

ESTIMATIVA DO DÉFICIT DE ÁREA DE FLORESTA PROTETORA EM CURSOS D'ÁGUA USANDO EQUAÇÕES GEOMORFOLOGICAS - ESTUDO DE CASO: UNIDADE HIDROGRÁFICA DO TEBICUARY BACIA ALTA - PARAGUAI (1986-2022)

ESTIMATION OF THE DEFICIT OF PROTECTIVE FORESTS IN WATERCOURSES
USING GEOMORPHOLOGICAL EQUATIONS - CASE STUDY: TEBICUARY
UPPER BASIN HYDROGRAPHIC UNIT - PARAGUAY (1986-2022)

ESTIMACIÓN DEL DÉFICIT DEL ÁREA DE BOSQUES PROTECTORES
EN CAUCES HÍDRICOS MEDIANTE EL USO DE ECUACIONES
GEOMORFOLOGICAS - ESTUDIO DE CASO: UNIDAD HIDROGRÁFICA
TEBICUARY CUENCA ALTA - PARAGUAY (1986-2022)

Nestor Cabral Antúnez¹

0009-0004-5844-3282
ncabral@ing.una.py

Margarita Pereira Pesoa²

0009-0006-7121-5094
mpereira@ing.una.py

Maria Gloria Cabrera³

0009-0006-7121-5094
gloria.cabrera@agr.una.py

Jimmy Walter Rasche Alvarez⁴

0009-0006-7121-5094
jwrasche@yahoo.com.ar

1 Doctorando en Gestión Ambiental en la Universidad Nacional de Itapúa. Docente Investigador en temas de planificación territorial, degradación de suelos y gestión de recursos naturales. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7892-3756>. E-mail: ncabral@ing.una.py.

2 Docente Investigador de FIUNA en temas de Ingeniería y Tecnología, Ingeniería del Medio Ambiente, Sensores Remotos, Geoprocесamiento y sensoramiento remoto aplicado a Recursos hídricos. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3812-053X>. E-mail: mpereira@ing.una.py.

3 Tutora y Docente Investigador de la FCAUNA en temas de Ciencias Agrícolas, Economía agrícola, Sistemas de producción, y Administración rural. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2129-7838>. E-mail: gloria.cabrera@agr.una.py.

4 Co Tutor y Docente Investigador de la FCAUNA en temas de Ciencias Agrícolas, Agricultura, y Ciencias del Suelo. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2517-6868>. E-mail: jwrasche@yahoo.com.ar.

RESUMO: A intensidade da produção agropecuária no Paraguai aumentou a pressão sobre os recursos naturais, em particular sobre os cursos d'água. O desmatamento e a degradação florestal afetam a qualidade da água e aumentam o risco de inundações, destacando a necessidade de recuperar a Floresta Protetora de Cursos d'água (FPCA) para evitar a erosão e a sedimentação. Este estudo aplica uma metodologia baseada em equações geomorfológicas e Sistemas de Informações Geográficas (SIG) para identificar áreas com déficit de FPCA na Unidade Hidrográfica da Bacia do Alto Tebicuary, estimando a largura dos cursos d'água e a floresta protetora necessária. Os resultados indicam que 12,2% da perda total de florestas nessa unidade hidrográfica correspondem a áreas com déficit de FPCA.

Palavras-chave: Largura de cursos d'água. SIG. equações geomorfológicas. Déficit de florestas.

ABSTRACT: The intensity of agricultural production in Paraguay has increased pressure on natural resources, particularly on watercourses. Deforestation and forest degradation affect water quality and increase the risk of flooding, highlighting the need to restore the Watercourse Protection Forest (FPCA) to prevent erosion and sedimentation. This study applies a methodology based on geomorphological equations and Geographic Information Systems (GIS) to identify areas with a deficit of FPCA in the Tebicuary River Hydrographic Unit - Upper Basin, estimating the width of the watercourses and the protective forest required. The results indicate that 12,2% of the total loss of forest in this hydrographic unit corresponds to areas with a deficit in FPCA.

Keywords: Watercourse width. GIS. Geomorphological equations. Forest deficit.

RESUMEN: La intensidad de la producción agropecuaria en Paraguay han incrementado la presión sobre los recursos naturales, en particular sobre los cursos de agua. La deforestación y la degradación forestal afectan la calidad del agua y aumentan el riesgo de inundaciones, lo que destaca la necesidad de recuperar el Bosque Protector de Cauces hídricos (BPCH) para evitar la erosión y la sedimentación. Este estudio aplica una metodología basada en ecuaciones geomorfológicas y Sistemas de Información Geográfica (SIG) para identificar áreas con déficit de BPCH en la Unidad Hidrográfica de la Cuenca Alta del Río Tebicuary, estimando el ancho de los cauces hídricos y el bosque protector necesario. Los resultados indican que el 12,2 % de la pérdida total de bosques en esta unidad hidrográfica corresponde a áreas con déficit de BPCH.

Palabras clave: Ancho de los cursos de agua. SIG. Ecuaciones geomorfológicas. Déficit de bosques.

INTRODUÇÃO

O Paraguai, com uma área de 406.8752 km², possui uma economia fortemente baseada na produção agropecuária, destacando-se pela criação de gado e pela produção global de soja (CAN, 2022). Contudo, esse desenvolvimento produtivo tem gerado impactos ambientais significativos, sobretudo sobre os recursos hídricos (Cálix; Blanco, 2020).

