

ANÁLISE DA RECUPERAÇÃO DE UMA ÁREA DEGRADADA ATRAVÉS DE ÍNDICE DE VEGETAÇÃO

ANALYSIS OF THE RECOVERY OF A DEGRADED AREA THROUGH VEGETATION INDEX

ANÁLISIS DE LA RECUPERACIÓN EN UN ÁREA DEGRADADA A TRAVÉS DEL ÍNDICE DE VEGETACIÓN



10.56238/revgeov16n5-128

Wesley dos Santos Carvalho

Mestre em Ciências Ambientais e Sustentabilidade Agropecuária
Instituição: Universidade Católica Dom Bosco (UCDB)
E-mail: wesleysc352@gmail.com

Marcos Vinicius Alves de Oliveira

Graduado em Ciências Biológicas
Instituição: Universidade Católica Dom Bosco (UCDB)
E-mail: omarcosoliveira67@gmail.com

Maria Eduarda Basílio de Ávila

Graduada em Agronomia
Instituição: Universidade Católica Dom Bosco (UCDB)
E-mail: mariaeduardabavila.02@gmail.com

Drielle de Carvalho Petuco

Graduanda em Ciências Biológicas
Instituição: Universidade Católica Dom Bosco (UCDB)
E-mail: petucodrielle@gmail.com

Paola Ferreira Guimarães Grau

Graduanda em Agronomia
Instituição: Universidade Católica Dom Bosco (UCDB)
E-mail: paolafgg28@gmail.com

Thiago Ferreira Diniz

Graduando em Agronomia
Instituição: Universidade Católica Dom Bosco (UCDB)
E-mail: dinizthiago021@gmail.com

Andressa Tognon

Mestre em Desenvolvimento Local
Instituição: Universidade Católica Dom Bosco (UCDB)
E-mail: andressatognon.eng@gmail.com



Denilson de Oliveira Guilherme

Doutor em Produção Vegetal

Instituição: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro

E-mail: denilson@ucdb.br

RESUMO

Os processos antrópicos podem muitas vezes resultar em danos ao meio ambiente, reduzindo algumas de suas propriedades como a qualidade ou capacidade produtiva dos recursos naturais. O processo de recuperação busca reabilitar uma determinada área degradada a alguma forma de utilização ambientalmente sustentável. O sensoriamento remoto é uma forma econômica de mapear áreas degradadas, e monitorar o processo de recuperação. Neste contexto o presente trabalho analisou a evolução do Projeto de Recuperação de Área Degradada ou Alterada (PRADA) do Parque Ambiental Água Limpa localizado em Campo Grande/MS. Para isso, foi realizada análise estatística de duas séries temporais de NDVI derivadas dos Satélites TERRA-ASTER e Landsat 5/8 por meio de teste não-paramétrico Kruskal-Wallis a fim de verificar se existe variação anual do NDVI, se houve variação entre período anterior e posterior à implantação do PRADA. Posteriormente, foi aplicado o teste pós-Hoc Dunn-Bonferroni para verificação da diferença pareada entre os grupos. Por fim, foi aplicado o teste de Mann-Kendall para verificar se existe tendência, se positiva ou negativa, nas séries de NDVI analisadas. Os resultados demonstraram que existe variação ao longo do tempo no NDVI de ambas as séries. Verificou-se ainda que os valores de NDVI são estatisticamente diferentes comparando-se o período anterior e posterior à implantação do PRADA. A série Landsat 5/8 apresentaram tendência positiva nos valores do NDVI evidenciando a aumento de biomassa vegetal na área de recuperação.

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto. Kruskal-Wallis. Mann-Kendall. NDVI. PRADA.**ABSTRACT**

Anthropogenic processes can often result in damage to the environment, reducing some of its properties such as the quality or productive capacity of natural resources. The recovery process seeks to rehabilitate a given degraded area to some form of sustainable environmental use. Remote sensing is an economical way to map degraded areas and monitor the recovery process. In this context, this work analyzes the evolution of the Degraded or Altered Area Recovery Project (PRADA) of the Água Limpa Environmental Park located in Campo Grande/MS. To this end, a statistical analysis was carried out on two NDVI time series derived from the TERRA-ASTER and Landsat 5/8 Satellites using the non-parametric Kruskal-Wallis test to verify whether there is an annual variation in the NDVI, whether there was a variation between the previous period and subsequent to the implementation of PRADA. Subsequently, the Dunn-Bonferroni post-hoc test was applied to verify the paired difference between the groups. Finally, the Mann-Kendall test was applied to check whether there is a trend, whether positive or negative, in the series of NDVI tests. The results obtained show that there is variation over time in the NDVI of both series. It was also found that the NDVI values are statistically different when comparing the period before and after the implementation of PRADA. The Landsat 5/8 series had a positive trend in NDVI values, showing the increase in plant biomass in the recovery area.

Keywords: Remote Sensing. Kruskal-Wallis. Mann-Kendall. NDVI. PRADA.

RESUMEN

Los procesos antropogénicos muchas veces pueden resultar en daños al medio ambiente, reduciendo algunas de sus propiedades como la calidad o la capacidad productiva de los recursos naturales. El proceso de recuperación busca rehabilitar un área determinada desde la degradación hasta alguna forma de uso ambientalmente sostenible. La teledetección es una forma económica de mapear áreas degradadas y monitorear el proceso de recuperación. En este contexto, el presente trabajo analizó la evolución del Proyecto de Recuperación de Área Degradada o Alterada (PRADA) del Parque Ambiental Água Limpa ubicado en Campo Grande/MS. Para ello se realizó un análisis estadístico de dos series temporales de NDVI derivadas de los Satélites TERRA-ASTER y Landsat 5/8 mediante la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis con el fin de verificar si existe variación anual en el NDVI, si existe Hubo variación entre los períodos antes y después de la implementación de PRADA. Posteriormente se aplicó la prueba post-Hoc de Dunn-Bonferroni para verificar la diferencia pareada entre los grupos. Finalmente, se aplicó la prueba de Mann-Kendall para comprobar si existe una tendencia, ya sea positiva o negativa, en la serie de NDVI analizada. Los resultados demostraron que existe variación en el tiempo en el NDVI de ambas series. También se encontró que los valores de NDVI son estadísticamente diferentes al comparar el período antes y después de la implementación de PRADA. La serie Landsat 5/8 mostró una tendencia positiva en los valores de NDVI, mostrando un aumento en la biomasa vegetal en el área de recuperación.

