17. GEOMORFOLOGIA EÓLICA CONTINENTAL E OS CAMPOS DE DUNAS HOLOCÊNICAS DO PAMPA NO RIO GRANDE DO SUL, BRASIL

Tania Cristina Gomes[1] & Roberto Verdum[1]

[1] Universidade Federal do Rio Grande do Sul; geotania.gomes@gmail.com; verdum@ufrgs.br

---

Resumo: Os sistemas de depósitos eólicos continentais constituem feições arenosas inativa e ativas, composta de sedimentos eólicos, que surgem de uma multiplicidade de conformações ambientais, sob distintas condições climáticas, que variam de úmidas/subúmidas a semiáridas/áridas. O sudoeste do Rio Grande do Sul expõe *manchas de areia* (areais) encravadas na paisagem do Pampa, o bioma campestre, que representa 63% do território do estado. São formações superficiais, compostas por depósitos eólicos estáveis e instáveis, que representam a herança de variações climáticas, ao longo do Quaternário, sob condições de climas mais secos do que o atual, e que fornecem evidências paleoclimáticas importantes na compreensão dessa paisagem. Os depósitos de areia, cuja gênese é identificada em climas secos, estão, ao mesmo tempo, sob a ação eólica mais intensa, nos períodos de escassez hídrica, e sujeitos às erosões superficial e subsuperficial, em estações chuvosas, o que remobiliza os sedimentos eólicos inconsolidados, dando início ao processo de *arenização* e à formação de areais. Dessa maneira, com o intuito de compreender a dinâmica hídrica-eólica na área de ocorrência de *arenização* e de formação dos areais, faz-se pertinente o estudo das tipologias de feições típicas de ambientes semiáridos, áridos e hiperáridos, bem como o estabelecimento das relações entre as formações superficiais, os processos de arenização e os depósitos eólicos do Quaternário. Assim, pretende-se, neste capítulo, expor os pressupostos teórico-metodológicos, que fundamentaram a pesquisa, a partir da revisão da literatura, referente à temática abordada, trazendo o estado da arte sobre os sistemas eólicos continentais de interiores nessa porção do Pampa do Rio Grande do Sul, Brasil.
Palavras-Chave: Dinâmica eólica continental. Campos de dunas continentais. Arenização. Areais. Pampa.

Abstract: Continental eolian deposit systems constitute inactive and active sandy features, composed of eolian sediments, which arise from a multiplicity of environmental conformations, under distinct climatic conditions, ranging from humid/sub-humid to semi-arid/arid. The southwest of Rio Grande do Sul exposes sand spots (called areais) embedded in the landscape of the Pampa, the grassland Biome, which represents 63% of the state's territory. These are superficial formations, composed of stable and unstable eolic deposits, which represent the legacy of climatic variations throughout the Quaternary period, under drier climates than the present one, and which provide important paleoclimatic evidence for the understanding of the landscape. The

sand deposits, whose genesis is identified in dry climates, are, at the same time, under the most intense wind action during periods of water scarcity, and subject to surface and subsurface erosion during rainy seasons, which remobilizes the unconsolidated aeolian sediments, initiating the sandification process and the formation of sand spots. Thus, in order to understand the aeolian-water dynamics in the area of occurrence of arenization and sand spots, it is pertinent to study the typologies of typical features of semi-arid, arid and hyper-arid environments, as well as to establish the relations between the surface formations, the arenization processes and the aeolian deposits of the Quaternary. Thus, this chapter intends to present both theoretical and methodological assumptions, which were the basis of the research, from the literature review, referring to the theme addressed, bringing the state of the art about the interior continental wind systems in this portion of the Pampa of Rio Grande do Sul State, Brazil.
Keywords: Continental wind dynamics. Continental dune fields. Sandization. Sand spots. Pampa Biome.

Tema: Geomorfologia Eólica Continental

---

1. INTRODUÇÃO

Sistemas eólicos e de campos de dunas interiores (inativas, estabilizadas, relictos, fixos ou fósseis) têm sido amplamente apontados como *proxy* geomorfológico de mudança climática, durante o Quaternário, sendo interpretados como indicadores de períodos de expansão do deserto ou de paleoaridez. No entanto, apesar das dunas do deserto serem uma valiosa ferramenta paleoambiental nas latitudes médias e tropicais, sua interpretação exige a consideração cuidadosa sobre uma série de fatores ambientais e a avaliação de resultados de estudos recentes (THOMAS & SHAWT, 1990).

Os sistemas de dunas, e os depósitos eólicos continentais associados, constituem feições arenosas inativas e ativas, compostas de sedimentos eólicos, que surgem de uma multiplicidade de conformações ambientais, sob distintas condições climáticas, que variam de úmidas e subúmidas a semiáridas e áridas, inclusive, hiperáridas.

A evolução dos sistemas eólicos do Quaternário, sobretudo, do Holoceno, na América do Sul, foi inferida, a partir de poucos estudos, concentrados em áreas limitadas, enquanto muitas regiões se conservam inexploradas. Além disso, as heterogeneidades ambientais e geomorfológicas continentais geram questionamentos sobre a representatividade dos registros estudados e, consequentemente, colocam em dúvida, se os resultados e as interpretações, obtidos a partir destes estudos, podem ser compreendidos em escala regional, visto que os campos de dunas interiores da América do Sul têm sido pouco explorados, enquanto foco de interesse científico, sendo estas formações menos conhecidos do que as sucessões de *loess* no continente (TRIPALDI & ZÁRATE, 2014).

No entanto, na década passada, houve uma retomada dos estudos sobre os sistemas eólicos interiores da América do Sul, sobretudo, com o registro de informações

paleoambientais e paleoclimáticas, ocorridas durante o Quaternário. Os estudos recentes trazem descrições e interpretações mais detalhadas sobre a gênese, a composição, a idade absoluta e a geomorfologia dos sistemas eólicos. Alguns se propuseram a catalogar novos campos de dunas, ainda desconhecidos, estimando a idade, a partir de luminescência opticamente estimulada (LOE). A idade é um parâmetro fundamental para correlacionar os sistemas eólicos com outros registros de *proxy*, além de compreender as respostas dessas morfologias às mudanças climáticas (TRIPALDI & ZÁRATE, 2014).

A contribuição de Tripaldi & Zárate (2014) contribui com o estado da arte, pertinente à pesquisa de sistemas eólicos interiores, na qual o Norte tropical (~10ºN ~10ºS) abrange os campos de dunas de *Llanos del Orinoco* e da bacia amazônica, compostos, principalmente, por dunas parabólicas, *blowouts* (ou deflação) e lineares, desenvolvidas nas várzeas do rio. O Sul tropical (~10ºS ~22ºS) compreende sistemas eólicos, situados ao longo das extensas planícies do *Gran Chaco*, e aqueles, localizados em bacias fluviais, associadas ao escudo cratônico brasileiro (São Francisco, Pantanal e Mato Grosso), não havendo dados cronológicos disponíveis para as dunas lineares e para as *lunettes*, descritas no Pantanal, mesmo que se admita que estas cristas lineares foram distinguidas no alto rio Paraná (Mato Grosso), como acúmulos de areia, associados em diferentes fases do Holoceno. Já o *Piemonte* andino e os pampas ocidentais, no Leste subtropical da América do Sul, compreendem uma grande variedade de morfologias de origem eólica, como, por exemplo, as dunas do tipo *Barchan-barchanoid*, lineares, parabólicas, transversais e *lunettes*, bacias de deflação e lençóis de areia, sendo que as datações por luminescência sugerem atividade eólica, durante tempos glaciais tardios e no Holoceno.

Este é o panorama resumido sobre os sistemas eólicos interiores no conjunto da América do Sul, sendo oportuno aprofundar a temática, a partir da relação de um sistema eólico correspondente no Sudoeste do Rio Grande do Sul, o qual pode integrar o sistema eólico transfronteiriço do Pampa – Brasil, Uruguai e Argentina (províncias de Buenos Aires, de La Pampa, de Santa Fé, Córdoba, de Entre Rios e de Corrientes).

No Sudoeste do Rio Grande do Sul, há manchas de areia (*areais*) encravadas na paisagem do Pampa, bioma campestre que representa 63% do território do estado. São formações superficiais, compostas por depósitos eólicos estáveis e instáveis, que representam a herança de variações climáticas, ao longo do Quaternário, sob condições de climas mais secos do que o atual, que fornecem evidências paleoclimáticas importantes para a compreensão da paisagem.

Deste modo, com o intuito de compreender a dinâmica hídrico-eólica na área de ocorrência de *arenização* e de formação dos areais, faz-se pertinente o estudo das tipologias de feições típicas de ambientes semiáridos, áridos e hiperáridos, bem como o estabelecimento das relações entre as formações superficiais, os processos de arenização e os depósitos eólicos do Quaternário. Assim, pretende-se, neste capítulo, expor os pressupostos teórico-metodológicos, que fundamentaram a pesquisa, a partir da revisão

da literatura, referente à temática abordada, trazendo o estado da arte sobre os sistemas eólicos continentais de interiores numa porção do Pampa do Rio Grande do Sul, Brasil.

2. SISTEMAS EÓLICOS CONTINENTAIS E INTERIORES DO BRASIL

Como já mencionado, os sistemas de dunas interiores têm sido amplamente empregados como *proxy* geomorfológico da mudança climática do Quaternário, caracterizando períodos de expansão de condições desérticas e de paleoaridez. Thomas & Shawt (1990) inferem a existência de sistemas de dunas em cinco continentes, sendo que, para a América do Sul, foram mapeadas quatro regiões com sistemas de dunas relictos: no *Llanos*, entre Venezuela e Colômbia (TRICART, 1974); no São Francisco, no Brasil (TRICART, 1974); no Pantanal, no Brasil (KLAMMER, 1982); e no Pampa, na Argentina (TRICART, 1979). Particularmente, interessa-nos este último sistema, por se situar próximo à área de ocorrência de arenização no Pampa gaúcho, visto que tais ocorrências podem se assemelhar em gênese, em morfologia e em processo. A Figura 1 ilustra a espacialização dos principais sistemas eólicos de interior continental já conhecidos pela sociedade científica brasileira.

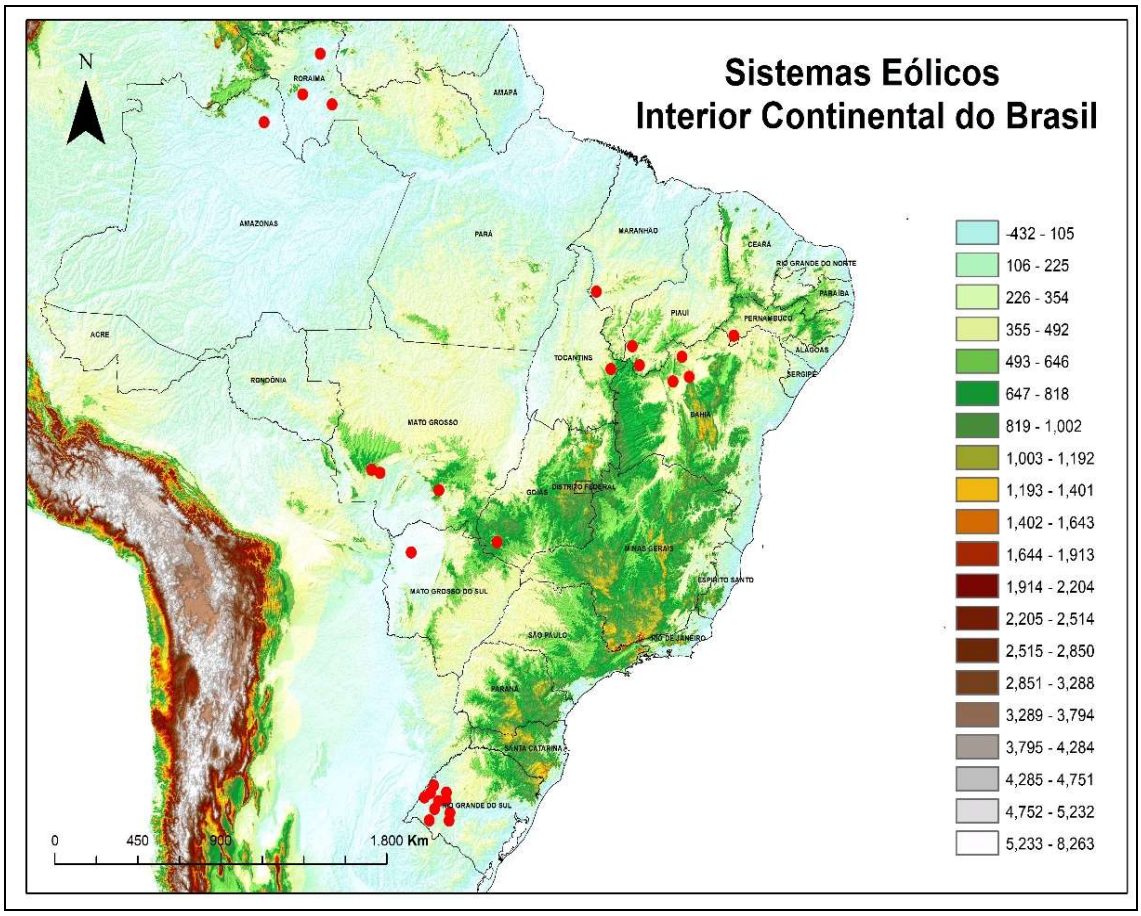

Figura 1: sistemas eólicos do Brasil (**Fonte**: Elaborado pelos autores, 2021)

