

Relação entre a seca e erosão do solo na formação campestre da bacia hidrográfica do rio Santa Maria (RS)

Relationship between drought and soil erosion in the grassland formation of the Santa Maria river hydrographic basin (RS)

Carina Petsch *, Eduardo Cunha do Amaral *, Fabio de Oliveira Sanches **, Romario Trentin*, Anderson Augusto Volpato Scoti*, Luís Eduardo de Souza Robaina*, Kátia Kellem da Rosa***

* Departamento de Geociências, Universidade Federal de Santa Maria, e-mails: carinapetsch@gmail.com; eamaral783@gmail.com; romario.trentin@gmail.com; ascoti2@gmail.com; lesrobaina@gmail.com;

** Departamento de Geociências, Universidade Federal de Juiz de Fora, e-mail: fsanches.73@gmail.com

*** Departamento de Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e-mail: katiakellem@gmail.com

DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/raega.v56i0.86421>

Resumo

O papel da precipitação na erosão é amplamente documentado, enquanto a relação entre a erosão e períodos de seca é complexa e pouco pesquisada. A bacia hidrográfica do Rio Santa Maria (BHRSM) é extensivamente estudada no que se refere ao desenvolvimento de feições erosivas lineares (FEL), porém sem associação com os períodos de seca. Dessa forma, o objetivo da pesquisa é avaliar o comportamento do NDVI em porções de formação campestre da BHRSM, para anos chuvosos e secos, e relacionar com as FEL. Os dados utilizados se referem a precipitação, imagens de satélite, MDE, geologia e solos. Para a determinação dos anos chuvosos e secos, foi aplicado o Índice de Anomalia de Chuvas. A BHRSM apresentou mais valores classificados nas categorias de anos secos do que chuvosos. A estação Ponte Toropi II se destacou, pois é a que teve mais anos secos e se localiza justamente onde a BHRSM possui maior concentração de FEL. Os menores valores de NDVI ocorrem no período de inverno e no ano de 1989, mais seco da BHRSM. Observou-se que as FEL da BHRSM se desenvolvem nas porções de formação campestre com menor valor de NDVI. Isso se deve ao fato de que a maior parte da formação campestre da BHRSM está sujeita a degradação, e com os períodos secos intensos ocorre diminuição da cobertura vegetal, prejudicando e retardando o crescimento das plantas. Assim sendo, o solo fica exposto contribuindo para o desenvolvimento de FEL em períodos de eventos extremos de chuva.

Palavras-chave:

NDVI, feições erosivas lineares, bioma Pampa

Abstract

The role of precipitation in erosion is amply documented, while the relationship between erosion and periods of drought is complex and poorly researched. The Santa Maria River watershed (SMRW) is extensively studied regarding the development of linear erosive features (LEF), but without association with dry periods. Thus, the objective of the research is to evaluate the behavior of the NDVI in portions of grassland formation of the SMRW, for rainy and dry years, and to relate it with the LEF. The data used refer to precipitation, satellite

images, DEM, geology and soils. To determine the rainy and dry years, the Rainfall Anomaly Index was applied. The SMRW presented more values classified in the categories of dry than rainy years. The Ponte Toropi II station stood out, it had the most dry years and is located precisely where the SMRW has the highest concentration of FEL. The lowest values of NDVI occur in the winter period and in 1989, the driest year of the SMRW. It was observed that the FEL of the BHRSM develop in the portions of grassland with the lowest value of NDVI. This is because most of the grassland formation of the SMRW is subject to degradation and with intense dry periods there is a decrease in vegetation cover, harming and delaying plant growth. Therefore, the soil is exposed contributing to the development of LEF in periods of extreme rainfall events.

Keywords:

NDVI, linear erosive features, Pampa biome

I. INTRODUÇÃO

A erosão está entre os maiores problemas ambientais do planeta levando a degradação irreversível dos solos (BERTONI e LOMBARDI NETO, 2012; PHUONG et al. 2017; MASROOR et al. 2022). No que se refere a erosão hídrica, esta é causada pela complexa interação entre o relevo; o clima que pode estar ligado ao aumento de número de dias secos ou de eventos extremos de precipitação; além das atividades humanas causando alterações no uso e cobertura do solo, desmatamento, sobrepastoreio e intensificação da agricultura (MONDAL et al. 2016; PANAGOS et al. 2017; WANG et al. 2016; ZHU et al. 2019).

A precipitação é um dos fatores mais importantes, visto que sua intensidade, duração e frequência podem causar uma maior taxa de erosão devido a capacidade de desagregar as partículas do solo, gerado pelo impacto das gotas de chuva, escoamento superficial e transporte de sedimentos (BERTONI e LOMBARDI NETO, 2012; MONDAL et al. 2016; RIQUETTI et al. 2020; PEREIRA e RODRIGUES, 2022; ZHANG et al. 2022). O papel da precipitação no processo erosivo é amplamente discutido, porém, segundo Masroor et al. (2022) os estudos relacionando a erosão do solo e seca é complexa. A seca pode provocar alterações na quantidade e decomposição da matéria orgânica do solo causando diminuição da coesão das partículas; criar sulcos que reduzem a umidade e alteram o volume do solo; retardar e dificultar o crescimento das plantas ao contribuir para a exposição do solo e a perda de umidade, o que o torna altamente vulnerável à erosão hídrica e eólica; a redução do teor de água do solo afeta a diversidade de organismos do solo; e finalmente, a ação do vento pode contribuir para erosão eólica e diminuição da umidade do solo (PHUONG et al. 2017; DJUKIC et al. 2018; MASROOR et al. 2022).

Nesse viés, para o bioma Pampa, Nabinger et al. (2009) ressaltam que o sobrepastoreio favorece a compactação e erosão do solo diante da baixa velocidade de infiltração da água, que provoca maior escoamento superficial e determina menor desenvolvimento das raízes e menor crescimento do caule e folhas,

consequentemente, diminuindo sua resiliência em períodos de seca. Diante do período seco enfrentado pelo bioma Pampa no período de 2020-2022 e de evidências de trabalhos de campo, surge a questão principal desta pesquisa: de que maneira os períodos de seca contribuem para o desenvolvimento de processos erosivos lineares na bacia hidrográfica do rio Santa Maria (BHRSM)? A área de estudo escolhida se justifica por haver processos intensos de erosão hídrica (ROBAINA et al. 2015; RADEMANN et al. 2018; CABRAL et al. 2020) e representar importante porção do bioma Pampa.

Guerra et al. (2020) já apontaram que os padrões de proteção contra a erosão do solo variaram significativamente no espaço e no tempo entre 2001 e 2013, com extensas áreas do Hemisfério Sul perdendo capacidade de proteger o solo ao longo do tempo, incluindo a porção da BHRSM. Por conseguinte, o uso de produtos de monitoramento temporal remoto pode contribuir para o entendimento da seca e sua associação com a erosão hídrica. As métricas temporais, sazonais, anuais e fenológicas obtidas por meio de índices de vegetação a partir de imagens de Sensoriamento Remoto preenchem uma lacuna na escala temporal e territorial de análise (HOTT et al. 2019). O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) é amplamente utilizado para detecção de áreas de pastagens degradadas (HOTT et al. 2019) e combinado com dados temporais de precipitação, permitem determinar onde e quando a erosão pode ocorrer (VRIELING et al. 2008).

Diante do exposto, têm-se os objetivos deste estudo: (i) avaliar o uso e cobertura do solo da BHRSM no período de 1990-2020; (ii) aplicar o Índice de Anomalia de Chuvas (IAC) para evidenciar os anos mais secos da BHRSM no período 1986-2020 e correlacionar com o ENOS (El Niño Oscilação Sul); (iii) obter a variação do NDVI na BHRSM nos anos mais secos e mais chuvosos nesse período (iv) investigar se as feições erosivas lineares (FEL) da BHRSM se desenvolvem nas porções de formação campestre com menor NDVI.

II. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A BHRSM se localiza no sudoeste do Estado do Rio Grande do Sul, entre as coordenadas geográficas 29°47' a 31°36' de latitude Sul e 54°00' a 55°32' de longitude Oeste (Figura 1). Abrange uma área de 15.740 km² e drena em parte ou a totalidade dos territórios de seis municípios, sendo estes: Cacequi, Dom Pedrito, Rosário do Sul, Sant'ana do Livramento, São Gabriel e Lavras do Sul.