As florestas são fundamentais para a regulação hídrica, a proteção do solo e a manutenção da qualidade da água, atuando também como corredores ecológicos essenciais (FAO, 2009). No contexto nacional, a Estratégia Nacional da Floresta para o Crescimento Sustentável (ENBCS, 2019),

e o programa REDD+ destacam a restauração de florestas protetoras de cursos d'água (FPCA) como medida prioritária para reduzir a erosão e melhorar os serviços hidrológicos (Walcott *et al.*, 2015).

A Lei Florestal do Paraguai nº 422/73 define as florestas protetoras como aquelas destinadas à regulação do regime hídrico e à proteção de solos e ecossistemas. Sua restauração é regulamentada pela Lei nº 4241/10 e pelo Decreto nº 9824/12, que estabelecem parâmetros para a recomposição de matas ciliares com espécies nativas, em consonância com a Lei nº 3239/07 sobre Recursos Hídricos.

O Instituto Florestal Nacional (INFONA) e o Ministério do Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (MADES) são responsáveis pela implementação do Programa Nacional de Restauração de Florestas Protetoras, com apoio dos governos locais. O Sistema Nacional de Monitoramento Florestal (SNMF), instituído pelo Decreto nº 3.246/2020, e o mapeamento de degradação do Sistema de Avaliação de Desempenho e Implementação (PRAIS4, 2022) possibilitam a identificação de áreas prioritárias para restauração.

Para estimar a largura dos cursos d'água e, por conseguinte, das faixas de florestas protetoras, foi utilizado o modelo hidrológico MGB-IPH (Modelo de Grandes Bacias) (Collischonn, 2001; Collischonn *et al.*, 2007; Paiva *et al.*, 2011a). O método utiliza equações geomorfológicas baseadas em dados do Modelo Digital de Elevação SRTM (Farr *et al.*, 2007). Essas equações, validadas por estudos de Mejia e Reed (2011) e por Paiva; Collischonn e Tucci (2011a), permitem representar de forma simplificada a morfologia fluvial e auxiliar na determinação de áreas com déficit de FPCA.

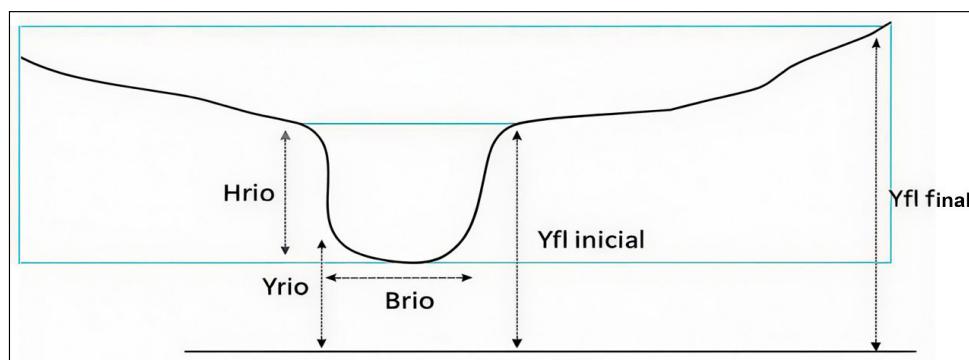
O procedimento para obtenção das relações geomorfológicas consiste em utilizar dados medidos de largura e profundidade do rio em distintos pontos com diferentes valores de área de drenagem (A), como apresentado nas Equações 1 e 2.

$$Hrio_i = a \cdot A_i^b \quad (1)$$

$$Brio_i = c \cdot A_i^d \quad (2)$$

Onde: $Hrio_i$ é a profundidade do curso de água na minibacia i (m); $Brio_i$ é a largura da seção no trecho de rio na minibacia i (m); A_i é a área de drenagem da área incremental da bacia até a minibacia i (m^2); a , b , c , d são parâmetros de ajuste das equações potenciais que relacionam a profundidade e a largura do canal com a área de drenagem.

Na Figura 1 observa-se a simplificação do canal assumido.



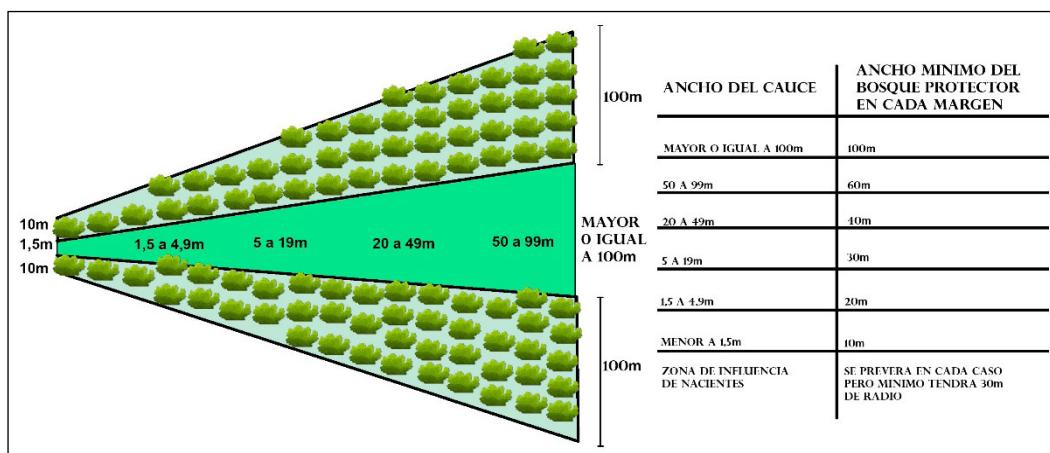
Fonte: Pontes (2016).