Palabras clave: Teledetección. Kruskal-Wallis. Mann-Kendall. NDVI. PRADA.



1 INTRODUÇÃO

A recuperação de áreas degradadas e alteradas é um processo complexo que demanda tempo, recursos financeiros, recursos humanos e recursos tecnológicos, bem como o conhecimento dos diversos fatores relacionados à área afetada, como as características do solo, da água, da fauna, da flora e dos distúrbios incidentes. O Projeto de Recuperação de Áreas Degradadas e Alteradas (PRADA) tem como objetivo principal criar um roteiro sistemático contendo as informações e especificações técnicas organizadas em etapas lógicas para orientar as ações de recuperação de uma determinada área degradada ou alterada (ALMEIDA, 2016).

O processo de recuperação em áreas alteradas é viabilizado quando as áreas possuem potencial de regeneração natural, entretanto, se há a perda do potencial de regeneração natural, considera-se áreas degradadas e torna-se necessário reintroduzir espécies nativas combinadas com outras ações de restauração (SANTOS et al., 2017). Importante destacar ainda que o processo de recuperação busca que uma determinada área retorne ao equilíbrio ambiental permitindo um uso futuro, enquanto que a restauração de uma área busca o retorno ao seu estado primitivo antes das intervenções (SILVA, 2020).

Devido a capacidade inerentemente espacial e repetibilidade o sensoriamento remoto oferece um meio de monitorar as ações de recuperação de áreas degradadas, como por exemplo, a regeneração natural (BUMA, 2012). Assim, a dinâmica da vegetação em áreas em processo de regeneração natural pode ser avaliada usando dados derivados do sensoriamento remoto como índices de vegetação, que permitem analisar as mudanças na estrutura da vegetação e seu desenvolvimento (SANTOS et al., 2017). Essa avaliação envolve a análise espaço-temporal da área em recuperação, estando relacionada aos estágios sucessionais, que refletem a estrutura e evolução dos diversos grupos de plantas presentes (BERVEGLIERI et al., 2021).

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) tem sido amplamente utilizado em estudos ambientais como indicador da saúde e característica biofísica de plantas. É a medida de detecção remota da vegetação mais comum e está relacionado às propriedades estruturais das plantas como índice de área foliar, biomassa verde e às propriedades de produtividade da vegetação (FORKEL et al., 2013; POMPA-GARCÍA et al., 2022).

A aplicação do NDVI em estudos da cobertura vegetal foi proposto inicialmente por Rouse et al., (1974), utilizando dados sensor MSS do Satélite ERTS-1 (Landsat 1) como um método para a medição quantitativa das condições de vegetação em regiões das Grandes Planícies dos Estados Unidos. O NDVI é definido como a razão entre a diferença da banda do Infravermelho próximo (NIR) e a banda vermelho (RED) pela soma banda do Infravermelho próximo (NIR) e a banda vermelho (RED): $NDVI = (NIR-RED)/(NIR+RED)$. Seu valor numérico varia de +1, quando possui biomassa vegetal, e até -1 quando não possui biomassa vegetal ou fotossinteticamente ativa.

A detecção de tendências e sazonalidade em séries temporais de NDVI pode ajudar a identificar



e quantificar mudanças nas propriedades do ecossistema, desde uma escala local até global e tem sido amplamente utilizado como um indicador da degradação da vegetação e regeneração (FORKEL et al., 2013; VALLE JÚNIOR et al., 2019). O NDVI tem sido amplamente utilizado em estudos de vegetação devido a sua simplicidade conceitual, acessibilidade para usuários não técnicos e facilidade de generalização para outros estudos (BUMA, 2012).

Alguns estudos têm aplicado o NDVI no monitoramento de áreas em processo de recuperação. No entanto, Senf, Muller e Seidl (2019) pontuam que a análise da recuperação em áreas que sofreram processo de degradação ainda tem recebido menos atenção dos pesquisadores. Távora, Egert e Beltrão (2011) utilizaram o NDVI para o acompanhamento da recuperação de áreas degradadas em uma área objeto de atuação do Ministério Público do Distrito Federal e Território, concluindo que houve aumento da biomassa vegetal no período analisado, porém ainda não encontra-se com valores semelhantes às áreas conservadas do entorno. No estudo conduzido por Pompa-Garcia et al., (2022) os autores utilizaram o teste paramétrico de Kruskal-Wallis para avaliar por meio do NDVI a recuperação de uma área incendiada, comparando-se a situação anterior e posterior ao processo de incêndio florestal.

O Parque Ambiental Água Limpa, localizado em Campo Grande/MS, é um exemplo bem sucedido de implantação de medidas de recuperação através de PRADA. Após a execução do projeto observou-se um aumento significativo da biomassa vegetal no local. Destaca-se a relevância do PRADA em ambientes afetados por atividades antrópicas, especialmente aquelas relacionadas aos recursos hídricos. A implementação de projetos destinados a mitigar os impactos ambientais não apenas aprimora o ambiente, mas também assegura a diversidade de espécies na fauna e flora (PARK EMPREENDIMENTOS IMOBILIÁRIOS LTDA, 2016).

O objetivo deste trabalho é realizar a análise estatística de duas séries de dados dos Satélites TERRA-ASTER e Landsat por meio do teste não-paramétrico Kruskal-Wallis a fim de verificar se existe variação anual do NDVI, se houve variação entre a situação anterior e posterior à implantação do PRADA na área do Parque Ambiental Água Limpa localizado em Campo Grande/MS. Após o teste de Kruskal-Wallis foi aplicado o teste de comparação múltipla Dunn-Bonferroni a fim de verificar os pares de amostras que possuem diferença significativa. Por fim, foi realizado o teste de Tendência Mann-Kendall a fim de verificar se existe tendência significativa nas duas séries de NDVI, bem como verificar a tendência do NDVI considerando o período de implantação do PRADA.

