

Análise da dinâmica da cobertura vegetal e estocagem de carbono pelo modelo de Cadeias de Markov.

Livia dos Santos Abdalla ¹
Antonio Julio Barreira Neto ¹
Kenny Tanizaki Fonseca ¹

¹ Universidade Federal Fluminense – UFF
{abdalla.livia@gmail.com; julio@fisica.if.uff.br; kenny.fonseca@gmail.com}
Av. Gal. Milton Tavares de Souza, s/nº - Campus da Praia Vermelha - Niterói - RJ.
Telefone: (21) 26495979

Abstract. The carbon cycle is the chemical engine that provides power and weight to most living things, besides being closely related to the regulation of the global atmosphere and, consequently, climate. Growing forests absorb and fix large amounts of carbon and can still contribute significantly to the recovery of important ecosystem services. In this regard, this study focuses on simulating the dynamics of carbon sequestration in a mosaic of different vegetation area by the use of two images from Landsat TM, for the years 1993 and 2009. Through these images, we could analyze the changes occurred in the use and land cover, especially in areas of forests, grassland and bare soil, elements that absorb more carbon from among the ranks and in a backdrop of vegetation succession. Field validations were made in the cities of Niterói and Marica, regions with large degraded areas and remaining forest lands. From these first results it was possible to simulate the dynamics of vegetation cover by the Markov model associated with cellular automata in order to obtain a projection of carbon stocks. Despite the inaccuracy of the model and the uncertainties associated with forest regeneration cover classification and its biomass this was a first approach for obtaining information on vegetable biomass in the future.

Palavras-chave: carbon sequestration, images Landsat, spatial cellular automata, vegetation dynamics simulation, Atlantic Forest. seqüestro de carbono, imagens Landsat, autômato celular territorial, simulação da dinâmica vegetal, Mata Atlântica.

1. Introdução

As mudanças climáticas globais atualmente observadas destacam-se como um dos maiores problemas que a humanidade deverá enfrentar num futuro próximo. Trata-se de um fenômeno natural da história do Planeta Terra, historicamente alternando-se em ciclos de aquecimento e resfriamento. A partir da revolução industrial (séc. XIX) o aumento do consumo de combustíveis fósseis tem provocado o lançamento de grandes quantidades de carbono para a atmosfera ocorre desde então, contribuindo para uma intensificação deste ciclo natural de aquecimento global.

Esta intensificação é atribuída ao aumento da concentração de gases de efeito estufa (gás carbônico, ozônio, metano e óxido nitroso, dentre outros) na atmosfera. A maior contribuição é a do gás carbônico, devido à sua grande concentração na atmosfera e a emissão, quando estimulado, de radiação infravermelha. O carbono possui um ciclo biogeoquímico que reflete suas diversas transformações na biosfera fornecendo energia e sendo elemento estrutural de todos os seres vivos. É um dos responsáveis pela composição e regulação atmosférica, e conseqüentemente pelo clima.

A influência direta do homem no ciclo do carbono estrutura-se basicamente de quatro setores de atividades humanas: as emissões do setor industrial e de produtos industrializados; do setor energético e de transporte; as do setor de tratamento de efluentes e resíduos; e as do setor mudança de uso do solo. As duas primeiras interações são responsáveis por 75% das emissões. Já no que se refere ao uso da terra, ocorrem emissões (desmatamento e uso intensivo do solo) e seqüestros relacionados à regeneração de florestas. As emissões de carbono associadas ao uso da terra, embora sejam menores que as demais fontes, ainda contribuem significativamente para a concentração do gás carbônico na atmosfera com cerca de 25% (IPCC, 2007).

Assim, além da redução das emissões, a implantação de um amplo programa de reflorestamento contribuiria para a redução efetiva das concentrações do CO atmosférico. Florestas em regeneração absorvem e fixam grandes quantidades de carbono e ainda podem contribuir significativamente para a recuperação de importantes serviços ambientais indispensáveis para o desenvolvimento sustentável (Manfrinato, 2005; apud Santos, F.C.C, 2009).

