



*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Centro Nacional de Pesquisa de Solos
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

ISSN 1678-0892

Dezembro, 2004

Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 61

Metodologia para Analisar a Dinâmica da Paisagem, Projetar Simulações Futuras e Construir Cenários

*Jesus Fernando Mansilla Baca
Ana Luiza Coelho Netto
Paulo Márcio Leal de Menezes*

Rio de Janeiro, RJ
2004

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Solos

Rua Jardim Botânico, 1.024 Jardim Botânico. Rio de Janeiro, RJ

Fone:(21) 2274.4999

Fax: (21) 2274.5291

Home page: www.cnps.embrapa.br

E-mail (sac): sac@cnps.embrapa.br

Supervisor editorial: *Jacqueline Silva Rezende Mattos*

Normalização bibliográfica: *Cláudia Regina Delaia*

Revisão de Português: *André Luiz da Silva Lopes*

Editoração eletrônica: *Pedro Coelho Mendes Jardim*

1ª edição

1ª impressão (2004): online

Todos os direitos reservados.

A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Mansilla Bacca, Jesus Fernando.

Metodologia para analisar a dinâmica da paisagem, projetar simulações futuras e construir cenários / Jesus Fernando Mansilla Bacca; Ana Luiza Coelho Netto; Paulo Márcio Leal de Menezes. - Rio de Janeiro : Embrapa Solos, 2004.

36 p.. - (Embrapa Solos. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento; n. 61)

ISSN 1678-0892

1. Dinâmica da Paisagem - Metodologia. 2. Dinâmica da paisagem - Metodologia. I. Coelho Netto, Ana Luiza. II. Menezes, Paulo Márcio Leal de. III. Título. IV. Embrapa Solos (Rio de Janeiro). VI. Série.

CDD (21.ed.) 558.11

© Embrapa 2004

Sumário

Introdução	9
Análise da Dinâmica da Paisagem	11
Matriz de Área (MA) de dados vetoriais	12
Matriz de Porcentagens (MP) de área	15
Vetor de Estados (VE) da paisagem	16
Projeção de Simulações Futuras	17
Matriz de Transição (MT)	17
Simulação da Dinâmica da Paisagem	20
Projeção dos Estados da Paisagem	20
Iniciar	21
Finalizar	21
Algoritmo “efeito de borda” para simular a Dinâmica da Paisagem	22
Gerações de Imagens ao longo do Tempo	25
Mapa Modal da Simulação e o Mapa de Erros	27
Construção de Cenários.....	30
Cenários alternativos	31
Conclusões.....	34
Referências Bibliográficas.....	35

Metodologia para Analisar a Dinâmica da Paisagem, Projetar Simulações Futuras e Construir Cenários

Jesus Fernando Mansilla Baca¹

Ana Luiza Coelho Netto²

Paulo Márcio Leal de Menezes²

Resumo

Este trabalho é uma parte da pesquisa desenvolvida na tese de doutorado do autor e orientada pelos co-autores (Mansilla Baca, 2002). Nele é apresentado um esquema para análise da dinâmica da paisagem a partir de duas imagens em dois momentos diferentes, de um conjunto de classes que formam a paisagem; são criadas uma Matriz de Área (MA) e uma Matriz de Porcentagens (MP) de áreas totais que permitem extrair a dinâmica da paisagem entre os tempos considerados. Como informação marginal destas matrizes, são criados os Vetores de Área e Porcentagens (VA e VP) com as áreas totais e porcentagens das diferentes classes nos referidos tempos. Com a MA ou MP é formada a Matriz de Transição (MT), denominada também "Matriz Estocástica". Foi desenvolvido o "algoritmo de efeito de borda", que, conjuntamente com o VP e a MT, permite espacializar a ocorrência de classes em cada elemento (pixel) da paisagem para tempos futuros.

Com este esquema foi possível simular a cobertura e uso do solos do Maciço da Tijuca em Rio de Janeiro anualmente de 1972 até 2032 inicialmente e posteriormente até 2092. Com o uso de diferentes MT foram geradas diferentes imagens de simulação, ou seja, diferentes cenários, que permitem analisar os efeitos de "Se a

¹ Pesquisador Embrapa Solos, R. Jardim Botânico, 1024. CEP: 22460-000, Rio de Janeiro, RJ. E-mail: jesus@cnpq.embrapa.br

² Professor e pesquisador Universidade Federal de Rio de Janeiro, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, RJ. E-mail: ananetto@globocom.com, pmenezes@unisys.com.br

paisagem é gerenciada de uma forma ..., então o resultado para o futuro será ...". Este tipo de exercício permite desenvolver hipóteses sobre gerenciamento das paisagens, importante ferramenta nas tomadas de decisões.

Termos de indexação: dinâmica da paisagem, dinâmica espaço temporal, simulações futuras, projeções futuras e cenários futuros.

Methodology To analyze the Dynamics of the Landscape, To project Future Simulations and To construct Scenes

Abstract

This work is a part of doctoral thesis of the author and advisors the co-authors (Mansilla Baca, 2002). It is presented a framework for analysis of the dynamics of the landscape with two images at two different moments of a set of classes that form the landscape; a Matrix of Area (MA) and a Matrix of Percentages of total areas are created (MP) which allow representing the dynamics of the landscape between the considered times. As marginal information of these matrix, the Vectors of Area and Percentages (VA and VP) are obtained with the total areas and percentages of the different classes in the related times. With MA or MP is formed the Matrix of Transition (MT) also called "Random Matrix". An "edge effect algorithm" was developed which, jointly with the VP and MT, allows one to predict the spatial occurrence of a specific class at a given time in the future.

With this framework was possible to simulate the land cover land use of soils of the Tijuca Massif in Rio de Janeiro – Brazil from 1972 to 2032 firstly and to 2092 latterly. With the use of different transition matrix were simulated different images, or different scenarios, that they permit to analyze the effects of "If the landscape is managed in a form ..., then the result for the future will be ...". This type of exercises permit hypotheses related to the management of the landscapes, important tool to decision support.

Keywords: dynamic landscape, space time dynamic, future simulations, future projections, future scenarios.

Introdução

A característica dinâmica das paisagens faz com que os modelos empregados para estudá-la devem considerar abordagens apropriadas para caracterizar tal dinâmica. As paisagens consideradas como sistemas abertos estão em interação com outros elementos externos, numa troca de fluxo de energia e transferência de matéria entre eles. Além disso, a dinâmica interna entre seus diversos componentes torna mais rica e complexa sua estrutura, com elementos imbricados entre eles, com realimentações negativas que regulam seus fluxos (auto-evolução) e realimentações positivas que criam novas interações (auto-organização) (Naveh & Lieberman, 1984).

As técnicas estabelecidas para caracterização da dinâmica de uma paisagem envolvem a análise de diferentes representações cartográficas: mapeamentos, fotografias aéreas, imagens de satélites, etc. de diferentes épocas, ou seja, multitemporais, as quais servem para o cálculo de métricas que descrevem globalmente a variação das características da paisagem (por exemplo, forma dos fragmentos, largura de corredores, porosidade de matriz, etc.) como uma função de tempo, através de três parâmetros independentes: *tendência geral*, *amplitude da oscilação* e *ritmo da oscilação*.

Considerando duas imagens da mesma paisagem tomadas dentro de um certo intervalo de tempo, e olhando como cada elemento da paisagem é mantido ou substituído por outro tipo de elemento, pode-se construir uma matriz de transição e calcular a taxa de substituição: a porcentagem da mudança de cada uma das classes, baseadas no número total de pontos observados. Essas taxas são importantes porque relacionam mudanças na estrutura de uma paisagem, portanto, mudanças no seu funcionamento (Forman & Gordon, 1986). Uma classificação de imagem multitemporal torna isso possível e permite entender a dinâmica da paisagem além de como cada um de seus elementos interage em tal processo. No entanto, há um espectro de modos para considerar mudança da paisagem que percorre do simples e prontamente interpretável, para outros mais realistas (complicados) e menos interpretáveis.

Talvez os dados mais fundamentais em mudança da paisagem surjam de observações do estado de uma paisagem numa série histórica, com pelo menos duas datas diferentes. Por exemplo, poder-se-iam ter mapas de cobertura das terras de imagens de satélite classificadas obtidas para duas datas separadas de dez anos e notar-se-ia que algumas das celas (*pixels*) mudaram de classe naquele intervalo de tempo.

Para paisagens com uma boa série histórica, tal como mapas de uso e cobertura do solo, poderia ser derivada uma série de modelos de Markov de primeira ordem, uma com cada par de mapas. Se as taxas de mudança forem as mesmas através de todos os períodos, bastaria só uma matriz e esta é dita estacionária.

Matrizes de transição não-estacionárias sugeririam que as regras ou forças de mudança da paisagem variassem com o passar do tempo. Esse seria o caso de regiões orientadas por variações físicas, políticas, sociais e econômicas cujo mudança claramente é observada na correspondente paisagem.

