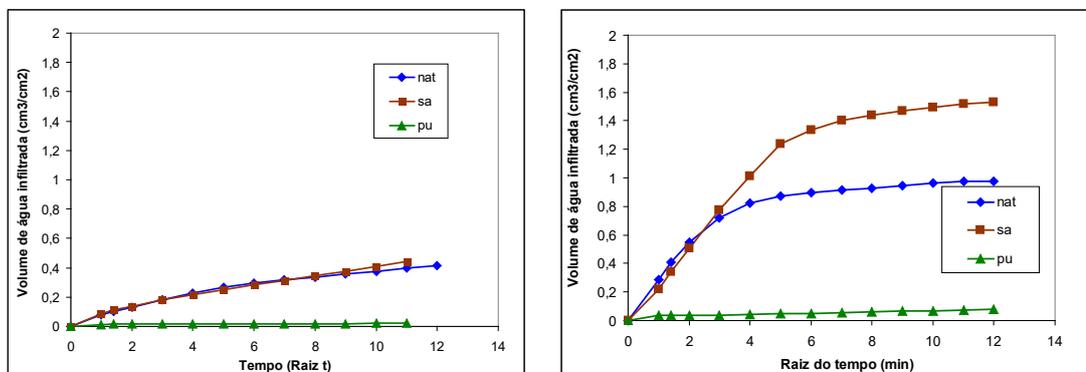
A Tabela 2 apresenta os resultados dos ensaios de infiltrabilidade e erodibilidade específica, através do coeficiente de sorção (s) e da perda por imersão (pi), respectivamente. O coeficiente de sorção ou índice de absorção representa a velocidade

de ascensão capilar dos solos, relacionada à capacidade do solo em infiltrar a água da chuva e dificultar a formação do fluxo superficial, enquanto a erodibilidade específica representa o potencial de desagregação do solo pela água.

Os ensaios de infiltrabilidade e perda de massa por imersão da metodologia MCT foram realizados com amostras do horizonte A/B, rocha alterada e arenito para três condições de umidade: natural, seca ao ar e pré-umedecida (Tabela 2). No ensaio de infiltrabilidade, o volume de água infiltrado diferiu significativamente nas camadas amostradas e nas três condições de umidade a que foram submetidas. O volume infiltrado nas amostras pré-umedecidas foi muito menor quando comparado com o volume infiltrado nas outras duas condições de umidade, para todas as camadas ensaiadas (Figuras 5a e 5b).

As Figuras 5a e 5b apresentam as curvas médias (3 amostras) do volume de água infiltrada (cm^3/cm^2) pela raiz quadrada do tempo e a velocidade de infiltração (cm/s) pelo tempo (s) para o horizonte A/B e arenito. Verifica-se que, na umidade natural, o coeficiente de infiltrabilidade foi mais baixo no arenito quando comparado ao horizonte A/B, portanto, fazendo com que, neste material, estabeleça-se mais rapidamente o escoamento superficial. Além disso, observa-se uma relação direta entre os resultados do ensaio de desagregação e os de infiltrabilidade para o material ensaiado, pois as amostras de arenito mostraram alta desagregação frente à inundação e valores de perda de imersão mais elevados.

Figura 5. Gráfico mostrando as curvas de volume de água infiltrada (cm^3/cm^2) pela raiz quadrada do tempo (min) para o horizonte A/B (a) e arenito (b).



Fonte: elaborado pelos autores.

