

Simulação do Uso e Cobertura da Terra na Área de Entorno da UHE Itutinga (Minas Gerais)

Douglas Felipe Lucas^{1*}, Bráulio Magalhães Fonseca², Ítalo Sousa de Sena³, Marcelo Antônio Nero⁴

¹Mestre em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil. (*Autor correspondente: douglasflucas@gmail.com)

²Professor Doutor em Geografia/Análise Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil.

³Doutor em Geografia/Análise Ambiental, University College Dublin, Irlanda.

⁴Professor Doutor em Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, Brasil.

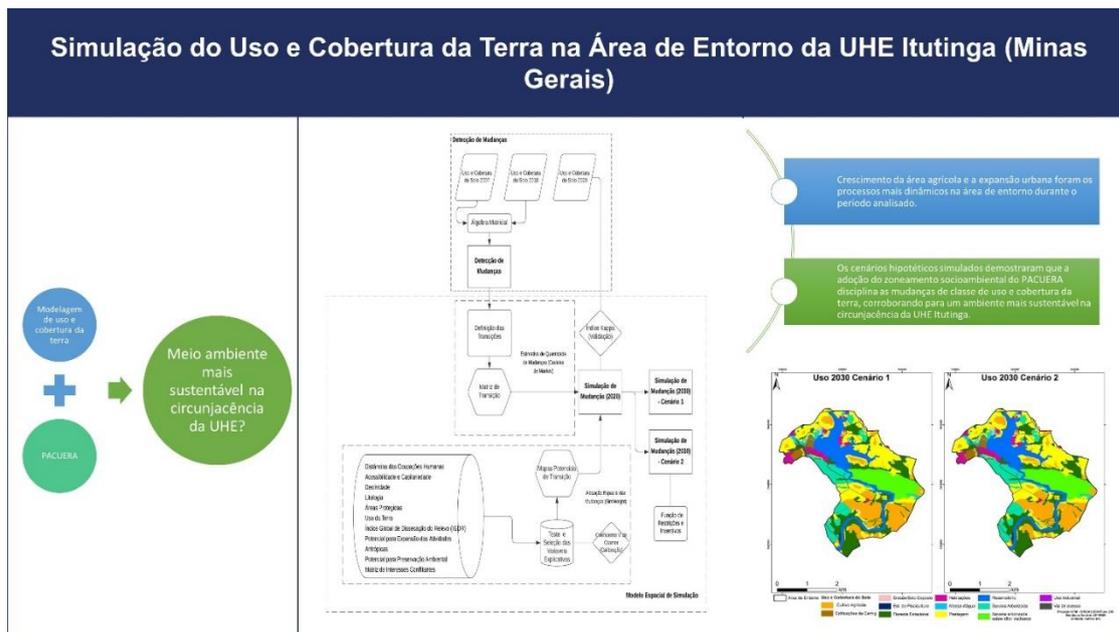
Histórico do Artigo: Submetido em: 06/03/2023 – Revisado em: 19/09/2023 – Aceito em: 26/10/2023

RESUMO

A implantação e a operação de usinas hidrelétricas podem causar danos ao meio ambiente. Diante deste cenário passou a ser exigida, em seu licenciamento, a apresentação do PACUERA; definido como um conjunto de diretrizes e proposições com o objetivo de disciplinar a conservação, recuperação, o uso e ocupação do entorno do reservatório. Um dos subsídios para a delimitação do zoneamento socioambiental é a predição das mudanças de uso e cobertura da terra. O objetivo deste trabalho é construir um modelo preditivo de mudança de uso e cobertura da terra para o ano de 2030 no entorno da UHE Itutinga em Minas Gerais, e simular dois cenários: sem considerar as diretrizes de uso presentes no zoneamento do PACUERA e assumindo a implementação das diretrizes. Tal simulação foi realizada no software IDRISI Selva, com cálculo das taxas e potenciais de transição com base em Cadeias de Markov e SimWeight, respectivamente. Os resultados do modelo revelam uma tendência de crescimento das atividades agrícolas e expansão urbana em detrimento de áreas de pastoreio e vegetação natural nativa. Os cenários hipotéticos simulados demonstraram que a adoção do zoneamento do PACUERA disciplina as mudanças de classe de uso e cobertura da terra, corroborando para um ambiente mais sustentável na circunjangência da UHE.

Palavras-Chaves: Ordenamento Territorial. Modelagem de Sistemas Ambientais. PACUERA.

RESUMO GRÁFICO // GRAPHICAL ABSTRACT



Lucas, D. F., Fonseca, B. M., Sena, Í.S, Nero, M. A. (2023). Simulação do Uso e Cobertura da Terra na Área de Entorno da UHE Itutinga (Minas Gerais). Revista Brasileira de Meio Ambiente, v.11, n.3, p.106-121.



Land Use and Coverage Simulation in the area surrounding of Itutinga HPP (Minas Gerais)

ABSTRACT

The implementation and operation of hydroelectric power plants can cause damage to the environment. Given this scenario, the presentation of the PACUERA is now required in its licensing; defined as a set of guidelines and propositions to discipline the conservation, recovery, use and occupation of the reservoir's surroundings. One of the subsidies for the delimitation of socio-environmental zoning is the prediction of changes in land use and coverage. The objective of this work is to build a predictive model of land use and coverage change for the year 2030 around the HPP Itutinga in Minas Gerais, and to simulate two scenarios: without considering the usage guidelines present in the PACUERA zoning and assuming the implementation of the guidelines. Such simulation was performed in IDRISI Selva software, with the calculation of transition rates and potentials based on Markov Chains and SimWeight, respectively. The model results reveal a trend of growth in agricultural activities and urban expansion at the expense of grazing areas and native natural vegetation. The simulated hypothetical scenarios demonstrated that the adoption of PACUERA zoning disciplines changes in land use and land cover classes, supporting a more sustainable environment in the vicinity of the HPP.

Keywords: Territorial Planning. Environmental Systems Modelling. PACUERA.

1. Introdução

O crescimento acelerado das atividades humanas, principalmente ao longo dos dois últimos séculos, modificou a superfície do planeta. A demanda progressiva por energia é um agente relevante deste processo. No Brasil, devido ao seu elevado potencial de aproveitamento hidráulico, 68,1% da energia elétrica é proveniente de usinas hidrelétricas (EPE, 2018). Contudo, a implantação e operação de usinas podem causar degradação dos ecossistemas terrestres e aquáticos e sua biodiversidade, estes verificáveis ao longo e além do tempo de vida da usina, bem como ao longo do espaço físico envolvido (Guerra; Carvalho, 1995; Sousa, 2000).

Face aos danos impostos ao meio ambiente e às comunidades os empreendimentos hidrelétricos, quando vistos como de interesse coletivo de uma sociedade, propiciam uma melhor qualidade de vida através da oferta de energia e promoção do uso racional e sustentável dos recursos naturais. No entanto, para que isso ocorra, são necessários a gestão e o planejamento ambiental eficientes a partir das fases iniciais do projeto, passando pela etapa de obras e ao longo da vida útil da usina a fim de minimizar os efeitos negativos e maximizar os benefícios (Sousa, 2000).

Dentro desse contexto deve-se inserir o Plano Ambiental de Conservação e Uso do Entorno de Reservatório Artificial (PACUERA). De acordo com a definição da Resolução nº 302/2002 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2002) o PACUERA é um conjunto de diretrizes e proposições com o objetivo de disciplinar a conservação, recuperação, o uso e ocupação do entorno do reservatório artificial, de forma a garantir a conservação ambiental dos recursos hídricos. A elaboração do PACUERA é realizada abrangendo os meios físico, biótico e socioeconômico.