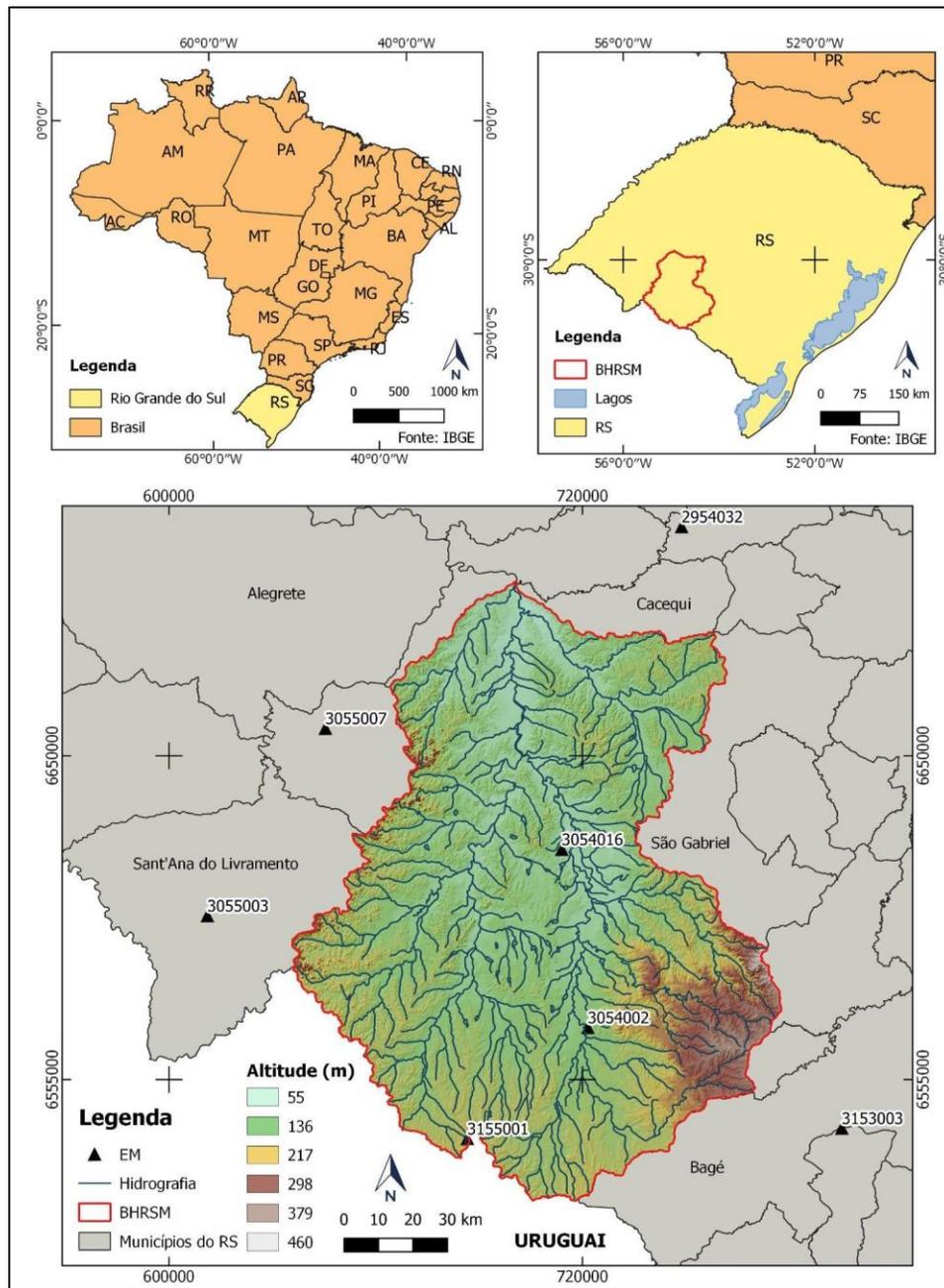


Figura 1 – Localização da BHRSM no sudoeste do Rio Grande do Sul, informações hipsométricas e distribuição da rede hidrográfica.

O mapa hipsométrico (Figura 1) demonstra que as altitudes na BHRSM variam entre 55 m em sua foz e 460 m na porção sudeste. Apresenta três províncias geomorfológicas, sendo elas: Planalto da Campanha, Depressão Central Gaúcha e Planalto Sul-Riograndense (IBGE, 1986). Conforme a classificação geológica do RS proposta por Wildner et al. (2006), em termos de litotipos aflorantes se destacam as sequências sedimentares da Bacia do Paraná. Quanto aos solos, os Argissolos predominam, enquanto os solos pouco desenvolvidos são encontrados nas áreas escarpadas e associados a morros e morrotes (SCCOTI, 2017).

As tipologias climáticas encontradas na BHRSM são: Subtropical I - pouco úmido - e Subtropical II - medianamente úmido – com a temperatura média anual variando de 17 a 20°C e as precipitações em torno de 1.200 – 1.500 mm anuais (ROSSATO, 2011). O valor médio de precipitação anual da BHRSM é 1.496,5 mm, sendo que o menor valor foi de 874,6 mm em 1989 e o maior valor foi de 2.496,8 mm em 2002 (Figura 2). Petsch et al. (2022a) destacam que o índice de erosividade médio anual (fator R da EUPS) para a BHRSM é de 11.979 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano, o que é considerado um valor muito forte, além de indicarem uma tendência de aumento de chuvas erosivas para o período de 2008 a 2019.

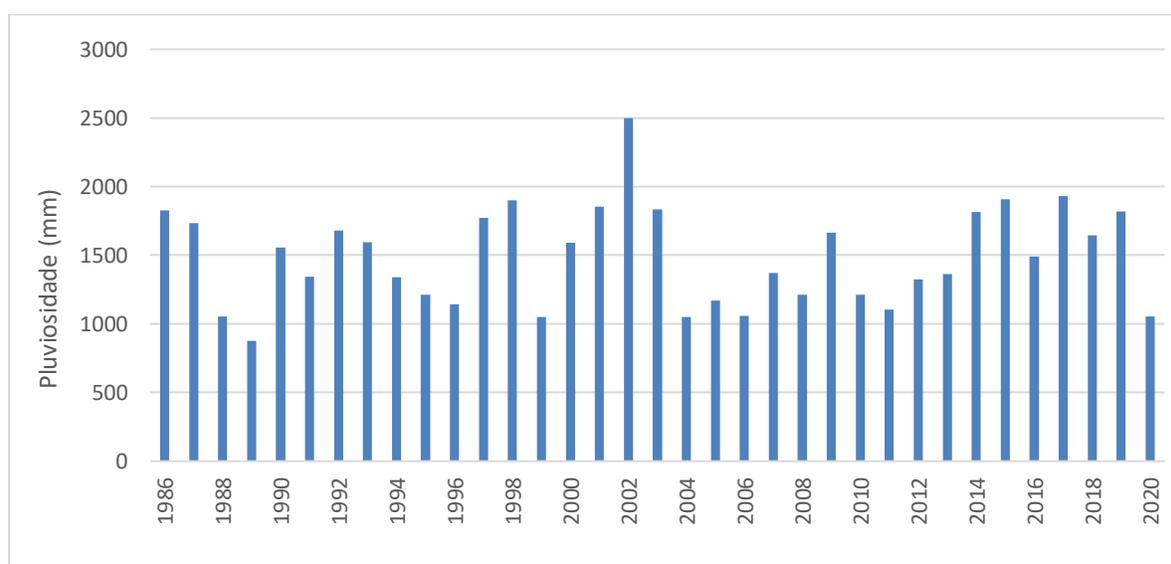


Figura 2 - Pluviosidade média anual para a BHRSM.

III. MATERIAIS E MÉTODOS

A composição do banco de dados da pesquisa está apresentada no Quadro 1 e foi compilada no QGIS 3.4. Foram realizados sete trabalhos de campo para a BHRSM, entre 2021-2022, para levantamento de dados, descrições e registros fotográficos, que foram utilizados para validação dos mapas e para ajuste das bases cartográficas para adequação das escalas de análise. Salienta-se que a pesquisa focou na LULC (*Land Use and Land Cover*) de formação campestre da BHRSM, pois de acordo com Rademann et al. (2018), em estudo para Cacequi, mais de 50% das feições erosivas se desenvolvem nas áreas de campo.

