

Análise da dinâmica entre a arenização e silvicultura em Alegrete-RS, a partir do NDVI

Analysis of the dynamics between sandspots and silviculture in Alegrete-RS, based on NDVI

Mauricio Oliveira Righi da Silva¹, Marciano Carneiro² & Silvia Beatriz Alves Rolim²

¹ UFRGS, PPG em Sensoriamento Remoto, Porto Alegre, Brasil. E-mail: mauricio.o.righi@gmail.com.

² UFRGS, Departamento de Geodésia, Porto Alegre, Brasil. E-mail: marciano.carneiro@ufrgs.br; silvia.rolim@ufrgs.br.

Resumo: A arenização é um processo de degradação ambiental caracterizado pela formação de areais, que afeta o solo e a cobertura vegetal, com ocorrência principalmente no sudoeste do Rio Grande do Sul. Este estudo teve como objetivo analisar a dinâmica da arenização e a influência da silvicultura no controle dos areais, por meio do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) aplicado as imagens do Landsat entre 1985 e 2023, no município de Alegrete. Foram selecionados três areais (A1, A2 e A3) com diferentes níveis de intervenção. Os resultados indicaram que A1 e A2 apresentaram reduções nas áreas expostas, enquanto A3 apresentou crescimento contínuo. A análise de regressão linear reforçou esses padrões, evidenciando a eficácia da silvicultura na contenção dos processos de arenização, principalmente no A1, com $R^2=0,80$. Conclui-se que a introdução da silvicultura contribuiu para mitigar a arenização, embora variações locais e limitações de resolução espacial devam ser consideradas em futuras análises.

Palavras-chave: Degradação Ambiental; Série Temporal; Uso e Ocupação do Solo.

Abstract: Sandization is a process of environmental degradation characterized by the formation of sandspots, affecting soil and vegetation cover, occurring mainly in the southwest of Rio Grande do Sul State. This study aimed to analyze the dynamics of sandization and the influence of silviculture on the control of sandspots, using the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) applied to Landsat images between 1985 and 2023 in the city of Alegrete. Three sandspots (A1, A2, and A3) with different levels of intervention were selected. The results indicated that A1 and A2 showed reductions in exposed areas, while A3 exhibited continuous growth. Linear regression analysis reinforced these patterns, highlighting the effectiveness of silviculture in containing sandization processes, especially in A1 with $R^2 = 0.80$. It is concluded that the introduction of silviculture contributed to mitigating sandization, although local variations and spatial resolution limitations should be considered in future analyses.

Keywords: Environmental Degradation; Time Series; Land Use and Occupation.

1. Introdução

A arenização é um tipo de degradação ambiental que afeta o solo e sua cobertura. É um processo que ocorre naturalmente, a partir da erosão pluvial com ravinamento e voçorocas, associado às chuvas torrenciais, liberando sedimentos para a superfície, que são transportados e concentrados pela ação dos ventos em regiões de baixo relevo (Suertegaray, 1989; Suertegaray *et al.*, 2001; Binda, 2019).

Esses depósitos ativos, denominados areais, são substratos inconsolidados ou pouco consolidados, com vegetação natural nas margens, onde há retrabalhamento constante pelos ventos (Nardin & Robaina, 2010; Sanches & Verdum, 2013; Suertegaray, 1989, 2011; Suertegaray & Bertê, 1997).

No Brasil, o processo de arenização ocorre principalmente no estado do Rio Grande do Sul, em clima subtropical úmido (Cfa) e subtropical temperado (Cfb) (Kuinchtner & Buriol, 2001). A proveniência dos areais é atribuída às Formações Botucatu e Guará, ambas da Bacia do Paraná, do Eocretáceo (Suertegaray *et al.*, 2001; Milani *et al.*, 2007).

As manchas de areia eram descritas como parte de um processo de desertificação. A partir de verificações de campo (Souto, 1985), constatou-se que o processo e algumas características, como o clima e a precipitação, divergiam da definição de desertificação estabelecida pelas Nações Unidas em 1977.

A definição estabelece, como um processo de clima árido e semiárido, em áreas com precipitação média menor que 200 mm ao ano, resultante de atividade antrópica e variações climáticas (UNCOD, 1977).

A partir dessa definição, estudos iniciais da arenização no Rio Grande do sul fizeram parte do “Plano Piloto no Deserto de São João/Alegrete” durante o período de 1977-1984, em Alegrete e Quaraí, com o objetivo caracterizar sua causa, fonte e processos, com o intuito de recuperar e prevenir a degradação local, já que essa região é conhecida pela pecuária e agricultura (Souto, 1985; Gomes *et al.*, 1990; Suertegaray & Bertê, 1997, Suertegaray, 2020).

A silvicultura surgiu como uma alternativa para frear o avanço dos areais sobre a vegetação natural da região e os campos de cultivo agrícolas. No início da década de 1990, políticas ambientais foram implementadas para a recuperação dos areais utilizando coberturas de eucalipto e acácia, a partir de um convênio firmado entre empresas privadas e a Secretaria de Agricultura do Estado, dando continuidade ao Plano Piloto de Alegrete, projeto descontinuado em 2008 (Ribeiro & Verdum, 2013).

As mudas de eucalipto foram plantadas em volta dos areais, com a função de barrar o vento, visando modificar a dinâmica entre os areais e a vegetação (Ribeiro & Verdum, 2013).