Giannini *et al*. (2005)[1] infere e classifica três áreas de ocorrência de dunas eólicas interiores e destaca que as idades destas paleodunas permitem supor uma atividade eólica intensificada por clima mais seco, sobretudo, durante o Último Máximo Glacial:

> O sistema de paleodunas do **baixo Rio Negro (AM)** é formado por vários campos interconectados, contendo formas parabólicas simples e compostas de cristas bem definidas [...]. Destaca-se o campo de dunas entre os rios Catrimani e Água Boa, com 40 km de extensão e 25 km de largura. O sistema **do médio Rio São Francisco** corresponde a campos de dunas livres formadas por ventos de SE e E, com controle topográfico-estrutural evidenciado pela espessura elevada da acumulação (100 m). As **paleodunas do Pantanal Mato-Grossense** resultaram do retrabalhamento eólico de sedimentos de leques aluviais, com deposição no sotavento de depressões deflacionares. Na parte sul do Leque do Taquari, onde as paleodunas estão alinhadas segundo NE, reconhecem-se *lunettes* estabilizadas por vegetação arbórea ao redor de antigas depressões deflacionares, hoje lagoas. (GIANNINI *et al*., 2005 p. 235, grifos nossos)

Ainda conforme Giannini *et al*. (2005), há outros dois campos de dunas gigantes em Anauá (RR) e em Aracá (AM), bem como campos de dunas menores, dunas isoladas e "[...] extensos campos de areia, sem estruturação de dunas" (possivelmente, lençóis de areia). O sistema do médio São Francisco corresponde à acumulação de areias, supridas pelo rio São Francisco e transportadas pelos ventos de SE e de E, com a maior concentração de dunas inativas, ocupando parte dos municípios de Barra e de Pilão Arcado, na Bahia.

As paleodunas do Pantanal Mato-Grossense foram compostas, a partir de leques aluviais e são constituídas sob condições de clima semiárido no final do Pleistoceno. No Rio Taquari, há um megaleque aluvial e, na sua porção sul, existe uma área, conhecida como Nhecolândia, em que há pequenas lagoas, distribuídas em meio à trama de paleocanais distributários e de canais tributários atuais. Essas lagoas são margeadas por elevações de areia fina, com até 4 m de altura (denominadas "cordilheiras"). No entanto, é importante salientar que foi a partir do trabalho de Almeida (1945) que passou a se admitir a existência de paleodunas no Pantanal:

> Na Nhecolândia, Almeida (1945) observou uma lagoa associada à obstrução de vale por barragem arenosa de 2 m de altura e concluiu que as lagoas teriam sido derivadas de vales barrados por dunas eólicas. Para corroborar sua interpretação, apresentou resultados de análises granulométricas das barragens, em que se observa o predomínio de areias limpas e bimodais (finas a médias).
>
> Valverde (1972), por exemplo, considerou que as cordilheiras são a expressão morfológica de antigas dunas eólicas formadas em condições desérticas pretéritas. Posteriormente, Klammer (1982) identificou milhares de dunas longitudinais fósseis orientadas segundo as direções NNE-SSW e NNW-SSE,

[1] As inferências de morfologias eólicas interiores foram inferidas, a partir de trabalhos realizados por Almeida (1945), por Braun (1977), por Tricart (1982), por Klammer (1982), por Ab'Saber (1988), por Santos *et al.* (1993) e por Carneiro Filho *et al.* (2002).

> concluindo que os ventos foram constantes de NNE e NNW e que "o relevo do Pantanal é como o de um deserto posto sob influência de clima úmido". A suposta existência desse padrão uniforme de dunas levou Clapperton (1993) a considerar que o Anticiclone do Atlântico Sul estava numa posição mais austral durante a formação do campo de dunas.
>
> Numa outra perspectiva de análise, mas também considerando a atuação do vento como agente geológico modelador de parte da paisagem pantaneira, Almeida & Lima (1959) sugeriram que processos de deflação eólica contribuíram para a gênese das lagoas. A hipótese foi retomada muitos anos depois por Tricart (1982), para quem as lagoas foram formadas a partir de depressões de deflação, em analogia a formas similares existentes na área da Pampa Deprimida, na Argentina. Com base na interpretação de imagens de satélite, mapeou as principais áreas de atuação pretérita de processos eólicos
>
> Segundo Assine & Soares (2004), a paisagem do Pantanal Mato-Grossense é resultado da superimposição de diversos eventos geológicos atuantes nos últimos 120.000 anos. Durante o último período seco, coincidente com o máximo glacial no final do Pleistoceno, distributários de lobos aluviais da parte sul do Leque do Taquari foram abandonados e os sedimentos retrabalhados pelo vento, gerando depressões de deflação. Pequenas dunas eólicas foram formadas no lado de sotavento das depressões, muitas vezes em forma de meia-lua (*lunette dunes*), constituindo elevações marginais de areias finas a muito finas (as chamadas cordilheiras). Com a deglaciação, a mudança para um clima mais úmido na região promoveu a elevação do nível freático, dando origem às lagoas. Muitas delas, devido ao seu isolamento da drenagem superficial, tornaram-se salinas, tendo sido por isso consideradas *salt pans* por Klammer (1982) (GIANNINI *et al*., 2005, p. 251).

Outros estudos também apontam que, no norte tropical do Brasil, os sistemas eólicos interiores abrangem os campos de dunas da bacia amazônica, compostos, principalmente, por dunas parabólicas, *blowouts* (ou deflação) e lineares, desenvolvidas nas várzeas do rio (TRIPALDI & ZÁRATE, 2014). Os campos de dunas da Bacia Amazônica estão relacionados às áreas abertas[2], em que predominam formações arenosas, associadas a depósitos aluvionares de paleodrenagem e a depósitos *in situ* de rochas intemperizadas do escudo cristalino das Guianas, que, remodeladas pelos ventos, deram origem a feições eólicas (atualmente, paleodunas) do tipo dunas parabólicas ativas e inativas. Essas áreas merecem uma melhor discussão, dos pontos de vista físico e biológico, pois compreendem as áreas-chave dos estudos paleoambientais, caracterizando as feições discordantes, em relação ao clima atual, tropical úmido (CARVALHO, 2015).

A exemplo, estas áreas ocorrem nos *Llanos do Orinoco* (Venezuela), no Chaco (Bolívia) e, no Brasil, são observadas no estado de Roraima (em Boa Vista), nos lavrados e nas campinaranas (planícies e areias brancas) do centro-sul do estado, que, juntas, recobrem cerca de 27% do território de Roraima (com cerca de 43.281 km² e de 17.500 km², respectivamente) (LATRUBESSE & NELSON, 2001; CARNEIRO-FILHO *et al*., 2003; CARVALHO, 2015). Ainda há exemplo de depósitos eólicos, restritos às regiões dos rios Cauamé e Tacutu e à foz do rio Mucajaí (MENESES *et al*., 2007).

---

[2] "Dentre as áreas abertas amazônicas, podemos citar as do rio Trombetas (EGLER, 1960); Negro (DUCKE & BLAKE, 1953); Tapajós (VELOSO *et al*., 1976); Madeira (MURÇA-PIRES, 1974); no Amapá (MURÇA-PIRES, 1974); além de outras áreas, pouco documentadas." (CARVALHO, 2015, p. 447).

No Sul tropical, os sistemas eólicos estão localizados em bacias fluviais, associadas ao escudo cratônico brasileiro (São Francisco, Pantanal e Mato Grosso, como descrito, anteriormente), não havendo dados cronológicos disponíveis para as dunas lineares e para as *lunettes* do Pantanal, mesmo que se admita que estas cristas lineares tenham sido distinguidas no alto rio Paraná (Mato Grosso) como acúmulos de areia, associados a diferentes fases do Holoceno (TRIPALDI & ZÁRATE, 2014).

O mais recente trabalho em escala nacional sobre a temática aparece no livro *Brasil - Feições Arenosas*, organizado por Suertegaray e Silva (2020). Na obra, foram registradas duas áreas do estado do Rio Grande do Sul, os municípios de São Francisco de Assis e de Quaraí; o Parque Nacional Chapada das Mesas, em Carolina, no Maranhão; Gilbués e Corrente, no Sudoeste do Piauí; Jalapão, no Tocantins; Xique-Xique, Barra e Casa Nova, no sertão da Bahia; Petrolina, em Pernambuco; Serranópolis, em Goiás; e Reserva do Cabaçal, Salto do Céu e Planalto dos Guimarães (Jaciara), no Mato Grosso. Essas são as áreas mais conhecidas, por parte dos pesquisadores brasileiros. Cada uma delas expõe características geomorfológicas distintas na sua gênese e na sua origem, mas assinalam, como ponto de conexão, as características típicas de feições arenosas eólicas interiores.

As feições arenosas do Maranhão são conhecidas como o portal da Chapada no Cerrado. Pertencem ao Parque Nacional da Chapada das Mesas (com destaque para o Morro do Chapéu) e abrangem os municípios de Carolina, de Riachão, de Estreito e de Imperatriz. É uma complexa paisagem de transição fitogeográfica, com características do Cerrado, da Amazônia e da Caatinga. Nos topos das mesas e das chapadas, encontram-se formações savânicas e florestais, além da vegetação ciliar. São feições arenosas, associadas a paredões areníticos, expostas às erosões química e física da água e à ação dos ventos, condições que facilitam o transporte e a deposição dos arenitos eólicos (NUNES, 2020).

Do ponto de vista geológico, a área está inserida na Bacia Sedimentar do Parnaíba (Paleozoico) e assentada sobre a formação Sambaíba (Paleotriássico – Grupo Balsas). É composta por arenitos, provenientes de ambientes desérticos, com contribuição fluvial. No âmbito da geomorfologia, compreende os domínios das Chapadas e das Mesetas de Estreito-Carolina, sendo caracterizada por extensa superfície de aplainamento conservada, com significativa quantidade de relevos residuais, em forma de mesas, de mesetas, de platôs isolados e de morros testemunhos. No sopé das mesas, há o acúmulo de depósitos de coluviões pleistocênicos, oriundos da ação da gravidade (NUNES, 2020).

As feições arenosas de Gilbués (malhadas, grotas, terra nua e morrotes vermelhos, em denominações regionais) no Sudoeste do Piauí se caracterizam como áreas de intenso processo erosivo, desencadeado pelas dinâmicas hídrica e eólica sobre solos descobertos e frágeis. São feições em forma de rampas alongadas e de topografia ondulada, com vegetação rasteira ou arbustiva, produzindo uma paisagem do tipo *badland*, com encostas e com topos dissecados (SILVA, 2020).