Quadro 1 - Banco de dados utilizado na pesquisa.

| Dados | Fonte | Escala | Dado secundário |
|------------------------------|---|--------|--|
| Precipitação | Hidroweb (https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas) | - | IAC |
| ENOS | https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php | - | - |
| Uso do solo | MapBiomass (SOUZA et al. 2020) | 30 m | Arquivo vetorial de formação campestre |
| Imagens Landsat 5, 7 e 8 | <i>EarthExplorer</i> | 30 m | NDVI |
| Arquivo shapefile com as FEL | Trabalho prévio do projeto (PETSCH et al. 2022b) | - | - |

Fonte: autores

Cálculo do IAC

Foram utilizados dados pluviométricos de sete estações meteorológicas (EM): 3155001 (Três Vendas), 2954032 (Ponte Toropi II), 3054002 (Dom Pedrito), 3054016 (Granja Umbu), 3055003 (Fazenda Encerra), 3055007 (São Carlos) e 3153003 (Paraíso). Devido à ausência de dados em parte das séries históricas, técnicas para o preenchimento de falhas foram adotadas. Foram calculados os coeficientes de determinação (R^2) e equações de regressão entre a EM com menor ausência de dados e as demais EM. Em seguida, a partir dos dados da estação com menor ausência de dados, foram estimados e testados os valores para as falhas correspondentes nas séries de dados das demais EM de acordo com a literatura (JUNQUEIRA et al. 2018; OLIVEIRA et al. 2021).

Para determinação dos anos secos e chuvosos, assim como sua intensidade e duração optou-se pelo Índice de Anomalia de Chuva (IAC), pois de acordo com Sanches et al. (2014) trata-se de um procedimento simples e já foi utilizado em uma área próxima da BHRSM com o objetivo de estabelecer relações com os processos de erosão hídrica e eólica. O IAC é calculado utilizando as seguintes equações:

$$\text{IAC positivo} \quad IAC = 3 * \left[\frac{(N - \bar{N})}{(\bar{M} - \bar{N})} \right] \quad (1)$$

$$\text{IAC negativo} \quad IAC = -3 * \left[\frac{(N - \bar{N})}{(\bar{X} - \bar{N})} \right] \quad (2)$$

Têm-se que: N compreende a precipitação total (mm) do ano que será gerado o IAC; \bar{N} corresponde à média (anual) da série histórica (mm); \bar{M} representa a média das dez maiores precipitações anuais da série

histórica (mm) e \bar{X} compreende a média das dez menores precipitações anuais da série histórica (mm). O IAC foi classificado segundo sua intensidade em 6 classes (ARAÚJO et al. 2007).

Os dados de IAC foram interpretados utilizando os valores médios anuais de ONI (*Oceanic Niño Index*), o qual considera as condições do El Niño presentes quando o ONI é +0,5 ou superior, e as condições da La Niña existem quando o índice apresenta valores iguais ou menores que -0,5.

Estimativa do NDVI para anos secos e chuvosos da BHRSM

De acordo com o método de Vrieling et al. (2008), o NDVI foi calculado para dois períodos, o ano mais chuvoso e mais seco da área de estudo. Também foi gerado o NDVI para o ano de 2020, por ser o ano mais recente com dados de precipitação disponíveis e ter sido um ano com as EM registrando IAC de seco, muito seco e extremamente seco.

O objetivo era obter valores de NDVI para a BHRSM durante todas as estações sazonais de 1989, 2002 e 2020, segundo método de Junges et al. (2016), contudo a cobertura de nuvens impediu este monitoramento. Portanto, as imagens analisadas foram de 22/05/1989, 25/07/1989, 16/12/1989, 27/02/2002, 19/06/2002, 30/08/2002, 05/02/2020, 14/07/2020, 21/12/2020 e foram pré-processadas utilizando o *Semi-Automatic Classification Plugin* (CONGEDO, 2021), sendo realizada a correção atmosférica e conversão para reflectância de superfície. Além disso, foi gerado o NDVI para a imagem Landsat de 24/12/2021, pois foi um momento crucial da seca recente e há fotografias de campo. O cálculo do NDVI (ROUSE et al. 1973) ocorreu utilizando as fórmulas:

$$\text{Landsat 5 e 7} = (\text{Banda 4} - \text{Banda 3}) / (\text{Banda 4} + \text{Banda 3}) \quad (3)$$

$$\text{Landsat 8} = (\text{Banda 5} + \text{Banda 4}) / (\text{Banda 5} - \text{Banda 4}) \quad (4)$$

Todos os arquivos NDVI foram recortados utilizando como máscara os vetores de formação campestre de 1989, 2002 e 2020, obtidos no projeto MapBiomias (SOUZA et al. 2020). Foram calculados dados estatísticos como o valor máximo, mínimo e médio para toda a série, pois conforme Hott et al. (2019) essas variações mostram as amplitudes e níveis do índice de vegetação e podem subsidiar a classificação das condições das pastagens.

Associação do NDVI com os processos erosivos

Para a interpretação dos valores de NDVI da formação campestre da BHRSM, foi feito um cruzamento dos arquivos do Índice de Vegetação com o arquivo de FEL da BHRSM. As FEL foram mapeadas anteriormente,

em outra parte do projeto, utilizando imagens do Google Earth (PETSCH et al. 2022b). Assim, foi possível verificar quais os valores de NDVI para as porções que possuem o desenvolvimento de FEL.

IV. RESULTADOS

Esse item apresenta as análises de mudanças nos LULC da BHRSM, assim como a apresentação dos dados de IAC, a aplicação do NDVI nas imagens satelitais e a relação destes valores com as feições erosivas lineares.

Mudanças no LULC da BHRSM

No que se refere à dinâmica temporal de LULC na BHRSM, verifica-se que a formação campestre é a predominante, porém apresentando diminuição de 1990 para o ano de 2020, com 1.044.476 ha e 784.970 ha, respectivamente. A cultura da soja se destacou pelo crescimento, sendo de 7.850 ha em 1990, e em 2020 ocupava 219.946 ha (Figura 3). Quanto à localização, verifica-se que as porções próximas aos canais de drenagem principais da BHRSM, passaram a ser intensamente modificadas, pelo adensamento de culturas de arroz, do mosaico de agricultura e pastagem e pela inserção da soja. A formação campestre, natural do bioma Pampa, em 2020 ocupava principalmente as porções de divisores de drenagem.

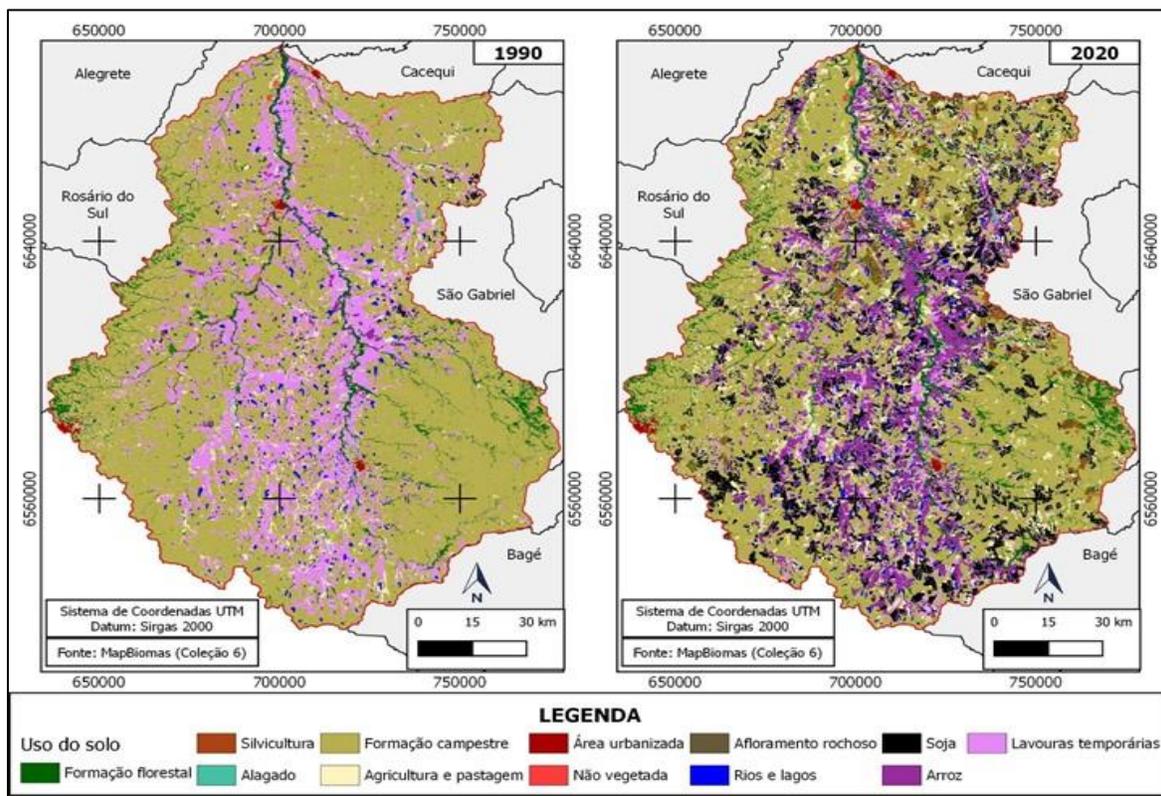


Figura 3 - Os dados do MapBiomas apontam a diminuição da formação campestre na BHRSM e aumento das culturas de arroz e soja.