Há um teste formal para determinar a estacionariedade de matrizes de transição (Usher, 1992), mas também o de não-estacionariedade, é óbvio, quando a projeção de um período de tempo não coincide com o estado da paisagem no próximo período, isto é, se a projeção da paisagem baseada na sua representação nos tempos t_1 e t_2 (passo p ou diferença de tempo $dt = t_2 - t_1$) não prediz o estado no momento t_3 ($t_2 + dt$)

Isso é porque o modelo de Markov é uma descrição empírica completa das mudanças observadas na proporção de tipos de cobertura na paisagem, por conseguinte, tem que reproduzir as mudanças agregadas para o período para o qual o modelo foi construído; ou como apresentado na teoria markoviana, pode-se ter um rico conjunto de série histórica da paisagem, porém o modelo de Markov só reflete as tendências do intervalo no qual foi construída a matriz de transição não levando em consideração os outros dados da série. Assim, se o modelo falhou para o momento t_3 , então as taxas de transição mudaram entre o período de tempo t_2 e t_3 .

Outras características da dinâmica da paisagem são as dependências espaciais. Há dois tipos gerais destas dependências espaciais:

- as covariâncias espaciais condicionadas, que relacionariam dependências por tipo de solo, posição topográfica, ou outras variáveis (temáticas) ambientais medidas em um determinado ponto. Por exemplo, as taxas de mudança entre tipos de vegetação poderiam depender das condições edáficas ou microclimáticas;
- outro tipo de associação espacial é o efeito de vizinhança, por meio de qual as transições num determinado ponto dependem de condições nas celas que

cercam aquele ponto. Exemplos incluiriam uma variedade de processos contagiantes, como dispersão de semente, incêndio, peste ou erupções de doença, ou a proximidade de outros usos de terra.

Essas complicações orientam a abordagem da modelagem para um esquema de Markov estendido, para modelos em que as probabilidades de transição não só dependem do estado atual do sistema, mas também de algumas outras condições declaradas. Então, a Matriz de Transição conteria probabilidades condicionais; quer dizer: a probabilidade de um pixel de tipo i mudar para tipo j depende de alguma condição k . Nisso, a probabilidade simples p_{ij} torna-se $p_{ij|k}$ de probabilidade condicional.

O assunto final concerne à suposição de que, para prever o estado futuro do sistema, basta conhecer seu estado atual; nos casos em que isso é verdade, o processo é verdadeiramente de primeira ordem. A rigor, pode haver casos em que a informação sobre estados anteriores adicionais é precisa. Por exemplo, se o uso da terra anterior tem um resíduo (legado) afetando a dinâmica sucessional futura, então o sistema retém uma “memória” de condições antecedentes; a dinâmica não é de primeira ordem.

Esses casos conduziram a um modelo de Markov de uma ordem maior (por exemplo, em um modelo de segunda ordem, precisar-se-ia conhecer o estado do sistema em momento t_1 e t_2), para prever seu estado no momento t . Sistemas com “memória” até mais longa ainda requereriam modelos de ordens maiores. Há extensões do modelo que permitem explicar a não-estacionariedade nas transições; mas novamente essas extensões fazem parte do modelo não-Markoviano e complicam a simulação. Estas extensões consideram que a dinâmica da paisagem estaria condicionada a memória histórica não somente considerando o período de mudança, senão também outros períodos anteriores e a interação entre eles, daí surgem os modelos de 2ª ordem, 3ª ordem e assim sucessivamente. Como comprovado pelos testes de não-estacionariedade da matriz de transição esta parece ser a característica das paisagens no mundo real e daí sua complexidade.

Análise da Dinâmica da Paisagem

Uma das características principais das paisagens é sua mudança em relação ao tempo, porque as paisagens refletem os ciclos biogeoquímicos e o fluxo de energia, e, como em cada fragmento da paisagem têm-se características próprias de

composição físico-química e condições ambientais diferentes, então podem ser esperadas dinâmicas diferentes em cada posição espacial. Outra característica é a dinâmica entre fragmentos (componentes diferentes), que faz uma interação entre estes, com realimentação positiva e negativa com os resultados, como é explicada pela Ecologia da Paisagem (Naveh & Lieberman, 1984; Odum, 1983). Para caracterizar tal dinâmica, e com o emprego de dois mapas classificados em dois tempos diferentes, apresentam-se: a matriz de área, a matriz de porcentagens, os vetores de estados e a matriz de transição, tanto para dados vetoriais (polígonos) e raster (*pixels*). Todo esse instrumental permite quantificar e apresentar em forma numérica ou gráfica como é a composição dos diferentes componentes de uma paisagem e a interação entre eles, formando sistemas como apresentado na Teoria Geral de Sistemas.

Matriz de Área (MA) de Dados Vetoriais

Considere uma paisagem representada vetorialmente no qual cada polígono representa uma área homogênea da paisagem (Câmara, 1995). Uma paisagem teria numa situação tal um conjunto de classes cada qual representando áreas diferenciadas em relação a um atributo ou à temática em estudo. Considerando uma paisagem, em dois tempos diferentes sua dinâmica será dependente da intensidade da dinâmica das suas classes. Para determinar e explicitar tal dinâmica, tomam-se duas paisagens de uma mesma área, de uma mesma temática e em duas épocas diferentes. Para fins de aplicar modelos de simulação, é necessário que as classes em ambas épocas sejam as mesmas, no entanto para fins de analisar a dinâmica da paisagem não se precisa disto. Para este trabalho e para o restante do presente capítulo foram empregados os Mapas de Uso de Solos do Projeto Estudos de Qualidade Ambiental do Geocossistema do Maciço da Tijuca, desenvolvido pelo Laboratório de Geo-Hidroecologia (GEOHECO), do Instituto de Geociências do Departamento de Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) (Geoheco, 2000a, 2000b, 2000c).

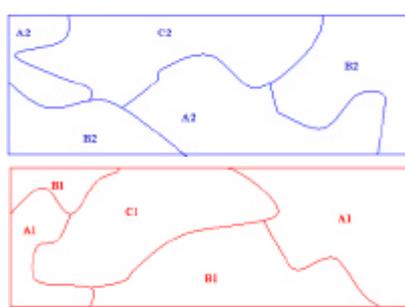


Fig. 1. Representação vetorial de duas paisagens em diferentes épocas.

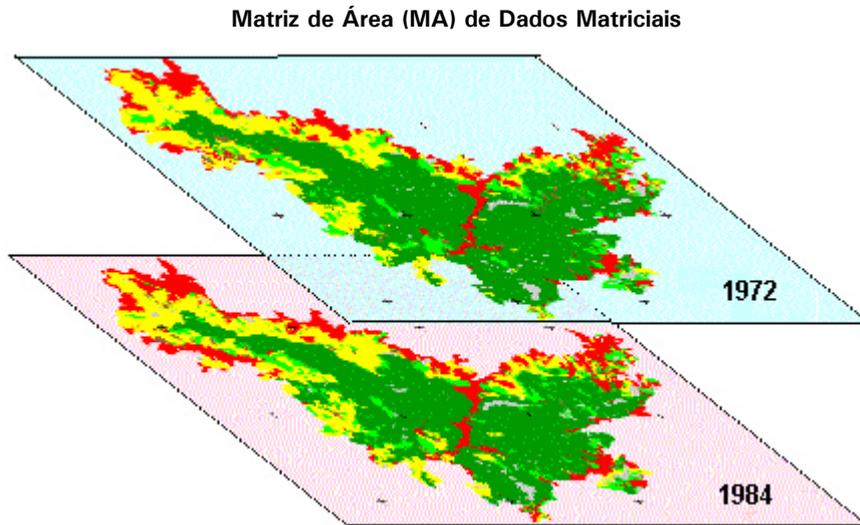


Fig. 3. Imagens de duas paisagens de uma mesma área nos tempos T1 e T2.

Uma outra representação das paisagens é através de dados matriciais (Câmara, 1995), no qual a paisagem é representada por um conjunto de celas (pixels), as quais tem uma classe associada (Figura 3). Neles cada cela representa uma área do terreno, portanto a determinação de uma Matriz de Área (MA) similar à apresentada anteriormente (Tabela 1) será feita com a contabilização de cada cela simultaneamente nos dois tempos considerados (1972 e 1984) agregando em cada elemento da matriz uma unidade conforme seja determinada na contabilização das mudanças. Como se conhece a área que representa cada cela ao final deste processo, ter-se-ia as áreas de **Figura 3 Imagens de duas paisagens de uma mesma área nos tempos T1 e T2** mudança de cada classe de uma data para outra. A Tabela 2 apresenta o resultado deste processo que é a formação de uma tabela com a quantidade de celas correspondentes a mudança de classe. Cada um dos elementos desta matriz representa a quantidade de pixels que mudaram da classe especificada pela legenda, da linha para a coluna da classe correspondente.

As Tabelas 1 e 2 apresentam o mesmo tipo de informação, a Matriz de Áreas (MA). Sua diferenciação está no tipo de mapa empregado para sua determinação, seja vetorial ou matricial. Considerando que atualmente a tecnologia permite a conversão entre os dois tipos de dados (Câmara, 1995), pode-se empregar qualquer dos dois métodos para determinar a MA, no entanto, deve considera que na passagem

da informação vetorial para matricial (*raster*) é perdida uma informação, que depende de como seja definida a resolução das celas. Mas isto é um aspecto que pode ser gerenciado dependendo do tipo de trabalho a ser realizado.

