
Fragilidade Ambiental na Bacia Hidrográfica do Rio Ivaí: análise temporo-espacial e implicações ambientais

Environmental Fragility in the Ivaí River Basin: spatio-temporal analysis and environmental implications

Fragilidad Ambiental en la Cuenca Hidrográfica del Tío Ivaí: análisis temporo-espacial e implicaciones ambientales

Gustavo Henrique Andrade da Cruz¹

Isabella Beatrys Algarte Emerenciano²

RESUMO: Ações antrópicas recentes têm intensificado os impactos sobre ambientes naturais, especialmente em áreas de elevada geodiversidade, refletidos em mudanças heterogêneas nas formas de uso da terra. Diante disso, buscou-se, neste estudo, analisar a dinâmica espaço-temporal da fragilidade ambiental na bacia hidrográfica do rio Ivaí, localizada no estado do Paraná. Em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), a Fragilidade Ambiental Potencial (FAP) foi determinada a partir da integração entre as cartas de fragilidade dos solos e o grau de declividade do relevo. Para a Fragilidade Ambiental Emergente (FAE), referente aos anos de 1985 e 2022, incorporou-se a variável uso da terra, possibilitando a compreensão da dinâmica da fragilidade ambiental. Os resultados indicam que, em decorrência das alterações nas formas de uso da terra, entre 1985 e 2022 cerca de 17,1% (6.247 quilômetros quadrados) da área total da BHRI passou por mudanças no grau de fragilidade. A bacia apresenta, a montante, uma área de estabilidade quanto à fragilidade ambiental e duas áreas dinâmicas, influenciadas pelas alterações nas formas de uso da terra. Assim, conclui-se que a análise espaço-temporal da fragilidade ambiental pode subsidiar a delimitação de unidades de gestão passíveis de redefinição ao longo do tempo.

PALAVRAS-CHAVES: degradação dos solos; erosão; planejamento territorial; geoprocessamento.

ABSTRACT: *Recent anthropogenic actions have intensified impacts on natural environments, especially in areas of high geodiversity, resulting in heterogeneous changes in land-use patterns. This study aimed to analyze the spatiotemporal dynamics of environmental fragility in the Ivaí River watershed, located in the state of Paraná, Brazil. Using a Geographic Information System (GIS) environment, the Potential Environmental Fragility (PEF) was determined through the integration of soil fragility maps and terrain slope. For the Emerging Environmental Fragility (EEF), corresponding to the years 1985 and 2022, the land-use variable was incorporated, allowing for a comprehensive assessment of environmental fragility dynamics. The results indicate that, due to changes in land-use patterns,*

¹ Doutorando no Programa de Pós-Graduação em Geografia da UEM (Universidade Estadual de Maringá). E-mail: gusttavohnq@gmail.com.

² Doutoranda no Programa de Pós-Graduação em Geografia da UEM (Universidade Estadual de Maringá). E-mail: isabellabeatrys@gmail.com.

between 1985 and 2022 approximately 17.1% (6,247 km²) of the total watershed area experienced changes in fragility levels. The watershed presents, in its upstream sector, one area of stability regarding environmental fragility and two dynamic areas influenced by land-use changes. Therefore, the spatiotemporal analysis of environmental fragility can support the delimitation of management units subject to redefinition over time.

KEYWORDS: *soil degradation; erosion; territorial planning; geoprocessing.*

RESUMEN: *Las acciones antrópicas recientes han intensificado los impactos sobre los ambientes naturales, especialmente en áreas de elevada geodiversidad, reflejándose en cambios heterogéneos en las formas de uso del suelo. El objetivo de este estudio fue analizar la dinámica espacio-temporal de la fragilidad ambiental en la cuenca hidrográfica del río Ivaí, localizada en el estado de Paraná, Brasil. En un entorno de Sistema de Información Geográfica (SIG), la Fragilidad Ambiental Potencial (FAP) se determinó a partir de la integración entre los mapas de fragilidad de los suelos y el grado de pendiente del relieve. Para la Fragilidad Ambiental Emergente (FAE), correspondiente a los años 1985 y 2022, se incorporó la variable uso del suelo, lo que permitió comprender la dinámica de la fragilidad ambiental. Los resultados indican que, como consecuencia de los cambios en el uso del suelo, entre 1985 y 2022 aproximadamente el 17,1% (6.247 km²) del área total de la cuenca presentó modificaciones en el grado de fragilidad. La cuenca presenta, en su sector alto, un área de estabilidad en cuanto a la fragilidad ambiental y dos áreas dinámicas influenciadas por los cambios en el uso del suelo. De este modo, el análisis espacio-temporal de la fragilidad ambiental puede subsidiar la delimitación de unidades de gestión susceptibles de redefinición a lo largo del tiempo.*

PALABRAS-CLAVE: *degradación del suelo; erosión; planificación territorial; geoprocesamiento.*

INTRODUÇÃO

As bacias hidrográficas são unidades fundamentais para os estudos ambientais, pois integram processos físicos, biológicos e sociais, permitindo uma análise sistêmica das interações entre o meio natural e as atividades humanas. Compreender a fragilidade ambiental dessas unidades torna-se, assim, uma ferramenta estratégica para o planejamento territorial sustentável e para a preservação dos recursos naturais, fornecendo subsídios ao manejo e ao planejamento do uso da terra (Anjinho *et al.*, 2021; Nakashima, 2001).

Mudanças no uso da terra, particularmente em áreas agrícolas, podem alterar significativamente a distribuição espacial das classes de fragilidade ambiental, gerando novos padrões e demandando ajustes nas unidades de gestão. Incorporar a análise da fragilidade ambiental como parâmetro de planejamento é essencial para orientar políticas públicas e estratégias de conservação (Oliveira-Andreoli *et al.*, 2021).

No Paraná, a modernização agrícola iniciada na década de 1970 provocou transformações profundas na paisagem rural (Moro, 1995; Oliveira, 2009). Nas últimas décadas, a intensificação das atividades antrópicas tem acentuado essas mudanças, afetando ecossistemas naturais e áreas agrícolas por meio da substituição de culturas e da expansão de sistemas produtivos de alta intensidade (Graça *et al.*, 2015).

Inserida nesse contexto, a Bacia Hidrográfica do Rio Ivaí (BHRI) apresenta grande relevância territorial e ambiental. A região combina remanescentes de vegetação nativa, solos com diferentes graus de vulnerabilidade e intensa ocupação agrícola, configurando uma paisagem de contrastes que evidencia a necessidade de uma análise criteriosa da fragilidade ambiental (Meurer; Bravard; Stevaux, 2010).

Diante disso, o presente estudo tem como objetivo analisar a variabilidade espacial das classes de fragilidade ambiental na BHRI, com ênfase nos processos de erosão e degradação dos solos, considerando as mudanças no uso da terra, por meio de uma abordagem integrada e cartográfica.

METODOLOGIA

A área experimental consiste na bacia hidrográfica do rio Ivaí (BHRI), situada no estado do Paraná, região sul do Brasil (Figura 1). Abrange uma área de aproximadamente 36.587 quilômetros quadrados, o que representa 18% do território paranaense, configurando-se como a segunda maior bacia hidrográfica do estado (Meurer; Bravard; Stevaux, 2010).

A metodologia adotada fundamenta-se na análise empírica de ambientes naturais e antropizados, através da elaboração de cartas sínteses de fragilidade ambiental, conforme a abordagem proposta por Ross (1994), baseada no conceito de Unidades Ecodinâmicas de Tricart (1977). Para este estudo, foi adotada, predominantemente, a metodologia adaptada e validada por Bonifácio (2019) em sua pesquisa desenvolvida em unidades hidrográficas localizadas na região Norte do Paraná, à saber, nas bacias dos rios Pirapó, Paranapanema 3 e Paranapanema 4, comumente denominados, em conjunto, como Bacia Hidrográfica do Piraponema.