A mudança na dinâmica dos areais, principalmente com a entrada da silvicultura nos municípios de Alegrete e Quaraí, pode ser caracterizada por meio de uma análise temporal. Monitorar a dinâmica de um evento de degradação ambiental é de suma importância para o controle e a mitigação dos processos que causam esses fenômenos.

Um estudo da dinâmica da arenização realizado na bacia hidrográfica do Arroio Puitã, RS, mostrou que o mapeamento multitemporal é uma ferramenta importante na análise desses fenômenos (Souza & Pires, 2017). Fokeng & Fogwe (2022) e Kumar *et al.* (2022), utilizaram o *Normalized Difference Vegetation Index*, Índice de Diferença Normalizada da Vegetação (NDVI) como uma ferramenta no monitoramento de mudanças

ambientais, tais como degradação, controle da agricultura e dinâmica da vegetação de modo geral.

Souza & Pires (2017) indicam que um intervalo de 10 anos entre os dados é muito longo, visando a um monitoramento de um comportamento real, podendo mascarar algum resultado. Essa falta de dados mais robustos, com um intervalo maior entre o ano inicial e o final, e dados menos espaçados entre os anos, é algo que dificulta a visualização da dinâmica da arenização com a agricultura e a silvicultura, que são processos mais rápidos.

Sendo assim, o objetivo deste trabalho é quantificar a variação da arenização sobre a vegetação, através da reconstituição da dinâmica de arenização a partir da análise temporal de imagens de satélite Landsat 5 e 8, em dois casos, onde há a entrada da silvicultura como uma barreira para o areal, e onde não há barreira ou alteração antrópica, utilizando a variação do NDVI como parâmetro.

2. Área de Estudo

O município de Alegrete apresenta a maior ocorrência de areais no Rio Grande do Sul (Suertegaray, 1989), tornando-se um importante local para estudos sobre sua dinâmica. Além disso, Alegrete foi um dos municípios que receberam o incentivo a silvicultura, assim alterando a dinâmica dos areais da região. A seleção da área baseou-se na representatividade desses depósitos e na possibilidade de avaliar as diferentes interações.

Foram selecionados três areais de grande extensão no município de Alegrete. Os areais foram delimitados em A1, A2 e A3 e representam diferentes tipos de interação com o seu entorno, abrangendo a entrada da silvicultura na região (Figura 1).

A1 é um areal com plantio de eucalipto em seu entorno. A2 com plantio de eucalipto por cima de uma parte de sua área. A3 é um areal sem atividade de silvicultura.

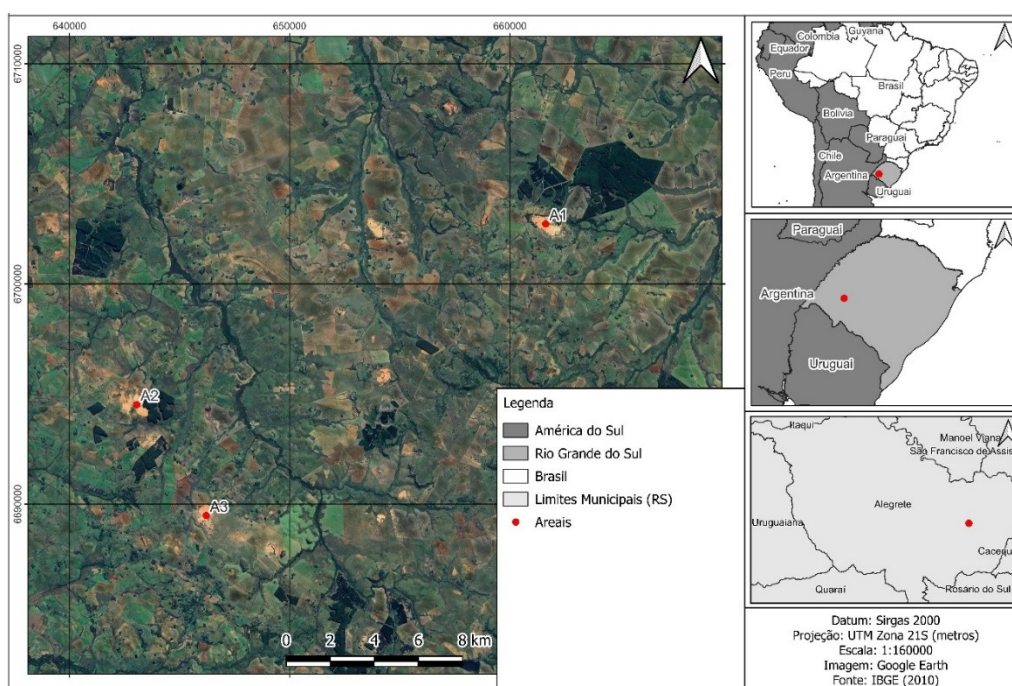


Figura 1. Localização dos areais de estudo.

Figure 1. Location of study sandspots.

3. Materiais e Métodos

Para a composição temporal, foram utilizadas 9 imagens de satélite, distribuídas entre 1985 e 2023, coletadas pelas plataformas Landsat 5TM e Landsat 8OLI/TIRS (Tabela 1). A cena escolhida corresponde à órbita ponto 224/81, cobrindo a cidade de Alegrete e a área de estudo.