Inicia-se com um diagnóstico socioambiental da área de entorno, a fim de realizar sua caracterização e identificar peculiaridades, necessidades, potenciais e fragilidades. Depois são propostos o zoneamento socioambiental e as diretrizes para cada zona proposta. A fim de consolidar o zoneamento, é realizada a consulta pública, onde a proposta é exposta à população, órgãos públicos, associações e entidades interessadas, para sua discussão, objetivando uma gestão integrada dos usos múltiplos do reservatório e seu entorno, especialmente a médio e longo prazos (Lucas, 2021).

Um dos subsídios para a delimitação do zoneamento socioambiental é a detecção e predição das mudanças de uso e cobertura da terra. O estudo do mesmo é responsável pela detecção de uma série de aspectos da mudança ambiental global e suas forças dirigentes, tendo por isso recebido crescente atenção dos cientistas e tomadores de decisão. Nas últimas duas décadas, o foco da investigação tem se direcionado para a modelagem de sistemas, através da previsão de mudanças e da exploração de possíveis cenários futuros (Mas et al., 2014; Oliveira, 2012).

A ampla disponibilização de dados de sensoriamento remoto e o desenvolvimento e popularização de plataformas de Geoprocessamento, em especial os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) impulsionou e facilitou esta tendência (Carvalho de Lima et al., 2013). A modelagem espacialmente explícita é uma importante técnica para projetar e explorar cenários alternativos futuros, para conduzir experimentações que auxiliam no entendimento e quantificação dos processos envolvidos na dinâmica da paisagem (Mas et al.,

2014). Este enfoque exploratório e prospectivo permite que os modelos sejam usados como ferramentas de suporte ao planejamento e análise ambiental e têm-se tornado um importante instrumento de auxílio ao ordenamento territorial (Oliveira, 2012).

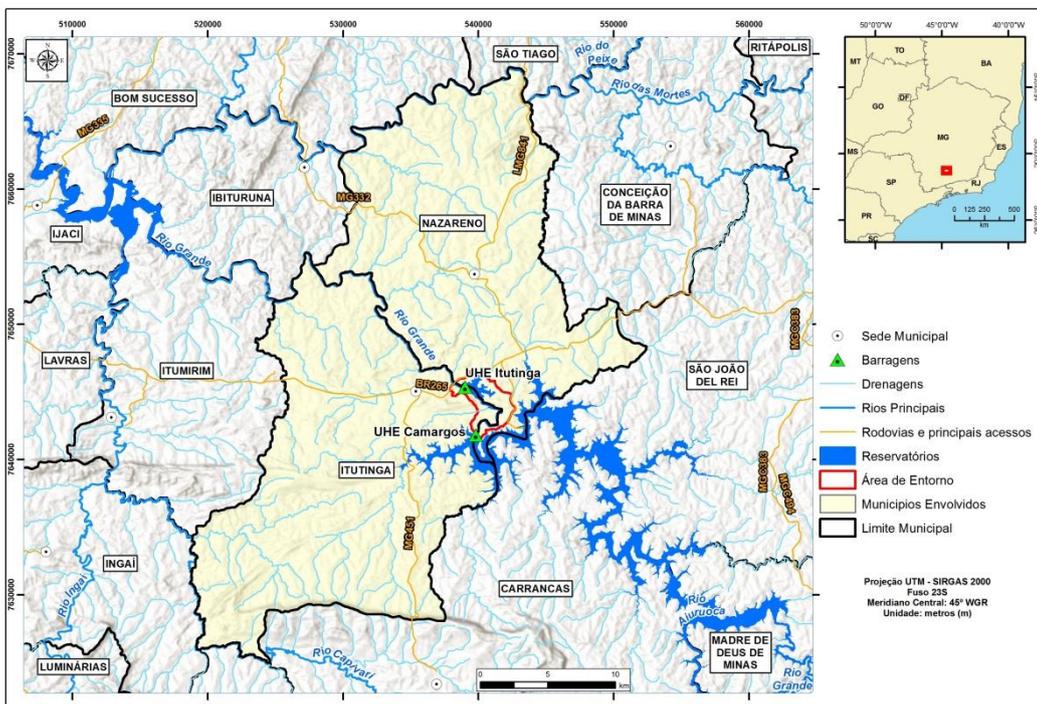
Neste contexto o trabalho tem como principal objetivo construir um modelo preditivo de mudança para o ano de 2030 e simular dois cenários hipotéticos: (a) sem considerar as diretrizes de uso presentes no zoneamento socioambiental do PACUERA e (b) assumindo a implementação das diretrizes.

2. Material e Métodos

2.1 Caracterização da área de estudo

A área avaliada corresponde à área de entorno do PACUERA da UHE Itutinga (Brandt Meio Ambiente, 2017), com aproximadamente 1.197 ha. Situada no leito do rio Grande, nas divisas dos municípios de Itutinga e Nazareno, na região sul do estado de Minas Gerais (Figura 1), a UHE Itutinga figura entre os primeiros empreendimento da Cemig (Companhia Energética de Minas Gerais), sua obra foi iniciada em abril de 1952 (CEMIG, 2006).

Figura 1 – Mapa de localização da área de entorno da UHE Itutinga.



Fonte: Autores (2023).

Esta área encontra-se inserido em um mosaico vegetacional composto por um ecótono entre duas fisionomias vegetais distintas: floresta estacional semidecidual do bioma Mata Atlântica e cerrado tropical semidecidual (savana) do bioma Cerrado (IBGE, 1992). Conforme a classificação do IBGE (2012), a área apresenta tipo climático Tropical do Brasil Central, ou seja, quente e semiúmido com 3 a 5 meses mais secos.

A Área de Entorno apresenta modo de vida predominantemente rural, sendo a agricultura e a pecuária as principais atividades econômicas desempenhadas pelas comunidades existentes no local. Desta forma, a área possui potencial para continuidade de tais usos, desde que sejam aplicadas práticas adequadas de manejo.

Isso porque, de forma geral, observa-se que a área apresenta alta suscetibilidade a erosão muito em função das características do relevo e dos solos associadas às intervenções antrópicas