Tabela 2. Matriz de Áreas (MA) das classes.

		ÁREAS						
LEGENDA								VA 72
ÁREA URBANA		7728	21	26	1	0	193	7969
GRAMÍNEAS		1500	9674	785	323	105	118	12505
FLOR. SEC. INIC., PIONEIRA E OUTRAS		638	1895	2812	91	6	193	5635
SOLO EXPOSTO		145	201	124	63	26	148	707
PEDREIRAS E ROCHAS		3	4	1	0	1397	3	1408
ÁREAS DE FLORESTAS		489	1614	1371	120	26	25969	29589
VA 84		10503	13409	5119	598	1560	26624	57813

Matriz de Porcentagens (MP) de área

A matriz anterior (MA) apresenta valores que, pelas grandezas envolvidas, dificultam sua interpretação, motivo pelo qual a transformação, em porcentagens em referência à área total da paisagem, facilita sua interpretação e manipulação, como é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3. Matriz de Porcentagens (MP) das áreas das classes.

		PORCENTAGENS (%)						
LEGENDA								VP 72
ÁREA URBANA		13.37	0.04	0.04	0.00	0.00	0.33	13.78
GRAMÍNEAS		2.59	16.73	1.36	0.56	0.18	0.20	21.63
FLOR. SEC INIC, PIONEIRA E OUTRAS		1.10	3.28	4.86	0.16	0.01	0.33	9.75
SOLO EXPOSTO		0.25	0.35	0.21	0.11	0.04	0.26	1.22
PEDREIRAS E ROCHAS		0.01	0.01	0.00	0.00	2.42	0.01	2.44
ÁREAS DE FLORESTAS		0.85	2.79	2.37	0.21	0.04	44.92	51.18
VP 84		18.17	23.19	8.85	1.03	2.70	46.05	100.00

Tal transformação é feita dividindo cada um dos elementos da MA pela área total da paisagem. Esta matriz permite determinar:

- os Vetores de Estado da paisagem;
- a Matriz de Transição da paisagem;

- que classes tiveram as maiores mudanças;
- classes que não tiveram mudanças;
- trabalhar em áreas menores de forma independente, para depois integrar para áreas maiores, com a soma matricial ponderada pela razão da área menor pela área maior a integrar, pelo emprego da formula:

$$(\text{MP maior}) = \sum_{i=1 \text{ até } n \text{ menores}} (\text{MP menor})_i * (\text{Área}_i / \text{Área Total})$$

Vetor de Estados (VE) da paisagem

A MA e a MP permitem ser usadas para obter marginalmente os Vetores de Áreas (VA) e Vetores de Porcentagens (VP) que sintetizam os Vetores de Estado (VE) da paisagem pelo somatório de todos os elementos de cada linha e coluna respectivamente, resultando no VA ou VP no tempo inicial T_1 (linhas) e o VA ou VP no tempo T_2 final (colunas) do período considerado (Tabelas 2 e 3). Os VE representam a forma resumida dos estados das classes na paisagem por área ou porcentagens nos tempos considerados.

Considere-se também que esses vetores intervêm no cálculo da MT. Uma consideração importante é que a análise da diferença dos VE nos tempos T_2 e T_1 permite detectar as mudanças numa paisagem (Figura 4). O resultado zero (0) dessa diferença mostra que não houve mudança desta classe na paisagem no referido período. Um resultado positivo mostra que tal classe foi incrementada, e um negativo mostra que a classe sofreu um decréscimo. Mas deve-se considerar que esses resultados mascaram importantes mudanças, que só podem ser observadas pela MA ou MP correspondente. A representação gráfica deste resultado apresentado na parte inferior da Figura 4 facilita ainda mais a interpretação da dinâmica em estudo. As classes que aparecem acima do eixo das abcissas tiveram incremento e as que ficaram abaixo tiveram diminuição.

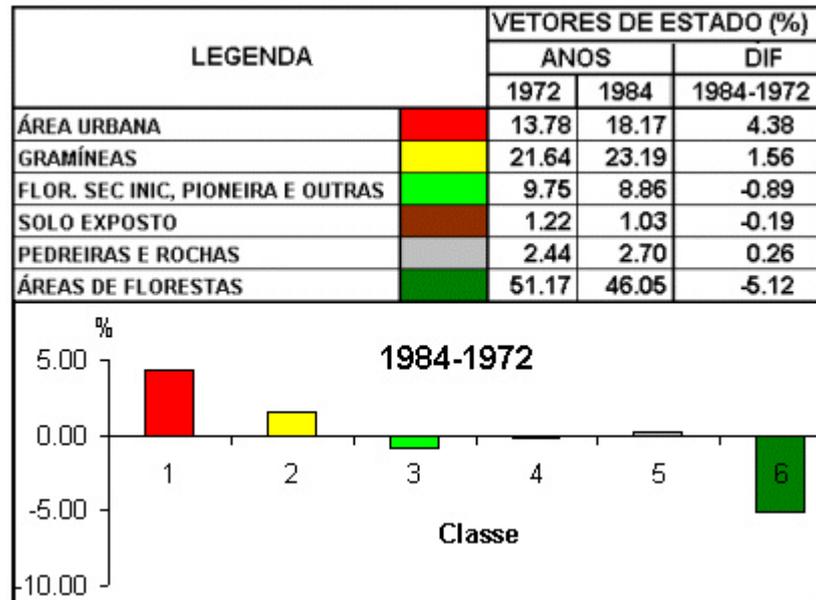


Fig. 4. Vetores de Estados (VE) e Diferenças.

Projeção de Simulações Futuras

Matriz de Transição (MT)

A Matriz de Transição formada será uma matriz quadrada $N \times N$. É uma “matriz estocástica” (Haykin, 1999), cujos elementos representam a probabilidade de mudança de uma classe para outra.

Ela é uma representação matemática dos processos de Markov (ou “Cadeias de Markov”) e é uma formalização de modelagem de sistemas que descrevem o sistema como um processo estocástico. Assim, um sistema é caracterizado pelos seus estados e a forma pela qual eles se alternam (Silva, 1992). Os processos de Markov estão baseados na premissa de que existe uma dependência entre um acontecimento e o seu anterior (Harvey, 1974).

As Cadeias de Markov podem ser compreendidas como uma máquina de mudança de estados. Emprega-se a teoria de grafos para descrevê-las, na qual o funcionamento de um sistema tem um conjunto de estados possíveis que ele pode assumir

(nodos) e das transições que cada estado pode assumir (arcos). Uma definição gráfica análoga pode ser adotada pelas cadeias de Markov (Silva, 1992).

Na Figura 5, mostra-se como seria a representação dessa máquina de estados com círculos representando os estados e as setas, as transições (mudanças) de um estado para outro. A representação matemática dessa máquina de estados seria uma matriz (MT) com dimensões para linhas e colunas no mesmo número dos estados. Cada elemento da matriz representa a probabilidade de mudança do estado do índice-linha para o estado do índice-coluna do elemento; por exemplo, mt_{23} representa a probabilidade de mudança do estado 2 para o estado 3 em um passo, considerando-se passo o tempo em que ocorre ou é medida a mudança de estado. Isso faz com que esta matriz seja chamada Matriz Estocástica, possuindo duas características que deve ser cumpridas em forma simultânea (Haykin, 1999):

- 1 - A soma dos elementos de uma linha desta matriz é igual a um (1.0).
- 2 - Todos os elementos da matriz são iguais ou maiores que zero (0.0).

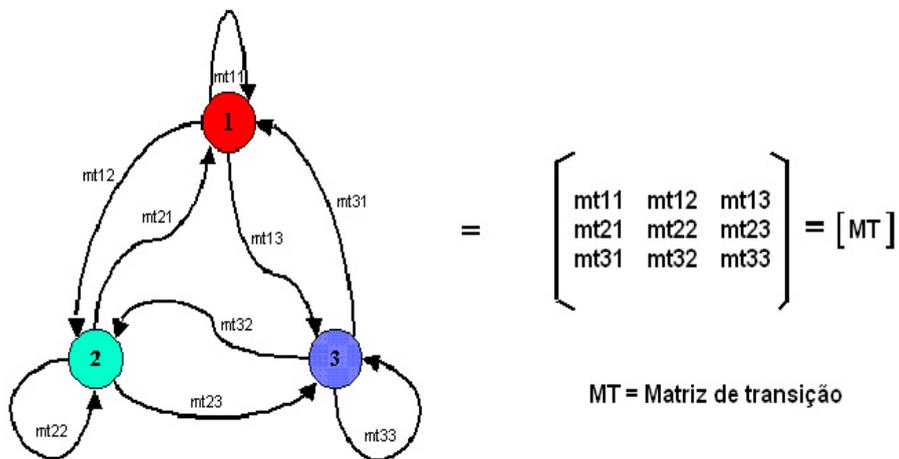


Fig.5. Representação dos processos de Markov e sua expressão matemática.