A série Landsat oferece dois níveis de correção disponíveis para download: nível 1 (L1) e nível 2 (L2). Os dados L1 possuem uma correção de precisão de terreno e geomática, que consiste apenas na correção da geolocalização da imagem, a fim de deixar o dado com uma precisão de ≤ 12 metros de erro quadrático. Além disso, os dados passam por calibração radiométrica, a fim de remover possíveis interferências de leitura e padronizar os dados (USGS, s.d.).

Os dados L2 possuem as mesmas correções e calibrações do L1 e a correção atmosférica dos dados, assim como alguns produtos, como, por exemplo, dados de reflectância e temperatura de superfície (USGS, s.d.).

Tabela 2. Imagens utilizadas nas análises

Table 1. Images used in the analysis

Data	Código da imagem	Path/Row	Satélite	Coleção	Nível de correção
02/05/1985	LT05_L2SP_224081_19850502_20200918 _02_T1	224/81	Landsat 5	2	L2
01/06/1990	LT05_L2SP_224081_19900601_20200916 _02_T1	224/81	Landsat 5	2	L2
16/05/1996	LT05_L2SP_224081_19960516_20200911 _02_T1	224/81	Landsat 5	2	L2
27/05/2000	LT05_L2SP_224081_20000527_20200907 _02_T1	224/81	Landsat 5	2	L2
12/07/2005	LT05_L2SP_224081_20050712_20200902 _02_T1	224/81	Landsat 5	2	L2
02/04/2009	LT05_L2SP_224081_20090402_20200828 _02_T1	224/81	Landsat 5	2	L2
05/05/2015	LC08_L2SP_224081_20150505_20200909 _02_T1	224/81	Landsat 8	2	L2
16/04/2020	LC08_L2SP_224081_20200416_20200822 _02_T1	224/81	Landsat 8	2	L2
12/06/2023	LC08_L2SP_224081_20230612_20230615 _02_T1	224/81	Landsat 8	2	L2

3.1 Cálculo do índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI)

O NDVI consiste na diferença de absorção de sinal vermelho e infravermelho próximo do espectro eletromagnético, os valores variam de -1 a +1, sendo os valores próximos de -1 representando solo exposto, rocha ou nuvens, e valores próximos de +1 indicando áreas vegetadas (Novo, 2010). A fórmula é dada pela Equação 1:

$$NDVI = (NIR - R) \div (NIR + R) \quad (1)$$

Para o cálculo do NDVI foi utilizado as bandas do vermelho (R) e infravermelho próximo (NIR), para o satélite Landsat 5TM bandas 3 e 4, e Landsat 8OLI/TIRS bandas 4 e 5 respectivamente.

Com os dados de NDVI é possível identificar os areais, por não possuírem vegetação, assim demarcando o limite dos areais com a vegetação rasteira adjacente. Com o NDVI, também é possível identificar as áreas de silvicultura, que, em alguns pontos, recobrem os areais.

Para classificar e quantificar os areais, foi definido um intervalo de NDVI de 0,02 a 0,12. Essa faixa foi escolhida com base nos valores médios das assinaturas espectrais dos areais nas imagens analisadas utilizando os pontos de campo como base.

3.2 Quantificação da área dos areais a partir do NDVI

Com as imagens classificadas pelo NDVI, foi possível quantificar a área dos areais no intervalo de 0,02 a 0,12. Para o cálculo, foi utilizado o software QGIS 3.40.6, com a ferramenta de classificação de raster, resultando em um arquivo shapefile contendo a área em m² em cada ano estudado.

4. Resultados e Discussões

A Tabela 2 apresenta o valor da área dos areais para cada ano analisado, classificada por NDVI.

Tabela 2. Variação da área dos areais em cada ano pelo NDVI

Table 2. Variation of the area of the sandspots in each year by NDVI

Ano	Área A1 (m ²)	Área A2 (m ²)	Área A3 (m ²)
1985	793.800	243.900	91.800
1990	810.000	483.300	164.700
1996	738.900	460.800	189.000
2000	744.300	609.300	311.400
2005	748.800	635.400	413.100
2009	769.500	576.000	354.600
2015	668.700	443.700	355.500
2020	661.500	528.300	429.300
2023	628.200	564.300	414.900

A Figura 2 mostra a dinâmica do areal 1, calculada com base no NDVI. O areal 1 possuía uma área de 793.800 m² em 1985 e 628.200 m² em 2023, totalizando 165.600 m² a menos da área original.

A Figura 3 mostra a dinâmica do areal 2, calculada com base no NDVI. O areal 2 possuía uma área de 243.900 m² em 1985 e 564.300 m² em 2023, totalizando um aumento de área de 320.400 m² referente à área original.

A Figura 4 mostra a dinâmica do areal 3, calculada com base no NDVI. O areal 3 possuía uma área de 91.800 m² em 1985 e 414.900 m² em 2023, totalizando um aumento de área de 323.100 m².

Se observarmos apenas os valores iniciais e finais da variação de área dos areais, podemos dizer que o areal 1 foi o único a apresentar diminuição de área ao longo do período estudado. Mas sabemos que o início da silvicultura na região ocorreu por volta do início da década de 1990, e no areal 1 é possível identificar a silvicultura a partir de 1996, período em que a área do areal diminuiu a cada ano.

