

Aplicación de técnicas SIG, Sensoramiento Remoto y Análisis Multicriterio para la Detección de Impactos Antropogénicos en la Cobertura de Suelos y su Proyección para el 2010. Caso de estudio: Estuario de Santos (Brasil)

P. Almeida **, M. Duriavich*, R. Napolitano*, E. Feoli*

(**) Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar

Escuela Superior Politécnica del Litoral - ESPOL

Campus “Gustavo Galindo” Km. 30.5 Vía Perimetral. Casilla: 09015863. Guayaquil, Ecuador

(*) Departamento de Biología

Universidad de Trieste

Via E. Weiss 2, 34100, Trieste, Italia

palmeida@espol.edu.ec, mduriavich@units.it, napolita@units.it, feoli@units.it

Resumen

Este artículo enfatiza la utilidad de herramientas como son los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y sensores remotos para la detección efectiva de alteraciones ambientales y predicción de futuros escenarios. En este caso se analizaron cambios en el uso de suelos provocados por acciones antropogénicas en el Estuario de Santos (Brasil). La aplicación de técnicas como clasificación supervisada en imágenes de satélite del área de estudio y el posterior análisis multitemporal de las mismas fue imprescindible para establecer cambios en los patrones de usos de suelos en un lapso de 7 años. El algoritmo seleccionado para realizar la clasificación fue “maximum likelihood” por su mayor efectividad en la comparación de firmas espectrales. La utilización de estas técnicas facilita la identificación de áreas vulnerables y por ende la posibilidad de realizar pronósticos de tendencias que resulta de gran utilidad para un control efectivo de las actividades antropogénicas en el área. El pronóstico de tendencias se realizó mediante la aplicación de funciones de “fuzzy sets” y análisis multi-criterio (MCA) basados en una serie de factores y restricciones que caracterizan y describen el área de estudio. La teoría de fuzzy sets provee una base matemática muy efectiva para la construcción de reglas de decisión utilizada en la evaluación de criterios, lo que facilita la creación de futuros escenarios basados en el minucioso análisis de factores y restricciones del presente para determinar su influencia en el futuro.

Palabras Claves: SIG, imágenes de satélite, análisis multitemporal, uso de suelos, clasificación supervisada, analisis multicriterio, fuzzy sets

Abstract

This article emphasizes the advantages of Geographical Information Systems (GIS) and remote sensing as effective tools for detection of environmental alterations and future scenarios. The main objective of this study was the analysis of landuse changes caused by anthropogenic activities in Santos Estuary (Brazil). The application of supervised classification techniques at satellite images of the study area and its multitemporal analysis were decisive to determine changes in landuse patterns in a 7 years period. The maximum likelihood algorithm was selected for the supervised classification due to its effectiveness in the comparison of spectral signatures. Application of these techniques facilitates the identification of vulnerable areas therefore the possibility of tendencies forecasting in the study area. Future tendencies forecasting was performed by the application of fuzzy sets functions and multicriteria analysis (MCA) based on a series of factors and constraints that characterize and describe the study area. The fuzzy set theory provides an effective mathematical basis for the construction of decision rules used in the evaluation of this criteria. Therefore it is possible to create future scenarios based on detailed analysis of present factors and constraints of the study area in order to determine their influence in the future.

Keywords: GIS, satellite images, multitemporal analysis, landuse, supervised classification, multicriteria analysis, fuzzy sets

Recibido: Junio, 2009

Aceptado: Agosto, 2009

1. Introducción

El análisis multitemporal constituye uno de los métodos más eficaces para la comparación y determinación de cambios (e.g. vegetación) que acontecen en un lapso de tiempo [1], y que generalmente se deben a la acción del hombre sobre su entorno. En este caso se trata de cambios en el uso de suelos que se llevaron a cabo en el área de Santos (Brasil) [2] en un periodo de siete años. El análisis multitemporal es fundamental para la planificación ambiental y procesos de decisión tanto de autoridades locales como regionales ya que permite evidenciar los impactos generados por la acción antropogénica y de esta forma identificar aquellas zonas más vulnerables y que necesitan de mayor control y protección en lo que se refiere a protección del ambiente [3]. Este tipo de análisis y las herramientas que se utilizan para llevarlo a cabo permiten además la proyección de escenarios de lo que podría suceder a futuro si las acciones y amenazas previamente identificadas sobre el ambiente no son controladas y suprimidas a tiempo. El análisis multitemporal se basa en la aplicación de herramientas como los Sistemas de Información Geográfica (SIG) [4], imágenes de satélite y softwares que permiten la aplicación de funciones “fuzzy” como base de los análisis comparativos.

