

**MODELAGEM E ANÁLISE TEMPORAL DA DINÂMICA DO USO
E OCUPAÇÃO DO SOLO NA BACIA DO RIO CUIÁ-PB**

**MODELING AND TEMPORAL ANALYSIS OF DYNAMICS OF SOIL USE
AND OCCUPATION IN THE CUIÁ-PB RIVER BASIN**

**MODELACIÓN Y ANÁLISIS TEMPORAL DE LA DINÁMICA DEL USO Y
OCUPACIÓN DEL SUELO EN LA CUENCA DEL RÍO CUIÁ-PB**

Leonardo Pereira e Silva

Doutor em Engenharia Civil e Ambiental, Mestre em Engenharia Urbana e Graduado em Geografia pela Universidade Federal da Paraíba – UFPB. Professor da Faculdade Brasileira de Ensino Pesquisa e Extensão – FABEX/PB.
lpsjampa@gmail.com / <http://orcid.org/0000-0003-4153-7325>

Adriano Nascimento da Paixão

Doutor em Economia Aplicada pela Universidade Federal de Viçosa – UFV. Mestre em Economia e Graduado em Ciências Econômicas pela Universidade Federal da Paraíba – UFPB. Professor do Departamento de Economia (UFPB) e do Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento Regional (UFT).
anpaixao@gmail.com / <http://orcid.org/0000-0002-2717-3716>

Recebido para avaliação em 18/06/2019; Aceito para publicação em 04/09/2019.

RESUMO

Nas últimas duas décadas o crescimento da população acelerou o processo de ocupação humana nessas áreas ao longo dos rios, criando diversos problemas ambientais. Assim, este trabalho teve por objetivo analisar as mudanças no uso e ocupação do solo na bacia do rio Cuiá e estimar o uso e ocupação do solo para a bacia da Cuiá para o ano de 2030, utilizando algoritmo de Redes Neurais artificiais: Rede Neural Multi-Layer Perceptron. Dessa forma, foi realizado o processamento de imagens de satélites dos anos de 1998, 2001 e 2005, realizada a predição do uso do solo para o ano de 2001 baseado em Redes Neurais para a validação. Em seguida, o resultado da predição do uso do solo foi analisado pelo do índice Kappa e após obtenção do índice Kappa com um resultado de acordo com a classificação prevista por Landis & Koch (1977) foi realizada a predição do uso e ocupação do solo para 2030. Os resultados mostraram um aumento da classe Ocupadas entre os anos analisados. A modelagem dinâmica do uso do solo baseada em Rede Neural mostrou resultados satisfatórios para a bacia do rio Cuiá com acurácia de 98,64%, após 10.000 iterações e índice Kappa igual a 0,94, classificado como excelente. A previsão do uso do solo para 2030 apresentou aumento da área da classe Ocupada e uma diminuição da área com expansão.

Palavras-chave: Uso do Solo; Redes Neurais; Geoprocessamento.

ABSTRACT

In the last two decades the population growth accelerated the process of human occupation in these areas along the rivers, creating several environmental problems. Thus this study aimed to analyze the changes in land use and occupation in the Cuiá river basin and to estimate the land use and occupation for the Cuiá basin for the year 2030 using an artificial neural network algorithm: Multi-Layer Perceptron Neural Network. In this way, the satellite image processing of the years of 1998, 2001 and 2005 was carried out, with the prediction of the use of the ground for the year 2001

based on neural networks for the validation, followed by the prediction of the land use was analyzed through the Kappa index and after obtaining the Kappa with a result according to the classification predicted by Landis & Koch (1977) the use and occupation of the soil was predicted by 2030. The results showed an increase of the Occupied class among the analyzed years. The dynamic modeling of soil use based on Neural Network showed satisfactory results for the Cuiá River basin with accuracy of 98.64%, after 10,000 iterations and Kappa equal to 0.94, classified as excellent. Prediction of land use for 2030 showed an increase in the area of the occupied class and a decrease of the area with expansion.

Keywords: Soil Use; Neural Network; Geoprocessing.

RESUMEN

En las últimas dos décadas el crecimiento de la población aceleró el proceso de ocupación humana en esas áreas a lo largo de los ríos, creando diversos problemas ambientales. Entonces este trabajo tuvo por objetivo analizar los cambios en el uso y ocupación del suelo en la cuenca del Río Cuiá y estimar el uso y ocupación del suelo para la cuenca de Cuiá para el año 2030 utilizando algoritmo de Redes Neuronales Artificiales: Red Neural Multi-Layer Perceptron. De esta forma, se realizó el procesamiento de imágenes de satélites de los años 1998, 2001 y 2005, realizada la predicción del uso del suelo para el año 2001 basado en Redes Neuronales para la validación, luego el resultado de la predicción del uso del suelo se analizó por el índice Kappa y tras la obtención del índice Kappa con un resultado de acuerdo con la clasificación prevista por Landis & Koch (1977) se realizó la predicción del uso y ocupación del suelo para 2030. Los resultados mostraron un aumento de la clase Ocupados entre los años analizados. El modelado dinámico del uso del suelo basado en Red Neural mostró resultados satisfactorios para la cuenca del Río Cuiá con exactitud del 98,64%, después de 10.000 iteraciones e índice Kappa igual a 0,94, clasificado como excelente. La previsión del uso del suelo para 2030 presentó aumento del área de la clase Ocupada y una disminución del área con expansión.

Palabras clave: Uso del Suelo; Red Neuronales; Geoprocementamiento.

INTRODUÇÃO

Uma bacia hidrográfica é uma porção do espaço natural, que tem como delimitações divisores topológicos, e vem sendo muito utilizada como unidade de gestão para estudos de questões ambientais, dado que se representa em ambientes de características e condicionantes que se tornam nitidamente delimitáveis na paisagem (SILVA, 2002).

Nas últimas duas décadas o crescimento da população acelerou o processo de ocupação humana nessas áreas, criando diversos problemas ambientais, como as atividades que desestabilizam as encostas dos rios, provocando ravinas, voçorocas, movimentos de massa, alagamentos, poluição hídrica, entre outros, o que contribui para acelerar o desequilíbrio do espaço ocupado.

Nesse sentido, analisar a dinâmica temporal e tendências futuras do uso do solo em bacias hidrográficas é de suma importância para compreensão dos processos antrópicos e ambientais. Principalmente, pelo fato da área de estudo estar inserida numa zona de preservação ambiental, isso significa que houve uma preocupação por parte dos gestores

municipais em preservá-la. Porém, não garante que ocorra um desequilíbrio do espaço ocupado por falta de um monitoramento e fiscalizações periódicas (SILVA, 2002).

A bacia hidrográfica do rio Cuiá se localiza na parte sul da cidade de João Pessoa, tem características de uma bacia urbana, e vem sofrendo várias transformações que prejudicam os processos ambientais.