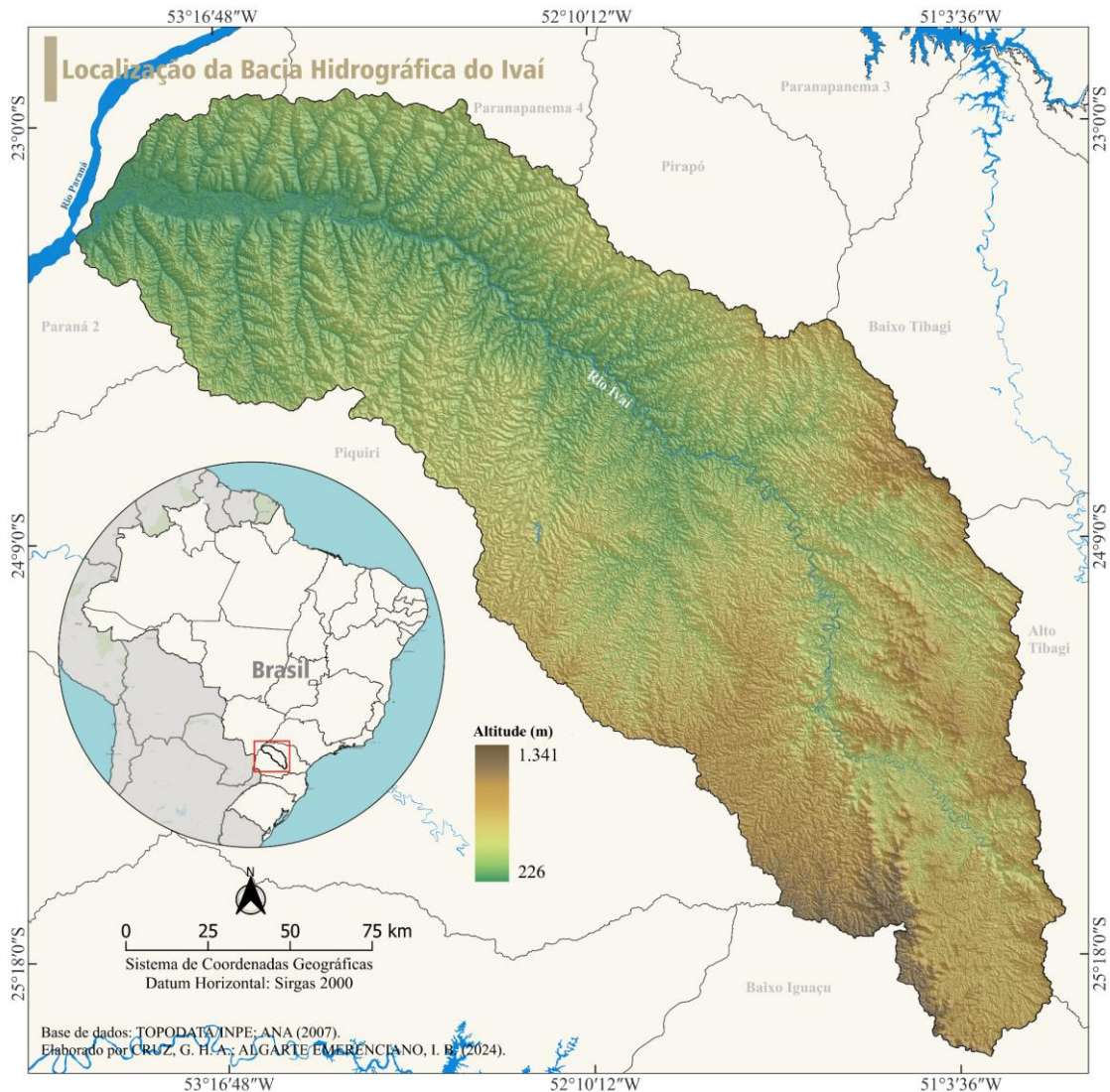
A análise empírica dos ambientes naturais, representada pela carta de Fragilidade Ambiental Potencial (FAP), baseou-se na síntese da distribuição espacial de variáveis independentes, como o grau de fragilidade dos solos, considerando o grau de erodibilidade dos horizontes superficiais, bem como o índice de declividade do terreno. Já para a caracterização dos ambientes antropizados, na determinação da Fragilidade Ambiental Emergente (FAE) se incorporou a distribuição espacial do uso da terra no ano de 1985 e 2022.

As bases cartográficas utilizadas na elaboração das cartas sínteses foram obtidas em plataformas digitais, disponibilizadas por órgãos oficiais (Quadro 1). Os dados foram processados no *software Qgis*, versão 3.38.3, ferramenta que viabilizou a espacialização e integração das variáveis ambientais.

A atribuição de valores às classes de solo seguiu a metodologia proposta por Bonifácio (2019), que lhes atribuiu pesos/valores variando de 1 a 5, conforme o grau de erodibilidade (Fator

K) dos horizontes pedológicos superficiais (Tabela 1), estabelecidos pela autora para os solos da região através da aplicação da equação proposta por Bouyoucos (1935).

Figura 1 – Localização da bacia hidrográfica do rio Ivaí, estado do Paraná, Sul do Brasil



Fonte: Os autores.

Quadro 1 – Fonte da base de dados utilizadas para a determinação da FAE na bacia hidrográfica do rio Ivaí, ano de 1985 e 2022

Variável	Fonte	Escala/Resolução de Imagem
Solos	Embrapa (2008).	1:250.000
Declividade	Calculado a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE), disponibilizado pelo INPE/TOPODATA (INPE, 2011).	Resolução espacial de ≈30m
Uso da terra (1985 e 2022)	MapBiomias (2024).	Resolução espacial de ≈30m

Organização: Os autores.

A BHRI apresenta elevada variedade de litotipos (Figura 2a), formados em contextos geológicos variados. Essa heterogeneidade conduz a formação de diferentes classes de

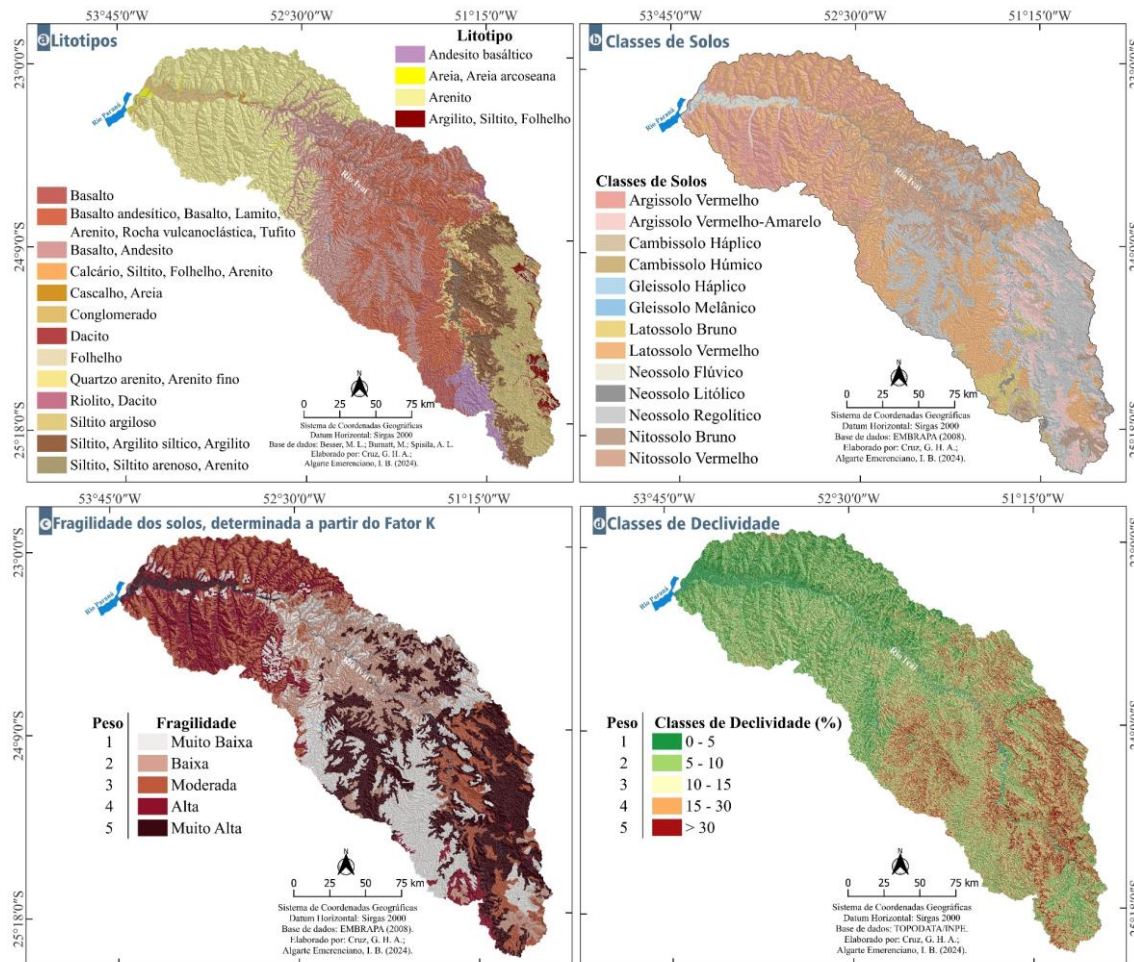
solos (Figura 2b), com variações significativas na composição física, química e mineralógica. Tal característica condiciona múltiplos graus de erodibilidade em função da variação de textura do solo.

Tabela 1 – Categorias hierárquicas da fragilidade das classes de solos

Classes de Solos	Peso	Classe de Fragilidade
Latossolos textura argilosa a muito argilosa	1	Muito Baixa
Latossolos textura argilo-franco, Nitossolos Vermelhos	2	Baixa
Latossolos textura média, Argissolos textura média/argilosa	3	Moderada
Argissolos textura média e arenosa/média, Cambissolos, Chernossolos	4	Alta
Neossolos, Gleissolos, Planossolos, Organossolos, Espodossolos	5	Muito Alta

Fonte: Bonifácio (2019).

Figura 2 – Distribuição espacial de litotipos (a), classes de solos (b), fragilidade dos solos (c) e classes de declividade (d) na bacia hidrográfica do rio Ivaí



Fonte: Os autores.