2 METODOLOGIA

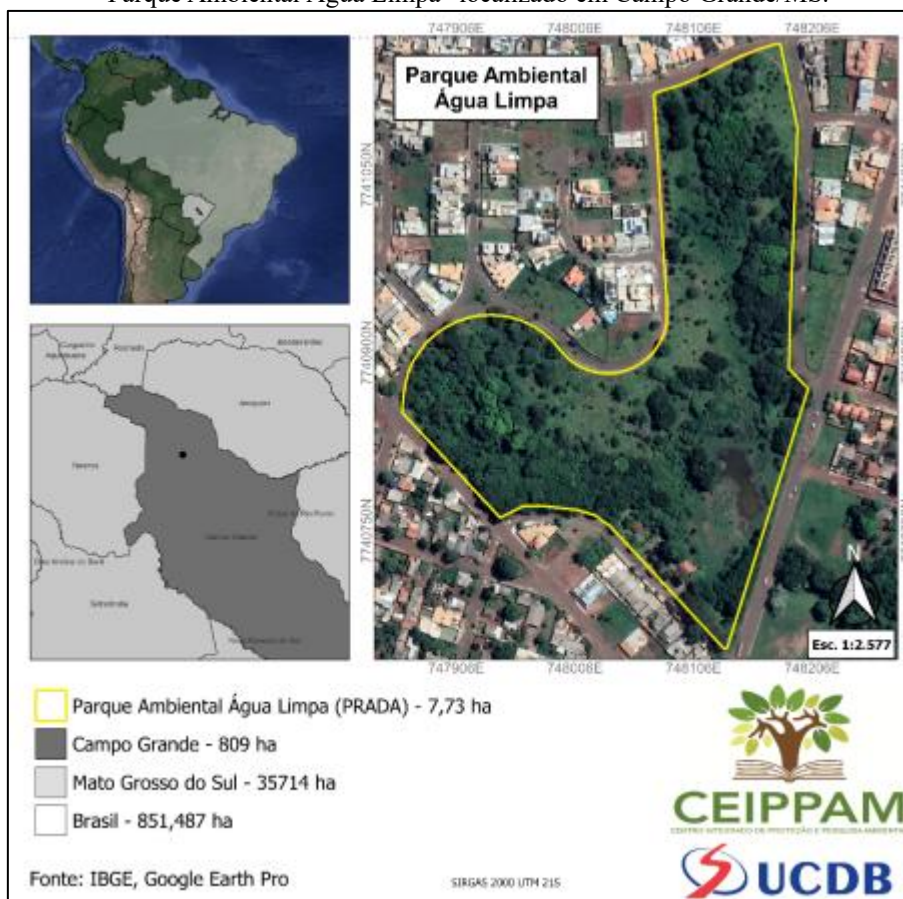
2.1 ÁREA DE ESTUDO

O “Parque Ambiental Água Limpa”, com área total de 7,73 hectares, encontra-se inserido no perímetro urbano do município de Campo Grande/MS na Avenida Tamandaré. O local



formado por solos hidromórficos, que possibilita a exsudação do lençol freático resultando em nascentes difusas e uma lagoa de acumulação, bordeada por vegetação característica de Vereda como a palmeira *Mauritia flexuosa* (buriti). De acordo com o Código Florestal o local é considerado uma Área de Preservação Permanente (APP), pois forma as nascentes do Córrego Seminário, portanto deve ser mantido isolado e sua vegetação conservada (Figura 1).

Figura 1. Mapa com imagem de alta resolução espacial do Google Earth Pro representando o local de estudo denominado “Parque Ambiental Água Limpa” localizado em Campo Grande/MS.



Fonte: Elaborada pelos próprios autores, 2025.

A área de estudo foi antigamente impactada pela presença de bovinos, juntamente com a introdução de espécies exóticas, como gramíneas, destinadas à alimentação do gado. Essas ações resultaram na compactação do solo, erosões e a degradação do recurso hídrico presente no local. Entretanto, como medida mitigadora para a implantação do residencial Água Limpa Park a construtora responsável pelo empreendimento deu início no ano de 2006 ao Projeto de Recuperação de Áreas Degradadas e Alteradas (PRADA) visando a recuperação da cobertura vegetal, além da contenção dos processos erosivos (PARK EMPREENDIMENTOS IMOBILIÁRIOS LTDA, 2016).

Quanto ao reflorestamento do local a metodologia adotada no PRADA consistiu no levantamento dos indivíduos arbóreos remanescentes, e para a implementação da mata ciliar, bosques utilizou-se o plantio de 750 mudas nativas entre pioneiras, oportunistas e espécies clímax. Em relação



à contenção dos processos erosivos foram selecionadas plantas adaptadas a solos erodidos e de crescimento rápido, a fim de mitigar os processos erosivos, proporcionando cobertura vegetal, além do rápido desenvolvimento radicular das espécies (PARK EMPREENDIMENTOS IMOBILIÁRIOS LTDA, 2016).

O PRADA foi finalizado no ano de 2011 e o monitoramento ambiental da área ocorreu até o ano de 2016, totalizando 10 anos de cronograma (PARK EMPREENDIMENTOS IMOBILIÁRIOS LTDA, 2016). Atualmente (Figura 2) a área tem sido monitorada pelo Projeto “Águas para o Futuro” do Ministério Público do Estado de Mato Grosso do Sul (MPMS) que realiza o monitoramento das áreas de nascentes de Campo Grande/MS, sendo o local identificado no projeto como “Nascente Córrego Seminário N° 3” (MPMS, 2019).

Figura 2. Documentação fotográfica da região de estudo "Parque Ambiental Água Limpa" antes e após a implementação do PRADA. Na imagem (A) datada de 2006 Mostra a área antes das ações de recuperação iniciaram-se, é evidente a pouca cobertura vegetal. A imagem (B) de 2021 revela um notável aumento na biomassa vegetal. A imagem (C) mostra situação atual em 2023 visão a partir da avenida Tamandaré e a visão (D) mostras a área a partir da Rua Marli em 2023 ao fundo da área.



Fonte: (A) Mario Testa administrador do Parque Ambiental Água Limpa. (B,C,D) Autores, 2025.

2.2 IMAGENS DE SATÉLITE

Foram utilizadas duas séries de imagens de satélite, uma do satélite TERRA ASTER e outra com a combinação dos satélites Landsat 5 e Landsat 8 conforme dados resumidos na Tabela 1. As imagens foram obtidas e processadas a partir da Plataforma Google Earth Engine (GEE). Para a análise



do processo de recuperação da área de estudo foi utilizado o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) a fim de verificar a evolução da cobertura vegetal da área.