No areal 2, os eucaliptos são observados no NDVI de 2015 (Figura 3); isto pode indicar que o plantio no local ocorreu na última etapa de incentivo do governo, em meados de 2008. É possível visualizar essa mudança no gráfico da Figura 5, no qual sua área começou a se reduzir entre 2005 e 2009.

Nas imagens do Areal 2 (Figura 3), é possível ver a vegetação crescendo a leste do areal, ficando mais evidente em 2015, 2020 e 2023.

O areal 3, que é o areal livre, teve um crescimento constante, ficando mais estável entre os anos de 2010 e 2015 (Figura 4).

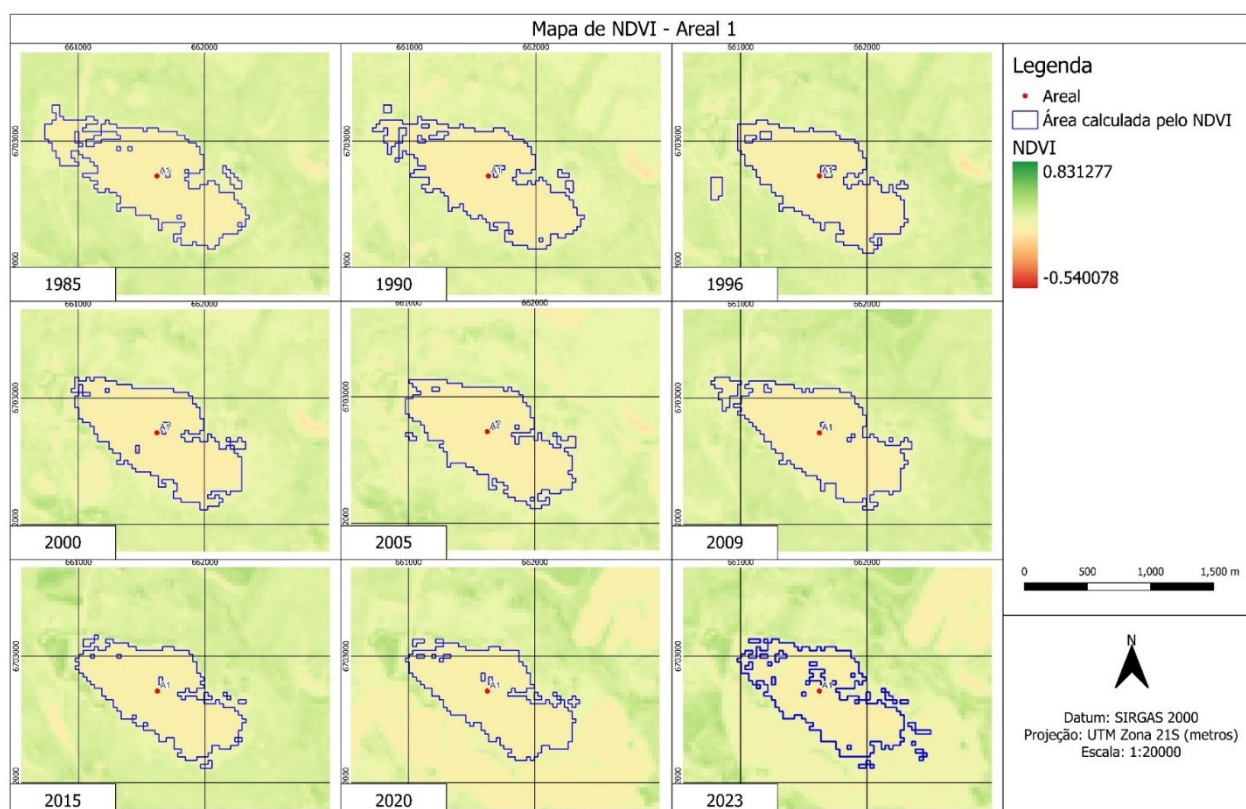


Figura 2. Variação do NDVI do areal 1.

Figure 2. NDVI variation of sandspot 1.