El análisis multitemporal se realizó utilizando como fuente principal imágenes Landsat (1993 y 2000). Se puso un énfasis especial en la determinación de cambios en vegetación provocados por deforestación debido a la creación de asentamientos urbanos en zonas de bosques (Mata Atlántica y manglares), con el principal objetivo de establecer leyes ambientales más estrictas y ejercer un mayor control del crecimiento urbano en estas zonas protegidas [5].

2. Metodología

2.1. Clasificación Supervisada

Las dos imágenes Landsat de Santos (Junio 18/1993 y Abril 30/2000) fueron clasificadas utilizando el método de Clasificación Supervisada, que se basa en la selección de “áreas de entrenamiento” (training areas) [6]. Las áreas de entrenamiento fueron inicialmente identificadas en la zona de estudio mediante dos salidas de campo (Abril y Marzo 2005) en donde se las posicionó con un GPS para luego ser transferidas a las imágenes de satélite utilizando las coordenadas registradas. Una vez que las áreas de entrenamiento son identificadas en las respectivas imágenes se procede a la aplicación de un algoritmo (i.e. paralelepípedo, distancia mínima, distancia de Mahalanobis, máxima similitud, codificación binaria, red neural). El algoritmo seleccionado fue el de máxima similitud el cual asume que las estadísticas

de cada clase en cada banda satelital son normalmente distribuidas y calcula la probabilidad que un determinado pixel pertenezca a una clase específica, luego cada pixel es asignado a la clase con la probabilidad más alta. [7]. Por lo tanto las áreas de entrenamiento son comparadas con el resto de la imagen basándose en la similitud de las firmas espectrales.

Originalmente se identificaron once clases, de las cuales aquellas similares fueron reagrupadas en una sola categoría, obteniéndose finalmente cinco clases (bosque, manglar, vegetación baja, área urbana, agua) en base a las cuales se realizó la clasificación supervisada y luego el análisis multitemporal.

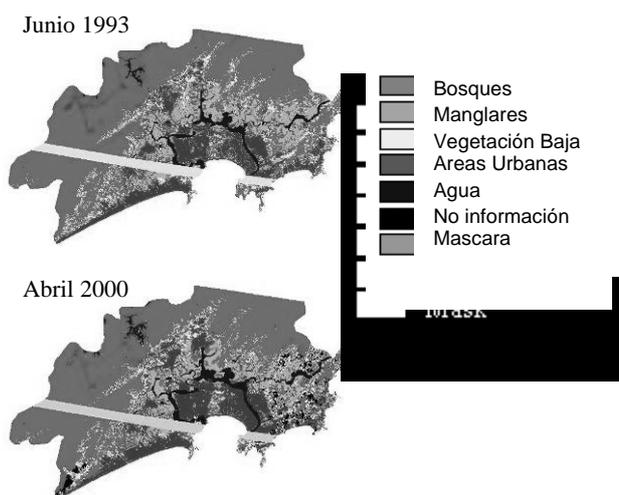
Los porcentajes de confiabilidad de las imágenes clasificadas fueron bastante altos obteniendo para el año 1993 un 80% y para el 2000 un 91%, lo que garantiza óptimos resultados en análisis posteriores.

La imagen de 1993 presentaba un defecto debido a un mal funcionamiento del satélite, el cual fue corregido mediante el enmascaramiento de la zona afectada. El mismo procedimiento se realizó en la imagen del 2000 a pesar que esta no presentaba ningún desperfecto, sin embargo como el análisis multitemporal se basa en una comparación pixel a pixel de las dos imágenes, este procedimiento es necesario para evitar errores en el análisis.

La Figura 1 muestra los resultados de la clasificación supervisada de las dos imágenes.

Figura 1. Mapas de clasificación final usados para el análisis multitemporal.

