
Mudanças no Uso e Cobertura da Terra na Cabeceira da Bacia do Rio Lavapés e Impactos sobre o Escoamento Superficial das Águas Pluviais

Changes in Land Use and Land Cover in the Headwaters of the Lavapés River Basin and Impacts on Stormwater Runoff

Cambios en el Uso y Cobertura del Suelo en la Cabecera de la Cuenca del Río Lavapés y sus Impactos en la Escorrentía Superficial de las Aguas Pluviales

Edson Luís Piroli¹

Donizeti Aparecido Pastori Nicolete²

RESUMO: As bacias hidrográficas delimitam territórios e definem processos de ocupação do espaço geográfico. Mesmo que as pessoas ou planejadores desconheçam ou desconsidere isto, ao ocupar determinada porção do território com atividades antrópicas ocorrem interferências no conjunto de processos naturais. Neste trabalho são analisadas as mudanças no uso e cobertura da terra na Cabeceira da Bacia Hidrográfica do Rio Lavapés (CBHRL), em Botucatu (SP), nos anos de 2002 e 2022. Foram utilizadas imagens de alta resolução disponibilizadas no aplicativo Google Earth Pro, as quais foram classificadas e pós-processadas utilizando o módulo *Land Change Modeler*, disponível no Sistema de Informações Geográficas (SIG) TerrSet. Os dados analisados mostram que houve importantes alterações, com ampliação das áreas urbanizadas, que passaram de 972,86 hectares (20,17% da área) para 1.728,33 hectares (35,84% da área) e redução das áreas naturais representadas pela vegetação arbórea, que cobria 617,55 hectares (12,80% da área) e passou a cobrir 542,43 hectares (11,25% da área). Além disso, houve redução expressiva também na classe de agropecuária e campestre, que abrangia 2.468,75 hectares (51,19% da área) e que passou a abranger 1.703,14 hectares (35,31% da área). Estas mudanças têm alterado as taxas de infiltração e de escoamento superficial da água.

PALAVRAS-CHAVES: recursos hídricos; inundação; cidades sustentáveis; sensoriamento remoto; geoprocessamento.

¹ Doutor em Agronomia na Área de Concentração em Energia na Agricultura, na Linha de Pesquisa Planejamento do Uso do Solo, Estudo do Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, pela UNESP - Universidade Estadual Paulista. Professor Associado da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP, no curso de graduação em Geografia, no Campus de Ourinhos e no Programa de Pós-Graduação em Geografia da Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP de Presidente Prudente. E-mail: edson.piroli@unesp.br.

² Doutor em Agronomia (Irrigação e Drenagem) pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP. E-mail: donizeti.nicolete@unesp.br.

ABSTRACT: *Watersheds delineate territories and shape the spatial patterns of land occupation. Anthropogenic activities within a watershed inevitably interfere with natural processes, even when overlooked or poorly understood by planners and the general population. This study analyzes land use and land cover (LULC) changes in the headwaters of the Lavapés River Basin (CBHRL), located in Botucatu, São Paulo State, Brazil, between 2002 and 2022. High-resolution satellite imagery from Google Earth Pro was classified and post-processed using the Land Change Modeler (LCM) module in the TerrSet GIS platform. The results revealed substantial changes over the two-decade period, particularly the expansion of urban areas from 972.86 ha (20.17% of the basin) to 1,728.33 ha (35.84%), and a reduction in natural arboreal vegetation cover from 617.55 ha (12.80%) to 542.43 ha (11.25%). Agricultural and pastures areas also declined significantly, from 2,468.75 ha (51.19%) to 1,703.14 ha (35.31%). These LULC changes are likely altering the basin's hydrological dynamics, including reduced infiltration and increased surface runoff.*

KEYWORDS: *water resources; flooding; sustainable cities; remote sensing; geoprocessing.*

RESUMEN: *Las cuencas hidrográficas delimitan territorios y moldean los patrones espaciales de ocupación del suelo. Las actividades antrópicas dentro de una cuenca inevitablemente interfieren con los procesos naturales, aun cuando sean ignoradas o poco comprendidas por los planificadores y la población en general. Este estudio analiza los cambios en el uso y cobertura del suelo (LULC) en las cabeceras de la cuenca del río Lavapés (CBHRL), ubicada en Botucatu, estado de São Paulo, Brasil, para los años 2002 y 2022. Se utilizaron imágenes satelitales de alta resolución obtenidas a través de Google Earth Pro, las cuales fueron clasificadas y procesadas posteriormente mediante el módulo Land Change Modeler del Sistema de Información Geográfica (SIG) TerrSet. Los resultados revelaron cambios sustanciales durante el período de dos décadas, en particular la expansión de las áreas urbanas de 972,86 ha (20,17% de la cuenca) a 1.728,33 ha (35,84%) y una reducción de la cobertura de vegetación arbórea natural de 617,55 ha (12,80%) a 542,43 ha (11,25%). Las áreas agrícolas y pastizales también disminuyeron significativamente, de 2.468,75 ha (51,19%) a 1.703,14 ha (35,31%). Estos cambios en el uso y cobertura del suelo probablemente están modificando la dinámica hidrológica de la cuenca, incluyendo una reducción en la infiltración y un aumento en la escorrentía superficial.*

PALABRAS-CLAVE: *recursos hídricos; inundación; ciudades sostenibles; teledetección; geoprocementamiento.*

INTRODUÇÃO

A natureza, ao longo do seu processo evolutivo, foi moldando as formas do relevo, a cobertura e as demais características do solo em ritmo, em geral, lento. A humanidade, ao ocupar áreas cada vez mais amplas da superfície terrestre e intensificar o uso do solo, substituindo vegetações nativas por atividades agropecuárias, áreas urbanas e infraestruturas, tem acelerado mudanças e encontrado consequências negativas e inesperadas.

Nos últimos anos, tem sido observado um aumento nos desastres relacionados à água, como secas, inundações e deslizamentos. Conforme Azadi *et al.* (2022). As mudanças climáticas e alterações no uso e na cobertura das terras podem contribuir para mudanças nos padrões de ocorrência desses desastres, tornando-se preocupações de nível global. Chuvas com intensidade acima da média têm aumentado a ocorrência de alagamentos, enxurradas e inundações (Marengo *et al.*, 2023). Estes eventos, por sua vez, têm causado prejuízos

crescentes em termos de infraestruturas danificadas, economias prejudicadas, com destruição de plantações e criações de animais, e, inclusive, com a perda de vidas humanas, que tem tido aumento proporcional à ocorrência de episódios extremos (CRED, 2023).

A retirada da cobertura vegetal e sua substituição por áreas urbanas, plantações, estradas e outras estruturas modifica as taxas de infiltração da água das chuvas e do escoamento superficial em grandes áreas das bacias hidrográficas (Astuti *et al.*, 2019; Prokešová; Horáčková; Snopková, 2022; Silva *et al.*, 2023), normalmente reduzindo a primeira e aumentando a segunda (Delgado; Carol; Casco, 2020).

Diferentes fatores são identificados como indutores das mudanças de uso e de cobertura das terras. O crescimento contínuo da população, bem como as mudanças econômicas, sociais e tecnológicas, juntamente com as características do ambiente, condiciona a transição de áreas naturais para áreas antropizadas (Cui *et al.*, 2022; Duan *et al.*, 2023; Hailu; Mammo; Kidane, 2020; Souza *et al.*, 2020; Teck *et al.*, 2023).