Neste aspecto, o presente estudo tem por foco simular a dinâmica do seqüestro de carbono em uma área, mosaico de diferentes vegetações, por meio de duas imagens do satélite Landsat TM, referentes aos anos de 1993 e 2009 e, através de estudos de campo feitos nos municípios de Niterói e Maricá, regiões possuidoras de remanescentes florestais e extensas áreas degradadas; foi possível simular a dinâmica da cobertura vegetal por meio do modelo de Cadeia de Markov associado à autômatos celulares obtendo uma projeção do estoque de carbono na biomassa vegetal.

2. Metodologia de Trabalho

2.1. Área de Estudo

Os municípios de Niterói e Maricá localizam-se no litoral do Estado do Rio de Janeiro, entre as coordenadas lat. 22°49'20'' long. 42°39'53'' e lat. 22°59'59'' long. 43°07'32'' (Figura 1). Em Niterói, como exemplo de unidades de conservação, encontra-se a Reserva Ecológica Darcy Ribeiro e em Maricá, a Área de Preservação Ambiental que é composta por restinga e manchas de florestas de Mata Atlântica e o Monumento Natural da Pedra de Itaocaia (onde foram realizados diversos estudos de biomassa em floresta secundária). Existe também o Parque Estadual da Serra da Tiririca, que protege um importante remanescente florestal e está localizado na divisa dos municípios.



Figura1. Localização dos Municípios de Niterói e Maricá

2.2. Análise dos Dados

Com vista a analisar a mudança de uso e cobertura do solo no município, foram utilizadas duas imagens TM/Landsat-5 da órbita/ponto 217/76, referentes às datas 15/ 01/1993 e 28/02/2009; obtidas na página do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

A análise dos dados foi conduzida através do software *IDRISI*, versão Andes, o qual integra funcionalidades direcionadas às aplicações em SIG e Processamento de Imagens. Ele ainda possui funcionalidade analítica em raster, consulta de banco de dados e modelagem espacial em GIS, atendendo, portanto, a todas as etapas pretendidas para a realização do modelo empírico da Cadeia de Markov à qual apresenta-se neste software como um filtro utilitário próprio (*build-in*).

As imagens referentes aos anos de 1993 e 2009 sofreram recortes idênticos, projetadas no sistema de referência UTM-23-S e foram geradas composições coloridas RGB/123. A partir desta composição foi possível caracterizar e interpretar as principais formas de uso e cobertura do solo, além de observar como cada elemento da paisagem foi mantido ou substituído por outro.

Geralmente, as imagens de sensores remotos são sujeitas a uma série de distorções espaciais, não possuindo precisão cartográfica quanto ao posicionamento dos objetos. Assim, torna-se necessário aplicar correções, de modo a reorganizar os pixels da imagem em relação a um determinado sistema de projeção cartográfica. Através do processo denominado *georeferenciamento*, os *pixels* tornam-se agora determinados em termos de coordenadas geográficas e não apenas no sistema de linhas e colunas. (Richards e Jia, 1998; apud Coelho, A. S., 2009).

O processo de classificação utilizado foi a supervisionada, a qual usa áreas de treinamento (training sites) da imagem que representam as classes no terreno a serem classificadas, cujas características são necessárias para estabelecer as assinaturas espectrais das classes. A partir destas amostras, utilizou-se o classificador Multi-Layer Perceptron (MLP) baseado em rede neural.

Foram gerados assim, dois mapas temáticos de uso e cobertura do solo da mesma região nos anos de 1993 e 2009 (Figura 2 e 3). Ambos os mapas possuem as mesmas classes: Floresta, Pastagem, Solo Exposto, Urbano Alta Densidade, Urbano Média Densidade, Água e Areia.