2.2. Análisis multitemporal y multicriterio



El uso de un software especializado fue necesario para realizar el análisis multitemporal entre las dos imágenes [8]. En este caso se utilizó Idrisi Andes [9], el cual en base a una serie de parámetros: restricciones y factores, realiza una evaluación de multi-criterios [10] para lo cual aplica principios de algebra booleana y una combinación lineal de pesos. El primero (restricciones) implica criterios de

afirmaciones lógicas de adaptabilidad combinados por operadores como intersección (Y) o de unión (O). El segundo (factores) encierra criterios estandarizados a un rango numérico y luego combinados por el promedio de sus pesos, este concepto fue utilizado para dar flexibilidad a la aplicación de cada criterio.

La herramienta principal que utiliza este software es el análisis SIG [11], que proporciona diferentes alternativas que hacen referencia a una extensa base de datos que va suministrando el usuario conforme avanza en el proceso de evaluación y la creación de una serie de variables que se van generando en cada uno de los pasos del proceso. Mediante la aplicación de funciones fuzzy y evaluaciones de multicriterio (EMC) [12] se obtienen una serie de mapas y de tablas que son generadas mediante la contribución de “factores” y “restricciones” que definen que tan apropiado será el uso de suelos que se dará a un área determinada en la cual se piensa llevar a cabo un desarrollo de cierto tipo o continuar con uno ya existente.

2.3. Factores y restricciones

Los factores y restricciones utilizados en el análisis fueron los siguientes: elevación, distancia a las áreas urbanas y carreteras, distancia a cuerpos de agua, pendiente, áreas protegidas y distancia a la costa (Figura 2).

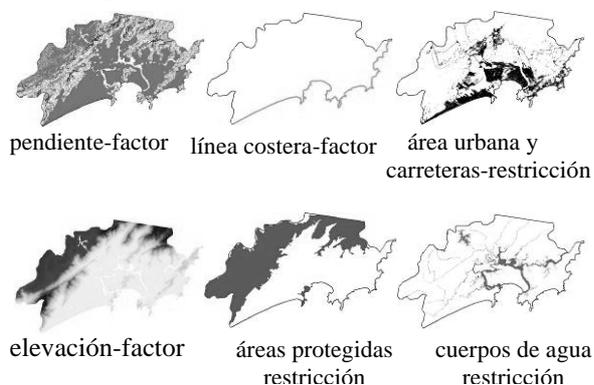


Figura 2. Factores y restricciones usados en la evaluación de multicriterio (EMC).

Estos parámetros son comparados con cada una de las clases previamente seleccionadas (bosque, vegetación baja, manglar, área urbana y agua) y se establecen los criterios de adaptabilidad que indican el mejor y peor escenario para que se desarrolle cada una de las clases.

2.4. Funciones Fuzzy

Todos los factores y restricciones fueron estandarizados utilizando funciones fuzzy de pertenencia [13]. Estas funciones se caracterizan por tener grados de posibilidad entre 0.0 y 1.0, que indican un continuo incremento desde la no-pertenencia hasta la completa pertenencia de un

determinado pixel de las imágenes de satélite a una categoría específica [9].

Las teorías fuzzy proveen la base matemática requerida para la construcción de reglas de decisión en los criterios de evaluación y combinación. El módulo FUZZY en el software IDRISI [9] está diseñado para la construcción de funciones de pertenencia de grupos fuzzy, este ofrece cuatro tipos de funciones: Sigmoidal (forma S), forma J, lineal y definida por el usuario. En este caso se utilizó una función de tipo sigmoidal, siendo esta la más común de las funciones fuzzy. Este procedimiento redefine la distancia de los objetos (factores) en un rango de distancia no-regular. Las preferencias con respecto a la vecindad de un pixel fueron utilizadas entre un cierto grupo de pixeles asociados y una nueva distribución de pixeles fue definida según las funciones de pertenencia de los grupos fuzzy [13].

La aplicación de las funciones fuzzy a los diferentes factores y restricciones dan como resultado una serie de mapas donde se distinguen las áreas mas apropiadas para que el píxel de una determinada categoría tenga mas posibilidades de desarrollarse.

2.3. Combinaciones lineales de pesos

Dos de los procedimientos más comunes para la evaluación de multi-criterios son: combinación lineal de pesos y análisis de concordancia-discordancia [11]. En general, para factores continuos, como en este caso, la combinación lineal de pesos es la mejor opción [10]. En este caso los factores son combinados aplicando pesos a cada uno de ellos y luego sumando todos los resultados para dar lugar a un mapa que indica los lugares más adecuados (S) para cada categoría basándose en sus características (factores y restricciones).