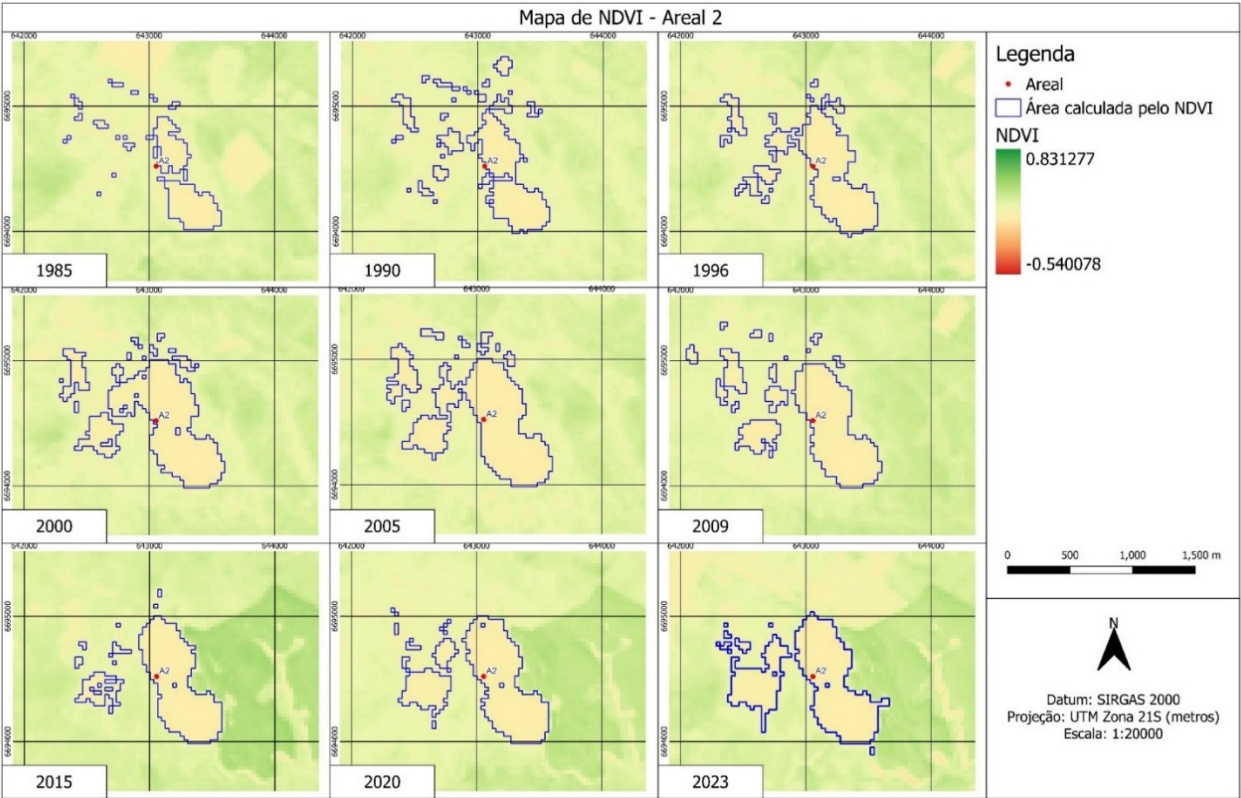


Figura 3. Variação do NDVI do areal 2.

Figure 3. NDVI variation of sandspot 2.

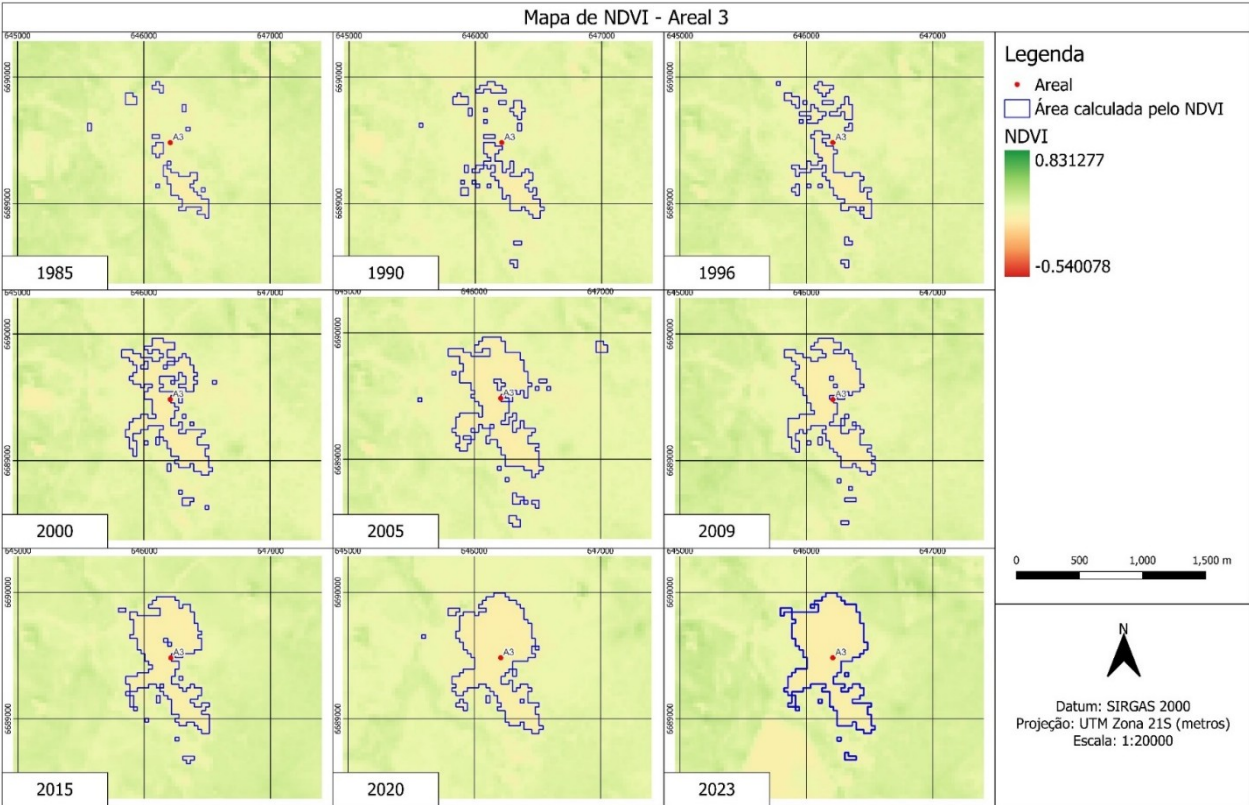


Figura 4. Variação do NDVI do areal 3.