As feições arenosas do Parque Estadual do Jalapão (Ponte Alta do Tocantins, de Mateiros e de São Félix do Tocantins) estão situadas nos patamares Leste do estado do Tocantins, inseridas nas bacias sedimentares dos rios São Francisco e Parnaíba. A área do parque exibe uma paisagem de morros residuais (*inselbergs*) de arenito, de topos planos e de vertentes bem dissecadas, em zona de confluência entre os estados da Bahia, do Maranhão e do Piauí. São os conhecidos Patamares Leste do Tocantins, representando as feições mais elevadas, em formato de mesas (exemplos: Morro do Bigorna, Serra do Espírito Santo, Serra do Porco e Serra da Jalapinha), caracterizando áreas de dissecação e de fornecimento de materiais sedimentares (GARÇÃO, 2020).

As formações arenosas são feições de acumulação, com extensos cordões arenosos, ao longo do seu perfil longitudinal, entremeadas por cursos fluviais de grande volume de água, como os dos rios Novo, Soninho e Sono, que deságuam na bacia hidrográfica do Tocantins. Assim, as feições, conhecidas como dunas do Jalapão, estão associadas às areias finas, carregadas das escarpas das serras, pelos ventos, e depositadas sobre os cordões arenosos, formando areais, em um processo semelhante ao da arenização, que ocorre no Sudoeste do Rio Grande do Sul. São terrenos com predomínio de Neossolos Quartzarênicos Órticos e compreendem solos susceptíveis a processos erosivos, conformando áreas de morfogênese acelerada, formando areais de origem natural, associados à estrutura rochosa, ao escoamento superficial, à ação eólica e à declividade das rampas (GARÇÃO, 2020).

De acordo com Pacheco (2014; 2020), o Semiárido Nordestino abriga um dos maiores registros eólicos do Brasil, configurando depósitos de areia e de dunas inativas, de evolução e de gênese intrinsecamente associadas às mudanças climáticas e ambientais, ocorridas durante o Quaternário. Dessa maneira, as dunas e as paleodunas do Sertão da Bahia (paleodunas de Xique-Xique, às margens do Rio São Francisco, por exemplo) são deposições sedimentares fluviais, carreadas ao longo do tempo.

Os depósitos arenosos de Xique-Xique foram descritos como um "[...] pequeno Saara, ao longo do São Francisco" (WILLIAMS, 1925 apud GIANNINI *et al*., 2005, p. 250) e, no ano seguinte, Moraes Rego (1926) incluiu os depósitos aluviais e eólicos, que margeiam o Rio São Francisco na Formação Vazantes. Do ponto de vista paleoclimático, Giannini *et al*. (2005) destacam que as primeiras inferências sobre a área são de Domingues (1948), que atribuiu as paleodunas à fase de acentuada aridez, durante o último período glacial do Hemisfério Norte. Os mesmos autores ainda destacam características morfológicas, granulométricas, morfoscópicas e mineralógicas das areias das dunas inativas.

> A maioria das dunas exibe grandes dimensões e apresenta **forma parabólica composta**, com **diferentes graus de preservação da morfologia eólica**, o que permite o reconhecimento de **três domínios geomorfológicos**...: **lençol de areia**, **dunas com morfologia tênue e dunas com morfologia nítida**. O gigantismo das dunas (com até 13 km de extensão) deve refletir efeitos combinados de **alta energia dos ventos, abundante suprimento de areias e resistência aerodinâmica oferecida pela vegetação local**. Teria sido

> originado assim extenso e espesso "mar de areia", através do empilhamento sucessivo de várias gerações de dunas durante o Quaternário. Estudos granulométricos, morfoscópicos e mineralógicos das areias das dunas inativas indicaram **altas maturidades textural e química** e auxiliaram na delimitação dos três diferentes domínios eólicos. O teor de minerais pesados em relação à amostra total é baixo, não ultrapassando a 0,7%. A **ausência** aparente de **estruturas sedimentares** é bastante comum. .... Sondagens elétricas verticais indicam que o embasamento das dunas, constituído principalmente pelos metassedimentos dos grupos Chapada Diamantina e Bambuí e pelos calcários da Formação Caatinga, apresenta desníveis de até 140 m em relação ao nível de base atual do Rio São Francisco e que as areias encontram-se acumuladas com espessuras variáveis entre 50 e 150 m (GIANNINI *et al*., 2005, p. 250-251, grifo nosso)

O campo de dunas do submédio São Francisco possui cerca de 148 km² e se situa no extremo Oeste do estado, à margem esquerda do rio e a Oeste/Sudoeste da sede municipal de Petrolina. É um depósito arenoso de 11 km de extensão na direção Norte/Sul e de 23 km, no sentido Leste/Oeste. São dunas de areias muito fina e fina, com grãos, que variam de moderadamente selecionados a bem selecionados (CABRAL *et al*., 2020). Diversos autores (BARRETO, 1996; BARRETO *et al*., 2002; AB'SABER, 2006; FERREIRA *et al*., 2013; CABRAL *et al*., 2020) indicam gênese, associada às flutuações climáticas, ocorridas ao longo do Pleistoceno e do Holoceno, que ora resultou na diminuição, ora no aumento do volume de água no leito fluvial. Assim, as areias foram transportadas do canal fluvial do rio São Francisco para as suas margens, quando a lâmina d'água foi reduzida, em períodos de severa semiaridez, que, sob ventos intensos (de SE), formaram feições dunares de variados tipos, como, por exemplo, *nebkhas*, parabólicas, *blowouts* e lençóis de areia (CABRAL *et al*., 2020).

As feições arenosas do Sudoeste de Goiás, especialmente, nos municípios de Serranópolis e de Mineiros, são areais originados de paisagens degradadas ou de solos cultivados com cana-de-açúcar e abandonados a *posteriori,* sobretudo, em áreas de acentuada fragilidade ambiental. Os areais (areiões, na denominação regional) ocorrem, associados às depressões, que sobrevêm da dissecação dos chapadões dos Cerrados no Sudoeste do estado, permitindo o afloramento dos arenitos da Formação Botucatu, que, consequentemente, originam Neossolos Quartzarênicos, altamente suscetíveis à erosão. Ainda, nessas depressões, o relevo é suave-ondulado, o que, associado às friabilidades da rocha e do solo, constitui um ambiente propício à dinâmica erosiva acelerada e à dificuldade de fixação da vegetação em solos desnudos (SOUSA, SCOPEL, PEIXINHO, 2020).

As feições arenosas de Mato Grosso, no município de Reserva do Cabaçal, têm se destacado, na paisagem, como manchas de areia de diferentes extensões. A área de ocorrência dessas feições se situa na região alta, denominada Bacia do Alto Paraguai (BAP), fazendo parte das sub-bacias da cabeceira do Pantanal. A região ainda é constituída pelo Planalto Dissecado, pela Chapada dos Parecis e pela Depressão do Alto Paraguai (NOGUEIRA, 2020).

Nogueira (2017; 2020) infere que a origem das manchas de areia está relacionada às fragilidades do ambiente, ou seja, associa-se aos aspectos físicos da região, bem como às atividades antrópicas, ligadas ao uso da terra, "[...] uma vez que, somente a partir da ocupação territorial e da substituição da vegetação nativa, iniciou-se o processo de formação dos areais" (NOGUEIRA, 2020, p. 129). A supressão da vegetação nativa do Cerrado e a conversão de áreas em pastagens facilita a ação direta da chuva sobre os solos, potencializando o escoamento superficial e levando à formação de ravinas e de voçorocas.

De acordo com Ferreira & Silva (2020), as feições arenosas da Reserva do Cabaçal e do Salto do Céu, no Sudoeste de Mato Grosso, resultam de processos erosivos à disposição do relevo em rampas declivosas e de processos de escoamento, vinculados ao regime de chuvas. Dessa maneira, as feições estão associadas à dinâmica hídrica de escoamento concentrado dos tipos ravinas e voçorocas, que promovem a erosão e o transporte de material arenoso, depositando-o em áreas de menor declividade.

As feições arenosas do Planalto dos Guimarães e da depressão de Rondonópolis ocorrem na borda Noroeste da Bacia Sedimentar do Paraná e estão associadas aos processos morfodinâmicos da abertura da Depressão Interplanáltica de Rondonópolis, sob o Planalto dos Guimarães. Nessa direção, a origem dos areais no Sul e no Sudeste mato-grossenses pode estar relacionada:

> (I) ao **Sistema Denudacional**, através do processo de esculturação das áreas do planalto, em que são identificadas as superfícies regionais de aplainamento, com maior instabilidade do relevo, nas quais há possibilidades de serem intensificadas pela ação das descontinuidades lito-estruturais de falhamentos e de fraturas, resultando em vários conjuntos de patamares abatidos, que se formam nessas áreas; ou (II) no **Sistema Agradacional**, vinculado à queda de material por ação da gravidade no sopé de escapas e de depósitos aluviais, em sua maioria, com características alóctones. (TAKATA & CABRAL, 2020, p. 143, grifos nossos)

Essas feições arenosas ainda podem estar relacionadas à ocorrência de Neossolos Quartzarênicos, os quais são altamente friáveis e apresentam alto índice de erodibilidade, alto déficit hídrico e reduzida fertilidade, atributos que limitam o seu uso (TAKATA & CABRAL, 2020).

3 SISTEMAS EÓLICOS CONTINENTAIS INTERIORES DO RIO GRANDE DO SUL E O SIGNIFICADO PALEOGEOMORFOLÓGICO DOS AREAIS DO PAMPA BRASILEIRO

O estado do Rio Grande do Sul é formado por dois grandes domínios ambientais: os biomas da Mata Atlântica e do Pampa, sendo que este último representa 63% do território do estado, segundo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). A paisagem do Pampa gaúcho, na porção Sul do estado, caracteriza-se pelas colinas (*coxilhas*, na denominação regional), pelos relevos testemunhos (cerros), cobertos por vegetação herbáceas-arbustivas, por vertentes côncavas e por fundos de vales, em que se encontram as matas ciliares. Já a porção Norte do estado está representada pelo Bioma

Mata Atlântica, em que predominam os Campos de Cima da Serra, em meio a formações florestais robustas, ambos ambientes associados a terrenos elevados, de constituição de rochas vulcânicas, ácidas e básicas.

O Sudoeste do estado, no Bioma Pampa, expõe, como característica marcante, a ocorrência de *areais* e de focos de *arenização,* e são inúmeros são os esforços de pesquisadores da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, especialmente, do *Grupo de Pesquisa Arenização/desertificação: questões ambientais*, na investigação da origem e da gênese dessas morfologias arenosas. Estudos sistemáticos, desenvolvidos pelo grupo, têm comprovado que a gênese dos areais daquela região é natural, visto que sua formação procede do processo de arenização de depósitos arenosos não consolidados, retrabalhados pelas dinâmicas hídrica e eólica, ao longo do tempo geológico.

A região de ocorrência dos areais no Pampa gaúcho (Figura 2) se limita, a partir do meridiano de 54º, em direção Oeste, até as fronteiras com a Argentina e com a República Oriental do Uruguai. A área afetada pelo fenômeno da arenização abrange cerca de 4.948,19 ha (última atualização em 2010), espacializados nos municípios brasileiros de Alegrete, de Cacequi, de Itaqui, de Maçambará, de Manuel Viana, de Quaraí, de Rosário do Sul, de São Borja, de São Francisco de Assis e de Unistalda (SUERTEGARAY *et al*., 2001; GUASSELLI, 2012).

Cabe destacar que, com exceção dos areais do município de Quaraí, os demais núcleos arenosos ocorrem na área de abrangência da bacia hidrográfica do Rio Ibicuí, a qual pertence à Região Hidrográfica do Uruguai (U050) e compreende uma área de 36.397,69 km². Esta bacia hidrográfica se limita, ao Norte, pela bacia do Ijui-Piratinim-Icamaquã; ao Sul, pelas bacias do Quaraí e do Santa Maria; a Leste, pelas bacias do Alto Jacuí e do Vacacaí-Vacacaí-Mirim; e a Oeste, com o Rio Uruguai, na divisa com a Argentina.