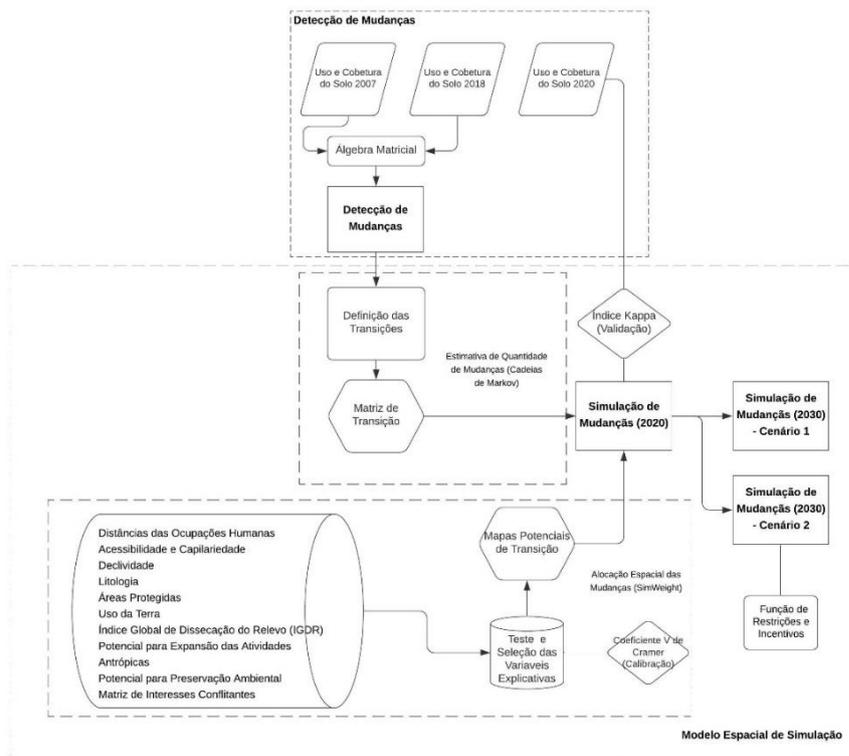
2.2 Procedimentos metodológicos

A metodologia foi composta por duas etapas: detecção de mudanças e modelo espacial de simulação, expostas na figura 2. Na primeira etapa foram gerados três mapas de uso e cobertura da terra em três tempos distintos para a área de entorno do reservatório da UHE Itutinga. A geração destes dados históricos foi embasada pela vetorização de imagens disponibilizadas pelo aplicativo Google Earth, para os anos de 2007 (Google Earth Pro 7.3.3, 2007), 2018 (Google Earth Pro 7.3.3, 2018) e 2020 (Google Earth Pro 7.3.3, 2020) aplicáveis ao padrões de qualidade posicionais do presente trabalho, que são de âmbito regional (1:50.000 e maiores).

As tipologias de uso e cobertura da terra, pré-definidas por chave de interpretação, correspondem a: Cultivo Agrícola, Edificações da Cemig, Erosão/Solo Exposto, Estação de Piscicultura, Floresta Estacional, Habitações, Massa d'água, Pastagem, Reservatório, Savana Arborizada, Savana Arborizada sobre Afloramentos Rochosos, Uso Industrial e Vias de acesso. Na classe Reservatório, o corpo hídrico formado pela barragem da UHE Itutinga foi discriminado a partir da base cartográfica disponibilizada pela Cemig (Lucas, 2021).

A detecção das mudanças ocorridas entre os anos de 2007 e 2018 foi realizada no software ArcGIS 10.5, por meio de álgebra matricial. As mudanças verificadas foram quantificadas por tipologia, sendo possível fazer análises quantitativas e qualitativas. Também foi possível observar as principais tendências de mudanças no período observado, o que permitiu a seleção das transições que foram empregadas no modelo espacial de simulação.

Figura 2 – Fluxograma das etapas metodológicas



Fonte: Autores (2023).

O modelo espacial de simulação foi implementado através do módulo *Land Change Modeler* (LCM), que integra o software IDRISI versão Selva. Desenvolvido pela Clark Labs da Clark University, o LCM dispõe de ferramentas para avaliação e projeção de mudanças de cobertura da terra. O módulo apresenta-se em uma estrutura fixa que divide a modelagem em etapas como: Análise das Mudanças de cobertura da terra (*Change Analysis*), Cálculo dos Potenciais de Transição (*Transition Potentials*), Simulação de Mudanças futuras (*Change Prediction*) além de ferramentas para Avaliação de Intervenções Planejadas no uso da terra (*Planning*) (Eastman, 2012a).

A simulação de uso e cobertura da terra compreende as seguintes etapas: estimativa da quantidade de mudanças, alocação espacial das mudanças e simulação de mudanças futuras. Na estimativa da quantidade de mudanças foram empregados como dados de entrada os mapas de uso e cobertura da terra dos anos de 2007 (inicial) e 2018 (final), sendo empreendido o cálculo das taxas de transição com base em Cadeias de Markov (com base em Paegelow e Olmedo, 2008 e citados por Oliveira, 2012), que informa sobre a quantidade das mudanças a serem simuladas. O produto deste cálculo é a matriz de transição, a qual contém as probabilidades de uma determinada classe permanecer inalterada ou mudar para as outras classes durante certo intervalo de tempo.

O cálculo desta matriz contemplou as transições mais relevantes em relação à área de abrangência e em relação ao objetivo deste trabalho, a saber: 1 – transição de Pastagem para Cultivo Agrícola, 2 – transição de Pastagem para Habitações e 3 – transição de Floresta Estacional para Pastagem. Estas transições foram eleitas por apresentarem valores de mudança acima de 1 hectare no período observado de 2007 a 2018.

A alocação espacial das mudanças foi feita com base nos potenciais de transição. Assim, as probabilidades de mudança de classe foram calculadas a partir do mapa de mudanças e considerando a influência do conjunto de variáveis explicativas espaciais. Como produtos foram gerados os mapas de potenciais de mudanças para cada transição que contém as probabilidades de mudança calculadas para cada pixel.

Este cálculo da alocação espacial das mudanças pode ser aplicado através de diversos métodos. No LCM, é possível utilizar os métodos de regressão logística, aprendizado computacional (*SimWeight*) ou redes neurais (*Multilayer Perceptron*). No presente estudo empregou-se o método *SimWeight*.

A aprendizagem baseada em observação ponderada por similaridade (*SimWeight*) é uma técnica não paramétrica simples para o cálculo de potenciais de transição de mudanças de terreno. Seguindo a base lógica do algoritmo K-vizinho mais próximo (Fix; Hodges, 1989), o *SimWeight* baseia seu cálculo na obtenção de distâncias ponderadas em espaço variável para observações conhecidas para as classes.

No contexto da geração de potenciais de transição para modelagem de mudanças da terra, para cada transição a ser avaliada o modelo deve ter duas classes: a mudança e a persistência. Para cada pixel a ser avaliado, o *SimWeight* extrai os k vizinhos mais próximos (mudança ou persistência) e, em seguida, calcula a distância no espaço variável de cada local desconhecido para as observações de mudança que caem no intervalo de k .

Para obter o valor da distância, uma função de ponderação exponencial é usada com a qual um mapa contínuo de pertencimento a cada classe pode ser calculado. Uma elevada associação de classe para a classe de mudança significaria que um pixel tem condições ambientais semelhantes àquelas que já mudaram e, portanto, pode ser considerado como tendo um alto potencial de transição (Palacios Orejuela, 2020).

A característica mais desejável desse algoritmo é que ele requer apenas um parâmetro – k . O k ideal pode ser testado sobre o conjunto ou subconjunto de dados para validação em uma faixa de valores para k (Sangermano; Eastman; Zhu, 2010). Neste trabalho, após sucessivos testes, o valor de k empregado foi de 50.

As variáveis que explicaram espacialmente, no contexto desse trabalho, as mudanças foram recolhidas de estudo pretérito de identificação de potenciais de uso e seus conflitos realizada Lucas e Fonseca (2021) na área de estudo (Quadro 1). Para seleção das variáveis do modelo, foi realizado o teste estatístico presente no LCM denominado Teste de Poder Explicativo. A medida quantitativa utilizada foi o Coeficiente V de Cramer, que indica o grau de associação de uma variável com a distribuição das classes de uso e cobertura da terra (Eastman, 2012b). Tomando valores entre 0 e 1, o valor 0 corresponde a ausência de associação entre as variáveis, valores próximos de zero correspondem a fraca associação e valores mais próximos de 1 correspondem a associação mais forte. Conforme o Eastman (2011) citado por Fonseca (2015), variáveis com valor de coeficiente V de Cramer próximos de 0.15 são úteis enquanto valores iguais ou acima de 0.4 são boas.