Figura 1. Representação do canal do curso hídrico no Modelo de Grandes bacias.

De acordo com Paiva *et al.* (2013), os parâmetros geométricos do rio, como largura B (m) e a profundidade máxima da água H (m), podem ser calculados em função da área de drenagem Ad (km²), por meio de equações geomorfológicas desenvolvidas a partir de análises de seções transversais de rios, obtidas em pontos de medição fornecidos pela Agência Nacional de Recursos Hídricos (ANA) no Brasil. Tais equações, determinadas empiricamente, podem ser utilizadas, com cautela, em territórios com características hidrológicas e morfológicas semelhantes.

A aplicação dessas equações, combinada ao geoprocessamento, possibilita determinar a largura mínima de FPCA e estimar as áreas deficitárias na Unidade Hidrográfica Tebicuary Bacia Alta (UHTBA). À luz do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2019), o gerenciamento sustentável da terra envolve o uso equilibrado dos recursos terrestres para atender às necessidades humanas sem comprometer sua produtividade e funções ambientais. No mesmo sentido, a Neutralidade da Degradação da Terra (LDN), busca equilibrar perdas e ganhos de qualidade do solo por meio de ações de restauração e reabilitação (Sims *et al.*, 2021).

As florestas de proteção devem ser mantidas ou restabelecidas em proporção direta à largura do curso d'água e às particularidades das regiões. No Paraguai, o INFONA estabelece os parâmetros mínimos e máximos para esse fim (Decreto nº 9824/12) conforme ilustrado na Figura 2.



Fonte: Decreto N° 9824/12.

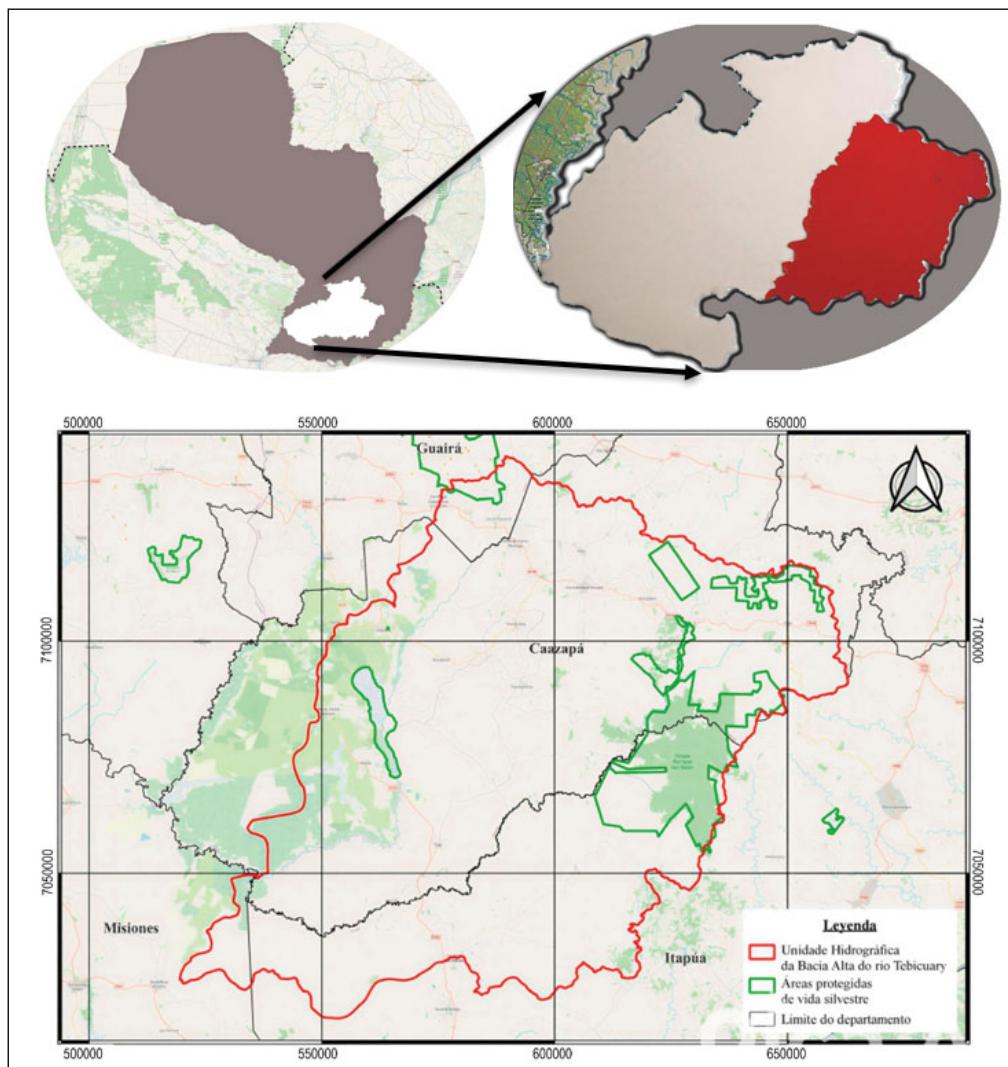
Figura 2. Largura de florestas protetoras para a Região Oriental do Paraguai.