Índice de Anomalia de Chuvas para a BHRSM

Diante da necessidade de preenchimento das falhas na série histórica do período 1986-2020, a EM de Dom Pedrito foi utilizada por se tratar da que mais apresentou dados. Os valores de R^2 obtidos entre a EM de Dom Pedrito com as estações de Três Vendas, Ponte Toropi II, Granja Umbu, Fazenda Encerra, São Carlos e Paraíso foram de 0.70, 0.38, 0.68, 0.58, 0.56 e 0.59, respectivamente. No que se refere aos valores do coeficiente de Correlação de Pearson (r) entre a EM Dom Pedrito e Três Vendas, Ponte Toropi II, Granja Umbu, Fazenda Encerra, São Carlos e Paraíso foi respectivamente de 0.84, 0.62, 0.83, 0.76, 0.75, 0.77.

A BHRSM apresentou mais valores classificados nas categorias de anos secos do que chuvosos, para o período de análise. Avaliando os dados de IAC nas sete EM, têm-se que 65 valores registrados são de úmido, 41 valores são de muito úmido, 12 valores se referem a extremamente úmido; enquanto 66 valores se classificam como seco, 55 valores de muito seco e seis valores de IAC se referem a extremamente seco. Se destaca o ano de 2002 por apresentar em seis EM valores classificados como extremamente úmidos e o ano de 1989 com duas EM de valor extremamente seco e as demais com muito seco. O valor máximo de IAC registrado foi 7,94 na EM Três Vendas em 2002 e o menor valor foi -5,86 na EM São Carlos em 2020 (Figura 4).

No que se refere a comparação entre as EM, a São Carlos localizada na porção norte, foi a que apresentou mais valores de IAC extremamente secos, sendo nos anos de 1989, 1999 e 2020. As EM Dom Pedrito e Granja Umbu localizadas na porção central da BHRSM, foram as que registraram maior número de anos muitos secos, sendo de 10. A estação Ponte Toropi II - porção nordeste da BHRSM - se destacou, pois é a que teve mais anos classificados como seco, muito seco e extremamente seco, sendo em 20 dos 35 anos (Figura 4).

| | T. Vendas | Toropi II | D. Pedrito | G. Umbu | F. Encerra | São Carlos | Paraíso |
|--------------------|-----------|-----------|------------|---------|------------|------------|---------|
| 1986 | 1,3 | 3,8 | 3,0 | 1,9 | 1,5 | 1,9 | 1,7 |
| 1987 | 2,0 | 4,4 | 0,5 | 0,9 | -0,6 | 1,9 | 1,4 |
| 1988 | -2,2 | -2,6 | -2,4 | -2,9 | -3,4 | -2,5 | -3,5 |
| 1989 | -3,8 | -3,4 | -3,9 | -3,4 | -4,4 | -4,5 | -3,8 |
| 1990 | -1,1 | 1,9 | 0,0 | 1,9 | 1,8 | -1,5 | 0,3 |
| 1991 | -0,5 | -3,5 | -0,5 | -0,9 | 0,7 | -0,6 | -1,0 |
| 1992 | 0,6 | -1,2 | 1,7 | 1,6 | 2,0 | 2,3 | 1,7 |
| 1993 | 2,7 | -1,1 | 1,9 | -0,5 | 0,4 | 0,2 | 1,1 |
| 1994 | -1,8 | 0,2 | -1,2 | 0,0 | -2,5 | 0,3 | -1,7 |
| 1995 | -1,9 | -1,8 | -1,5 | -1,8 | -1,6 | -1,7 | -1,8 |
| 1996 | -1,3 | -1,5 | -3,2 | -2,3 | -1,9 | -1,5 | -4,0 |
| 1997 | 1,5 | 2,3 | 2,4 | 3,6 | -1,9 | 4,0 | 0,7 |
| 1998 | 0,9 | 1,9 | 1,7 | 3,8 | 2,8 | 3,5 | 3,8 |
| 1999 | -2,8 | -0,8 | -3,3 | -3,0 | -3,0 | -4,0 | -2,7 |
| 2000 | 0,2 | -0,6 | 0,9 | 0,9 | 1,9 | -0,5 | 2,0 |
| 2001 | 3,0 | 1,1 | 1,2 | 2,0 | 4,5 | 1,7 | 4,8 |
| 2002 | 7,9 | 4,0 | 6,7 | 7,1 | 6,5 | 6,0 | 6,6 |
| 2003 | 2,3 | 2,2 | 2,8 | 2,3 | 1,6 | 2,1 | 2,0 |
| 2004 | -2,5 | -4,7 | -1,4 | -2,8 | -2,8 | -2,4 | -2,7 |
| 2005 | -2,2 | -1,2 | -2,3 | -2,2 | -1,7 | -2,3 | -2,3 |
| 2006 | -2,5 | -2,5 | -2,9 | -3,3 | -3,0 | -2,7 | -2,4 |
| 2007 | -0,6 | -1,8 | -0,6 | -0,2 | 0,4 | -1,2 | -1,1 |
| 2008 | -2,2 | -1,6 | -2,7 | -1,7 | -2,7 | -0,1 | -1,2 |
| 2009 | 0,1 | 1,6 | 0,8 | 0,3 | 2,0 | 1,3 | 1,9 |
| 2010 | -1,1 | -0,3 | -2,5 | -1,7 | -1,9 | -2,4 | -2,6 |
| 2011 | -2,8 | -2,1 | -2,4 | -2,4 | -3,1 | -1,4 | -2,9 |
| 2012 | -0,6 | -1,4 | -1,6 | -2,1 | -1,2 | -0,8 | 0,1 |
| 2013 | -0,6 | -0,7 | -1,0 | -1,2 | -0,3 | -0,9 | -0,9 |
| 2014 | 1,7 | 3,9 | 1,6 | 2,3 | 2,0 | 2,0 | 0,9 |
| 2015 | 2,5 | 4,1 | 3,3 | 2,3 | 3,0 | 1,3 | 2,1 |
| 2016 | -0,8 | 0,0 | -0,5 | 0,0 | 1,3 | 0,5 | -0,4 |
| 2017 | 4,6 | 0,4 | 3,3 | 2,8 | 3,3 | 2,4 | 2,6 |
| 2018 | 0,5 | 1,2 | 2,0 | 0,7 | 0,7 | 1,6 | 0,2 |
| 2019 | 1,6 | 0,6 | 2,8 | 1,2 | 2,0 | 4,0 | 2,5 |
| 2020 | -2,2 | -0,7 | -2,8 | -3,1 | -2,5 | -5,9 | -1,5 |
| Extremamente úmido | | | | | | | |
| Muito úmido | | | | | | | |
| Úmido | | | | | | | |
| Seco | | | | | | | |
| Muito seco | | | | | | | |
| Extremamente seco | | | | | | | |

Figura 4: Classificação qualitativa dos valores de IAC utilizando o método de Schröder

Os valores de IAC para a BHRSM apresentaram alguns ciclos nos últimos anos que possuem relação com o ONI (Figura 5). O período entre 2000-2003 se caracterizou por uma sequência de anos classificados como úmidos devido ao fortalecimento do El Niño em 2002. Entre 2004 e 2013, a maioria dos anos foram considerados secos nas EM; a partir de 2014, predominam novamente anos úmidos, devido a um pico de atuação do El Niño em 2015. O ano de 2020 é classificado como seco, muito seco ou extremamente seco em todas as EM, momento em que a La Niña começa a se acentuar (Figura 5). Dos 35 anos, sete apresentaram valores correspondentes a El Niño, sete para La Niña e 21 anos no intervalo de +0,5 e -0,5, os quais são tidos como neutros segundo classificação do ONI.