Quanto à distribuição espacial, seguindo o segundo nível taxonômico, destacam-se os Latossolos Vermelhos, que recobrem, especialmente, os topos dos interflúvios no médio e baixo curso da bacia hidrográfica. Na porção inferior da bacia, esses solos, que assumem

textura média por serem derivados de arenitos, são lateralmente sucedidos por Argissolos Vermelhos de textura arenosa/média. No setor central, apresentam textura argilosa devido ao material parental (basaltos), e ocorrem em associação lateral aos Nitossolos Vermelhos de textura muito argilosa (Figura 2b).

A montante da BHRI, destacam-se os Neossolos Litólicos e Neossolos Regolíticos, associados a relevos com alta taxa de dissecação. Também ocorrem, nessa região, Argissolos Vermelhos-Amarelos de textura média, derivados de rochas sedimentares de granulometria fina (especialmente siltitos e argilitos). Com menor expressividade, desenvolvem Latossolos Brunos e Cambissolos (Háplicos e Húmicos). Já os Gleissolos (Háplico e Melânico) e Neossolos Flúvicos incidem de forma mais restrita, associados à planície do rio Ivaí em seu baixo curso (Figura 2b).

Com base na distribuição das classes e características texturais dos solos, a BHRI apresenta três unidades bem definidas quanto a distribuição espacial do grau de fragilidade: (i) Fragilidade muito baixa e baixa, predominantemente na porção central da bacia hidrográfica, onde ocorrem Latossolos de textura argilosa, além de Nitossolos Vermelhos de textura muito argilosa; (ii) Fragilidade moderada, com distribuição mais dispersa, ocorrendo tanto no baixo compartimento, associada a Latossolos de textura média, quanto no setor superior, em Argissolos Vermelhos-Amarelos de mesma composição textural; e (iii) Fragilidade alta, concentrada principalmente no setor inferior da bacia, associados a Argissolos de textura arenosa/média, enquanto o nível muito alto caracteriza o setor superior, marcado pela presença de Neossolos Litólicos, Neossolos Regolíticos e, com menor frequência, Cambissolos (Figura 2c).

A análise morfométrica, representada pela carta clinográfica, revela maiores declividades a montante da BHRI, com valores superiores a 15%. Na porção central e a jusante, predominam áreas com relevo de baixa declividade, especialmente nos interflúvios, onde os valores são inferiores a 5%, embora ocorra um aumento gradual em direção ao terço médio das vertentes, que podem atingir até 15% (Figura 2d).

A distribuição espacial das declividades, assim como nas características pedológica, contribui significativamente para a expressiva variabilidade no grau de fragilidade observada na bacia hidrográfica, conforme os pesos atribuídos às respectivas classes por Bonifácio (2019) (Tabela 2).

Os intervalos de classes de declividade utilizados para a avaliação da fragilidade ambiental foram definidos por Bonifácio (2019), com base no tratamento estatístico das classificações propostas por Young (1972), Ross (1994), Embrapa (2006), FAO (2006), Lepsch *et al.* (2015) permitindo padronizar a avaliação das variações topográficas e seus efeitos sobre a degradação ambiental.

Tabela 2 – Categorias hierárquicas da fragilidade das classes de declividade

Classes de Declividade	Peso	Classe de Fragilidade
0 – 5	1	Muito Baixa
5 – 10	2	Baixa
10 – 15	3	Moderada
15 – 30	4	Alta
> 30	5	Muito Alta

Fonte: Bonifácio (2019).

Para a análise do uso e cobertura da terra, foram utilizados dados da Coleção 8 do projeto MapBiomass (2024) referentes aos anos de 1985 e 2022, também processados no *software* QGIS 3.38.3. Foi atribuído pesos às classes de uso (Tabela 3), conforme o grau de cobertura do solo. Além disso, foi realizado o cálculo da área de cada categoria, permitindo a identificação a dinâmica temporal e espacial do uso da terra e sua influência na determinação da variação da Fragilidade Ambiental Emergente (FAE).

Tabela 3 – Categorias hierárquicas do grau de cobertura do solo

Uso da terra	Peso
Cobertura Florestal: cobertura original florestal, silvicultura	0
Pastagem	0,25
Culturas: temporárias e permanentes	0,75
Solo exposto e área urbanizada	1

Fonte: Bonifácio (2019).

Seguindo os preceitos adaptados por Bonifácio (2019), o grau de Fragilidade Ambiental Potencial (FAP) foi determinado a partir da aplicação da equação 1:

$$FAP = ((GS + GD) / 2) \quad (\text{equação 1})$$

Em que FAP trata-se da Fragilidade Ambiental Potencial (admissional); GS - Grau de fragilidade dos solos; GD - Grau de declividade.

Utilizando as mesmas variáveis, somados ao índice de uso da terra, foi determinada a Fragilidade Ambiental Emergente, conforme equação 2:

$$FAE = (((GS+GD)/2) + IU) \quad (\text{equação 2})$$

Em que FAE trata-se da Fragilidade Ambiental Emergente (admissional); IU - Índice relacionado ao uso das terras, determinado a partir do grau de cobertura e proteção dos solos.

Posterior a aplicação da operação algébrica, foi realizada a reclassificação da documentação cartográfica gerada para enquadramento das categorias de fragilidade, conforme Tabela 4.

Tabela 4 – Enquadramento das categorias de Fragilidade Ambiental

Intervalo	Classe/Grau de Fragilidade
1 a 1,4	Muito Baixa
1,5 a 2,4	Baixa
2,5 a 3,4	Moderada
3,5 a 4,4	Alta
≥ 4,5	Muito Alta

Fonte: Adaptado de Bonifácio (2019).

FRAGILIDADE AMBIENTAL POTENCIAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO IVAÍ

Com base na interação entre o grau de fragilidade das variáveis ambientais, notadamente o grau de erodibilidade dos solos e os índices de declividade do terreno, observa-se que, sob condições naturais, predomina na BHRI o Grau de Fragilidade Ambiental Potencial (GFAP) moderado, com abrangência de aproximadamente 12.996 quilômetros quadrados, correspondendo a 35,6% de sua área total. Essa classe manifesta-se de forma difusa em todo o perímetro da bacia, com predominância em seu baixo compartimento, onde se associam declividades entre 10 e 15% e a presença de Argissolos Vermelhos de textura média (Figura 3).

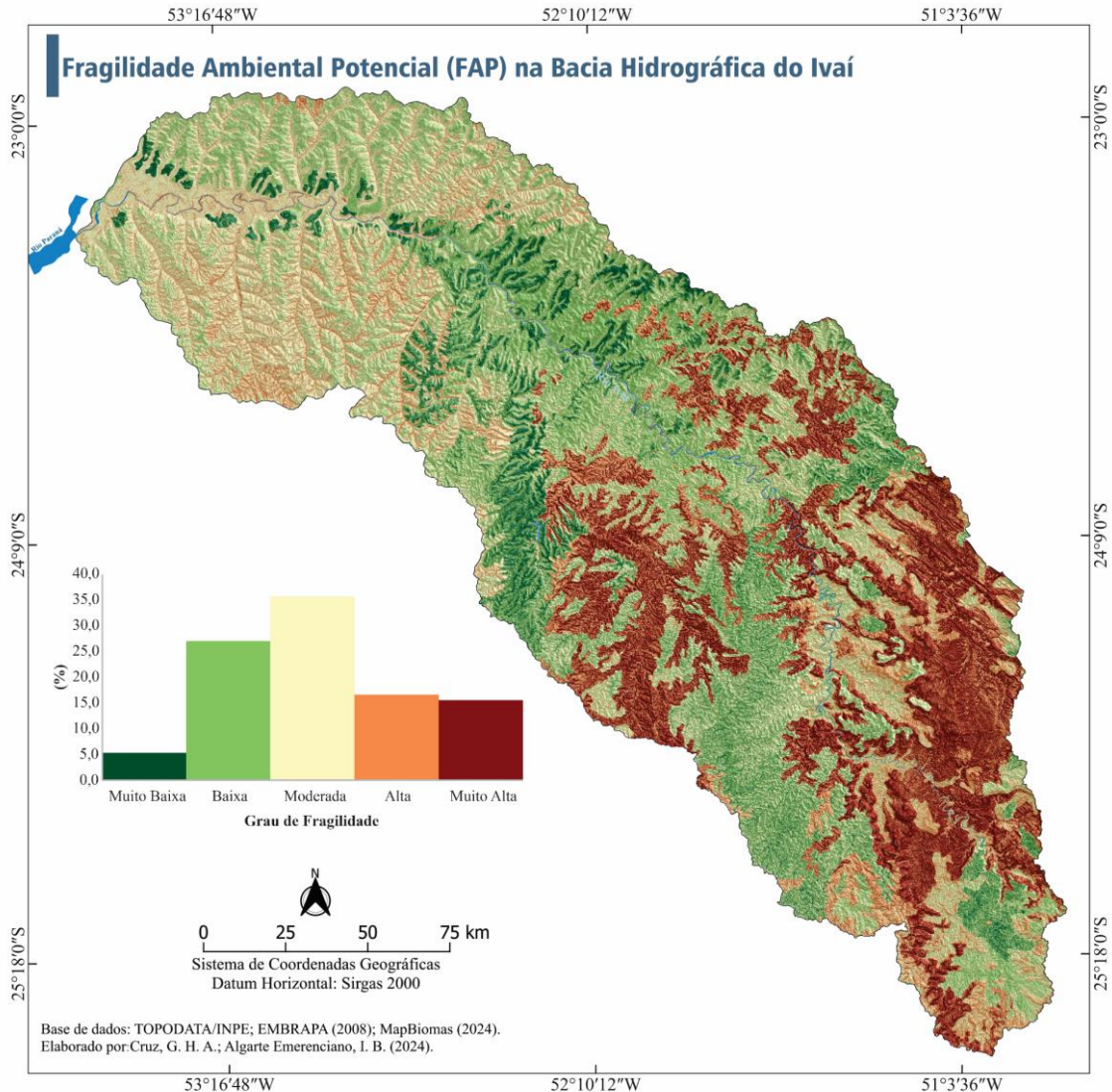
No mesmo compartimento, essa característica pedogeomorfológica é mais significativa na margem esquerda do rio Ivaí (Figura 3), onde o maior entalhe da rede de drenagem induz ao aumento do ângulo de declividade face ao plano médio do relevo que, por sua vez, através da intensificação dos fluxos hídricos no interior no solo, condiciona a translocação de matéria e ao surgimento de frentes de transformação pedogenéticas mais pronunciadas (Ruellan; Dosso, 1993), assim como o que foi constatado por Couto (2015). O rompimento da estabilidade da cobertura pedológica provoca o surgimento de processos pedogenéticos inerentes a essas condições, tais como a argiluviação, gerando Argissolos com estágios de evolução mais avançados, que progridem regressivamente sobre Latossolo até patamares topográficos mais elevados da vertente, corroborando com o que foi relatado por Nóbrega *et al.* (2022).