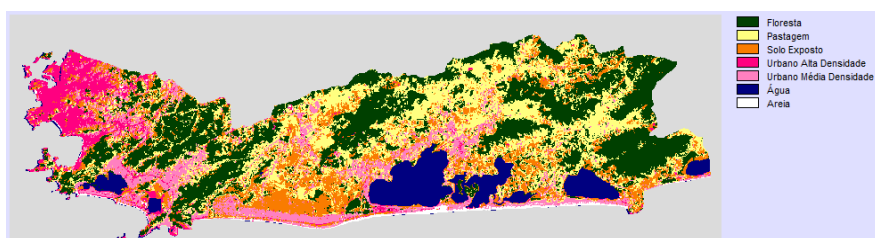


Figura 2. Mapa de Uso e Cobertura do Solo - 1993.

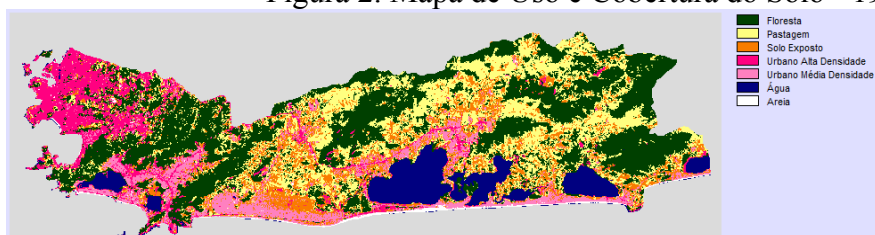


Figura 3. Mapa de Uso e Cobertura do Solo – 2009.

2.3. Projeção da cobertura vegetal utilizando Cadeias de Markov.

A utilização de modelos de dinâmica da paisagem busca a possibilidade de ir além do que simplesmente descrever o ambiente a partir da classificação dos diferentes tipos de uso e cobertura, e, realmente, desenvolver modelos de caráter preditivo com o intuito de analisar os processos dinâmicos que dão origem a uma determinada paisagem. Dentre os modelos que atendem a essas questões, optou-se pelo modelo empírico de Cadeia de Markov, que são sistemas de probabilidade em que, através da alteração observada no tempo t e no tempo $t+1$ faz-se uma projeção do cenário para o futuro.

A projeção deste cenário futuro representa quais os estados possíveis de acontecer, os quais são gerados através da aplicação das probabilidades da mudança de classes que estão na Matriz de Transição (MT) aos pixels do mapa imediatamente anterior à data na qual pretendemos gerar o novo mapa com o provável uso futuro de solo. A MT é uma matriz quadrada, um tensor (uma matriz onde cada elemento a_{ij} é outra matriz), tendo por base 2 cenários (imagens), os quais estão associados às classes (ou tipos) de ocupação do solo e é estabelecida uma probabilidade que indica a possibilidade de mudança de uma classe para outra dentro de um dado setor do cenário. O intervalo de tempo entre estes dois cenários é considerado “unidade de transição” de modo que, ao fazermos uma estimativa de como o uso do solo apresentar-se-á em uma data futura que estará a n unidades de transição do último cenário. A matriz de transformação será aplicada n vezes sucessivamente, de maneira a construirmos um perfil de evolução temporal até a data desejada.

Este procedimento, como todo encadeamento Markofiano, apenas opera temporalmente sem estabelecer vínculos espaciais entre um elemento do terreno (pixel) e seus limítrofes. Os processos Markofianos são complementados no caso da análise da dinâmica do uso e cobertura do solo pelo emprego de autômatos celulares, que são algoritmos que desempenham uma tarefa de acordo com uma regra fixa, que neste caso trata-se de alterar a probabilidade de transição de um tipo de ocupação para outro em função da ocupação dos elementos que os circundam, ou seja, de acordo com o posicionamento dos elementos vizinhos no estado anterior nossa estimativa. Assim, o encadeamento Markofiano estabelece os vínculos temporais e o autômato celular realiza os vínculos espaciais entre os pixels.

O programa *Idrisi* executou estes procedimentos de Autômatos Celulares e Cadeias de Markov seguindo esta lógica tanto para a saída de dados da matriz de transição em pixel ou para a saída em probabilidades (Tabela 1), bem como para o mapa gerado pelas probabilidades (Figura 4), a qual reporta as probabilidades condicionais de uma dada classe mudar para outra classe.