Diversos elementos e dinâmicas desta paisagem revelam heranças de condições de ressecamento climático, que se contrapõem à típica paisagem de clima subtropical úmido atual. Atualmente, os depósitos de areia, cuja gênese é atribuída a climas secos, estão, ao mesmo tempo, sob ação eólica, nas estações secas, e sujeitos às erosões superficiais e subsuperficiais, em estações chuvosas, o que remobiliza os sedimentos eólicos inconsolidados, dando início ao processo de *arenização* e à formação dos areais.

Estudos paleogeográficos, já realizados, na região estudada, vêm evidenciando uma grande variabilidade climática, ocorrida ao longo do tempo geológico, nos quais o entendimento dessas oscilações climáticas, especialmente, as ocorridas no Quaternário, possuem relação com a morfodinâmica do relevo e com os agentes erosivo-deposicionais, que apresentam comportamento desigual, em condições distintas de temperatura e de umidade.

Em síntese, os areais derivam do retrabalhamento de depósitos arenosos de formações superficiais quaternárias, sendo resultado de dinâmicas morfogenéticas, nas quais os processos hídricos superficiais, particularmente, os de escoamento concentrado dos tipos ravina e voçoroca, associados às chuvas torrenciais, expõem, transportam e

depositam areia, dando origem à formação de areais, que, em contato com o vento, tendem a uma constante remobilização (SUERTEGARAY & VERDUM, 2008).

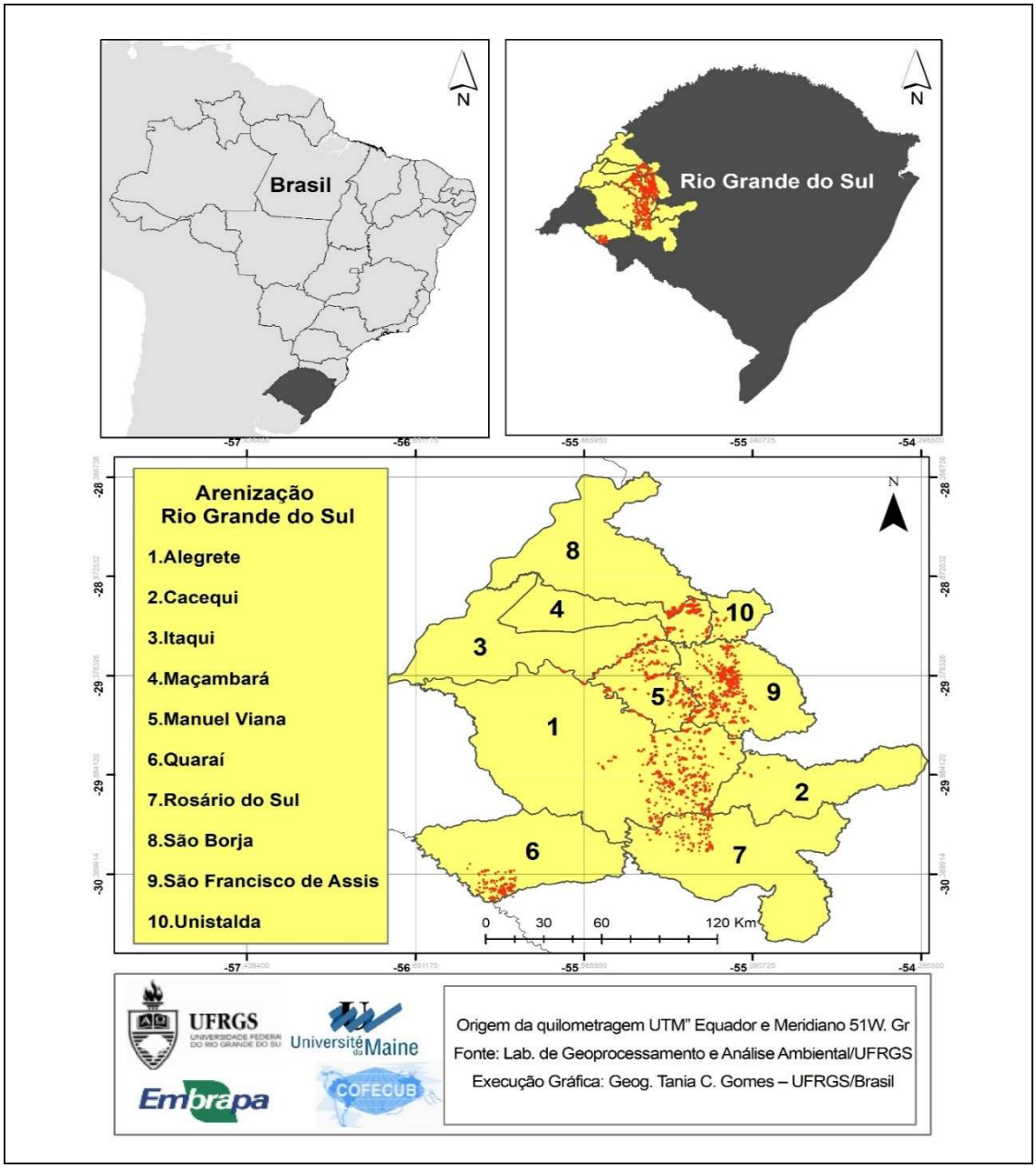

Figura 2. mapa de localização dos municípios, sob processos da arenização (**Fonte:** elaborado pelos autores, 2021).

Igualmente, o processo de arenização e a formação de areais são reconhecidamente de origem natural, associados às paisagens de um passado recente do Pampa, os quais são considerados relictos geomorfológicos e um patrimônio natural a ser preservado. Destaca-se, ao mesmo tempo, que a região, sob domínio de clima úmido, atualmente, conjuga fatores, que favorecem à formação de depósitos eólicos, como, por exemplo, topografia de terras baixas, regime de ventos apropriado (em velocidade e em direção), disponibilidade de sedimentos arenosos (areia quartzosa), expostos à ação dos

ventos, para transporte e para posterior deposição, além de afloramentos rochosos de ancoragem, entre outras características.

Estes fatores caracterizam os elementos fundamentais na composição da paisagem atual e o conhecimento sobre formações superficiais, especialmente, o relacionado aos depósitos eólicos antigos continentais. Contudo, tal contexto é ainda incipiente ou insuficiente, para explicar, com maior precisão, a complexa interpretação associativa, a propósito da morfologia, da gênese e dos processos erosivos/deposicionais, sobretudo, no Brasil e, consequentemente, no Rio Grande do Sul.

3.1. Apresentação e relevância da área experimental de estudo[3]

A área experimental de estudo, com cerca de 144 mil ha, situa-se entre os municípios de Alegrete e de Manoel Viana, ao longo da BR-377 (municípios 1 e 5, na Figura 2). Optou-se por este recorte espacial, por representar a complexidade dos processos geomorfológicos, pois abrange características substanciais no estudo das morfologias eólicas. Entre os elementos evidenciados na área escolhida, observa-se a presença de *areais*, morfologias tipicamente associadas aos depósitos eólicos estáveis e/ou instáveis; de afloramento de blocos areníticos, condicionante estrutural de ancoragem de depósitos eólicos; de lagos em bacia de deflação; de estrangulamento de paleodrenagem/valão, por depósitos eólicos; de processos erosivos lineares dos tipos ravina e voçoroca; entre outras características.

No âmbito da compartimentação geomorfológica (Figura 3), o Rio Grande do Sul está inserido em oito unidades morfoesculturais: Cuesta de Haedo, Depressão Central Gaúcha, Escarpa da Serra Geral, Planalto Dissecado do rio Uruguai, Planalto Sul-rio-grandense, Planalto de Uruguaiana, Planalto dos Campos Gerais e Planície Costeira Gaúcha. Contudo, a área experimental de estudo está inserida na morfoescultura Planalto de Uruguaiana e esta unidade, também denominada, pelo IBGE (1995), Planalto da Campanha Gaúcha, constitui-se de basaltos e de andesitos da Fácies Alegrete da Formação Serra Geral (de idade jurocretácica), com afloramento de basaltos da Fácies Gramado e de arenitos de origem eólica da Formação Botucatu, em fundos de vales encaixados, formando vultuosos aluvionamentos nas calhas dos cursos d'água e gerando amplas planícies de inundação, como nos rios Uruguai, Quaraí, Ibicuí e Butuí (CPRM, 2006; DANTAS; VIERO; SILVA, 2010).

Conforme os mesmos autores, próximo ao reverso da unidade Cuesta de Haedo, o planalto apresenta um relevo dissecado em colinas e em morros. Em direção ao rio Uruguai, esse relevo é substituído por superfícies aplainadas, suavemente entalhadas, por uma rede de drenagem de baixa densidade, caracterizando o amplo domínio de superfícies aplainadas, refletindo o baixo grau de dissecação, a que esse baixo planalto foi submetido.

No entanto, se desconsiderarmos a cuesta, enquanto compartimento geomorfológico, divisão adotada por alguns autores, os *areais* ocorrem somente sobre a

[3] Como área experimental de estudo, entende-se o recorte espacial, definido como área-piloto, para a elaboração do mapeamento das morfologias eólicas e de seus atributos.

escarpa erosiva do Planalto Meridional, caracterizando áreas de relevo acidentado e com presença de relevos testemunhos, e sobre a Depressão Periférica, na qual predominam as paisagens do Pampa brasileiro, com presença de relevos do tipo colinas (coxilhas) e morros testemunhos (cerros), com cotas altimétricas de até 200 m. Assim, os *areais* ocorrem, predominantemente, nos compartimentos de colinas com substrato arenítico e são, em sua maioria, originários de deposição eólica, admitindo-se a fragilidade das morfologias de colinas, em virtude da presença de solos incipientes e de formações superficiais quaternárias inconsolidadas (GUASSELLI, 2012).

Como já mencionado, as feições geomorfológicas continentais, como depósitos eólicos antigos e estáveis, também são testemunhos de que as condições climáticas do passado eram bem diferentes das atuais, porém pouco estudadas. Por constituírem feições de difíceis identificação e classificação, quando em regiões continentais, os depósitos eólicos continentais (inativos/fixos e/ou paleodunas inativas/fixas) podem guardar evidências e indicadores geomorfológicos e sedimentológicos de flutuações climáticas, durante o Quaternário, igualmente.

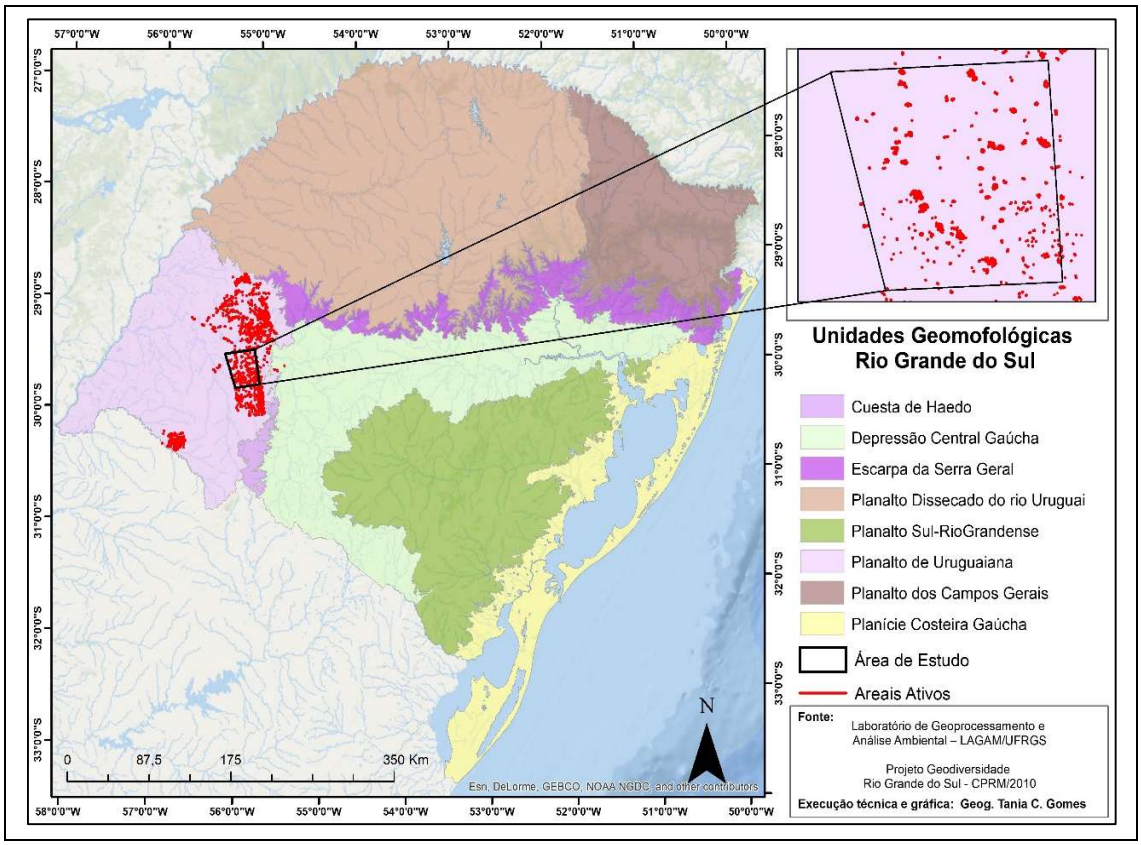

Figura 3: unidades geomorfológicas do Rio Grande do Sul e área experimental de estudo (**Fonte:** CPRM, 2010 **Elaboração**: Os autores, 2021).