Ela permite o seguinte:

- realizar uma análise da dinâmica da paisagem pela forma como as diferentes classes variam em dois tempos diferentes, considerando-se o primeiro desses como o tempo inicial ou base, deste "passo";

- realizar projeções (simulações) dos estados da paisagem para datas futuras;
- avaliar as diferentes classes na forma como cederam suas áreas para outras classes e com que porcentagem de sua área original, os demais elementos em cada linha, exceto o elemento da diagonal, apresentam tal informação;
- permite determinar que classes não mudaram, nos dois períodos, as que apresentam 100% no elemento da diagonal da Matriz;
- com o apoio da MA e a MP, permite detectar a quantidade de área ou que porcentagem de área total permaneceu com as mesmas classes nos dois tempos e quais são as porcentagens de cada classe.

A Matriz de Transição (MT) é formada da seguinte forma: cada elemento de uma linha da MP ou MA é dividido pelo somatório de todos os elementos da correspondente linha (VE). A Figura 6 apresenta a MT associada às MA ou MP apresentados anteriormente nas Tabelas 2 e 3.

MATRIZ DE TRANSIÇÃO							
LEGENDA							
ÁREA URBANA		0.970	0.003	0.003	0.000	0.000	0.024
GRAMÍNEAS		0.120	0.774	0.063	0.026	0.008	0.009
FLOR. SEC INIC, PIONEIRA E OUTRAS		0.113	0.336	0.499	0.016	0.001	0.034
SOLO EXPOSTO		0.205	0.284	0.175	0.089	0.037	0.209
PEDREIRAS E ROCHAS		0.002	0.003	0.001	0.000	0.992	0.002
ÁREAS DE FLORESTAS		0.017	0.055	0.046	0.004	0.001	0.878

Fig. 6. Matriz de Transição.

A interpretação que se pode dar à Matriz de Transição, obtida de dados vetoriais e matriciais, é que cada linha mostra como cada classe muda, o que ela “perde”, enquanto as colunas mostram o que ela “ganha”. Por exemplo: a classe 1 Área Urbana (linha) tem o elemento da Matriz Diagonal igual a 97%, ou seja, no referido passo não mudou nesta porcentagem na área urbana entre 1972 e 1984, “perdeu” 2,4% de sua área original para as florestas e também “cedeu” 0,3% para as classes gramíneas e floresta secundária inicial, pioneira e outras; esta mesma classe “ganhou” o 12% da área original da classe gramíneas; também ganhou 11,3% das áreas que pertenciam à classe floresta secundária inicial, pioneira e outras; da classe solo exposto, “ganhou” os 20,5% que esta tinha em 1972. A classe pedreiras e rochas aportou 0,2% para a classe área urbana e “recebeu” 1,7% do

que pertenciam à classe florestas. Essa análise pode ser feita para as demais classes, o que mostra a riqueza desta ferramenta para mostrar a dinâmica da paisagem.

Simulação da dinâmica da paisagem

Um dos objetivos de todo modelo científico é ou deveria ser apresentar uma projeção futura de como será a realidade modelada. Conhecendo o que vai ocorrer amanhã, poder-se-iam praticar ações para obter o melhor proveito dessa informação. Esse tipo de projeção já é feito em muitas áreas: meteorologia para a previsão de chuvas; agricultura para a previsão de safras; no mundo comercial, para a previsão de comportamento de mercados, etc.

No contexto da presente pesquisa, objetivou-se realizar a previsão dos estados da paisagem para tempos futuros (quantidade de áreas ocupadas por cada classe), projeção na paisagem de tais mudanças com a construção de cenários para tempos futuros e a simulação no tempo de tais projeções.

Para realizar tais projeções e simulações, empregou-se a teoria de processos ou cadeias de Markov, que, com o emprego da MT descrita anteriormente, permite a projeção dos estados (VE) da paisagem para tempos futuros. Com a MT, o VE e simulação de Monte Carlo, projetaram-se espacialmente cenários no espaço (paisagens). Tais projeções, porém, não trouxeram como resultado a estrutura e configuração da paisagem como se esperava — daí ter sido implementado o “algoritmo de efeito de borda”, que permitiu construir cenários com uma boa estrutura e configuração. Essas realizações estocásticas possibilitaram construir um modelo de simulação dinâmica, com a apresentação de como evoluirão as mudanças da paisagem no tempo.

Projeção dos estados da paisagem

A projeção dos estados da paisagem para tempos futuros é feita:

- por geração da MT para o tempo desejado, considerando que o tempo é levado para tantos “passos” quantos contenha tal tempo em relação ao tempo inicial (base do cálculo da MT); ou seja: supondo-se que a MT tenha sido calculada com dados da paisagem em 1972 e 1984, então o passo (p) para calcular esta MT é de doze ($p = 1984 - 1972 = 12$) anos. E, caso se queiram projetar os estados para o ano 2008, calculam-se quantos passos existem entre 1972 e 2008 ($n = (2008 - 1972) / p$) resultando $n = 3$;

- com o número de passos (3), o Vetor de Estados (VE) e a Matriz de Transição (MT), aplica-se a seguinte fórmula:

$$[VE_{2008}]_{1 \times M} = [VE_{1972}]_{1 \times M} * [[MT]_{M \times M}]^3$$

onde M = Estados ou classes na paisagem,

Para projetar um mapa *raster*, simplesmente é invocada a Matriz de Transição na base de cela-por-cela. Mas, como cada cela só pode mudar em, no máximo, um outro estado (uma cela não pode mudar em frações), isso deve ser feito probabilisticamente. O algoritmo para tal fim é apresentado:

Iniciar

Construir uma matriz de função acumulada (FA) de probabilidades para cada linha da matriz de transição MT.

Repetir para cada cela:

- Conferir para ver que tipo de cobertura esta cela é (chame-se i).
- Olhar na linha número i da matriz de transição FA.
- Utilizar um número aleatório uniforme y [0,1].
- Repetir para cada coluna j da linha i de FA:

se $fa(i,j-1) < y \leq fa(i,j)$, então,

- Mudar a cela para o tipo j.
- Ir para o próximo tipo j se a cela não tivesse mudado.
- Ir para a próxima cela.

Finalizar

Ao terminar, cada cela terá sido mudada (a “mudança” poderia ter sido permanecer no mesmo estado), e haveria um mapa novo apresentando tais mudanças. É importante apontar o seguinte: esse novo mapa é uma de muitas possíveis realizações ou imagens estocásticas de um novo mapa, já que ele foi criado probabilisticamente.

As imagens ou realizações geradas com este algoritmo são diferentes entre si, mas mantêm sua estrutura, porque são imagens estocásticas. No entanto, existem diferenças entre os dois conjuntos de imagens, explicadas pelo tempo entre ambas, o que permite projetar cenários do futuro da paisagem sob os supostos markovianos de primeira ordem.

Algoritmo “efeito de borda” para simular a dinâmica da paisagem

Ainda que as imagens geradas anteriormente mantenham a estrutura do sistema, sua configuração não é alcançada, ela fica como uma figura com limites não definidos e com a forma de “poeira na imagem”. Para isso, foi desenvolvido um algoritmo denominado “efeito de borda” que permite espacializar aleatoriamente as mudanças entre as diferentes classes da paisagem. Esse algoritmo tem a capacidade de gerar todas as bordas das classes de uma paisagem e armazena os *pixels* que formam parte de tais bordas e com os quais eles fazem borda. O procedimento é fazer uma análise de como cada pixel relaciona-se com seus vizinhos. Por exemplo considerando a Figura 7 os dois desenhos da parte superior representaria uma paisagem com 3 classes e os da parte inferior a correspondente implementação em vetores do algoritmo “efeito de borda”. O pixel da primeira linha e primeira coluna ($p_{1,1}$) pertencente à classe 1 relaciona-se com seus vizinhos da sua mesma classe $p_{1,2}$ e $p_{2,1}$ o qual não é de interesse no algoritmo pelo que não se considera, porém a outra vizinhança $p_{2,2}$ pertence à classe 2 diferente da sua, o que deve ser registrado no vetor (1,2) com o valor 7 correspondendo à posição de $p_{2,2}$ na paisagem com a seguinte fórmula:

$$\text{Valor} = (\text{NC}) * ((\text{FP}) - 1) + (\text{CP})$$

Onde: NC = Número de colunas da imagem;

FP = Linha posicionada do pixel vizinho;

CP = Coluna posicionada do pixel vizinho.

Para o exemplo NC = 5; FP = 2 e CP = 2. O resultado é o Valor 7. Procede-se a análise de todos os pixels, formando-se as bordas de cada classe, que é implementada em forma de vetores conforme mostra a Figura 7 (lado esquerdo). As duas figuras da direita mostram como mudou a paisagem no pixel $p_{2,3}$ (que era da classe amarela e passou para a vermelha e a forma como é implementada nos vetores correspondentes).