El principio matemático en el cual se basa esta operación se describe a continuación.

$$S = \left(\sum WiXi \right) * \prod Ci$$

Donde:

S = grado de adaptabilidad

Wi = factor de peso i

Xi = criterio de puntuación del factor i

Ci = criterio de puntuación de las restricciones

∑ = suma

∏ = producto

A través de una herramienta de análisis SIG se realizan una serie de comparaciones [11] de la relativa importancia de los factores para la adaptabilidad de los pixeles a un determinado uso de suelos. Este proceso de derivación de pesos consiste el mayor reto, ya que una serie de criterios tienen que ser tomados en consideración.

Los pesos son calculados para indicar hasta que punto un factor o restricción es más importante que otro para la adaptabilidad de cada clase. Por ejemplo, para los bosques el criterio más importante para su adaptabilidad es la pendiente, ya que a mayor pendiente existe mayor probabilidad para el desarrollo y conservación de los bosques; seguido por la actividad urbana debido a la presión que ejerce la parte antrópica sobre la conservación y desarrollo de los bosques. Para los manglares los criterios cruciales son la pendiente y elevación, ya que estos ecosistemas se desarrollan en pendientes suaves y a elevaciones bajas.

2.5. Evaluación de multi-criterios (EMC)

La característica más importante en la evaluación de multicriterios [12] consiste en como combinar la información de diversos criterios para formar un índice de evaluación único. Con el fin de obtener este índice único, se realizaron una serie de intentos para crear mapas de adaptabilidad para cada una de las clases analizadas, insertando efectos interactivos de los factores y restricciones contribuyentes previamente procesadas.

Luego mediante el uso de análisis SIG, se usaron los archivos que contenían los pesos de cada factor y se realizaron una serie de mapas de adaptabilidad [11]. Los mapas de adaptabilidad son creados mediante la multiplicación de los factores por cada uno de sus pesos, sumando los resultados y posteriormente multiplicando el resultado con operaciones booleanas con cada una de las restricciones, las cuales sirven para excluir áreas, ya sea porque son consideradas áreas de reserva o protegidas o simplemente porque están ya ocupadas por asentamientos urbanos establecidos.

Los mapas de adaptabilidad (Figura 3) indican la sensibilidad de un área para desarrollar o mantener una determinada clase (bosques, manglares, vegetación baja y zonas urbanas). Una vez que se obtienen los mapas de adaptabilidad, el análisis para determinar cambios en el uso de suelos entre 1993 y el 2000 puede llevarse a cabo, al igual que la

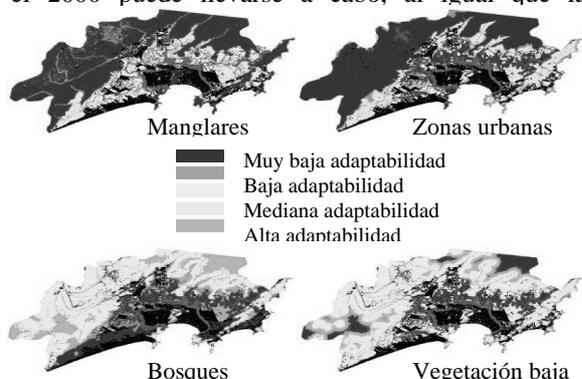


Figura 3. Mapas de adaptabilidad creados por EMC que indican el grado de susceptibilidad de cada píxel para albergar las clases analizadas.

Los mapas de adaptabilidad enfatizan los criterios aplicados a cada uno de los factores y restricciones de las clases analizadas. Por ejemplo, en los mapas de adaptabilidad de bosques se muestra que las áreas de mayor adaptabilidad serían aquellas elevadas, pendientes pronunciadas y distantes de zonas urbanas.

2.6. Predicción de uso de suelos y escenarios de cambio potencial

Para la predicción de un determinado cambio se utilizaron procesos marcovianos, los cuales pueden predecir el estado de un sistema en un tiempo 2 basados en el estado del sistema en un tiempo 1 [12]. Estos procesos generan matrices que indican la probabilidad de transición de cada clase de cobertura a convertirse en otro tipo de cobertura.