De acordo com Giannini *et al*. (2005), os campos de dunas e os lençóis de areia de idade quaternária[4] são registrados em diferentes setores do interior continental

[4] A exemplo das Dunas do Jalapão, dunas do Paleodeserto de Xique-Xique, depósitos eólicos no Oeste de Salvador, paleodunas no Sudoeste de Roraima e planície do Rio Negro.

brasileiro, e a origem destas feições geomorfológicas comumente tem sido associada a períodos de ressecamento climático, ocorridos nos finais do Pleistoceno e do Holoceno. Dessa maneira, os depósitos eólicos estáveis e/ou instáveis, identificados no Sudoeste do estado, também guardam respeitáveis evidências e informações sobre mudanças climáticas, ocorridas, regionalmente, que influenciaram a formação e a transformação da paisagem atual, especialmente, por torná-la única no mundo, abrigando características específicas da região do Pampa.

3.2 Processos e feições geomorfológicas eólicas do Pampa brasileiro, associadas a ambientes pretéritos semiáridos, áridos e desérticos

Com o intuito de compreender a dinâmica eólico-geomorfológica do recorte espacial estudado, faz-se pertinente o estudo da classificação e das tipologias de feições em ambientes semiáridos, áridos e hiperáridos. Dessa maneira, buscou-se caracterizar os mecanismos, que envolvem a atividade eólica, associada as suas feições erosivas e deposicionais. Tal caracterização legou suporte à elaboração da chave de interpretação (Quadro 1), necessária à identificação e à classificação dos depósitos eólicos estáveis ou instáveis, que compõem a paisagem atual da região de ocorrência de arenização no Pampa.

Foram abordados, também, subtemas, referentes à distribuição espacial dos ambientes desérticos no globo terrestre, os agentes atuantes na esculturação das feições típicas desses ambientes secos, as diferentes feições eólicas, trazendo suas classificações e tipologias, e, por fim, a ocorrência de processos flúvio-eólicos em ambientes semiáridos, áridos e hiperáridos. No entanto, esses conceitos não serão detalhados nesse momento, devido à extensão teórica da temática.

Para Goudie (2004), a morfologia das dunas responde às características dos sedimentos e à variabilidade direcional do vento, sendo que estas ocorrem em padrões auto-organizados, que se desenvolvem, ao longo do tempo, de acordo com o regime de ventos e com o fornecimento de areia. A vegetação e os obstáculos topográficos são fatores, que influenciam a morfologia das dunas em regiões costeiras, em regiões semiáridas e em regiões subsumidas. Portanto, a diversidade de dunas surge da variação da intensidade e da combinação dos processos de formação de dunas: os padrões de vento diários e anuais, a estabilidade atmosférica e a estratificação, a força do vento, o tamanho do sedimento, o fornecimento de sedimentos, a cobertura vegetal e a forma da planta, a topografia de rochas duras, as chuvas e a história geológica recente.

De acordo com Sígolo (2009), as dunas possuem, como características principais, estratigrafia cruzada e marcas de ondulações, existindo duas classificações fundamentais para dunas: uma, considerando seu aspecto morfológico; e outra, o aspecto da estrutura interna (a forma, pela qual os grãos de areia se dispõem, em seu interior). Dessa maneira, a classificação fundamentada na estrutura interna de dunas considera sua dinâmica de formação, reconhecendo dois tipos principais: dunas estacionárias (estáticas) e

migratórias. Considerando as morfologias, as dunas podem ser: transversais, barcanas, parabólicas, estrelas e longitudinais.

Sígolo (2009) descreve, também, dunas fósseis, dunas antigas ou paleodunas. Elas constituem feições dunárias, que sofreram processos de consolidação de suas areias, ao longo do tempo. São feições características da ação eólica, que podem ser reconhecidas em rochas sedimentares de diferentes idades, permitindo, ainda, a reconstituição de ambientes eólicos do passado, ou seja, podem testemunhar ambientes desérticos da Era Mesozoica, a exemplo dos registros encontrados na Bacia Sedimentar do Paraná, os quais abrangem vários estados brasileiros (Mato Grosso, São Paulo, Santa Catarina, Paraná e Rio Grande do Sul) e no Uruguai, no Paraguai e na Argentina. A identificação, em rochas sedimentares antigas, de estruturas interna e externas, típicas de dunas atuais (estratigrafia cruzada e marcas onduladas), permite, também, o reconhecimento de uma duna fóssil, visto que, pela análise da orientação das faces em dunas fósseis, é possível identificar o sentido preferencial do vento na época de sua formação, bem como reconhecer as faces de barlavento e de sotavento pretéritas.

Para Suguio (2003), existem vários tipos de depósitos eólicos, mas os mais significativos são os lençóis eólicos (*eolian sheets*) e as dunas eólicas (*eolian dunes*). Os lençóis eólicos correspondem a extensos depósitos arenosos, de superfícies mais ou menos planas, os quais resultam da sedimentação, por ventos de alta velocidade, transportando areia de granulometria heterogênea. As dunas eólicas constituem feições distintas entre os depósitos arenosos de ambientes desérticos, ainda que não sejam uma exclusividade deste tipo de ambiente. Suguio (2003) sugere as classificações de dunas propostas por diferentes autores (MELTON, 1940; MCKEE, 1966; e COOPER, 1967), que as distinguem em: barcanas, transversais, parabólicas, *seif*, estreladas, dômicas e reversas, considerando as formas barcanas e *seif* como as mais frequentes.

Ainda de acordo com Suguio (2003), quando há acumulação de lençóis eólicos em superfícies mais ou menos planas, na dimensão de 1.000 a 10.000 km², observam-se os mares de areia (*sand seas*) ou *ergs*. Os chamados campos de dunas (*dunefields*) se aplicam a acumulações menos extensas, de algumas centenas de quilômetros quadrados.

A região de ocorrência dos areais, em toda a sua extensão, comporta depósitos aluviais e eólicos, e muitos deles margeiam o rio Ibicuí, rio da maior bacia hidrográfica do Oeste do estado. Os depósitos eólicos estáveis da área de estudo exibem formas originais remodeladas e desfiguradas pelas erosões pluvial e fluvial, ou seja, apresentam diferentes graus de preservação da morfologia eólica (Figura 4).

As figuras 4A, 4B e 4C caracterizam depósitos eólicos estáveis, os quais, em uma aproximação de classificação, podem ser definidos como campo de dunas (*dunefield*), típico de clima mais seco do que o atual, refletindo a combinação entre a alta energia de ventos e o abundante fornecimento de areia, apresentando resistência aerodinâmica, favorecida por afloramentos rochosos, atualmente aparentes, evidenciando a abrasão, na face à barlavento (SE), e sustentando a deposição eólica à sotavento (NO).

Quadro 1. Chave de interpretação, para o mapeamento das feições geomorfológicas

Atributos	Característica do atributo		Materiais e técnicas aplicadas
Classificação das unidades de relevo	Vales	*Vales secos*: canais sem fluxo herdados, em que três fases levam à forma atual: modelagem anterior em vale, preenchimento de areais, soprados pelo vento e, às vezes, remodelados em concavidades (cabeça de vale seco)	Classificadas, a partir da forma do terreno, segundo o Projeto TOPODATA – INPE (Banco de Dados Geomorfométrico do Brasil, disponibilizado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) Rede de drenagem atual Agência Nacional de Águas (ANA) Imagem SRTM – TIN (INPE) (Resolução 30m) (*Software* ArcGIS 10.5)
		Vales Drenados: caracteriza a atual Rede hidrográfica. Incluem um canal ou leito. O fluxo que os empresta pode ser intermitente ou perene	
	Espaços intermediários ou vertentes	São planas ou setores tabulares entre o topo das encostas dos vales e o sopé das colinas	
	Colinas de topo agudo e topo plano	São os pontos altos do relevo. Sua cartografia torna possível localizar sua forma e sua altitude. Os topos foram interpretados, a partir de imagem SRTM - TIN	
Depósitos eólicos estáveis	Depósitos de areia estáveis, identificados a partir de fotointerpretação. Classificados por textura, por cor, por forma e por altimetria		Fotointerpretação digital em anaglifos (interpretação visual e vetorização) (*software* ILWIS 3.3 Academic e ArcGIS10.5)
Depósitos eólicos instáveis (Areais)	Depósitos de areia ativos, identificados a partir de fotointerpretação e validados em imagens de alta resolução espacial Classificados por textura, por cor e, principalmente, por ausência de vegetação		Fotointerpretação digital em anaglifos Imagens de alta resolução espacial do *Google Earth* Pro (interpretação visual e vetorização) (*software* ILWIS 3.3 Academic e ArcGIS 10.5)
Afloramento rochoso	Passíveis de interpretação em imagens de alta resolução espacial		Fotointerpretação digital em anaglifos Imagens de alta resolução espacial do *Google Earth* Pro (interpretação visual e vetorização) (*software* ArcGIS 10.5)
Relevo abrupto ou tabular	Passíveis de interpretação por fotografias aéreas		Fotointerpretação digital em anaglifos Imagens de alta resolução espacial do *Google Earth* Pro (interpretação visual e vetorização) (*software* ArcGIS 10.5)
Bacia de deflação	Passíveis de interpretação por fotografias aéreas e por imagem de alta resolução espacial		Fotointerpretação digital em anaglifos Imagens de alta resolução espacial do *Google Earth* Pro (interpretação visual e vetorização) (*software* ArcGIS 10.5)
Processos erosivos dos tipos ravinas e voçorocas	Passíveis de interpretação por fotografias aéreas e por imagem de alta resolução espacial		Fotointerpretação digital em anaglifos Imagens de alta resolução espacial do *Google Earth* Pro (interpretação visual e vetorização) (*software* ArcGIS 10.5)

Fonte: Gomes (2019)

A Figura 4C ilustra as morfologias eólicas, ainda bem preservadas, associadas à cobertura herbácea, as quais já demostram sinais de erosão, como aqueles visíveis no

quadrante superior esquerdo da imagem. Na imagem, é possível observar dois pequenos lagos (no centro e no quadrante superior direito), denominados lagos em deflação (*lunettes*) ou PAN, que consistem, basicamente, em uma área rebaixada pela erosão e pela abrasão eólica, causada pelos paleoventos do quadrante Sudeste, originando pequenos lagos deflacionados em áreas de baixa precipitação.