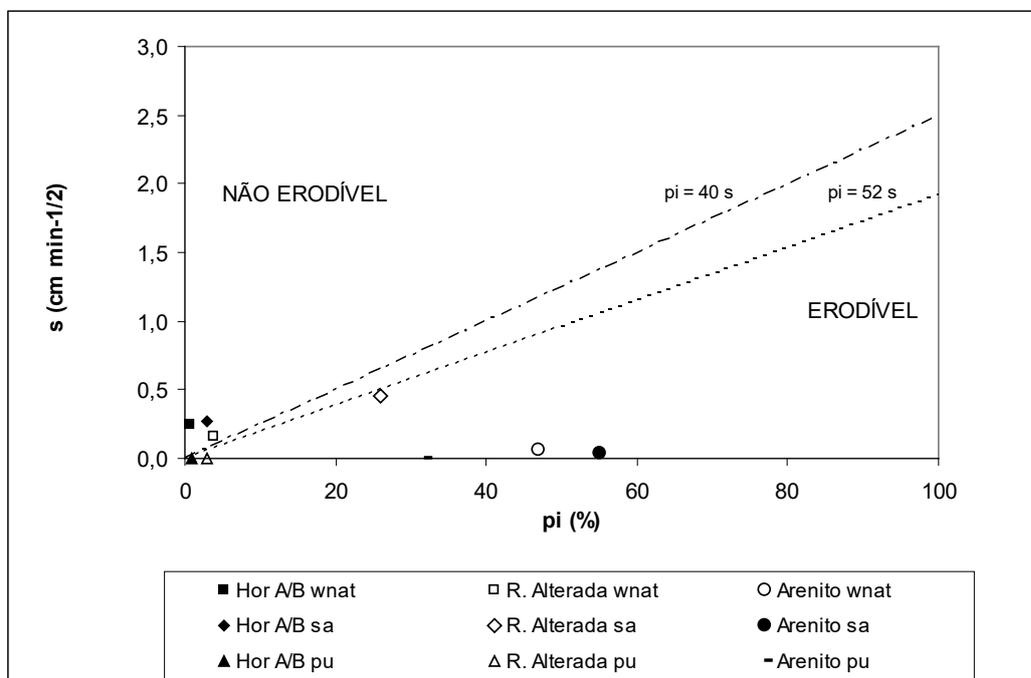
Tabela 2. Valores do coeficiente de sorção (s) e perda por imersão (pi) para diferentes condições de umidade das amostras dos horizontes A/B, rocha alterada e arenito – critério de erodibilidade da Metodologia MCT.

| | Umidade Natural (wnat) | | | Seca ao ar (sa) | | | Pré-umedecida (pu) | | |
|-----------|----------------------------|--------|------|----------------------------|--------|------|----------------------------|--------|-------|
| | s (cm/min ^{1/2}) | pi (%) | pi/s | s (cm/min ^{1/2}) | pi (%) | pi/s | s (cm/min ^{1/2}) | pi (%) | pi/s |
| Hor. A/B | 0,248 | 0,69 | 2,9 | 0,265 | 2,84 | 9,40 | 0,004 | 0,94 | 382 |
| R. Alter. | 0,166 | 3,84 | 23,8 | 0,454 | 26,0 | 60,7 | 0,003 | 2,96 | 983 |
| Arenito | 0,058 | 47,0 | 792 | 0,040 | 55,1 | 1398 | 0,008 | 31,7 | 36533 |

Fonte: elaborada pelos autores.

A perda de massa por imersão (Pi) é a porcentagem da massa seca da porção que se desprende do corpo de prova, quando o mesmo é preparado e imerso em água, sob condições padronizadas. Para as amostras ensaiadas, a perda de massa foi mais elevada no arenito do que no horizonte A/B. Os valores de Pi/s foram plotados no gráfico da Figura 6.

Figura 6. Aplicação do critério de erodibilidade pela Metodologia MCT para os materiais estudados.



Para Nogami e Villibor (1979), o solo é considerado erodível quando a relação Pi/s é maior ou igual a 52; dessa forma, o arenito, em todas as condições de umidade ensaiadas, e o horizonte A/B, nas amostras secas ao ar e pré-umedecidos, são erodíveis. Na condição de umidade natural, o horizonte A/B não é erodível. Na camada rocha

alterada, a relação $pi/s > 52$ foi verificada para condição seca ao ar e pré-umedecida (FERNANDES, 2011). Os resultados apresentados destacam a maior susceptibilidade à erosão do arenito em relação à rocha alterada e horizonte superficial do solo (horizonte A/B).

O ensaio de Inderbitzen para avaliação direta da erodibilidade foi realizado com 24 amostras indeformadas do horizonte A/B e do arenito, totalizando 48 amostras em condição de umidade natural seca ao ar durante 72 horas e pré-umedecidas com inclinações de 10°, 26°, 45° e 54° de rampa e vazões de 3 l/min e 6 l/min.

Tanto para o horizonte A/B quanto para o arenito, foi possível confirmar a relação direta entre a perda de solo, a inclinação da rampa e a vazão de ensaio. As amostras na condição de seca ao ar perderam mais solo do que as amostras nas demais condições, verificando a influência da sucção. Verificou-se que a perda de material foi maior no arenito do que no horizonte A/B, sendo que, para uma mesma condição inicial da amostra, as perdas foram maiores nas amostras secas ao ar e menores nas pré-umedecidas.