Para o presente estudo, optou-se pelo emprego das variáveis com coeficiente V de Cramer acima de 0.15. O quadro abaixo exhibe as variáveis testadas.

Quadro 1 - Variáveis testadas para modelo espacial de simulação

Variáveis Explicativas	Dimensão e origem do dado
Distância das Ocupações Humanas	1:5.000, (Google Earth Pro 7.3.3, 2007)
Acessibilidade e Capilaridade Viária	1:5.000, (Google Earth Pro 7.3.3, 2007)
Declividade	MDE Resolução 5 m disponibilizado pela Cemig, (Brandt Meio Ambiente, 2017)
Litologia	1:150.000, (Quéméneur et al., 2002)
Potencial para Expansão das Atividades Antrópicas	1:5.000, (Lucas; Fonseca, 2021)
Áreas protegidas	Áreas de Preservação Permanente e Reserva Legal, (Brandt Meio Ambiente, 2017)
Uso do Solo	1:5.000, (Google Earth Pro 7.3.3, 2007)
Área Núcleo	1:5.000, (Google Earth Pro 7.3.3, 2007)
IGDR	MDE Resolução 5 m disponibilizado pela Cemig e Drenagem, (Brandt Meio Ambiente, 2017)
Potencial para Preservação Ambiental	1:5.000, (Lucas; Fonseca, 2021)
Matriz de Interesses Conflitantes	1:5.000, (Lucas; Fonseca, 2021)

Fonte: Autores (2023).

Após esta calibração, foi realizada a simulação do uso e cobertura da terra para o ano de 2020. Na etapa de validação foi medido o desempenho do modelo comparando a simulação de 2020 com o mapeamento realizado para mesma data.

A estatística Kappa (Kappa Index of Agreement- KIA), aplicada por vários autores, tais como por Fleiss; Cohen e Everitt, (1969), Landis e Koch (1977), Monserud e Leemans (1992), Yang (2007) e Foody (2020), foi utilizada para medir a similaridade entre os dois mapas (simulado e "real"), baseada na razão da porcentagem de acertos observados pela porcentagem de acertos esperados por aleatoriedade. A estatística Kappa permite avaliar acertos relacionados à quantidade de mudanças e à localização das mudanças (Pontius Jr; Millones, 2011).

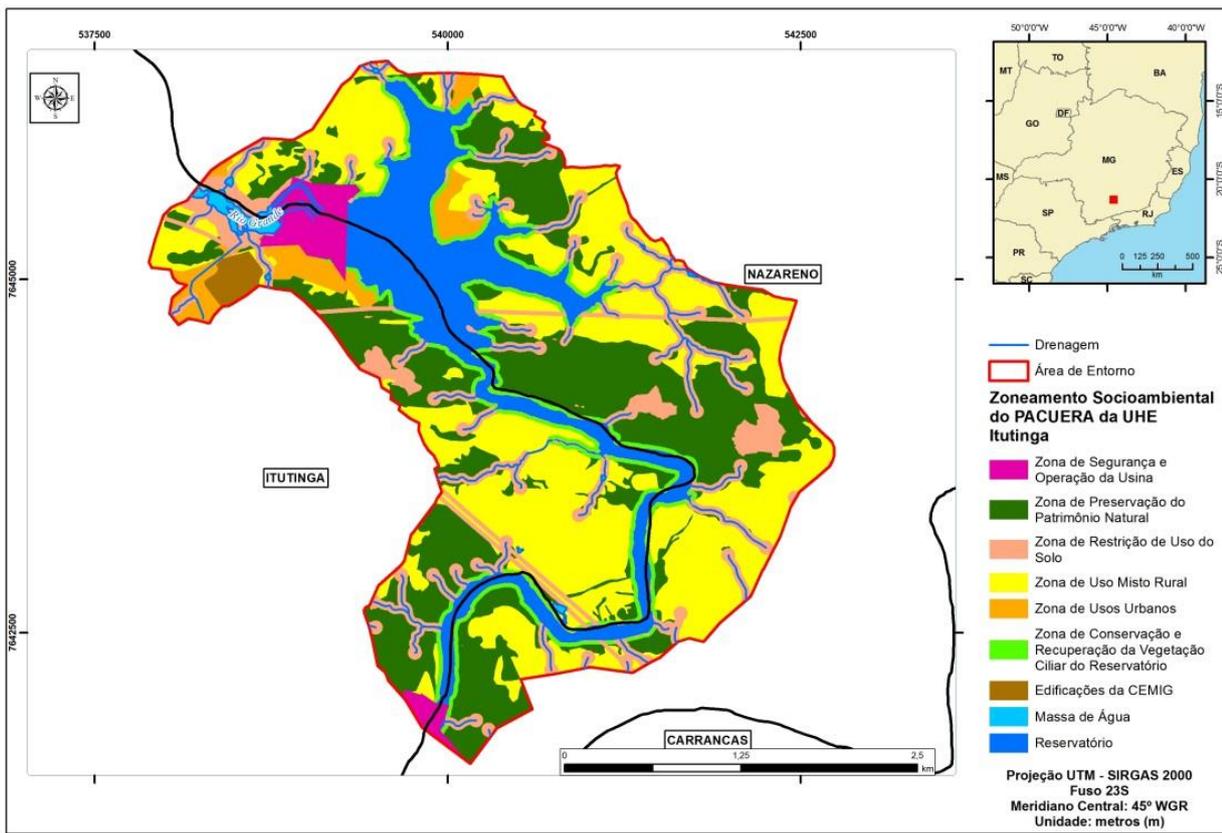
Como recomendado por Carvalho (2015), valores aptos a validação de mapas de mudança devem atingir percentuais superiores a 90%. Atualmente, o módulo *VALIDATE* do Idrisi calcula índice Kappa padrão de validação desmembrado em diferentes componentes baseados nos trabalhos de Pontius Jr (2000 e 2011).

A simulação de mudanças no módulo LCM é feita a partir da integração das taxas ou probabilidades de transição e dos mapas de potenciais de mudança que informam respectivamente sobre a quantidade e a alocação espacial das mudanças a serem simuladas.

No presente estudo, a simulação de mudança para o ano de 2030 ocorreu em dois cenários: 1) sem considerar as diretrizes de uso presentes no zoneamento socioambiental do PACUERA da UHE Itutinga (Figura 3) e 2) assumindo a implementação das diretrizes.

Para o cenário 1, utilizando como dados de entrada os mapas de uso e cobertura da terra para os anos 2007 e 2018, simulou-se o mapa de uso e cobertura da terra para ao ano de 2030. Para o cenário 2, empregando os mapas de uso e cobertura da terra para os anos 2007 e 2018 e aplicando a função Restrições e Incentivos (*Constraints and Incentives*) da Avaliação de Intervenções Planejadas (*Planning*) do LCM, simulou-se o mapa de uso e cobertura da terra para ao ano de 2030.

Figura 3 – Zoneamento Socioambiental da UHE Itutinga



Fonte: Autores (2023).

As diretrizes de uso de cada zona presente no PACUERA (Brandt Meio Ambiente, 2017) foram relacionadas com as transições selecionadas. Desta maneira, foram construídas matrizes de incentivo e restrição. As restrições e incentivos agem como multiplicadores. Um multiplicador de 1,0 não tem qualquer efeito. Multiplicadores maiores que 1,0 agem como incentivos (eles aumentam o potencial de transição), enquanto multiplicadores inferiores a 1,0 atuam como desincentivos. Um multiplicador de 0,0 atua como uma restrição absoluta (Eastman, 2012a). Os valores para incentivo e desincentivo adotados foram, respectivamente, 10 e 0,01.