Tabela 1. Informações das imagens de satélite utilizadas para as séries temporais. Onde Red = Banda faixa Vermelho. NIR = Banda faixa do Infravermelho próximo

Satélite	Bandas	Resolução espacial	Resolução radiométrica	Resolução temporal	NDVI
TERRA-ASTER	-B02: (Red) -B3N: (NIR)	15 m	8 bits	16 dias	$\frac{B3N - B02}{B3N + B02}$
Landsat 5	-SR_B3: (Red) -SR_B4: (NIR)	30 m	8 bits	16 dias	$\frac{SR_B4 - SR_B3}{SR_B4 + SR_B3}$
Landsat 8	-SR_B4: (Red) -SR_B5: (NIR)	30 m	16 bits	16 dias	$\frac{SR_B5 - SR_B4}{SR_B5 + SR_B4}$

Fonte: Adaptado de Rouse et al., (1974) e Gorelick et al., (2017).

Utilizando o GEE foram gerados três conjuntos de séries temporais de imagens de satélite entre os anos de 1999 a 2023 para cada satélite utilizado, considerando-se o período de operação e disponibilidade de imagens para o local. As imagens foram filtradas considerando-se o nível de cobertura de nuvens para a área de estudo. Os dados do Landsat 5 e Landsat 8 disponíveis no GEE já possuem correção para reflectância de superfície, enquanto que as imagens do satélite TERRA ASTER não estão disponíveis com correção atmosférica (GORELICK et al., 2017).

O cálculo do NDVI foi realizado no GEE para cada imagem presente nas duas séries temporais dos satélites selecionados por meio da função *map()*, utilizando as bandas do Vermelho (RED) e Infravermelho próximo (NIR) conforme a Tabela 1. Em seguida os valores dos índices espectrais foram obtidos usando uma função de redução para a área de estudo por meio do comando *ee.Reducer.frequencyHistogram()*, onde este comando realiza a contagem do valor de cada pixel da imagem para cada data encontrada pelo GEE. Por fim, os dados são exportados em formato tabular CSV por meio do comando *flatten()*.

Os dados de NDVI dos satélites TERRA ASTER, Landsat 5 e Landsat 8 foram exportados e analisados usando a linguagem R por meio do ambiente RStudio para analisar e processar estatisticamente os dados. Foi realizado o tratamento dos dados que foram exportados em uma estrutura de dicionários. Além disso, foram removidos os valores de NDVI que ocupam uma fração menor que 70% da área do pixel, geralmente posicionadas nas bordas da área de estudo. Os dados de satélite Landsat 5 e Landsat 8 foram unidos em um único conjunto de dados a fim de formar uma única série contínua entre 1999 e 2023 com resolução espacial de 30 metros.

2.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Foi realizada uma análise estatística multitemporal com os valores obtidos de NDVI. Inicialmente foi realizado o teste de normalidade de Anderson-Darling, devido à grande quantidade de amostras (SCHOLZ; STEPHENS, 1987). Após a análise de normalidade foi selecionado o teste

estatístico de Kruskal-Wallis, que é um teste não paramétrico utilizado na comparação de três ou mais amostras independentes que indicará se há diferença entre pelo menos duas delas (KRUSKAL; WALLIS, 1952). Em seguida foi realizado teste *post-Hoc* de Dunn-Bonferroni para identificar quais subconjuntos de dados são estatisticamente diferentes uns dos outros (p -valor $<0,05$) (ELLIOTT; HYNAN, 2011).

Assim foi realizado o Teste de Kruskal-Wallis para verificar se existe diferença estatística entre as amostras de NDVI (p -valor $<0,05$):

- i) dos valores de NDVI entre os anos do período estudo;
- ii) se há diferença entre as médias de NDVI do período chuvoso (outubro a abril) e seco (maio a setembro);
- iii) se há diferença estatística entre o período anterior e posterior à implantação do PRADA;

Por fim, foi aplicado o Teste de Tendência de Mann-Kendall, cujo objetivo principal é verificar se há uma tendência estatisticamente significativa nos dados, se crescente ou decrescente (MOHR et al., 2023; YANG et al., 2019). O teste foi aplicado nas duas séries temporais do TERRA-ASTER e Landsat 5/8 a fim de verificar se houve aumento do NDVI ao longo período analisado (1999-2023) e também verificar a tendência do NDVI após a implantação do PRADA, para ambos os testes foi considerando um nível de significância de 5% e intervalo de confiança de 95%.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O teste de normalidade Anderson-Darling demonstrou que os dados da série temporal dos dados de NDVI não seguem uma distribuição normal, tanto do satélite TERRA-ASTER ($A = 53,828$; p -valor $< 2,2 \cdot e^{-16}$) quanto do satélite Landsat 5/8 ($A = 126,74$; p -valor $< 2,2 \cdot e^{-16}$), considerando-se um nível de significância de 5% e intervalo de confiança de 95%. De modo geral os dados NDVI de cobertura do solo podem não seguir uma distribuição normal sendo variável de local para local (MOHR et al., 2023; MONTANDON; SMALL, 2008).

Os valores de NDVI encontrados para as duas séries de dados se diferem entre os satélites utilizados (Figura 3) devido às diferentes características dos sensores: i) resolução espacial, pois as imagens de o TERRA-ASTER possuem 15 metros de resolução espacial enquanto as imagens do Landsat 5/8 possuem resolução espacial de 30 metros; ii) resolução radiométrica, as imagens do TERRA ASTER possuem resolução radiométrica de 8 bits enquanto que a resolução radiométrica do Landsat 5 é 8 bits e Landsat 8 é 16 bits.