O aumento das áreas urbanas, com consequente impermeabilização do solo, contribui para a formação de maiores volumes de escoamento superficial, favorecendo a ocorrência de cheias e inundações (Feng; Zhang; Bourke, 2021; Seidl *et al.*, 2020). A entrada de sedimentos, resíduos sólidos, efluentes domésticos e industriais, nutrientes e contaminantes em rios urbanos condicionam processos de assoreamento e eutrofização, além de obstruções e mudanças na geometria dos canais dos rios e córregos, levando a perdas em quantidade e qualidade da água, bem como no aumento das frequências de inundações (Akinawo, 2023; Saraswat; Kumar; Mishra, 2016). As áreas verdes nos espaços urbanos desempenham um importante papel no comportamento hidrológico das cidades; a redução dessas áreas com a implantação de áreas construídas condiciona menor infiltração da água no solo e consequentemente um maior excedente de água na superfície (Ghalehtemouri; Ros; Rambat, 2024).

O Sistema de Informações Geográficas (SIG) em conjunto com o sensoriamento remoto (SR), vem sendo utilizado para avaliações multiescala das mudanças temporais no uso e na ocupação das terras ao longo do tempo e nas suas implicações nos processos ambientais em bacias hidrográficas, como na qualidade da água e degradação das terras (Alves *et al.*, 2021; Carvalho *et al.*, 2025; Desta; Fetene, 2020; Mello *et al.*, 2020; Silva *et al.*, 2023). As alterações no uso e na cobertura das terras precisam ser monitoradas de forma constante para que as interações entre as atividades humanas e ambientais sejam compreendidas, possibilitando visualizar o cenário atual e futuro da ocupação das terras, dando aos gestores uma importante ferramenta na tomada de decisão (Oliveira *et al.*, 2022).

A coleta de informações, baseada em SR e seu devido processamento utilizando algoritmos de classificação de imagem e modelagem espacial, dão suporte ao entendimento dos padrões de uso e de ocupação das terras em nível local, regional e global (Silva; Galvanin;

Menezes, 2022; Souza *et al.*, 2020; Winkler *et al.*, 2021). Séries históricas de imagens da superfície terrestre oriundas de diferentes sensores como *Thematic Mapper* (TM), *Enhanced Thematic Mapper* (ETM+) e *Operational Land Imager* (OLI), embarcados nos satélites da família Landsat, *Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), dos satélites TERRA e AQUA, bem como conjuntos de imagens de vários sensores disponibilizadas em aplicativos como Google Earth, são utilizadas para gerar mapas e avaliar as mudanças de uso e cobertura da terra ao longo do tempo (Padma *et al.*, 2022; Silva; Galvanin; Menezes, 2022; Souza *et al.*, 2020; Sulla-Menashe *et al.*, 2019). Assim, permitem identificar e delimitar as transições de uma classe para outra, suas causas e consequências (Hasan *et al.*, 2020).

Algoritmos como o *Land Change Modeler* (LCM) são amplamente utilizados na avaliação das mudanças temporais do uso e da cobertura das terras e para verificação das transições entre as diferentes classes de uso e de cobertura, para dar suporte às decisões no planejamento territorial e para a conservação ambiental. Com o uso do LCM pode-se visualizar as mudanças na cobertura da terra, simular cenários futuros e modelar os impactos sobre as condições ambientais, espécies animais e vegetais e sua biodiversidade (Eastman, 2009), gerando mapas de perdas, persistências e ganhos, possibilitando detalhamento das mudanças em termos de quantidade e distribuição espacial (Armenteras *et al.*, 2019; Assalve; Fuzzo, 2021; Gupta; Sharma, 2020; Preis; Franco; Varela, 2021; Xavier; Silva, 2018;).

Neste contexto, o presente estudo teve como objetivo analisar os processos de mudança no uso da terra na CBHRL, localizada em Botucatu, SP, nos anos de 2002 e 2022, para entender as causas e como as mudanças no uso e cobertura da terra podem influenciar na ampliação dos danos em episódios de enxurradas e inundações ocorridos na área urbana da cidade, como o que aconteceu em 10 de fevereiro de 2020, quando uma chuva de 284 milímetros (Franco *et al.*, 2023) derrubou dezenas de pontes e casas e causou a morte de quatro pessoas no município.

MATERIAL E MÉTODOS

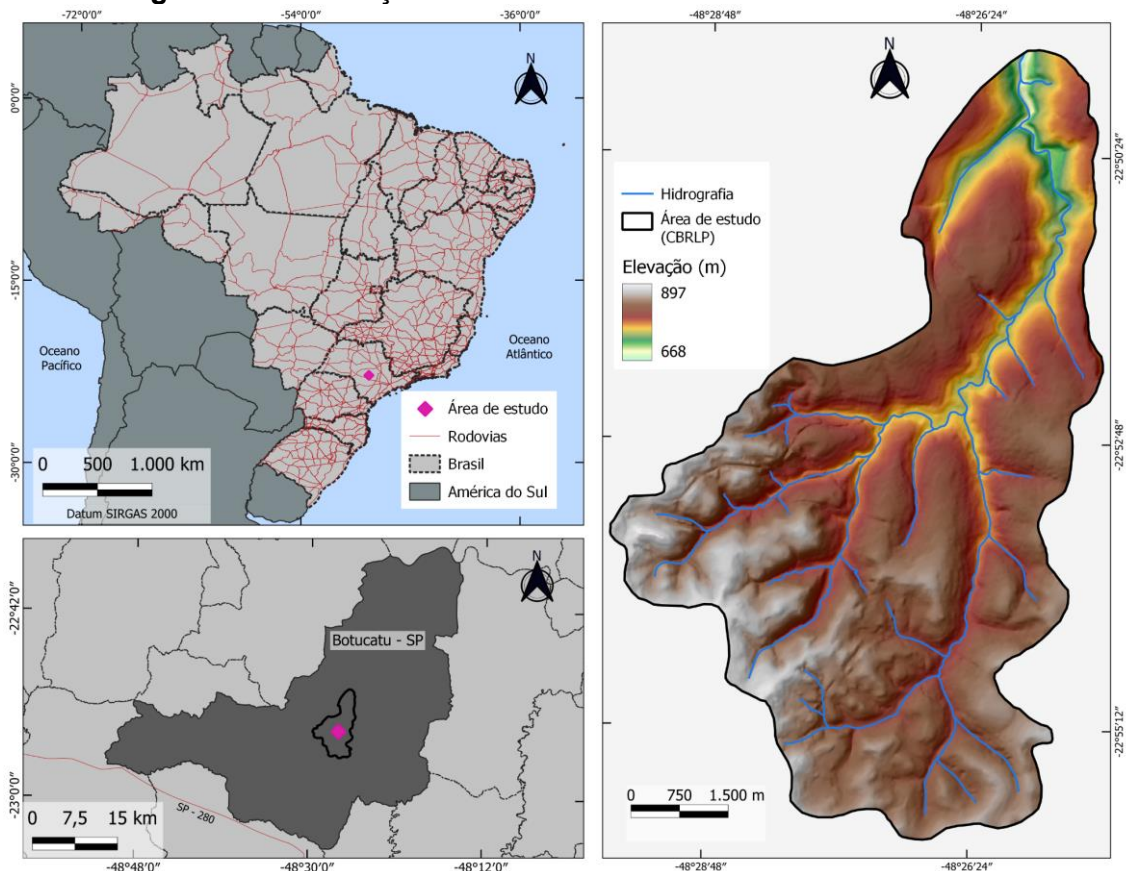
A área de estudo corresponde à Cabeceira da Bacia Hidrográfica do Rio Lavapés (CBHRL) e está localizada no município de Botucatu - São Paulo, entre as coordenadas 22° 49' 24" e 22° 56' 15" de latitude Sul e 48° 29' 44" e 48° 25' 04" de longitude Oeste, Datum Sirgas 2000, (Figura 1), abrangendo uma área de 4.822,74 hectares.