A descrição do zoneamento e sua relação com as matrizes de incentivo e restrição aplicadas estão expostas no quadro 2.

Quadro 2 - Descrição do Zoneamento Socioambiental da UHE Itutinga e Matriz de Incentivo e Restrição

Zoneamento Socioambiental da UHE Itutinga		Matriz de Incentivo e Restrição		
Zona	Descrição	Transição Floresta Estacional para Pastagem	Transição Pastagem para Cultivo Agrícola	Transição Pastagem para Habitações
Zona de Segurança e Operação da Usina	Área destinada às atividades ligadas à geração de energia elétrica e à operação da usina, barragem e reservatório, restritas a pessoas autorizadas pela CEMIG.	Sem efeito	Sem efeito	Sem efeito
Zona de Preservação do Patrimônio Natural	Remanescentes de vegetação natural quase inalterada, ou seja, apresentam características que conferem a esses locais o maior grau de integridade.	Desincentivo	Desincentivo	Desincentivo
Zona de Restrição de Uso do Solo	Correspondem às áreas protegidas, por razões jurídicas e científicas, dentro da área de entorno do reservatório; representadas pelas Áreas de Preservação Permanente (APPs) de cursos d'água, nascente, declividade e do reservatório e faixas de domínio de linhas de transmissão.	Restrição absoluta	Restrição absoluta	Restrição absoluta
Zona de Uso Misto Rural	Porções do terreno destinadas a usos socioeconômicos, sendo composta basicamente por áreas com aptidão para cultivos diversos, pastagem e áreas de lazer do tipo chacareamentos e condomínios.	Incentivo	Incentivo	Incentivo
Zona de Usos Urbanos	Formada por todos os aglomerados urbanos consolidados dentro da área de entorno.	Incentivo	Desincentivo	Incentivo
Zona de Conservação e Recuperação da Vegetação Ciliar do Reservatório	Corresponde à área da faixa de 30 metros de largura a partir do nível máximo operativo do reservatório.	Desincentivo	Desincentivo	Desincentivo

Fonte: Autores (2023).

3. Resultados e Discussão

De um modo geral, entre os anos de 2007 e 2018 observa-se que a atividade agrícola e a expansão urbana foram os processos mais dinâmicos na área de entorno. A área destinada ao cultivo agrícola aumentou mais de 7% em onze anos. As Habitações aumentaram a área de 33,10 ha, no ano 2007, para 37,54 ha em 2018, o que representa uma variação percentual de 13,41% (Tabela 1).

Tabela 1 - Quantitativo de tipologias de uso e cobertura da terra nos anos 2007 e 2018

Classes	2007		2018	
	Área (ha)	Percentual (%)	Área (ha)	Percentual (%)
Cultivo Agrícola	20,02	1,67	105,45	8,81
Edificações da Cemig	19,31	1,61	19,31	1,61
Erosão/Solo Exposto	3,72	0,31	4,61	0,39
Est. de Piscicultura	1,75	0,15	1,75	0,15
Floresta Estacional	197,08	16,47	194,55	16,26
Habitações	33,10	2,77	37,54	3,14
Massa d'água	9,54	0,80	9,54	0,80
Pastagem	469,90	39,27	382,84	31,99
Reservatório	182,00	15,21	182,00	15,21
Savana Arborizada	123,36	10,31	121,71	10,17
Savana arborizada sobre aflor. rochosos	123,75	10,34	123,75	10,34
Uso Industrial	1,12	0,09	1,12	0,09
Via de acesso	12,06	1,01	12,54	1,05
Total Geral	1196,71	100,00	1196,71	100,00

Fonte: Autores (2023)

A expansão do cultivo agrícola se deu pela conversão de áreas de pasto. Durante o período analisado, 85,96 ha de pastagem foram convertidas em áreas agrícolas. Esta conversão se concentrou no entorno imediato de áreas agrícolas pretéritas na região central e pelo surgimento de uma grande área agrícola na margem esquerda do reservatório.

O processo de expansão urbana também ocorre majoritariamente sobre as áreas de pastoreio, onde 3,78 ha foram transformadas para a classe Habitações. Esta conversão agrupou-se principalmente nas adjacências do assentamento no município de Nazareno.

Em consequência dos processos acima citados, a classe Pastagem teve a maior perda em área, correspondendo ao decréscimo de 87,06 ha. Em termos percentuais, a queda foi de -7,27%. Em relação as áreas de pasto, destaca-se também de desmatamento de áreas nativas. No período analisado, 2,62 ha de Floresta Estacional e 0,96 ha de Savana arborizada foram convertidas para Pastagem. O processo de expansão urbana também contribuiu para o desmatamento de 0,66 ha de Savana Arborizada.

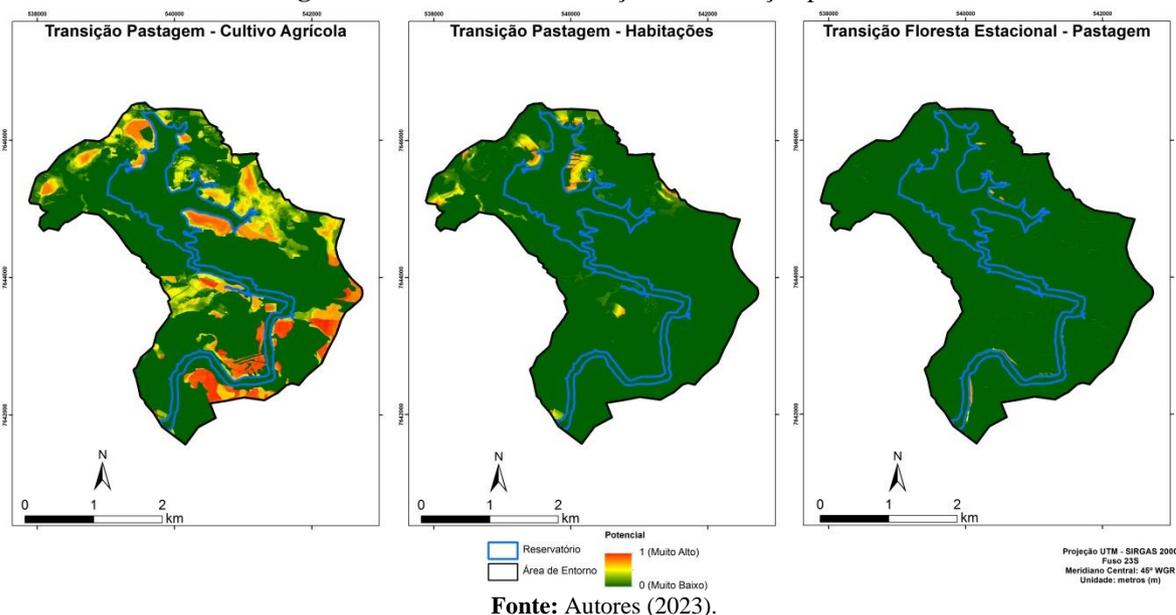
Outras mudanças observadas foram: o crescimento de 1,24 vezes da Erosão/Solo Exposto, totalizando um acréscimo de 0,89 ha de área; e a expansão de 0,48 ha da Via de Acesso, o que representa uma variação percentual de 4,01%. Para as demais classes restantes, nota-se que não houve uma variação relevante nos seus valores de área e percentual. Ao longo do período de análise, estas classes não tiveram transições significantes (acima de 1 ha) em suas áreas.