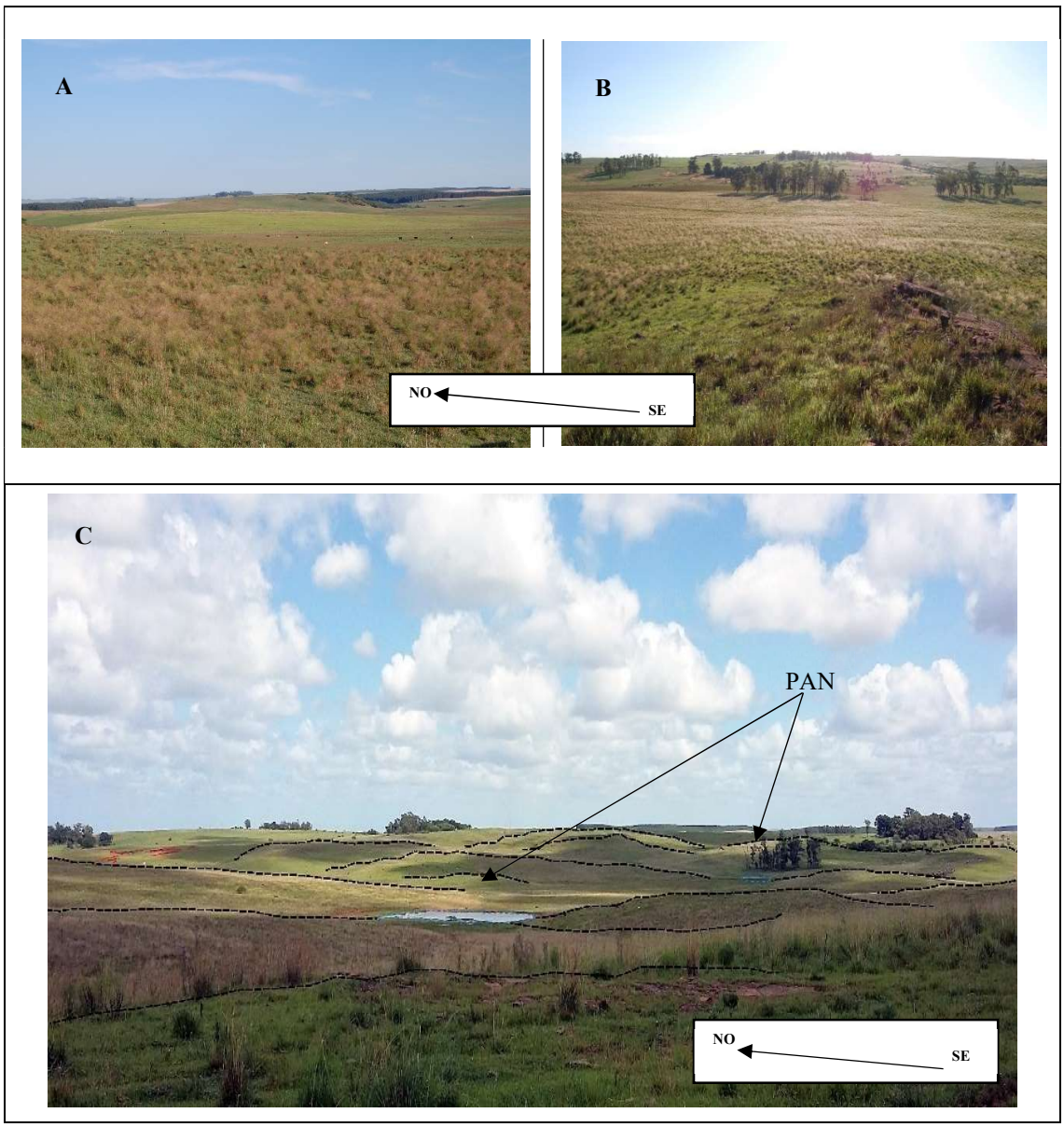

Figura 4: Colinas, associadas a campos de dunas (*dune fields*) do Quaternário. (A) Colinas, associadas a campos de dunas (*dune fields*) do Quaternário, dispostas, de forma alongada, no sentido SE-NO, estáveis, com cobertura herbácea; (B) Colinas, associadas a campos de dunas (*dune fields*) do **Quaternário**, dispostas, de forma alongada, no sentido SE-NO, estáveis, com cobertura herbácea e com afloramentos rochosos, sustentando a deposição eólica à sotavento (NO) (**Fonte:** Trabalho de Campo – novembro/2014; **Fotografia:** Roberto Verdum); (C) Colinas, associadas a campos de dunas (*dune fields*) do Quaternário, dispostas, de forma alongada, no sentido SE-NO, estáveis, com cobertura herbácea, com formação de PAN (*lunettes*) ou, ainda, bacia ou lagos em deflação (**Fonte**: Gomes (2019); **Fotografia**: Tania C. Gomes)

As morfologias do tipo PAN, também denominadas *playas*, *pfannen*, *sabkhas*, *chotts*, *kavirs*, etc., são depressões topográficas fechadas, características de superfícies de baixo ângulo, situadas em terras secas do mundo (JAEGER, 1939 *apud* GOUDIE, 2004, p. 758), especialmente bem desenvolvidas nas *High Plains* dos EUA, nos Pampas argentinos, na Manchúria, nas estepes ocidentais siberianas e cazaques, na Austrália ocidental e meridional e no interior do sul da África. A origem tem intrigado geomorfologistas há mais de um século. Hipóteses incluíram deflação, escavação por animais, cárstica (*dayas*) e solução de pseudocárstica. O que está claro é que uma série de processos tem sido envolvida na iniciação e na manutenção do PAN, porém nenhuma hipótese pode explicar todas as facetas de suas próprias histórias, de seus tamanhos variados e de suas morfologias (GOUDIE, 2004).

Os PANs se desenvolvem em superfícies suscetíveis. No sul da África, por exemplo, eles são mais bem desenvolvidos nas areias do *Kalahari Bed* e em xistos, de granulação fina. Também ocorrem em situações topográficas particulares – em pisos de lagos deflacionados, em antigas linhas de drenagem, nas valas entre dunas, nos narizes de dunas parabólicas e nas planícies costeiras (por exemplo, em Carolina Bays, na Costa Leste dos EUA). São orientados, em relação às tendências regionais de vento, e, em muitos casos, tendem a ter lados bulbosos, protegidos do vento. Em áreas, como a do Pampa, na América do Sul, nas *High Plain*, nos EUA, e no interior da África do Sul, existem, literalmente, dezenas de milhares de depressões e elas podem cobrir extensas áreas da superfície da Terra (GOUDIE, 2004).

Um modelo integrado de PAN define que estas depressões ocorrem, preferencialmente, em áreas de relativamente baixa precipitação efetiva. Esta condição predisponente de baixa precipitação significa que a cobertura vegetal é escassa e que a atividade deflacional pode ocorrer. Além disso, uma vez que uma pequena depressão inicial é formada e que a água tenha se evaporado, para se obter um ambiente fisiológico, o crescimento de vegetação é mais retardado, o que incentiva ainda mais a deflação. O papel da deflação, na remoção de material, a partir de uma depressão, pode ser aumentado por animais, que tendem a se concentrar ali, devido à disponibilidade de água. Também é importante que qualquer depressão inicial, uma vez formada e por qualquer meio, não seja destruída pela ação dos sistemas fluviais integrados ou eficazes. Os fatores, que podem causar a falta de integração fluvial, são: encostas de ângulo baixo, dessecação episódica e duna invasão, presença de intrusões de dolerite e de perturbações tectônicas. Além de sua ocorrência em desertos, vários tipos de lagos também são uma característica de algumas áreas de tundra (GOUDIE, 1999; 2004).

Vale destacar, ainda, as feições do tipo *lunette*, que são acumulações eólicas concêntricas, que ocorrem nas margens à sotavento (na direção dos ventos) de PAN (Figura 5). Elas tendem a ocorrer em áreas, nas quais os níveis de precipitação atuais variam entre 100 mm e 700 mm e sua estratigrafia pode indicar mudanças passadas nas condições hidrológicas e climáticas. Algumas bacias podem ter dois ou mais *lunettes* em seus lados, protegidos do vento, e podem ter diferentes características mineralógicas e de

tamanho de grãos. As *lunettes* podem ter dimensões de alguns quilômetros de extensão e, em circunstâncias excepcionais, podem atingir alturas superiores a 60 m (GOUDIE, 2004).

Figura 5: Colina, associada a campo de dunas (*dune fields*) do Quaternário, e deflação, do tipo PAN. No primeiro plano da foto, colina, associada a campo de dunas (*dune fields*) do Quaternário, disposta, de forma alongada, no sentido SE-NO, com cobertura de pastagem artificial (*Brachiaria decumbens*); no segundo plano da foto, lago, associado à deflação do tipo PAN, situado na depressão entre as colinas (intraduna) (**Fonte:** Trabalho de Campo – novembro/2014; **Fotografia:** Roberto Verdum).

Os materiais destas feições podem variar, de acordo com sua composição e com os tamanhos das areias e das argilas (no caso de dunas de argila, podem conter de 30% a 70% de sua composição total). Igualmente, algumas *lunettes* são ricas em carbonato de quartzo, enquanto outras o sejam em sua quase totalidade. Conforme o mesmo autor, várias são as hipóteses formuladas, para explicar a composição das *lunettes.* Hills (1939) acreditava que elas foram construídas, quando as depressões continham água, e que elas eram compostas de pó atmosférico, capturado por gotas de pulverização, provenientes do corpo de água. Stephens & Cocker (1946) sugeriram que muitas das *Lunettes* foram construídas de agregados, transportados a partir dos pisos das depressões. Campbell (1968) acreditava que essa hipótese, da ação da deflação, poderia realmente representar muitas características das *lunettes*, ao observar que o seu material era oriundo do leito do lago. No entanto, a mesma autora reconheceu que alguns materiais poderiam ter origem nas praias, gerados pelas ondas, e, por isso, poderiam ser análogos aos das dunas costeiras primárias, do tipo frontais. De acordo com Goudie (2004), esta é uma visão desenvolvida por Bowler (1973), que observou fácies arenosas, associadas às praias, enquanto fácies ricas em argila, que também podem ter um alto teor de grãos evaporíticos, foram formadas durante as fases mais secas, quando a deflação do fundo do lago dessecado era possível.

Portanto, as *lunettes* podem fornecer evidências, para compreender as mudanças hidrológicas no tempo (GOUDIE, 2004).

Os depósitos eólicos também podem estar associados a canais fluviais, soterrados pelas suas areias, barrando/estrangulando a continuidade da drenagem, visivelmente encaixada em áreas úmidas, atualmente. A Figura 6A ilustra o processo de soterramento de canal fluvial por depósito arenoso.