Este estudo propõe uma metodologia para identificar trechos de cursos d'água com déficit de florestas protetoras na UHTBA, combinando técnicas de geoprocessamento e modelagem geomorfológica. Essa abordagem busca apoiar o cumprimento da legislação ambiental e orientar ações estratégicas de restauração florestal voltadas à sustentabilidade hídrica e à mitigação da degradação da terra.

METODOLOGIA

Para testar a equação na estimativa da largura do canal e determinar a largura mínima de florestas necessária, realizou-se um experimento na UHTBA, situada na região Oriental do Paraguai, desde a cabeceira até a confluência com o rio Pirapó, abrangendo uma superfície aproximada de 9.570 km². Utilizou-se a equação desenvolvida por Paiva *et al.* (2013) para determinação da largura do

rio. A Figura 3 apresenta a localização da área de estudo, distribuída em quatro departamentos e três ecorregiões, com dinâmica produtiva baseada tanto na agricultura familiar tradicional ligada a cadeias de produção como à agricultura empresarial.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Figura 3. Localização da bacia do rio Tebicuary no Paraguai e da unidade hidrográfica Tebicuary Cuenca Alta dentro dela.

A coleta de dados secundários abrangeu dados cartográficos oficiais, relatórios nacionais publicados, regulamentos atuais e relatórios técnicos relevantes relacionados a: Banco de dados cartográficos pertencente à Direção Geral de Proteção e Conservação de Recursos Hídricos do MADES em formato vetorial correspondente à localização de cursos d'água, lagos e lagoas em escala nacional e por Unidades Hidrográficas; Mapa de Degradação da Terra (2000 a 2019) baseado em dados globais do FAOWOCAT; Mapa de cobertura florestal correspondente ao ano de 1986 (INFONA); Cobertura de uso da terra segundo imagens Sentinel-2 de 10 m (<https://livingatlas.arcgis.com/landcoverexplorer/#mapCenter=-3.286%2C31.34%2C3&mode=step&timeExtent=2017%2C2021&year=2022&downloadMode=true>) (Karra; Kontgis *et al.*, 2021); Relatório nacional da cobertura florestal e mudanças no uso da terra (<https://nube.infona.gov.py/index.php/s/BPdE3ijGWRnQ2aA>); Informações vetoriais sobre

localidades, limites departamentais e nacionais do Instituto Nacional de Estatística do Paraguai (<https://www.ine.gov.py/microdados/cartografia-digital-2012.php>); Modelo Digital de elevação proveniente do conjunto de dados SRTM 1Arc-Second Global (<https://earthexplorer.usgs.gov/>); manuais técnico da Lei 4241/10 e do Decreto Nº 9824/12; Manual de Restauração Ecológica de Florestas Protetoras de Cursos de agua da Floresta Atlântica do Alto Paraná; Informação referente ao Sistema Nacional de Áreas Protegidas do Paraguai (SINASIP) e disponibilizada no sitio web do MADES (<https://www.mades.gov.py/areas-silvestres/>).

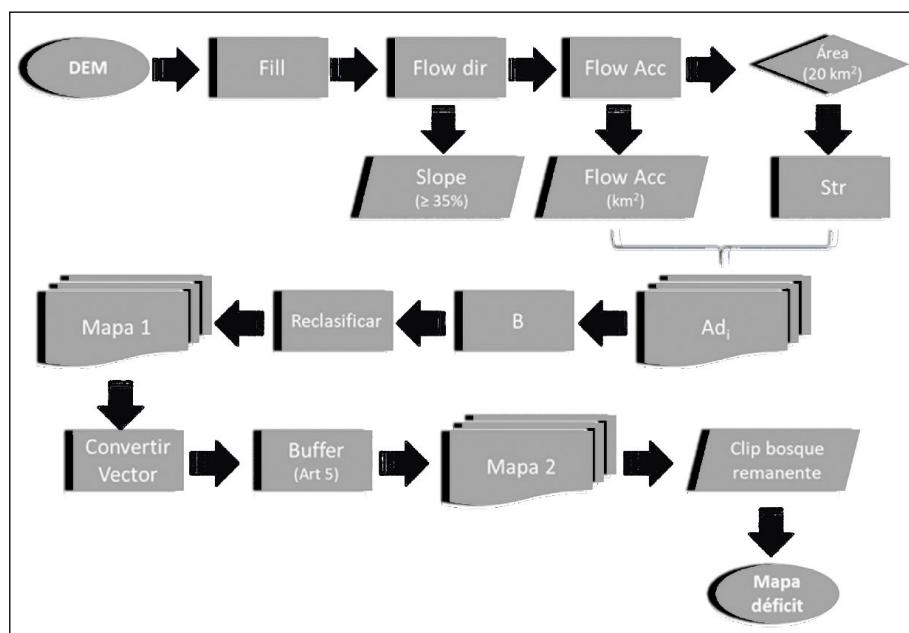
A partir da informação vetorial disponível identificaram-se os trechos de rio desprovvidos de FPCA, isso com a finalidade de planejar ações no marco de projetos de restauração.

As técnicas de teledetecção ou sensoriamento remoto tornaram-se ferramentas frequentes para a análise da cobertura vegetal e, em particular, para a estimativa e quantificação da dinâmica espaciotemporal da coberta florestal (desmatamento).