A principal modificação antrópica pode ser definida como o alto crescimento urbano desordenado, que na maioria das vezes não leva em conta o agrupamento da rede hidrográfica e modifica as seções e perfis transversal e longitudinal dos cursos d'água, alterando assim a eficiência do fluxo e na vazão da água, de modo a causar mudanças nos processos do ciclo hidrológico da bacia (SILVA, 2007).

Assim, o monitoramento das mudanças ocorridas e a predição do uso do solo baseada na dinâmica da ocupação do solo de uma região estão sendo cada vez mais utilizados com a implementação de modelos matemáticos e algoritmos computacionais de detecção de mudança (*Land Use and Land Cover Change –LUCC*).

Os procedimentos metodológicos de predição de mudanças de uma área consideram processos de âmbito econômicos, ambientais, institucionais e sociais envolvidos, percebe uma ampla quantidade de fatores em diferentes abordagens metodológicas e possibilita o estabelecimento de medidas para o ordenamento do uso do solo (SOARES FILHO et al., 2013; MAS et al., 2014).

Dentre metodologias desse gênero, se destaca a baseada em Redes Neurais de previsão de mudanças, o *Multi-Layer Perceptron* (MLP), utilizado cada vez mais em estudos ambientais e na detecção de mudanças no uso do solo (XAVIER; SILVA, 2016).

Nessa perspectiva, o geoprocessamento se destaca por oferecer ferramentas capazes de disponibilizar informações do meio físico, uso do solo e fazer a integração desses dados. Apropria-se, portanto, de várias metodologias para uma possível análise e compreensão, os quais resultam em subsídios que sejam pertinentes às propostas de ordenamento do território (VALÉRIO FILHO et al., 2005).

Considerando a necessidade de se trabalhar com a informação espacial e sua dinâmica temporal, a representação e a integração dos aspectos numa bacia urbana, esse trabalho tem por objetivo estimar o uso e a ocupação do solo para a bacia do rio Cuiá para o ano de 2030, no sentido de produzir uma visão futura de como as áreas de uso e ocupação da bacia serão possivelmente espacializadas, caso seja mantida a tendência do uso e ocupação do solo.

Para isso foram identificadas as mudanças no uso e ocupação do solo na bacia do rio Cuiá, ocorridas nos anos de 1998, 2001 e 2005. E realizou-se uma simulação do cenário futuro de uso e ocupação do solo na bacia do rio Cuiá para o ano de 2030.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As modificações antrópicas no uso do solo têm causado grandes impactos em bacias hidrográficas devido ao amplo processo de substituição de áreas naturais por outros tipos de uso e, por consequência, uma fragmentação na cobertura vegetal (COELHO et al., 2013).

É esperado que uma bacia hidrográfica, por suas características naturais, possua um gerenciamento constante para que possa ter um uso racional dos seus recursos naturais e que o ciclo hidrológico não seja alterado.

Assim, é notória a busca de uma eficiente gestão dos problemas ambientais, que passa pela exigência de que se tenha um vasto conhecimento do território habitado, com uso de geotecnologias e a criação de dados, úteis para mostrar várias realidades existentes no período atual e no futuro, bem como todas as potencialidade da área e os problemas a serem gerenciados (RIBEIRO; SCHIEBELBEIN, 2014).

Dentre as geotecnologias utilizadas nos últimos anos, para o manejo correto do uso do solo, planejamento ambiental, conservação do solo e dos recursos hídricos, estão o Geoprocessamento e o Sensoriamento Remoto, os quais são conectados por meio de Sistemas de Informação Geográfica e que ainda são associados com modelos matemáticos de simulação (RODRIGUES et al., 2014).

Para Tucci (1998), modelos hidrológicos ou matemáticos são a representação de algum sistema ou fenômeno, numa linguagem ou forma de fácil acesso e uso, por meio da equacionalização dos processos, e tem como objetivo entendê-lo e buscar respostas para diferentes problemas reais.

O sensoriamento remoto é uma tecnologia que pode ser entendida como a medição e/ou aquisição de informações de algumas propriedade de um objeto, fenômeno ou alvo, por um equipamento de obtenção de informações de que não esteja em contato físico com alvo, fenômeno ou objeto que esteja em estudo (JENSEN, 2009).

Segundo Silva (2007), o geoprocessamento pode ser entendido como um conjunto de técnicas que permite capturar, modelar, manipular, recuperar, examinar, consultar, analisar e apresentar dados geograficamente referenciados, já o Sistema de Informações

Geográficas (SIG) é uma tecnologia mais ampla, podendo englobar todas as demais técnicas de espacialização.

Silva (2007) utilizou técnicas de geoprocessamento e a modelagem hidrológica para identificar áreas com risco de inundação e erosão na bacia do rio Cuiá, na cidade de João Pessoa. Com a ferramenta do geoprocessamento foi possível apresentar uma variação de impermeabilidade e isso mostrou que cerca de 10% de toda área da bacia do rio Cuiá pode ser enquadrada na classe que contém o solo com mais de 95% de impermeabilidade. Ainda em seu estudo, utilizando modelos hidrológicos, mostrou que a bacia do rio Cuiá pode apresentar uma produção de sedimentos anuais de 0,23 (ton/ha/ano), em 1999 e 177,35 (ton/ha/ano), no ano de 1996.

Oliveira (2012) utilizou, das técnicas de mudanças futuras do uso do solo, o (*LCM*) *Land Change Modeler*, para realizar uma detecção das alterações do uso e cobertura do solo na região do Sinclinal Moeda, no “Quadrilátero Ferrífero”, em Minas Gerais, no período de 1991 a 2011 e predição das mudanças futuras por meio de modelo espacial que se utiliza do procedimento de simulação. Este estudo ilustrou um cenário tendencial em que predomina a expansão da mineração seguida pela expansão dos condomínios.

Pavão (2017) analisou com modelos de projeções futuras as mudanças do uso e cobertura da terra no entorno de áreas protegidas para o ano de 2035 no Parque Estadual da Cantareira, em São Paulo. Para isso foi utilizado o modelador de mudanças no uso da terra (LCM) e apresentou como conclusão do seu trabalho que as mudanças mais expressivas ocorreram com a expansão de áreas urbanas sobre as áreas de utilização agrícola. Isso produziu alguns cenários que indicaram redução de áreas de cobertura vegetal natural e ocorreu em função do intenso processo de urbanização.

Xavier e Silva (2018), por sua vez, em seu estudo realizado na região Nordeste do Brasil, e numa bacia hidrográfica, na qual por meio do procedimento de LCM realizou uma modelagem temporal da dinâmica do uso e ocupação do solo e as perdas e deposição de sedimentos, sendo um de seus objetivos a predição dos cenários de uso do solo para o ano de 2035.