A simulação para 2030 teve como foco as mudanças ocorridas nas tipologias de uso e cobertura da terra: Pastagem, Cultivo Agrícola, Habitações e Floresta Estacional. Todas as variáveis testadas somente a variável Áreas Protegidas apresentou valor de Cramer inferior a 0,15, o que a tornou inapta a integrar o sub-modelo de potencial de transição (Fonseca, 2015; Mas et al., 2014). Todas as demais variáveis foram selecionadas para compor o modelo.

O resultado do sub-modelo de transição potencial são os mapas de potencial de transição para cada transição eleita (Figura 4). Observa-se que o maior potencial de transição Pastagem para Cultivo Agrícola ocorreu nas circunvizinhas de plantios já existentes.

Como observado no potencial anterior, as áreas nas adjacências das atuais habitações exibiram maior potencial para a transição Pastagem para Habitações. Neste destaca-se o entorno do assentamento no município de Nazareno. O potencial de transição da tipologia Floresta Estacional para a tipologia Pastagem obteve baixa representatividade espacial. Este ocorre em pequenos fragmentos envoltos por matriz antrópica

Figura 4 – Potenciais de Transição na simulação para 2030



Com base na matriz de probabilidades de transição calculada por Cadeias de Markov e nos mapas de potencial de alocação espacial das mudanças calculado por aprendizagem baseada em observação ponderada por similaridade (SimWeight), foi realizada simulação do uso e cobertura da terra para o ano de 2020 (Figura 15).

A validação da simulação foi feita pela comparação estatística entre o mapeamento realizado para 2020 e o modelo projetado para 2020. A estatística Kappa avaliou a similaridade entre os dois mapas, baseada na razão da porcentagem de acertos observados pela porcentagem de acertos esperados por aleatoriedade. De um modo geral, o valor obtido pelo índice Kappa global (K_{no}) foi de 0,9852 e indica um bom desempenho geral do modelo, o valor obtido para o índice Kappa de alocação de mudança ($K_{location}$), de 0,9988, evidencia um bom desempenho relativo à alocação espacial das mudanças simuladas. O valor encontrado para o índice Kappa padrão ($K_{standard}$) foi de 0,9804 e confirma o bom desempenho do modelo de simulação.

Após a validação do modelo foi executada as simulações para os dois cenários 1) sem considerar as diretrizes de uso presentes no zoneamento socioambiental do PACUERA da UHE Itutinga e 2) assumindo a implementação das diretrizes (Figura 5). Na simulação para 2030, observa-se que a classe com menor probabilidade de persistência será a Pastagem (78,45%), com mudanças projetadas de 20% e 0,9% para Cultivo Agrícola e Habitações, respectivamente. Este resultado é compatível com a dinâmica de mudança do uso e cobertura da terra detectada entre 2007 e 2018. Nesta nota-se a tendência de crescimento da atividade agrícolas e expansão urbana sobre as áreas de pastoreio.

Outra consonância observada entre a matriz de transição simulada (Tabela 2) e o padrão de mudanças detectadas foi em relação ao desmatamento de áreas nativas. Simula-se que a Floresta Estacional transicione 1,45% para a Pastagem. Já a Savana arborizada deve mudar 0,85% para Pastagem e 0,58% para Habitações.

Tabela 2 – Matriz de transição com percentuais de persistência e mudanças

	Cultivo Agrícola	Erosão/Solo Exposto	Floresta Estacional	Habitacões	Pastagem	Savana Arborizada	Via de acesso
Cultivo Agrícola	0,9703	0,0000	0,0000	0,0000	0,0297	0,0000	0,0000
Erosão/Solo Exposto	0,0000	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Floresta Estacional	0,0000	0,0000	0,9855	0,0000	0,0145	0,0000	0,0000
Habitacões	0,0000	0,0000	0,0000	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Pastagem	0,2032	0,0021	0,0002	0,0089	0,7845	0,0000	0,0011
Savana Arborizada	0,0000	0,0000	0,0000	0,0058	0,0085	0,9854	0,0003
Via de acesso	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	1,0000

Fonte: Autores (2023)

Não houve diferença significativa entre os dois cenários quanto ao quantitativos de área por tipologias de uso e cobertura da terra (Tabela 2). Comparando os cenários e 2018, em relação ao zoneamento socioambiental, podem ser observadas diferenças nestes quantitativos (Quadro 3).

Nas Zona de Conservação e Recuperação da Vegetação Ciliar do Reservatório e Zona de Preservação do Patrimônio Natural, cuja matriz de restrição e incentivos atribui valores de desincentivo às transições escolhidas, observa-se que os valores de área de Cultivo Agrícola, Florestal Estacional e Habitacões são maiores no cenário 1 em comparação com o cenário 2. Destaca-se as áreas agrícolas na Zona de Conservação e Recuperação da Vegetação Ciliar do Reservatório. No cenário 1 ocuparão 1,77 ha, no cenário 2, 0,02 ha; área 76 vezes menor.

Na Zona de Restrição de Uso do Solo, onde se atribui restrição absoluta pela matriz de restrição e incentivos, nota-se que não houve diferenças significativas nos quantitativos de 2018 e cenário 2. Isto prova que a restrição absoluta impediu que as transições escolhidas ocorressem nesta zona neste cenário. Para o cenário 1, observa-se que os valores de área refletem as tendências de persistências e mudanças projetadas: aumento das áreas agrícolas e assentamentos humanos sobre áreas de pastagem e desmatamento de cobertura natural.