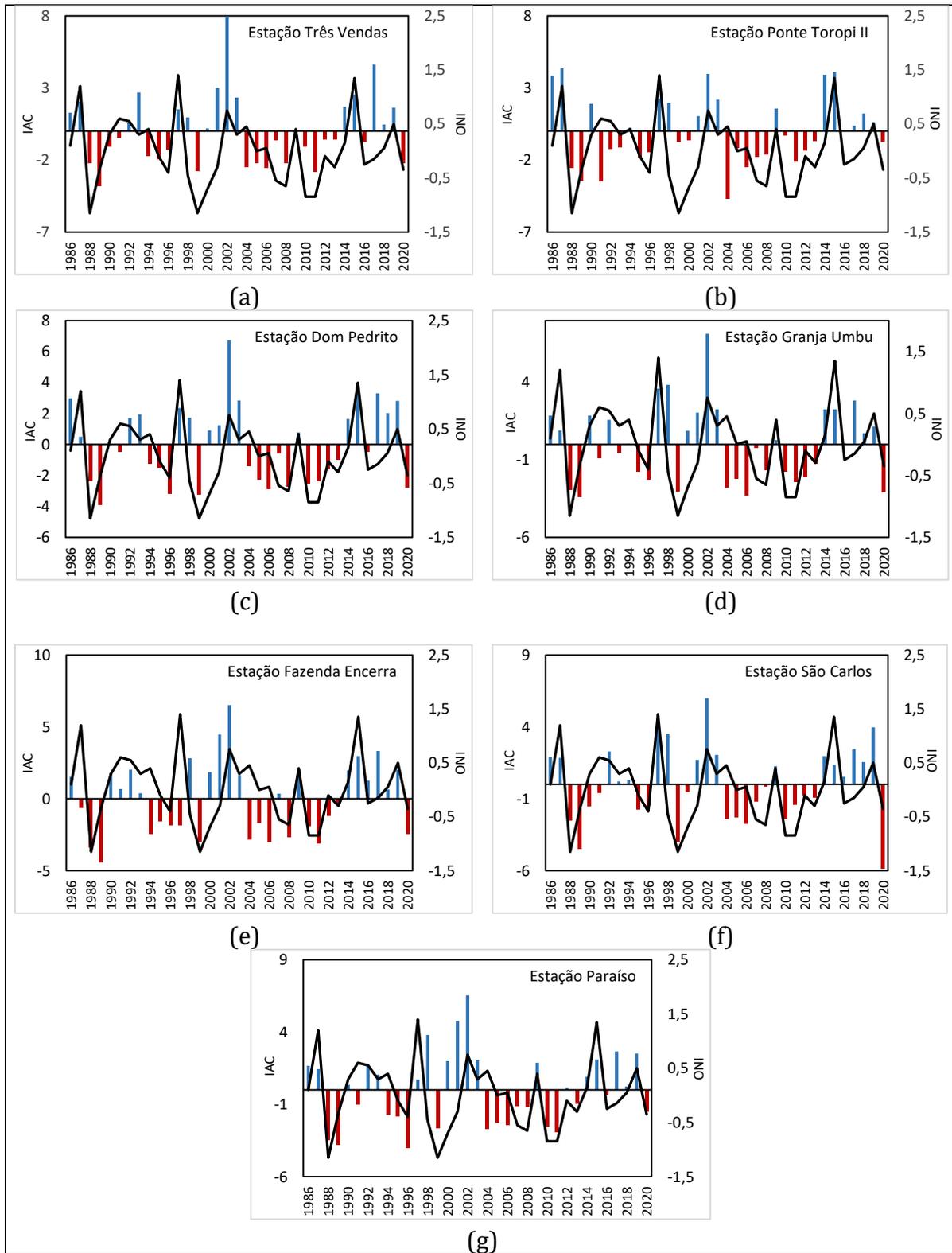


Figura 5 - Gráficos de IAC e sua relação com o ONI. Destaca-se que o ONI está representado na linha preta.

NDVI da BHRSM em anos com IAC positivo e negativo

No ano de 1989, que é o mais seco da BHRSM, os valores de NDVI da formação campestre atingiram valores mínimos entre -0.80 e -0.94, respectivamente julho e dezembro (Figura 6). No ano de 2020, a formação campestre em todas as imagens atingiu o valor de NDVI de -1. Em 2002, classificado como o mais chuvoso da BHRSM, os valores mínimos de NDVI variam entre -0.34 e -0.60 (fevereiro e junho). Quanto aos valores médios de NDVI para a formação campestre, em 1989, os menores valores ocorrem em outono e inverno, com 0.40 em 22 de maio e 0.50 em 25 de julho. Em 2002, o padrão se repete com os menores valores sendo de 0.51 em 19 de junho e 0.47 em 30 de agosto; em 2020, o menor valor médio ocorreu no inverno, em 14 de julho com 0.58.

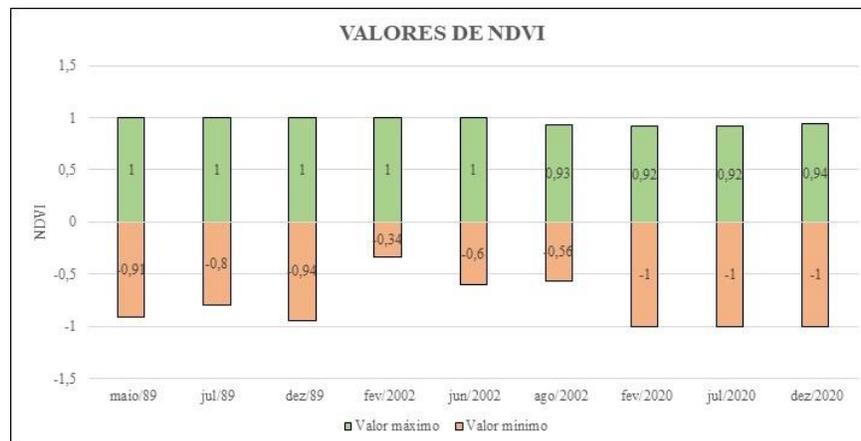


Figura 6 - Amplitude dos valores de NDVI nas imagens analisadas.

Especialmente, em 22/05/1989, a BHRSM possuía grande parte de sua área com valores de NDVI abaixo de 0.34, justamente o ano indicado pelo IAC como mais seco. Em julho de 1989, os menores valores de NDVI ocorrem sobre arenitos das Formações Pirambóia e Sanga do Cabral, havendo uma recuperação da vegetação na porção sudeste, na imagem de dezembro (Figura 7). Em 2002, o ano mais chuvoso, percebe-se que a vegetação apresenta maior degradação no inverno, sendo que na imagem de agosto é possível ver que as porções com menores valores de NDVI se relacionam às Formações Pirambóia e Sanga do Cabral também. Em 2020, é possível verificar especialmente os menores valores associados ao inverno e nas Formações Geológicas já citadas.