A seguir, com o emprego do VE de porcentagens das classes e a Matriz de Transição, simula-se a dinâmica na paisagem, seguindo-se o seguinte esquema:

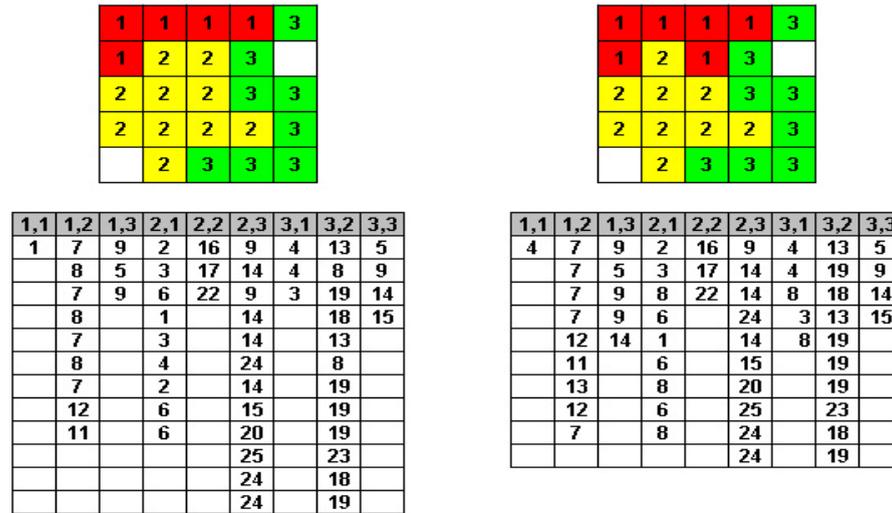


Fig. 7. Vetores com os elementos de borda de cada classe,

- 1) Gera-se os vetores com os estados de borda de cada classe.
- 2) Gera-se uma tabela da distribuição acumulada a partir do VE de porcentagens apresentado na Figura 8. Também geram-se tantas tabelas de distribuição acumulada como classes existam com os elementos de cada linha da MT (similares a Figura 8).
- 3) Proceda-se a geração das imagens da seguinte maneira:
 - 3.1) Repetem-se tantos passos como pixels compoñham a paisagem (instâncias):
 - 3.1.1) Gera-se um número aleatório (entre 0 e 1) com distribuição uniforme, o qual é verificado em que classe cai (aponta) sobre a tabela do passo 2 tal como mostra a Figura 8. Por exemplo, se foi gerado o valor 0.42 verifica-se que este cai sobre a classe 3 (apontada pela linha azul). O resultado é a escolha de uma classe que vai mudar de estado.

3.1.2) Nas tabelas geradas pelo passo 2, escolhe-se a tabela de distribuição acumulada correspondente a classe escolhida no passo anterior. Gera-se um número aleatório (entre 0 e 1) com distribuição uniforme, igual ao passo anterior, com o qual é verificado em que classe aponta nesta tabela. O resultado é a escolha da classe para a qual muda a instância anteriormente escolhida.

3.1.3) Com os dois passos anteriores, tem-se escolhido aleatoriamente que classe muda e para qual outra classe, com estes resultados, escolhe-se o vetor que contém todos os pixels que estão nesta situação do passo 1 (Figura 7 à esquerda). É gerado um número aleatório para escolher que pixel mudará.

3.1.4) Muda-se o estado do pixel (Figura 7 lado direito).

3.1.5) Geram-se novamente as bordas das classes com esta mudança.

3.1.6) Recompõem-se os vetores de ligação das bordas (Figura 7 lado direito).

3.2) Grava-se a imagem.

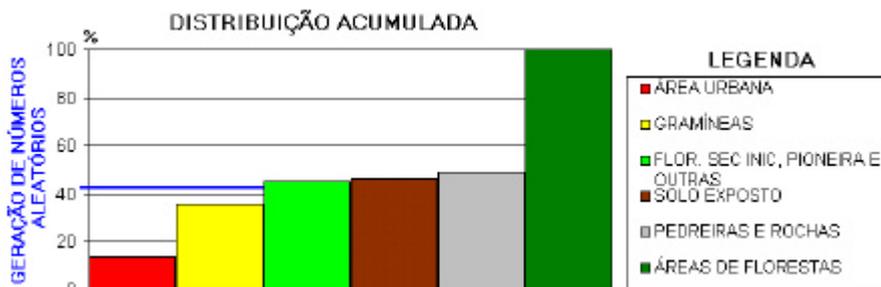


Fig. 8. Geração de números aleatórios sobre uma distribuição acumulada.

O resultado dessa operação é a geração de imagens ou realizações estocásticas da dinâmica da paisagem. Esse algoritmo permite criar mapas que tenham a configuração e estrutura do mapa original mudado de acordo com as tendências da MT correspondente. Ele continua aproveitando a teoria de Markov para projetar simulações do futuro das paisagens. Um resultado deste algoritmo é a projeção da paisagem para o ano 2092 apresentado na Figura 9.

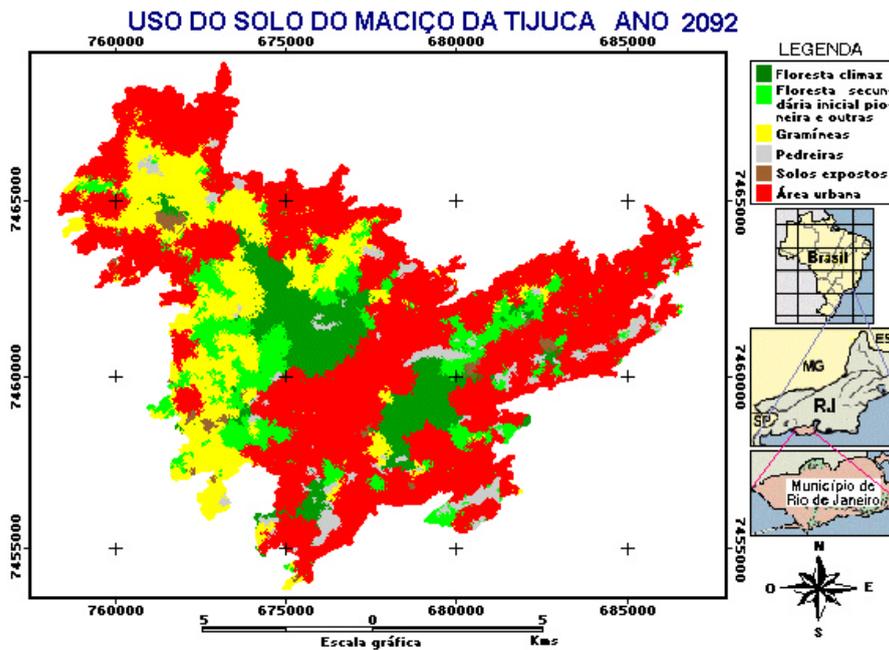


Fig.9. Projeção do uso e cobertura do Maciço da Tijuca para o 2092.

Geração de imagens ao longo do tempo

A geração de imagens ou realizações (simulações do futuro) para N passos, em forma seqüencial, permitem que se gere “filmes ou animações” de simulação da dinâmica da paisagem no tempo. Esse esquema possibilita que se produzam visualizações dinâmicas do que ocorre na paisagem da seguinte forma:

Simulação Dinâmica = M imagens ou realizações geradas como N passos seqüencialmente de 1 até M.

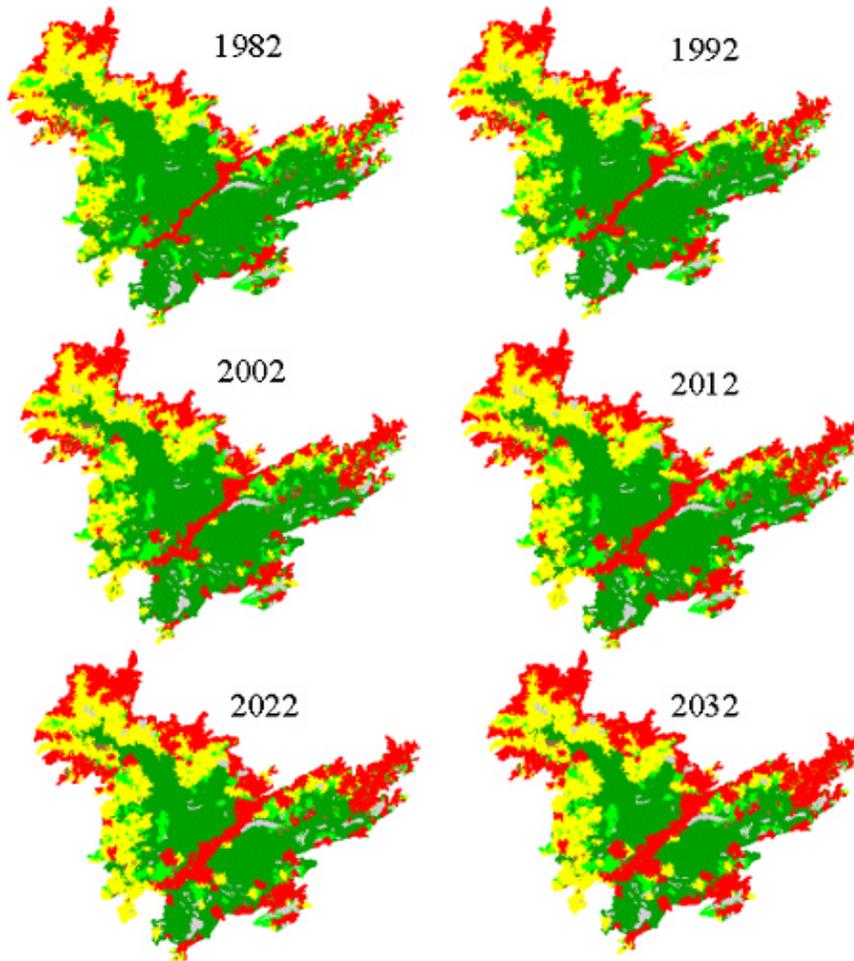


Fig. 10. Imagens estocásticas da paisagem geradas a cada 10 anos.