Figure 4. NDVI variation of sandspot 3.

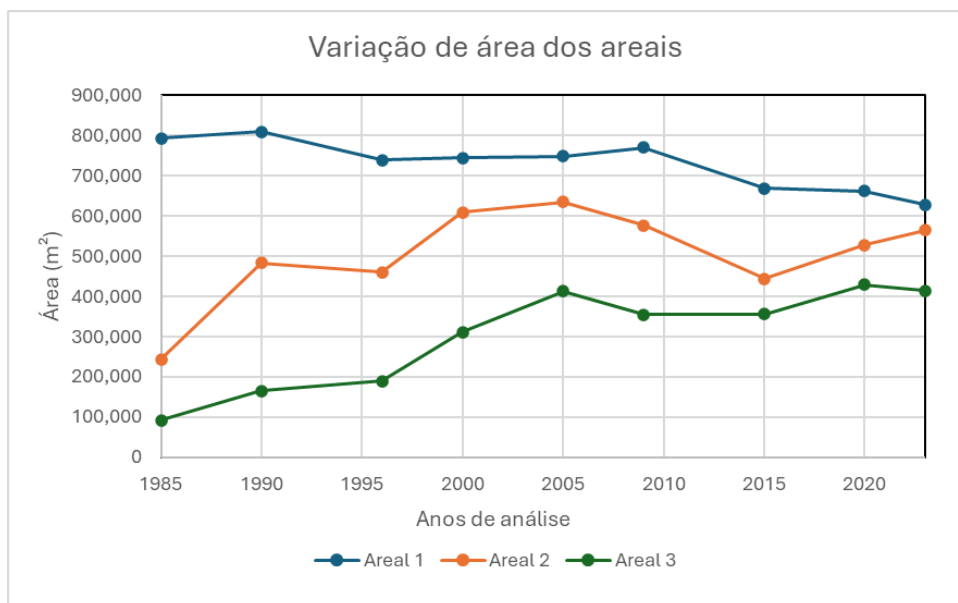


Figura 5. Variação de área dos areais.

Figure 5. Variation in sandspots área.

De maneira geral, observa-se que os areais se comportaram de forma diferente: os areais 1 e 2 apresentaram retração em momentos distintos, indicando as duas fases da política de incentivo à silvicultura descrita por Ribeiro & Verdum (2013).

Souza & Pires (2017) obtiveram resultados semelhantes em São Francisco do Sul, município limítrofe a norte de Alegrete, com a área dos areais analisados crescendo de 1984 a 2004 e reduzindo-se entre 2004 e 2014.

Outro ponto importante destacado por Souza & Pires (2017), que também se observa neste estudo, é que, ao comparar o primeiro e o último ano analisados, podemos ter a impressão de que o crescimento ou a retração foi baixo. Quanto menor o intervalo entre as imagens, melhores e mais realistas ficam os resultados, uma vez que a taxa de crescimento da vegetação deve ser monitorada para que a taxa de crescimento/retração do areal seja visualizada da melhor forma.

4.1 Regressão Linear

Segundo Montgomery & Runger (2018), a análise de regressão permite avaliar a força e a direção da relação entre duas variáveis, sendo uma ferramenta útil para compreender a dinâmica de recuperação ou degradação ambiental ao longo do tempo.

As análises de regressão linear entre as áreas obtidas a partir do NDVI dos areais 1, 2 e 3 estão representadas nas figuras 6, 7 e 8, respectivamente. O coeficiente de determinação (R^2) foi de 0,80 para o areal 1, 0,27 para o areal 2 e 0,83 para o areal 3.

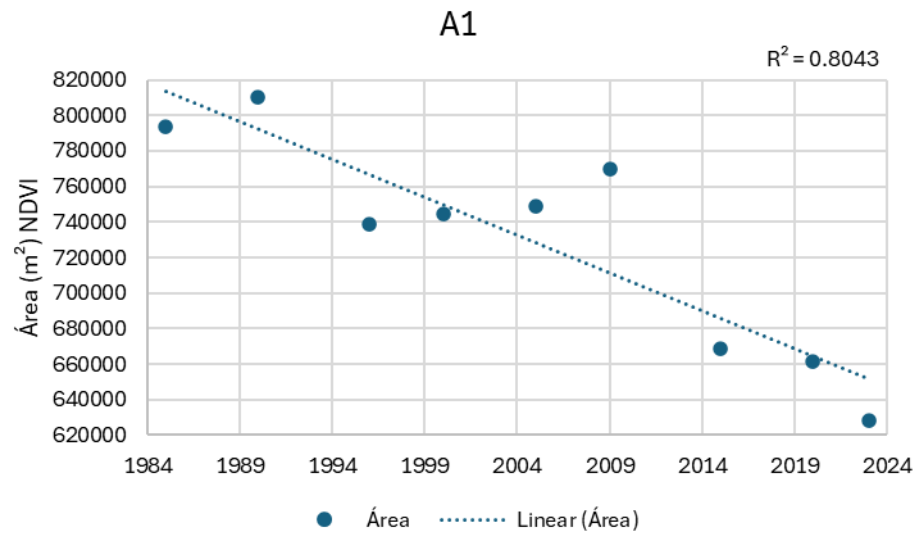


Figura 6. Regressão linear do areal 1.

Figure 6. Linear regression of sandspot 1.