Em termos de taxa ocorrência e distribuição espacial, o GFAP muito baixo se manifesta de maneira menos expressiva. Associada as áreas com declividades inferiores a 5% e constituídas por Latossolos de textura argilosa a muito argilosa de baixa erodibilidade, abrange uma área de 1.941 quilômetros quadrados (5,3%) e se concentra no terço médio da bacia hidrográfica e, pontualmente, em seu baixo setor, associado especialmente aos topos das colinas (Figura 3). Essas classes de fragilidade em ambientes com as mesmas características pedogeomorfológica foram encontrados por Fushita *et al.* (2011).

Na extremidade oposta da classificação, o GFAP muito forte ocupa uma área de 5.649 quilômetros quadrados (15,5%). Incide sobretudo no setor médio, em áreas com declividades

superiores a 30% e cobertura pedológica composta por Neossolos Regolíticos, Neossolos Litólicos e, com menor expressividade, Cambissolos. Também predominante na alta bacia, associado às mesmas características pedológicas, mas em terrenos com declividade entre 15 e 30%, ocorre o GFAP forte, ocupando 6.044 quilômetros quadrados (16,6%).

Figura 3 – Fragilidade Ambiental Potencial da Bacia Hidrográfica do Ivaí, Paraná



Fonte: Os autores.

Tais classes de fragilidade (\geq forte) são comumente constatadas em pesquisas desenvolvidas em áreas com as mesmas características físico-naturais (Degrande; Bortoluzzi, 2020; Santos; Marchioro, 2020; Sousa; Rocha, 2024), que decorre de fatores estruturais e funcionais, conduzidos pela maior atuação da morfogênese sobre a pedogênese (Tricart, 1977). Em concordância ao relatado por Valle, Francelino e Pinheiro (2016), em relevo forte ondulado, a instabilidade geomorfológica promove contínua remoção de material pedológico,

inibindo o desenvolvimento e instabilidade dos perfis de solos, favorecendo o aumento do grau de fragilidade ambiental.

Os Neossolos (Litólicos e Regolíticos) predominantes nessas áreas apresentam limitada capacidade de infiltração vertical da água em função de sua baixa profundidade efetiva, o que sugere a instalação de fluxos hídricos laterais repentinamente após as precipitações. Essa característica, correlacionada o alto grau de dissecação do terreno, gera o aumento da intensidade do escoamento hídrico em superfície, de forma concentrada ou difusa, favorecendo a formação de feições erosivas na paisagem, sejam laminares ou em sulcos, independente da cobertura vegetal que lhe é atribuída.

O GFAP baixo apresenta distribuição relativamente homogênea em toda a bacia hidrográfica. Geralmente está associada a área com três características distintas em termos de aspectos clinográficos e pedológicos, sendo: (i) áreas com taxas de declividade inferiores a 5% e constituídas por Latossolos de textura média; (ii) inferiores a 10% e compostas por Nitossolos de textura muito argilosa; e (iii) entre 10 e 15%, formada por Latossolos de textura argilosa. Assim, como reflexo do aumento de possibilidades que levaram à formação de áreas com grau baixo de fragilidade, além de ocorrer de maneira relativamente homogênea em termos de distribuição geográfica, trata-se da segunda classe de maior ocorrência na BHRI, cobrindo aproximadamente 9.837 quilômetros quadrados (27,0%) (Figura 3).

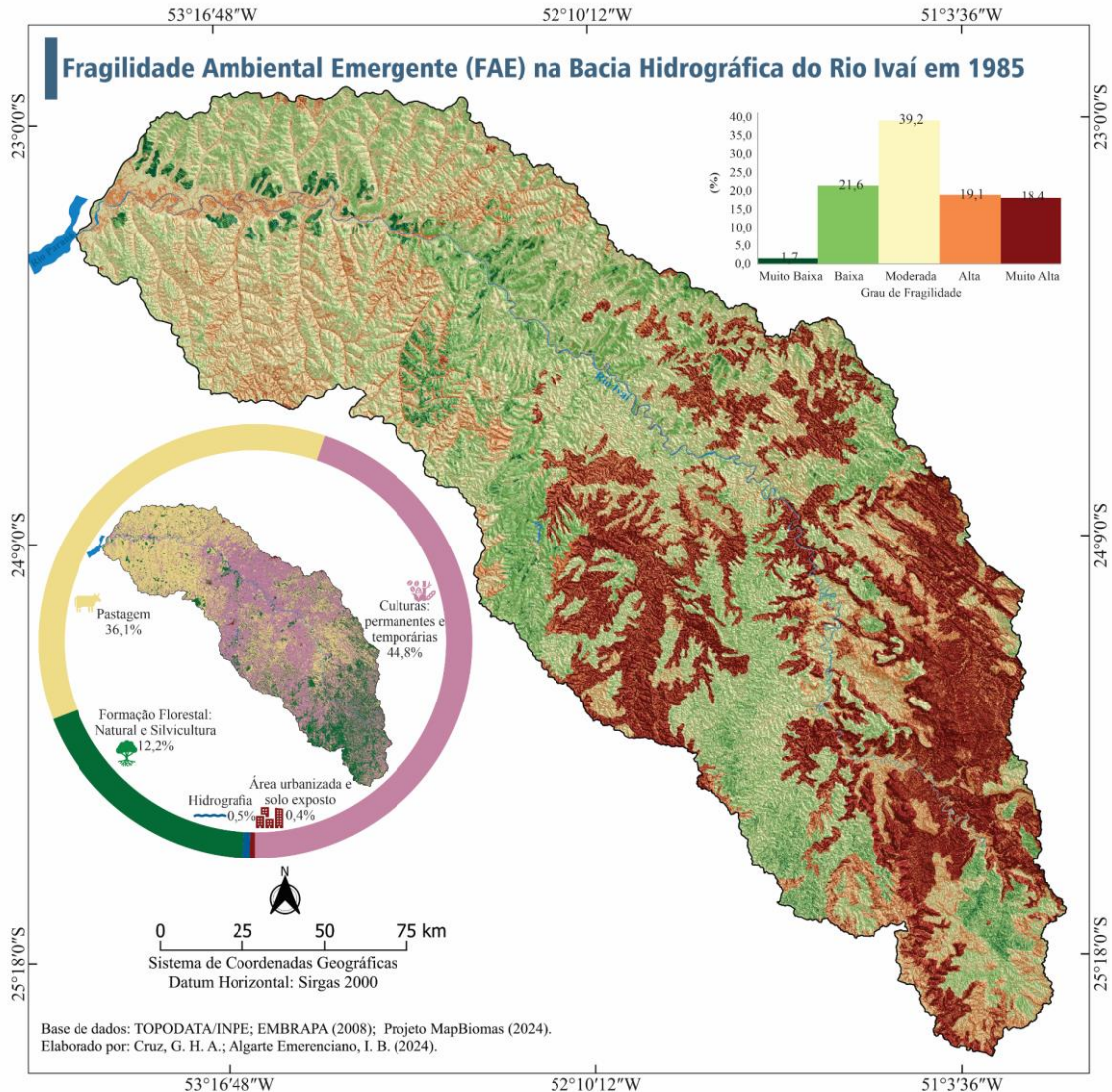
A FRAGILIDADE AMBIENTAL EMERGENTE NOS ANOS DE 1985 E 2022

A diversidade potencial dos solos que compõem a BHRI, condicionada por características inerentes à sua gênese e evolução, aliada às especificidades climatológicas e geomorfológicas locais, resultou na consolidação de uma diversificada organização fundiária. Tal dinâmica territorial favoreceu a instalação de distintas atividades antrópicas, cujas ações provocaram alterações que extrapolaram os limites de fragilidade intrínseca da sua estrutura natural (FAP), implicando em crescentes processos de degradação ao longo do tempo.