Considerando que, para a geração de uma imagem são processadas todos os pixels que compõem a paisagem (números de pixel que devem mudar nos N passos), divide-se este número pelo total de anos a ser projetado e, a cada um destes intervalos, gera-se a imagem correspondente ao ano considerado. Por exemplo, considerando-se 60.000 instâncias (pixels que formam uma paisagem) com um passo de 10 anos e com uma paisagem inicial do ano 2000, para projetar-se a paisagem para o 2050, empregam-se-iam cinco passos ($N=5$), gerando-se a MT correspondente e com o VE inicial do ano 2000, contabilizam-se 50 anos ($5 \cdot 10$),

então se divide 60.000/50 resultando 1.200, ou seja, que durante a geração das imagens do esquema anterior a cada 1.200 instâncias é gerada a correspondente imagem. Ainda que esta geração teoricamente não seja exata, é uma boa aproximação. Considere-se que o resultado no final (2050) não é um resultado instantâneo e sim uma agregação dos resultados obtidos ao longo do tempo. Na Figura 10, apresentam-se as projeções em seis (6) imagens feitas para os dados do Maciço da Tijuca partindo de 1972 até 2032.

A visualização dessa simulação é possível com o apoio de sistemas computadorizados que apresentam seqüencialmente tais imagens por curtos períodos de tempo, o que cria o efeito de dinamismo. No site <http://www.cnps.embrapa.br/paisagem> são apresentadas varias animações que permitem mostrar a dinâmica espaço temporal do uso e cobertura de solos projetadas para diversas épocas no futuro.

Mapa modal da simulação e o mapa de erros

Considerando que uma simulação objetiva apresenta imagens estocásticas equiprováveis da paisagem, apresentando a mesma estrutura da paisagem (estatísticas) e formas similares (“jeitão”) para todas as imagens, uma geração de N imagens permite a geração do mapa modal e o mapa de erros associado a tal mapa.

Nas Figuras 11 e 12 apresentam-se duas (2) imagens de simulação estocástica que tem a mesma estrutura e configuração, geradas a partir de sementes diferentes. Um conjunto maior de imagens permitem a geração do Mapa Modal da Figura 13 que apresenta uma probabilidade de ocorrência para cada cela de cada classe. Este mapa é complementado com o Mapa de Erros apresentado na Figura 14 que mostra os erros associados a cada cela do Mapa Modal.

O mapa modal é gerado calculando-se para cada pixel a classe que tem mais ocorrências (O_{moda}), ou seja, a moda nas correspondentes N imagens do referido pixel. Processa-se com os pixels de toda a imagem, que dá como resultado o referido mapa, que apresenta em cada pixel a classe moda resultante.

O mapa de erro é o resultado de obter para cada pixel : $(1 - f_r(\text{moda}))$ ou $(1 - O_{moda}/N)$. Estes dois mapas permitem obter mapa da simulação com o correspondente mapa de erros.

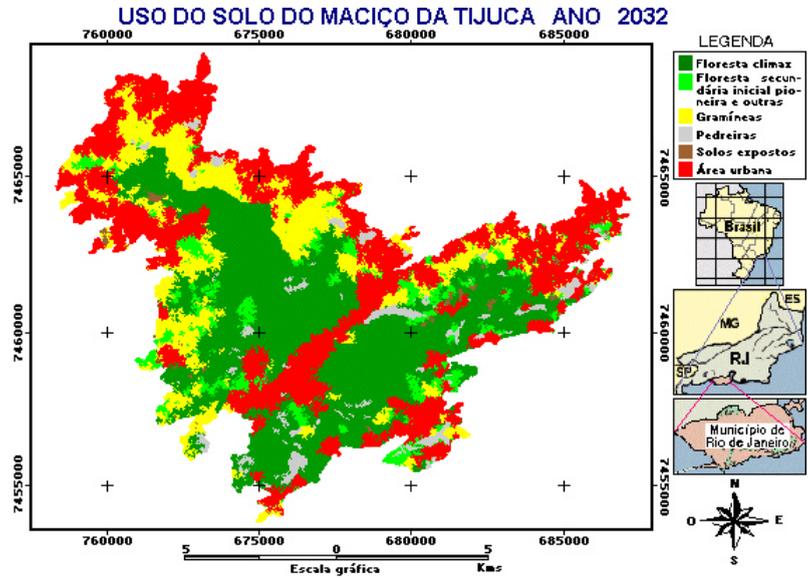


Fig. 11. Simulação estocástica (a) do Maciço da Tijuca para 2032.

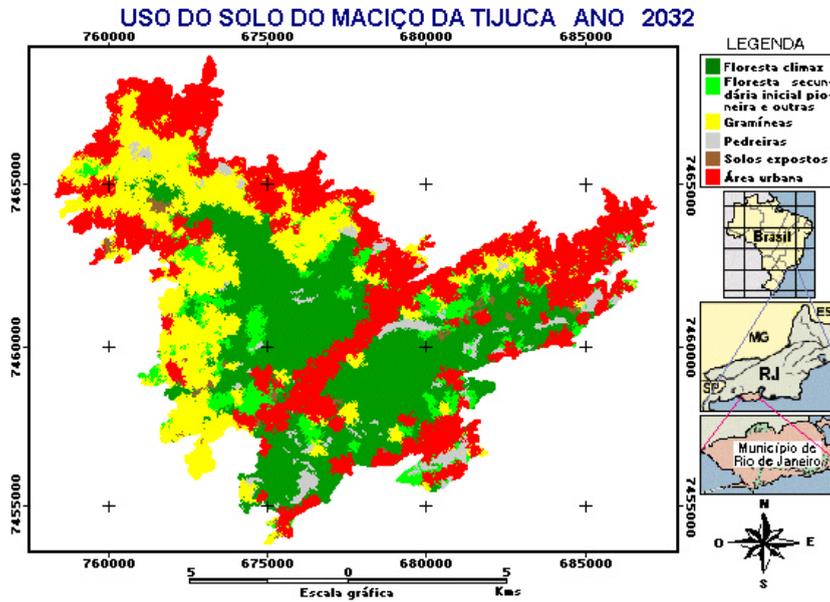


Fig. 12. Simulação estocástica (b) do Maciço da Tijuca para 2032.

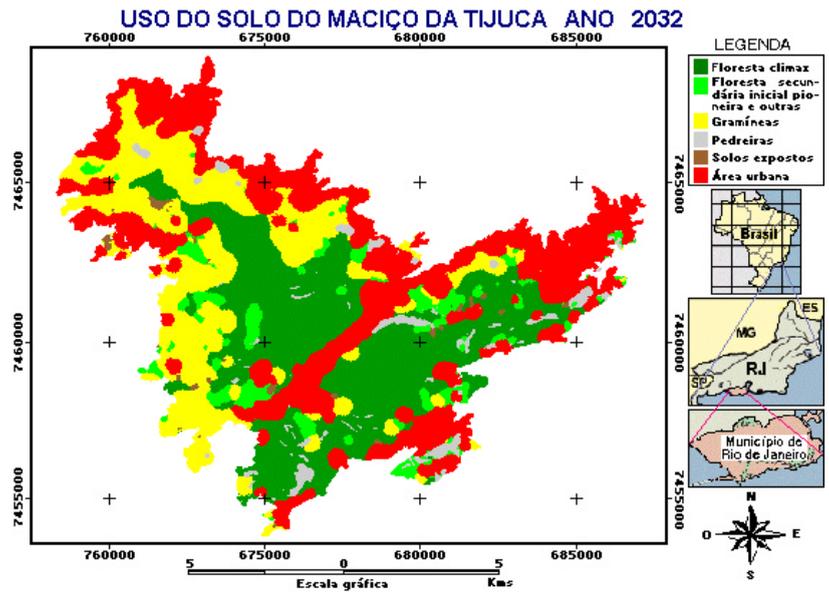


Fig.13. Mapa modal do Maciço da Tijuca para 2032.