Tabela 1. Matriz de Transição em Probabilidades.

	Floresta	Pastagem	Solo Exposto	Urb. Alto	Urb. Médio	Água	Areia	Total
Floresta	14.26%	1.69%	0.43%	0.20%	0.12%	0.04%	0.00%	16.75%
Pastagem	3.04%	7.14%	2.63%	0.41%	0.70%	0.03%	0.02%	13.97%
Solo Exposto	2.02%	2.81%	2.73%	0.87%	0.78%	0.17%	0.01%	9.39%
Urb. Alto	0.26%	0.10%	0.18%	2.59%	0.25%	0.06%	0.03%	3.47%
Urb. Médio	0.37%	0.64%	1.41%	1.27%	2.62%	0.03%	0.08%	6.42%
Água	0.11%	0.02%	0.02%	0.13%	0.02%	4.16%	0.03%	4.50%
Areia	0.01%	0.01%	0.03%	0.07%	0.16%	0.04%	0.42%	0.73%
Total	20.06%	12.41%	7.44%	5.55%	4.64%	4.54%	0.60%	100.00%

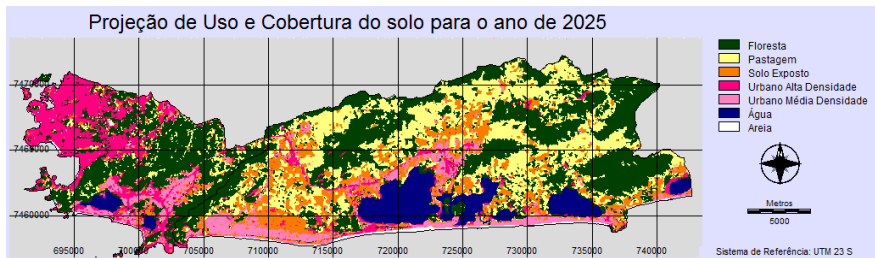


Figura 4. Mapa de Uso e Cobertura do Solo para o ano de 2025.

2.4 Trabalho de campo

O carbono de uma floresta fica estocado em três compartimentos principais: a Biomassa Viva Acima do Solo (BVAS), a biomassa subterrânea (BS) e a matéria orgânica do solo (MOS). Na maioria das florestas (como a Mata Atlântica e a Amazônia) o compartimento mais fácil de ser medido é a BVAS, sendo os demais compartimentos calculados a partir de relações de proporção da estrutura da primeira.

O cálculo do carbono é feito a partir do volume de madeira fresca, utilizado para o cálculo do peso seco da biomassa. A biomassa seca é convertida em carbono dividindo-se o seu peso por 2, pois de uma maneira geral o carbono representa cerca de 50% da biomassa seca da madeira (Fearnside, 1997).

O trabalho de campo, basicamente, consiste em medir o DAP (Diâmetro à altura do peito) e a altura de todas as árvores maiores de 10 cm de DAP e que estejam dentro de uma parcela de solo cuja dimensão deve ser de 100 a 200 metros de comprimento por 10 metros de largura.

Após a delimitação de um transecto (uma área amostral de floresta com limites de 10 m largura por, de 60 até 100 m de comprimento, dependendo da floresta – secundária inicial, média, avançada ou clímax) em uma floresta, são medidos o DAP (diâmetro na altura do peito – 1,3 m do solo) e altura de todos os indivíduos acima de 10 cm de DAP. A medida da altura é feita por meio de um telêmetro com um clinômetro (aparelho que mede o ângulo de visadas da copa e da base do tronco). Deve-se, porém ter uma especial atenção para a calibração e verificação dos valores medidos (Figura 5). Com essas medidas então, é calculada a biomassa de cada árvore utilizando-se equações alométricas (Equação 1) abaixo elaborada a partir de estudos anteriores em diversas localidades do Rio de Janeiro, tendo sido testada e calibrada para a região deste estudo (Tanizaki, 2000 e Marinho, 2010).