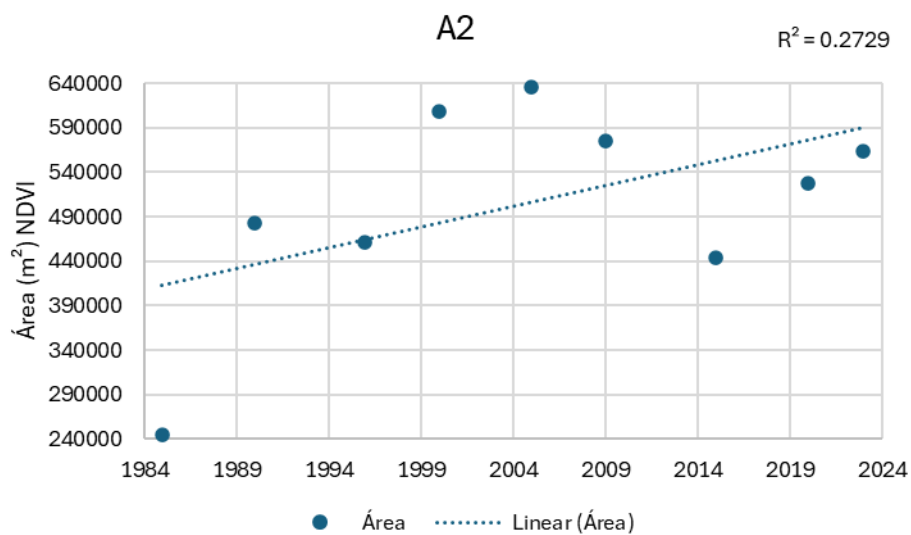


Figura 7. Regressão linear do areal 2.

Figure 7. Linear regression of sandspot 2.

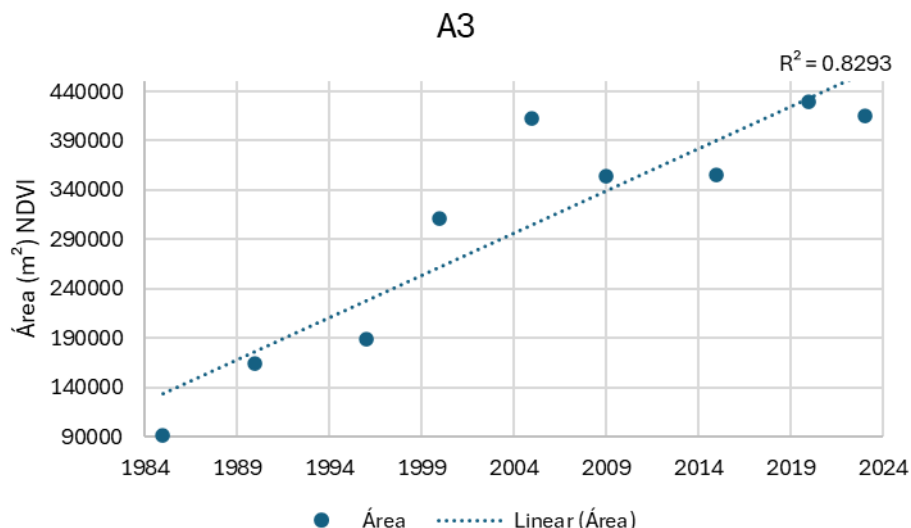


Figura 8. Regressão Linear do areal 3.

Figure 8. Linear regression of sandspot 3.

A análise por regressão linear revelou que o areal 1 apresenta tendência de diminuição de área ao longo dos anos, indicando um processo de recuperação da cobertura vegetal por meio da silvicultura. Por outro lado, o areal 2 se mostrou inconsistente com um $R^2=0,27$; este resultado pode ser explicado pelo fato do areal apresentar um crescimento até 2005, ano no qual o areal tem sua maior área, seguido de uma diminuição de área nos anos seguintes. O areal 3, por sua vez, demonstrou tendência de aumento das áreas expostas ($R^2 = 0,83$), o que sugere expansão das áreas degradadas.

Dessa forma, o uso da regressão linear aplicada às áreas derivadas de NDVI demonstrou ser eficaz para identificar padrões temporais de alteração nos areais analisados.

5. Conclusão

Os resultados apresentam a variação da dinâmica da arenização ao longo do período estudado (1985-2023), evidenciando a influência da entrada da silvicultura em dois momentos. No areal 1 é possível identificar a entrada da silvicultura entre 1995 e 2000, e no areal 2 entre 2005 e 2009, destacando os dois momentos de incentivo a silvicultura criado pela secretaria de agricultura do estado do Rio Grande do Sul.

De modo geral, a análise quantitativa mostrou a efetividade da silvicultura na retração dos areais em um primeiro momento. Para um resultado mais qualitativo no sentido da influência da silvicultura, seria necessário avaliar um tempo maior após o plantio, visto que no último ano analisado o areal 2 voltou a crescer. Este crescimento pode estar associado à mistura de pixels, uma vez que foi trabalhado com imagens de resolução espacial de 30 m.

Para uma melhor compreensão dos motivos qualitativos da variação de área dos areais, recomenda-se mais estudos na área visando responder os motivos que levam diferentes areais e comportarem de formas distintas além da introdução da silvicultura.