Para a delimitação da CBHRL foi utilizada a carta topográfica de Botucatu, folha SF-22-Z-B-VI-3, na escala 1:50.000. Inicialmente a carta topográfica foi georreferenciada, considerando o sistema de projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), Datum SIRGAS 2000, em seguida a rede de drenagem foi digitalizada e foram definidos os limites da

área de estudo com base nos dados de altitude (curvas de nível e pontos cotados) apresentados na carta topográfica.

De acordo com a classificação climática de Köppen, o clima da área é definido como Aw (clima tropical com inverno seco). A precipitação média anual é igual a 1.534,47 milímetros, com temperatura média mínima de 17,24°C, média máxima de 26,51°C e média de 21,34°C, considerando o período de 1991 a 2020 (Franco *et al.*, 2023). Com uma amplitude altimétrica de 229 metros, os pontos mais altos e mais baixos da CBHRL estão localizados em altitudes de 897 metros e 668 metros, respectivamente (Figura 1).

Figura 1 – Localização da área de estudo - CBHRL em Botucatu-SP



Fonte: elaborado pelos autores.

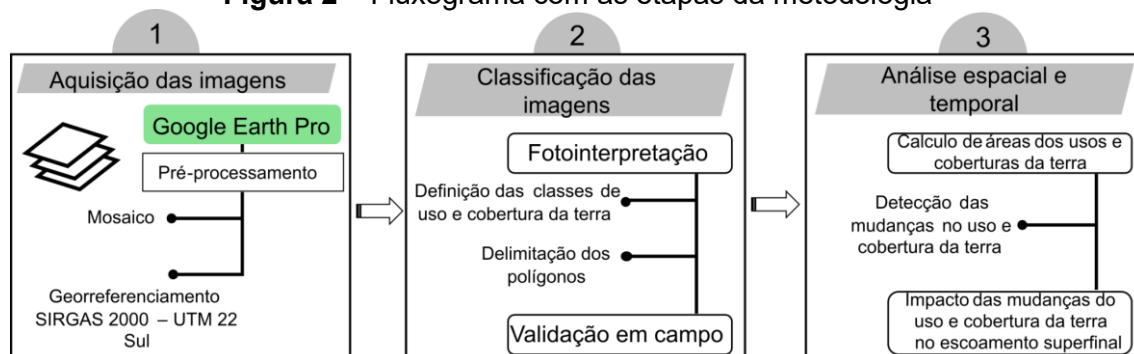
Em termos hidrográficos, a Bacia do Rio Lavapés é tributária da margem esquerda do Rio Tietê, desaguando nele ao norte do território do Município de Botucatu. A Bacia do Rio Tietê faz parte da Região Hidrográfica do Rio Paraná, sendo um de seus mais importantes tributários da margem esquerda. No sistema paulista de gerenciamento de recursos hídricos, a Bacia do Rio Lavapés faz parte da Unidade de Gerenciamento dos Recursos Hídricos – 10 (UGRHI-10), Tietê/Sorocaba.

Para a identificação das diferentes classes de uso e cobertura da terra foram utilizadas imagens de alta resolução espacial disponíveis no programa *Google Earth Pro* (GE) (Santos

et al., 2022), que utiliza dados de diferentes satélites, como *QuickBird* e *Geoeye*. As imagens foram acessadas por meio da ferramenta de linha do tempo do GE, que contém um conjunto de imagens históricas de diferentes períodos (Batista; Vieira; Marinho, 2019). Para a CBHRL foram selecionadas duas cenas do satélite *QuickBird* do ano de 2002 e duas cenas do satélite *Geoeye* do ano de 2022.

Utilizando o aplicativo ArcGIS 10.3.1, as cenas foram agrupadas em uma única imagem (mosaico) para cada um dos anos analisados. Em seguida, foi realizado o processo de georreferenciamento para correções geométricas e de posicionamento espacial das imagens. O fluxograma das etapas é apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Fluxograma com as etapas da metodologia



Fonte: elaborado pelos autores.

A classificação do uso e cobertura da terra na área de estudo nos anos pesquisados foi realizada no aplicativo ArcGIS 10.3.1 a partir da análise visual por ambos os autores, usando-se como orientação os critérios de fotointerpretação estabelecidos por Jensen (2009) e por Florenzano (2011).

As classes identificadas foram: área urbana consolidada, área urbana expansão, área urbana sustentável, Infraestruturas, agropecuária e campestre, vegetação arbórea e corpos d'água (Figura 3). As classes foram delimitadas por digitalização manual, com a construção de polígonos no formato vetorial.

Na etapa de classificação das imagens, foram definidos locais representativos para análises aprofundadas das condições *in loco*. A definição destes locais foi feita em função de seu uso e da forma de ocupação, buscando-se analisar pelo menos três locais distintos para cada tipo de uso, em diferentes pontos da CBHRL. Em seguida, fizeram-se confirmações a campo nos dias 30/06/2023, 01/07/2023, 29/11/2023, 19/12/2023 e 18/11/2024, e a busca de informações sobre episódios de enxurradas, inundações e fatores que interferiram nas mudanças no uso da terra (implantação e modificação de infraestruturas como estradas, novos bairros, estruturas de saúde e outras que atraem pessoas para novas áreas). As informações relativas aos anos estudados (2002 e 2022) foram levantadas em artigos,

trabalhos de pesquisa, notícias de jornais e conversas com moradores da área e autoridades do município de Botucatu.

Figura 3 – Classes de uso e cobertura da terra identificadas na área de estudo e descrição de suas principais características

Classe	Descrição	Amostra
Área urbana consolidada	Locais onde havia estrutura urbana completa e alta taxa de cobertura do solo com construções	
Área urbana expansão	Locais onde haviam estruturas urbanas sendo implantadas e construções esparsas	
Área urbana sustentável	Locais onde a área urbana apresenta estrutura adequada, com arborização, espaços para infiltração da água da chuva, rede de drenagem e conservação do solo implantada	
Infraestruturas	Locais onde estão instaladas infraestruturas públicas, via férrea, rodovias, e avenidas.	
Agropecuária e campestre	Locais onde eram desenvolvidas atividades agropecuárias	
Vegetação arbórea	Locais ocupados por árvores de médio e grande porte	
Corpos d'água	Locais onde a lâmina de água era visível, como açudes e pequenas represas	

Fonte: Elaborado pelos autores.

Nos trabalhos de campo realizados, foram visitadas as 29 nascentes localizadas na área de estudo, além de áreas ao longo dos córregos e do rio principal para a verificação da presença de mata ciliar, erosões nas margens e sinais de assoreamento no leito dos corpos d'água. Nesta etapa, foram verificadas possíveis ocorrências de locais com lançamento de efluentes, resíduos sólidos e entulho junto aos cursos d'água, instabilidade das encostas, aterros e presença ou ausência de estruturas de drenagem em função de que estas influenciam no resultado do escoamento superficial e consequentemente no surgimento de erosões e assoreamentos.

A detecção de mudanças é uma etapa de pós classificação, onde duas imagens de períodos diferentes (t_1 e t_2), contendo as mesmas classes, extensão espacial e sistema de coordenadas, são comparadas pixel a pixel. No processo de comparação, são verificadas a natureza das mudanças e sua extensão espacial, assim são quantificadas as mudanças líquidas, os ganhos e perdas em cada classe, bem como suas contribuições no processo de mudança (Singh; Venkatramanan; Deshmukh, 2022).