Observou-se que os resultados mostrados na Figura 2 da série Landsat 5/8 apresentaram um padrão nos valores do NDVI entre os anos de 1999 a 2011 referente ao satélite Landsat 5 e outro padrão de 2013 a 2023 referente ao satélite Landsat 8. Observou-se que independente do período, seco ou

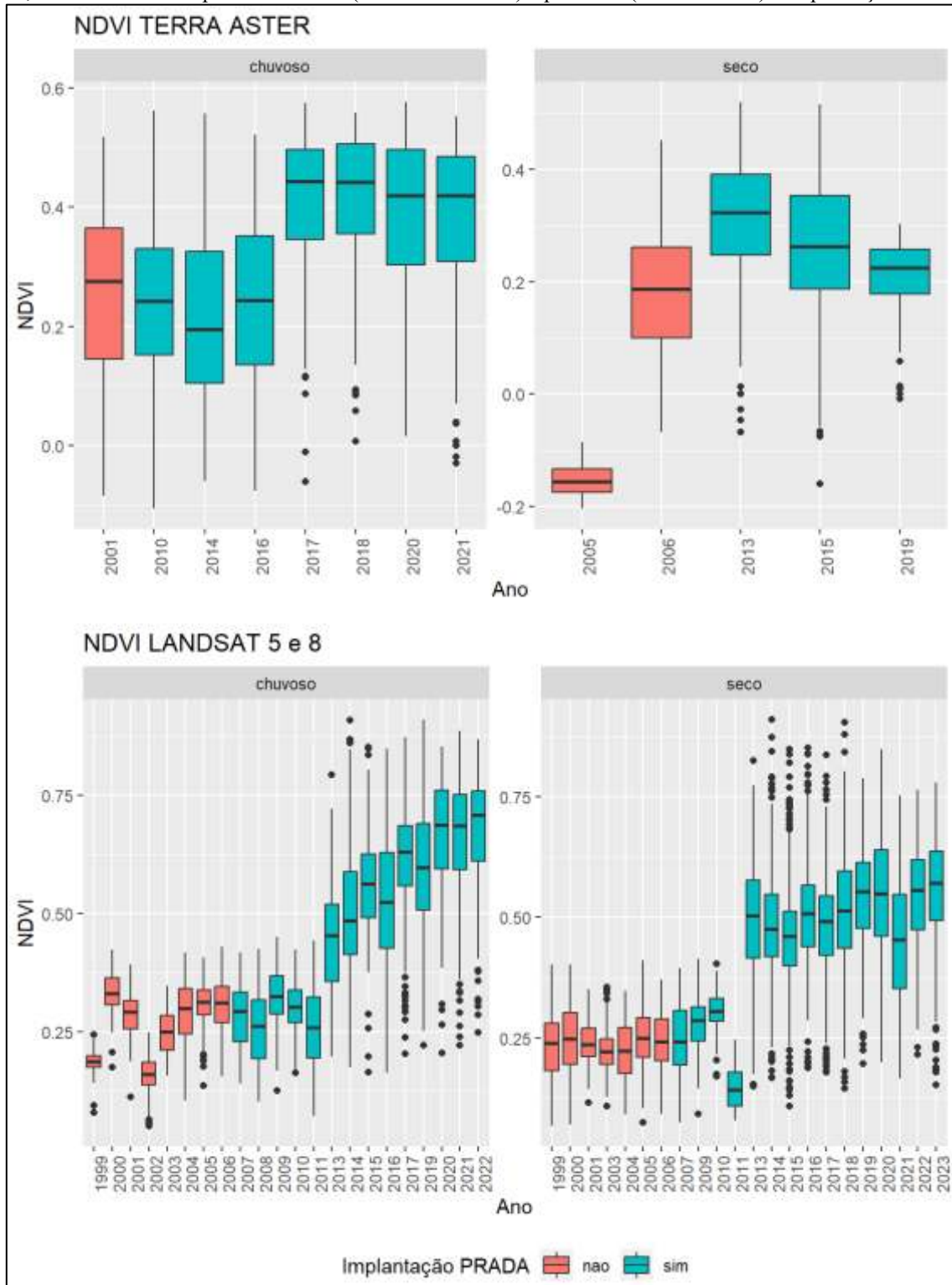


chuvoso, os dados de 1999 a 2011 são proporcionalmente menores, em termos de escala, em relação ao restante do período de 2013 a 2023 referente ao Landsat 8. Esse comportamento pode ser explicado pela diferença de resolução radiométrica entre os satélites. Os dados do satélite Landsat 5 foram obtidos com resolução radiométrica de 8 bits equivalente a 256 níveis de brilho ($2^8=256$), enquanto que o satélite Landsat 8 possui resolução radiométrica de 16 bits o que equivale 65.536 níveis de brilho ($2^{16}=65.536$) o que permite que o sensor do Landsat 8 capture mais detalhes no terreno, com a mesma resolução espacial (30 metros). Esse efeito já foi relatado por outros autores que adicionalmente pontuam as diferenças no comprimento da faixa do infravermelho próximo entre os diferentes sensores Landsat, obtendo-se valores de NDVI maiores para o Landsat 8 (MANCINO et al., 2020; ROY et al., 2016).

Analisando-se os gráficos de Boxplot da Figura 3 contendo as medianas da época chuvosa e seca de cada satélite observa-se que o NDVI é afetado pela disponibilidade hídrica. Para o satélite TERRA ASTER o NDVI nos períodos secos reduz suas medianas variando entre 0 e +0,3, enquanto que no período mais chuvoso as medianas aumentam para a faixa de +0,2 a +0,5. Por outro lado, a série temporal do NDVI do satélite Landsat tem medianas maiores que o TERRA ASTER, seja nos períodos mais secos ou chuvosos. As medianas da série do Landsat variam de +0,30 a +0,70 no período chuvoso e no período seco essa variação foi de +0,25 a +0,60.



Figura 3. Gráfico boxplot contendo as medianas do NDVI para série TERRA ASTER e Landsat 5/8 para o período seco e chuvoso, bem como mostra período anterior (candles vermelho) e posterior (candles verde) à implantação do PRADA.



Fonte: Autores, 2025.

Foram realizados três testes Kruskal-Wallis considerando-se os dados anuais NDVI como variável dependente em relação às variáveis independentes “Ano”, “Época” (seco ou chuvoso) e “Período” (antes e depois do PRADA). Os resultados da Tabela 2 demonstram que existe diferença estatística entre os valores anuais de NDVI com p-valor <0,05, admitindo-se a hipótese alternativa,



demonstrando que há uma variação significativa do NDVI entre os anos da série histórica, seja ela positiva ou negativa.