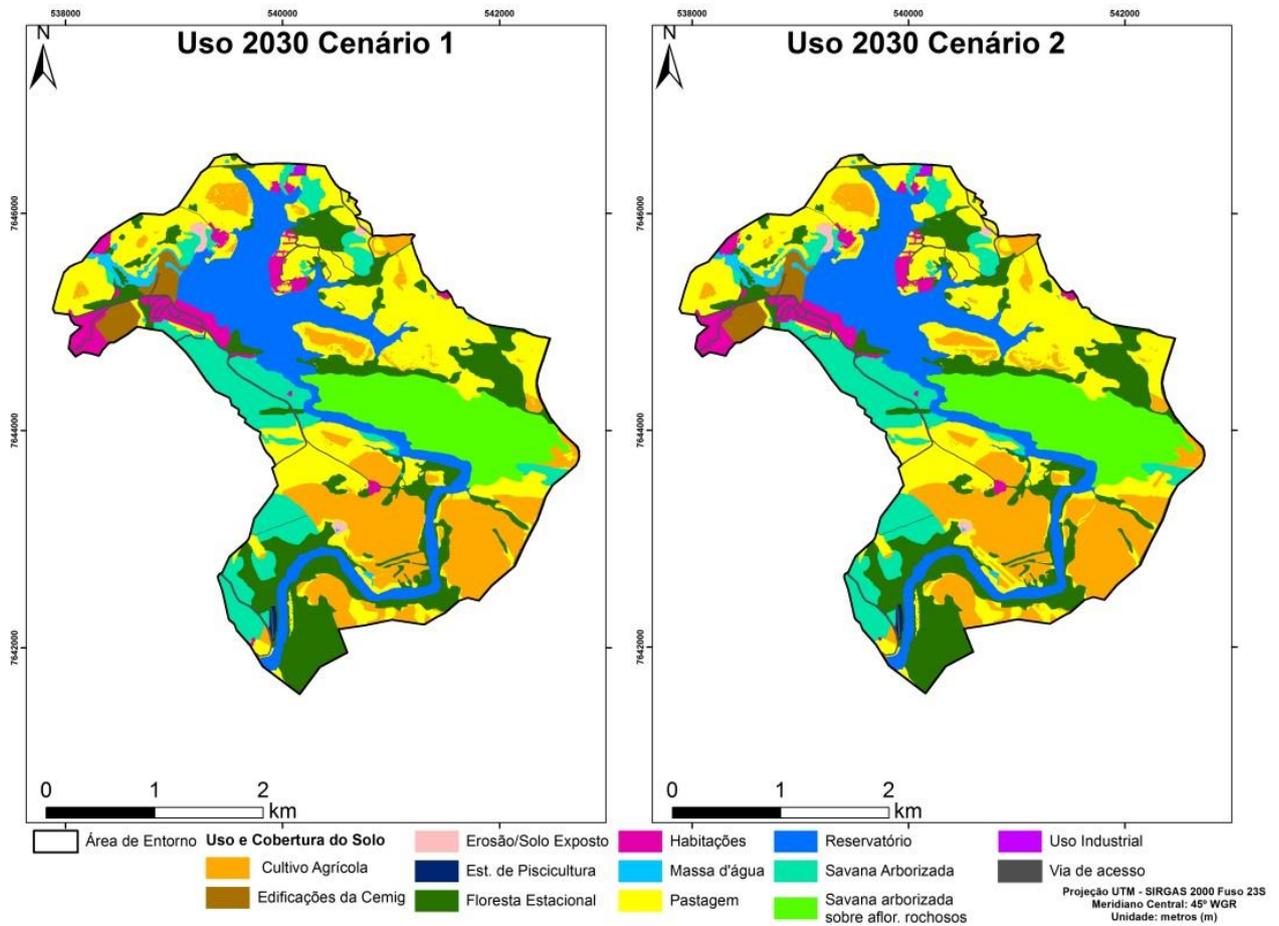
Para a Zona de Segurança e Operação da Usina, na qual não houve efeito multiplicador da matriz de restrição e incentivos, os valores das classes analisadas permaneceram semelhantes nos dois cenários e no ano de 2018. Evidenciando que esta zona não apresenta potencial relevante para mudanças

Nas Zona de Uso Misto Rural e Zona de Usos Urbanos, para quais valores de incentivo foram atribuídos pela matriz de restrição e incentivos para as transições analisadas; exceto para a transição Pastagem para Cultivo Agrícola na Zona de Usos Urbanos, observa-se o aumento de áreas do Cultivo Agrícola e Habitacões no cenário 2 em relação ao cenário 1. Isto demonstra que o padrão de mudança identificado pela detecção de mudanças foi potencializado no cenário 2, fato consonante com os usos permitidos destas zonas.

De maneira geral, quando nas transições eleitas valores de incentivo estavam presentes nas zonas socioambientais do PACUERA, foram observados aumento nas áreas das classes. Quando valores de desincentivo, diminuição. Como exemplo podemos citar, o acréscimo de 8,88 ha de Cultura Agrícola na Zona de Uso Misto Rural e o decréscimo de -3,51 ha da mesma tipologia na Zona de Preservação do Patrimônio Natural.

A tipologia Pastagem é uma exceção para o padrão apresentado acima. Os valores desta tipologia tiveram aumento de área quando relacionadas a valores de desincentivo e diminuição em relação a valores de incentivo, na comparação entre cenários. Isto que pode estar relacionado com a tendência identificada de perdas de áreas de pastoreio para atividades agrícolas e por esta tipologia estar relacionada a todas as transições elencadas.

Figura 5 – Cenários de uso e cobertura da terra projetado para 2030



Fonte: Autores (2023).

Quadro 1 - Quantitativos de classes por Zoneamento e Transições

Zoneamento	Classes*	Uso e cobertura da terra		
		2018	Cenário 1	Cenário 2
		Área (ha)	Área (ha)	Área (ha)
Zona de Conservação e Recuperação da Vegetação Ciliar do Reservatório	Cultivo Agrícola	0,02	1,77	0,02
	Flor. Estacional	20,94	20,17	20,16
	Habitações	3,08	3,77	3,09
	Pastagem	20,91	19,25	21,68
Zona de Preservação do Patrimônio Natural	Cultivo Agrícola	0,57	4,08	0,57
	Flor. Estacional	100,19	98,92	98,91
	Habitações	0,54	0,63	0,54
	Pastagem	41,98	39,67	43,27
Zona de Restrição de Uso do Solo	Cultivo Agrícola	5,07	8,58	5,07
	Flor. Estacional	60,05	59,73	60,05
	Habitações	4,05	4,05	4,05
	Pastagem	62,77	59,60	62,79

Zoneamento	Uso e cobertura da terra			
	Classes*	2018	Cenário 1	Cenário 2
		Área (ha)	Área (ha)	Área (ha)
Zona de Segurança e Operação da Usina	Cultivo Agrícola	0,06	0,16	0,06
	Flor. Estacional	0,58	0,51	0,45
	Habitacões	1,22	1,34	1,22
	Pastagem	4,73	4,57	4,86
Zona de Uso Misto Rural	Cultivo Agrícola	99,74	168,65	177,53
	Flor. Estacional	12,23	11,86	11,61
	Habitacões	3,81	5,37	5,83
	Pastagem	246,34	176,29	167,20
Zona de Usos Urbanos	Flor. Estacional	0,52	0,52	0,52
	Habitacões	24,82	25,78	26,21
	Pastagem	6,04	5,08	4,66

Fonte: Autores (2023).

Diante do exposto, conclui-se que a adoção das diretrizes do zoneamento socioambiental do PACUERA proporciona um ambiente mais sustentável na circunjacência da UHE Itutinga, haja vista que as mudanças de classe de uso do solo ficaram disciplinadas ao zoneamento.

4. Conclusão

Este artigo propôs a aplicação de um arcabouço metodológico para simular o uso e cobertura da terra no entorno de um reservatório hidrelétrico. O conjunto de modelos e procedimentos metodológicos utilizados pode ser aplicado em casos correlatos ao caso aqui estudado.

A estrutura metodológica e conceitual implementada neste estudo proporcionou uma avaliação crítica das temáticas abordadas, com avaliações que foram submetidas a testes estatísticos e validadas. No entanto, é importante destacar as limitações associadas à disponibilidade e qualidade das variáveis utilizadas como parte da nossa pesquisa.

Para um mapeamento mais confiável do uso e cobertura da terra, sugerimos a consideração da utilização de drones para a geração de ortofotos. No entanto, é crucial reconhecer os custos envolvidos nessa aquisição, o que pode ser um desafio orçamentário significativo.

Embora o Google Earth seja uma ferramenta valiosa para a visualização geoespacial, é fundamental estar ciente de que as imagens e seus vetores derivados podem conter distorções, erros de georreferenciamento e não atender a padrões rigorosos de precisão. Portanto, ao incorporar dados provenientes dessa fonte em estudos científicos, é imperativo que se reconheçam essas limitações e se realize uma avaliação crítica de sua qualidade e confiabilidade dentro da metodologia do estudo.

A detecção e quantificação de mudanças no uso e cobertura da terra permitiu a identificação das principais alterações da paisagem. Foi observado que crescimento da área agrícola e a expansão urbana foram os processos mais dinâmicos na área de entorno durante o período analisado.

O modelo de mudança construído para explicar e modelar a dinâmica do uso e cobertura da terra apresentou resultado satisfatório, haja vista os valores dos índices de calibração e validação alcançados. As variáveis explicativas utilizadas demonstraram uma forte associação com o modelo e com a área de estudo.