Para esses autores, a técnica utilizada mostrou-se ser uma ferramenta eficaz, em que os cenários simulados mostraram intensificação das classes de policultura, pecuária, área urbana e cana-de-açúcar. Os autores alertam, ainda, que é de suma importância a implantação de políticas ambientais que visem à conservação dos recursos hídricos na bacia do Tapacurá-PE.

No arcabouço teórico sobre o planejamento territorial, Honda et al. (2015) alertam que o processo de urbanização brasileira teve o seu início a partir da década de 1960,

tornando-se um grande desafio para ao planejamento e aplicações de políticas para a organização do território municipal.

Esse planejamento territorial tenta buscar o equilíbrio no ambiente, pois esse fator está diretamente relacionado à qualidade de vida da população que nele habita (CANEPA, 2007 apud HONDA et al., 2015).

No trabalho de Silva e Fonseca (2016) foi realizado um levantamento do uso e da cobertura do solo por meio de utilização de informações de sensoriamento remoto para a análise espaço-temporal. Essa técnica tem sido difundida globalmente e os autores em seu artigo apresentam uma análise multitemporal da cobertura do solo realizada no município de São Thomé das Letras, que fica no estado de Minas Gerais. Eles chegaram à conclusão que o grande desafio para os gestores públicos do município é o desenvolvimento ou a reestruturação dos instrumentos de gestão territorial e ambiental.

Nesse contexto, Bispo e Levino (2011) caracterizaram o problema da expansão urbana tanto quanto populacional e territorial na região da periferia de Maceió/AL, e os autores explicam em seu trabalho que o poder público tem que subsidiar um planejamento sustentável, tanto populacional como territorial.

Sestari et al. (2007) apostam em tecnologia de geoprocessamento para analisar as condições de uso e ocupação do solo da bacia do Ribeirão Anhumas, cujo estudo foi possível criar e tornar acessível o conhecimento das características ambientais, econômicas, sociais, físicas e biológicas, e realizar a dinâmica de cruzamento dos aspectos e informações mediante técnicas de geoprocessamento, sendo possível definir uma fiscalização mais eficiente e, conseqüentemente, um planejamento urbano efetivo da área estudada.

Para Silva e Santos (2010), uma das melhores formas de apontar medidas mitigatórias para diversos problemas ambientais é fazer estudos em uma unidade de planejamento, sendo esta a ser adotada uma bacia hidrográfica, pois ela é a primeira unidade afetada pelo ciclo hidrológico.

Ainda de acordo com Setti et al. (2000), citados por Silva e Santos (2010), pensando numa gestão dos recursos hídricos recomenda-se que a unidade básica de gestão seja a bacia hidrográfica, uma vez que, por intermédio da rede de drenagem fluvial, se integra uma extensa parte das relações causa-efeito que devem ser tratadas na gestão de uma bacia.

Nesse âmbito, baseados nos argumentos teóricos que buscam explicar a importância de se estudar a dinâmica do uso do solo numa bacia, Silva (2002), em seu trabalho sobre a análise espacial de riscos ambientais na bacia do rio Cuiá por técnicas de geoprocessamento, afirma que foi possível realizar um inventário e um monitoramento da

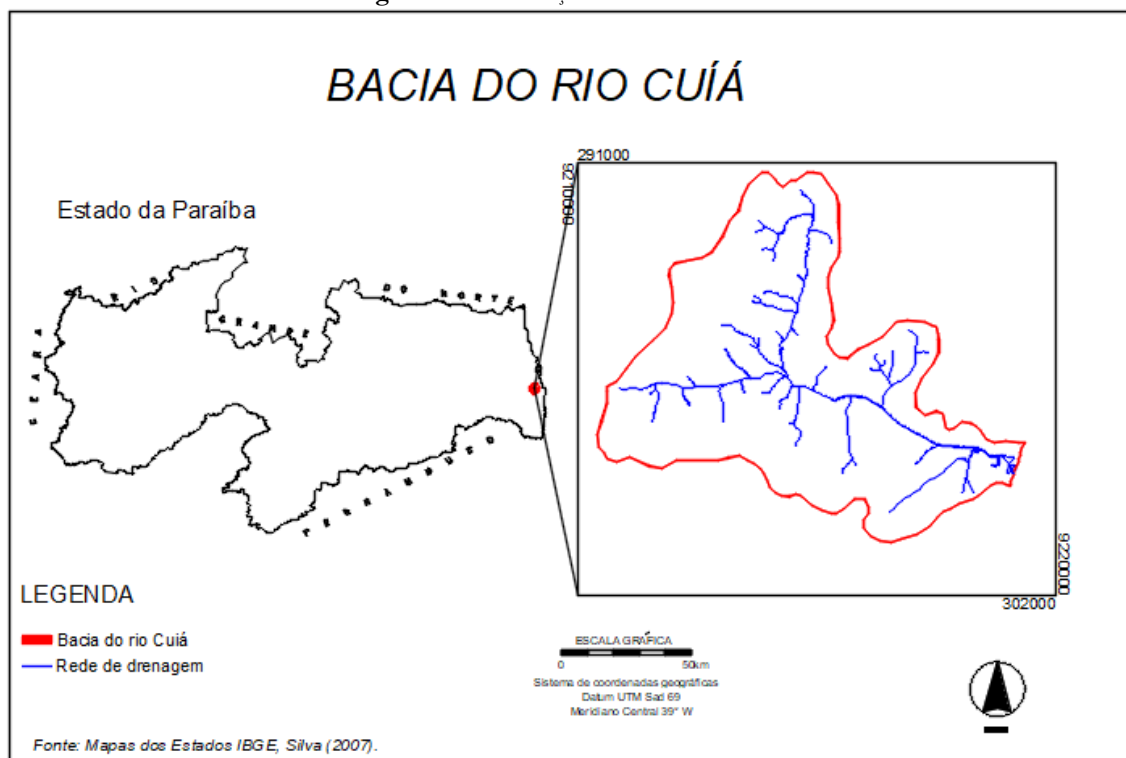
área de estudo. Nesse sentido, o autor mostrou as incongruências de uso e constatou que era acelerado o desmatamento entre os anos de 1985 e 1998.

METODOLOGIA

Localização e caracterização da área de estudo

A área de estudo desse artigo está localizada numa bacia hidrográfica na Mesorregião do Litoral Paraibano, na Microrregião de João Pessoa e na cidade de João Pessoa, na porção sul do litoral Paraibano, entre as coordenadas métricas de 302.000E/9.210.000N e 292.000E/9200.000N. O perímetro desse estudo compreende: ao norte, com a bacia do rio Jacarapé; ao sul, pela bacia do rio Gramame; ao oeste, com o Conjunto Residencial Ernany Sátiro; e ao leste, com o Oceano Atlântico. A bacia do rio Cuiá engloba uma área de cerca de 40 km², a altitude média da bacia é em torno de 5 m, sendo inseridos na área a ser estudada os conjuntos residenciais dos Grotões, Ernesto Geisel, Radialistas, José Américo, Valentina de Figueiredo e Mangabeira, conforme pode ser visto na Figura 1. Silva (2007).