As camadas da cobertura florestal para o período de 1986 a 2022, fornecidas pelo INFONA e ESRI, respectivamente, foram usadas para a geração das áreas com déficit de FPCA.

Em primeiro lugar foram feitas correções topológicas e os bancos de dados foram unificados. Para encontrar as perdas florestais, foi aplicado o algoritmo “Symmetric Difference”, que extrai as partes dos objetos espaciais que não coincidem, removendo as áreas de sobreposição entre as duas camadas. Para comparar a cobertura florestal do ano de 1986 com a do ano de 2022, foi usado o arquivo “Differences”, que mostra o resultado da análise de imagens de satélite (ESA Sentinel-2) com resolução de 10 m fornecidas pelo Impact Observatory, Microsoft e Esri. Essas imagens correspondem à cobertura de árvores do ano de 2022. Para poder contrastá-los com os de 1986, foi aplicado um processo de reamostragem que reduziu a resolução para 30 m, mantendo assim a mesma escala e o mesmo nível de detalhes.

Para a determinação da largura do curso de agua e posterior estimativa do déficit de FPCA na UHTBA, foi utilizado o fluxograma apresentado na Figura 4.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Figura 4. Fluxograma utilizado para a determinação da largura e a estimativa do déficit de FPCA.

A partir do MDE, se procedeu ao preenchimento de quaisquer falhas ou imperfeições que pudessem ter (*Fill*). Com esse produto, foi determinado: i) as direções de fluxo (*Flow dir*) que definem o comportamento hidrológico de cada célula como uma unidade isolada (esse comportamento é diretamente condicionado pelas células vizinhas, pois é a relação entre as alturas de cada uma delas com a célula central que indica a direção do fluxo); e ii) Declividade (*Slope*), um fator que controla a maioria dos processos na superfície da terra, pois atua na velocidade do fluxo superficial e subsuperficial e na taxa de escoamento, bem como no teor de umidade do solo e nas propriedades do solo. Hidrologicamente, a declividade indica a quantidade de energia gravitacional disponível para lidar com o fluxo de água. Esse produto é reclassificado considerando a cláusula (a) do Artigo 6 $\geq 35\%$, do Decreto do Paraguai N° 9824/2012 “*Pelo qual se regulamenta a Lei N° 4241/2010*”.

O produto *Flow dir*, indica a direção que toma o fluxo de água em cada pixel de imagem, baseada no princípio de que a água sempre é movimentada em seu caminho em direção à declividade máxima no sentido do fluxo que sai de cada célula, o *Flow Acc*, é a área de acumulação de fluxo, área contribuinte ou área de captação formada pela a superfície localizada a montante de um ponto de interesse, coleta o fluxo que recebe e o transita por esse ponto. Logo é possível obter a rede de fluxo (*Str*) considerando o limiar de área que gera uma nascente igual a $0,9 \text{ km}^2$. Também é calculado a área acumulada em km^2 (*FlowAcckm*).

Com estes produtos é utilizada a calculadora Raster tendo em consideração o *FlowAcckm* e o *Str*, para obter a área da bacia incremental (*Adi*). Logo é aplicada a Equação 2 e com o resultado é possível reclassificar a imagem de acordo ao estabelecido no Art 5 do Decreto N° 9824/12 (*B*).

O resultado final (Mapa 1) é vetorizado e sobreposto ao arquivo denominado “*Diferenças*” para obter as áreas com déficit de florestas protetoras em hectares para a área de estudo (Mapa 2).

A confiabilidade de um instrumento de medição, de acordo com Hernández et al. (2003), é determinada por meio de várias técnicas e refere-se ao grau em que sua aplicação repetida ao mesmo sujeito produz os mesmos resultados. O índice Kappa é a proporção de correspondências obtidas em um produto cartográfico subtraindo aqueles gerados em forma fortuita. É uma medida da diferença entre a precisão obtida na classificação com o software e a precisão de obter uma classificação correta com a classificação visual (no campo ou com imagens de alta resolução). Seguindo as diretrizes estabelecidas por Congalton (1988b), recomenda-se amostrar aproximadamente 1% da área mapeada (a área da UHTBA é de $9560,65 \text{ km}^2$). Sugere-se também verificar pelo menos 50 locais por categoria, e 75 a 100 se a área em estudo exceder 400.000 hectares ou tiver mais de 12 categorias, como o mesmo autor aponta em outra publicação (Congalton, 1991). Portanto, considerando a área para uma população infinita, foi considerado um tamanho de amostra de 285, selecionados aleatoriamente. O parâmetro estatístico que depende do nível de confiança foi 1,69, o nível de confiança de 95%, portanto o erro máximo de estimativa aceito foi de 5%. Para a avaliação do coeficiente Kappa foi usada no Relatório de Avaliação de Precisão Temática do Mapa de Cobertura Florestal e Mudança de Uso da Terra (2015 - 2016), que está disponível no link: <https://nube.infona.gov.py/index.php/s/X3cwCHHY3rj2pjT#pdfviewer>

RESULTADOS

A Tabela 1 apresenta os parâmetros mínimos relacionados à largura do curso d'água e às particularidades da área de influência na unidade hidrográfica. Esses parâmetros são essenciais para orientar as ações voltadas para a recomposição de florestas protetoras em cursos d'água, de acordo com o disposto no Decreto do Paraguai nº 9824, que regulamenta a Lei nº 4.241 (MADES, 2018).