Contribuições dos Autores: Concepção, M.O.R.S., M.C. e S.B.A.R.; metodologia, M.O.R.S.; software, M.O.R.S.; validação, M.O.R.S., M.C. e S.B.A.R.; análise formal, M.O.R.S.; pesquisa, M.O.R.S.; recursos, M.O.R.S., M.C. e S.B.A.R.; preparação de dados, M.O.R.S.; escrita do artigo, M.O.R.S.; revisão, M.O.R.S. e M.C.; supervisão, M.C. e S.B.A.R.; aquisição de financiamento, S.B.A.R. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito".

Conflito de Interesse: Os autores declaram não haver conflito de interesse.

Referências

- Binda, A.L. 2019. Classificação De Eventos Pluviométricos Extremos em Área Afetada Por Processos De Arenização No Sudoeste Do Rio Grande Do Sul. *GEographia*, 21, 97-114.
- Fokeng, R.M. & Fogwe, Z.N. 2022. Landsat NDVI-based vegetation degradation dynamics and its response to rainfall variability and anthropogenic stressors in Southern Bui Plateau, Cameroon. *Geosystems and Geoenvironment*, 1(3), 100075. <https://doi.org/10.1016/j.geogeo.2022.100075>
- Gomes, A.M.B.; Carvalho, C.S.; Barboza, V.R.D. 1990. Estudo de Geomorfologia: Alegrete, RS. *Estudos Avançados*, 4(9), 243-254.
- Kuinchtner, A. & Buriol, G.A. 2001. Clima Do Estado Do Rio Grande Do Sul Segundo A Classificação Climática De Köppen E Thornthwaite. *Disciplinarum Scientia*, 2(1), 171-182.
- Kumar, B.P.; Raghu Babu, K.; Anusha, B.N.; Rajasekhar, M. 2022. Geo-environmental monitoring and assessment of land degradation and desertification in the semi-arid regions using Landsat 8 OLI / TIRS, LST, and NDVI approach. *Environmental Challenges*, 8, 100578. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100578>
- Milani, E.J.; Melo, J.H.G.; Souza, P.A.; Fernandes, L.A.; França, A.B. 2007. Bacia do Paraná. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 15(2), 265-287.
- Montgomery, D.C. & Runger, G.C. 2018. *Applied Statistics and Probability for Engineers*. Wiley, n.7, ISBN 978-1-119-40036-3.
- Nardin, D. & Robaina, L.E.S. 2010. Zoneamento geoambiental no oeste do Rio Grande do Sul: um estudo em bacias hidrográficas em processo de arenização - Geoenvironmental Zoning in the west of Rio Grande do Sul: a study on Hydrographic Basins in sandy patch process. *Sociedade & Natureza*, 22(3), 487-502.
- Novo, E.M.L.M. 2010. *Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações*. Blucher, São Paulo, p. 387.
- Ribeiro, J.C.C. & Verdum, R. 2013. Arenização, silvicultura e políticas ambientais no sudoeste do Rio Grande do Sul. *GEographia*, 15(29), 77.
- Sanches, F.O. & Verdum, R. 2013. Os Areais Sulriograndenses Sob a Ótica Geossistêmica De Bertrand. *Revista Casa da Geografia de Sobral*, 15, 59-83.
- Souto, J.J.P. 1985. *Deserto, uma ameaça? Estudos dos núcleos de desertificação na fronteira sudoeste do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre: Secretaria de Agricultura - Departamento de Recursos Naturais Renováveis, p. 169.
- Souza, A.C. & Pires, C.A.F. 2017. Dinâmica da arenização na bacia hidrográfica do Arroio Puitã, oeste do RS, através do mapeamento multitemporal no período de 1984 a 2014. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 18(1), 185-196. <https://doi.org/10.20502/rbg.v18i1.1051>
- Suertegaray, D.M.A. 1989. Trajetória da Natureza: Um Estudo Geomorfológico Sobre os Areais de Quaraí - RS. Uma Síntese. *Boletim gaúcho de geografia*, 17, 17-31.
- Suertegaray, D.M.A. 2001. Projeto Arenização no Rio Grande do Sul, Brasil: gênese, dinâmica e espacialização. *Anais... X SBSR*, Foz do Iguaçu, 2001, INPE, 1(1), 349-356.
- Suertegaray, D.M.A. 2011. Erosão Nos Campos Sulinos: Arenizacao No Sudoeste Do Rio Grande Do Sul. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 12(3), 61-74. <https://doi.org/10.20502/rbg.v12i0>
- Suertegaray, D.M.A. 2020. A pesquisa: areais e arenização, o ponto de partida para uma reflexão em *Geografia. Ciência e Natura*, 42, e46,
- Suertegaray, D.M.A. & Bertê, A.M.A. 1997. Políticas de Florestamento em Áreas Degradadas: areais do Sudoeste do Rio Grande do Sul. *Revista do Departamento de Geociências CFH*, 26, 56-70,
- UNCOD, 1977. *Perspectivas da População Mundial: Round-up, plan of action and resolutions*. Disponível em: < <http://www.ciesin.org/docs/002-478/002-478.html> >. Acesso em: 11 de fevereiro de 2025.

USGS – United States Geological Survey. *Landsat Collection 2 Level-2 Science Products*. Reston, VA: USGS. Disponível em: <<https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2-level-2-science-products>>. Acesso em: 15 fevereiro 2025.