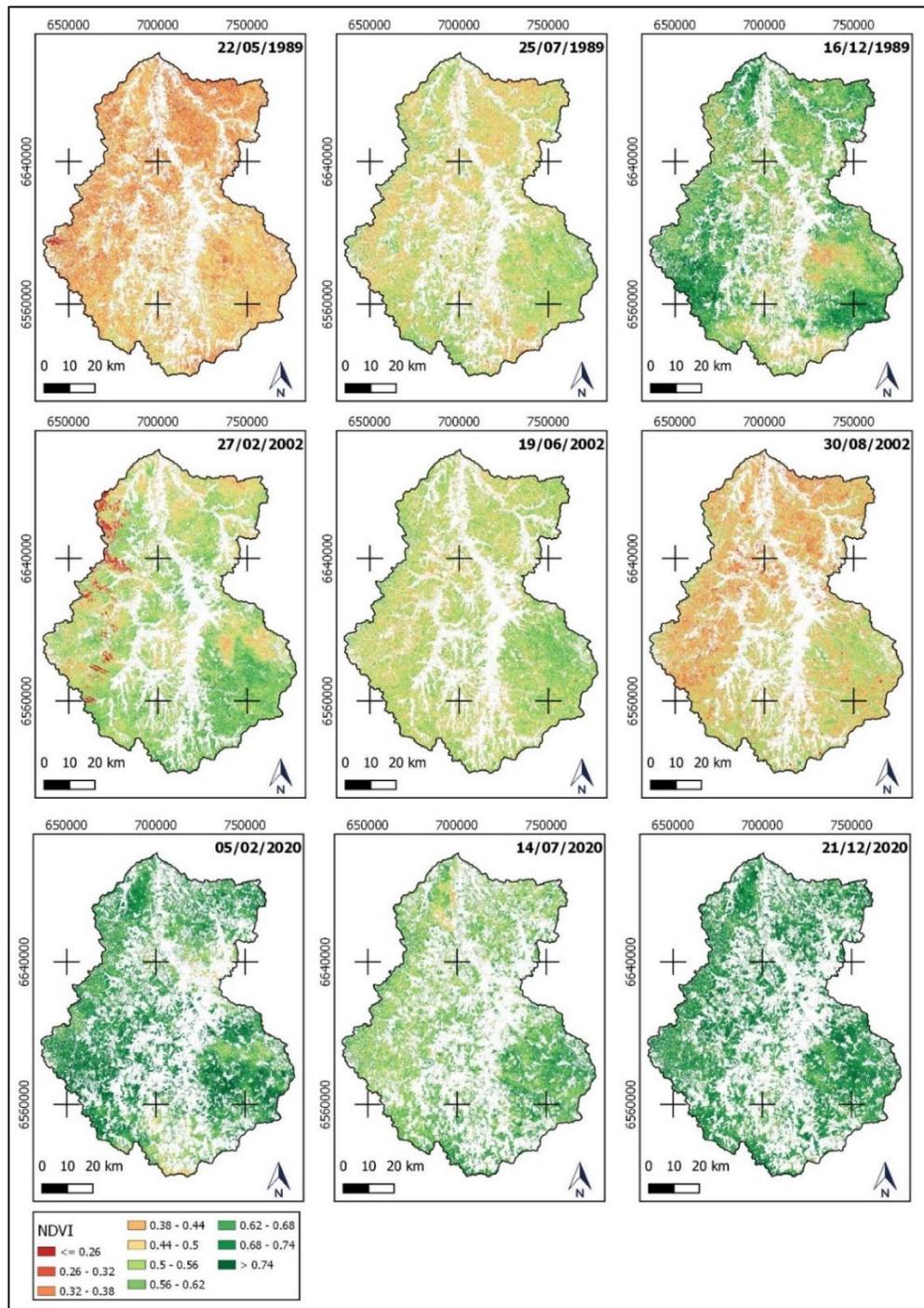


Figura 7 - NDVI de imagens de três anos distintos: 1989 e 2020 como anos secos e 2002 como ano úmido. Verifica-se que espacialmente os menores valores de NDVI ocorrem no inverno.

As FEL possuem maior frequência nas porções de Formação Campestre da BHRSM e se concentram justamente onde os menores valores de NDVI ocorrem, geralmente abaixo de 0.58, indicando vegetação esparsa (Figura 8). O recorte realizado com o *buffer* das FEL, indica que o menor valor de NDVI atingido é de -0.79, o valor máximo é de 0.91 e o valor médio é de 0.61. Na figura 8 A é possível observar a concentração de FEL no

substrato geológico da Formação Pirambóia e na figura 8 B observa-se as FEL se desenvolvendo em variadas classes de NDVI, inclusive nas porções mais degradadas, abaixo de 0.46.

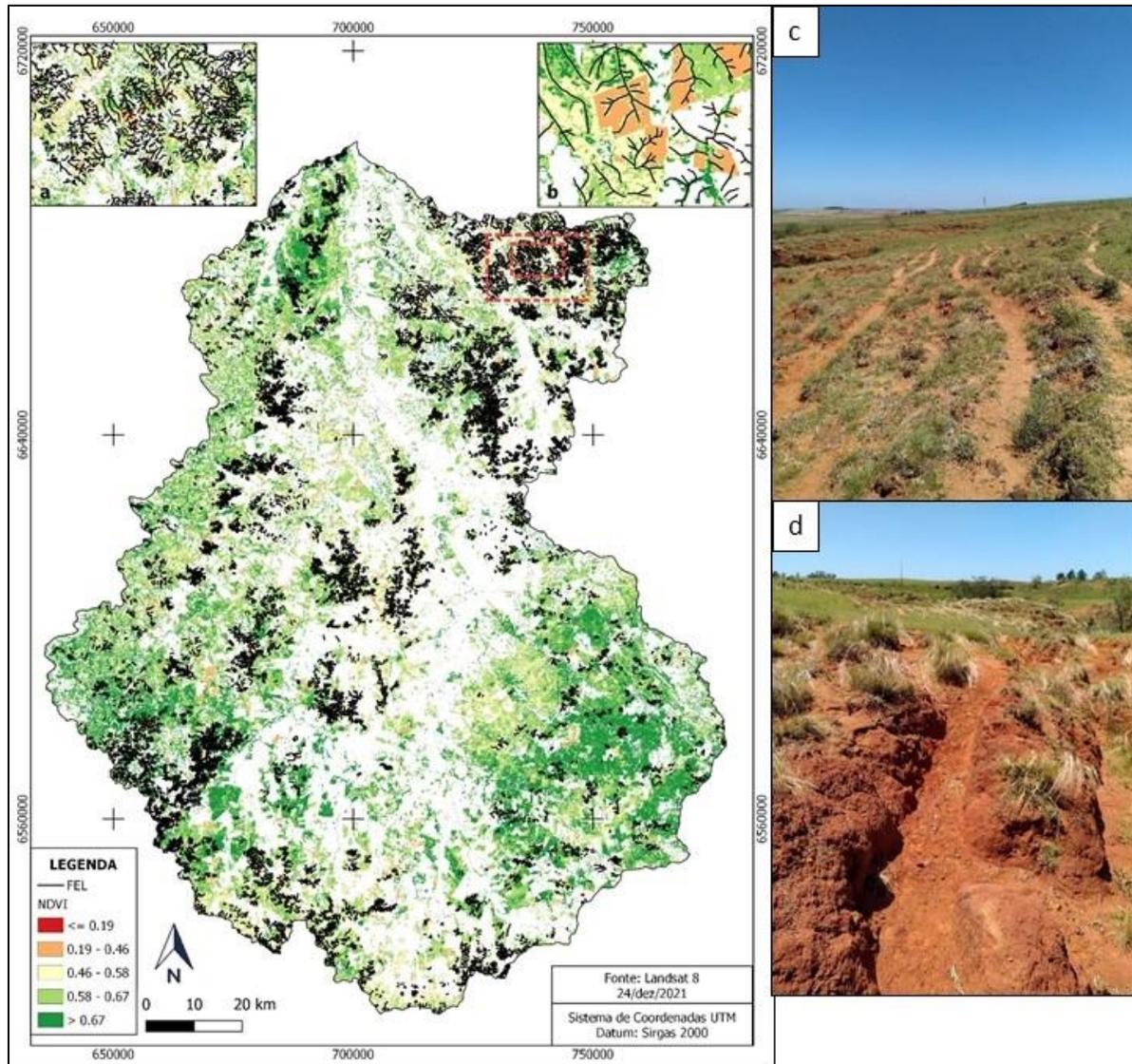


Figura 8 - Valores de NDVI para 24 de dezembro de 2021. A se refere ao maior quadro e B ao menor quadro onde se observa a presença de FEL em áreas degradadas de formação campestre em rochas sedimentares da Formação Pirambóia. As fotografias C e D foram registradas na porção do quadro em vermelho menor e mostram o papel do gado na degradação da formação campestre em período seco.

Em trabalho de campo realizado em dezembro de 2021, foi possível verificar as consequências de períodos de estiagem em formação campestre da BHRSM com uso de pecuária bovina. A figura 8 C mostra uma série de caminhos trilhados pelo gado numa porção próxima à borda de uma voçoroca e há menor densidade de cobertura vegetal; na figura 8 D observa-se o caminho de descida do gado para a porção inferior da voçoroca, em busca de água, além da presença do Capim-Barba-de-Bode (*Aristida spp.*).

V. DISCUSSÕES

Os dados disponibilizados pelo projeto MapBiomas (SOUZA et al. 2020) demonstraram a alteração na proporção entre as LULC na BHRSM. Embora a formação campestre, em 2020, ainda seja a predominante na área de estudo, verificou-se que houve uma diminuição acentuada ocasionada principalmente pela inserção da cultura temporária de soja. Os resultados vão ao encontro de outros estudos, como Kuplich et al. (2018) que indicam que a área de soja aumentou 188,5% entre 2000 e 2015 nos campos naturais e Ribeiro et al. (2021), que salientam que apenas 40% do Pampa do Brasil ainda é coberto por vegetação nativa.

Destaca-se que o gado contribui para a compactação do solo pelo pisoteio (THOMAZ e DIAS, 2009), em qualquer estação sazonal, porém pode ser mais prejudicial em períodos secos, que são justamente os mais frequentes na BHRSM. Conforme evidenciado em campo, e por outros autores (Thomaz e Dias, 2009), nos períodos secos os bovinos necessitam percorrer maiores distâncias em busca de alimento e de água o que acaba causando: maior compactação do solo nos caminhos percorridos pelos animais; criação de novos caminhos em busca de alimento e alterações nas paredes de voçorocas pela sua descida até a fonte de água no fundo de vale.

No que se refere aos períodos secos da BHRSM, verificou-se que a La Niña e El Niño possuem influência direta na BHRSM, determinando períodos secos e chuvosos, o que por sua vez, afetou o crescimento da formação vegetal da área de estudo. Destaca-se que houve um longo período (2004 a 2013) classificado como seco, muito seco e extremamente seco nas EM analisadas, o que pode conferir alterações no ecossistema em longo alcance causando exposição do solo e erosão (SIDIROPOULOS et al. 2021). Isso contribui para o estresse hídrico e afeta a biomassa da formação campestre em períodos posteriores aos anos secos.