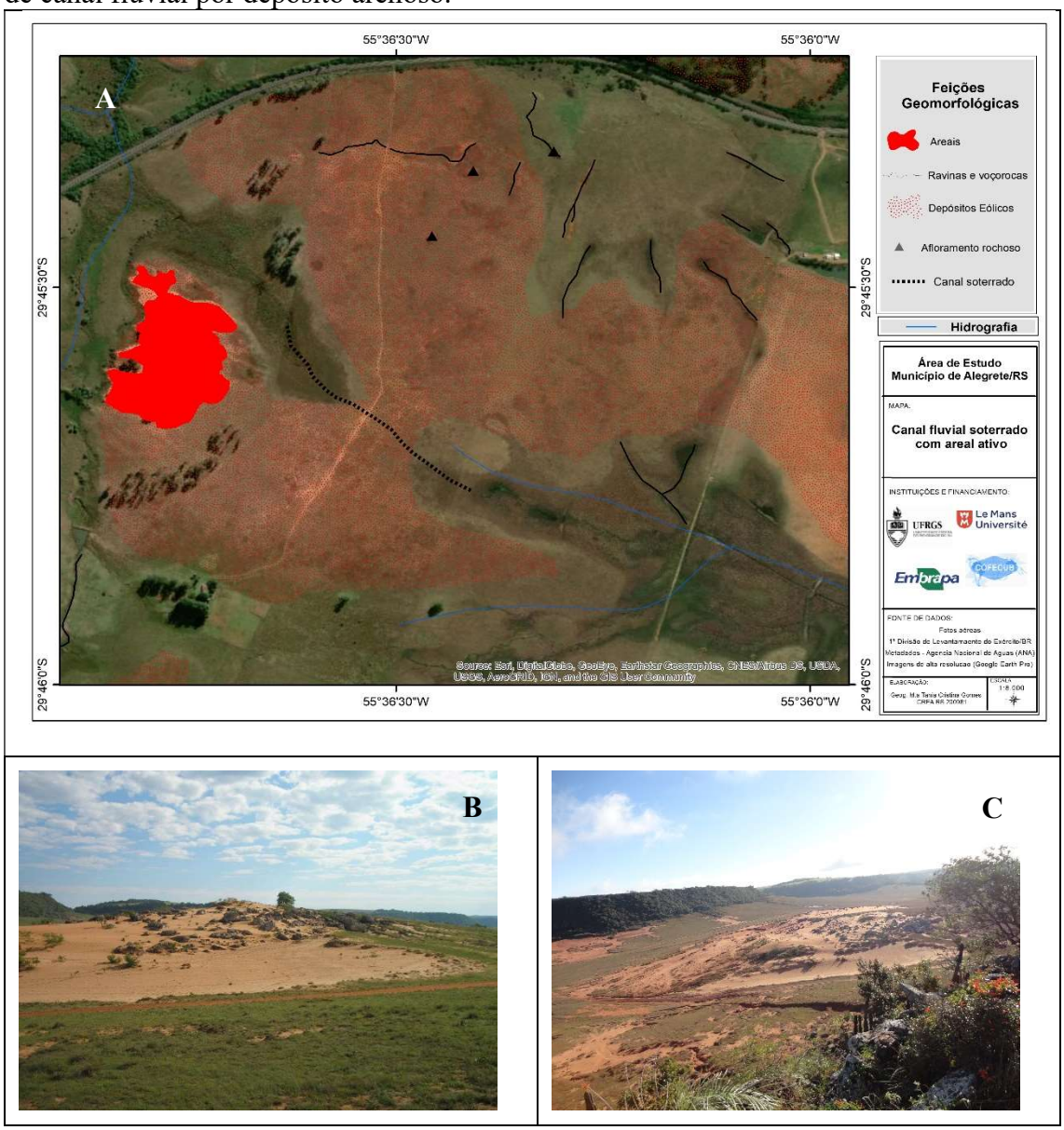

Figura 6: (A) mapa ilustra a área de depósito eólico instável (areal ativo – em vermelho), processos de ravinamentos e de reativação de canais (segmentos em preto), atuando sobre o depósito eólico. Presença, também, de canal, soterrado por depósito arenoso (segmento pontilhado em preto). Pela imagem, é possível observar, ainda, o depósito eólico, barrando/estrangulando a continuidade da drenagem atual, encaixada em área úmida (**Fonte**: Gomes (2019); (B) depósito eólico instável, com areal ativo em topo de colina e em blocos de rochas aparentes, em São Francisco de Assis (RS) (**Fonte**: trabalho de campo 2011; **Fotografia:** Tania Gomes); (C) depósito eólico instável, com areal ativo em topo de colina e em rampa; processo erosivos dos tipos ravinas e voçorocas, em São Francisco de Assis (RS) (**Fonte**: trabalho de campo 2013; **Fotografia:** Tania Gomes)

Pela imagem, é possível observar o depósito eólico, barrando/estrangulando a continuidade da drenagem, atualmente, a qual se encontra encaixada em áreas úmidas. O canal soterrado está representado pelo segmento pontilhado em preto. A mancha na cor vermelha ilustra um depósito eólico instável (areal ativo (figuras 6B e 6C)), os segmentos em preto representam processos erosivos (do tipo voçoroca), atuando sobre os depósitos eólicos, que compõem a paisagem. Os triângulos pretos representam afloramentos da Formação Botucatu, os quais serviram de ancoragem às areias desse depósito eólico.

Após o estudo das feições geomorfológicas, associadas aos depósitos eólicos, foram estabelecidas a condição de compartimentação e a classificação das unidades de relevo. A Figura 7 compõe o mapa das unidades de relevo da área de estudo, as quais são individualizadas em: vales (vales secos e vales drenados); colinas; espaços intermediários ou vertentes, associadas a feições geomorfológicas do tipo afloramentos rochosos; bacias de deflação; depósitos eólicos estáveis e/ou instáveis (*areais*); e processos erosivos dos tipos ravinas e voçorocas.

A área de estudo possui cerca de 144 mil ha, dos quais cerca de 38 ha são de vales drenados, 21 ha são de vales secos, 18 ha são de vertente/espaços intermediários e 65 ha são de topo de colinas (agudo ou plano). Também foram calculadas as áreas e os percentuais, equivalentes a cada feição geomorfológica em cada unidade de relevo. Dessa maneira, tem-se, na unidade **vales drenados,** 0,28% de areais, 0,017% de processos erosivos e 7,47% de depósitos eólicos. Os **vales secos** têm 0,9% de areais, 0,04% de processos erosivos e 22,25% de depósitos eólicos. As **vertentes/espaços intermediários** possuem 0,43% de areais, 0,02% de processos erosivos e 17,82% de depósitos eólicos. E, por fim, na unidade **topo de colinas**, são cerca de 0,44% de areais, de 0,0098% de processos erosivos e de 20% de depósitos eólicos (Quadro 2).

Quadro 2. Demonstrativo de área e de percentual de cada feição geomorfológica, em relação as unidades de relevo

Unidades de relevo (ha)		**Depósitos eólicos**	**Areais**	**Processos erosivos**
Vales drenados	38.495	2.878	110	65.663
Vales secos	21.729	4.836	197	101.050
Espaços intermediários	18.807	3.353	81	38.829
Topos de colinas	65.422	13.235	289	64.081
Total	144.453	24.302	677	269.624 (m²) – 27 (ha) *calculados, a partir de um *buffer* de 0,5 m
Percentual proporcional sobre cada unidade (%)			**Areal**	**Processos erosivos** / **Depósitos eólicos**
	Vales drenados		0,2849	0,0171 / 7,4754
	Vales secos		0,9070	0,0465 / 22,2571
	Espaços intermediários		0,4333	0,0206 / 17,8281
	Topos de colinas		0,4416	0,0098 / 20,2297

Fonte: Gomes (2019)

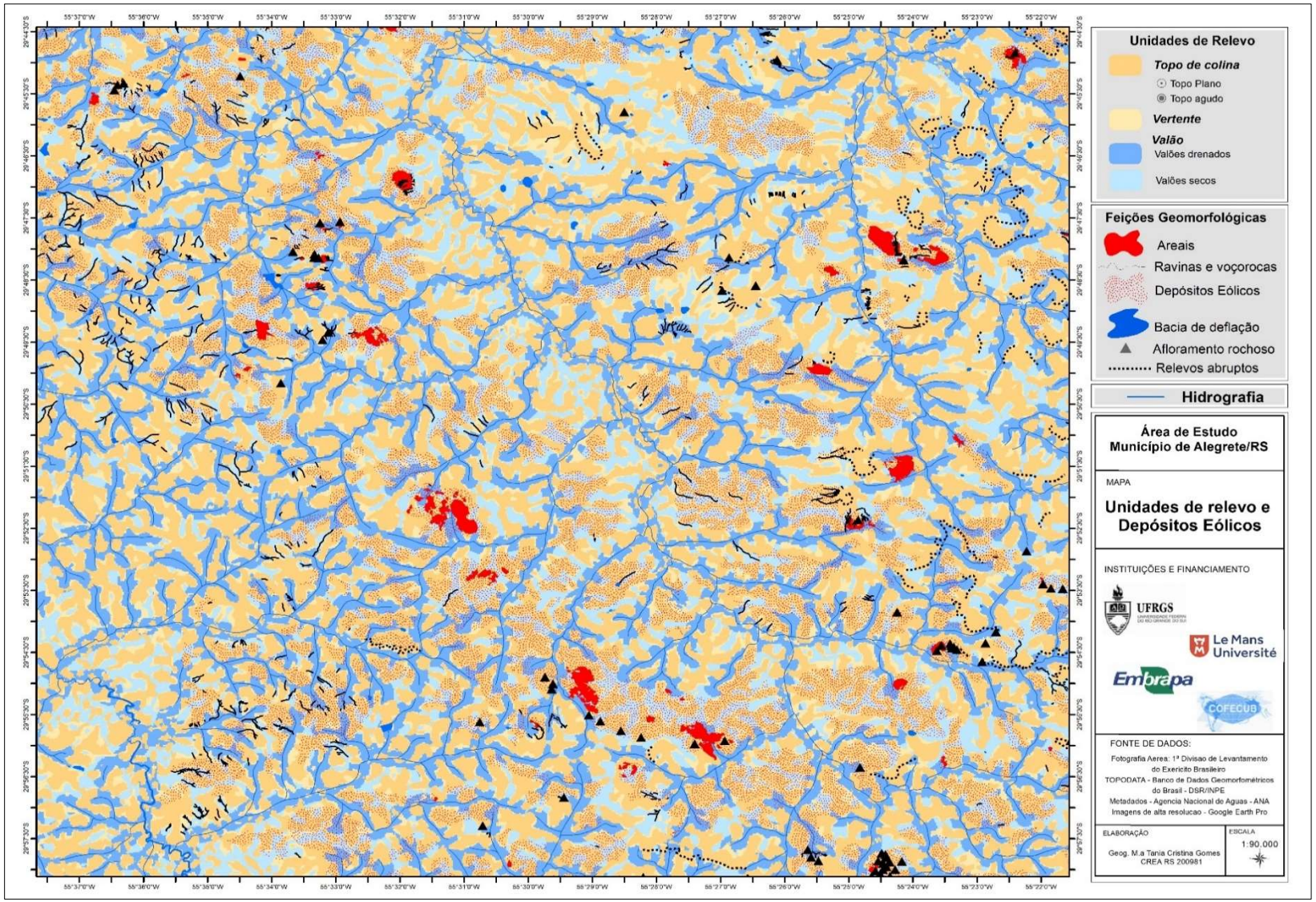

Figura 7: Feições geomorfológicas, associadas às unidades de relevo (**Fonte:** Gomes (2019)).

Nas unidades colina e vales secos, os depósitos eólicos são mais representativos, com cerca de 20% e de 22%, respectivamente, muito provavelmente, por serem camadas superficiais mais jovens, isto é, por terem sido as últimas a ser depositadas, em fase de ressecamento climático. Os cálculos demonstram que, nos vales secos, a dinâmica atual, típica de clima úmido, ainda está incidindo, visto que é nesta unidade que ocorrem os maiores percentuais de processos erosivos e de areais, possivelmente, pela composição sedimentológica frágil – de material arenoso, friável e inconsolidado –, como pode ser observado na Figura 8, que quantifica a distribuição das feições geomorfológicas sobre as unidades de relevo.

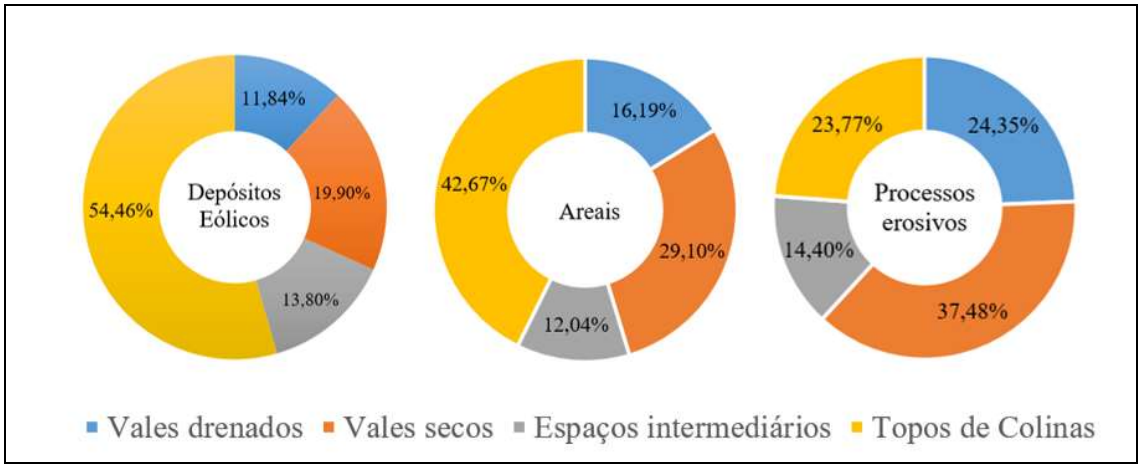

Figura 8: Distribuição das feições geomorfológicas sobre as unidades de relevo. (**Fonte:** Gomes (2019)).