Tabela 1. Parâmetros mínimos de acordo com a largura do curso d'água, a área de influência correspondente e o número de cursos d'água em cada categoria, juntamente com a porcentagem de ocorrência de cada largura de curso hídrico na unidade hidrográfica.

Largura do curso hídrico	Largura mínima da Floresta Protetora (m)	Trechos de rio contabilizado (Quantidade)	Porcentagem de ocorrência (%)
≥ 100	100	0	0,00
50 a 99	60	347	3,70
20 a 49	40	232	2,47
5 a 19	30	1123	11,98
1,5 a 4,9	20	2089	22,28
< 1,5	10	5585	59,57

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

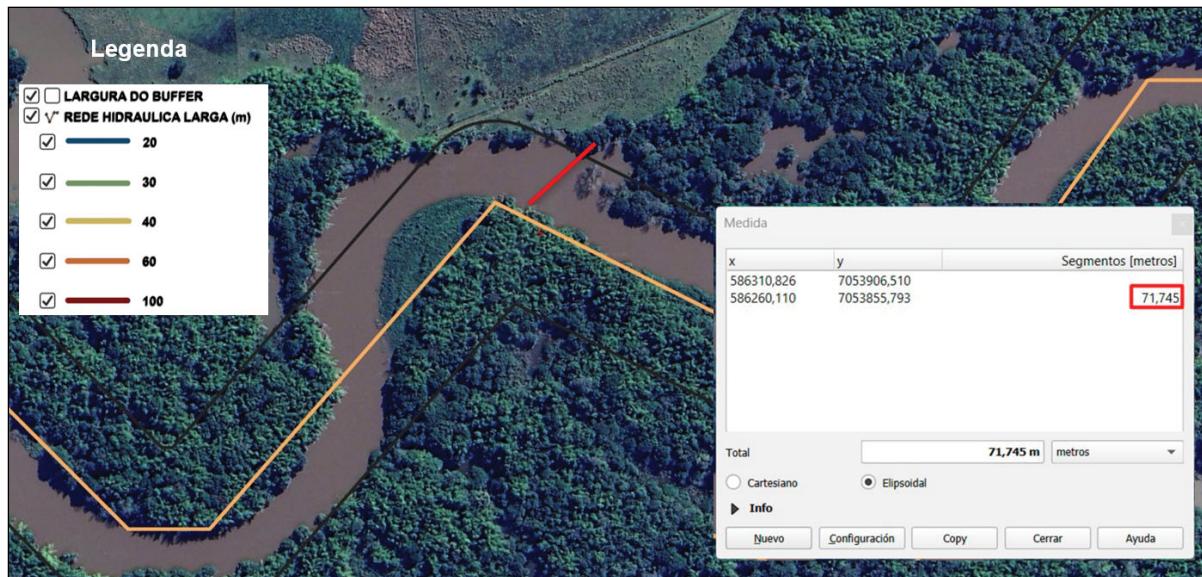
A Tabela 2 resume a área de cobertura florestal para ambos os períodos e a perda florestal. Entretanto, a aplicação do complemento Symmetric Difference produziu um valor de 214.028,61 ha na UH, indicando uma diferença significativa entre as fontes de dados utilizadas. Essa diferença se deve ao fato de que a cobertura de 2022 é proveniente de dados globais que podem apresentar diferenças na definição ou classificação da cobertura florestal. Além disso, deve-se levar em conta que alguns hectares podem estar relacionados a mudanças na cobertura da terra devido a atividades de reflorestamento e/ou à expansão de culturas lenhosas, desde a entrada em vigor da Lei nº 2524/2004, que proíbe a mudança no uso da terra na região oriental do Paraguai.

Tabela 2. Diferença da cobertura florestal no período 1986 – 2022 na Unidade hidrográfica.

Capa	Floresta na UH (ha)	Perda de Floresta (ha)
CF 1986	346.513,4	--
CF 2022	312.002,4	34.511,0

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

A Figura 5 apresenta os resultados obtidos por meio do processo de geoprocessamento envolvendo o cálculo da área de influência. Esse cálculo é feito levando-se em conta a distância linear, tendo como referência o valor mínimo da largura da floresta protetora contida no campo correspondente.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Figura 5. Trecho do rio Tebicuary (Intervalo 50 a 99 m) comparado com a medição sobre a imagem de satélite de maior resolução.

Além disso, a confiabilidade da representação cartográfica obtida em relação à determinação da largura do canal foi avaliada pela aplicação da equação paramétrica, buscando refletir essas informações de forma precisa e verdadeira. Essa avaliação foi realizada por comparação com imagens de alta resolução espacial e medição na tela das larguras dos canais em locais selecionados aleatoriamente. Os resultados revelaram uma diferença mínima entre a precisão obtida com a aplicação da equação paramétrica usando ferramentas QGIS v3.28.3 y SAGA GIS 7.8.2 e as medições feitas em uma imagem de alta resolução espacial. Isso se refletiu em um índice kappa de 0,81, indicando uma concordância quase perfeita de acordo com a avaliação do coeficiente kappa (Landis; Koch, 1977).

Os resultados indicam que na Unidade Hidrográfica do Tebicuary Bacia Alta de acordo com o resultado do geoprocessamento em nível nacional, foram identificados aproximadamente 4.203 hectares de déficit de florestas de proteção de cursos d’água, o que representa cerca de 12,2% da perda total de florestas nessa unidade. Os resultados das medidas de desempenho calculadas para analisar a eficácia do método proposto são apresentados a seguir.