Em 1985, período em que o processo de ocupação do interior do estado do Paraná já se encontrava consolidado (Serra, 2022), a BHRI apresentava predominantemente três formas de uso da terra, organizadas espacialmente de acordo com padrões de cobertura bem definidos. No alto compartimento da bacia, marcado por relevo com alto grau de dissecação e solos em estágio iniciais de formação, como Neossolos Litólicos, Neossolos Regolíticos e Cambissolos, predominavam cobertura florestal remanescente e pastagens, devido às limitações à mecanização agrícola e à urbanização. No setor médio, composto por solos em estágios avançados de evolução, fisicamente estáveis, bem drenados (Latosolos) e naturalmente férteis (Nitossolos), destacava-se a cultura de grãos, com ênfase em milho, soja e trigo. Já no setor

inferior da bacia, que também compreende solos profundos (Latosolos e Argissolo), mas geralmente de baixa fertilidade e alta vulnerabilidade natural em decorrência de características físicas e químicas herdadas de seu material parental (arenitos do Grupo Caiuá), a pastagem plantada para a criação de gado eram predominantes (Figura 4).

Figura 4 – Fragilidade Ambiental Emergente da Bacia Hidrográfica do Ivaí em 1985



Fonte: Os autores.

A implantação das atividades agropecuárias, embora em consonância com as potencialidades edáficas e geomorfológicas, nem sempre ocorrem de maneira planejada levando em consideração os níveis de vulnerabilidade dos solos. Em resultado, passaram a provocar alterações significativas nos padrões de fragilidade ambiental emergente (FAE) em relação à potencial, particularmente nos graus intermediário e elevado (\geq moderado), refletindo no decréscimo das áreas que naturalmente apresentavam GFAP muito baixo ou baixo.

No primeiro quinquênio da década de 1980, imperava o grau de fragilidade ambiental emergente (GFAE) moderado, o qual ocorria em 14.304 quilômetros quadrados, correspondendo a 39,2% da BHRI. A sua distribuição geográfica, assim como na FAP, se concentra principalmente na porção noroeste do compartimento inferior da bacia hidrográfica, sobretudo na margem esquerda do rio Ivaí (Figura 4).

Nessa região, embora predominasse a pastagem como forma de uso da terra, que em termos de cobertura da superfície se configura uma condição de maior estabilidade em comparação a culturas mecanizadas, a proeminência de solos derivados de arenitos, com maiores taxas de erodibilidade, resulta em índices de FAE intermediários. A declividade, que predominantemente varia entre 5 e 10%, também cooperou para essa característica.

A segunda classe mais expressiva em 1985, tanto em frequência quanto em dispersão espacial, foi o GFAE baixo. Em função da antropização da área, passou a ocupar 7.880 quilômetros quadrados, correspondendo a 21,6% da BHRI (Figura 4), registrando assim um decréscimo de -5,4% em relação as condições naturais (FAP). Essa classe esteve associada, principalmente, às áreas com solos derivados de basaltos (Latosolos de textura argilosa e Nitossolos de textura muito argilosa) e declividade inferior a 10%, concentrando majoritariamente no terço médio da bacia, cobertos principalmente por culturas temporárias, especialmente a soja e sistema rotativo com o milho.

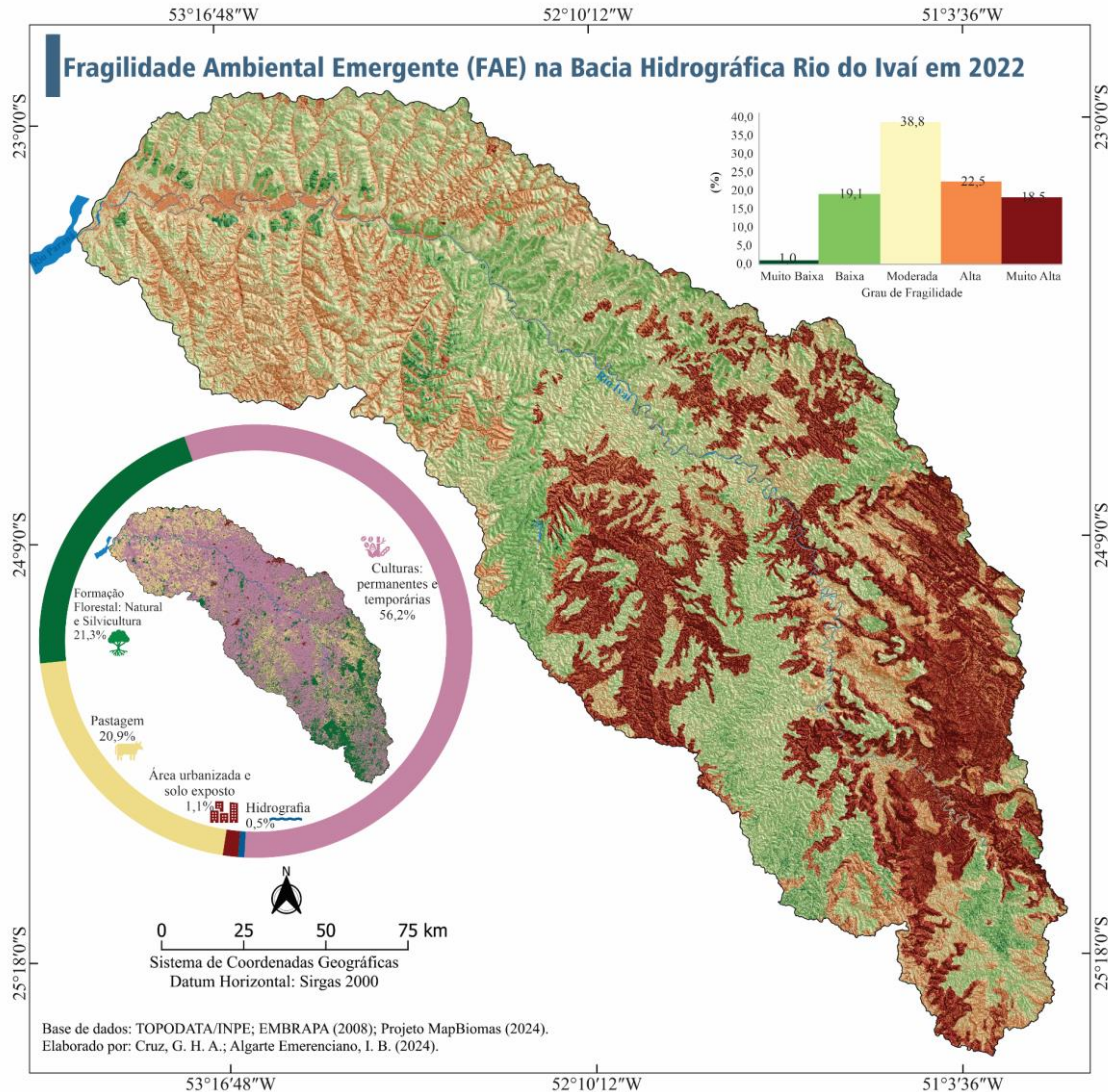
O GFAE muito baixo, por sua vez, registrou uma redução de 3,6% em relação à FAP, restringindo-se aos topos das colinas de baixa declividade (<5%), constituídas por Latossolos de textura argilosa, localizadas no baixo compartimento da unidade hidrográfica.

Em contraposição, as áreas com alto nível de fragilidade (GFAE alto) abrangiam, ainda em 1985, cerca de 6.972 quilômetros quadrados (19,1%), representando um acréscimo de 2,5% (911,65 quilômetros quadrados) em relação às condições naturais (FAP). Já a classe de fragilidade muito alta (GFAE muito alta), cobria 18,4% da BHRI (6.697 quilômetros quadrados), associada principalmente a áreas caracterizadas por apresentarem declividades superiores a 15% e solos incipientes. Embora essas áreas apresentassem formação florestal e pastagem, os quais promovem maior cobertura e taxa de estabilidade aos solos, suas características geomorfológicas e pedológicas condicionam naturalmente a geração de áreas mais fragilizadas (Figura 4).

Até o ano de 2022 a BHRI passou por mudanças significativas na dinâmica de uso e ocupação do solo, impulsionados especialmente pelo processo de modernização agrícola no estado do Paraná, que reverberaram diretamente nos níveis de fragilidade. Destaca-se o aumento significativo das áreas destinadas à utilização com lavouras de culturas temporárias, que passaram a recobrir 56,2% da bacia (20.487 quilômetros quadrados), aumento de 11,4% (4.156 quilômetros quadrados) em relação ao ano de 1985 (Figura 5). Paralelamente, houve

um acréscimo na formação florestal, que passou de 4.450 quilômetros quadrados (12,2%) em 1985 para 7.763 quilômetros quadrados (21,3%) na taxa de cobertura total da BHRI em 2022.