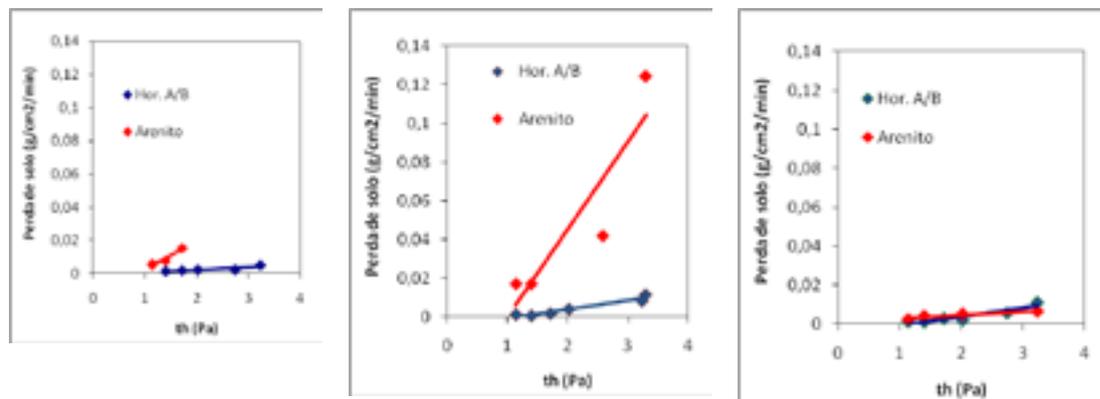
Para a determinação do parâmetro K ($g/cm^2/min/Pa$) e a tensão cisalhante hidráulica crítica $\tau_{h\text{ crit}}$ (Pa), efetuou-se o cálculo de erodibilidade para os resultados obtidos no tempo de 10 min do ensaio Inderbitzen. Através dos valores de K e τ_h , foi possível estabelecer comparações entre a suscetibilidade à erosão nas camadas do horizonte superficial e de arenito presentes na voçoroca do Buraco Fundo.

O parâmetro K indica a erodibilidade do solo, então, quanto mais elevado for, mais suscetível é o solo/rocha à erosão. Valores baixos para τ_h indicam que uma tensão menor é suficiente para desencadear o processo de destacamento e transporte das partículas. As amostras demonstraram um comportamento típico para o ensaio, ou seja, para tensões menores ocorreram perdas menores e, com o aumento da tensão hidráulica imposta pelo ensaio, a quantidade de partículas desprendidas foi maior.

Para a camada de arenito, o coeficiente de erodibilidade (K) médio obtido foi de $2,1 \times 10^{-2} g/cm^2/min/Pa$, independentemente da condição inicial de umidade das amostras. Para as amostras secas previamente, este coeficiente eleva-se para valores de $4,5 \times 10^{-2} g/cm^2/min/Pa$. Para o horizonte superficial, o coeficiente de erodibilidade (K) médio obtido foi $0,3 \times 10^{-2} g/cm^2/min/Pa$ para os mesmos níveis de tensão hidráulica. Os valores $\tau_{h\text{ crit}}$ do horizonte situaram-se entre 1 e 1,25 Pa, e a camada de arenito apresentou $\tau_{h\text{ crit}}$ inferior, entre 0,9 e 1,0. Para a amostra de arenito em condição de umidade pré-umedecida, não foi possível calcular a tensão hidráulica crítica.

Os valores de K foram, em média, maiores para a camada de arenito do que para a camada superficial, portanto, neste caso, a rocha é considerada mais erodível que o solo. A erodibilidade do arenito, em média, é sete vezes superior à do solo superficial. A Figura 7 apresenta o resultado de todos os ensaios, com os valores de perda de solo e a sua relação com a $\tau_{h\text{ crit}}$ e o coeficiente de erodibilidade (K) para o horizonte A/B e o arenito. Para a rocha alterada, os valores obtidos foram similares ao horizonte A/B de solo.

Figura 7. Resultados dos ensaios Inderbitzen para as amostras do horizonte A/B e arenito nas condições de umidade natural (a), seca ao ar (b) e pré-umedecida (c).



Fonte: elaborado pelos autores.

Em campo e mesmo em imagem de satélite, observa-se que a voçoroca mostra um avanço para noroeste, na forma de uma ramificação associada à presença de três feições doliniformes alinhadas segundo a direção N 20° W. A disposição destas concavidades na paisagem são fortemente influenciadas pelos lineamentos estruturais que ocorrem na área (Figura 8).

Figura 8. Alinhamento das concavidades seguindo a direção das fraturas.