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos demonstram que a estimativa da largura dos cursos d’água, usando equações geomorfológicas e ferramentas de QGIS v3.28.3 y SAGA GIS 7.8.2, foi eficaz e confiável. Essas informações foram cruciais para identificar as áreas que necessitam de restauração da FPCA. Além disso, a aplicação da metodologia desenvolvida neste estudo permitiu determinar que aproximadamente 12,2% da perda total de florestas na UHTBA correspondem a áreas com déficit de FPCA.

A implementação dessa metodologia e a identificação precisa de áreas prioritárias para a restauração de FPCA terão um impacto significativo na conservação do meio ambiente e da biodiversidade na região. A promoção da restauração de florestas protetoras não apenas contribui

para a mitigação da degradação ambiental, mas também reduz o risco de enchentes e melhora a qualidade da água, o que beneficia diretamente as comunidades locais. Elas permitem que os esforços sejam concentrados em áreas estratégicas, otimizando recursos e obtendo benefícios ambientais significativos. Esses benefícios incluem a redução da fragmentação do habitat, a proteção de espécies nativas e a melhoria da saúde do ecossistema, que, juntos, contribuem positivamente para a biodiversidade e a sustentabilidade ambiental.

Este estudo fornece uma metodologia eficaz para a identificação e restauração da FPCA na UHTBA do Paraguai. Entretanto, são necessárias informações nacionais e oficiais para uma melhor estimativa em qualidade e quantidade adequada. A conservação dessas florestas é essencial para garantir a saúde dos ecossistemas aquáticos e contribuir para o gerenciamento sustentável dos recursos naturais na região. Além disso, a aplicação dessa metodologia pode servir de modelo para abordar problemas semelhantes em outras áreas geográficas, promovendo, assim, o gerenciamento sustentável da terra e a proteção dos recursos hídricos em todo o país.

REFERÊNCIAS

- CÁLIX, Á.; BLANCO, M. **Os desafios da transformação produtiva na América Latina:** perfis nacionais e tendências regionais. Friedrich-Ebert-Stiftung. Projeto Regional Transformação Social-Ecológica, 2020.
- CAN – CENSO AGROPECUARIO NACIONAL (Paraguai). **Censo Agropecuário Nacional – CAN 2022.** Ministério da Agricultura e Pecuária (MAG), 2022. Disponível em: <https://www.datos.gov.py/dataset/censo-agropecuario-nacional-can-2022>. Acesso em: 11 jul. 2023
- COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D. G.; SILVA, B. C. da; TUCCI, C. E. M. The MGB-IPH model for large-scale rainfall — runoff modelling. **Hydrological Sciences Journal**, v. 52, n. 5, p. 878– 895, 2007.
- CONGALTON, R. G. A comparison of sampling scheme use in generating error matrices for assessing the accuracy of maps generated from remotely sensed data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.54, n. 5, p. 593-600, 1988b.
- CONGALTON, R. G. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. **Remote sensing of environment**, v. 37, n. 1, p. 35-46, 1991.
- ENBCS - ESTRATEGIA NACIONAL DE BOSQUES PARA O CRESCIMENTO SUSTENTAVEL. **Documento socializado com o apoio do Projeto Bosques para o Crescimento Sustentável (BCS).** Assunção: MADES; INFONA; FAPI; PNUD; ONU Meio Ambiente; FAO, 2019. Aprovado pela Resolução nº 293/2019 da Comissão Nacional de Mudança Climática.
- FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. Integração do Modelo MGB-IPH com Sistema de Informação Geográfica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, p. 243-254, 2014.
- FAO WOCAT. **Dinâmica da produtividade da terra** [Conjunto de dados]. Disponível em: <https://wocatapps.users.earthengine.app/view/ldn-prais4>. Acesso em: nov. 2023.
- FAO. **Os bosques e a água. Estudos FAO Montes**, n. 155. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2009.
- FARR, T.G.; CARO, E.; CRIPPEN, R.; et al. The Shuttle Radar Topography Mission. **Reviews of Geophysics**, v. 45, RG2004, 2007. DOI: 10.1029/2005RG000183.
- HERNÁNDEZ, R.; SAMPIERI, R.; FERNÁNDEZ, C. **Metodología de la Investigación.** Santiago:

Mc Graw Hill, 2003.

INE - INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICAS. **Informação vetorial sobre localidades, limites departamentais e nacionais.** Disponível em: <https://www.ine.gov.py/microdados/cartografia-digital-2012.php>. Acesso em: nov. 2023.

INFONA - INSTITUTO FORESTAL NACIONAL. **Relatório Nacional de Cobertura Florestal e Mudança de Uso da Terra.** Disponível em: <https://nube.infona.gov.py/index.php/s/BPdE3ijGWRnQ2aA>. Acesso em: nov. 2023.

IPCC - GRUPO INTERGUBERNAMENTAL DE EXPERTOS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO. Resumo para formuladores de políticas. In: **Mudança climática e a terra:** relatório especial sobre mudança climática, desertificação, degradação da terra, gestão sustentável, segurança alimentar e fluxos de gases de efeito estufa em ecossistemas terrestres. 2019.