Nessa mesma linha quando se compara os valores do NDVI antes e após a implantação do PRADA observa-se que também há uma diferença significativa nas duas séries de dados TERRA-ASTER ($p\text{-valor}=1,84 \cdot e^{-49}$) e Landsat 5/8 ($p\text{-valor} \cong 0$), confirmando-se a hipótese de que o NDVI foi afetado pelas ações do PRADA.

Tabela 2. Resultados do teste Kruskal-Wallis comparando-se as séries TERRA ASTER e Landsat 5/8.

Variável Dependente	Variável Independente	Satélite	Qui quadrado	Grau de liberdade	p-valor
NDVI	Ano	ASTER	1313,015	12	$7,81 \cdot e^{-274^*}$
NDVI	Ano	Landsat	7004,381	23	$\cong 0^*$
NDVI	Época	ASTER	146,2682	1	$1,13 \cdot e^{-33^*}$
NDVI	Época	Landsat	23,01943	1	$1,6 \cdot e^{-06^*}$
NDVI	Período	ASTER	218,5857	1	$1,84 \cdot e^{-49^*}$
NDVI	Período	Landsat	3735,63	1	$\cong 0^*$

Fonte: Autores, 2025. * Existe diferença estatisticamente significativa ($p\text{-valor}<0,05$).

No estudo conduzido por Pompa-Garcia et al., (2022) os autores encontraram uma significativa variação do NDVI em uma área que foi anteriormente afetada por incêndio florestal e posteriormente que foi mantida em processo de regeneração natural. Os autores aplicaram o teste de Kruskal-Wallis obtendo uma diferença significativa ($p\text{-valor}=2,2 \cdot 10^{-16}$) entre o período pré-incêndio e a regeneração pós-incêndio, confirmando-se a variação do NDVI. Semelhantemente Aljahdali, Munawar e Khan (2021) por meio da análise do NDVI compararam o comportamento da recuperação de uma área manguezal que foi degradada. Os autores verificaram por meio do teste de Kruskal-Wallis que existem diferenças significativas nos valores medianos do período de perturbação em relação ao período de recuperação com $p\text{-valor}=0,0006918$.

Os testes de post-hoc de Dunn-Bonferroni demonstraram que existe diferença significativa entre a maioria dos pares anuais comparados (Tabela 3). Para a série TERRA-ASTER foram realizadas 78 comparações ano a ano sendo 75,64% formados pares significativamente diferentes e o restante 24,36% por pares não são significativos, enquanto que para a série Landsat 5/8 foram realizadas 256 análises pareadas, sendo 70,65% de pares estatisticamente diferentes e 29,35% por pares sem diferença estatística. Analisando-se comparativamente os anos iniciais e finais de cada série observa-se que há diferença significativa para o TERRA-ASTER (2001-2021, $p\text{-valor ajustado}=1,05 \cdot e^{-15}$) também para a série Landsat 5/8 (1999-2023, $p\text{-valor ajustado}=1,8 \cdot e^{-196}$). Considerando-se o período antes e posterior ao PRADA de cada série também observa-se valores significativos para TERRA-ASTER (2010-2021, $p\text{-valor ajustado}=8,65 \cdot e^{-40}$) e Landsat 5/8 (2007-2023, $p\text{-valor ajustado}=3,4 \cdot e^{-125}$).



Tabela 3. Resultados dos testes Dunn-Bonferroni para as séries TERRA ASTER e Landsat 5/8. A coluna “Período PRADA” indica se o par comparado é anterior, posterior ou entre o período de implantação PRADA em 2006. Onde: p =p-valor Dunn; $p.adj$ =p-valor ajustado Bonferroni.

Série	Período PRADA	Grupo1	Grupo2	n1	n2	Estatística	P	p.adj
Landsat	Antes do PRADA	1999	2006	414	497	4,706211	$2,52 \cdot e^{-06}$	0,000697*
Landsat	Entre período	1999	2023	414	518	30,09	$6,5 \cdot e^{-199}$	$1,8 \cdot e^{-196}$ *
Landsat	Depois do PRADA	2007	2023	344	518	24,03365	$1,2 \cdot e^{-127}$	$3,4 \cdot e^{-125}$ *
ASTER	Antes do PRADA	2001	2006	275	254	-5,83412	$5,41 \cdot e^{-09}$	$4,22 \cdot e^{-07}$ *
ASTER	Entre período	2001	2021	275	254	9,304709	$1,34 \cdot e^{-20}$	$1,05 \cdot e^{-18}$ *
ASTER	Depois do PRADA	2010	2021	1152	254	13,52526	$1,11 \cdot e^{-41}$	$8,65 \cdot e^{-40}$ *

Fonte: Autores (2025). * P-valor estatisticamente significativo (p-valor 0,05).

O teste de Tendência de Mann-Kendall foi aplicado desconsiderando-se o efeito da sazonalidade dos valores NDVI na época seca e chuvosa, conforme os testes de Kruskal-Wallis da Tabela 4. Foi calculada a média anual do NDVI para toda a série temporal do satélite TERRA-ASTER que apresentou tendência positiva média, porém não significativa ($\tau=0,410$, p -valor= $0,058$). A série temporal completa do Landsat 5/8 apresentou tendência positiva elevada e significativa ($\tau=0,804$, p -valor= $4,211 \cdot e^{-8}$).

O coeficiente tau do Landsat 5/8 é o dobro do que foi observado pela TERRA-ASTER, esse resultado pode estar relacionado à diferença de valores de NDVI observado entre os satélites Landsat 5 e Landsat 8 como observada na Figura 3. A análise de Mann-Kendall para as duas séries de NDVI demonstrou que na área de estudo houve ao longo do tempo um aumento na biomassa vegetal, como observado na análise multitemporal das imagens de satélite da Figura 3, ficando nítida a revegetação do local conforme o último Relatório de Monitoramento de 2016 (PARK EMPREENDIMENTOS IMOBILIÁRIOS LTDA, 2016).

A análise Mann-Kendall considerando o período anterior e posterior à implantação do PRADA (após 2006) pode ser observada na Tabela 4. Os dados da série TERRA-ASTER não foram considerados significativos, seja para o período anterior e posterior ao PRADA, confirmando-se a hipótese nula (H_0) de que não há tendência para os dados, sendo os valores do coeficiente tau próximo de zero. Esse fato pode estar relacionado à escassez de imagens TERRA-ASTER o que ocasionou uma baixa variância dos dados, gerando poucas amostras, muitas vezes concentradas em períodos específicos.