Figura 1 – Localização da Área de Estudo



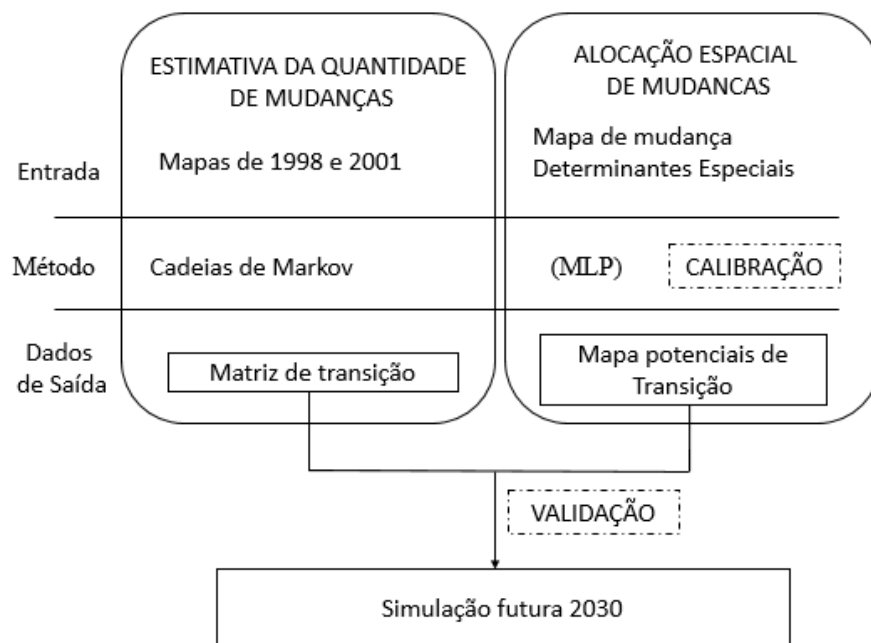
Fonte: Silva (2007).

A bacia do rio Cuiá, segundo a classificação de KÖPPEN, possui um clima na área de estudo do tipo As', ou seja, clima tropical chuvoso, que é predominante na região litorânea de João Pessoa. Conforme o Atlas Geográfico da Paraíba, a pluviosidade média anual normalmente não ultrapassa os 2.000 (mm). A área de estudo possui uma temperatura média anual em torno de 26 a 27 (°C) (PARAÍBA, 1985).

Materiais e métodos

Para a realização deste trabalho fizeram-se necessárias algumas etapas metodológicas, como mapeamento da área de estudo em alguns anos, calibração da rede neural e aplicação do modelo, calibração e validação dos dados, e simulação e previsão, que podem ser vistas no fluxograma abaixo.

Figura 2 – Fluxograma da metodologia



Fonte: Adaptado de Oliveira (2012).

Seleção e processamento das imagens de satélite

Para a realização deste estudo foram selecionadas três imagens de satélite (1998), (2001) e (2005). O mapeamento do uso e da ocupação do solo para a bacia do rio Cuiá foi realizado a partir de imagens de satélite LANDSAT, SPOT e CBERS2, com resoluções espacial entre 10 a 30 m, obtidas junto às plataformas da *United States Geological Survey*, INPE e LEPPAN/UFPB (Tabela 1).

Essas imagens foram escolhidas pela ausência de nuvens sobre a área da bacia, pois, no litoral do Brasil, as nuvens são um grande empecilho na interpretação e classificação de imagens de satélite. Assim, foram escolhidas cenas que apresentassem no máximo 20% de cobertura com nuvens.

Tabela 1 – Características das imagens utilizadas na classificação do uso e ocupação do solo na bacia do Rio Cuiá

Data	Satélite	Sensor	Órbita	Ponto	Bandas	Resolução
1998	SPOT	HRV	-	-	Pancromática	10 m
04/08/2001	LANDSAT 7	ETM	214	65	5-4-3 (RGB)	30 m
09/08/2005	CBERS2	CCD	146	108	5-4-3(RGB)	20 m

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados do INPE e LEPPAN/UFPB.

O processamento das imagens (georreferenciamento e classificação) foi realizado no software SPRING[®] 5.0.6., distribuído gratuitamente pelo INPE (2018). Para iniciar a interpretação e análise das imagens de satélite foram definidas as seguintes classes de uso e ocupação do solo: (a) Ocupadas, (b) Gramíneas, (c) Expansão, (d) Mata, (e) Culturas, (f) Mangue. O Quadro 1 mostra a descrição das classes do uso do solo identificadas para a bacia do rio Cuiá.

Quadro 1 – Descrição das classes de uso do solo para bacia do rio Cuiá

Classes	Descrição
Ocupadas	Áreas com habitações e muito antropizadas
Gramíneas	Áreas com uma vegetação herbácea ou pouca vegetação
Expansão	Áreas com solo exposto ou ausência de vegetação
Mata	Áreas com uma vegetação densa, ou áreas protegidas por lei
Culturas	Áreas com presença de culturas diversas e pasto
Mangue	Áreas com vegetação junto as praias

Fonte: Baseado em Silva (2007).

Predição do uso do solo

Para a previsão do uso do solo na bacia do rio Cuiá foi utilizado o algoritmo MLP no modulo *Land Change Modeler* do software de geoprocessamento IDRISI TerrSet. O algoritmo MLP foi escolhido para modelagem dinâmica do uso do solo para estimar o ano de 2030. Para Haykin (2001), o MLP tem como base Redes Neurais Artificiais, que de maneira genérica são técnicas computacionais que se inspiram na estrutura neural de organismos inteligentes, incorporando a capacidade de adquirir conhecimento por meio de um processo de aprendizagem. O MLP é treinado por um algoritmo que deriva de uma

retro-propagação em que o treinamento da rede é mediante da aprendizagem por correção dos erros.

Neste trabalho, a modelagem dinâmica foi composta por três etapas principais: (a) previsão do potencial de transição, (b) simulação e (c) validação. Para a etapa de previsão do potencial de transição foram realizadas as análises das principais mudanças no uso do solo da bacia entre (1998) e (2001), necessárias para a definição das classes de transição. Em seguida, foram definidas as classes de transição, testando a seleção de variáveis explanatórias pelo teste de Cramer. Neste estudo foram consideradas, na modelagem dinâmica do uso do solo, as variáveis que apresentaram valores de Cramer $> 0,15$, valor este recomendado pelos autores Sampaio (2014) e Hamdy et al. (2017). Assim, foram testadas as seguintes variáveis explanatórias: (a) declividade, (b) cursos d'água, (c) distâncias dos cursos d'água, (d) mudanças entre 1998 a 2001 e (e) probabilidade de mudanças entre 1998 a 2001.