La Tabla 1 representa la matriz de probabilidad de transición a partir de la cual es posible determinar la probabilidad de que una clase se convierta en otra. De la Tabla 1 se puede decir que un gran porcentaje de cada clase tiene bajas probabilidades de cambio entre 1993 y el 2000, exceptuando la vegetación baja que indica que solo un 24.51% de su área tiene probabilidades de conservarse intacta. Los valores en negritas indican el porcentaje de la clase que permanece igual.

Tabla 1. Matriz de transición de probabilidad de la cobertura de suelos 2000 (columnas) vs cobertura de suelos 1993 (filas) expresada en porcentajes.

	M %	AU %	VB %	A %	B %
M	68.36	1.35	0.66	15.98	13.65
AU	2.33	70.46	11.63	1.85	13.73
VB	2.98	25.63	24.51	1.09	45.79
A	1.56	1.75	0.47	95.76	0.45
B	1.5	3.35	8	0.88	86.27

M=Manglar; AU=Áreas urbanas; VB=Vegetación baja; A=Agua; B=Bosques

2.7. Autonomía de celdas/Cadenas de Markov

Se trata de un procedimiento combinado que añade un elemento de contigüidad espacial así como de conocimiento de probabilidad de las transiciones de distribución espacial al análisis de cambio Marcoviano [8]. Una de las bases de los elementos espaciales que define la dinámica de muchos de los eventos de cambio es la proximidad: las áreas tendrán una mayor tendencia de cambio hacia una clase cuando estas se encuentran cerca de áreas de la misma clase (i.e. fenómeno de expansión). Este fenómeno puede ser efectivamente modelado usando el principio de autonomía de celdas.

La autonomía de celdas es una entidad de celdas que varía independientemente su estado, basándose

en su estado previo y sus celdas vecinas de acuerdo a reglas específicas [10]. Existe una similitud de este proceso con el Marcoviano, la única diferencia es la aplicación de una regla de transición que depende no solo de su estado previo pero también del estado de su vecino local.

3. Resultados del cambio de suelos

El procedimiento de autonomía de celdas utilizado para la predicción en cambio de suelos fue implementado mediante herramientas analíticas del software IDRISI contenidas en el módulo: "GIS Analysis/Change-Time Series/CA_Markov". La función CA_Markov toma como input: el mapa de uso de suelos sobre el cual se realizarán los cambios proyectados (2000), el archivo que contiene las áreas de transición producidas por el análisis Marcoviano y por último el grupo de mapas de adaptabilidad resultado de la EMC.

Finalmente se continúa con un proceso iterativo de reubicación de uso de suelos hasta que coincida con los resultados totales proyectados por el análisis Marcoviano.

El resultado es un mapa proyectado de uso de suelos basado en el principio que los cambios se desarrollan como un proceso de crecimiento en áreas de gran adaptabilidad próximas a las áreas ya existentes [9].

3.1. Cambio en el uso de suelos 1993-2000

Una vez que se aplicaron los criterios previamente descritos, se obtuvo como resultado dos mapas que evidencian los cambios en cobertura de suelos: el primero un mapa da cambios en cobertura de suelos entre 1993 y el 2000 (Figura 4) [14] y el segundo un mapa indicando los cambios entre el 2000 y el mapa proyectado del 2010 (Figura 5).

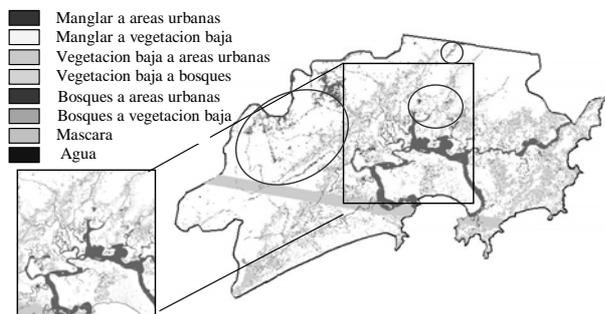


Figura 4. Mapa de cobertura de suelos evidenciando los cambios en vegetación ocurridos entre 1993 y 2000. Las áreas encerradas indican deforestación.