Para a detecção e quantificação das mudanças no uso e cobertura da terra para a área de estudo no intervalo de duas décadas, foram utilizados os resultados das classificações realizadas nas imagens dos anos de 2002 e 2022. A comparação direta entre as duas imagens classificadas foi realizada no módulo *Land Change Modeler* (LCM) disponibilizado no aplicativo TerrSet, o qual cria uma matriz de mudanças entre as classes para as duas datas analisadas (Tewolde; Cabral, 2011).

Na sequência, cada mudança no uso da terra foi avaliada quanto ao seu potencial para geração de impactos ambientais, tanto negativos quanto positivos. Ao mesmo tempo, foram feitas pesquisas na literatura especializada e conversas com pesquisadores, gestores públicos e moradores da região, realizadas nas datas dos trabalhos de campo, buscando explicações sobre os motivos que levaram às transformações ao longo do período estudado e às suas consequências. As questões feitas a cerca de 30 pessoas, em conversas informais, versaram sobre o conhecimento acerca da ocorrência de enxurradas e inundações, quais os locais mais afetados e os prejuízos causados por elas ao longo do intervalo de tempo estudado. Além disso, se conheciam as causas dos fenômenos e as providências tomadas.

No que se refere ao coeficiente de escoamento superficial (runoff), que demonstra a relação entre o volume de água que esco superficialmente e o volume de água que precipita (Machado; Cardoso; Mortene, 2022; Pacheco *et al.*, 2017), foram usados os valores estabelecidos por Brasil (2022) e DAEE (2005) adaptados às classes de uso estudadas, conforme apresentado no Tabela 1. Estes valores foram multiplicados pelas áreas de cada uso da terra e em seguida usados para estimar o volume do escoamento superficial nas áreas que sofreram mudanças no uso da terra no intervalo estudado.

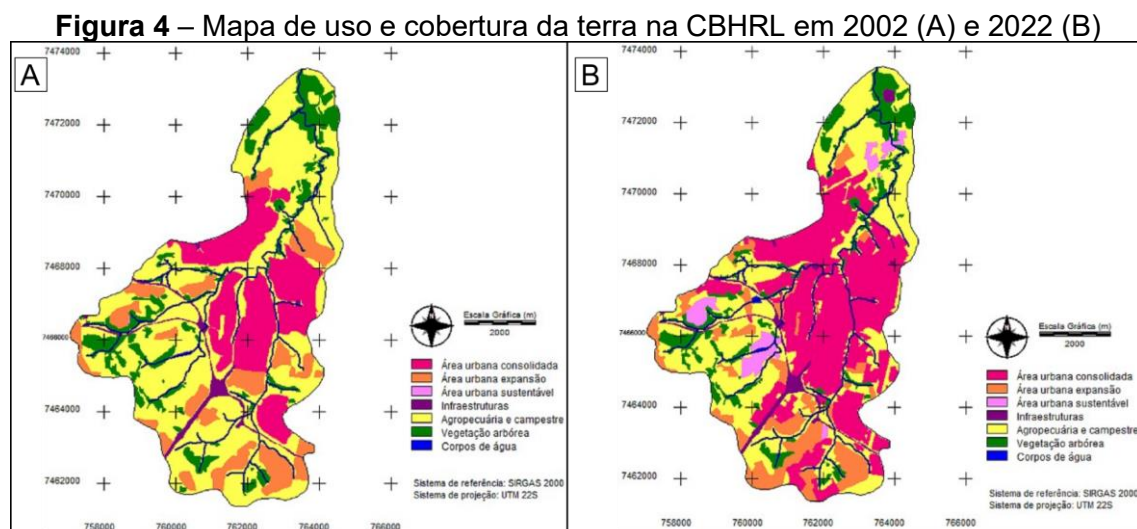
Tabela 1 – Classes de uso e respectivos runoff

Classe de uso	Coeficiente de runoff
Área urbana consolidada	0,8
Área urbana expansão	0,6
Área urbana sustentável	0,4
Infraestruturas	0,8
Agropecuária e campestre	0,3
Vegetação arbórea	0,1
Corpos de água	1,0

Fonte: Modificado de Brasil (2022) e DAEE (2005).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resultado da classificação do uso da terra efetuada sobre as imagens do ano de 2002 (Figura 4A), indica que a maior parte da área na época era ocupada por agropecuária e campestre. Esta classe de uso abrangia 2.468,75 hectares, o que correspondia a 51,19% e se distribuía por toda área, principalmente ao sul e ao norte da área urbana. A segunda classe mais abrangente era a área urbana consolidada, com 972,86 hectares (20,17%) sendo seguida pela área urbana expansão que ocupava 643,74 hectares (13,35%). A quarta categoria mais abrangente na área era a de vegetação arbórea, com 617,55 hectares (12,80%). Esta classe tem grande importância no que se refere à proteção do solo e na infiltração da água das chuvas, uma vez que dissipa a energia destas águas, reduz sua velocidade e facilita sua percolação (Lima; Zakia, 2000).



Fonte: Elaborado pelos autores.

Na Figura 4A é possível observar que a maior parte das Áreas de Preservação Permanente (APP) dos corpos d'água da área já se encontravam desprotegidas por matas ciliares, em desacordo com a Lei 4.771/1965, que disciplinava o assunto na época. Os principais remanescentes de vegetação arbórea encontravam-se na região das cabeceiras, acompanhando os corpos d'água ao sul, e também ao norte da área de estudo. A área urbana consolidada encontrava-se distribuída na região central da CBHRL e a área urbana em expansão se distribuía ao redor, espalhada sobretudo na cabeceira da bacia. As infraestruturas, compostas principalmente pelas rodovias SP 300, Marechal Rondon e SP 209, Professor João Hipólito Martins, distribuíam-se na região centro-sul da área. A Tabela 2 mostra os dados relativos às classes de uso da terra, áreas e porcentagens existentes na área estudada no ano de 2002.

Tabela 2 – Taxas de uso da terra na CBHRL no ano de 2002

Classe de uso	Área (ha)	Porcentagem
Área urbana consolidada	972,86	20,17
Área urbana expansão	643,74	13,35
Área urbana sustentável	1,06	0,02
Infraestruturas	112,95	2,34
Agropecuária e campestre	2.468,75	51,19
Vegetação arbórea	617,55	12,80
Corpos de água	5,83	0,12
Total	4.822,74	100,00

Fonte: Elaborado pelos autores.

Ao se analisar os usos da terra na área estudada no ano de 2022 (Figura 4B), verifica-se que houve importantes mudanças, com a área urbana consolidada passando a ocupar 1.728,33 hectares (35,84%) e se tornando a maior classe de ocupação do solo da CBHRL. O aumento das áreas ocupadas por esta classe foi de 755,47 hectares, tendo ocupado 400,44 hectares da classe área urbana expansão e 361,78 hectares da agropecuária e campestre, além de pequenas áreas das demais classes. Isto indica uma taxa de ampliação da urbanização em Botucatu de 37,77 hectares por ano entre 2002 e 2022. Neste contexto de mudança na cobertura da terra, muda-se também a relação infiltração/escoamento das águas pluviais (Tucci, 2007).

A segunda classe mais abrangente no ano de 2022 era a agropecuária e campestre, com 1.703,14 hectares (35,31%). Esta, teve uma perda de área de 765,61 hectares ao longo dos 20 anos do estudo. As principais perdas foram para a classe área urbana consolidada (361,78 hectares), área urbana expansão (363,99 hectares) e área urbana sustentável (125,59 hectares).