KARRA, K.; KONTGIS, C. et al. Global land use/land cover with Sentinel-2 and deep learning. In: **IGARSS 2021** - IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2021. IEEE. Disponível em: <https://livingatlas.arcgis.com/landcoverexplorer/>. Acesso em: nov. 2023.

LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. An application of hierarchical kappa-type statistics in the assessment of majority agreement among multiple observers. **Biometrics**, p. 363-374, 1977.

MADES - MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. **Projeto Paisagens de Produção Verde / MADES / PNUD / GEF:** Manual técnico para a administração e aplicação da Lei nº 4241/10 e seu Decreto nº 9824/12. Assunção: MADES, 2018.

MEJIA, A. I.; REED, S. M. Evaluating the effects of parameterized cross section shapes and simplified routing with a coupled distributed hydrologic and hydraulic model. **Journal of Hydrology**, v. 409, n. 1-2, p. 512-524, 2011.

PAIVA, R. C. D. **Modelagem hidrológica e hidrodinâmica de grandes bacias:** estudo de caso bacia do rio Solimões. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Large scale hydrologic and hydrodynamic modeling using limited data and a GIS based approach. **Journal of Hydrology**, v. 406, n. 3-4, p. 170–181, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.06.007>

PAIVA, R. C. D.; et al. Assimilating in situ and radar altimetry data into a large-scale hydrologic-hydrodynamic model for streamflow forecast in the Amazon. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions (Online)**, v. 10, p. 2879-2925, 2013.

PARAGUAI. **Decreto nº 3246, de 10 de enero de 2020.** Regulamenta o Sistema Nacional de Monitoramento Florestal do Paraguai. Boletim Oficial da República do Paraguai, Assunção, 10 ene. 2020. Disponível em: <https://www.mades.gov.py/wp-content/uploads/2025/03/DECRETO-Nro-3246-de-fecha-10-de-enero-de-2020.pdf>. Acesso em: 10 set. 2024 [Revogado pelo Decreto nº 9849/2023].

PARAGUAI. **Decreto nº 9824, de 3 de outubro de 2012.** Pelo qual se regulamenta a lei nº 4241/2010 “de restabelecimento de florestas protetoras de cursos d’água dentro do território nacional”. Boletim Oficial da República do Paraguai, Assunção, 3 out. 2012. Disponível em: https://www.bacn.gov.py/archivos/2893/Decreto_N_9824_Reglamenta_la_Ley_N_4241.pdf. Acesso em: 10 set. 2023.

PARAGUAI. **Lei nº 2524, de 13 de diciembre de 2004.** Proíbe, na Região Oriental, as atividades de transformação e conversão de superfícies com cobertura florestal. Boletim Oficial

da República do Paraguai. Assunção, 13 dic. 2004 Disponível em: <https://www.bacn.gov.py/archivos/3507/20150703134445.pdf>. Acesso em: 10 set. 2023.

PARAGUAI. Lei nº 3239, de 10 de julio de 2007. Dispõe sobre os recursos hídricos do Paraguai. Boletín Oficial da República do Paraguai. Assunção, 10 jul. 2007. Disponível em: <https://www.bacn.gov.py/leyes-paraguayas/2724/de-los-recursos-hidricos-del-paraguay>. Acesso em: 10 set. 2023.

PARAGUAI. Lei nº 422, de 23 de noviembre de 1973. Declara de interesse público o aproveitamento e o manejo racional dos bosques e das terras florestais. Boletín Oficial da República do Paraguai, Assunção, 23 nov. 1973. Boletim Oficial da República do Paraguai, Disponível em: <https://www.bacn.gov.py/leyes-paraguayas/2370/ley-n-422-forestal>. Acesso em: 10 set. 2023.

PARAGUAI. Lei nº 4241, de 20 de diciembre de 2010. Dispõe sobre o restabelecimento de florestas protetoras de cursos hídricos em todo o território nacional. Boletín Oficial da República do Paraguai. Assunção, 20 dic. 2010. Disponível em: <https://www.bacn.gov.py/leyes-paraguayas/2893/ley-n-4241-restablecimiento-de-bosques-protectores-de-cauces-hidricos-dentro-del-territorio-nacional>. Acesso em: 10 set. 2023.

PAZ, A. R. et al. Data Assimilation in a Large-scale Distributed Hydrological Model for Medium Range Flow Forecasts. **IAHS Publication**, n. 313, p. 471–478. Wallingford: IAHS Press, 2007.

PONTES, P. R. M. **Modelización hidrológica e hidrodinámica integrada de la cuenca del Río da Prata.** Tesis (Doctorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/156600>. Acesso em: nov. 2023.

SIMS, N.C. et al. **Good Practice Guidance:** SDG Indicator 15.3.1. Proportion of land that is degraded over total land area. Version 2.0. Bonn: United Nations Convention to Combat Desertification, 2021. UNCCD - UNITED NATIONS CONVENTION TO COMBAT DESERTIFICATION. **Performance review and assessment of implementation system (PRAIS 4).** Seventh reporting process: Paraguay country report 2022. United Nations Convention to Combat Desertification, 2022. Disponível em: <https://www.unccd.int/our-work-impact/country-profiles/paraguay>. Acesso em: 15 mar. 2023.

WALCOTT, J. et al. **Mapeamento dos múltiplos benefícios do REDD+ no Paraguai:** uso de informações espaciais para apoiar o planejamento do uso da terra. Cambridge: UNEP-WCMC, 2015.