3.2. Proyección de uso de suelos para el 2010

La proyección de usos de suelos para el 2010 resulta una fuente importante para el modelamiento

ambiental y procesos de toma de decisiones [8]. La validez y credibilidad de estas proyecciones depende exclusivamente de la calidad de información de entrada, refiriéndonos a las imágenes clasificadas (Figura 1). Mientras mejor sea la calidad de las fuentes de información, más precisas serán las proyecciones.

En la figura 5 se puede apreciar cual será el uso de suelos para el 2010. Se observa que en el 2010 varias hectáreas de bosque se habrán transformado en vegetación baja, lo cual debería tomarse en consideración para tomar las medidas ambientales necesarias y evitar esta pérdida de bosques en el futuro lo cual aumentaría el riesgo de erosión en el área [15]. Para el 2010 se mantienen las mismas tendencias de cambio observadas entre 1993 y el 2000.

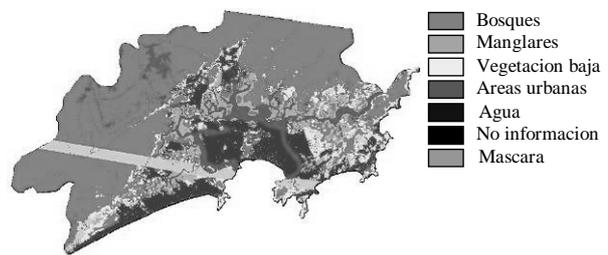


Figura 5. Mapa de la proyección de cobertura de suelos para el 2010.

La Tabla 2 indica la probabilidad de cambio de una clase a otra entre el 2000 y el 2010.

Tabla 2. Matriz de probabilidades (%) de cambio entre la cobertura de suelos proyectada para 2010 (columnas) y cobertura del 2000 (filas).

	M %	AU %	VB %	A %	B %
M	83.85	0.13	0.68	16.30	1.28
AU	3.12	96.09	3.40	3.98	0.99
VB	3.12	2.78	59.67	1.23	5.30
A	1.17	0.14	0.22	71.43	0.04
B	8.74	0.85	36.03	7.06	92.39

M=Manglar; AU=Áreas urbanas; VB=Vegetación baja; A=Agua; B=Bosques

De la tabla 2 es posible decir que la mayor parte de las clases se mantendrán iguales sin ser alteradas por ningún tipo de cambio en su cobertura de suelos. Los valores en negritas indican el porcentaje de cada área que se mantendrá sin cambios. Comparando las tablas 1 y 2 se observa que en la tabla 2 los porcentajes de las áreas que permanecen inalteradas son más elevados que en la tabla 1, lo cual se podría deber al incremento de medidas y leyes para la protección ambiental [16]. Estas cifras son bastante alentadoras ya que evidencian una mejora en las condiciones ambientales del área de estudio, Santos.

3.3. Cambio en el uso de suelos 2000-2010

En base a los resultados y mapa del 2010 obtenidos mediante análisis Marcoviano, se realizó un análisis de los cambios en el uso de suelos que se esperarían para el 2010. La figura 6 resume los principales cambios en el uso de suelos que se esperan entre el 2000 y 2010.

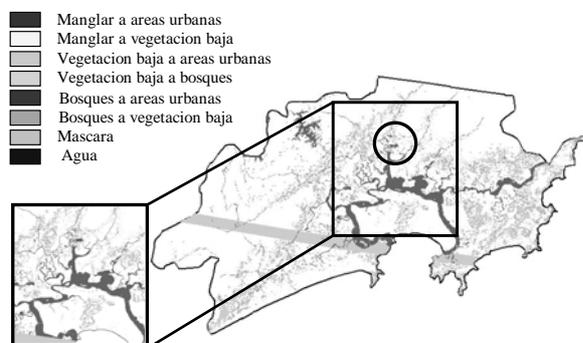


Figura 6. Mapa de uso de suelos evidenciando cambios en cobertura vegetal esperados entre 2000 y 2010. Las áreas encerradas indican deforestación.

Se observa para el 2010 una disminución de áreas de bosque convertidas en asentamientos urbanos [10], lo cual es positivo, sin embargo, se evidencia que los bosques tendrán mayor tendencia a convertirse en vegetación baja para el 2010 [17], que sigue siendo preocupante desde el punto de vista ambiental. Esta situación se considera crítica refiriéndose a la degradación de suelos y al impacto ambiental que sufrirían muchas especies tanto de animales como plantas que tienen su hábitat principal en estos bosques [18][19][20][21][22].