Comparando os resultados do IAC com outros estudos, Gross e Cassol (2015) avaliaram o IAC de 44 estações meteorológicas do RS, entre 1983 e 2012, sendo que 57,78% (208) das EM apresentaram anomalias negativas de precipitação e 42,22% (152) anomalias positivas. Os autores verificaram um ciclo de anos secos para o RS, principalmente a partir do ano de 2003, o que coincide com a BHRSM. Brubacher et al. (2021) criaram um banco de dados espacial com série histórica de chuvas para o RS. De acordo com estes autores o ano de 2002 também foi o de maior IAC (6,1) do período analisado, assim como na BHRSM. O ano de 2020 é classificado como seco, muito seco ou extremamente seco na BHRSM; condições de secas para 2020 e 2021 são evidenciadas por Naumann et al. (2021) para a Bacia La Plata relacionadas a influência da La Niña e acompanhada por secas severas. Além das condições de La Niña, outras condições foram observadas e pode ter

afetado a precipitação na América do Sul como a identificação de anomalias de SST positivas em todos os oceanos (GOMES et al. 2021).

Ademais, ocorre também o aumento de espécies invasoras. O Capim-annoni teve uma rápida disseminação pelo Pampa, devido sua alta produção de sementes, adaptação a condições severas com solos de baixas fertilidade e restrições pluviais, sendo assim quanto maior o distúrbio, mais intensa e rápida a invasão por Capim-annoni (OVERBECK et al. 2009). Dessa maneira, as condições de seca e degradação das pastagens oferecem um ambiente propício para o desenvolvimento do Capim-annoni, conforme já observado em campo na BHRSM. Além disso, apresenta baixa palatabilidade e não satisfaz as demandas nutricionais dos animais (OVERBECK et al. 2009) demandando que o gado procure alimento e cause maior compactação do solo.

No que tange a análise temporal detalhada do comportamento do NDVI, foi prejudicada devido a cobertura de nuvens, conforme evidenciado por outros autores como Vrieling et al. (2008), sendo assim somente 3 imagens de cada ano foram possíveis de serem utilizadas. Ainda assim, foi verificado um comportamento anual, já que os menores valores de NDVI, foram encontrados nos anos secos de 1989 e 2020. Estes valores baixos indicam que não há vegetação nessas porções configurando solo exposto. Os padrões sazonais também foram verificados assim como em Junges et al. (2016), com menor média de NDVI no inverno, já que as temperaturas baixas dificultam o crescimento da formação campestre natural, indicando uma mudança nas propriedades de reflectância das plantas. Dessa forma, nesse período pode haver maior sobrepastoreio e conseqüente degradação da pastagem, já que segundo Overbeck et al. (2009) ocorre uma produção limitada de biomassa no inverno.

Foi evidenciada uma associação dos valores baixos de NDVI com o substrato geológico da Formação Pirambóia e Sanga do Cabral, já que nessas rochas friáveis (ROBAINA et al. 2015; RADEMANN et al. 2018) ocorre a localização da maioria das FEL da BHRSM. A presença das FEL dificultam o crescimento da vegetação devido a perda de solo superficial e de matéria orgânica do solo (PHUONG et al. 2017), justificando os menores valores de NDVI para estas porções.

É importante salientar que nas voçorocas, o afloramento do lençol freático acaba deixando a vegetação mais densa, o que eleva os valores de NDVI quando se usa a metodologia de avaliar valores em uma área de *buffer* das FEL. Além disso, essas porções acabam apresentando mais matéria orgânica e a deposição de sedimentos, o que acaba contribuindo para o crescimento da vegetação que também é composta por espécies diferentes daquelas que se formam em porções com menor teor de umidade.

Nas partes da borda da voçoroca e das imediações o pisoteio do gado, efeitos do *piping* e solapamentos de degraus e a própria erosão laminar dificultam o crescimento da formação campestre, conforme observado por Panagos et al. (2017), Wang et al. (2016) e Zhu et al. (2019). Assim, os processos erosivos associados às FELs presentes na área de estudo podem contribuir para a instabilidade das áreas do entorno. Esta relação entre as feições de voçorocas e o entorno é destacada por Pereira e Rodrigues (2022).

Dessa forma, a seca é considerada a categoria de desastre natural mais complexa e destrutiva do mundo (JAVED et al. 2020) e não existe um único método universalmente aceito para quantificar e qualificar com precisão os efeitos da seca (ZHANG et al. 2016), assim sendo os estudos sobre a temática precisam continuar. As influências da La Niña nas precipitações no sul da América do Sul continuam em 2022. Dessa forma, estas condições podem indicar a ampliação dos problemas de erosão acelerada nas áreas de formação campestre da BHRSM.

VI. CONCLUSÕES

O monitoramento temporal de LULC, demonstrou que a formação campestre apresentou acentuada redução em função da sua substituição pelas lavouras de soja, que são muitas vezes mais rentáveis. Essa lucratividade também está ligada à degradação apresentada em muitas porções de formação campestre, sujeitas a processos erosivos, compactação e esgotamento dos solos e propagação de espécies invasoras. Desta forma, é importante buscar estratégias de pastejo sustentável para a BHRSM.

Os índices do IAC indicaram que a BHRSM esteve sob ação de ciclos de úmidos e secos, demonstrando que o fenômeno ENOS possui grande influência no regime de chuvas na região da área de estudo. O monitoramento da formação campestre com o NDVI, ainda que não tenha sido completo, devido a presença de nuvens, permitiu o acompanhamento de padrões sazonais e anuais. No inverno as porções com rochas friáveis apresentaram valores baixos de NDVI, já que o solo pouco fértil e as temperaturas baixas dificultam o crescimento da vegetação.

Diante dos variados contextos geológicos constituídos por rochas friáveis e das características secas indicadas pelo IAC, na BHRSM, é necessário desenvolver estudos de gestão para preservação da vegetação natural, seja com técnicas de rotatividade do gado, sobressemeadura de espécies forrageiras ou adubação da pastagem. Dessa forma, destaca-se que este estudo constituiu um debate inicial para a BHRSM, demandando de maiores investigações com a aplicação do NDVI em mais imagens satelitais, cálculos de perda de solos, detalhamento do IAC e verificação de eventos extremos da BHRSM.

VII. REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, L. E.; SILVA, D.F.; MORAES NETO, J.M.; SOUSA, F.A.S. Análise da variabilidade espaçotemporal da precipitação na bacia do rio Paraíba usando IAC. *Revista de Geografia*, v.24, n.1, 2007.
- BRUBACHER, J. P.; OLIVEIRA, G. G.; GUASSELLI, L. A. Banco de Dados Espaciais de Precipitação do Estado do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 36, n. 3, 2021.
- CABRAL, T. L.; NUMMER, A. V.; BATEIRA, C. V. de M. Indicadores morfométricos como suporte para a classificação de voçorocas em sub-bacias hidrográficas no município de Cacequi, RS. *Revista Brasileira Geomorfologia*, v.21, n.1, p.139-154, 2020.
- CONGEDO, L. Semi-Automatic Classification Plugin: A Python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS. *Journal of Open Source Software*, v. 6(64), n. 317, 2021.
- DJUKIC, I.; KEPFER-ROJAS, S.; SCHMIDT, I.K.; LARSEN, K. S.; BEIER, C.; BERG, B.; VERHEYEN, K. Early stage litter decomposition across biomes. *Science Total Environment*, v. 628, p. 1369–1394, 2018.
- GOMES, M. S.; CAVALCANTI, I. F. A.; MÜLLER, G. V. 2019/2020 drought impacts on South America and atmospheric and oceanic influences. *Weather and Climate Extremes*, v. 34, p. 100404, 2021.
- GROSS, J. A.; CASSOL, R. Índice de anomalia de chuva do estado o Rio Grande do Sul. *Ambiência - Revista do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais*, v.11 n.3, 2015
- GUERRA, C. A.; ROSA, I. M. D.; VALENTINI, E. et al. Global vulnerability of soil ecosystems to erosion. *Landscape Ecology*, n. 35, p. 823–842, 2020.
- HOTT, M. C.; CARVALHO, L. M. T.; ANTUNES, M. A. H.; RESENDE, J. C.; ROCHA, W. S. D. Analysis of Grassland Degradation in Zona da Mata, MG, Brazil, Based on NDVI Time Series Data with the Integration of Phenological Metrics. *Remote Sensing*, n. 11, p. 2956, 2019.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Projeto RADAMBRASIL. Levantamento de recursos naturais (Folha SH.22 Porto Alegre e parte das Folhas SH.21 Uruguaiana e SI.22 Lagoa Mirim). 1. ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 1986
- JAVED, T.; YAO, N.; CHEN, X.; SUON, S.; LI, Y. Drought evolution indicated by meteorological and remote-sensing drought indices under different land cover types in China. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 27, n. 4, 2020.
- JUNGES, A. H.; BREMM, C.; FONTANA, D. C.; OLIVEIRA, C. A. O.; SCHAPARINI, L; P.; CARVALHO, P. C. F. Temporal profiles of vegetation indices for characterizing grazing intensity on natural grasslands in Pampa biome. *Scientia Agricola*, v. 73, n. 4, 2016.
- JUNQUEIRA, R.; AMORIM, J. S.; OLIVEIRA, A. S. Comparação entre diferentes metodologias para preenchimento de falhas em dados pluviométricos. *Sustentare*, v. 2, n.1, 2018.
- KUPLICH, T. M.; CAPOANE, V.; COSTA, L. F. F. O avanço da soja no Bioma Pampa. *Boletim Geográfico do Rio Grande do Sul*, n. 31, p. 83-100, 2018.
- LOMBARDI NETO, F. *Conservação do solo*. 5 eds. Editora Ícone, São Paulo, 355p, 2012.