A terceira classe com maior abrangência no ano de 2022 foi a de vegetação arbórea, que ocupava 542,43 hectares, tendo reduzido 75,12 hectares ao longo do período do presente estudo. Isso significa que a maior parte da vegetação arbórea existente em 2002 ainda existia em 2022. Do total da área perdida, 60,44 hectares foram para a classe agropecuária e campestre. A segunda classe que mais substituiu a vegetação arbórea foi a área urbana expansão, com 5,91 hectares.

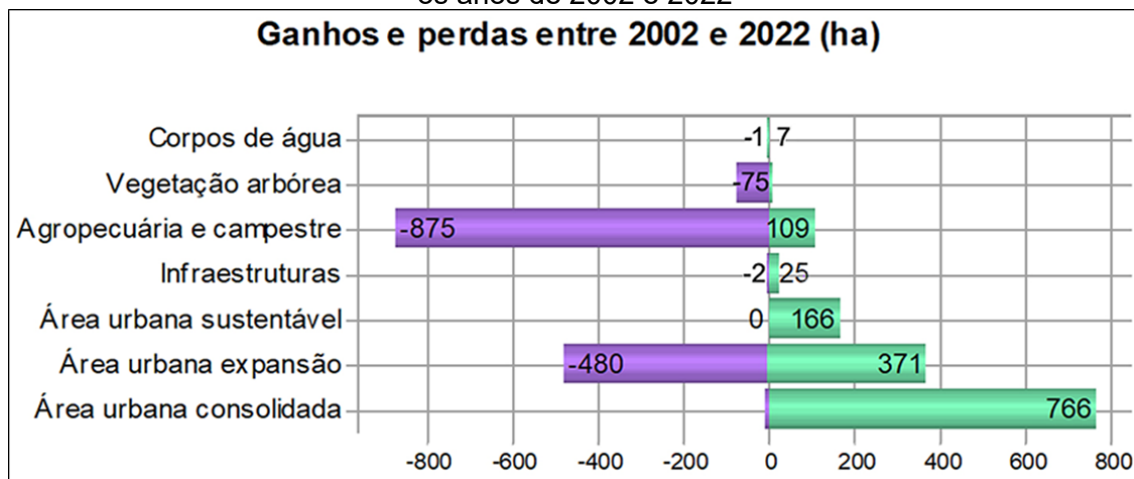
A quarta classe mais abrangente, área urbana expansão, ocupava 534,43 hectares em 2022, ou 11,08% da área. Ela reduziu sua amplitude em 109,31 hectares com relação ao ano de 2002. Suas maiores perdas de área foram para a área urbana consolidada, em um total de 400,44 hectares. No entanto, por ser uma classe que representa as novas áreas ocupadas pelas infraestruturas urbanas, ela se expandiu para novos locais, onde a cidade se amplia. A Tabela 3 mostra os dados relativos às classes de uso da terra, áreas e porcentagens existentes na área estudada no ano de 2022.

Tabela 3 – Taxas de uso da terra na CBHRL no ano de 2022

Classe de uso	Área (ha)	Porcentagem
Área urbana consolidada	1.728,33	35,84
Área urbana expansão	534,43	11,08
Área urbana sustentável	166,86	3,46
Infraestruturas	135,72	2,81
Agropecuária e campestre	1.703,14	35,31
Vegetação arbórea	542,43	11,25
Corpos de água	11,83	0,25
Total	4.822,74	100,00

Fonte: Elaborado pelos autores.

Quando se analisa as mudanças no uso da terra em uma determinada área é necessário considerar que algumas classes de uso apresentam forte dinamismo na sua localização, mudando de local ao longo do tempo. Isto pode ser observado na área estudada, principalmente com a classe agropecuária e campestre, que foi amplamente substituída por outros usos, mas também ocupou novas áreas, como pode ser observado na Figura 5, que mostra os dados gerados pelo LCM. Nela verifica-se que a perda total de áreas da classe foi de 875 hectares. Estas perdas foram para as classes área urbana consolidada, expansão urbana, área urbana sustentável e infraestrutura. Mas ela também ganhou 109 hectares de outros usos ao longo do tempo, principalmente da classe vegetação arbórea, de quem ocupou 60,44 hectares.

Figura 5 – Perdas e ganhos entre as classes de uso e cobertura da terra no período entre os anos de 2002 e 2022

Fonte: Elaborado pelos autores.

Neste contexto de mudanças no uso da terra e ampliação das áreas impermeabilizadas, as águas pluviais passam a ter sua infiltração reduzida e o seu escoamento superficial aumentado (Costa *et al.*, 2019; Tucci, 2007). Considerando-se que as taxas de infiltração mudem de 40% para 20% (Brasil, 2022; DAEE, 2005; Tucci, 2007) ao se substituir a classe

área urbana expansão para área urbana consolidada, o escoamento superficial é ampliado em 33,33%. Isso ocorreu em 400,44 hectares.

Considerando-se uma precipitação média anual em Botucatu de 1.534,47 milímetros (Franco *et al.*, 2023), precipitam sobre a área da CBHRL (4.822,74 hectares) 74.003.498,48 m³ de água ao longo do ano. Como Botucatu apresenta clima do tipo Aw, com verões quentes e úmidos e invernos frios e secos, normalmente as precipitações se concentram nos meses de verão, o que faz com que em determinados dias as chuvas apresentem volumes consideráveis.

A título de exemplo, no dia 10 de fevereiro de 2020 ocorreu uma chuva de 284 milímetros (Franco *et al.*, 2023), que causou fortes enxurradas que destruíram pontes e arrastaram casas e pessoas, causando prejuízos e mortes. Sobre a área urbana consolidada que abrangia 1.728,33 hectares em 2022, esta chuva de 284 milímetros precipitou 4.908.457,2 m³. Usando-se a taxa de escoamento superficial de 0,8, estabelecida por Brasil (2022) e DAEE (2005), o total de água escoada sobre esta classe de uso foi de 3.926.765,76 m³.

Os dados referentes ao escoamento superficial das demais classes de uso para a mesma condição são apresentados na Tabela 4, que mostra também os valores referentes às taxas de infiltração usadas no cálculo, as áreas total e impermeabilizada e o volume escoado superficialmente, para uma chuva de 284 milímetros no ano de 2022. Nela é possível observar que, para esta chuva, o volume total escoado por todas as classes de uso da terra foi de 6.974.065,88 m³.

Tabela 4 – Estimativa do escoamento superficial na CBHRL para uma chuva de 284 milímetros

Classe de uso	Área (ha)	Taxa de impermeabilização	Área impermeabilizada (ha)	Volume superficial escoado (m ³)
Área urbana consolidada	1.728,33	0,8	1.382,66	3.926.765,76
Área urbana expansão	534,43	0,6	320,66	910.668,72
Área urbana sustentável	166,86	0,4	66,74	189.552,96
Infraestruturas	135,72	0,8	108,58	308.355,84
Agropecuária e campestre	1.703,14	0,3	510,94	1.451.075,28
Vegetação arbórea	542,43	0,1	54,24	154.050,12
Corpos de água	11,83	1	11,83	33.597,20
Total	4.822,74		2.455,66	6.974.065,88

Fonte: Elaborado pelos autores.

Ao compararmos as áreas ocupadas pela área urbana consolidada entre os dois anos estudados, verificamos que o escoamento superficial aumentou consideravelmente para precipitações equivalentes, conforme a classe se expandiu pela CBHRL. Este aumento no

escoamento superficial, ocorrido de 2002 a 2022, potencializa os estragos feitos pelas enxurradas e inundações (Ferraz, 2021; Pontini; Coelho, 2022; Tucci, 2012) e demanda ações ainda mais intensas por parte da prefeitura do município. Entre aquelas já tomadas, destaca-se a ampliação do canal do rio em vários trechos, como visto na Figura 6, que mostra parte do Rio Lavapés em local próximo a uma de suas nascentes. Nela observa-se o rio em condições próximas do natural em dezembro de 2019, à esquerda, e retificado, ampliado e canalizado em julho de 2020.