Esse teste varia entre 0 e 1, sendo que quanto mais próximo de 1, maior a relação entre a variável explanatória e as classes de transição definidas. O teste de Cramer pode ser definido como uma análise estatística não paramétrica, e é aplicável independente da distribuição das variáveis. Essa análise é utilizada para mensurar a força da ligação entre variáveis (LIEBERTRAU, 1983; SAMPAIO, 2014; LUIZ, 2014). Esse teste é dado pela Equação 1 (LIEBERTRAU, 1983):

$$V = \sqrt{\frac{\chi^2}{n(q-1)}} \quad (1)$$

em que: χ^2 = coeficiente Qui-quadrado (Eq. 2):

$$\chi^2 = \frac{(O - E)^2}{2} \quad (2)$$

sendo: V = índice V de Cramer; n = tamanho da amostra; q = menor valor das linhas e colunas da imagem da cobertura do solo; O = frequência observada para uma categoria e E = frequência esperada na categoria correspondente.

Para avaliar a probabilidade de mudança por meio da matriz de probabilidade de transição de 2001 para 2005 foi utilizado, também, cadeias de Markov (CM). As CM traçam processos estocásticos usando:

$$\Pi(t+1) = p^n \times \Pi(t) \quad (3)$$

no qual: $\Pi(t)$ = é o estado do sistema no tempo t ; $\Pi(t+1)$ = é o estado do sistema após o intervalo $(t+1)$ e p^n = representa os estados possíveis de acontecer, demonstrado através de matriz de possibilidade de transição.

A etapa de validação da modelagem, para o ano 2005 simulado, foi realizada no próprio módulo LCM do IDRISI TerrSet, utilizando o índice Kappa. Segundo Landis & Koch (1977), esse coeficiente avalia o grau de concordância entre as imagens classificadas e a estimada. O índice Kappa pode ser obtido pela seguinte equação (COHEN, 1960):

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^c x_{ii} - \sum_{i=1}^c x_{i+} x_{+i}}{n^2 - \sum_{i=1}^c x_{i+} x_{+i}} \quad (4)$$

sendo I = índice Kappa; x_{ii} = o valor na linha i e coluna i ; x_{i+} = a soma da linha i ; x_{+i} = a soma da coluna i da matriz; n = número total de observações e c = número total de classes. A Tabela 2 mostra a relação do coeficiente Kappa adotada neste estudo para avaliação da qualidade entre o mapa simulado e o classificado para o ano de 2005.

Tabela 2 – Avaliação da modelagem baseada na estatística Kappa.

Índice Kappa	Qualidade
< 0	Péssima
0–0,2	Ruim
0,21–0,4	Razoável
0,41–0,6	Boa
0,61–0,8	Muito boa
0,81–1,0	Excelente

Fonte: baseado em Landis & Koch (1977).

O valor mínimo do coeficiente Kappa requerido neste estudo foi igual a 0,41, uma vez que valores acima de 0,41 do Kappa indicam bons resultados da modelagem. Após a obtenção do coeficiente Kappa ($> 0,41$) foi realizada a simulação do uso do solo para o ano de (2030).

RESULTADOS

Análise das mudanças no uso do solo na bacia do rio Cuiá

As figuras 3a-3c apresentam as classificações do uso e ocupação do solo para os três anos analisados 1998, 2001 e 2005. A figura 3d mostra a predição da classificação do uso e ocupação do solo para o ano de 2005 estimado pelo MLP “*Neural Network*” e CM

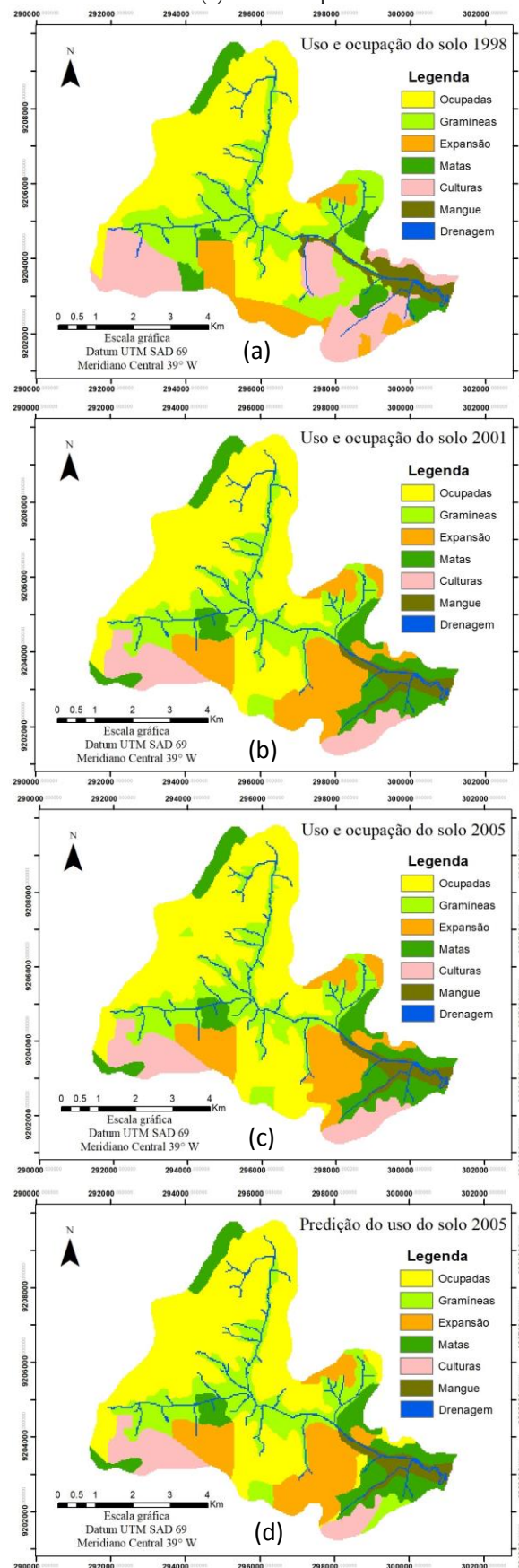
“cadeias de Markov”. Para o ano de 1998 observou-se a predominância das classes de gramíneas ao longo do rio principal da bacia e áreas ocupadas com habitação na porção noroeste da bacia, enquanto que para porção sudoeste foram identificadas principalmente as classes de mangue e culturas diversas.