La deforestación de *Mata Atlântica* tiene también efectos graves en la calidad del agua [23] y estabilidad del suelo, ya que los suelos desprovistos de cobertura vegetal pierden su estabilidad natural y su protección contra efectos de erosión, volviéndolos más vulnerables a eventos severos de pérdida de suelos ya sea por lluvias intensas, que caracterizan la zona o por actividades antropogénicas [24].

La figura 7 muestra de forma clara y completa las tendencias de cambios en uso de suelos entre 1993, 2000 y el 2010.

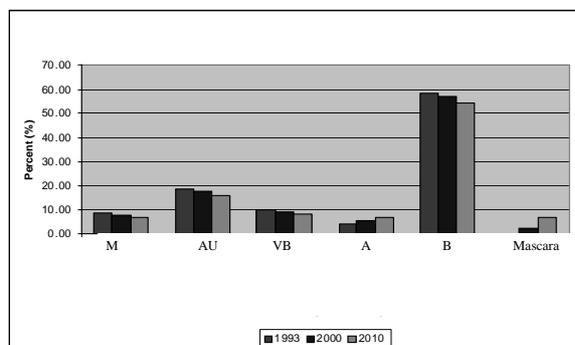


Figura 7. Diferencias en la cobertura de suelos de las clases seleccionadas entre 1993, 2000 y 2010.

4. Conclusiones

Mediante los análisis descritos anteriormente y la utilización de herramientas como SIG e imágenes de satélite que facilitaron enormemente el proceso analítico se puede concluir lo siguiente:

Es evidente cierto grado de cambio en lo que respecta la cobertura de suelos en el área de Santos entre 1993 y el 2000, principalmente en la vegetación.

El análisis fue enfocado a cambios en vegetación, especialmente bosques y manglares convertidos a zonas urbanas o vegetación baja, ya que estos tipos de vegetación son considerados los ecosistemas más representativos existentes en el área de estudio de Santos.

En base al análisis multitemporal aplicado a las dos imágenes Landsat y la aplicación de técnicas SIG se define las áreas que han sido transformadas y en que se han convertido. Estos análisis proporcionan una idea clara de donde se encuentran ubicadas las áreas más amenazadas y vulnerables debido a la acción antropogénica, en especial la deforestación y urbanización.

La aplicación de EMC constituyó una herramienta importante para el éxito de las evaluaciones, ya que permite la combinación e integración de diversos criterios, que son previamente seleccionados y que representan las características principales del área de estudio.

Los procesos utilizados y los resultados obtenidos constituyen la base para predicciones futuras. Mediante el análisis EMC fue posible determinar las áreas más adaptables a un cierto tipo de desarrollo de suelos en el 2010. De esta manera se da al usuario la posibilidad de predecir cual podría ser el escenario de Santos en el futuro.

Estos análisis son útiles en la creación y propuesta de planes de desarrollo, dando a las autoridades y planificadores locales una fuente invaluable, un escenario futuro, que les permite tomar decisiones basados en el escenario presente proyectado en el tiempo. De esta manera logran visualizar cuales serian las consecuencias y efectos de las actividades actuales.

Estas herramientas y análisis facilitan la creación de medidas preventivas con el fin de mantener las actividades antropogénicas dentro de un control razonable.

5. Referencias

- [1] Silva, S., 1999. Diagnóstico das restingas do Brasil. In: Fundação Bio Rio (ed.). Workshop Avaliação e Ações Prioritárias Para a Conservação da Biodiversidade da Zona Costeira, Ilhéus. <http://www.bdt.org>.
- [2] SOS MATA ATLÂNTICA. 1998. Atlas da evolução dos remanescentes florestais e ecossistemas

associados no domínio da Mata Atlântica no período 1990-1995. Fundação SOS Mata Atlântica, Instituto Socioambiental e Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São Paulo

[3] Silva, J.M. C. 1998. Um método para o estabelecimento de áreas prioritárias para a conservação na Amazônia Legal. Reporte preparado para WWF-Brasil. 17 pp.