Tabela 4. Resultados do Teste Mann-Kendall para as séries TERRA ASTER e Landsat 5/8. A coluna NDVI médio “Anual” considera o período 1999-2023, “Antes do PRADA” considera o período 1999-2006, “Após o PRADA” considera o período 2007-2023. Fonte: Carvalho et al. (2025). Onde: τ =coeficiente tau Mann-Kendall.

NDVI médio	Satélite	tau	Variância	p-valor
Anual	ASTER	+0,385	268,667	0,0768

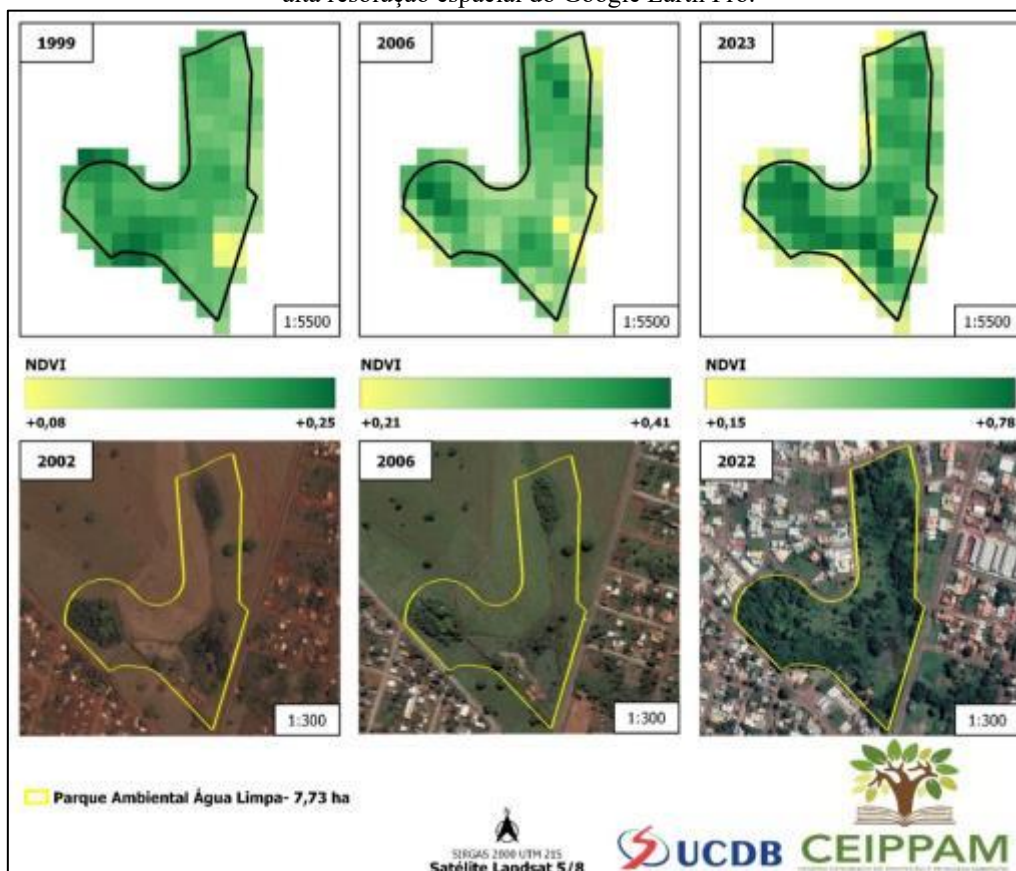


Anual	Landsat	+0,768	1625,33	$1,661 \cdot e^{-7*}$
Antes PRADA	ASTER	0	8,667	1,0
Antes PRADA	Landsat	0,515	212,667	0,02364*
Após PRADA	ASTER	+0,167	92,0	0,602
Após PRADA	Landsat	+0,789	212,667	0,0004702*

Fonte: Autores, 2025. *Existe tendência estatisticamente significativa (p-valor<0,05).

A Figura 4 demonstra a evolução do NDVI para a área de estudo considerando-se a série Landsat 5/8, observa-se que no ano de 2006, quando iniciaram-se as ações de recuperação do PRADA o NDVI máximo era +0,41 saltando-se para +0,78 em 2023 confirmando-se a tendência observar pelo teste de Mann-Kendall.

Figura 1. Mapa contendo a evolução do NDVI para a área de estudo entre 1999 e 2023 comparando-se com imagem de alta resolução espacial do Google Earth Pro.



Fonte: Autores, 2025.

4 CONCLUSÃO

O estudo demonstrou a viabilidade do uso de séries temporais de NDVI para analisar os resultados de um projeto de recuperação de área degradada (PRADA). As séries temporais dos satélites TERRA-ASTER e Landsat 5/8 apresentaram vantagens e desvantagens. O número reduzido de imagens para a área de estudo com grandes períodos não imagedos é uma das principais desvantagens do TERRA-ASTER, no entanto, este satélite possui como principais vantagens a resolução espacial de 15 metros e a coleta sistemática de imagens com mesma resolução espacial e radiométrica desde o ano