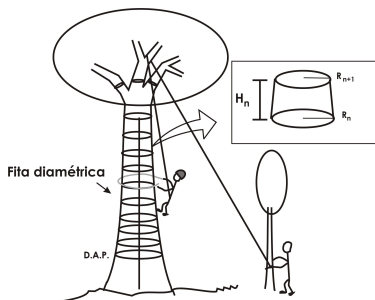


Figura 5: Técnica de escalada para elaboração de equações alométricas não destrutiva (Tanizaki, 2000 e Marinho, 2010)

$$\sum_{n_i}^{i=1}^4 \frac{\pi}{3} \times ((R_n + R_{n+1})^2 - (R_n * R_{n+1})) \quad (1)$$

Equação para cálculo do volume de uma seção de tronco de cone, medido em intervalos de um metro, pela técnica de escalada.

Onde BVAS é a biomassa viva acima do solo (t). DAP é o diâmetro (cm). H é a altura total da árvore (m). FFA é um fator empírico de conversão do volume cilíndrico em volume real e D é a densidade da madeira (peso seco por volume fresco – t/m³).

Os procedimentos para calcular esta incerteza e a propagação de erros são bem complicados, desta forma usaremos o valor de 30% para a maioria das florestas do Rio de Janeiro (Tanizaki, 2000 e Foster Brown, com. pess.).

Para efeito dos cálculos a serem feitos neste estudo será considerado o estoque de uma floresta secundária em estágio médio será considerado um estoque de 75 toneladas de carbono por hectare. Este valor corresponde à média entre formações secundárias iniciais e média, algo aproximado do que uma floresta de aproximadamente 40 anos de abandono em um uso não muito intenso é capaz de estocar. Para o cálculo do estoque de carbono em pastagens foi utilizado o valor de 4 toneladas de carbono por hectare (Brown e Lugo, 1995).

3. Resultados e Discussões

A partir dos mapas de uso do solo para os anos de 1993 e 2009, as classes referentes à floresta, pastagem e solo exposto foram consideradas como um grupo e isoladas das demais, já que estas contribuem significativamente para a estocagem de carbono, enquanto as demais não contribuem para seqüestro ou estoque. O mesmo se fez com o mapa de projeção para o ano de 2025, gerado de acordo com as probabilidades condicionais de Cadeias de Markov.

Como demonstra a tabela 2, o estoque de carbono foi calculado de acordo com as unidades de áreas de cada uma dessas classes; resultando numa estimativa de aumento de 217.817 toneladas/km² de carbono entre 1993 e 2009 e 15.698 toneladas/km² entre 2009 e a projeção referente ao ano de 2025.

Tabela 2: Área e estoque de carbono das classes significativamente contribuintes.

Classes de uso do solo	Estoque de C/classe tC/km ²	Uso do solo			Estoque		
		1993	2009	2025	1993	2009	2025
		km ²	km ²	km ²	tC/km ²	tC/km ²	tC/km ²
Floresta	7.500	151	181	183	1.130.902	1.354.340	1.370.324
Pastagem	400	126	112	111	50.293	44.671	44.385
Solo Exposto	0	85	67	60	0	0	0
Total (tC/km ²)					1.181.194	1.399.011	1.414.709

O aumento do estoque de carbono deve-se à evolução da cobertura arbórea verificada entre os dois primeiros anos; sendo essa tendência também verificada na projeção futura de 2025, pois como esta foi estimada através da matriz de transição obtida pelos mapas 1993 e 2009, detectando-se assim esta probabilidade de mudança, a simulação da dinâmica futura dessas classes segue a mesma lógica.

4. Conclusão

Para uma primeira abordagem, a análise multitemporal da cobertura vegetal nos municípios de Niterói e Maricá, em conjunto com a aplicação do modelo de Cadeias de Markov, associado a autômatos celulares, para a projeção de estocagem de carbono na biomassa vegetal dos municípios; mostra-se um interessante exercício para simular a evolução da vegetação, dos estoques de carbono e recuperação de áreas degradadas, que por ventura sejam reflorestadas.