Ações como a mostrada na Figura 6 possuem, no entanto, efeitos limitados às condições atuais de ocupação do solo na CBHRL, uma vez que se a área urbana continuar se expandindo no mesmo ritmo no período de 2002 a 2022 (37,77 ha/ano), em 41 anos (2063) a metade da CBHRL estará ocupada por área urbana consolidada, o que ampliará o escoamento superficial. Caso a área mantenha o ritmo de crescimento apresentado no período estudado, em 82 anos (2104) estará totalmente urbanizada. Neste cenário, o escoamento superficial pode alcançar 10.957.215,76 de m³ em uma chuva de 284 milímetros. Ou seja, um volume escoado na superfície 86,97% maior do que aquele que escoava em 2002.

Figura 6 – Trecho do Rio Lavapés no ano de 2019 (esquerda) e no ano de 2020 (direita)



Fonte: (Google [...], 2024). Organizado pelos autores.

Em condições como esta, as ampliações e canalizações do leito dos rios poderão não ser suficientes para receber toda água escoada até eles. Neste cenário, se não forem tomadas providências de planejamento, gestão e manejo integrado da área, como retenção temporária, retardo no escoamento e aumento da infiltração, as enxurradas e inundações serão corriqueiras, tanto para o ano de 2063 quanto para o ano de 2104. Deve-se considerar também os efeitos das mudanças climáticas, que não foram diretamente avaliados neste trabalho, mas que poderão potencializar chuvas concentradas.

Há que se levar em conta, ainda considerando as mudanças climáticas, os riscos relativos às estiagens, pois nestes casos os corpos d'água da área correrão sérios riscos de secarem, uma vez que as águas que escoam superficialmente não infiltram no solo, deixando

de recarregá-lo com água, rebaixando o nível de base e, em muitos casos, comprometendo ou secando nascentes (Costa *et al.*, 2019; Tucci, 2007).

A Figura 7 mostra algumas características da ocupação da área da CBHRL que justificam a concentração superficial das águas pluviais e a ocorrência de enxurradas, bem como o acúmulo de sedimentos e entulhos em alguns trechos dos corpos d'água. Na Figura 7A é possível observar a ocupação de áreas consideráveis por novos conjuntos habitacionais, que, com construções de grande porte e próximas umas das outras, impermeabilizam significativamente o solo. A Figura 7B mostra a declividade significativa em algumas áreas da CBHRL, onde as ruas implantadas no sentido do declive aceleram a velocidade das águas superficiais, que concentradas chegam rapidamente ao Rio Lavapés, elevando seu nível rapidamente, quando da ocorrência de chuvas intensas. A Figura 7C mostra a fotografia do leito do Rio Lavapés na região central da cidade de Botucatu. Nela é possível observar o assoreamento no leito do rio e as estruturas de proteção do barranco. Já a Figura 7D apresenta o final de um trecho canalizado, onde se observa a erosão no fundo do rio e o acúmulo de detritos e de lixo.

Figura 7 – Registro fotográfico em diferentes locais na CBHRL



Fonte: Os autores.

Este conjunto de fotografias apresentados na Figura 7 demonstra que a área da CBHRL precisa de monitoramento contínuo quanto à ocupação de seu território, da mesma forma que dos seus corpos d'água, pois o aumento das áreas impermeabilizadas, as ruas declivosas, o assoreamento dos rios e o acúmulo de sedimentos em seus leitos tendem a potencializar as inundações nas áreas de fundo de vale próximas aos rios, aumentando os riscos à população da cidade de Botucatu.

O monitoramento deve ser feito pela prefeitura do município, assim como pela população, uma vez que ela pode sofrer as consequências da falta de planejamento da ocupação do território e das ações de manejo mal executadas. Para que a população se torne agente de transformação, é necessário que os órgãos responsáveis pela normatização do uso da terra, bem como pelo planejamento, gestão e manejo dos recursos naturais, sobretudo da água, no município, divulguem informações acerca das condições, tanto da área da bacia, quanto dos corpos d'água, mostrando o papel de cada um e os riscos que os cidadãos correm caso não se atentem para as mudanças que estão ocorrendo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As análises desenvolvidas neste trabalho demonstram que a CBHRL passou por importantes alterações no uso e na cobertura da terra, na maior parte de suas áreas, nos anos de 2002 e 2022. As mudanças mais significativas estão relacionadas ao aumento da área urbana consolidada, impactando consideravelmente na redução das taxas de infiltração e de retenção temporária da água das chuvas e no aumento do escoamento superficial instantâneo.

Esta situação potencializa eventos como aquele ocorrido em 10 de fevereiro de 2020, quando parte significativa da área urbana de Botucatu passou por significativas enxurradas e inundações, causando prejuízos à população. Neste contexto, as informações trazidas por esta pesquisa servem de alerta para as consequências da ocupação do território sem planejamento e são fundamentais para a definição de políticas públicas, tanto de formas sustentáveis de ocupação de novos espaços, quanto para ajustes naqueles locais onde os riscos de desastres são altos.

Depreende-se das observações realizadas neste trabalho que há deficiência no planejamento da expansão urbana e das infraestruturas voltadas para a drenagem das águas pluviais. Observou-se que isso tem causado também processos erosivos em vários pontos da CBHRL e que o solo transportado causa o assoreamento dos fundos de vale, trazendo prejuízos importantes para o ecossistema dos corpos d'água, comprometendo o ambiente e praticamente extinguindo todas as formas de vida ali existentes.

Os dados obtidos reforçam a importância de gestores públicos e privados preparados e de membros da população conhecedores das diferentes formas de uso da terra e dos impactos de sua mudança sem planejamento. Isso permite que medidas de correção e de convivência com as mudanças nos usos da terra, sobretudo em tempos de mudanças climáticas, sejam tomadas visando a adequação nas técnicas de manejo dos solos e das águas. Esta condição preserva também a segurança das pessoas e a qualidade dos ecossistemas.