Figura 5 – Fragilidade Ambiental Emergente da Bacia Hidrográfica do Ivaí em 2022



Fonte: Os autores.

A pastagem, que em 1985 era a segunda principal forma de uso da terra (13.175 quilômetros quadrados ou 36,1%) e que ocorria principalmente no alto e baixo compartimento da bacia, sofreu significativa redução até 2022, atingindo uma cobertura de 7.640 quilômetros quadrados, o equivalente a 20,9% da área total da bacia hidrográfica (Figura 5).

Em resposta ao avanço das lavouras perenes e temporárias, com destaque para a segunda, representada pela cana-de-açúcar no compartimento inferior e da soja/milho no setor médio da bacia hidrográfica, entre os anos de 1985 e 2022 houve variações significativas na distribuição das classes de fragilidade, em especial ao aumento de 3,4% (1.239 quilômetros quadrados) nas áreas classificadas como GFAE alto e uma redução de 2,5%

(911,6 quilômetros quadrados) nas áreas de GFAE baixo. As áreas com fragilidade muito baixa, moderada e muito alta apresentaram oscilações menos expressivas, com taxas de variação de -0,6% (218,80 quilômetros quadrados), -0,4% (145,86 quilômetros quadrados) e 0,2% (72,93 quilômetros quadrados), respectivamente.

Grande parte dessas alterações foi observada em áreas que, em 1985, eram ocupadas por pastagens, sobretudo no baixo compartimento da BHRI, que foram gradualmente convertidas em culturas temporárias até 2022. Como resultado, essa área passou a apresentar, progressivamente, maior concentração do GFAE alto (Figuras 4 e 5).

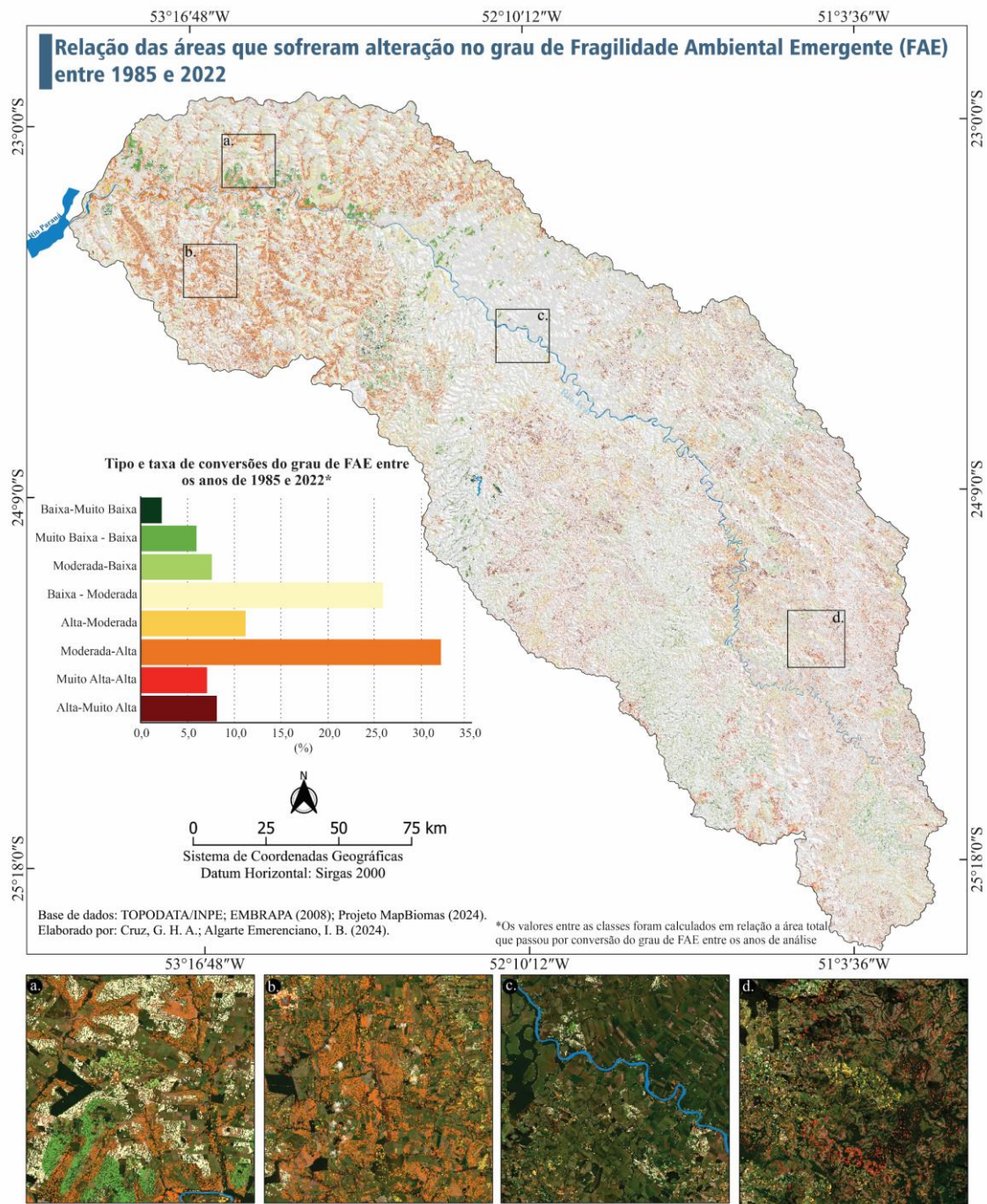
Em relação ao GFAE que menos sofreu oscilação entre 1985 e 2022, foi o muito alto. Esse fato pode ser atribuído e associado a áreas naturalmente frágeis em função de suas características pedológicas (erodibilidade) e geomorfológicas (declividade), por serem áreas resultantes da síntese de solos incipientes (Neossolos Litólicos, Neossolos Regolíticos e Cambissolos) e relevo forte ondulado (declividades superiores a 30%). Nesses ambientes, mesmo que recobertos por formação florestal, condição favorecida pela limitada aptidão agrícola, a fragilidade intrínseca se mantém. Contudo, os processos de degradação podem ser intensificados mediante a conversão do uso florestal para agrícola, especialmente sobre solos um pouco mais profundos (Cambissolo).

A DINÂMICA DA FRAGILIDADE AMBIENTAL EMERGENTE ENTRE 1985 E 2022

Embora, comparativamente, algumas classes de fragilidade terem apresentado baixa variações em termos de ocorrência entre 1985 e 2022, resultante da expansão de determinadas áreas em detrimento de outra(s), é importante destacar que essas classes aparentemente pouco alteradas podem refletir dinâmicas de transformação particulares e complexas. Tais mudanças nem sempre são facilmente perceptíveis por meio de uma análise visual dos produtos cartográficos.

Entre 1985 e 2022, aproximadamente 17,1% da BHRI (6.247 quilômetros quadrados) apresentou alterações no GFAE. A classe de alta fragilidade foi a que apresentou maior variabilidade, representando cerca de 58,4% da área total alterada. A transição mais significativa ocorreu em regiões classificadas, em 1985, como de fragilidade moderada e, ao longo do período analisado, passaram a ser classificadas como de alta fragilidade, abrangendo aproximadamente 32% da área total modificada. Entretanto, nem todas as transições relacionadas ao GFAE alto refletiram impactos negativos, uma vez que 11,2% da área convertida evoluiu positivamente da classe alta para a moderada (Figura 6).

Figura 6 – Relação das áreas que sofreram alteração no grau de Fragilidade Ambiental Emergente (FAE) entre 1985 e 2022



Fonte: Os autores.

Geograficamente, as áreas que tiveram seu grau de fragilidade alterado de moderado para alto estão concentradas, majoritariamente, no baixo setor da BHRI (Figura 6a), especialmente na margem esquerda do rio Ivaí (Figura 6b). Essa distribuição está associada, sobretudo, à conversão do uso do solo, com a transição de pastagens para culturas temporárias, como já evidenciado por estudos que apontam o avanço expressivo da cana-de-açúcar sobre solos derivados de arenitos (Latossolos e Argissolos) no noroeste paranaense

após a década de 1990 (Nóbrega; Serra, 2009). Essa característica, o aumento do grau da fragilidade moderada para alto em resposta a introdução da cana-de-açúcar, corrobora o que foi constatado em outras pesquisas (Guerrero *et al.*, 2023; Oliveira-Andreoli *et al.*, 2021).

As transições da classe alta para moderada ocorreram principalmente na porção superior da BHRI (Figura 6d), assim como as mudanças da classe muito alta para alta, que representa 7,1% da área total alterada. Entende-se que, devido à dificuldade de mecanização dos solos nesses locais, parte das pastagens foi convertida em cobertura florestal, seja com espécies nativas ou destinadas à silvicultura comercial (eucaliptos), o que teria contribuído para a redução relativa da fragilidade, mesmo que os níveis elevados persistam devido às condições naturais do ambiente.