A bacia do rio Cuiá apresentou as seguintes quantificações de áreas para o ano de 1998: (a) Gramíneas = 9.88 km², representando 24.70% da área total da bacia, (b) Expansão = 3.48 km², o equivalente a 8.69% , (c) Mata = 2.70 km², sendo 6.75% do total da área de estudo; (d) Culturas = 6.84 km² com 17.09% da área da bacia, (e) Ocupadas = 15.29 km², com 38.21% da área da bacia, sendo, neste ano, o tipo de cobertura que foi o mais expressivo, (f) Mangue 1.82km², sendo 4.55% (Figura 3a).

No ano de 2001, a configuração da cobertura vegetal da área de estudo apresentou as seguintes áreas: (a) Gramíneas = 8.01 km², ou 20.02% da área toda estudada; (b) Expansão = 6.48 km² (16,20% da área); (c) Mata = 4.80 km² ou 12.00% da área total da bacia; (d) Culturas = 3.59 km² (8,98%) e (e) Ocupadas = 15.72 km² da área de estudo o que equivale a 39,31%, (f) Mangue 1.40 ou 3.49% da área da bacia do rio Cuiá. A Figura 3(b) apresenta o mapa da cobertura vegetal referente ao ano de (2001), observou-se que a classe de ocupação foi a mais representativa para esse ano. Na porção noroeste foi verificada a mudança da classe de Ocupadas para classe Gramíneas, essa mesma variação foi identificada na área oeste da bacia, no entanto, foi percebida a transição da classe de cultura e mata.

Para o ano de 2005 (Figura 3c), as classes temáticas apresentaram os seguintes resultados: (a) Gramíneas = 7.62km² (19.06% da área da bacia), (b) Expansão = 5.62km² (correspondente a 14.06% da área), (c) Mata = 4.95km² (12.38%), (d) Culturas = 3.43km² (8.58%) e (e) Ocupadas = 116.98 km² (42.43%), (f) Mangue =1.40 km² (3.49%). Como nos outros anos, na porção noroeste observaram-se predominância da classe Ocupadas e um aumento das classes Expansão. Verificou-se perda da classe gramínea e aumento da ocupação quando comparado ao mapa classificado para 2001.

Figura 3 – Mapas dos uso e ocupação do solo da na bacia do rio Cuiá para os anos: (a) 1998, (b) 2001, (c) 2005 e (d) estimado para 2005



Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da pesquisa.

Analisando os mapas de uso do solo obtidos, verificou-se que a classe Gramínea apresentou uma diminuição na área do ano 1998 para 2001, gradativamente; a classe Expansão mostrou um aumento para os dois períodos consecutivos e uma diminuição em 2005; a Mata apresentou aumento para os três períodos consecutivos; a Cultura teve uma diminuição consecutiva nos três períodos; a Ocupadas apresentou um aumento nos três períodos; e, finalmente, a classe Mangue teve um aumento no primeiro período e uma leve diminuição para o segundo período, conservando a mesma área. A Tabela 3 apresenta as áreas para cada classe temática identificada na bacia do rio Cuiá referente aos três anos estudados.

Tabela 3 – Cobertura vegetal na bacia do rio Cuiá, em 1998 a 2005

Classe de uso do solo	1998		2001		2005	
	Área (km ²)	%	Área (km ²)	%	Área (km ²)	%
Gramíneas	9,88	24.70	8.01	20.02	7.62	19.06
Expansão	3,48	8.69	6.48	16.20	5.62	14.06
Mata	2,70	6.75	4.80	12.00	4.95	12.38
Culturas	6,84	17.09	3.59	8.98	3.43	8.58
Ocupadas	15,29	38.21	15.72	39.31	16.98	42.43
Mangue	1,82	4.55	1.40	3.49	1.40	3.49

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da pesquisa.

Aplicação da modelagem futura do uso do solo na bacia do rio Cuiá

A Tabela 4 apresenta as variáveis explanatórias testadas a partir do teste de Cramer para a modelagem do uso do solo modelado em 2005, que serviu para a validação do cenário 2030 na bacia do rio Cuiá. As variáveis explanatórias que apresentaram valores maiores que 0,15 e assim consideradas na modelagem foram: (a) Mudanças entre 1998 a 2001, (b) Declividade, (c) Distâncias rede de drenagem e (d) “Likelihood” Probabilidade das mudanças entre 1998 a 2001.

Tabela 4 – Resultado do teste V de Cramer para as variáveis explanatórias testadas na modelagem para a área de estudo.

Variável explanatória	V de Cramer
Mudanças entre 1998 a 2001	0,55
Probabilidade das mudanças entre 1998 a 2001	0,96
Declividade	0,16
Rede de drenagem	0,11
Distâncias rede de drenagem	0.27

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da pesquisa.

Esse resultado do teste V de Cramer, que incluiu as variáveis anteriormente citadas, indicou que as mudanças ocorridas nos anos de 1998 e 2001 na área de estudo foram significativas para a simulação e que existe maior possibilidade da permanência do comportamento das alterações no uso do solo para o cenário futuro do ano de 2030. Porém, para variável de rede de drenagem foi encontrado o menor resultado quanto ao teste de Cramer, o que representou baixa significância dessa variável para a modelagem do uso do solo na bacia.

Em relação aos resultados comparativos entre a classificação do uso e ocupação do solo de 2005 (Figura 3c) e a simulada “predição 2005” (Figura 3d) mostram que a classe “Ocupadas” apresentou resultados satisfatórios quanto aos acertos na localização espacial. Em compensação, nas classes “Expansão” e “Culturas”, a modelagem apresentou resultados satisfatórios com pequenas trocas de classes na porção nordeste da bacia para “Expansão”, e na porção sudoeste da bacia para “Culturas”.

A Tabela 5 mostra a quantificação das classes de uso do solo do mapa classificado e do mapa obtido com a modelagem dinâmica e a variação percentual de cada área na bacia. O resultado mostra que as classes Expansão, Culturas e Ocupadas apresentaram as maiores perdas de área. As classes de Gramíneas e Mata foram as que obtiveram os maiores e o Mangue não apresentou variação. Os resultados obtidos mostraram que a acurácia da concordância entre as imagens classificada e a estimada foram boas, com as medidas de discordância de quantidade 0,0083 e o desacordo de alocação 0,0317, e de precisão avaliada com o índice Kappa = 0,94 (Kstandard = 0,94; Kno = 0,95; Klocation = 0,95), indicando uma qualidade Excelente para a modelagem do uso do solo, segundo a classificação proposta por Landis & Koch (1977).