REFERÊNCIAS

- AKINNAWO, Solomon Oluwaseun. Eutrophication: causes, consequences, physical, chemical, and biological techniques for mitigation strategies. **Environmental Challenges**, Amsterdam, v. 12, p. 1-18, Aug. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envc.2023.100733>.
- ALVES, Wellmo dos Santos; MARTINS, Alécio Perini; PÔSSA, Évelyn Márcia; MOURA, Derick Martins Borges de; MORAIS, Wilker Alves; FERREIRA, Raina Santos; SANTOS, Leonardo Nazário Silva dos. Geotechnologies applied in the analysis of land use and land cover (LULC) transition in a hydrographic basin in the Brazilian Cerrado. **Remote Sensing Applications**, Amsterdam, v. 22, p. 1-10, Apr. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100495>.
- ARMENTERAS, Dolores; MURCIA, Uriel; GONZÁLEZ, Tania Marisol; BARÓN, Oscar Javier; ARIAS, Jorge Eliecer. Scenarios of land use and land cover change for NW Amazonia: impact on forest intactness. **Global Ecology And Conservation**, Amsterdam, v. 17, p. 1-13, Jan. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2019.e00567>.
- ASSALVE, Layla Cristina de Freitas; FUZZO, Daniela Fernanda da Silva. Utilização da ferramenta LCM do idrisi /taiga para análise de perdas e ganhos no uso da terra na zona de amortecimento da estação ecológica de Assis (SP). **Holos Environment**, Rio Claro, v. 21, n. 2, p. 249-263, Mar. 2021. DOI: <https://doi.org/10.14295/holos.v21i2.12439>.
- ASTUTI, Ike Sari; SAHOO, Kamalakanta; MILEWSKI, Adam; MISHRA, Deepak R. Impact of land use land cover (LULC) change on surface runoff in an increasingly urbanized tropical watershed. **Water Resources Management**, Amsterdam, v. 33, n. 12, p. 4087-4103, Sept. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02320-w>.
- AZADI, Hossein; BARATI, Ali Akbar; NOOGHABI, Saeedeh Nazari; SCHEFFRAN, Jürgen. Climate-related disasters and agricultural land conversion: towards prevention policies. **Climate And Development**, Abingdon, v. 14, n. 9, p. 814-828, Feb. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1080/17565529.2021.2008291>.
- BATISTA, Daiane Cardoso Lopes; VIEIRA, Antonio Fábio Sabbá Guimarães; MARINHO, Rogério Ribeiro. Uso do 'GOOGLE EARTH PRO' no mapeamento de voçorocas na área urbana de Manaus (AM), Brasil. **Geosaberes**, Fortaleza, v. 10, n. 20, p. 1-12, jan./abr. 2019. DOI: <https://doi.org/10.26895/geosaberes.v10i20.689>.
- BRASIL. **Conceitos básicos de hidrologia e drenagem para projetos rodoviários**. Brasília, DF: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2022.
- CARVALHO, Ana C. P.; CARVALHO, Ana P. P.; GOMES, Tamara M.; ROSSI, Fabrício. Spatiotemporal analysis of land use and land cover using remote sensing. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 45, n. 1, p. 1-10, Apr. 2025. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v45nespe120240180/2025>.

COSTA, Adriana da; SALIS, Hugo de; VIANA, João; PACHECO, Fernando Leal. Groundwater recharge potential for sustainable water use in urban areas of the Jequitiba River Basin, Brazil. **Sustainability**, Basel, v. 11, n. 10, p. 1-20, May 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11102955>.

CRED – CENTRE FOR RESEARCH ON THE EPIDEMIOLOGY OF DISASTERS. **2022 disasters in numbers**. Brussels: CRED, 2023.

CUI, Jian; ZHU, Mingshui; LIANG, Yong; QIN, Guangjiu; LI, Jian; LIU, Yaohui. Land use/land cover change and their driving factors in the Yellow River Basin of Shandong Province based on google earth engine from 2000 to 2020. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, Hannover, v. 11, n. 3, p. 1-18, Feb. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgi11030163>.

DAEE – DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. **Guia prático para projetos de pequenas obras hidráulicas**. São Paulo: DAEE, 2005.

DELGADO, María Isabel; CAROL, Eleonora; CASCO, María Adela. Land-use changes in the periurban interface: hydrologic consequences on a flatland-watershed scale. **Science Of The Total Environment**, Amsterdam, v. 722, p. 1-14, June 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137836>.

DESTA, Hayal; FETENE, Aramde. Land-use and land-cover change in Lake Ziway watershed of the Ethiopian Central Rift Valley Region and its environmental impacts. **Land Use Policy**, Amsterdam, v. 96, p. 1-12, July 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104682>.

DUAN, Xinyi; CHEN, Yan; WANG, Lingqing; ZHENG, Guodi; LIANG, Tao. The impact of land use and land cover changes on the landscape pattern and ecosystem service value in Sanjiangyuan region of the Qinghai-Tibet Plateau. **Journal Of Environmental Management**, Amsterdam, v. 325, p. 1-10, Jan. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116539>.

EASTMAN, John Ronald. **Idrisi Taiga Tutorial**. Massachusetts: Clark Labs, 2009. Disponível em: www.clarklabs.org. Acesso em: 14 ago. 2019.

FENG, Boyu; ZHANG, Ying; BOURKE, Robin. Urbanization impacts on flood risks based on urban growth data and coupled flood models. **Natural Hazards**, Berlim, v. 106, n. 1, p. 613-627, Jan. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04480-0>.

FERRAZ, Caio Mário Leal. Inundações e alagamentos em meio urbano: uma perspectiva teórico-conceitual, em abordagem geomorfológica. **Vozes dos Vales**, Diamantina, v. 10, n. 20, p. 1-16, out. 2021. Disponível em: <http://site.ufvjm.edu.br/revistamultidisciplinar/files/2021/10/Ferraz.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2024.

FLORENZANO, Teresa Gallotti. **Iniciação em sensoriamento remoto**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

FRANCO, José Rafael; DAL PAI, Enzo; CALÇA, Marcus Vinícius Contes; RANIERO, Matheus Rodrigues; DAL PAI, Alexandre; SARNIGHAUSEN, Valeria Cristina Rodrigues; SANCHÉZ-ROMÁN, Rodrigo Máximo. Atualização da normal climatológica e classificação climática de köppen para o município de Botucatu-SP. **Irriga**, Botucatu, v. 28, n. 1, p. 77-92, Mar. 2023. DOI: <https://doi.org/10.15809/irriga.2023v28n1p77-92>.

GHALEHTEIMOURI, Kamran Jafarpour; ROS, Faizah Che; RAMBAT, Shuib. Flood risk assessment through rapid urbanization LULC change with destruction of urban green infrastructures based on NASA Landsat time series data: a case of study Kuala Lumpur between 1990-2021. **Ecological Frontiers**, Amsterdam, v. 44, n. 2, p. 289-306, Apr. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2023.06.007>.

GOOGLE earth pro: versão 7.3.6.9345. Mountain View: Google Inc., 2024.

GUPTA, Rajit; SHARMA, Laxmi Kant. Efficacy of spatial land change modeler as a forecasting indicator for anthropogenic change dynamics over five decades: a case study of shoolpaneshwar wildlife sanctuary, Gujarat, India. **Ecological Indicators**, Amsterdam, v. 112, p. 1-19, May 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolond.2020.106171>.

HAILU, Alemenesh; MAMMO, Siraj; KIDANE, Moges. Dynamics of land use, land cover change trend and its drivers in Jimma Geneti District, Western Ethiopia. **Land Use Policy**, Amsterdam, v. 99, p. 1-11, Dec. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.105011>.

HASAN, Shaikh Shamim; ZHEN, Lin; MIAH, Md. Giashuddin; AHAMED, Tofayel; SAMIE, Abdus. Impact of land use change on ecosystem services: a review. **Environmental Development**, Amsterdam, v. 34, p. 1-14, June 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2020.100527>.

JENSEN, John R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos: Parêntese, 2009.

LIMA, Walter de Paula; ZAKIA, José Brito Zakia. Hidrologia de matas ciliares. *In*: RODRIGUES, Ricardo Ribeiro; LEITÃO FILHO, Hermógenes de Freitas (org.). **Matas ciliares: conservação e recuperação**. São Paulo: EDUSP; FAPESP, 2000. p. 33-44.

MACHADO, Ronalton Evandro; CARDOSO, Tais Oliveira; MORTENE, Matheus Henrique. Determination of runoff coefficient (C) in catchments based on analysis of precipitation and flow events. **International Soil And Water Conservation Research**, Shaanxi Province, v. 10, n. 2, p. 208-216, June 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.09.001>.

MARENGO, Jose A.; SELUCHI, Marcelo E.; CUNHA, Ana Paula; CUARTAS, Luz Adriana; GONCALVES, Demerval; SPERLING, Vinicius B.; RAMOS, Andrea M.; DOLIF, Giovanni; SAITO, Silvia; BENDER, Fabiani. Heavy rainfall associated with floods in southeastern Brazil in November–December 2021. **Natural Hazards**, Berlim, v. 116, n. 3, p. 3617-3644, Jan. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-023-05827-z>.