- MASROOR, M. D.; SAJJAD, H.; REHMAN, S.; SINGH, R.; RAHAMAN, M. H.; SAHANA, H.; AHMED, R.; AVTAR, R. Analysing the relationship between drought and soil erosion using vegetation health index and RUSLE models in Godavari middle sub-basin, India. *Geoscience Frontiers*, v. 13, n. 2, 2022.
- MONDAL, A.; KHARE, D.; KUNDU, S. Impact assessment of climate change on future soil erosion and SOC loss. *Natural Hazards*, n. 82, p. 1515-1539, 2016.
- NABINGER, C.; FERREIRA, E. T.; FREITAS, A. K.; CARVALHO, P. C. de F.; SANT'ANNA, D. M. Produção Animal com base no campo nativo: aplicação de resultados de pesquisa. In: PILLAR, V. DE P.; MULLER, S. C.; CASTILHOS, Z. M. de S.; JACQUES, A. V. Á. Campos Sulinos—conservação e uso sustentável da biodiversidade, Ministério do Meio Ambiente, Brasil, 2009. p. 175-198.
- NAUMANN, G. et al. The 2019-2021 extreme drought episode in La Plata Basin, EUR 30833 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2021.
- OLIVEIRA, T. A.; SANCHES, F.; FERREIRA, C. C. M. Aplicação e avaliação de técnicas para o preenchimento de falhas de dados pluviométricos em anos habituais, secos e chuvosos. *Revista Entre-Lugar*, v. 24, p. 301-320, 2021.
- OVERBECK, G. E.; MULLER, S. C.; FIDELIS A.; PFADENHAUER, J.; PILLAR, V. de P.; BLANCO, C. C.; BOLDRINI, I. I.; BOTH, R.; FORNECK, E. D. Os campos sulinos: um bioma negligenciado. In: PILLAR, V. de P.; MULLER, S. C.; CASTILHOS, Z. M. de S.; JACQUES, A. V. Á. Campos Sulinos—conservação e uso sustentável da biodiversidade, Ministério do Meio Ambiente, Brasil, 2009. p. 101-121.
- PANAGOS, P.; BORRELLI, P.; MEUSBURGER, K. Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records. *Scientific Reports*, n. 7. 2017.
- PEREIRA, J.S.E.; RODRIGUES, S. C. Erosão por Voçorocas: estado de arte. In: Carvalho Jr. Et al. Revisões da Literatura Brasileira. UGB. p. 503-529, 2022.
- PETSCH, C.; SANCHES, F. DE O.; SCCOTI, A. A. V.; TRENTIN, R.; ROBAINA, L. E. de S.; AMARAL, E. C. do. Erosividade da bacia hidrográfica do rio Santa Maria (RS): tendências e espacialização. *Boletim de Geografia*, v. 39, p. 348-368, e61231, 2022a.
- PETSCH, C.; VOLPATO SCCOTI, A. A.; SOUZA ROBAINA, L. E. de; TRENTIN, R. Controlling factors and mapping of linear erosive features in Santa Maria river watershed –RS. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 2, n. 4, p. 1876–1892, 2022b.
- PHUONG, T. T.; SHRESTHA, R. P.; CHUONG, H. V.; THANG, T. N.; DUNG, N. R.; HULSE, D.; SHARMA, S.; SHIVAKOTI, S. P. In: Redefining Diversity e Dynamics of Natural Resources Management in Asia, 3, pp. 87-99, 2017.
- RADEMANN, L. K.; TRENTIN, R.; ROBAINA, L. E. de S. Relação das variáveis ambientais com os processos erosivos no município de Cacequi, Rio Grande do Sul. *Revista Georaguai*. v. 8 n. 2, 2018.
- RIBEIRO, S.; MOREIRA, L. F. B; OVERBECK, G. E.; MALTCHIK, L. Protected Areas of the Pampa biome presented land use incompatible with conservation purposes. *Journal of Land Use Science*, n. 16:3, p. 260-272, 2021.
- RIQUETTI, N. B.; MELLO, C. R.; BESKOW, S.; VIOLA, M. R. Rainfall erosivity in South America: Current patterns and future perspectives. *Science of the Total Environment*, n. 724, 2020.
- ROBAINA, L.E.S.; TRENTIN, R.; LAURENT, F; SCCOTI, A. A. V. Zoneamento morfolitológico da bacia hidrográfica do rio ibicuí e sua relação com processos superficiais e o uso do solo. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 16, n. 1, p. 63-77, 2015.

- ROSSATO, M. S. Os climas do Rio Grande do Sul: variabilidade, tendências e tipologia. Tese (Doutorado em Geografia) Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2011. 240p.
- ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In 3rd ERTS Symposium, NASA SP-351 I, pp. 309-317, 1973.
- SANCHES, F. de O., VERDUM, R.; FISCH, G. O índice de anomalia de chuva (IAC) na avaliação das precipitações anuais em Alegrete/RS (1928-2009). *Caminhos de Geografia*, n. 15, v. 51, 2014.
- SCCOTI, A. A. V. Estudo e zoneamento geoambiental com auxílio de sig na bacia hidrográfica do Rio Santa Maria: sudoeste do Estado do Rio Grande do Sul. Tese (Doutorado em Geografia) Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2017. 153p.
- SIDIROPOULOS, P.; DALEZIOS, N. R.; LOUKAS, A.; MYLOPOULOS, N.; SPILIOPOULOS, M.; FARASLIS, I. N.; ALPANAKIS, N.; SAKELLARIOU, S. Quantitative Classification of Desertification Severity for Degraded Aquifer Based on Remotely Sensed Drought Assessment. *Hydrology*, v. 8, n. 1, 2021.
- SOUZA, C. M. JR.; et al. Reconstructing three decades of land use and land cover changes in Brazilian biomes with Landsat archive and Earth Engine. *Remote Sensing*, n. 12(17), p. 2735, 2020.
- THOMAZ, E. L.; DIAS, W. A. Bioerosão - evolução do rebanho bovino brasileiro e implicações nos processos geomorfológicos. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 10, n. 2, 2009.
- VRIELING, A.; JONG, S. M.; STERK, G.; RODRIGUES, S. C. Timing of erosion and satellite data: A multi-resolution approach to soil erosion risk mapping. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 10, n. 3, 2008.
- ZHANG, B.; HE, C.; BURNHAM, M.; ZHANG, L. Evaluating the coupling effects of climate aridity and vegetation restoration on soil erosion over the Loess Plateau in China. *Science of the Total Environment*, v. 539, p. 436-449, 2016.
- ZHANG, X.; SONG, J.; WANG, Y.; SUN, H.; LI, Q. Threshold effects of vegetation coverage on runoff and soil loss in the Loess Plateau of China: A meta-analysis. *Geoderma*, v. 412, 2022.
- ZHU, G.; TANG, Z.; SHANGGUAN, Z.; PENG, C.; DENG, L. Factors affecting the spatial and temporal variations in soil erodibility of China. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, n. 124, 2019.
- WANG, X.; ZHAO, X.; ZHANG, Z.; YI, L.; ZUO, L.; WEN, Q.; LIU, B. Assessment of soil erosion change and its relationships with land use/cover change in China from the end of the 1980s to 2010. *Catena*, v. 137, 2016.
- WILDNER, W.; RAMGRAG, G. E.; LOPES R. C.; IGLESIAS, C. M. F. Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul. Escala 1:750000. CPRM, Serviço Geológico do Brasil. Porto Alegre, RS. 2006.