Fonte: acervo pessoal dos autores.

A diferença de erodibilidade entre o arenito, o solo e a rocha alterada explicaria em parte a gênese das feições de carste encontradas na área de estudo. A percolação de água subterrânea ao longo da camada de arenito que apresenta uma erodibilidade mais elevada dá origem a dutos pelo carreamento de partículas e/ou dissolução do cimento de óxido de ferro, provocando o colapso do material das camadas superiores.

O fluxo superficial, por sua vez, contribui transportando o material que separa as

feições doliniformes, fato que promove a coalescência das feições e tende a aprofundar a incisão, formando sulcos e ravinas até atingir o lençol freático, expandindo a área da voçoroca.

Algumas depressões encontram-se estabilizadas pelo menos temporariamente, apresentando vegetação arbustiva e arbórea no seu interior. Os eventos extremos de chuva ou longos períodos de estiagem representam os mais críticos em termos de intensidade erosiva. Em episódios de chuva torrencial, as feições transbordam de água, o que favorece o rompimento da depressão, devido ao acúmulo de energia e consequente extravasamento em direção a jusante. Por outro lado, quando o material encontra-se muito seco, as camadas expostas perdem umidade para a atmosfera, sendo facilmente erodidas em um evento de chuva torrencial.

Considerações finais

A partir da caracterização geológica e geotécnica dos materiais que compõem a voçoroca estudada na Bacia Hidrográfica do Arroio Sarandi-RS, foi possível verificar que as depressões circulares interpretadas como feições doliniformes encontram-se associadas aos lineamentos estruturais (falhas e fraturas) que ocorrem na bacia hidrográfica, fato constatado pelo alinhamento preferencial das feições no sentido NW-SE e NE-SO, direção coincidente com o padrão da drenagem regional.

Os ensaios de desagregação mostraram a menor resistência do arenito frente à ação da água. Constatou-se que o destacamento das partículas do arenito é superior em relação às demais camadas, o que sugere uma relação direta com a perda da resistência, devido à sucção e à remoção do óxido de ferro, que atua como agente cimentante, levando à desagregação das partículas e ao consequente colapso das camadas superiores, sendo este o processo responsável pela gênese das feições doliniformes. As zonas mais fraturadas oferecem menor resistência à infiltração e circulação da água subterrânea, fato que explica o alinhamento das depressões circulares.

Por fim, o fluxo superficial promove a união das feições e a formação de pequenos canais incisivos, por onde ocorre o escoamento da água e dos sedimentos. Estes canais se conectam à voçoroca, sofrem aprofundamento e evoluem para montante, expandindo as dimensões da voçoroca.

As formas denudacionais que ocorrem na área são manifestações dos processos geoquímicos, que ocorrem em subsuperfície e promovem a perda de elementos químicos, preparando o material para a atuação dos processos morfogenéticos vistos em superfície.

Como salienta Cabral (2005), as principais manifestações que atualmente expressam a evolução do relevo na Depressão Sul-rio-grandense são processos de arenização e voçorocamento, que refletem os processos de erosão acelerada atuantes.

Nesse sentido, são necessários estudos futuros que auxiliem na compreensão mais detalhada dos processos químicos que conduzem à dissolução da rocha, sendo fundamental considerar a concentração de elementos químicos dissolvidos na água, o pH do meio e a influência da água subterrânea.