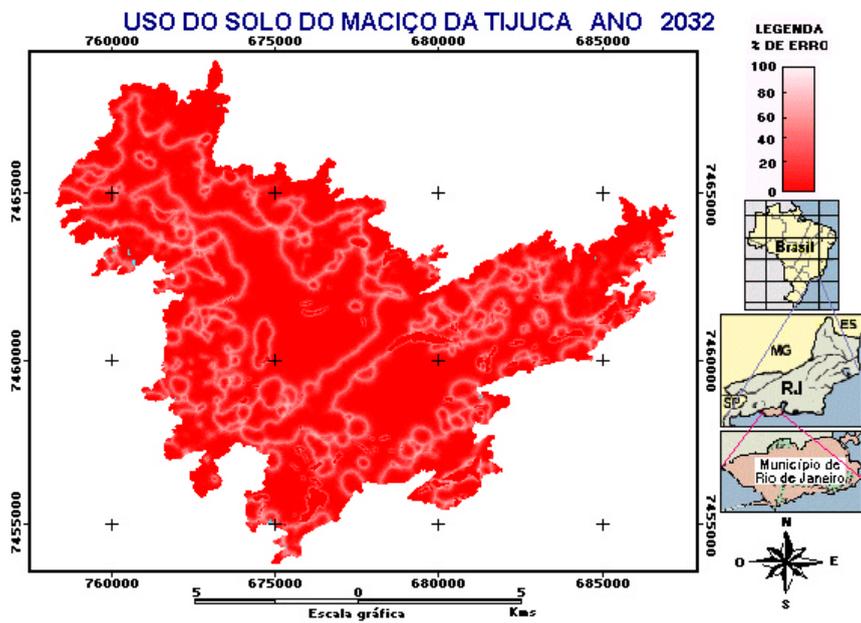


Fig.14. Mapa de erros do Maciço da Tijuca para 2032.

Construção de Cenários

Considerando que as paisagens não possuem uniformidade em toda sua extensão, no projeto Estudos de Qualidade Ambiental do Geoecossistema do Maciço da Tijuca foram consideradas três fases correspondentes a três grandes bacias que integram a área do Maciço, que é apresentada em forma particionada na Figura 15. Cada uma destas tem sua própria dinâmica de acordo com a estrutura de seus elementos, e cada uma delas é formada ainda de sub-bacias menores. Para considerar tais diferenças, pode-se processar por partes, aplicando todo o esquema apresentado anteriormente com os resultados apresentados na Figura 16. Para cada área foi calculada sua MA, MP, VA, VE e MT; cada um destes elementos comparada para as diferentes fases mostra diferenças importantes, como era esperado, pelo fato de cada fase corresponder a uma bacia a qual apresenta uma dinâmica própria e diferente das demais. Este esquema permite que possa ser aplicado a diferentes níveis, principalmente iniciando em níveis baixos para ir integrando em níveis maiores, como o apresentado na Figura 16 para o ano 2032, resultado do processamento das três fases anteriormente mencionadas e também apresentadas nas Figura 15 para o ano 2092. Igualmente pode proceder-se em sentido contrário, ou seja, iniciar em níveis altos, para ir discriminando em níveis menores. Isto pode realizar-se para a integração ou discriminação das paisagens em suas diferentes escalas.

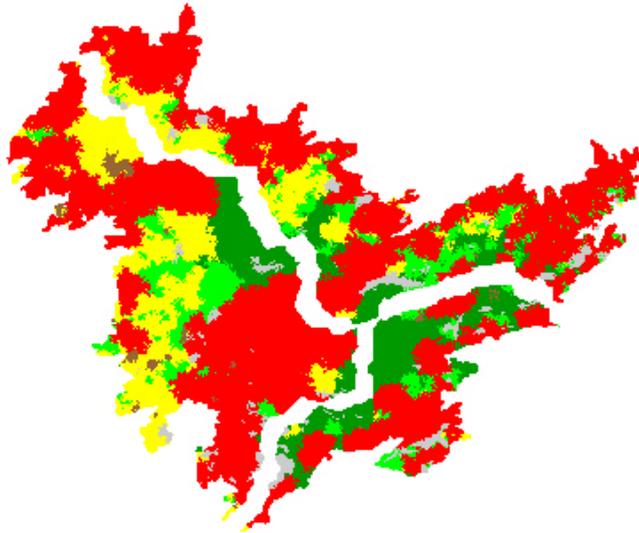


Fig.15. Paisagem particionada nas suas três bacias.

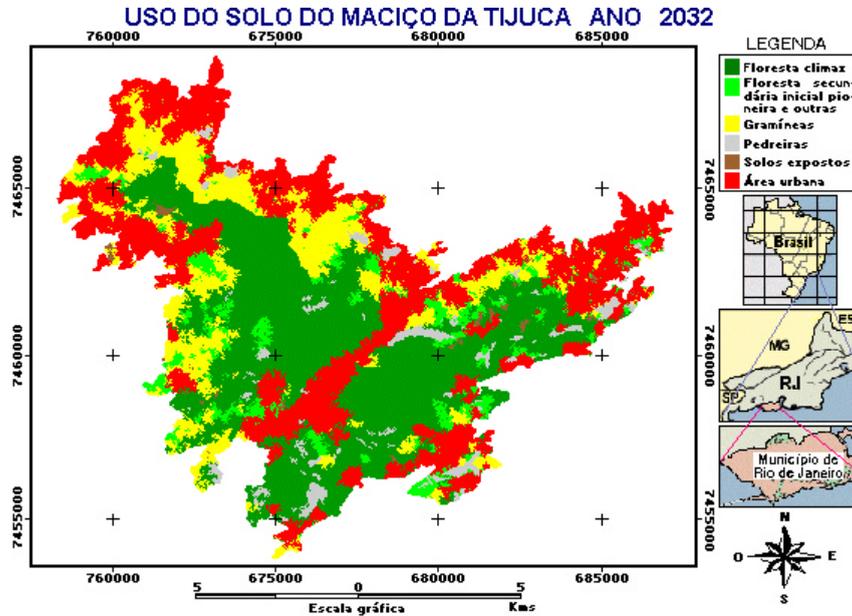


Fig.16. Projeção das três bacias integradas numa imagem para 2032

Cenários alternativos

As simulações permitem gerar cenários alternativos com diferentes MT. Cada MT apresenta diferentes probabilidades de mudança de uma classe para a outra, representando, desta maneira, como a paisagem foi gerenciada (administrada) na época, considerando os dados de construção da MT.

Considerando que também se pode processar paisagens em diferentes escalas (particionamento da paisagem) com análise de regiões mais detalhadas como exposto no item anterior, existem várias formas de criação de cenários, cada um representando a extrapolação da forma como foi feita a administração da paisagem para a época considerada. Para tal é necessário contar com uma série histórica suficiente e/ou o recorte de áreas diferenciadas (sub-bacias) da paisagem que permitam realizar tal tratamento.

Considerando que além dos dados de 1972 e 1984 também contava-se com os dados de 1996, foi possível construir três (3) MT na combinação dois a dois destes dados que resultaram nas Figuras 17, 18 e 19, além do tratamento particionado apresentado anteriormente na Figura 16. Estas figuras representam quatro (4) cenários

diferentes para a paisagem para o ano 2032, com diferentes estruturas e configurações da paisagem. Eles apresentam diferentes projeções da mesma área, o resultado de diferentes MT empregadas, portanto diferente gerenciamento da paisagem. Do ponto de vista ambiental, a Figura 18, Cenário 2, apresenta um maior efeito da intervenção e ocupação antrópica e a mais conservada é a da Figura 16, gerenciamento diferenciado das bacias. Estes resultados podem permitir realizar um análise tendencial do uso e cobertura do solo na área considerada que serve de suporte para outras temáticas e principalmente para o gerenciamento ambiental.

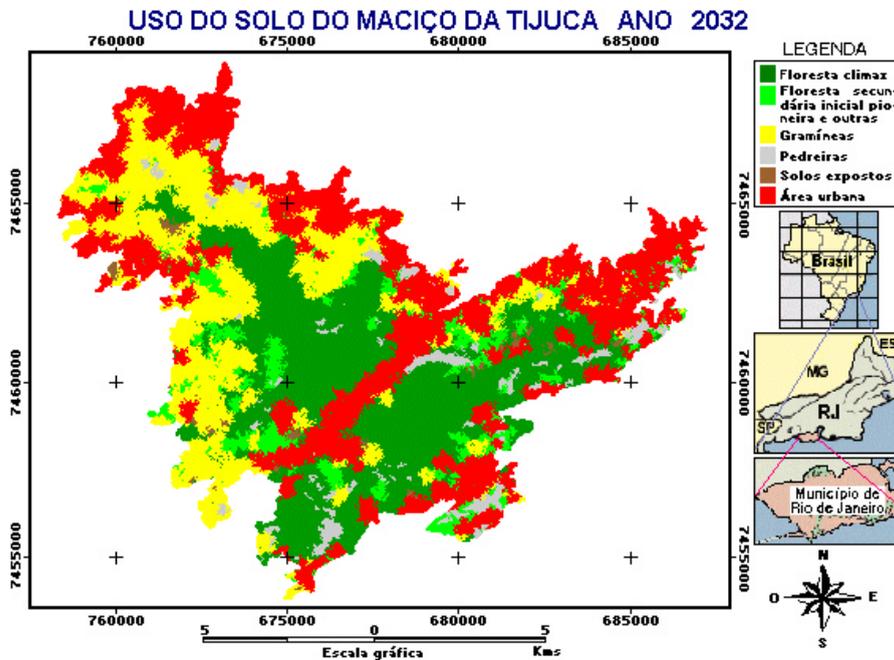


Fig. 17. Cenário 1.