De 24.302 ha de depósitos eólicos, cerca de 11% está sobre os vales drenados, 19% sobre os vales secos, 13% se encontra sobre espaços intermediários e 54% recai sobre topos de colinas. Dos 677 ha de areais, cerca de 16% está sobre os vales drenados, 29% está sobre os vales secos, 12% está sobre os espaços intermediários e 42% está sobre os topos de colinas. Quanto aos processos erosivos, cerca de 24% deles ocorre sobre os vales drenados, por compor o compartimento dos canais fluviais, cerca de 37% está instalado sobre os vales secos, 14% está sobre os espaços intermediários e 23% ocorre sobre os topos de colinas.

A distribuição das feições geomorfológicas, associada às unidades de relevo, mostra que os depósitos eólicos ocorrem, substancialmente, sobre os topos de colinas, seguido de vales secos, refletindo sobre o percentual de ocorrência de processos erosivos, os quais também ocorrem, em maior número, sobre esses compartimentos, com cerca de 37% identificados em topos de colinas e de 23% sobre os vales secos.

4 CONCLUSÕES

Este capítulo compõe um registro da formação, em uma espécie de catalogação, dos sistemas eólicos e das feições eólicas interiores do Brasil, as quais possuem um significado paleogeomorfológico importante na composição dos biomas e das paisagens brasileiras. São feições *proxy*, logo são indicadoras de mudanças climáticas do Quaternário, caracterizando períodos de expansão de condições desérticas e de paleoaridez, sobretudo, no Holoceno. Portanto, do ponto de vista da evolução geomorfológica, estão associados a morfologias e a processos típicos de ambientes semiáridos e áridos, de um passado recente da história geológica.

Os areais têm origem em processos muitos semelhantes. Associados às formações superficiais, são acumulações arenosas com morfologia de dunas, compondo campos de dunas, com tipologias, essencialmente, longitudinais e de barcanas. Compreendem terrenos, formados, predominantemente, por solos Neossolos Quartzarênicos Órticos, susceptíveis a processos erosivos, de morfogênese acelerada, formando areais. Estes estão associados aos aspectos litológicos, pedológicos, à cobertura herbácea pouco protetora, a escoamentos superficial e subsuperficial, em episódios de chuvas torrenciais, e à ação eólica, ao mesmo tempo.

Portanto, os campos de dunas inativas e os areais ativos do Pampa brasileiro, em especial, compreendem feições eólicas excepcionais, possuindo relevante valor geomorfológico e compondo um importante geossítio, por constituírem feições relictos e caraterísticas de um clima mais seco do que o atual, devendo ser preservados, inclusive, por seu potencial, enquanto registros paleoclimático, paleobotânico e paleozoológico.

Agradecimentos

Este capítulo é parte da pesquisa de doutorado da autora, sendo que ambos agradecem ao Programa CAPES/Embrapa, pela concessão da bolsa de doutorado (processo 88882.157107/2017-01), e ao Programa CAPES/COFECUB, pela concessão da bolsa de doutorado Sanduíche/Cotutela (processo 88887.137176/2017-00). Também agradecemos aos coorientadores, François Laurent e Jeannine Corbonnois – *Laboratoire Espace et Société* (ESO), *Le Mans Université*, França.

Referências Bibliográficas

ASSINE, Mario Luis; SOARES, Paulo César. Quaternary of the Pantanal, west-central Brazil. **Quaternary International**, v. 114, p. 23-34, 2004.

CABRAL, Cláudio José; LIRA, Daniel de; SILVA, Osvaldo da; CORRÊA, Antonio Carlos de Barros. Feições arenosas de Pernambuco: campos de dunas do submédio São Francisco. *In*: SUERTEGARAY, Dirce Maria Antunes; SILVA, Ivamauro Ailton de Sousa (org.). **Brasil feições arenosas**. Porto Alegre: Compasso Lugar-Cultura, 2020. p. 105-117.

CARNEIRO-FILHO, Arnaldo; TATUMI, Sonia Hatsue; YEE, Márcio. Dunas fósseis na Amazônia. **Ciência Hoje**, São Paulo, v. 32, n. 191, p. 24-29, 2003.

CARVALHO, Thiago Morato. Síntese dos aspectos hidrogeomorfológicos do estado de Roraima, Brasil. *In*: GORAYEB, P.; LIMA, A. (org.). **Contribuições à Geologia da Amazônia**. 1. ed. Belém: SGB Núcleo Norte, 2015. v. 9, p. 435-450.

DANTAS, Marcelo Eduardo; VIERO, Ana Cláudia; SILVA, Diogo Rodrigues Andrade da. Origem das Paisagens. *In*: VIERO, Ana Cláudia; SILVA, Diogo Rodrigues Andrade da (org.). **Geodiversidade do estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: CPRM, 2010.

FERREIRA, Ana Rosa; SILVA, Ivamauro Ailton de Sousa. Feições arenosas de Mato Grosso: areais em travessia: feições de Reserva do Cabaçal e de Salto do Céu. *In*: SUERTEGARAY, Dirce Maria Antunes; SILVA, Ivamauro Ailton de Sousa (org.). **Brasil feições arenosas**. Porto Alegre: Compasso Lugar-Cultura, 2020. p. 139-146.

GERÇÃO, Lucimar. Feições arenosas de do Tocantins: dinâmicas da natureza no Parque Estadual do Jalapão. *In*: SUERTEGARAY, Dirce Maria Antunes; SILVA, Ivamauro Ailton de Sousa (org.). **Brasil feições arenosas**. Porto Alegre: Compasso Lugar-Cultura, 2020. p. 75-89.

GIANNINI, Paulo César Fonseca; ASSINE, M. L.; BARBOSA, L.; BARRETO, A. M. F.; CLAUDINO-SALES, V.; MAIA, L. P.; MARTINHO, C. T.; PEULVAST, J.; SAWAKUCHI, A. O.; TOMAZELLI, L. J. Dunas e paleodunas eólicas costeiras e interiores. *In*: SOUZA, Celia Regina de Gouveia; SUGUIO, Kinitiro; OLIVEIRA, Antonio Manoel dos Santos; OLIVEIRA, Paulo Eduardo de. (org.). **Quaternário do Brasil**. São Paulo: Holos, 2005. p. 235-257.

GOMES, Tania Cristina. **Feições eólicas quaternárias e vulnerabilidades agrícolas em áreas de Arenização no Pampa Brasileiro**. 2019. 294f. Tese (Doutorado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

GOUDIE, Andrew S. **Encyclopedia of geomorphology**. Londres: Routledge, 2004. 1156 p. (Vol. 1)

GUASSELLI, Laurindo Antonio. O mapeamento de areias a partir de sensoriamento remoto. *In*: SUERTEGARAY, D. M. A.; SILVA, L. A. P. da; GUASSELLI, L. A. (org.). **Arenização**: natureza socializada. Porto Alegre: Compasso Lugar-Cultura; Imprensa Livre, 2012. p. 97-123.

KLAMMER, G. Die Palaeowüste des Pantannal von Mato Grosso und die pleistzãne Klima-geschichte der brasilianischen Randtropen. **Zeitschriftfür Geomorphologie**, v. 26, p. 393-416, 1982.

LATRUBESSE, Edgardo M.; NELSON, Walker B. Evidence for Late Quaternary Aeolian activity in the Roraima-Guyana Region. **Catena**, v. 43, p. 63-80, 2001.

MENESES, Maria Ecilene Nunes da Silva; COSTA, Marcondes Lima da; COSTA, José Augusto Vieira. Os lagos do lavrado de Boa Vista - Roraima: fisiografia, físico-química das águas, mineralogia e química dos sedimentos. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 37, n. 3, p. 478-489, 2007.

NOGUEIRA, Adivane Morais. **Caracterização do Processo de Arenização na Bacia Hidrográfica do Córrego Guanabara, Reserva do Cabaçal - BAP/MT**. 2017. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Mato Grosso (UFMT), Cuiabá, 2017.

NUNES, Hikaro. Feições arenosas do Maranhão: feições arenosas do Portal da Chapada. *In*: SUERTEGARAY, Dirce Maria Antunes; SILVA, Ivamauro Ailton de Sousa (org.). **Brasil feições arenosas**. Porto Alegre: Compasso Lugar-Cultura, 2020. p. 41-49.

PACHECO, Clecia. Feições arenosas da Bahia: paleodunas do Sertão da Bahia. *In*: SUERTEGARAY, Dirce Maria Antunes; SILVA, Ivamauro Ailton de Sousa (org.). **Brasil feições arenosas**. Porto Alegre: Compasso Lugar-Cultura, 2020. p. 93-102.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (CPRM). **Mapa Geodiversidade do Brasil**. Escala 1:2.500.000. Legenda expandida. Brasília: CPRM, 2006. 68 p. CD-ROM.

SÍGOLO, Joel Barbujiani. Processos eólicos e produtos sedimentares. *In*: TEIXEIRA, Wilson; FAIRCHILD, Thomas Rich; TOLEDO, Maria Cristina Motta de; TAIOLI, Fabio (org.). **Decifrando a Terra**. 2. ed. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2009. p. 334-347.

SILVA, Ivamauro Ailton de Sousa. Feições arenosas do Piauí: malhadas e grotas: feições abstratas. *In*: SUERTEGARAY, Dirce Maria Antunes; SILVA, Ivamauro Ailton de Sousa (org.). **Brasil feições arenosas**. Porto Alegre: Compasso Lugar-Cultura, 2020. p. 53-70.

SOUSA, Marluce; SCOPEL, Iraci; PEIXINHO, Dimas. Feições arenosas de Goiás. *In*: SUERTEGARAY, Dirce Maria Antunes; SILVA, Ivamauro Ailton de Sousa (org.). **Brasil feições arenosas**. Porto Alegre: Compasso Lugar-Cultura, 2020. p. 105-117.

SUERTEGARAY, Dirce Maria Antunes; SILVA, Ivamauro Ailton de Sousa (org.). **Brasil feições arenosas**. Porto Alegre: Compasso Lugar-Cultura, 2020. 158 p.

SUERTEGARAY, Dirce Maria Antunes; VERDUM, Roberto. Desertification in the Tropics. **Encyclopedia of Life Support Systems**. Paris: UNESCO Publishing, 2008. p. 1-17.

SUERTEGARAY, Dirce Maria Antunes; VERDUM, Roberto; GUASSELLI, Laurindo Antonio (org.). **Atlas da Arenização, Sudoeste do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Secretaria da Coordenação e Planejamento e Secretaria de Ciência e Tecnologia, Governo do Estado do Rio Grande do Sul, 2001. 85 p.

TAKARA, Rodrigo; CABRAL, Ivaniza de Lourdes. Feições arenosas de Mato Grosso: feições arenosas do Planalto dos Guimarães e Depressão de Rondonópolis. *In*: SUERTEGARAY, Dirce Maria Antunes; SILVA, Ivamauro Ailton de Sousa (org.). **Brasil feições arenosas**. Porto Alegre: Compasso Lugar-Cultura, 2020. p. 139-146.

THOMAS, David S. G.; SHAW, Paul. A. "Relict" desert systems: interpretations and problems. **Journal of Arid Environments**, v. 20, p. 1-14, 1990.

TRICART, J. **Traité de Geomorphologie**. Paris: SEDES, 1965. (Vol. 5: Le Modele des Régions Chaudes – Forêts et Savanes)

TRICART, J. Actions éoliennes dans la Pampa deprimada. **Revue Geomorphologie Dynamique**, v. 19, p. 178-189, 1969.

TRICART, J. Existence de périodes seches au quaternaire en Amazonie et dans les régions voisines. **Revue Geomorphologie Dynamique**, v. 23, p. 145-158, 1974.

TRIPALDI, Alfonsina; ZÁRATE, Marcelo A. A review of Late Quaternary inland dune systems of South America east of the Andes. **Quaternary International**, v. 410, p. 96-110, 2014.

VIERO, Ana Cláudia; SILVA, Diogo Rodrigues Andrade da. **Geodiversidade do estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: CPRM, 2010. 212 p. (Programa Geologia do Brasil - Levantamento da Geodiversidade)