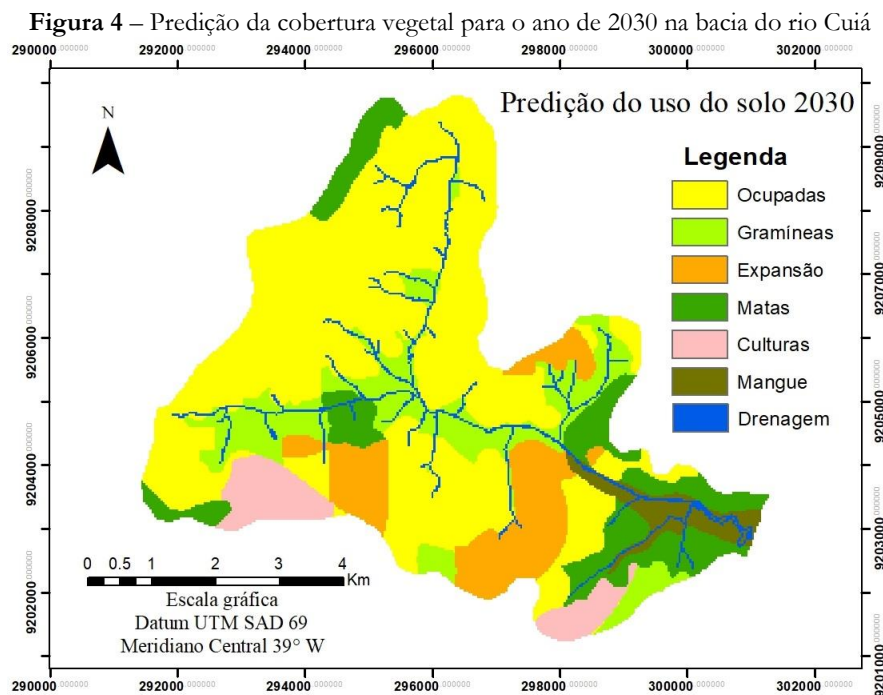
Tabela 5 – Checagem entre uso do solo de 2005 classificado e estimado

Classe de uso do solo	Área (km ²)		Variação (%)
	Mapa classificado 2005	Predição 2005	
Gramíneas	7,62	7,50	-1.6%
Expansão	5,62	5,88	4.6%
Mata	4,95	4,88	-1.4%
Culturas	3,43	2,95	-14.0%
Ocupadas	16,98	17,42	2.6%
Mangue	1,40	1,40	0.0%

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da pesquisa.

Previsão do uso e ocupação do solo para o ano de 2030

As probabilidades de transição da cobertura vegetal de 1990 e 1999 pelo MLP e CM propiciaram a realização da predição do ano de 2030. A Figura 4 mostra o resultado da modelagem do uso do solo para 2030. Nessa modelagem foi encontrada uma previsão de área de (a) Gramíneas = 5,75 km² (que representa 14,36% da área total da bacia), (b) Expansão = 4,40 km² (11,00%), (c) Mata = 4,85 km² (12,13%), (d) Culturas = 2,08 km² (5,19%), (e) Ocupadas = 21,53km² (53,81%), sendo esta classe a mais representativa, e por fim (f) Mangue = 1,40km² (3,49%) (Tabela 6).



Fonte: Dados da pesquisa.

Tabela 6 – Verificação do uso e ocupação do solo da área de estudo na predição 2030

Classe de cobertura	Área (km ²)	Área (%)
Gramíneas	5,75	14,36
Expansão	4,40	11,00
Mata	4,85	12,13
Culturas	2,08	5,19
Ocupadas	21,53	53,81
Mangue	1,40	3,49
Área da bacia	40,00	100,00

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da pesquisa.

Na porção nordeste da bacia foi identificado, para o ano de 2030, um possível aumento das áreas Ocupadas, as quais substituirão a classe Gramíneas e houve também a mudança da classe de Cultura para Gramíneas na porção sudoeste da bacia. No entanto, para a porção sul foi encontrada diminuição da classe de Expansão em substituição pela

classe Ocupadas. Observou-se também que, na área que compreende o centro da bacia, a modelagem mostrou uma diminuição da classe Gramíneas em detrimento do aumento das áreas Ocupadas.

Para a modelagem dinâmica do uso do solo, o melhor resultado do treinamento baseado no algoritmo MLP, obtido a partir da iteração das variáveis explanatórias com as transições de interesse, obteve-se uma taxa de acurácia de 98.64%, após 10.000 iterações.

Ainda analisando o comportamento das classes de uso do solo dos anos de 1998, 2001, 2005 e do cenário previsto para 2030: a classe Gramíneas mostrou uma mudança significativa com perdas de áreas contínuas ano após ano, entretanto, para as áreas Ocupadas, que foi encontrado aumento em sua área de 15,29km², em 1998, para 21,53 km² em 2030. Em contrapartida, para as classes de Expansão houve aumento e diminuição de áreas, variando entre os anos, sendo o menor valor em 1998 e o maior no ano de 2001. E a classe de Mangue teve uma diminuição em sua área do ano de 1998 para o ano de 2001, ficando inalterada nos demais anos.

CONCLUSÃO

O trabalho apresentou as mudanças ocorridas no uso e ocupação do solo para a bacia do rio Cuiá entre os anos de 1998, 2001 e 2005. Em todos os anos, as principais alterações foram com relação ao aumento da classe Ocupadas que se referem às áreas com maior densidade populacional e destinadas a conjuntos habitacionais, e uma diminuição das classes Expansão e Culturas, as quais deram lugar à classe Ocupadas.

Como relação à modelagem dinâmica do uso e ocupação do solo, o modelo proposto mostrou um resultado muito bom para a bacia do rio Cuiá, bem como uma acurácia na aprendizagem da rede neural com uma taxa de 98.64%, após as iterações definidas e o índice Kappa de 0,94, ou seja, 94% de concordância entre o uso do solo estimado e o uso do solo classificado, segundo Landis & Koch (1977). Esses números mostram que a qualidade da previsão é de muito boa para ótima.

Alguns fatos colaboraram para que tenha ocorrido esse bom resultado, como o tamanho da área de estudo com cerca de 40km², a boa resolução das imagens de satélite, a forma como foi realizada a classificação dos mapas e o padrão nas evoluções e regressão das classes classificadas na área de estudo.

O cenário calculado para o ano de 2030 apresentou um aumento considerado na classe Ocupadas, com 21,53 km², representando cerca do 53,81% da área de toda a bacia. Outro fato interessante é que a previsão mostrou uma grande diminuição da classe

gramíneas na porção norte da bacia, isso mostra que, caso não seja feito nada, essa vegetação que é representativa da mata ciliar pode desaparecer na realidade, próxima ao ano 2030.

Com isso, esse trabalho mostra que essa técnica de modelagem como o LCM pode ser usada como ferramenta de gestão dos recursos hídricos, bem como uma ferramenta para o planejamento e ordenamento do uso e ocupação do solo futuro.