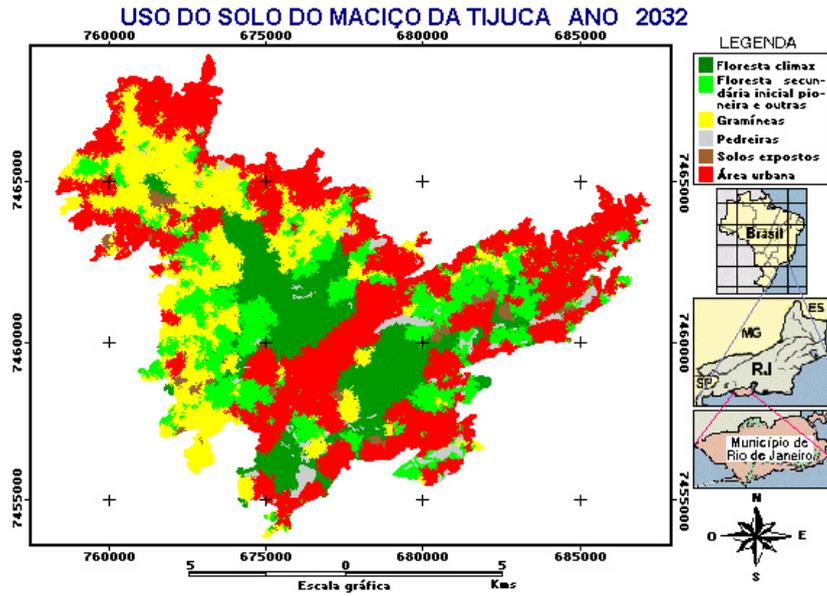


Fig. 18. Cenário 2.

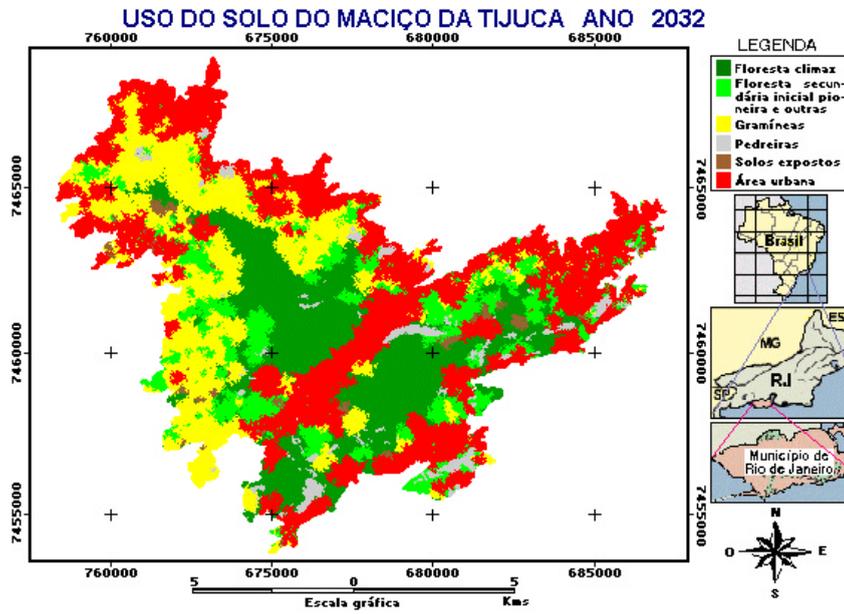


Fig. 19. Cenário 3.

Conclusões

Foi apresentado um esquema metodológico para analisar a dinâmica da paisagem, que se inicia com a construção de compreensíveis matrizes de área e porcentagens de mudança; determinam-se os vetores de estados e as matrizes de transição. Com esse instrumental e com apoio da teoria estatística, implementou-se projeções, simulações espaço-temporais e finalmente a construção de cenários, os quais permitem realizar diferentes análises do tipo “Se ocorrer tal situação na paisagem, então pode-se esperar no futuro tal outra situação ...”.

Ainda que para o desenvolvimento científico o trabalho possa contribuir com os resultados anteriormente expostos, O devem ser consideradas as características ou pressupostos próprios do modelo e explicitadas a continuação:

- O esquema considera a matriz de transição estacionária e os fenômenos na vida real não apresentam tal comportamento, razão pela qual os resultados devem ser analisados considerando tal característica.
- A dinâmica implementada no algoritmo “efeito de borda” é completamente aleatória e igual ao anteriormente exposto. Na vida real os fenômenos e os objetos espaciais geralmente não são aleatórios e sim condicionados ou restritos por outras variáveis.
- As imagens ou realizações estocásticas apresentadas devem ser analisadas na sua estrutura e configuração, que é o que caracteriza uma simulação.

Os cenários apresentados neste trabalho ou os que venham a ser construídos com o esquema proposto, principalmente para o leigo em simulação, podem ser interpretados como uma mudança na estrutura (% das diferentes classes) e configuração (“jeitão” ou forma espacial) da paisagem analisada, com o pressuposto das mesmas condições físicas e antrópicas que afetaram a paisagem no intervalo de tempo dos dados utilizados na construção da matriz de transição, com a qual foram feitas as simulações. Por exemplo, o Cenário 1 da Figura 17 foi construído a partir da matriz de transição com dados de 1972 e 1984, ou seja, neste intervalo os fatores físicos e antrópicos que “dirigiram as mudanças”, caso continuassem as mesmas (estacionárias) farão que a “tendência de mudança” alcance as forma e estrutura apresentada neste cenário.

Um resultado importante são os Mapas Modais e de Erros que permitem quantificar em termos estatísticos os resultados da simulação, associando a cada pixel projetado a classe associada e o correspondente erro.

Um outro resultado apresentado é a simulação de áreas diferenciadas, que mostra como o esquema pode ser empregado para um análise “botton up” possa se ir generalizando ou agregando a análise ou também no sentido contrário “top down” para ir discriminando ou detalhando a análise de áreas maiores para menores. Esta é outra alternativa para a construção de cenários.

Referências Bibliográficas

CÂMARA G. **Modelos, linguagens e arquiteturas para bancos de dados geográficos**. 1995. 264p. Tese de Doutorado - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

FORMAN, R. T. T.; GODRON, M. **Landscape ecology**. New York: John Wiley. 1986. 619 p.

GEOHECO. **Estudos de qualidade ambiental do geocossistema do Maciço da Tijuca** – subsídios à regulamentação da APARU do Alto da Boa Vista; Fase 1: Subsistema Hidrográfico de Jacarepaguá (SSHJ) – (2º Relatório). [s. ed.]: Rio de Janeiro. 2000a. 155 p.

GEOHECO. **Estudos de qualidade ambiental do geocossistema do Maciço da Tijuca** – subsídios à regulamentação da APARU do Alto da Boa Vista; Fase 2: Subsistema Hidrográfico da Baía de Guanabara (SSHBG) – (3º Relatório). Rio de Janeiro: [s. ed.], 2000b. 100 p.

GEOHECO. **Estudos de qualidade ambiental do geocossistema do Maciço da Tijuca** – subsídios à regulamentação da APARU do Alto da Boa Vista; Fase 3: Subsistema Hidrográfico da Zona Sul (SSHZS) – (4º Relatório). Rio de Janeiro: [s. ed.], 2000c. 106 p.

HARVEY, D. Modelos da evolução dos padrões espaciais na geografia humana. In: CHORLEY, R. J.; HAGGETT, P. **Modelos integrados em geografia**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos; São Paulo: Ed. Da Universidade de São Paulo, 1974. p. 41-85

HAYKIN, S. **Redes neurais** : princípios e prática. Porto Alegre: Bookman. 1999. 900 p.

MANSILLA BACA, J. F. **Dinâmica da paisagem**: métodos analíticos e modelos de classificação e simulação prognóstica, sob a ótica geoecológica. 2002. 184 p. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.

NAVEH, Z.; LIEBERMAN, A. S. **Landscape ecology**: theory an application. New York: Springer-Verlag. 1984. 356 p.

ODUM, E. P. **Ecologia**. Rio de Janeiro: Ed Guanabara. 1983. 434 p.

SILVA, A. de S. E. **Métodos computacionais de solução de cadeias de Markov**: aplicações a sistemas de computação e comunicação. Porto Alegre: UFRGS Inst. Informática. 1992. 195 p.

USHER, M. B. Statistical models of succession. In: GLENN-LEWIN, D. C.; PEET, R. K.; VEBLEN, T. T. (Eds.). **Plant succession**: theory and prediction. London : Chapman and Hall. 1992. p. 215-248.