[4] Rao, L., Kiran, N., Srivastava, N., y Singh, A., 1998. Development of a GIS based application for selection of villages for sodic land reclamation. GIS development.net, Application and Natural Hazard Management. En: <http://www.gisdevelopment.net>

[5] EMBRAPORT, 2003. Estudo de Impacto Ambiental, Empresa Brasileira de Terminais Portuários S.A (EMBRAPORT). Diagnóstico Ambiental nas Areas de Influência: Meio Físico, Vol. II, Capítulo 8.

[6] ENVI, 2003. ENVI User's Guide. ENVI Version 4.0. Research Systems Inc.(RSI). Septiembre, 2003 Edición. 563-564 pp.

[7] Richards, J., 1999. Remote Sensing Digital Image Analysis. Springer-Verlag, Berlin, 240-242 pp.

[8] Ghribi, M., 2005. GIS applications for monitoring environmental change and supporting decision making in developing countries. Publicación ICS-UNIDO.

[9] Eastman, J., 2001. IDRISI for Windows, version IDRISI32, release 2. Guide to GIS and Image Processing. Graduate School of Geography, Clark University, Worcester, USA. Vol. 1 y 2.

[10] Voogd, H. Multicriteria Evaluation for Urban and Regional Planning. Pion, Ltd., London, 1983, pp. 120.

[11] Carver, S., 1991. Integrating Multi-Criteria Evaluation with Geographical Information Systems, International Journal of Geographical Information Systems 5(3): 321 – 339 pp.

[12] Eastman, J., Jin, W., Kyem, P., y Toledano, J., Raster procedures for multicriteria/multiobjective decisions. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1995, 61 (5), pp. 539 – 547.

[13] Altman D., 1994. Fuzzy set theoretic approaches for handling imprecision in spatial analysis. International Journal of Geographical Information Systems, 8(3): 271-289 pp.

[14] CETEC, 1999. Ministerio de Agricultura: Mapa de suelos del Estado de São Paulo, 1960, Escala 1:500 000.

[15] Cerri, C., Ballester, M., Martinelli, L., Vettorazzi, C., 1998. Mapas de risco à erosão do solo na Bacia do Rio Piraciabá, utilizando técnicas de geoprocessamento. Anais IX Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Santos, Brasil, 11 – 18 Setembro, INPE, 513-523 pp.

[16] CONAMA, 2002. Environmental Laws for protection of natural ecosystems in Brazil. The National Environmental Council (Brazil).

[17] SOS MATA ATLÂNTICA. 1998. Atlas da evolução dos remanescentes florestais e ecossistemas associados no domínio da Mata Atlântica no período 1990-1995. Fundação SOS Mata Atlântica, Instituto Socioambiental e Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São Paulo.

[18] Silva, J.M.C., and A. Dinnouti. 1999. Análise de representatividade das unidades de conservação federais de uso indireto na Floresta Atlântica e Campos Sulinos. In: Conservation International, editor, Workshop Avaliação e Ações Prioritárias para Conservação dos Biomas Floresta Atlântica e Campos Sulinos, São Paulo. En: <http://www.conservation.org>.

[19] Silva, A. F., y H.F. Leitão Filho. 1982. Composição florística e estrutura de um trecho da Mata Atlântica de encosta no Município de Ubatuba (São Paulo, Brasil). Revista Brasileira de Botânica 5: 43-52 pp.

[20] Radambrasil, 1983. Projeto Radambrasil: levantamento de recursos naturais. IBGE, Rio de Janeiro. Vol. 32.

[21] Mantovani, W. 1993. Estrutura e dinâmica da floresta Atlântica na Juréia, Iguape-SP. Tese de Livre Docência. Universidade de São Paulo, São Paulo.

[22] Pontes, A. F. 2000. Levantamento florístico da Mata da AMEM, Cabedelo, Paraíba, Brasil. Monografia de Graduação. Universidade Federal da Paraíba, Recife.

[23] Procop, 2001. Sistema Estuarino de Santos e São Vicente. Governo do Estado de São Paulo, Secretaria de Estado do Meio Ambiente, CETESB, Diretoria de Controle da Poluição, Diretoria de Desenvolvimento e Transferência de Tecnologia, Diretoria de Recursos Hídricos e Engenharia Ambiental, Programa de Control de Poluição (Procop), Programa de Assistência Técnica, 4-142 pp.

[24] Pla, I., 2003. Erosion research in Latin America. En: D. Gabriels and W. Cornelis (Editors), In: 25 years of assessment of erosion.