de 1999 até o presente momento. Diferentemente, a série Landsat 5/8 possui uma descontinuidade de dados entre os anos de 2011 e 2013, com diferentes resoluções radiométricas para o período, influenciando os resultados de NDVI. A principal vantagem identificada para o uso imagens Landsat é a disponibilidade de grandes conjuntos de imagens contínuas anuais. O uso da série Landsat é ideal para períodos que contemplem um único sensor, ou seja, antes de 2011 ou após 2013. O teste de Kruskal-Wallis demonstrou que existe diferença significativa entre os valores anuais de NDVI, indicando que existe uma variação NDVI ao longo do tempo na área em recuperação. O teste de Dunn-Bonferroni demonstrou que 75,64% e 70,65% dos grupos das séries TERRA ASTER e Landsat 5/8, respectivamente, são significativamente diferentes. Além disso, considerando-se os valores de NDVI entre o período anterior e posterior à implantação do PRADA confirmou-se por meio do teste Kruskal-Wallis que há diferença significativa entre os períodos, confirmando-se a influência das ações de recuperação na estrutura de biomassa vegetal do local. O Teste de Mann-Kendall para série Landsat 5/8 demonstrou que as ações de recuperação aumentaram os valores de respostas de NDVI ($\tau=+0,789$, $p\text{-valor}=0,0004702$), porém para a série TERRA-ASTER não foi observada tendência nos dados NDVI após a implantação do PRADA ($\tau=+0,167$, $p\text{-valor}=0,602$). Por fim, o estudo, por meio de imagens de satélite, vai ao encontro dos resultados observados em campo e pelo relatório de monitoramento apresentada pelo gestor da área, confirmando o processo de recuperação da área, com significativo ganho de biomassa vegetal. Recomenda-se a continuidade dos estudos por meio de outros índices espectrais, além da aplicação de outros sensores a fim de complementar o estudo e as evidências observadas em campo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem pelo apoio e financiamento deste estudo ao Ministério Público do Estado de Mato Grosso do Sul, via projeto CEIPPAM/UCDB e à Fundação de Apoio ao Desenvolvimento do Ensino, Ciência e Tecnologia do Estado de Mato Grosso do Sul (FUNDECT). Os autores agradecem ainda ao Gestor do Parque Ambiental Água Limpa Mário Domingos Testa pela disponibilização de dados e acesso ao local.



REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, D. S. D. Recuperação ambiental da Mata Atlântica. 3. ed. [s.l.] EDITUS, 2016.
- BERVEGLIERI, A. et al. Analysis of trends and changes in the successional trajectories of tropical forest using the Landsat NDVI time series. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, v. 24, p. 100622, 1 nov. 2021.
- BUMA, B. Evaluating the utility and seasonality of NDVI values for assessing post-disturbance recovery in a subalpine forest. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 184, n. 6, p. 3849–3860, 1 jun. 2012.
- ELLIOTT, A. C.; HYNAN, L. S. A SAS® macro implementation of a multiple comparison post hoc test for a Kruskal–Wallis analysis. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, v. 102, n. 1, p. 75–80, 1 abr. 2011.
- FORKEL, M. et al. Trend Change Detection in NDVI Time Series: Effects of Inter-Annual Variability and Methodology. *Remote Sensing*, v. 5, n. 5, p. 2113–2144, maio 2013.
- GORELICK, N. et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment, Big Remotely Sensed Data: tools, applications and experiences*. v. 202, p. 18–27, 1 dez. 2017.
- KRUSKAL, W. H.; WALLIS, W. A. Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis. *Journal of the American Statistical Association*, v. 47, n. 260, p. 583–621, 1 dez. 1952.
- MANCINO, G. et al. Cross-Comparison between Landsat 8 (OLI) and Landsat 7 (ETM+) Derived Vegetation Indices in a Mediterranean Environment. *Remote Sensing*, v. 12, n. 2, p. 291, jan. 2020.
- MOHR, J. et al. Assessing the Within-Field Heterogeneity Using Rapid-Eye NDVI Time Series Data. *Agriculture*, v. 13, n. 5, p. 1029, maio 2023.
- MONTANDON, L. M.; SMALL, E. E. The impact of soil reflectance on the quantification of the green vegetation fraction from NDVI. *Remote Sensing of Environment, Remote Sensing Data Assimilation Special Issue*. v. 112, n. 4, p. 1835–1845, 15 abr. 2008.
- MPMS. MPMS e UEMS dão início a parceria que visa proteger os rios do Estado. Disponível em: <<https://www.mpms.mp.br/noticias/2019/05/mpms-e-uems-dao-inicio-a-parceria-que-visa-proteger-os-rios-do-estado>>. Acesso em: 22 dez. 2023.
- PARK EMPREENDIMENTOS IMOBILIÁRIOS LTDA. PARQUE AMBIENTAL ÁGUA LIMPA: Programa de Recuperação de Áreas Degradadas. , 2016.
- POMPA-GARCÍA, M. et al. NDVI Values Suggest Immediate Responses to Fire in an Uneven-Aged Mixed Forest Stand. *Forests*, v. 13, n. 11, p. 1901, nov. 2022.
- ROUSE, J. W. et al. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. 1 jan. 1974. Disponível em: <<https://ntrs.nasa.gov/citations/19740022614>>. Acesso em: 19 nov. 2023
- ROY, D. P. et al. Characterization of Landsat-7 to Landsat-8 reflective wavelength and normalized difference vegetation index continuity. *Remote Sensing of Environment, Landsat 8 Science Results*. v. 185, p. 57–70, 1 nov. 2016.



SANTOS, G. L. DOS et al. Natural regeneration in anthropogenic environments due to agricultural use in the cerrado, Uberaba, MG, Brazil. *Bioscience Journal*, v. 33, n. 1, p. 169–176, 9 fev. 2017.

SCHOLZ, F. W.; STEPHENS, M. A. K-Sample Anderson–Darling Tests. *Journal of the American Statistical Association*, v. 82, n. 399, p. 918–924, 1 set. 1987.

SENF, C.; MÜLLER, J.; SEIDL, R. Post-disturbance recovery of forest cover and tree height differ with management in Central Europe. *Landscape Ecology*, v. 34, n. 12, p. 2837–2850, 1 dez. 2019.

SILVA, L. A. Uma revisão de literatura sobre o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) no monitoramento de áreas degradadas por empreendimentos minerários. *Holos Environment*, v. 20, n. 2, p. 198–213, 14 mar. 2020.

TÁVORA, B. E.; EGERT, R.; BELTRÃO, L. Aplicação do Índice de Vegetação por Diferenças Normalizadas na avaliação da recuperação de danos em áreas degradadas. *Boletim Científico Escola Superior do Ministério Público da União*, n. 35, p. 85–95, 30 dez. 2011.

VALLE JÚNIOR, R. F. DO et al. Diagnosis of degraded pastures using an improved NDVI-based remote sensing approach: An application to the Environmental Protection Area of Uberaba River Basin (Minas Gerais, Brazil). *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, v. 14, p. 20–33, 1 abr. 2019.

YANG, Y. et al. Factors Affecting Long-Term Trends in Global NDVI. *Forests*, v. 10, n. 5, p. 372, maio 2019.