REFERÊNCIAS

BISPO, T. C.; LEVINO, N. A. Impactos ambientais decorrentes do uso e ocupação desordenada do solo: um estudo da região da periferia de Maceió/AL. ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 31., 2011, Belo Horizonte. **Anais eletrônicos...** Belo Horizonte, 2011. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2011_tn_sto_143_901_18402.pdf>. Acesso em: 23 set. 2018.

COELHO, V. H. R.; MONTENEGRO, M. S. G. L.; ALMEIDA, C. N.; LIMA, E. R. V.; RIBEIRO NETO, A.; MOURA, G. S. S. Dinâmica do uso e ocupação do solo em uma bacia hidrográfica do semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 1, p. 64-72, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662014000100009>>. Acesso em: 16 set. 2018.

COHEN, J. A coefficient of agreement for nominal scales. **Educational and Psychological Measurement**, v. 20, n. 1, p. 37-46, abr. 1960. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1177/001316446002000104>>. Acesso em: 16 set. 2018.

GOVERNO DO ESTADO DA PARAÍBA. Secretaria da Educação. Universidade Federal da Paraíba. **Atlas geográfico do Estado da Paraíba**. João Pessoa: GRAFSET, 1985.

HAMDY, O.; ZHAO, S.; SALHEEN, M. A.; EID, Y. Y. Analyses the driving forces for urban growth by using IDRISI Selva Models Abouelreesh - Aswan as a case study. **International Journal of Engineering and Technology**, v. 9, n. 3, p. 226-232, 2017. Disponível em: <<http://www.ijetch.org/vol9/975-R0024.pdf>>. Acesso em: 30 set. 2018.

HAYKIN, S. **Redes Neurais**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001. p. 900.

HONDA, S. C. A. L.; VIEIRA, M. C.; ALBANO, M. P.; MARIA, Y. R. Planejamento ambiental e ocupação do solo urbano em Presidente Prudente (SP). **Revista Brasileira de Gestão Urbana (Brazilian Journal of Urban Management)**, v. 7, n. 1, p. 62-73, jan./abr. 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/2175-3369.007.001.AO04>>. Acesso em: 23 set. 2018.

JENSEN, J. R., **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. Tradução: José Carlos Neves Epiphany et al. São José dos Campos: Parêntese, 2009. Disponível em: <<http://mtc-m16d.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m19/2011/04.01.14.00/doc/jensen.pdf>>. Acesso em: 16 set. 2018.

LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, v. 33, n. 1, p. 159-174, 1977. Disponível em: <<https://www.jstor.org/stable/2529310>>. Acesso em: 16 set. 2018.

LIEBERTRAU, A. M. **Measures of association**. Newbury Park. CA: Sage Publications Quantitative, 1983.

LUIZ, C. H. P. **Modelagem da cobertura da terra e análise da influência do reflorestamento na transformação da paisagem: Bacia do Rio Piracicaba e Região Metropolitana do Vale do Aço**. 2014. 141 f. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

MAS, J. F.; KOLB, M.; PAEGELOW, M.; OLMEDO, M. C.; HOUET, T. Inductive pattern-based land use/cover change models: a comparison of four software packages. **Environmental Modelling & Software**, v. 51, n. 1, p. 94-111, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.09.010>>. Acesso em: 09 set. 2018.

OLIVEIRA, M. S. **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**. 2012. 56 f. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

PAVÃO, M. **Modelagem e Análise de Mudanças do Uso e Cobertura da Terra no entorno de Áreas Protegidas: o caso do Parque Estadual da Cantareira - São Paulo**. 2017. 125f. Tese (Doutora em geografia Física) – Departamento de Geografia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

RIBEIRO, O. J.; SCHIEBELBEIN, L. M. O geoprocessamento como ferramenta de gestão urbana. **Revista TechnoEng**, v. 1, n. 9, jan./jun. 2014.

RODRIGUES, M. T.; RODRIGUES, B. T.; TAGLIARINI, F. S. N. Comparação do desempenho de sistemas de informação geográfica (IDRISI Selva e ArcGIS®) por meio de processamento digital de imagem. **Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 10, n. 2, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.17271/198008271022014877>>. Acesso em: 16 set. 2018.

SAMPAIO, D. M. **Modelagem da cobertura do solo urbano no Vetor Norte da RMBH e projeções de cenários futuros considerando as novas infraestruturas viárias previstas**. 2014. 103 f. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

SESTARI, L.; SEYDELL, M. R. R.; BOZZA, J. L. Georreferenciamento de bacias hidrográficas para o planejamento de uso e ocupação do solo. ENCONTRO NACIONAL, 4., e ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS, 2., 2007, Curitiba. **Anais eletrônicos...** Curitiba, 2007. Disponível em: <http://www.elecs2013.ufpr.br/wp-content/uploads/anais/2007/2007_artigo_083.pdf>. Acesso em: 30 set. 2018.

SILVA, L. P.; SANTOS, C. A. G. Análise espacial dos riscos de erosão e inundação na bacia do rio Cuiá **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 15, n. 3, p. 21-32, jul./set. 2010. Disponível em: <https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/6/1b02ea03b47b69d47edd24a50707b379_6f63a3de0e98f95b476cfcff28065e0f.pdf>. Acesso em: 23 set. 2018.

SILVA, L. P. **Análise espacial de riscos ambientais na bacia do rio Cuiá através de técnicas de geoprocessamento**. 2002. Monografia (Graduação em Geografia) – Departamento de Geografia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2002.

SILVA, L. P. **Modelagem e Geoprocessamento na identificação de áreas com risco de inundação e erosão na bacia do rio Cuiá**. 2007. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) -. Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2007.

SILVA, N. L.; FONSECA, B. M. Análise espaço-temporal das mudanças no uso e cobertura do solo no município de São Thomé das Letras. **Caderno de Geografia**, v. 26, n. 45, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.5752/P.2318-2962.2016v26n45p79>>. Acesso em: 09 set. 2018.

SOARES-FILHO, B.; RODRIGUES, H.; FOLLADOR, M. A hybrid analytical-heuristic method for calibrating land-use change models. **Environmental Modelling Software**, v. 43, n. 1, p. 80-87, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.01.010>>. Acesso em: 09 set. 2018.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul-ABRH, 1998. 669 p.

VALÉRIO-FILHO, M.; SERAFIM, C. R.; PEREIRA, M. N.; ALVES, M. Análise temporal do crescimento urbano em áreas de risco à erosão com o suporte das geotecnologias. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. **Anais...** Goiânia, INPE, 2005. p. 3927-3933.

XAVIER, A. P. C.; SILVA, R. M. A GIS-based method for temporal dynamic modelling of the land use and land cover in the Tapacurá River basin (PE). **Geociências**, v. 37, n. 1, p. 193-210, 2018. Disponível em: <https://www.revistageociencias.com.br/geociencias-arquivos/37/volume37_1_files/37-1-artigo-15.pdf>. Acesso em: 09 set. 2018.