Referências bibliográficas

- AVILA, L. O. *Erosão na Microbacia do Arroio Sarandi: Voçoroca do Buraco Fundo, Santa Maria/RS*. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Maria, 2009.
- BASTOS, C. A. B. *Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados*. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1999.
- BERTONI, J.; NETO, F. L. *Conservação dos solos*. São Paulo: Ícone, 1999.
- FÁCIO, J. A. *Proposição de uma metodologia de estudo da erodibilidade dos solos do Distrito Federal*. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, 1991.
- CABRAL, I. de L. L.; ROSS, J. L. S.; ROBAINA, L. E.; MEDEIROS, E.; NETO, S. F. *Processos Erosivos Associados a Formas Pseudo-Cársticas na Depressão Periférica do Rio Grande do Sul*. *GEOUSP - Espaço e Tempo*, São Paulo, n. 17, p. 107-120, 2005.
- CAMAPUM DE CARVALHO, J. C. *Processos erosivos no centro-oeste Brasileiro*. Brasília: Universidade de Brasília; FINATEC, 2006.
- CASTRO, S. S.; COELHO NETTO, A. L. *Evolução Pedogenética em Depressão de Topo na Bacia do Alto Rio Fortaleza, Região do Bananal (RJ)*. *Encontro sobre Engenharia Geotécnica e Hidrologia no Sistema Encostaplanície Costeira*, Ano 4, p. 181-192, 2002.
- COELHO NETTO, A. L. *Evolução de cabeceiras de drenagem no médio vale do Rio Paraíba do Sul (SP/RJ): a formação e o crescimento da rede de canais sob controle estrutural*. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, n. 2, p. 69-100, 2003.
- DOERR, S. H. *Karst-like landforms and hydrology in quartzites of the Venezuelan Guyana shield: Pseudokarst or “real” karst?* *Zeitschrift fur Geomorphologie*, n. 43, p. 1-17, 1999.
- FERNANDES, J. A. *Estudo da erodibilidade de solos e rochas de uma Voçoroca em São Valentim, RS*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, 2011.
- FILIZOLA, H. F. A.; BOULET, R. *Evolution and opening of closed depressions developed in quartz-kaolinitic sedimentary substratum at Taubate basin, São Paulo, Brazil, and analogy to the slope evolution*. *Geomorphology*, p. 1-10, 1995.
- FORD, D.; WILLIAMS, P. *Karst hydrogeology and geomorphology*. Chichester: J. Wiley & Sons, 2007.
- FREIRE, E. P. *Ensaio Inderbitzen modificado: um novo modelo para avaliação do grau de erodibilidade do solo*. *Simpósio Nacional de Controle da Erosão*, Goiânia, 2001.
- FUJIMOTO, N. S. V. M.; GONÇALVES, F. de S.; ZANCANARO, C. *Caracterização das Formas de Relevo em Degraus de Abatimento nos Municípios de Manoel Viana e São Francisco de Assis, Região Sudoeste do Estado do Rio Grande do Sul*. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 11, n. 2, p. 69-74, 2010.
- HARDT, R.; PINTO, S. A. F. *Carste em litologias não carbonáticas*. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 10, n. 2, p. 99-105, 2009.
- INFANTI JUNIOR, N.; FORNASARI FILHO, N. *Processos de Dinâmica Superficial*. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. (Org.). *Geologia de engenharia*. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998. p. 131-152.
- JENNINGS, J. N. *Karst: An Introduction to Systematic Geomorphology*. Cambridge and London: MIT Press, 1971.
- MACIEL FILHO, C. L.; CABRAL, I. L. L.; SPINELLI, J. *Estruturas Morfológicas de Colapso em Sedimentos Inconsolidados no Rio Grande do Sul*. *Simpósio de Geografia Física Aplicada*, São Paulo, 1993. p. 209-211.
- NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. *Soil*

characterization of mapping units for highway purposes in a tropical area. *Bulletin of International Association of Engineering Geology*, n. 19, p. 196-199, 1979.

PILO, L. B.
Geomorfologia Cárstica.
Revista Brasileira de Geomorfologia, [S.l.]: v. 1, n. 1, p. 88-102, 2000.

ROBAINA, L. E. S.;
BAZZAN, T. Feições cársticas em rochas siliciclásticas no oeste do Estado do Rio Grande do Sul – Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 9, n. 2, p. 53-64, 2008.

SALLUN, F. W.;
KARMANN, I. Dolinas em arenitos da Bacia do Paraná: evidências de carste subjacente em Jardim (MS) e Ponta Grossa (PR). *Revista Brasileira de Geociências*, v. 39. p. 551-564, set. 2007.

UAGODA, R.; AVELAR, A.; COELHO NETTO, A. L. Depressões fechadas em relevo quartzo-quartzítico, bacia do ribeirão Santana, médio vale do rio Paraíba do Sul. *Anuário do Instituto de Geociências*, v. 29, p. 85-98, 2006.

VILAR, O. M.;
PRANDI, E. C. Erosão dos solos. In: CINTRA, J. C. A.; ALBIERO, J. H. (Org.). *Solos do interior de São Paulo*. São Carlos: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica; USP, v. 1, 1993. p. 177-206.

WERLANG, M. K.

Configuração da rede de drenagem e modelado do relevo: conformação da paisagem na zona de transição da Bacia do Paraná na Depressão Central do Rio Grande do Sul. Tese (Doutorado em Ciências do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

WRAY, R. A. L.
Quartzite dissolution: karst or pseudokarst? *Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers*, p. 1- 9, abr. 2003.