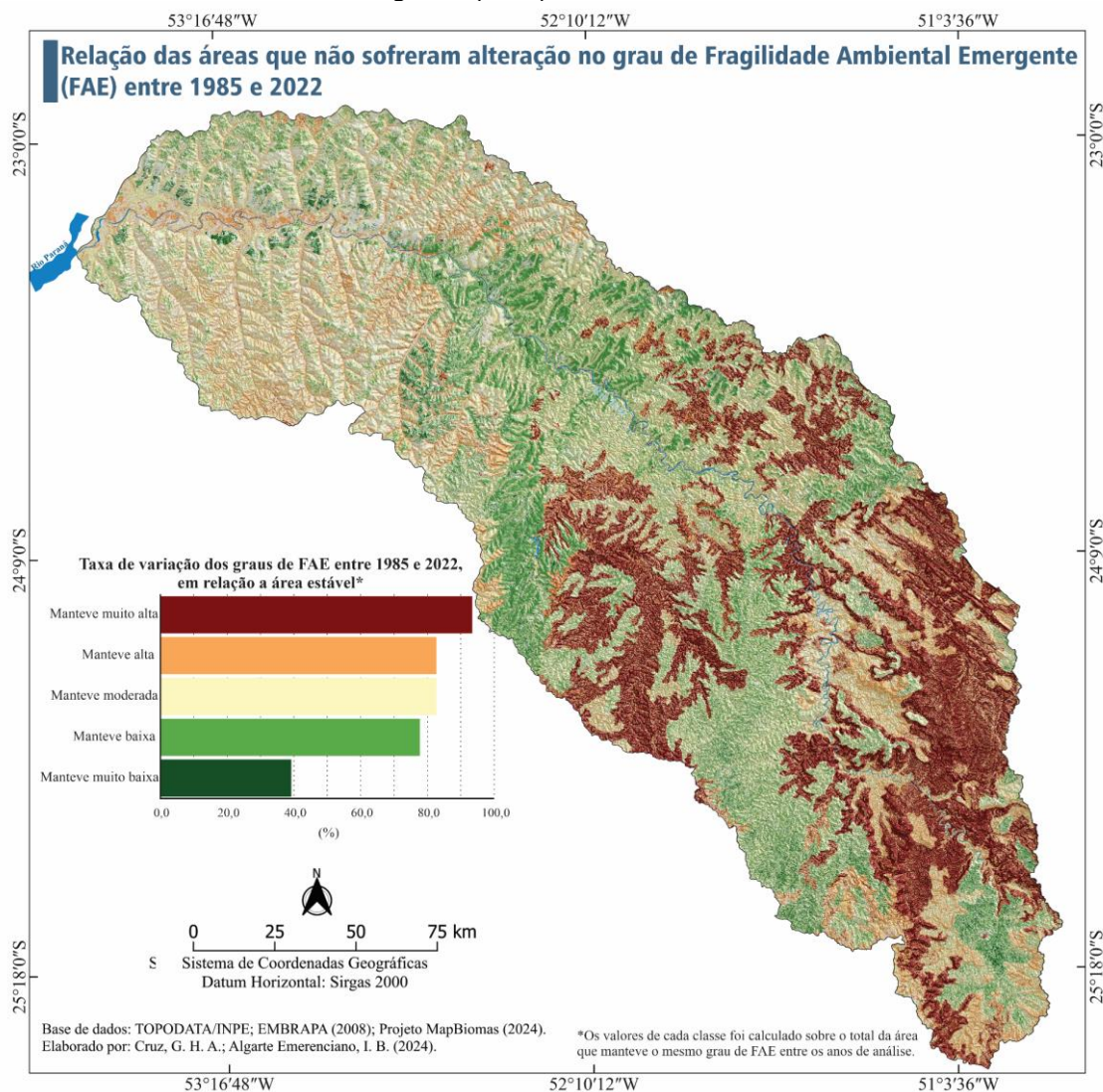
A conversão de áreas anteriormente destinadas à agropecuária para cobertura florestal também pode ter favorecido a transição de áreas que, em 1985, apresentavam baixo grau de fragilidade, mas que, em 2022, passaram a ser classificadas como de fragilidade muito baixa, o que representa aproximadamente 5,9% da área total alterada. Tais mudanças ocorreram, principalmente em áreas adjacentes a rede de drenagem no setor médio da BHRI (Figura 6c), compostas por Latossolos e Nitossolos de textura argilosa, em relevo com declividades inferiores a 10%.

O aumento da vegetação observado nessas regiões pode estar diretamente associado à recuperação e preservação das Áreas de Preservação Permanente (APPs), conforme definidas pelo Código Florestal Brasileiro (CFB) de 2012 (Lei nº 12.651) (Brasil, 2012). A promulgação do novo Código Florestal (CF) em 2012, que substituiu o Código Florestal de 1965 (Lei nº 4.771), instituiu diretrizes para a proteção dessas áreas, conforme pode ser verificado no artigo 7º do CF que “[...] estabelece que indivíduos que detêm propriedades que dispõem de APP devem manter a vegetação” (Algarte Emerenciano, 2024, p. 77). Esse marco legal, aliado com a instituição do Cadastro Ambiental Rural (CAR), registro público obrigatório para todos os imóveis rurais, pode ter incentivado na recuperação dessas áreas, contribuindo, assim, para atenuação dos índices de fragilidade ambiental em determinadas porções da bacia hidrográfica.

Durante o intervalo analisado e na escala cartográfica adotada neste estudo, não foram observadas mudanças abruptas nos níveis de fragilidade, como, por exemplo, a transição direta de áreas que apresentavam a classe de fragilidade muito baixa em 1985 e passaram a ser classificadas como moderadas (ou superiores) em 2022. Dessa forma, sugere-se que, embora tenha sido registrado um aumento nos níveis de fragilidade ambiental, tais mudanças não resultam de transformações repentinas, o que poderia provocar instabilidade mais significativa da paisagem.

Quanto às áreas consideradas estáveis, que correspondem aproximadamente 32.216 quilômetros quadrados, ou 82,8% da área total da bacia hidrográfica, estas apresentam uma distribuição geográfica mais significativa no setor superior da bacia, especialmente em áreas com GFAE muito alto, o que corresponde a 20,7% da área total que apresentou estabilidade. Essa característica pode ser explicada pelas limitações à mecanização dos solos e à instalação de grandes centros urbanos nessas áreas. No entanto, mesmo quando essas intervenções ocorrem, são locais que já se caracterizam por níveis extremos de fragilidade, o que torna mudanças visuais menos perceptíveis (Figura 7).

Figura 7 – Relação das áreas que não sofreram alteração no grau de Fragilidade Ambiental Emergente (FAE) entre 1985 e 2022



Fonte: Os autores.

Em contraste, áreas testemunhas de estabilidade em níveis de fragilidade muito baixa correspondem a apenas 0,8% da área total não alterada entre 1985 e 2022. Essas áreas

estão concentradas nos fundos de vales, denominadas pelo CFB de 2012 de Áreas de Preservação Permanente (APPs) (Brasil, 2012) e em pequenos topos de colinas de baixa declividade e constituídas por Latossolos de textura argilosa, às margens rio Ivaí em seu baixo curso. Conforme apresentado, a permanência dessas áreas com baixa fragilidade pode estar associada às restrições legais de uso.

Em síntese, o processo de ocupação e exploração do território para o desenvolvimento de atividades econômicas geralmente segue as potencialidades do ambiente, mas não leva em conta suas limitações, exceto quando estas apresentem níveis extremos, como ocorre nas áreas com fragilidade muito alta, resultante de sua gênese. A ausência de práticas conservacionistas em áreas predispostas a instabilidades tende a provocar alterações mais significativas nas classes de fragilidade, contribuindo para o processo de degradação ao longo do tempo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A bacia hidrográfica do rio Ivaí (BHRI) apresenta uma estrutura geoecológica heterogênea, resultante da diversidade de seus componentes físico-naturais e das interações entre eles. Essa heterogeneidade condiciona naturalmente a manifestação de múltiplos níveis de fragilidade ambiental, que podem ocorrer de maneira concentrada ou altamente dispersos espacialmente. A ação antrópica sobre os sistemas naturais, por meio da implantação de centros urbanos e, principalmente, de culturas agrícolas, contribuiu para o aumento das áreas com graus de fragilidade superiores ao grau moderado, em detrimento daquelas baixas e muito baixas.

A modernização agrícola no estado do Paraná e a introdução de novas formas de uso da terra entre 1985 e 2022, com destaque para a expansão da cana-de-açúcar no setor inferior da BHRI, foi acompanhado por um aumento de 3,4% na área classificada como de alta fragilidade e por uma redução de 2,5% das áreas de baixa fragilidade. Contudo, a sobreposição do material cartográfico demonstrou que as demais classes (muito baixa, moderada e muito alta), mesmo que aparentassem, a princípio, variações mínimas (-06%, -0,4% e 0,2%, respectivamente), também sofreram mudanças expressivas, que não se evidenciam apenas pela comparação das áreas de ocorrência calculadas.