No que se refere à aplicação do modelo de Markov na projeção dos estoques de carbono na vegetação, a principal conclusão é que as estimativas feitas através de modelos dinâmicos, apesar de seus resultados pouco confiáveis, devem ser utilizados com o propósito acadêmico e para o refinamento destas simulações. Estes exercícios são capazes de provocar reflexões sobre a importância das florestas naturais e o desenvolvimento de ações de recuperação ambiental.

5. Referências Bibliográficas

Brown, S.; Lugo, A.. Aboveground Biomass estimates for tropical moist forest of the Brazilian Amazon. *Interciencia*, v. 17 n°, p. 8-18, 1992.

Fearnside, P.; Guimaraes, W. M.. Carbon Uptake by secondary forests in Brazilian Amazonia. *Forest Ecology and Management*, v. 80, n. 1-3, p. 35-46. 1996.

Nelson, B. W; Mesquita, R; Pereira, J. L. G; Souza, S.G.A.; Batista, G.T; Couto, L.B.. Allometric regression for improved estimates of secondary forest biomass in the central Amazon. *Forest Ecology management*, v. 117, p. 149-167, 1999.

IPCC. Summary for Policymakers. In; Climate Change 2007; The Physical Science Basis. Contribution of Working group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007a

Baca, J.F.M.; Netto, A.L.C.; Menezes, P.M.L. Modelagem da Dinâmica da Paisagem com Processos de Markov. (In): Meirelles, M.S.P.; Câmara, G.; Almeida, C.M. **Geomática: modelos e aplicações ambientais**. Embrapa Informação Tecnológica. Brasília, DF. 2007. 592p.

Eastman, J. Ronald. **IDRISI Andes Tutorial**. Clark Labs, April 2006.

Eastman, J. Ronald. **IDRISI Andes Guide to GIS and Image Processing**. Clark Labs, April 2006.

Tanizaki, K. Avaliação do Estoque de Carbono nas Formações Florestais e na Vegetação Secundária do Estado do Rio de Janeiro. In: Fundação CIDE. **Índice de qualidade dos municípios – verde** (II edição). Rio de Janeiro, 2003. cap 8, p 117 – 125.

Carvalho, P.C.M., Avaliação do estoque de carbono na biomassa arbórea de uma floresta secundária em Marica – RJ. Dissertação (Monografia em Ciências Biológicas) – Universidade Veiga de Almeida, Rio de Janeiro, 2007.

Coelho, D. A., Modelagem de dinâmica do uso da terra e cobertura vegetal na região de Santarém, oeste do Pará, 2009, 56 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Universidade Federal do Pará (UFPA), Belém, 2009.

Pedrosa, B. M. Ambiente computacional para modelagem dinâmica. 2003, 71 p. Tese (Doutorado em Computação Aplicada) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) - São José dos Campos. 2003.

Marinho, Ludmila de Souza Varejão. MODELO ALOMÉTRICO PARA A MATA ATLÂNTICA ELABORADO ATRAVÉS DE TÉCNICAS DE ESCALADA. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Geoquímica Ambiental. UFF. 2010.

Tanizaki, K. Fonseca. Impacto do Uso da Terra no Estoque e Fluxo de Carbono na Área de Domínio da Mata Atlântica: Estudo de Caso Estado do Rio de Janeiro. 2000. Tese (Doutorado em Geoquímica Ambiental) - Universidade Federal Fluminense (UFF) Niterói, 2000.

Santos, F.C.C.; Tanizaki, K.; Mendonça, A.R.; Santos, H. F.; Ramos, P.T.. Estimativa do estoque de carbono na biomassa viva acima do solo em floresta secundária de mata atlântica – Município Engenheiro Paulo de Frontin, RJ. In: Congresso de Ecologia do Brasil (SEB), 09, 2009, Minas Gerais. Anais do IX Congresso de Ecologia do Brasil, São Lourenço – MG. Disponível em <http://www.seb-ecologia.org.br/2009/resumos_ixceb/958.pdf>. Acesso em: 15 de novembro de 2010.