MELLO, Kaline de; TANIWAKI, Ricardo Hideo; PAULA, Felipe Rossetti de; VALENTE, Roberta Aversa; RANDHIR, Timothy O.; MACEDO, Diego Rodrigues; LEAL, Cecília Gontijo; RODRIGUES, Carolina Bozetti; HUGHES, Robert M. Multiscale land use impacts on water quality: assessment, planning, and future perspectives in Brazil. **Journal Of Environmental Management**, Amsterdam, v. 270, p. 1-16, Sept. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110879>.

OLIVEIRA, Paulo de Sousa; GRACELLI, Rafaela Ribeiro; SILVA, Arthur Amaral; SANTOS, Vitor Juste; CASTRO, Jackeline de Siqueira; CALIJURI, Maria Lúcia. Projection of land use to 2030 and its impacts on water availability in a Brazilian sub-basin: a LCM and swat approach. **Geofísica Internacional**, Ciudad de México, v. 61, n. 1, p. 66-87, Jan./Mar. 2022. DOI: <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2022.61.1.2189>.

PACHECO, Suzeane da Fonseca; RODRIGUES, Rodrigo Silvano Silva; BITTENCOURT, Germana Menescal; FERNANDES, Lindemberg Lima; CRISPIM, Diêgo Lima. Evolução do coeficiente de escoamento superficial do câmpus de Ananindeua da Universidade Federal do Pará. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, Belém, v. 9, n. 2, p. 229-239, dez. 2017. Disponível em: <https://revistas.uepg.br/index.php/ret/article/view/11280>. Acesso em: 12 dez. 2024.

PADMA, Srinivasaperumal; LAKSHMI, Sivakumar Vidhya; PRAKASH, Ramaiah; SRIVIDHYA, Sundaresan; SIVAKUMAR, Aburpa Avanachari; DIVYAH, Nagarajan; CANALES, Cristian; FLORES, Erick I. Saavedra. Simulation of land use/land cover dynamics using google earth data and QGIS: a case study on outer ring road, Southern India.

Sustainability, Basel, v. 14, n. 24, p. 1-16, 7 Dec. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su142416373>.

PONTINI, Vinícius Vieira; COELHO, André Luiz Nascentes. Aspectos físico-sociais das inundações e enxurradas na sub-bacia de drenagem do rio Iconha, Estado do Espírito Santo. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 23, n. 86, p. 139-155, abr. 2022. DOI: <https://doi.org/10.14393/RCG238658385>.

PREIS, Christian Milanez; FRANCO, Davide; VARELA, Sophia Cavalcante. Avaliação do uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do rio Itajaí e simulação para 2027. **Geociências**, São Paulo, v. 40, n. 2, p. 407-414, ago. 2021. DOI: <https://doi.org/10.5016/geociencias.v40i02.14321>.

PROKEŠLOVÁ, Roberta; HORÁČKOVÁ, Šárka; SNOPOKOVÁ, Zora. Surface runoff response to long-term land use changes: spatial rearrangement of runoff-generating areas reveals a shift in flash flood drivers. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 815, p. 1-17, Apr. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151591>.

SANTOS, Alex Mota; CARMO, Nadyelle Curcino do; NUNES, Fabrizia Gioppo; AGUIAR, Larissa Andrade de; SILVA, Carlos Fabricio Assunção da. Digital image classification: a comparison of classic methods for land cover and land use mapping. **Anuário do Instituto de Geociências**, Rio de Janeiro, v. 45, p. 1-10, Aug. 2022. DOI: https://doi.org/10.11137/1982-3908_2022_45_47481.

SARASWAT, Chitresh; KUMAR, Pankaj; MISHRA, Binaya Kumar. Assessment of stormwater runoff management practices and governance under climate change and urbanization: an analysis of Bangkok, Hanoi and Tokyo. **Environmental Science & Policy**, London, v. 64, p. 101-117, Oct. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.06.018>.

SEIDL, Martin; HADRIKH, Bilel; PALMIER, Luiz; PETRUCCI, Guido; NASCIMENTO, Nilo. Impact of urbanisation (trends) on runoff behaviour of Pampulha watersheds (Brazil). **Environmental Science and Pollution Research**, Berlin, v. 27, n. 13, p. 14259-14270, Aug. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06029-6>.

SILVA, Daniela; GALVANIN, Edinéia A. S.; MENEZES, Raquel. Spatio-temporal analysis of land use/land cover change dynamics in Paraguai/Jauquara Basin, Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, Berlin, v. 194, n. 6, p. 1-20, May 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10052-5>.

SILVA, Gean Carlos Gonzaga da; CAMPOS, Priscila Celebrini de Oliveira; REIS, Marcelo de Miranda; PAZ, Igor. Spatiotemporal land use and land cover changes and associated runoff impact in Itaperuna, Brazil. **Sustainability**, Basel, v. 16, n. 1, p. 1-19, Dec. 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16010325>.

SINGH, Bhavna; VENKATRAMANAN, Veluswamy; DESHMUKH, Benidhar. Monitoring of land use land cover dynamics and prediction of urban growth using land change modeler in Delhi and its environs, India. **Environmental Science and Pollution Research**, Berlin, v. 29, n. 47, p. 71534-71554, May 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20900-z>.

SOUZA JR., Carlos Moreira *et al.* Reconstructing three decades of land use and land cover changes in Brazilian biomes with Landsat archive and Earth Engine. **Remote Sensing**, Basel, v. 12, n. 17, p. 1-27, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12172735>.

SULLA-MENASHE, Damien; GRAY, Josh M.; ABERCROMBIE, S. Parker; FRIEDL, Mark A. Hierarchical mapping of annual global land cover 2001 to present: the MODIS collection 6 land cover product. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v. 222, p. 183-194, Mar. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.12.013>.

TECK, Vanna; POORTINGA, Ate; RIANO, Carlos; DAHAL, Kshitij; LEGASPI, Richelle Marie B.; ANN, Vannak; CHEA, Ratha. Land use and land cover change implications on agriculture and natural resource management of Koah Nheak, Mondulkiri Province, Cambodia.

Remote Sensing Applications, Amsterdam, v. 29, p. 1-16, Jan. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100895>.

TEWOLDE, Mussie; CABRAL, Pedro. Urban sprawl analysis and modeling in Asmara, Eritrea. **Remote Sensing**, Basel, v. 3, n. 10, p. 2148-2165, Sept. 2011. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs3102148>.

TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. **Gestão da drenagem urbana**. Brasília, DF: CEPAL; IPEA, 2012.

TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. **Inundações urbanas**. Porto Alegre: ABRH; RHAMA, 2007.

WINKLER, Karina; FUCHS, Richard; ROUNSEVELL, Mark; HEROLD, Martin. Global land use changes are four times greater than previously estimated. **Nature Communications**, Berlin, v. 12, n. 1, p. 1-10, May 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22702-2>.

XAVIER, Ana Paula Campos; SILVA, Richarde Marques da. Modelagem temporal dinâmica do uso e ocupação do solo baseado em SIG para a Bacia do Rio Tapacurá (PE).

Geociências, São Paulo, v. 37, n. 1, p. 193-210, jan. 2018. DOI: <https://doi.org/10.5016/geociencias.v37i1.12623>.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pela Bolsa de Produtividade, PQ-2, Processo 305621/2022-0, concedida ao primeiro autor.

Recebido: abril de 2025.

Aceito: maio de 2025.