No total, cerca de 17,1% (6.247 quilômetros quadrados) da BHRI sofreu alteração no grau de fragilidade ao longo do período analisado. Dentre essas áreas modificadas, aproximadamente 58,4% estão, de alguma forma, associadas ao grau forte. No entanto, nem todas as áreas que passaram a integrar essa classe resultam do rebaixamento de regiões anteriormente menos vulneráveis, uma vez que 11,2% desse total correspondem a áreas que

transitaram do grau forte para moderado, enquanto 7,1% migraram da classe muito alta para alta, algo associado às áreas reflorestadas.

As áreas que apresentaram maior grau de estabilidade no período analisado concentram-se no alto setor da BHRI, caracterizadas por solos incipientes e relevo com alta taxa de declividade, o que naturalmente limita os graus de fragilidade altos e muito altos, independente da forma de uso da terra adotada. Essa característica faz com que, mesmo havendo um aumento local dentro da classe muito alta, tende a ser pouco perceptível, pois ocorre em um extremo superior do índice de fragilidade.

A análise comparativa da vulnerabilidade natural da bacia e da dinâmica do uso e ocupação da terra permite concluir que a BHRI apresenta, no setor a montante, uma área de estabilidade quanto ao grau de fragilidade ambiental, mesmo em condições de elevada fragilidade, além de duas áreas mais dinâmicas, que passaram por alterações mais expressivas em função das alterações nas formas de uso da terra.

Dessa forma, a análise espaço-temporal da fragilidade ambiental pode servir como parâmetro para a delimitação de unidades de gestão, suscetíveis de redefinição ao longo do tempo.

REFERÊNCIAS

ALGARTE EMERENCIANO, Isabella Beatrys. **Legislação ambiental brasileira e seus impactos nas Áreas de Preservação Permanente (APPs): estudo de caso do Ribeirão Marumbi, PR.** 2024. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2024.

ANJINHO, Phelipe da Silva; BARBOSA, Mariana Abibi Guimarães Araujo; COSTA, Carlos Wilmer; MAUAD, Frederico Fábio. Environmental fragility analysis in reservoir drainage basin land use planning: A Brazilian basin case study. **Land Use Policy**, Guildford, v. 100, p. 1-11, Jan. 2021.

BONIFÁCIO, Cássia Maria. **Fragilidade ambiental e qualidade da água na unidade hidrográfica do Pirapó, Paranapanema III e VI, Paraná.** 2019. Tese (Doutorado em Geografia,) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2019.

BOUYOUCOS, George John. The clay ratio as a criterion of susceptibility of soils to erosion. **Agronomy Journal**, Madison, v. 27, n. 9, p. 738-741, 1935.

BRASIL. Presidência da República. Casa Civil. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nºs 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 28 maio 2012.

COUTO, Edivando Vitor. **Evolução denudacional de longo prazo e a relação solo-relevo no Noroeste do Paraná.** 2015. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

DEGRANDE, Edmiler José Silva; BORTOLUZZI, Leandro Neri. Análise da fragilidade ambiental potencial e emergente da bacia hidrográfica do Córrego da Onça em Presidente

Prudente/SP. **Geografia em Questão**, Marechal Cândido Rondon, v. 13, n. 3, p. 33-50, 2020.

EMBRAPA. **Mapa de solos do Estado do Paraná**. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos e Florestas, 2008.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SPI, 2006.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Guidelines for soil description**. 4th ed. Roma: FAO, 2006.

FUSHITA, Ângela Terumi; CAMARGO-BORTOLIN, Livia Haik Guedes; ARANTES, Eurípedes Maximiano; MOREIRA, Marco Antônio Albano; CANÇADO, Cláudio Jorge; LORANDI, Reinaldo. Fragilidade ambiental associada ao risco potencial de erosão de uma área da região geoeconômica médio Mogi Guaçu superior (SP). **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v. 63, n. 4, p. 477-488, dez. 2011.

GRAÇA, Carlos Henrique *et al.* Multitemporal analysis of estimated soil loss for the river Mourão watershed, Paraná–Brazil. **Brazilian Journal of Biology**, São Carlos, v. 75, n. 4, p. 120-130, 2015. Supplement 2.

GUERRERO, João Vitor Roque; ESCOBAR-SILVA, Elton Vicente; Michel Eustáquio Dantas CHAVES; MATAVELI, Guilherme Augusto Verola; MOSCHINI, Luiz Eduardo. Detecting Multitemporal Land Use Changes and Environmental Fragility in a Heterogeneous Brazilian Landscape. **Papers in Applied Geography**, Philadelphia, v. 9, n. 1, p. 89-103, 2023.

INPE - INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Banco de dados geomorfométricos do Brasil**. São José dos Campos: INPE, 2011. Disponível em: <https://www.dsr.inpe.br/topodata/>. Acesso em: 12 mar. 2024.

LEPSCH, Igo Fernando; ESPINDOLA, Carlos Roberto; VISCHI FILHO, Oswaldo Julio; HERNANI, Luís Carlos; SILVA, Diego. **Manual para levantamento utilitário e classificação de terras no sistema de capacidade de uso**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2015.

MAPBIOMAS. **Coleção 8 da série anual de mapas de cobertura e uso da terra do Brasil**. São Paulo: MapBiomass, 2024. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/map/colecao-8/>. Acesso em: 13 out. 2024.

MEURER, Maurício; BRAVARD, Jean-Paul; STEVAUX, José Cândido. Ecorregiões da bacia hidrográfica do Rio Ivaí, Paraná, Brasil: uma contribuição metodológica para a gestão de bacias hidrográficas. **Boletim de Geografia Teorética**, Rio Claro, v. 35, p. 345-357, 2010.

MORO, Dalton Aureo. Aspectos geográficos da modernização agrícola no Norte do Paraná. **Boletim de Geografia**, Maringá, v. 13, n. 13, p. 79-93, 1995.

NAKASHIMA, Myriam da Silveira Reis. Carta de fragilidade ambiental da bacia do rio Keller, Estado do Paraná: subsídio ao estudo dos processos erosivos. **Acta Scientiarum**. Technology, Maringá, v. 23, p. 1547-1560, 2001.

NÓBREGA, Maria Teresa; CUNHA, José Edézio da; SILVEIRA, Hélio; BONIFÁCIO, Cássia Maria. Morfopedologia e dinâmica das paisagens no Noroeste paranaense em face da erosão. *In*: SERRA, Elpídio; SILVEIRA, Hélio; NÓBREGA, Maria Teresa (org.). **Noroeste paranaense: paisagem e desenvolvimento rural**. Maringá: Ed. PGE, 2022. p. 71-114.

NÓBREGA, Maria Teresa; SERRA, Elpídio. Noroeste do Paraná: a dinâmica da paisagem rural nas zonas de contato arenito-basalto. **Terra Plural**, Ponta grossa, v. 3, n. 2, p. 197-214, 2009.

OLIVEIRA, Semí Cavalcante. A economia cafeeira no Paraná até a década de 1970. **Vitrine da Conjuntura**, Curitiba, v. 2, n. 4, p. 1-8, jun. 2009.

- OLIVEIRA-ANDREOLI, Erica Zanardo *et al.* Multi-temporal analysis of land use land cover interference in environmental fragility in a Mesozoic basin, southeastern Brazil. **Groundwater for Sustainable Development**, [Amsterdam], v. 12, p. 1-9, Feb. 2021.
- ROSS, Jurandyr Luciano Sanches. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. 8, p. 63-74, 1994.
- RUELLAN, Alain; DOSSO, Mireille. **Regards sur le sol**. Paris, Éditeur Foucher, 1993.
- SANTOS, James Rafael Ulisses; MARCHIORO, Eberval. Análise empírica da fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do rio Duas Bocas, Espírito Santo, Brasil. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. 39, p. 72-87, 2020.
- SERRA, Elpídio. Noroeste do Paraná: pasto e cana nas terras da última fronteira do café. *In*: SERRA, Elpídio; SILVEIRA, Hélio; NÓBREGA, Maria Teresa (ed.). **Noroeste paranaense: paisagem e desenvolvimento rural**. Maringá: Ed. PGE, 2022. p. 9-46.
- SOUSA, Roneide; ROCHA, Glairton Cardoso. Análise integrada e fragilidade ambiental potencial da bacia hidrográfica do rio Camurupim, litoral do Piauí. **GEOFRONTER**, Campo Grande, v. 10, p. 1-22, 2024.
- TRICART, Jean. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro: IBGE-SUPREN, 1977.
- VALLE, Ivana Cola; FRANCELINO, Márcio Rocha; PINHEIRO, Helena Saraiva Koenow. Mapeamento da fragilidade ambiental na Bacia do Rio Aldeia Velha, RJ. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 23, p. 295-308, 2016.
- YOUNG, Anthony. **Slopes**. Edinburgh: Oliver and Boyd, 1972.

Recebido: setembro de 2025.

Aceito: dezembro de 2025.