Os resultados do modelo reverberam a tendência de crescimento da atividade agrícolas e expansão urbana em detrimento de áreas de pastoreio e vegetação natural nativa identificada na detecção de mudanças.

Os cenários hipotéticos simulados demonstraram que a adoção do zoneamento socioambiental do

PACUERA disciplina as mudanças de classe de uso e cobertura da terra, corroborando para um ambiente mais sustentável na circunjunção da UHE Itutinga.

Esta possibilidade depende de fatores internos e externos à área de estudo. Em relação aos fatores internos destaca-se o papel dos tomadores de decisão em relação à proposição e execução de políticas de gestão da paisagem propostos no PACUERA. Quanto aos fatores externos, as alterações macroeconômicas e mudanças climáticas globais podem interferir nas dinâmicas de mudança locais. Neste caso, por exemplo, um aumento na demanda por tomates - cultura de destaque na área de entorno - ou a diminuição de sua produção devido a problemas advindos de alterações climáticas podem acelerar ou arrefecer a expansão agrícola.

Conclui-se que, dentro das limitações dos modelos de representação disponíveis, suas respectivas escalas e resoluções espaciais, os resultados alcançados cumpriram o objetivo do trabalho.

5. Referências

Brandt Meio Ambiente (2017). **Plano Ambiental de Conservação e Uso do Entorno do Reservatório Artificial (PACUERA) da UHE Itutinga.** Disponível em: <http://www.meioambiente.mg.gov.br/images/stories/2018/PACUERA/Maio/PACUERA_UHE_Itutinga_2018.pdf>.

BRASIL. **Resolução Conama No 302 de 2002 - Áreas Protegidas – Áreas de Preservação Permanente.** Diário Oficial da União, 13 de mai. Disponível em :< <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=275>>. Acesso em: 15/06/2020. 2002

CARVALHO DE LIMA, T. et al (2013). DINAMICA EGO e Land Change Modeler para simulação de desmatamento na Amazonia brasileira: análise comparativa. **XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, p. 6379–6386, 2013.

CARVALHO, G. A (2015). **Contribuições metodológicas ao planejamento urbano: comparação de métodos de análise multivariada e modelos de simulação da paisagem urbana – aplicações na Regional Pampulha - Belo Horizonte, Minas Gerais - Brasil.** Tese de doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil.

Cemig. – Companhia Energética de Minas Gerais (2006). **Usinas da Cemig: a história da eletricidade em Minas e no Brasil, 1952-2005.** Rio de Janeiro: Centro da Memória da Eletricidade no Brasil.

Eastman, J. R (2012a). **IDRISI Selva Manual - Guide to GIS and Image Processing.** Worcester: ClarkLabs.

Eastman, J. R (2012b). **IDRISI Selva Tutorial.** Worcester: ClarkLabs.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética (2018) **Matriz Energética e Elétrica.** Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: 15/06/2020.

FIX, E.; HODGES, J. L (1989). Discriminatory Analysis. Nonparametric Discrimination: Consistency Properties. **International Statistical Review / Revue Internationale de Statistique**, v. 57, n. 3, p. 238.

FLEISS, J. L.; COHEN, J.; EVERITT, B. S (1969). Large sample standard errors of kappa and weighted kappa. **Psychological Bulletin**, v. 72, n. 5, p. 323–327.

FONSECA, B. M (2015). **Conceitos e Práticas de Geodesign aplicados ao ordenamento territorial do município de São Gonçalo do Rio Abaixo**. Tese de doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil.

FOODY, G. M (2020). Explaining the unsuitability of the kappa coefficient in the assessment and comparison of the accuracy of thematic maps obtained by image classification. **Remote Sensing of Environment**, v. 239.

GOOGLE EARTH PRO 7.3.3 (2007). **UHE Itutinga, MG. Coordenadas 21o17'31,44"S e 44o37'30,00"W**. Data de Visualização: 01/02/2020. Data da Imagem: 31/03/2017.

GOOGLE EARTH PRO 7.3.3 (2018). **UHE Itutinga, MG. Coordenadas 21o17'31,44"S e 44o37'30,00"W**. Data de Visualização: 01/02/2020. Data da Imagem: 22/10/2018.

GOOGLE EARTH PRO 7.3.3 (2020). **UHE Itutinga, MG. Coordenadas 21o17'31,44"S e 44o37'30,00"W**. Data de Visualização: 01/02/2020. Data da Imagem: 23/06/2020.

GUERRA, S. M.; CARVALHO, A. V (1995). Um paralelo entre os impactos das usinas hidrelétricas e termoelétricas. **Revista de Administração de Empresas**, v. 35, n. 4, p. 83–90.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (1992). **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**. Rio de Janeiro: [s.n.].

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2012). **Mapa de Clima Do Brasil**. Rio de Janeiro: [s.n.].

PONTIUS JR, R. G (2000). Quantification Error Versus Location Error in Comparison of Categorical Maps. **American Society for Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 66, n. 8, p. 1011–1016.

LANDIS, J. R.; KOCH, G. G (1977). The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. **Biometrics**, v. 33, n. 1, p. 159–174.

LUCAS, D. F. (2021). **Análise de multicritérios e simulação de uso e cobertura da terra na área de entorno da UHE Itutinga: um subsídio ao planejamento ambiental**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil.

LUCAS, D. F.; FONSECA, B. M. (2021). Identificação do potencial de expansão de atividades antrópicas e preservação ambiental e avaliação de conflitos de interesses na área de entorno da UHE Itutinga (Minas Gerais). **Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto**, v. 2, n. 3, p. 018–030.

MAS, J. F. et al (2014). Inductive pattern-based land use/cover change models: A comparison of four software packages. **Environmental Modelling & Software**, v. 51, p. 94–111.

MONSERUD, R. A.; LEEMANS, R (1992). Comparing global vegetation maps with the Kappa statistic. **Ecological Modelling**, v. 62, n. 4, p. 275–293.

OLIVEIRA, M. S. (2012). **Deteção de mudanças de uso e cobertura da terra no Sinclinal Moeda (MG) no período de 1991 a 2011 e previsões de mudanças futuras através de modelo espacial de simulação**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil.

PALACIOS OREJUELA, I. F (2020). **Generación de un modelo de crecimiento tendencial urbano de la ciudad de Macas (Ecuador) al año 2030, mediante técnicas de modelación espacial multivariable.** Dissertação de mestrado, Universidade da Barcelona, Barcelona, Espanha.

PONTIUS JR, R. G.; MILLONES, M (2011). Death to Kappa: Birth of quantity disagreement and allocation disagreement for accuracy assessment. **International Journal of Remote Sensing**, v. 32, n. 15, p. 4407–4429.

QUÉMÉNEUR, J. J. G. et al. (2012). **Carta geológica - Folha Lavras SF 23-X-C-I, 1:100.000.** Disponível em: <<http://www.portalgeologia.com.br/index.php/mapa/>>. Acesso em: 15 fev. 2021.

SANGERMANO, F.; EASTMAN, J. R.; ZHU, H (2010). Similarity Weighted Instance-based Learning for the Generation of Transition Potentials in Land Use Change Modeling. **Transactions in GIS**, v. 14, n. 5, p. 569–580.

SOUSA, W. L (2000). **Impacto Ambiental de Hidrelétricas: uma análise comparativa de duas abordagens.** Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

YANG, J (2007). **Measurement of Agreement For Categorical Data.** Tese de doutorado, Universidade do Estado da Pensilvânia, Pensilvânia, Estados Unidos da América.